

Best Practice Guidance for Effective Methane
Drainage and Use in Coal Mines
Second Edition December 2016

煤矿瓦斯有效抽采与利用 最佳实践指南 (2018)

联合国欧洲经济委员会 著
山西焦煤集团公司 组织编译



 煤炭工业出版社

煤矿瓦斯有效抽采与利用 最佳实践指南

(2018)

联合国欧洲经济委员会 著
山西焦煤集团公司 组织编译

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

TITLE: Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines

BY: United Nations

Copyright

© 2016 United Nations for the English edition

© 2018 United Nations for the Chinese edition

Allrights reserved worldwide

The work is published for and on behalf of the United Nations.

The present work is an unofficial translation for which the party being authorized (Shanxi Coking Coal Group Ltd. ,) accepts full responsibility

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南. 2018/联合国欧洲经济委员会著; 山西焦煤集团公司组织编译. --北京: 煤炭工业出版社, 2019
ISBN 978 - 7 - 5020 - 7158 - 5

I. ①煤… II. ①联… ②山… III. ①煤矿—瓦斯抽放—指南 ②煤矿—瓦斯利用—指南 IV. ①TD712 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 030277 号

煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南 (2018)

著 者 联合国欧洲经济委员会
组织编译 山西焦煤集团公司
责任编辑 赵金园
责任校对 陈 慧
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室) 010 - 84657880 (读者服务部)
网 址 www. cciph. com. cn
印 刷 太原理工大学印刷厂
经 销 全国新华书店

开 本 710mm × 1000mm¹/₁₆ 印张 8¹/₄ 字数 126 千字
版 次 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷
社内编号 20181699 定价 40.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

编译委员会

主 任 金智新

副 主 任 侯水云 申晋鸣

主 审 侯水云

技术顾问 (按姓氏笔画排序)

王永文 王振福 刘云虎 苏士龙 李民族

李进朋 杨彦群 贺志宏 贾庆荣 梁椿豪

编 译 刘艳红 刘效林 赵晋华 皮振林 蒋 璋

序

一、本书概要

《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南(2018)》(以下简称《最佳实践》),是联合国瓦斯专家委员会专家团队集体智慧的结晶。该书的出版,旨在帮助联合国会员国在煤炭生产活动中,更好地认识瓦斯、治理瓦斯、利用瓦斯,更好地提升煤矿安全水平,减少温室气体排放,提高煤矿经济效益。

联合国瓦斯专家团队深入研究了煤矿瓦斯的特性,开发和研究了全球领先的瓦斯治理利用理念和实践案例,收集筛选了过去四十年中,特别是近十几年中全球瓦斯抽采和利用的典型案列,形成了“最佳实践”的第一版。2016年英文版第二次修订出版,受到各国业界广泛欢迎。目前,本书的波兰语和印度尼西亚语版本已由公益机构翻译出版。

本次《最佳实践》中文版的翻译出版,填补了国内空白,对促进中国乃至全球华语地区煤矿开采领域的整体安全水平提高、瓦斯抽采和利用水平提升,都具有积极的现实指导意义。

需要指出的是,《最佳实践》对过去几十年中全球瓦斯治理和利用经验进行了规范性的总结,既有理论阐述,又有实践介绍,但《最佳实践》不是死板的“教科书”,而是基于大量实践性操作的、浅显易懂的从业人员“工具参考书”。随着人类对地球物理、自然生态的不断深入了解和煤矿工程建设管理水平的不断提升,《最佳实践》在未来将得到进一步丰富和发展。

二、出版背景

“联合国煤矿瓦斯特设专家委员会”是联合国可持续能源委员会

的附属机构，最早成立于2004年12月，自2014年起该机构更名为“联合国煤矿瓦斯专家委员会”，该委员会的任务是“开展具体的、以结果为导向的活动，通过回收和利用瓦斯，促进煤矿温室气体排放的减少”。

由于各国的煤矿瓦斯管理经验差异很大，全球性的智慧和经验的交流至关重要。2011年，联合国经济及社会理事会敦促联合国会员国、国际组织和各区域委员会采取适当措施，确保《最佳实践》在全球范围内得以应用。

中国的煤矿瓦斯抽采和利用实践，是世界能源领域革命的重要组成部分，中国煤矿从业者学习借鉴全人类瓦斯治理利用经验，开展相关研究实践，是自身发展的需要，也是对人类的重要贡献。

中国是煤炭生产大国，对煤矿瓦斯有着深刻且不断发展的认识。长久以来，人们都认为瓦斯是有害气体，是煤矿安全生产的第一杀手。明代（1637年）《天工开物》中已经记载，瓦斯是一种与煤炭伴生的“毒烟气”，并介绍了利用中空竹竿排放瓦斯的方法。辽宁工程大学对2008—2013年6年间的中国矿难进行过统计，数据显示，虽然煤矿事故逐年减少，在发生的时间、地域分布存在不均衡性，但瓦斯相关事故仍然是煤矿的首发事故。

20世纪以来，人们逐步认识到，瓦斯同时也是一种重要的温室气体，更是一种洁净、优质的能源，我们应当减少排放，同时对瓦斯加以利用。作为煤炭大国，中国的煤层气资源非常丰富，权威机构评估，中国仅2000m以内的浅层煤层气，就达到 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。中国工程院袁亮院士提出了“煤与瓦斯共采”等系列理论，瓦斯治理和抽采利用进入了一个新的阶段。


1992年《联合国气候变化框架公约》和1997年《京都协议书》签订后，碳金融在世界范围内逐步发展起来。利用或摧毁煤矿瓦斯产生相应的碳减排量，作为一种无形资产用于交易、抵押和融资，同时

也是碳金融体系中碳币、碳汇的一种表现形式。据世界银行推算，到2020年，全球碳排放权交易总额有望达到3.5万亿美元，将超过石油市场成为第一大能源和环境权益类衍生品市场。2009年以来，中国注册成功的清洁发展机制（CDM）项目数、项目产生的预期年减排量和获EB签发的核证减排量（CERS）均居世界第一，随着碳排放权交易市场的逐步建立，中国已成为全球碳排放交易第一大国。这其中，包括山西焦煤集团在内的一大批中国煤炭企业集团，长期致力于瓦斯治理与利用，作出了自己应有的贡献。

三、特别鸣谢

借此机会，谨向联合国出版委员会表示感谢，向联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯专家委员会主席雷蒙·皮尔彻（Raymond C. Pilcher）先生、全球甲烷倡议煤炭委员会联席主席菲利希亚·安露易兹（Felicía A. Ruiz）女士、联合国煤矿瓦斯专家委员会秘书长迈克尔·德拉比克（Michal Drabik）先生表示感谢，向本书原创团队的各位专家表示敬意！向组织和参与中文版翻译创作的各位专家学者的公益奉献表示敬意！

中国工程院院士
联合国煤矿瓦斯专家委员会副主席

签名：

2018年12月
中国太原

修 订 说 明

本书第一版于2010年2月出版。过程是：先由筹划指导委员会构思，提出总的方向和总体构想，然后由技术专家组起草初稿，该技术专家组由五名全球知名的可再生能源领域、井下通风领域和煤矿瓦斯抽采技术领域的技术专家组成。初稿在正式提交技术同行审阅之前，最先被利益相关者的顾问小组审阅，以确保书中（传递的）信息对于高级决策者来说清晰而且有效。最佳实践指南2010年初稿和2010年第一次修订稿的创作者们自愿抽出时间和精力并且乐于为促进煤炭安全开采作出贡献。

2016年更新版本遵循了上述程序：由专家组组成执行指导委员会，由志愿者组成技术专家修订起草小组，利益相关者顾问小组也作出了重要贡献，审查了该文件的内容，并对坚持的有关原则作出了解释。

2016年第一次修订版维持了原有的结构，更新了内容，同时增加了案例研究以拓展最佳实践原则应用的范围。2016年第二次修订包括以下内容：

- 小部分编辑改动和对少量印刷错误的校正。
- 适当更新了参考文献。
- 对现有主题中需要额外解释的部分或例子进行编辑，帮助改善理解。
- 增加了露天煤矿和废弃井下煤矿的瓦斯管理部分。
- 根据碳排放市场2010年以来的变化情况，更新了瓦斯采集和利用项目中成本内容，对环境相关的商品市场的讨论内容进行了部分修订。

- 更新了已有案例，增加了部分新的案例。
- 对2010年以来发生重大进展的有关内容进行了更新。联合国欧洲经济委员会和全球甲烷行动倡议组织的目标是，使这个文件成为“活的”文件，即根据动态环境的变化定期更新，以便于及时反映能源产业运行状况和全球气候体系的演变。

对《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南》 第二版（2016年10月）作出贡献的人员

执行指导委员会

Felicia A. Ruiz, 联席主席, 全球甲烷行动倡议组织煤炭委员会

Clark Talkington, 副主席, 煤矿瓦斯专家组

Jacek Skiba, 副主席, 煤矿瓦斯专家组

技术专家修订起草小组

David Creedy, 辛迪克可持续资源

Raymond C. Pilcher, Raven Ridge 资源

Michael Cote, Ruby Canyon 红宝石峡谷工程

Richard Mattus, RM 商务顾问

顾问小组

Bharath Belle, 英美冶金煤（澳大利亚/南非）

Yuriy Bobrov, 顿巴斯矿区协会（乌克兰）

Martin Hahn, 国际劳工组织

Özgen Karacan, 美国国家职业安全与健康研究所

Sergei Shumkov, 能源部（俄罗斯联邦）

Shekhar Saran, 中央矿山规划设计院（印度）

Hu Yuhong, 国家安全生产监督管理总局（中国）

Bharath Belle, 英美冶金煤（澳大利亚/南非）

对《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南》 第一版（2010年2月）作出贡献的人员

执行指导委员会

Pamela Franklin, 联席主席, M2M 煤炭委员会

Roland Mader, 副主席, 联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯特设专家组

Raymond C. Pilcher, 主席, 联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯专家组

Carlotta Segre, 秘书, 联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯专家组

Clark Talkington, 前任秘书, 联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯专家组

技术专家修订起草小组

Bharathe Belle, 英美冶金煤 (澳大利亚/南非)

David Creedy, 辛迪克碳资本有限公司

Erwin Kunz, DMT 股份有限公司

Mike Pitts, 绿色瓦斯国际

Hilmar von Schoenfeldt, HVS 顾问

顾问小组

Yuriy Bobrov, Donbass 矿区协会 (乌克兰)

Graeme Hancock, 世界银行

Martin Hahn, 国际劳工组织

Hu Yuhong, 国家安全生产监督管理总局 (中国)

Sergei Shumkov, 能源部 (俄罗斯联邦)

Ashok Singh, 中央矿山规划设计院 (印度)

Luke Warren, 世界煤炭研究所 (英国)

技术同行小组

John Carras, 共同财富英联邦科学和工业研究组织 (澳大利亚)

Hua Guo, 共同财富英联邦科学和工业研究组织 (澳大利亚)

Li Guojun, 铁法煤业有限公司 (中国)

Glyn Pierce Jones, 特罗克斯公司 (英国)

B. N. Prasad, 中央矿山规划设计院 (印度)

Ralph Schlueter, DMT 股份有限公司 (德国)

Karl Schultz, 绿色瓦斯国际 (英国)

Jacek Skiba, 卡托维兹中央矿业研究所 (波兰)

Trevor Stay, 英美冶金煤 (澳大利亚)

Oleg Tailakov, 国际煤炭与瓦斯研究中心, Uglemetan (俄罗斯联邦)

前 言

过去的两个世纪里，煤炭一直是全球一次能源的重要来源，并且在未来的几十年中，煤炭将依然是全球能源结构中的重要组成部分。如果离开煤炭资源，联合国（确定）的（可持续）发展目标将不可能实现。这样说绝对不是削弱可再生能源或其他低碳战略的重要性，但对于煤炭资源，（我们）确实应该有一个切实的认识，即在可预见的未来，煤炭将依然是许多国家能源安全的核心，并将在全球范围内，在消除能源贫困方面继续发挥着重要作用。

既然认识到煤炭的大规模生产在未来一段时期仍将持续下去，那么我们就必须认识到在煤炭开采过程中释放出的瓦斯对健康、安全以及环境的影响。全球范围内，许多井工矿井中的瓦斯对工作环境的安全造成威胁，甚至导致了許多恶性事故的发生，产生让人难以接受的后果。瓦斯也是一种温室气体（GHG），最近的研究表明，瓦斯对大气层的影响远大于早期的设想。煤矿开采是瓦斯排放的第四大来源，仅次于石油和天然气开采、垃圾填埋以及畜牧业所释放的瓦斯量。

在化石燃料转化（成能源）的过程中，如何减少因煤炭生产而产生的环境影响是至关重要的。在整个煤矿生命周期中，如何确保瓦斯的安全开采、安全运输以及安全利用是工作的关键。安全开采瓦斯可以避免矿工不必要的伤亡，而瓦斯的有效利用和火炬燃烧给采矿周边综合社区提供了一种承担得起的清洁燃料。技术进步使瓦斯排放显著降低成为可能，即使是在高瓦斯矿井。尽管如此，为实现瓦斯相关事故近零伤亡以及降低瓦斯向大气排放的最终目标而（采取的）技术推

广活动依然没有普遍实现，并且（此类推广活动）可能由于缺乏对煤矿瓦斯抽采和利用的指导原则的重视而受到阻碍。企业高层、政府和财务决策者在执行最佳实践的决策中发挥着不可或缺的作用，本书作为现有技术的补充，旨在为他们提供可行的高级别指导。

《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南》填补了一项重要空白，简明扼要地阐述了煤矿瓦斯（CMM）采集和利用的推荐原则和标准，为决策者提供了一个坚实的依据，从而指导政策制定和商业决策。书中知识内容对实现零伤亡和零爆炸的目标至关重要，同时有利于最大限度地降低与煤炭相关的瓦斯排放对环境的影响。

本书还可供学生和技术专家使用，作为瓦斯管理的主要原则和参考资料。

无论是在某个国家还是在国际上，《最佳实践》不会取代或替代法律法规或其他具有法律约束力的文件。本书概述的原则旨在提供指导，以对现有法律和监管框架提供补充，并且支持在行业实践和监管持续进步中开发更安全、更高效的做法。虽然《最佳实践》强调以绩效和原则为基础的监管方案，但（使用者）也可以另行补充更多的规定性制度，并最终过渡到以绩效为基础。

鉴于近期发生的事故，也为了悼念过去所有的伤亡人员，无论是2010年版还是2016年版的作者，都希望他们所做的工作能够有助于提高采煤作业的安全性。

Raymond C. Pilcher

联合国欧洲经济委员会煤矿瓦斯专家委员会主席

Felicia A. Ruiz

全球甲烷倡议煤炭委员会联席主席

2016年12月



目 录

综述	1
1 绪论	7
1.1 本书的目的	7
1.2 问题	8
1.3 瓦斯抽采、捕捉、利用和减排	10
2 瓦斯治理的基础	12
2.1 煤矿瓦斯治理的目标	12
2.2 瓦斯灾害的发生	12
2.3 降低爆炸风险	15
2.4 监管和管理原则	16
3 煤矿瓦斯涌出的发生、释放与预测	19
3.1 引言	19
3.2 煤层瓦斯赋存	19
3.3 瓦斯气体释放过程	20
3.4 煤矿瓦斯相对含量	21
3.5 认识煤矿瓦斯的涌出特征	21
3.6 煤的原位瓦斯含量的测定	22
3.7 煤矿瓦斯流量的实用估计	24
4 矿井通风	25
4.1 通风的挑战	25
4.2 通风设计的主要特征	26
4.3 高瓦斯工作面的通风	26
4.4 通风系统对供电的要求	29



4.5	煤矿掘进巷道的通风	30
4.6	通风风流监测	30
4.7	通风控制	31
5	瓦斯抽采	32
5.1	瓦斯抽采及其面临的挑战	32
5.2	全球通用的瓦斯抽采的基本原则	32
5.3	预抽采技术基础	33
5.4	后抽采技术基础	35
5.5	瓦斯抽采系统的设计考量	37
5.6	井下瓦斯管道基础设施	38
5.7	瓦斯抽采系统的监测	38
6	瓦斯的利用和减排	40
6.1	煤矿瓦斯与延缓气候变化	40
6.2	作为能源的矿井瓦斯	40
6.3	瓦斯利用的选项	43
6.4	抽采瓦斯的利用和减排	44
6.5	低浓度风排瓦斯 (VAM) 的减排或利用	48
6.6	瓦斯监测	53
6.7	关停和废弃矿井中瓦斯的利用	53
7	成本和经济问题	55
7.1	瓦斯抽采的成本与经济	55
7.2	瓦斯抽采成本的比较	56
7.3	瓦斯利用的成本与经济	57
7.4	碳融资和其他激励措施	60
7.5	瓦斯利用的机会成本	64
7.6	瓦斯利用的环境成本	65
8	为政策制定者提供的结论和总结	66

9 案例研究	69
【案例 1】 高瓦斯、高应力、有自然倾向的后退式长壁开采煤矿，实现 按计划达产（英国）	70
【案例 2】 高瓦斯涌出地区长壁作业的高效生产（德国）	72
【案例 3】 高瓦斯涌出地区长壁作业的高效生产（澳大利亚）	73
【案例 4】 具有高突倾向煤层的安全开采（澳大利亚）	75
【案例 5】 煤矿瓦斯发电与瓦斯减排一体化项目的开发（中国）	76
【案例 6】 三大煤矿瓦斯的减排与利用（中国）	77
【案例 7】 风排瓦斯（VAM）（中国）	81
【案例 8】 风排瓦斯（澳大利亚）	83
【案例 9】 房柱式采煤法爆炸风险的降低（南非）	85
【案例 10】 派克河（Pike River）煤矿的瓦斯爆炸事故（新西兰）	87
附录 1 瓦斯抽采方法比较（摘自 Creedy, 2001）	91
缩略语	96
专业术语表	98
参考文献	100
附加参考资料	103
致谢	105
译者后记	106

图 目 录

图 0-1	现阶段全球煤矿瓦斯利用项目分布	4
图 1-1	井下瓦斯抽采系统和地面煤矿瓦斯回收减排设施 三维示意图	11
图 2-1	甲烷浓度百分比和爆炸区间	13
图 3-1	长壁工作面模型平行剖面图	21
图 3-2	瓦斯含量测定设备（澳大利亚标准）	23
图 4-1	使峰值的瓦斯含量降低至 2% 的风量需求与 瓦斯抽采效率的对应关系	27
图 4-2	传统的 U 型通风系统	27
图 4-3	高瓦斯长壁工作面的通风布局	28
图 4-4	通风电力消耗和风量关系实例	29
图 5-1	从地面开水平钻孔采前预抽采示意图	34
图 5-2	各种采后抽采钻孔方法	36
图 6-1	瓦斯近零排放能源回收优化	41
图 6-2	通过条带矿井的横断面显示定向钻孔的可能位置	42
图 6-3	与露天煤矿规划扩建有关的垂直钻孔剖面示意图	43
图 6-4	全球范围内煤矿瓦斯项目类型的分布	44
图 6-5	由杜尔（DÜRR）公司安装在美国 McElroy 矿的处理风排瓦斯的 三套蓄热式热氧化器装置	51
图 6-6	安装在中国高河煤矿的杜尔（DÜRR）风排瓦斯 （处理）系统	52
图 6-7	废弃高瓦斯矿的瓦斯衰减曲线和瓦斯储量潜力	54
图 7-1	某瓦斯电厂的效能监控系统	58
图 7-2	利用瓦斯发电和燃烧减排	59
图 7-3	煤矿瓦斯发电的双重收益	64
图 9-1	“尾部返回”系统	70
图 9-2	“交互”（高低位抽采）系统	71

图 9-3	高低位钻机	72
图 9-4	Y 型通风系统	73
图 9-5	矿井通风与瓦斯抽采系统布置图	74
图 9-6	在 D 煤矿的煤矿瓦斯电厂第一期	79
图 9-7	在 T 煤矿的火炬燃烧系统	80
图 9-8	风排瓦斯的减排和能源回收在中国实施	82
图 9-9	利用瓦斯发电, 削减风排瓦斯, 回收能源	84
图 9-10	风排瓦斯处理和发电 (WestVAMP)	84
图 9-11	地面设施反映该地区的环境敏感性, 以及建筑物如何与 森林融合	87
图 9-12	在第三次爆炸后的上风竖井发生火灾	89

表 目 录

表 1 - 1	2010 年以后主要煤矿爆炸事故	8
表 2 - 1	瓦斯可燃浓度推荐限值和规定摘选	17
表 6 - 1	煤矿瓦斯利用对比	46
表 7 - 1	采用不同瓦斯抽采方法的吨煤生产成本比较（以 2015 年的 价格计算）	56
表 9 - 1	案例研究目录	69
表 9 - 2	实施计划	78
表 9 - 3	煤矿瓦斯项目效果总结	81
表 9 - 4	在不同条件下，处理能力 250000 Nm ³ /h 的 RTO 装置 可回收的热量	83
表 9 - 5	房柱型矿井瓦斯分层着火危险性评价	85

综 述

自工业革命以来，世界上大部分的初级能源生产都依赖于煤炭资源。在可预见的未来，全球经济的发展仍将继续依赖于煤炭。在当今资源体系中，煤炭大约占全球初级能源的 30%，占全球电力供应的 40%，以及全球钢铁和铝业近 70% 的能源需求。国际能源署（IEA）计划在未来逐步放缓对煤炭的需求；然而，亚洲的新兴经济体，特别是中国和印度依然对煤炭有着大量需求，2013 年全球煤炭生产总量达 7.8×10^9 t（世界煤炭协会）。尽管中国正在试图抑制对煤炭的依赖，至 2019 年全球年需求总量仍可能达到 9×10^9 t（IEA，2014）。

伴随着对煤炭生产的持续依赖，煤炭的开采将越来越具有挑战性。在世界上的许多地方，随着煤炭浅层储量枯竭，不得不进行深层和高瓦斯煤层的开采。然而，公众要求并期望有更加安全的煤炭开采条件，而且需要对煤炭产业进行更加严格的环境管理。煤矿瓦斯抽采与利用的最佳实践对减少与采矿相关的瓦斯爆炸事故至关重要，同时通过减少温室气体（GHG）排放，也有益于保护环境。

煤矿瓦斯给安全和环境带来的挑战

全球煤炭从业者、各国政府、工会和工人安全倡导者都十分关心瓦斯爆炸的频率和严重程度。特别是在新兴经济体，其爆炸频率和严重程度高得令人无法接受。需要向所有国家推广好的采矿实践经验，以确保所有的风险得到专业和高效的管理。即使是在最发达的国家，也没有一座煤矿完全不存在安全隐患。无论采矿地点或采矿条件如何，都存在进一步减少与瓦斯有关的事故和爆炸风险的空间。

空气中如果含有 5% ~15% 的甲烷就有爆炸的可能。或者说，事实上在爆炸下限的 2.5 倍系数（2.0%）和爆炸上限的 2 倍系数（30%）范围内，因为存在着爆炸的风险，通常认为运输、收集或利用该浓度范围内的瓦斯是不可取的。

对煤矿瓦斯风险的有效管理也有助于减少温室气体排放。煤矿是甲烷排放的一个重要来源，而甲烷是潜在的温室气体，其对导致全球变暖（GWP）的潜在影响是二氧化碳的 28 ~34 倍（IPCC 2014）。根据国际气候变化委员会第五次评估报告（IPCC 2014），甲烷占据全球由人类活动产生的温室气体排放总量的

20%，而这其中煤矿开采占据全球甲烷排放总量的8%（USEPA 2012）。基于前文国际能源署对煤炭需求量的预测，煤矿瓦斯排放量将会增加。到2019年，因全球煤矿开采而释放出的瓦斯总量将相当于 10^9 t二氧化碳当量（ MTCO_2e ）（温室效应潜能值为25；密度为 0.716 kg/m^3 ；相对瓦斯涌出量为 $9 \text{ m}^3/\text{t}$ ）。

瓦斯赋存与控制

处于井工矿井深处的瓦斯，富含甲烷成分，其甲烷浓度为80%~95%，在煤层中自然生成，在受到煤层开采扰动时释放出来。瓦斯只有在和空气混合时才会变得易燃易爆。

在某些地质环境中（如澳大利亚、南非、法国、中欧和东欧），煤矿中会释放出大量二氧化碳，对矿井整体的脱气管理战略具有重要影响。在突出情况下，大量的甲烷、二氧化碳或二者混合物会伴随着岩石或煤炭喷涌而出，而且爆炸和窒息的二次效应可能使危险性叠加。通过系统性的瓦斯预抽采方法，可以降低初始瓦斯含量并预防这种危险的发生。

在煤矿生产实践中，通过控制爆炸性混合物的生成来降低爆炸风险，是比较好的做法。在实际作业情况下，当监测到瓦斯处于异常水平时，迅速将爆炸性混合物稀释到安全浓度（例如：通过通风系统）。当瓦斯涌出量超过矿井通风系统的处理能力时，为确保矿井空气中瓦斯能够充分稀释，在瓦斯涌入矿井巷道之前，应通过矿井瓦斯抽采系统对瓦斯进行收集。

煤矿瓦斯抽采系统良好的实践表明，既要选择合适的瓦斯抽采方法，又要合理运行其抽采系统。遵循正确的方法可以确保煤矿瓦斯捕捉、运输和利用（如有必要）的安全性，使用时其浓度至少是爆炸上限的两倍（即：甲烷含量应高于30%）。

瓦斯调控的途径

通过应用爆炸风险的评估方法，结合强有力的通风措施和安全条例，可以提升矿井安全水平，并极大提高瓦斯采集的数量和质量。

此外，规范瓦斯抽采、输送和利用安全规程的建立和实施，将会鼓励建立更高层次的瓦斯抽采标准，增加清洁能源的生产，并大幅度减少瓦斯排放。

井下瓦斯涌出量的预测

在一定地质和采矿条件下，正常、稳定状态条件下煤矿井下瓦斯涌出量相对来说是可预测的，尽管不同国家之间可能存在不小的差异。由于开采而引起的地

层、含水层和瓦斯源之间复杂的相互作用，深层和多煤层同时开采缺乏可靠的瓦斯排放预测方法，预测瓦斯量依然是一项重大挑战。尽管如此，一些可用于预测瓦斯流动、瓦斯捕捉、满足通风要求和潜在利用的方法，已经在矿山规划设计之中得到证实，矿山日常规划中应经常使用这些方法。

由于瓦斯的固有特性，偶然涌出及突出不容易被预测到，但是其发生的条件是众所周知的，因此，遵循好的实践经验可以更有效地管控这些风险。

采矿活动有时会影响到邻近的天然储气层，从而导致瓦斯涌出量是预测独立煤层涌出总量的两倍。通过比较测量数据和预测结果，可以在早期阶段甄别这种情况。

通风系统的作用

采煤工作面安全开采的速度主要由两个因素共同决定：①通过矿井通风系统来稀释气体污染物至可接受程度的能力；②矿井瓦斯抽采系统的工作效率。

运营成本是设计矿井整体脱气方案的主要考虑因素，井下通风系统的电力消耗是煤矿最大的运营成本之一，通风的风量与电耗成正比。因此，较之增加通风量，引入瓦斯抽采系统或提高瓦斯抽采效率，通常意味着更低的通风成本。

瓦斯抽采

瓦斯抽采的目的是高浓度瓦斯在进入矿井巷道之前，从瓦斯源头提前进行捕捉。从严格监管的角度来看，只需抽采矿井全部瓦斯的一部分，就可以确保通风空气把矿井瓦斯稀释至安全范围。然而，为了最大限度地确保安全性、缓解环境压力及实现能源回收的目的，人们会最大限度地抽采瓦斯。

煤矿开采之前、期间和之后都可以捕捉瓦斯，相应地有预抽采和后抽采技术。预抽是减少煤层直接涌出瓦斯的唯一途径。基于此，如果煤层是瓦斯排放的主要来源，预抽采就显得尤其重要。但是，预抽采通常只有在中、高渗透能力的煤层才可行，除非在附近煤层打钻井（孔），通过增透刺激技术提高煤层透气性，比如水力压裂的方式。后抽采方法，是指受开采作业扰动的瓦斯在进入通风巷道之前对其进行截取。可应用后抽采技术的区域包括开采作业煤层上部扰动区和煤层下部区，后抽采技术既可以在井下打钻，也可以通过地面打钻。

如果瓦斯抽采系统的瓦斯捕获效率低，或抽采钻孔存在漏气，可能是由于瓦斯抽采方法的选择不当或这些方法的实施不力所致。这反过来又对瓦斯的输送和利用产生不利影响，因为有时产生的瓦斯浓度会处于不安全的水平（比如，瓦斯浓度低于30%）。

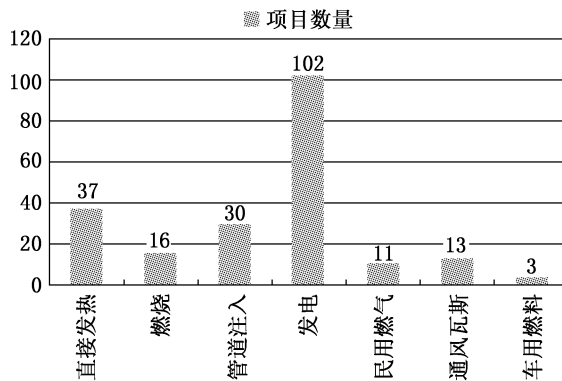
将正确的安装维护、流量监测和系统性的钻探相结合，可以极大改善已建立的瓦斯抽采系统的效能。

安装和运行高效率的瓦斯抽采系统具有很高的商业价值，成功的瓦斯治理是实现高瓦斯矿井盈利的关键因素。

世界各地煤矿的经验表明，对瓦斯抽采系统“最佳实践”的投资，能够降低煤矿瓦斯涌出问题导致的停产机会，提高煤矿开采环境的安全性，增加煤矿瓦斯的利用机会，并且减少了温室气体的排放。

瓦斯的利用和减排

捕捉到的煤矿瓦斯是一种清洁能源，具有多种用途。图 0-1 总结了现有全球运营的煤矿瓦斯项目分布。这些数字是由全球甲烷倡议机构（GMI）编制的。如图 0-1 所示，发电、注入天然气管道和锅炉燃烧是瓦斯利用的主要项目类型（基于项目数量）。



(数据来源：全球甲烷倡议机构煤炭瓦斯项目数据库，2015 年 8 月)

图 0-1 现阶段全球煤矿瓦斯利用项目分布

提纯技术已经被开发并广泛应用于去除高品质煤矿瓦斯中的杂质（例如在美国），以满足严格的“管道-质量”标准（USEPA，2009）。对于许多瓦斯终端用户来说，专门提纯可能产生比较高的成本，但这些成本并非必需，因为我们可以通过提高井下瓦斯抽采标准来达到提纯的目的。

采用适当的设备和程序，安全燃烧那些无法使用的抽采瓦斯，可以最大限度减少温室气体的排放。燃烧可以将瓦斯转换为二氧化碳，从而使得瓦斯对大气的

温室效应由原本的二氧化碳的 28 ~ 34 倍减少至 1 倍 (IPCC, 2014)。

未被瓦斯抽采系统捕获的瓦斯将在矿井通风系统中被新鲜风流稀释, 并作为风排瓦斯 (VAM) 排放到大气中, 风排瓦斯通常含量为 1% 或更少。尽管这样的浓度很低, 风排瓦斯的总量依然是全球煤矿瓦斯第一大排放来源。在一些地区和国家 (如澳大利亚、中国和美国), 已在商业级别上进行了热氧化技术的试点应用, 以减少风排瓦斯的排放 (例如在两个案例中, 利用热氧化技术发电)。现在正在研发其他减少风排瓦斯排放的技术 (例如, 催化氧化技术、贫燃料燃烧技术、回转窑技术)。

成本与经济问题

高效的瓦斯抽采降低了瓦斯突出、爆炸以及由此带来的事故风险, 降低这些风险就意味着降低了与此相关的成本。尽管与瓦斯有关的事故成本在不同国家差异较大, 但都很巨大。例如, 由于与瓦斯有关的事故, 导致某一个煤矿 10% 的停工或空运转, 可能导致一个典型的高产长壁矿井每年损失 800 万 ~ 1600 万美元。一座大型矿井中的一次致命事故的额外费用从 200 万 ~ 800 万美元以上不等, 包括生产损失、诉讼费用、赔偿款、罚金, 甚至会导致矿山关闭。在美国的一个案例中, 一家矿业公司曾支付了 2.2 亿美元的罚金。

与此同时, 瓦斯抽采给瓦斯的回收和利用创造了机会。瓦斯回收和利用这类能源回收项目, 通过直接销售瓦斯或将其转化为电力、汽车能源或其他天然气原料来实现其经济价值。

瓦斯回收和利用项目也越来越多, 其收益包括来自碳减排量认证的收益, 比如核实减排量 (VERs)、核证减排量 CERs) 或像信用减排联合 (ERUs) 等其他信用减排机构认证的收益。这些潜在的碳资产融资也许是某些煤矿瓦斯利用项目在经济上具有可行性的关键因素, 因为如果没有碳资产融资的支持, 那么这些项目在经济上可能并不具备吸引力。此外, 对单纯的碳减排项目而言, 碳资产融资可能是唯一的利润来源, 如风排瓦斯氧化 (无能量回收) 或火炬燃烧项目。

风排瓦斯同样可以用于发电。但是风排瓦斯发电离不开碳资产融资收益或其他激励措施 (如优惠电价或组合性收益), 否则在商业上是行不通的。

目前, 由于投资电力需要的设备和基础设施建设成本很高, 大多数煤矿业主的投资决策都倾向于扩大煤炭生产, 而不是开发利用煤矿瓦斯的项目 (特别是发电)。然而, 未来为了达成环保目标, 煤矿业主可能会被要求改进瓦斯抽采效能, 这一要求远高于仅仅保证煤矿安全生产的要求。这种对瓦斯抽采系统的改进, 可提供质量相对较高的瓦斯, 给瓦斯回收和利用项目方面的投资带来了更大

的可能性。

结论

制定一个全过程的整体解决方案，包括瓦斯在煤矿作业面的释放，以及之后的排入大气层，对煤矿安全、煤矿生产，特别是在控制温室气体排放方面，都有诸多的益处。

- 全球现有关于瓦斯赋存、预测、控制和管理知识及其相关应用将有助于提高煤矿生产的安全性。最佳瓦斯抽采实践的实施将很大程度上降低煤矿瓦斯造成的爆炸风险。
- 煤矿瓦斯既是能源，又是破坏力强大的温室气体。加强瓦斯利用，不可利用的瓦斯进行火炬燃烧，风排瓦斯进行氧化，都能够极大降低瓦斯的排放。
- 通过瓦斯抽采和利用，将瓦斯转化为可利用的能源，是一种非常好的商业模式，这一模式将增加高品质煤矿瓦斯的可用性。

1 绪 论

关键信息

煤矿工人的安全至上，这一点不应受任何因素的影响。

旨在降低爆炸风险的风险评估办法应该与通风和安全条例的实施相结合。

在理想情况下，现代煤矿公司应该认识到采用整体瓦斯管理系统的益处，该系统建设性地将井下瓦斯控制、瓦斯利用和减少温室气体排放融为一体。

1.1 本书的目的

本书旨在为煤矿业主和经营者、政府管理者和决策者在煤矿井下安全设计和实施、有效的瓦斯抽采和控制方面提供指导。目的主要是鼓励采用更安全的采矿方法，以减少与瓦斯有关的人员伤亡和财产损失。

高效的煤矿瓦斯抽采的另一个重要益处是优化瓦斯的回收和利用，从而避免了原本可利用能源资源的浪费。因此，编制本书的另一个重要动机就是推动和鼓励煤矿瓦斯（CMM）利用，以减少煤矿瓦斯排放，从而减少温室气体排放。最终，将这些实践做法与煤矿的运营流程相结合，通过以下几个方面提高全球煤矿的可持续性发展，并改善煤矿的长期财务状况：

- 努力实现人员零伤亡和财产零损失的目标。
- 兑现全球煤炭行业安全生产、减缓气候变化、承担企业社会责任的承诺，树立良好公民形象。
- 建立煤矿瓦斯抽采和利用的全球性对话机制。
- 创建煤炭行业、政府和监管部门之间的联系纽带。
- 把煤矿瓦斯抽采纳入有效风险管理体系。

本书意在“以原则为基础”，也就是说，并非是提出一个全面的、规定性的方法，因为那样可能不适合具体的地域条件、地质情况和采矿实践。本书创作者们认为，能够通用的方法并不存在，因此，本书制定了一套可以广泛参考的基本原则，个别情况可以在此基础上进行适当调整。一般而言，随着时间的推移，实施这些原则的技术会不断地演变和改进，本书对国际上瓦斯抽采行业的最佳做法

作了适当的概述。

本书无意被当成一本瓦斯抽采技术手册来使用。在本书最后和联合国欧洲经济委员会网站煤矿瓦斯栏目里，我们还提供了参考文献和其他一些参考资料。

1.2 问题

无论是工业化国家还是新兴经济体，煤炭都是基础性能源资源。特别是在一些快速增长的经济体中，巨大的能源需求给煤矿带来了增加产量的压力，导致整个采矿运营的压力增加，进而危及生产安全。煤矿瓦斯是一个严重的安全隐患，需要进行专业有效的管理。在许多产煤国家，尽管煤矿瓦斯爆炸事故很少发生，但全世界每年仍因此造成数千人伤亡。

单次瓦斯事故就可能导致多人死亡。表 1-1 显示了自 2010 年以来几个国家发生的部分极其严重的煤矿瓦斯爆炸事故。对矿井瓦斯进行有效管理，可以消除此类悲剧发生的核心因素。

煤矿开采时所造成的扰动，导致瓦斯从煤层和周围岩层进入到作业区，可能就会引发事故。释放到作业区中的瓦斯量与煤炭开采速率和煤层及周围岩层中原位瓦斯的含量有密切关系。

表 1-1 2010 年以后主要煤矿爆炸事故

国 家	日 期	煤 矿	死亡人数
中国	2013 -03 -29	吉林八宝煤矿	52
哥伦比亚	2010 -06 -16	圣费尔南多	73
新西兰	2010 -11 -19	派克河	29
巴基斯坦	2011 -03 -20	Sorange, Quetta	52
俄罗斯	2016 -02 -25	Vorkuta	36
俄罗斯	2010 -05 -08	Raspadskaya	90
土耳其	2014 -05 -13	Soma	301
乌克兰	2015 -03 -04	Zasyadko	34
美国	2010 -04 -05	Upper Big Branch	29

国家监管机构对煤矿井下通风巷道中瓦斯的浓度设定了最高限值。因此，释放到矿井工作面的瓦斯成为制约煤炭生产的一个限制性因素。

瓦斯突出事故如果发生在新暴露的工作面，通常伴随着大量瓦斯突然喷发，

导致矿用设备、矿井生产遭受损失，甚至造成人员伤亡。例如，2004年10月20日，中国河南省新密市的大平煤矿发生瓦斯突出和后续的爆炸事故，导致148人死亡（Xu，2006）。最大的一起瓦斯爆炸事故是发生在乌克兰的加顿涅茨克煤田加林煤矿，喷出14500 t煤炭和约600000 m³的瓦斯。瓦斯突出事故大多发生在掘进巷道，尽管事故报道说其发生在长壁开采区。自1843年法国首次事故报告以来，全球发生了大约30000起瓦斯突出事故，其中超过三分之一发生在中国。

为了减少煤矿瓦斯造成的危害，迫切需要一个方法指南，以帮助政府迅速指导实施更安全的工作实践。根据现有的数据，全球不同国家之间煤矿开采的死亡率差别是很大的。例如，一个国家与另一个国家的百万吨死亡率可能相差5倍以上。然而，这一统计数据与机械化程度和所采用的安全措施密切相关，而未遂事故、致伤和致死事故与轮换班次和工作时间也密切相关。

没有任何一座煤矿完全没有安全隐患，即使是最现代化的矿井也可能发生与瓦斯有关的事故。先进的技术减少了矿工死于爆炸的风险，但仅仅依靠技术是不够的。管理文化、组织结构、工人参与、培训、管理和执行系统都是有效的风险管理程序的基本组成部分。掌握和理解瓦斯控制的基本原理是设计有效控制和系统管理的基础。从根本上来讲，所有爆炸事故都是因为未能有效实施安全做法和程序。

新西兰派克河煤矿瓦斯爆炸事故

背景情况：瓦斯没有被认定具有潜在危险性。在勘探和开采过程中，对煤的含气量和排放特征没有系统的数据和研究。只有在瓦斯成为一个问题的时候才粗略地尝试控制。此外，部分井下电气设备没有完全按照煤矿防爆标准设计和安装。几天的时间里，发生了一连串的爆炸伴随着火灾，最终导致29名矿工遇难。

解决方案：成立了皇家调查委员会专门调查这一悲剧。他们的建议使新西兰的煤矿安全得到明显改善。改进公司的治理，采用煤矿瓦斯抽采与利用最佳实践，让更多的工人参与到健康和安全管理中。更多相关信息，参见案例10。

甲烷排放的一个重要来源是煤矿，甲烷是一种强力的温室气体，在过去的100年间，其对全球变暖潜能（GWP）的影响是二氧化碳的28~34倍（IPCC，2014）。根据国际气候变化第五次评估报告，甲烷占据人为温室气体排放总量的

20% (IPCC, 2014), 而在第四次报告中是16% (2007)。煤矿释放了全球人为产生甲烷气体排放的8% (USEPA, 2012)。根据国际能源机构预测, 未来几年煤炭需求量将达 9×10^9 t, 煤矿瓦斯排放量也会因此增加 (IEA, 2014)。到2019年, 全球煤矿中瓦斯排放量可能为 10^9 t 二氧化碳当量 (GWP = 25; 密度 = 0.716 kg/m^3 ; 瓦斯排放量 $9 \text{ m}^3/\text{t}$)。

通常认为超过90%的煤矿瓦斯排放来自井工矿井, 其中大约70%~80%低浓度瓦斯 (通常瓦斯含量不到1%) 是以风排瓦斯的形式排放出来的。

现有技术已经可以使煤炭开采产生的瓦斯排放大幅度减少, 但成功运用这些技术需要各国政府的领导和支持、适当的融资机制以及全球煤矿业在实践中的通力合作。

1.3 瓦斯抽采、捕捉、利用和减排

煤矿瓦斯的抽采、捕捉和利用并非新课题, 在过去的几个世纪里, 这些技术及其应用有了很大的进步。早在1730年, 英国首次出现关于瓦斯抽采的记录。1730年的英国。20世纪上半叶, 欧洲采用了更为现代化的瓦斯抽采系统。瓦斯用于照明可能发生在18世纪初, 但在19世纪80年代才有了明确的相关记录。

20世纪50年代, 德国首先研发了系统的、高效的瓦斯抽采技术, 并在欧洲得到了广泛应用。20世纪60年代以来, 瓦斯抽采得到广泛使用, 最初用于锅炉燃烧和工业生产, 后来用于发电、管道输送及民用。

如图1-1所示为井下瓦斯抽采系统和地面煤矿瓦斯回收减排设施三维示意图。从图1-1可以看出矿井井下瓦斯抽采和收集的复杂性, 以及地面设备将瓦斯转化成电能的内在相互关联的情况。图1-1也说明了风排瓦斯 (VAM) 从矿井通风竖井排出的情况。

据报告, 目前全球有200多个煤矿瓦斯回收和利用项目正在实施 (GMI, 2015)。最普遍的利用方式是用来发电, 其他用途包括锅炉燃料、注入天然气管道、民用燃气、工业用燃气、车用燃料 (如液化天然气 (LNG) 或压缩天然气 (CNG)), 或者用于煤炭烘干。

在某些情况下, 由于场地条件限制或者市场因素, 瓦斯不能经济地回收利用而被直接销毁掉 (例如燃烧, 从而转化为二氧化碳), 这减少了因瓦斯排放而导致的全球变暖潜能 (GWP)。在一些国家, 自愿减排和遵守碳减排市场原则是可以获得收益的。

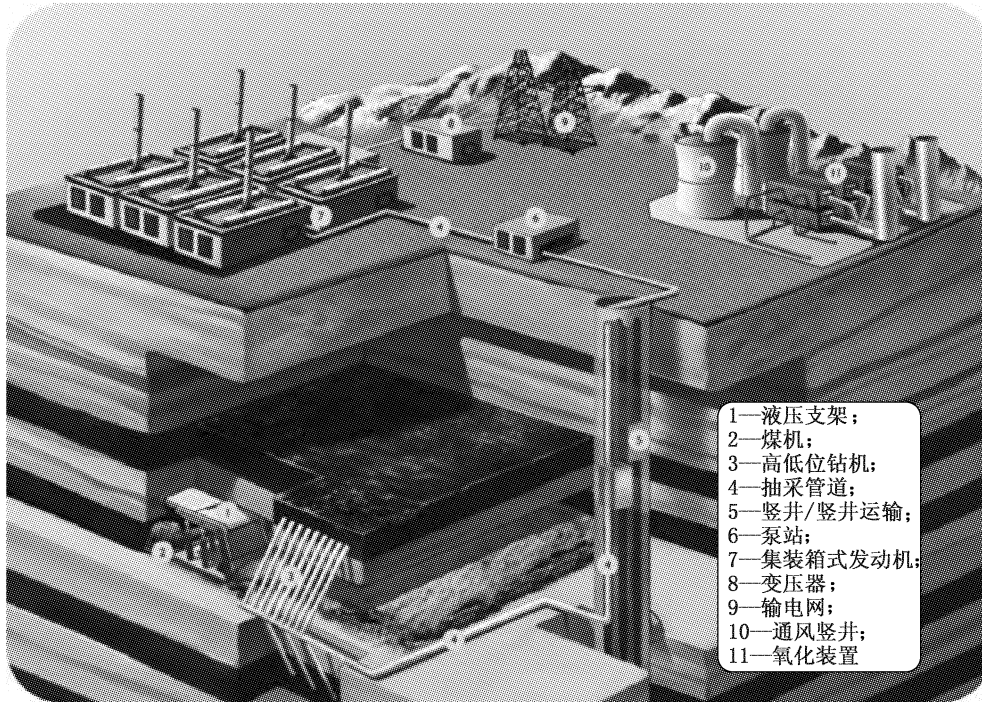


图 1-1 井下瓦斯抽采系统和地面煤矿瓦斯回收减排设施三维示意图

2 瓦斯治理的基础

关键信息

建立和推行瓦斯抽采、输送和利用的安全条例，能够推动瓦斯抽采安全标准的提高，以及增加清洁能源生产、促进更大力度的减排。

在如何降低瓦斯爆炸风险方面，全球瓦斯利用相关行业有丰富的知识和经验。

在高瓦斯矿井环境中创造安全的作业条件，仅靠立法或依赖最先进的技术都是很难实现的。合理和有效的管理制度、管理组织机构和管理实践经验是实现矿井安全生产的根本。实现矿井安全生产的其他关键要素还有对管理人员和工人进行必要的教育和培训，鼓励工人在实践中采用和遵守安全规程并定期检查。

2.1 煤矿瓦斯治理的目标

瓦斯治理系统的主要目标是防止煤矿井下发生瓦斯突出、瓦斯爆炸和窒息等事故。在一些煤矿，单纯利用通风技术就可以有效地把工作面释放的瓦斯稀释到允许的浓度范围，然而，如果工作面瓦斯量较高，则需要采用通风和瓦斯抽采相结合的办法来稀释。采用瓦斯治理最佳实践不仅可以提高安全性，而且可以使瓦斯有更好的利用前景。

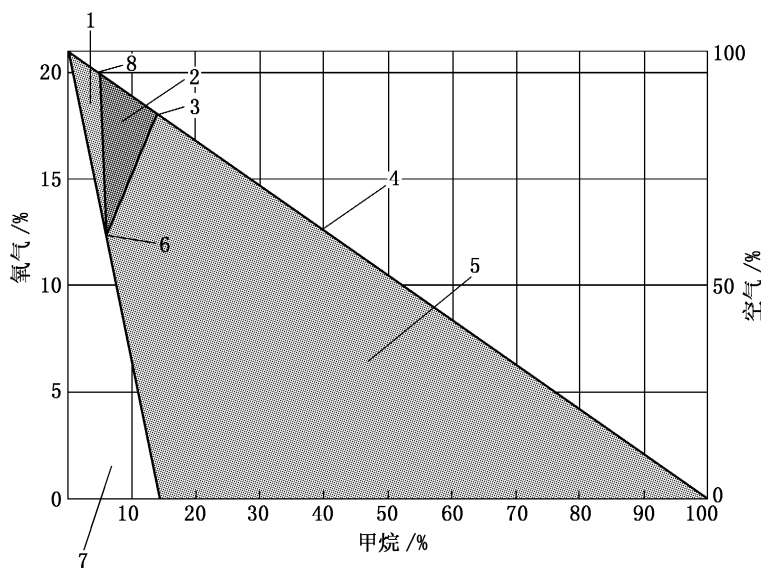
一旦发生爆炸，采用防护措施可以减少爆炸波及的深度，这是重要的第二道防线。然而，瓦斯爆炸后管理是无法替代预防的作用的，这是本书的重点。

2.2 瓦斯灾害的发生

天然存在于煤层中的瓦斯往往富含甲烷，通常含有 80% ~ 95% 的甲烷，这些瓦斯由于受到采矿的扰动而释放出来。瓦斯只有在与空气混合时才会变得易燃且有爆炸风险。

某些地质环境中也会出现二氧化碳大量涌出的情况。在一些国家曾出现过伴有二氧化碳的突出事故，由于二氧化碳对煤更强的吸附性及其毒性，这样的突出往往更猛烈、更难控制也更加危险。二氧化碳比空气重，空气中二氧化碳含量超过 5% 时就被视为具有毒性，浓度低至 1% 时依然会对人产生生理影响。

甲烷是一种无色、无臭、无味的气体，因此，需要依靠测量装置来确定其存在。甲烷与氧气混合达到一定范围时具有爆炸性，如图 2-1 所示。



1—贫燃料区，如甲烷含量增加，则易引起爆炸；2—爆炸区；3—爆炸上限；4—爆炸性混合物（总计）不会超过此线；5—富燃料区，如空气含量增加，则易引起爆炸；6—鼻尖（曲线顶端）；7—即使空气含量增加也不会引起爆炸；8—爆炸下限

图 2-1 甲烷浓度百分比和爆炸区间

在标准大气压情况下，甲烷在空气中含量为 9.5% 时具有最大爆炸性。在井下密闭条件下，由于未燃烧的气体被压缩在火焰前方，由爆炸产生的冲击力会增加。

在缺氧环境中，例如封闭的采空区，只有在空气进入时会形成爆炸性混合物。在瓦斯浓度高时，会引起人员窒息。由于矿井空间的局限性，大量瓦斯燃烧必然会导致爆炸。

澳大利亚在有突出倾向煤层的安全开采

背景情况：20 世纪 90 年代，澳大利亚部分煤矿被要求制订应对突出的管理计划（OMP）。可是高瓦斯地区取得成功的管理计划，在一些富含二氧化碳的矿井中未能取得良好效果。1994 年，Westcliff 煤矿发生了突出事故，导致人员伤亡，这凸显了对更严格的管理方法更加迫切的需求。

解决方案：应对突出的管理计划（OMP）必须包含对相关责任的描述、促进安全作业的程序和协议。对突出的管理过程包含对煤层瓦斯含量的监控分析、地质结构和煤层钻孔结果的分析。瓦斯抽采系统是防止开采煤层工作面瓦斯含量超过最低允许浓度的主要途径，能够有效减少瓦斯突出风险。在瓦斯突出条件下进行采矿作业，当抽无可抽，而且进一步打钻无法提供额外的有意义的的数据时，依然必须落实规程。

更多相关信息，参见案例4。

瓦斯有一种倾向，会聚集在煤矿工作面顶部风速较低的地方，并形成水平分层。出现这一现象的原因是瓦斯比空气轻，其密度仅为空气密度的0.55。在许多例子中，通风风速为0.5 m/s时可以阻止分层形成，但是在某些情况下，这样的风速是不够的。通风的设计者应该意识到抑制瓦斯分层的变量，例如层宽、巷道坡度、瓦斯涌出量和空气流速（Creedy & Phillips, 1997; Kissell, 2006）。

在一些情况下，通风风速不高，空气和瓦斯不会产生混合，而是会形成瓦斯层并与通风同向或逆向流动，这些瓦斯层有可能迅速传播火焰，进而把火源和可燃混合物连通（例如长壁采空区），从而增加了爆炸的危险性和严重性。一旦瓦斯和空气混合，就不会再自发的分离出来。在任何情况下，瓦斯层都会有一个从高浓度到低浓度的过渡，这个过渡范围包含可爆炸的范围在内。因此，尤其在煤矿开采区，预防瓦斯层形成是非常重要的。

煤矿运营者通常会主动地把煤矿的停止作业区封闭起来（即采空区），起到和通风系统隔离的作用。但是，由于扰动影响，这些封闭区总是没法完全封闭，因此不能完全阻止封闭区的瓦斯进入生产作业区。密封区内的爆炸性瓦斯混合物会因通风波动或气压下降而流入到通风巷道中。

形成爆炸性混合物的高风险区域包括：采空区、通风死角、机械化采煤机截割区和通风盲区，以及瓦斯抽采系统设计缺陷或操作不当导致吸入过量空气的区域，在这些区域瓦斯浓度可能处于爆炸的范围内。

相比于长壁采煤法，房柱式采煤法（无煤柱回收）对相邻地层的影响较小，因此，采用房柱式采煤法的煤矿往往比采用长壁采煤法开采的煤矿瓦斯含量低。然而，由于工作面难以达到足够量的通风，采用房柱式采煤法的煤矿并不意味着爆炸风险就能更低。采用房柱式采煤法的煤矿，瓦斯的主要来源在于采煤层本身。因为盲巷通风不良和从顶板释放的瓦斯同样会在顶板附近产生爆炸性混合物（详见案例9）。

点燃爆炸性瓦斯混合物的火花来源

瓦斯和空气的混合物可由多种来源点燃：电火花、钢钻头撞击石英岩产生的火花，顶板冒落、铝铁撞击形成火花，雷击、冒烟材料、爆炸物和雷管、煤炭自燃和其他明火。

现代煤矿使用大马力的煤岩切割机械，当岩石和矿物被切割头摩擦时可能产生高温火花，这容易导致严重的摩擦起火问题。由于煤岩切割工具引发的瓦斯燃烧相比于其他因素来说更加普遍，这也表明，要实现瓦斯灾害的完全控制，在技术上难度很大。

2.3 降低爆炸风险

本书的主要目标是强调预防瓦斯爆炸的基本原理，这些知识对于煤矿瓦斯风险控制方案的设计至关重要。本书中所描述的原则，与现代煤矿企业努力实现零爆炸、零事故所执行的风险管理系统原则一致。

煤矿瓦斯爆炸风险管理涉及了许多不同的方面，其中管理优良、责任明确是必不可少的。

典型的煤矿瓦斯爆炸风险防控措施和程序

- | | |
|------------------|--|
| • 使用阻燃型电气设备和电缆 | • 制定通风规划 |
| • 控制井下爆炸物及其使用 | • 管理煤矿通风 |
| • 提供充足的消防和救援设施 | • 实时监测矿井中瓦斯浓度 |
| • 规范瓦斯抽采计划、设计和实施 | • 使用辅助通风 |
| • 对抽采瓦斯的排放进行控制 | • 通过适当的开采顺序对煤层进行脱气 |
| • 对矿井巷道和工作面进行控制 | • 控制巷道风流中的瓦斯浓度 |
| • 严格限制携带违禁品进入井下 | • 严防摩擦起火 |
| • 严格检查井下作业情况 | • 使用阻燃措施 |
| • 使用防静电材料 | • 使用瓦斯探测器 |
| • 对采矿作业进行监督 | • 注意提高矿工的素质 |
| • 管理机电设备的使用和维护 | • 进行安全培训 |
| • 限制使用不适合的设备 | • 设置防爆屏障 |
| • 对机电设备操作进行监督 | • 张贴警告标示和注意事项 |
| • 严格限制井下冒烟材料 | • 避免火源（如不安全的电气设备、明火、吸烟） |
| • 制定瓦斯管理计划 | • 控制矿井采空区、密封区的瓦斯，使用瓦斯抽采方法以保持瓦斯纯度和适应气压的波动 |
| • 制定突发事件管理计划 | |

预防在任何可能的地方形成爆炸混合物，采取措施确保爆炸混合物与潜在的燃烧源分离，以此降低爆炸风险，是保证煤矿安全的最佳做法。

管理好井下瓦斯的稀释、扩散和分布，尽量降低瓦斯燃烧的可能性是至关重要的。可以通过以下几种方式来降低与矿井中可燃气体有关的风险：通过通风空气将其稀释到安全浓度；使用专用设备给采煤机通风；从工作区将瓦斯转移出去；必要时，在瓦斯进入通风巷道之前，在钻孔或瓦抽巷中将其捕获。

降低爆炸风险的基本原则如下：

- 在可能的情况下，预防爆炸混合物的形成（例如，采用高效的瓦斯抽采，保证一定的通风速度来阻止瓦斯的积聚）。
- 如果爆炸性气体混合不可避免，设法减小爆炸性混合物的量（例如，在通风空气中迅速稀释瓦斯至允许的浓度）。
- 将潜在的火源与不可避免其生成的气体混合物分离（例如，通过专门设计的通风系统阻止瓦斯在电动机附近积聚或避免在长壁回风巷道中用电）。

2.4 监管和管理原则

2.4.1 有效的安全监管框架

有效的安全监管框架是在安全主管机构的领导下，为行业提供连贯和明确的指导，清晰界定角色定位和职责范围，不至于与其他机构重叠。

即使是全面的煤矿瓦斯安全规章也不能保证煤矿生产的安全。为了发挥安全规章的实施效果，矿井检查人员、管理人员、监督人员和矿工，必须理解、应用和执行安全规章。积极的风险管理和自下而上的安全责任管理是预防瓦斯事故的关键。如果管理人员和矿工了解瓦斯排放和控制过程的基本原理，就会积极主动地遵守管理制度。因此，把培训和知识传授纳入安全方案中是必不可少的，而关于瓦斯事故及其原因的案例报告就是现成的培训资料，安全管理和安全培训应该同时针对煤矿工人和承包商进行。

2.4.2 执行

政府有效的工作应包括对井下施工条件进行详尽的检查、为煤矿管理提供专业指导、审查安全制度的执行情况、确保遵守规章制度，与煤矿经营者合作，纠正煤矿经营管理上的不足，对明显忽视法规、危及矿工生命安全的人员严厉惩罚。

有效的安全和监督管理系统还应该包含受瓦斯控制失败影响最大的群体，即煤矿工人。对于发生的所有事故，包括那些勉强避免的未遂事故，都应该进行调查并公开报道，以提高安全性。企业最有效的安全管理文化是可以对那些反映企业健康和安全隐患的员工进行惩罚，即“无责备”文化。企业最有效的风险管

理一定会强调事故预防的重要性。

成功的劳动保障管理不仅包含管理当局和煤矿经营者，还必须包含作为平等参与者的煤矿工人。正如国际劳工组织在《煤矿安全与健康公约》1995（176号）和《煤矿井下安全与健康守则》（ILO，2006）中所概述的，工人有权享有安全的工作环境，参与安全管理，及报告潜在危险而不用担心报复的权利。此外，作为创建安全工作环境的参与者，工人有义务采用安全的工作方法和维护安全的采矿环境。

2.4.3 安全工作条件下允许的瓦斯浓度

应谨慎使用规定性规章，因为这样的制度有可能扼杀创新，抑制专业的判断，带来虚假的安全感，或掩盖决策失误。安全界定应由具体的物理指标来进行说明，例如煤矿瓦斯在空气中爆炸的浓度范围。所有拥有采煤工业的国家，都为矿井通风巷道中煤矿瓦斯或易燃气体浓度设置了上限。根据煤矿井下采矿活动程度和达到的爆炸风险等级，在煤矿的不同地方设置了不同的强制瓦斯浓度限值，并设定输送和使用瓦斯的最小安全浓度，以减少井下爆炸的风险（表2-1）。

表2-1 瓦斯可燃浓度推荐限值和规定摘选

瓦斯含量/%	澳大利亚	中国	德国	印度 ^h	南非	英国	美国	安全系数 ^a
一般情况下工作面允许的最大值	1.25	1.00	1.00	1.25	1.40	1.25	1.00	3.6~5.0
在回风巷道允许的含量最大值	2.0 ^b	1.5 ^e	1.50	0.75	1.40	2.0 ^b	2.0 ^b	2.5~6.7
允许使用的含量最小值	未作硬性要求 ^e	未作硬性要求 ⁱ	25.00	未作硬性要求 ^f	未作硬性要求 ^f	40.00	25 ^c	1.7~2.7
井下管道运输的最小值	未作硬性要求 ^e	未作硬性要求	22.00	未作硬性要求 ^f	未作硬性要求 ^f	未作硬性要求 ^e	未作硬性要求 ^d	1.50

注：a. 安全系数指的是低于爆炸下限（5%）或高于爆炸上限（15%）的倍数范围。

b. 在无电力供应情况下。

c. 在通风方案中的瓦斯脱气处理方面，美国没有相关的规范或法规。

d. 未考虑到低浓度的采空区瓦斯经由露天矿井中的情况。

e. 数据由当地风险评估确定。

f. 数据很少或根本没有，所以问题未解决。

g. 在不走人的回风区最大允许浓度为2.5%。

h. 在印度，《印度煤矿制度》1957年版制定了煤矿瓦斯含量标准，是基于《印度采矿法案》1952年版出台制定的。

i. 根据中国环保部质量监督与管理中心出台的《煤层气、煤矿瓦斯排放标准》（GB 21522—2008），供使用的瓦斯含量应不低于30%，在特殊情况下低浓度也可以使用。

仅仅对瓦斯浓度进行精确测量还是不足以保证安全生产。同样重要的条件还包括确定用于测量瓦斯浓度的位置，用于测量瓦斯浓度的程序，以及对测量结果所采取的行动。在工业化程度高的国家，采矿业的立法通常是防范预期风险而制定，侧重于监督和控制。

2.4.4 瓦斯的安全输送和利用

瓦斯混合物是易爆品，它的运输和使用是十分危险的，其爆炸风险有可能波及到煤矿的生产区。在评估瓦斯的安全运输和使用方面，各个国家的煤矿安全条例在设置最低瓦斯浓度方面有所不同，从 25% ~ 40% 不等。通常认为安全系数至少应该是爆炸上限的两倍（即浓度 30% 或更高）才能保证安全。在管道运输中，浓度超过易燃上限的瓦斯不会导致爆炸，因为甲烷的纯度过高时是无法燃烧的；瓦斯在和空气接触的地方能够燃烧，在这种情况下，可以通过灭火技术将瓦斯与空气接触点的火扑灭。相反，在管道中，低纯度瓦斯（瓦斯浓度在 5% ~ 15% 范围内）如果被点燃，会导致火焰从燃烧点向管道的两个方向扩散，产生强烈爆炸力并影响整个矿井安全。

2.4.5 降低着火风险的规程

大多数的拥有采矿工业的国家都对井下允许使用的材料类型和使用方式有相应的管理限制和相关法规，以减少着火风险。然而，并非所有的潜在着火因素都能被消除。采矿设备需要电力供应，安全使用采矿设备需要采用防火材料及其内在安全标准，需要使用铠装电缆和安全连接器，以及严格的安全检查和维护程序 (I&M)。通常情况下，按规定禁止在长壁区特定通道中使用电力，因为有时候可能有瓦斯浓度升高的情况，尽管瓦斯浓度通常在允许的范围之内。

在采煤机上使用锋利的截齿、喷水准确定位以及机械通风系统，可以最大限度地降低采煤机摩擦起火的风险。由于驱动电机或轧辊过热，带式输送机也有可能起火，但这种风险可以通过定期检查和维修、消除煤粉尘和受热部件周围的颗粒物的方式来降低。人的不当行为，例如在井下抽烟，也是引起矿井爆炸的原因之一。

3 煤矿瓦斯涌出的发生、释放与预测

关键信息

在正常稳定的情况下，煤矿中释放出的瓦斯一般是可以预测的。

虽然非正常涌出和瓦斯突出不容易被预测到，但人们比较了解涌出和突出的条件。针对这些瓦斯涌出和突出的条件，为减少风险，已经制定了详细的规避风险的方法，在确定存在重大风险的情况下应该应用这些方法。安全的工作条件取决于对瓦斯的严密监控和瓦斯控制方法的实施力度。

安装井下安全监测系统对煤矿生产安全是十分重要的，但对搜集和使用数据来加强安全规划的作用也不能夸大其词。

3.1 介绍

随着开采速度的增加，刮板尺寸也在加大，采煤深度进一步增加，可能会深入到高瓦斯煤层及含有不同种类气源的地层，现代化高产矿井遇到的瓦斯涌出量也会越来越大。由于长壁采煤法采挖过程中影响地层的范围大，因此一般情况下释放的瓦斯比采用房柱式采煤等短壁采煤法释放的要多。同样的，在露天开采过程中，当覆盖层被清除后，瓦斯的透气性会因煤层和其他岩层的应力降低而增加，导致其释放到大气中。露天煤矿的总瓦斯量取决于含煤岩层中的瓦斯量、煤矿开采速度以及含水情况。尽管露天煤矿的瓦斯含量可能会较小，但随着时间的推移释放出的瓦斯总量可能会十分巨大。作为影响煤矿生产的因素，了解煤矿中瓦斯的赋存、排放特征和预测瓦斯涌出量，对于煤矿安全生产至关重要，也是煤矿生产计划、通风、瓦斯利用以及温室气体排放和控制需要考虑的重要因素。其他影响瓦斯产生的因素还有矿井设计、地质情况和运营情况。

3.2 煤层瓦斯赋存

煤层中天然存在的瓦斯气体的主要成分为甲烷（通常含量 80% ~ 95%），其他成分为烃类气体、氮气和二氧化碳。矿井中的甲烷、水蒸气、空气和伴生氧化物的混合物通常统称为“煤矿瓦斯”。

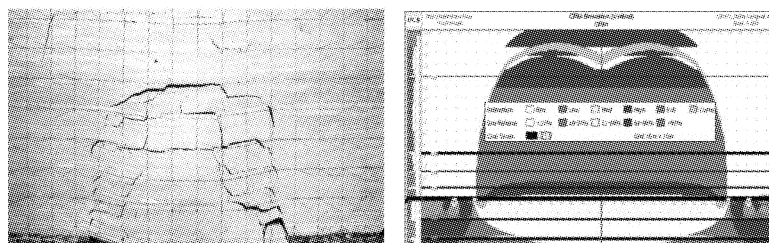
煤炭深埋于地下，通过长期化学反应生成甲烷。在现代沼泽中，如果植物碎屑埋藏在一定合适的深度并保持足够长的时间，会逐渐形成泥炭、有机碎屑并慢慢演变成煤炭，这一过程称之为煤化过程。煤炭形成时伴随的温度越高、压力越大、埋藏的时间越长、煤炭的成熟度越高（即等级），瓦斯产生的量也就越大。煤化过程中产生的瓦斯量远多于我们从煤层中所发现的量。但是，煤化过程中，含气地层暴露在地表时瓦斯会流失，或者在地下水流经时消融，或者在瓦斯飘逸过程中被困在周围岩石的孔隙之间及结构当中。困在岩石中的瓦斯有可能积聚在周围临近岩层的多孔地层中，例如砂岩，也有可能被有机页岩吸附。如果含气岩层在煤矿开采前依然被周围不透水的地层封闭，那么，这些储气岩石将会成为瓦斯的重要来源。由于煤的吸附作用，相比于其他岩类，甲烷更有可能积聚在煤炭之中。甲烷分子可以处于煤的内表面区域，其密度几乎与液体相似。在煤层分布的地质柱状图上，甲烷含量往往会随着深度和煤炭等级有规律地增加。不同煤田的瓦斯赋存深度和梯度差别很大，反映出形成煤炭盆地的地质历史。在一些煤炭盆地中，煤炭中甲烷的含量会随着埋藏深度增加而加大，达到一个峰值后再减少。

3.3 瓦斯气体释放过程

自然产生并且贮存于煤炭及周围地层中的瓦斯，受到采矿活动扰动会释放出来，其释放速率和释放总量取决于煤层中瓦斯的初始含量（含气量）、受采矿扰动的煤层分布和厚度、含煤地层的强度、采掘巷道的几何结构、采煤的速度和煤层透气性等因素。瓦斯释放总量与采煤扰动程度成正比，因此，在特定的地质条件下，瓦斯的释放量会随着采煤速度的增加而加大。

在一些特殊情况下，会出现煤和瓦斯的快速喷出（或称作突出）的情况。有些煤层同时含有大量二氧化碳和瓦斯，而且二氧化碳含量远大于原位瓦斯含量，这种情况下，尽管瓦斯含量不高，但仍有爆发突出事故的可能。因此，需要对二氧化碳和瓦斯两种气体的原位含量进行测量，以评估是否需要进行预抽采处理。

欧洲学者研究表明（Creedy 等人，1997.04），从长壁工作面的顶板向上的160~200 m 区域，底板向下40~70 m 的区域，会形成卸压或扰动，这些区域会产生瓦斯释放。图3-1 为一个石膏模型图，由图3-1 可知在形成裂隙空间以后，上覆层的去应力情况。这一模型形象地展现了在去应力区域内和产生裂隙空间以上一定高度内，明显的产生床层分离、裂缝及其他形式的地层松弛现象，因此，地层的透气性增加，从而创造出了煤矿瓦斯流出的通道。许多理论和试验模型已经展现了这一过程。



(仿 Gaskell 模型, 1989)

(由 Lunagas Pty 有限公司提供)

图 3-1 长壁工作面模型平行剖面图

(显示了由于采煤形成采空区和上覆层裂隙带, 上覆层松动)

煤层的开采会导致地面沉陷, 长壁工作面和地表之间的所有煤层都会受到影响, 只有受到扰动时, 卸压拱内的瓦斯才会进入采煤区。在煤矿正常开采时有些瓦斯不会释放出来, 因此稳定的瓦斯生产通常需要通过从地表向下钻孔这种方式来实现。钻孔或采气通道还可能成为未捕获气体的飘散通道, 从而造成地表和次地表区域的危险。

3.4 煤矿瓦斯相对涌出量

一般地, 通常采用“具体的”(或相对的)气体排放量来表示煤矿长壁采煤区的含气状态, 虽然使用和瓦斯含量相同的计量单位(即 m^3/t), 但是概念上是完全不同的。相对瓦斯涌出量指的是从所有来源排放出的瓦斯总量除以一段时间内(一般是一周或更长)所生产的煤炭总量。换言之, 这一指标实际上是每采一吨煤在任何一段限定时间内所排放的瓦斯总量(m^3)。正在释放并被测量的瓦斯不仅仅来自正在开采的煤层, 而是来自所有因开采活动受到扰动、产生空隙而坍塌并由此而变的松散的岩层。一般而言, 视煤矿相对瓦斯涌出量达到 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 或更高的矿井为高瓦斯矿井。在一些国家的矿井中, 曾有瓦斯相对排放量高达 $50 \sim 100 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间的情况, 例如英国和美国的一些矿井, 但是这么高的排放非常罕见。(Kissell 等人, 1973)。

3.5 认识煤矿瓦斯的涌出特征

在采掘面开采周期以及随后的长壁放顶煤推进过程中, 瓦斯流量的峰值会出现在采煤作业区的回风巷道中。统计数据表明, 这些峰值通常高于平均水平的 50% (Creedy 等人, 1997. 04)。在欧洲, 常利用这种关系作为初步测算满足瓦斯稀释要求所需要的通风量。

随着时间的推移,由采矿活动扰动而从煤层和周围岩层释放出的瓦斯量会逐渐减少,继续开采会产生新的瓦斯源。因此,瓦斯的释放总量取决于整个时期所有瓦斯源的释放总和。因此,相对瓦斯涌出量(每吨煤排放的瓦斯量)在长壁开采期会增加。当煤矿停止生产时,煤层中会继续释放出瓦斯,不含煤炭的岩层会流出瓦斯,但涌出量会逐渐降低。煤矿停止生产几天后取样,瓦斯涌出量就会低于生产时期的稳定数值。

大多数经验计算方法都假定煤矿生产稳定且瓦斯释放特性始终如一。虽然这种方法能够满足大多数规划需要,但是煤矿经营者依然需要考虑其他不太可预测的因素。因此,风险控制方法对降低发生严重事故的可能性至关重要。例如,在某些高瓦斯、低透气性煤层或具有断层地质构造特征的煤层中会发生瓦斯和煤(有时是岩石)突出事故。地质和采矿因素是造成突出事故的最主要原因,这种事故往往是可以识别的,但是在实际情况中又无法进行准确的预测。在煤矿管理中,可以通过实施严格的防突出管理措施来解决这一安全问题。例如在煤矿开采前通过瓦斯抽采将煤矿中的瓦斯含量降到临界值以下,在瓦斯抽采过程中,有时会通过抽采临近层瓦斯进行卸压,进而提高突出煤层的透气性,有助于提高瓦斯抽采效率。

在长壁工作区的底板、作业面或者靠近作业面的巷道中,有时会产生底鼓,造成瓦斯突然释放,这种类型的释放被认为是由于底板下含有巨大的砂岩岩床,同时在这个煤层下方40~60 m处还有另一个煤层。尽管对这样的突出情况进行预测有一定难度,但一般可以通过在底板钻孔的方法来释放瓦斯压力,以防止瓦斯积聚。

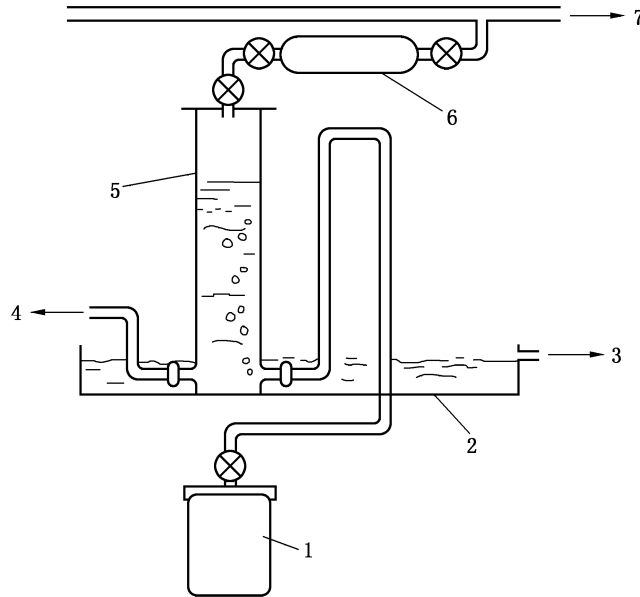
瓦斯突然的释放和突出会造成相当大的损失,并导致人员伤亡。如果空气和瓦斯的混合物在可燃范围内,那么有可能因岩石与金属撞击产生火花而引燃瓦斯。

煤矿开采有时会影响到天然的储气层,使得瓦斯的释放量比单一煤层的释放量大很多,远远超出预期。天然的储气层有可能是在岩层间或煤层间,为地质柱状图的正常组成部分,但由于地质运动阻碍或封闭了气体迁移通道,然而在煤矿开采时被困气体却会随之释放。这种情况在采矿之前不易被识别,但是煤矿经营者应该通过对比测量数据和预测数据对这种可能性进行预测。在高瓦斯矿区新开矿或矿井改扩建时,有必要进行额外的勘探。

3.6 煤的原位瓦斯含量的测定

规划、设计瓦斯抽采和通风系统时,需要先了解在煤炭中吸附的瓦斯总量,以及在一定程度上了解在较大的孔隙中压缩的瓦斯总量。原位瓦斯含量指的是单

位质量的煤中原位瓦斯的体积 (m^3/t)，这个概念不能和相对瓦斯涌出量弄混淆。测量原位瓦斯含量的一般方法是通过钻孔深入煤芯，获取处于尽可能原始状态下的煤炭样本并将其密封在密封罐中。将样本保持在接近井下原始温度并对其中的瓦斯进行解吸。依据测定的释放速率就可以计算出瓦斯在采样前损失的数值。图 3-2 为瓦斯含量测定设备。测量方法是，让罐内瓦斯定期流入测量瓶，并测量和记录瓦斯的体积。瓦斯的组成成分可以通过采样并进行化学分析来测定。初始实验后煤炭中残留的瓦斯，可以通过将煤粉碎，然后测定瓦斯释放量的方法来确定。美国矿业局 (USBN) 瓦斯含量测定法是最常用的技术之一，测定过程一般持续几天甚至几周的时间 (Diamond 和 Levine, 1981)。为了满足煤矿运营需要，在欧洲和澳大利亚已经开发出了快速解吸方法，该方法能够快速提供测量结果 (Janas 和 Opahle, 1986)。此外，对于低透气性的煤炭，已经开发出了分压和统计的方法 (Creedy, 1986)。因为煤层中包含矿物质和煤炭成分 (瓦斯主要吸附在有机物上)，一般将瓦斯含量调整为无灰基。有时对瓦斯成分进行单独测量；大多数情况下，瓦斯的主要成分是甲烷，甲烷在典型的煤层中含量范围为从痕量水平 (试样用量 $< 0.1 \text{ mg}$, 试液体积 $< 0.01 \text{ mL}$, 译者注) 至大约 $30 \text{ m}^3/\text{t}$ 。



1—解吸罐；2—集水盘；3—溢流；4—至下一量筒（如果必要）；
5—2000 mL 量筒；6—气体取样管；7—至真空源

图 3-2 瓦斯含量测定设备 (澳大利亚标准)

3.7 煤矿瓦斯涌出量的实用估计

学术界和研究机构已经开发出严格的瓦斯涌出量测定理论和模拟模型。出于实用性的目的,煤矿一般采用瓦斯释放经验模型来计算瓦斯排量,结合专业知识和当地实际情况,该模型具有一定可靠性。使用该模型需要输入煤层瓦斯含量、岩石和煤层的力学性质、开采的几何参数以及煤炭生产速度等参数。用户可以依据发布的公开信息构建自己的模型,也可以购买相关的专用软件。瓦斯涌出量的估算以吨煤瓦斯涌出量(即瓦斯相对含量 m^3/t)或稳态下绝对量(m^3/min)或(L/s)来表示。

通过模块可以预测增加煤炭产量对于瓦斯涌出量的影响。还可以通过以下参数计算瓦斯涌出量并预测相应的最大产煤量:

- 长壁回风区内瓦斯的浓度限值。
- 采掘工作面允许的配风量和实际能够达到的配风量。供往长壁工作面的风量取决于巷道的数量、采区的通风结构以及能让矿工感到舒适且可接受的风速。
- 能够保持稳定的瓦斯抽采量(如果采用瓦斯抽采系统的话)。

4 矿 井 通 风

关键信息

煤矿通风系统是整个采矿作业的重要组成部分，能够有效地去除矿井工作面的瓦斯。矿井通风系统的设计包含三个目标：①向矿工输送新鲜空气；②控制矿井中的温度和湿度；③有效稀释或消除有害气体和粉尘。

改进瓦斯抽采系统，能够比简单地增加矿井通风，更快速且经济地解决矿井瓦斯问题。

4.1 通风的挑战

矿井能否实现有效通风，是影响煤矿煤炭产量的重要因素。高瓦斯矿井实现安全高产取决于两个方面，分别是稀释污染物的通风能力和瓦斯抽采效率。

在井下巷道中，通风是稀释和分散有害气体的主要手段。优化通风风速和风量，以确保稀释瓦斯、粉尘的同时控制井下温度。工作面供应的新鲜空气量越大，能够稀释的瓦斯量就越大，但矿井内最大通风量和容许的最大风速是两个根本的限制因素。

通风压力与风量的平方成正比。因此，稍微增加通风量就需要增加很大的通风压力，通风压力越大，新鲜空气在采空区和风门中的漏风也会越大。如果过量的泄漏气流通过采空区，自燃的风险就会增加，更会影响到瓦斯抽采系统。

煤矿井下通风所需要的风量和瓦斯浓度标准通常由地方政府制定。如果设计的通风系统仅仅满足于地方法规对风速和风量所要求的最低限值，那么，该系统可能无法满足正在开采的煤矿的安全生产需要。因此，在设计通风系统时，必须考虑瓦斯涌出最严峻的情形。

瓦斯被认为是通风系统中的首要污染物，也是最危险的气体。如果通风系统的设计方案具有清除或有效控制瓦斯的能力，那么我们就可以假定该通风系统能够同时去除其他较小的污染物。

4.2 通风设计的主要特征

一般来说,通风(负压式)是通过安装在地面上的主要通风机来实现的,因此,正常情况下井下的气压低于标准大气压。如果通风机发生故障,矿井中的气压就会上升,可以一定程度上抑制作业区的瓦斯瞬间释放。

采面深、巷道长的煤矿需要更加复杂的通风系统。然而,这种更复杂的通风系统有可能导致进风和回风之间,以及风门处出现漏风。因此,在复杂和大型煤矿中,回采工作面和盲巷掘进时对新鲜风量是有限制的,这就要求辅助使用局部通风管道。然而,掘进通风必须使用并联方式,不允许采用串联方式,因为如果是串联的话,一个巷道内产生瓦斯问题,将会迅速传到下一个巷道。最佳的做法是,采取措施切断瓦斯浓度超过限值的作业点以及下游所有作业面的电力供应。

煤矿对通风的要求是动态的。随着煤矿的开采及通风区域的增加,需要更大的通风量,有时还需要增加进回风井、对主要通风机功率进行升级或对现有的巷道进行扩大。

可以利用专用软件来建立通风网络模型。定期进行压力和风量测试,以校准模型并在数值有变化时检查系统的性能。

只要有可能,通风系统应该设计成能够使各通风“分流”或支线维持自然平衡的状态,这样煤矿就不需要安装更多的风流控制设备(例如风门),人员通过风门时会对支线(或整个)矿井中的气流产生很大的影响。

地面主要通风机需要满足整个矿井的通风要求。因为风量需求是变动的,所以这些通风机供风能力一般有一定的调整范围,以确保在风量需求变化时也能满足要求。一些开采成熟的矿井安装的主要通风机较老,现在往往在最大负荷下运行,这种情况下,要想使风量能够到达矿井的边远区域,就只能通过对通风网络进行优化调整来实现。

4.3 高瓦斯矿井回采工作面的通风

通风配置不同,对瓦斯、煤尘和温度的调节效果也不同。高瓦斯风险主要在以下区域:煤层部分或者完全开采完毕的工作面(无论是长壁采煤法还是房柱式采煤法),不适合再进入的采空区。所有长壁作业区或煤柱回收作业区都与采空区直接相连,采空区是瓦斯、缺氧空气及其他危险气体聚集的地方。这些气体包括瓦斯抽采过程中未抽尽的瓦斯,以及从采空区残煤中持续释放出来的瓦斯。

处理这些瓦斯,在通风层面一般采用以下两种方式之一。第一,通风风量充

足时，让这些瓦斯进入煤矿回风通道，将已采区域的瓦斯在主通风道一并稀释到安全的范围内，如图 4-1 所示。如果改变通风方式，则可大幅度减小通风压力，例如一个采用 U 型通风的长壁工作面，如图 4-2 所示（单进单回，风量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大瓦斯允许浓度 2%），瓦斯抽采效率 50% 的情况下，总共可以处理瓦斯纯量 800 L/s ($48 \text{ m}^3/\text{min}$)，而采用《最佳实践》多进风通风方式的长壁工作面，（风量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大瓦斯允许浓度 2%），瓦斯抽采效率 70% 的情况下，总共处理瓦斯纯量 5333 L/s ($320 \text{ m}^3/\text{min}$)，处理能力是原来的 6 倍以上。

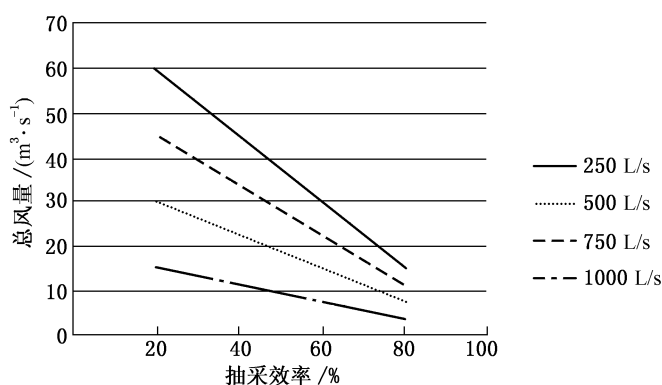


图 4-1 使峰值的瓦斯含量降低至 2% 的风量需求与瓦斯抽采效率的对应关系

第二，在局部有自燃倾向或矿压显现的情况下，部分瓦斯可能移动到工作面后面的风道，或穿过旧采空区，或排放到主回风通道或通风竖井（即从工作区域分流瓦斯的竖井，在美国常用）。这些“分流瓦斯”系统的效率取决于作业面通风压力的分配，而压力分配一般通过风道中设置障碍物（或调节器）实现。一些国家要求分流瓦斯的通风通道内瓦斯浓度低于 2%，以降低爆炸风险。

为确保作业面正常的工作环境，通过采煤工作面的通风量存在一个实际的上限，决定这一上限的因素是空气中的尘埃颗粒。采煤工作面风流的上限，限制了常规 U 型通风系统可实

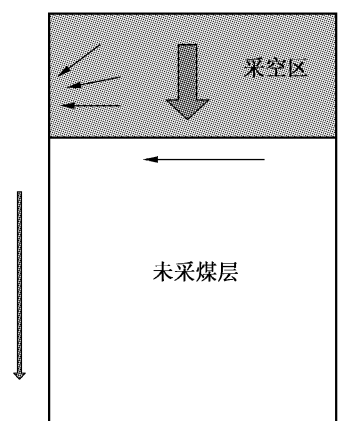





图 4-2 传统的 U 型通风系统

现的通风量 (图 4-2)。如果现有风量不足以稀释从作业面中释放出的瓦斯, 可以采用改变通风配置的矿井设计, 引入额外的新鲜空气, 如图 4-3 所示的“3 路”和“Y”系统。然而, 这些改变后的通风系统投资比较高, 例如会产生额外的巷道施工、垛墙以及在长壁采空区后敞口的巷道支护费用。在图 4-2 和图 4-3 中, “”表示工作面推进方向, “”表示回风风流方向, “”表示进风风流方向。

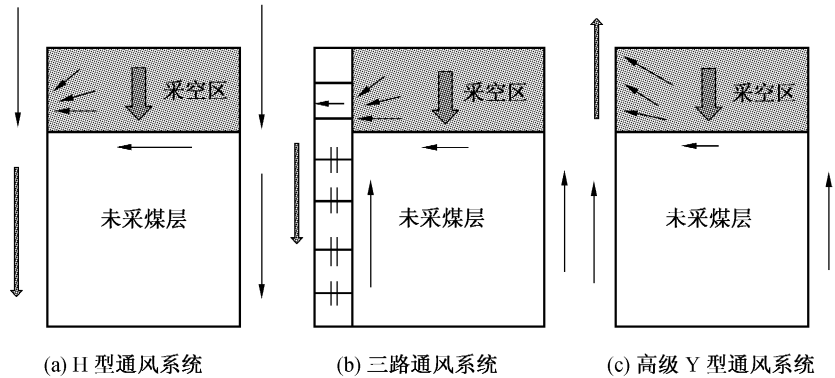


图 4-3 高瓦斯长壁工作面的通风布局

无论采用哪种系统或布局, 必须保证对采煤工作面供应足量的新鲜空气来稀释工作面瓦斯 (在瓦斯预抽采之后煤层中残留的) 及从长壁面上隅角 (尾角) 中存在的瓦斯, 以符合法定标准。选择的矿井布局应能在最有效的瓦斯抽采钻孔位置处提供良好的通风标准, 如果没有达到这一标准, 则会导致抽采效率降低, 通风需求量加大, 煤炭产量减少。

与后退式长壁采煤过程中的瓦斯管理相比, 采用钻孔和高低位钻孔抽采来控制瓦斯显得更为简单。然而, 世界上大多数的煤炭生产还是采用后退式长壁采煤, 因为这样更高产。通风配置的演化一直在试图把采煤工作面后的通风 (例如“Y”型和“H”型) 和回风系统的优点结合起来。应把在长壁工作面的上隅角制造压力梯度纳入到通风系统中, 压力梯度可以通过在巷道中使用风障 (或调节设施) 的办法或通过改变上隅角的风流方向, 以确保可燃混合气体不会循环到工作面。

德国高瓦斯涌出地区的高效长壁开采

背景情况：长壁采煤工作面最大允许风量为 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ，能稀释的瓦斯流量仅为 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ($22.2 \text{ m}^3/\text{min}$)，尽管煤炭管理局对甲烷含量的要求为 $1.0\% \sim 1.5\%$ （安全系数从 5.0 降低至 3.3 ），经评估仍是无效的。

解决方案：设计了一个 Y 型通风系统，再引入 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 的新鲜空气，混合后的风流流过工作面，用于稀释工作面和采空区的瓦斯，使得通过工作面的风量达到 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ，这种通风配置可以配合高低位钻孔使用，进行有效瓦斯管理。既可以和抽采系统相连接，也可以独立监测和调节。

更多相关信息，参见案例 2。

4.4 通风系统对供电的要求

井下通风系统中风量的一个很小变化，将带来电力消耗及相应通风成本的巨大变化。通风系统的电力消耗与通风量体积的立方成正比（图 4-4），在煤矿经营成本中占有很大的比例。因此，与增加通风量相比，引入瓦斯抽采或提高通风效率是降低成本的更好选择，增加通风量意味着煤矿辅助建设成本的增加。

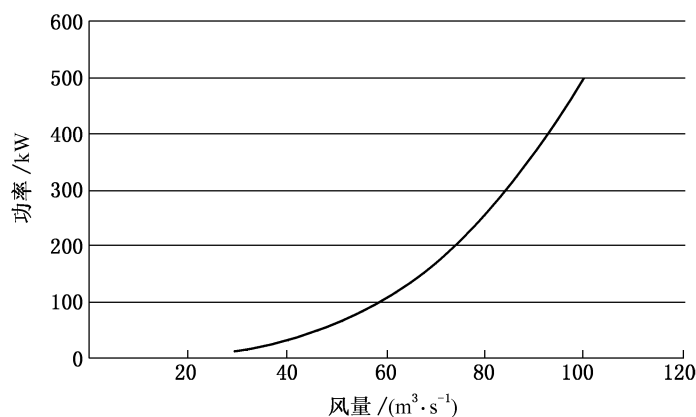


图 4-4 通风电力消耗和风量关系实例

4.5 煤矿掘进巷道的通风

使用局部通风机和采掘设备自带通风设备相结合的方法来稀释瓦斯，可以实现对瓦斯的有效控制，尤其适用于独头巷道作业和房柱式采煤法。

在掘进时，通常采用局部风机进行通风，采用负压抽风或压风的方法，或将二者相结合实现辅助通风。局部通风系统任何一处故障，瓦斯风险都会快速增加。一旦瓦斯产生积聚，掘进作业必须采取一些特殊的措施，以确保瓦斯以安全的方式清除。为了减少瓦斯积聚的风险，一些煤矿井下的局部通风机短暂停机后，在一定条件下允许自动重启。发生通风系统故障时，瓦斯在巷道中积聚，必须采用精心设计的程序排放瓦斯，以防止高浓度的瓦斯不受控制的排放到主通风系统中。

南非房柱式采煤法降低瓦斯爆炸风险

背景情况：由于已采区域风量需求大，而且风量均衡分配困难，导致通风效果不理想。为了保证主要通风气流能够到达工作面，将采空区用临时屏障封闭起来，因此瓦斯会在封闭的工作面后积聚。

解决方案：推荐的方法有：①在巷道中使用有效的局部通风（二级通风）；②定期测量和记录关键通风数据；③瓦斯区段监测间隔不超过1 h；④对正在开采的巷道进行不间断的瓦斯检测。

更多相关信息，请参见案例9。

断电、机械故障、局部管道故障和风机故障导致的通风系统故障，是造成很多瓦斯相关事故的重要因素。煤矿双供电系统和井下井上风机备用系统可以确保主通风系统不会停止运行。

4.6 通风风流监测

通风监测有两种主要方法：①使用固定的风速传感器，将通风数据持续传送到地面；②使用手持式设备需要进行定期校准。

风流监测的准确性取决于以下几个因素：传感器的位置、适当的校准和巷道的横断面积，这些都有可能随着采矿的影响而发生变化。对作业区和巷道的风流都应该进行持续监测，因为这对煤矿的安全生产至关重要。

测量位置不应该设置在有障碍物的地方，如机车或矿车停放区，因为这些

(机车或矿车的移动)会对测量数据产生干扰。

通风道的三维尺寸在各种类型的风速检测装置中都可显示,手持叶片风速仪适用于煤矿包括动态活动区域在内的任何地方。必须定期对风流测量装置进行重新校准,以确保其测量的精确性。

4.7 通风控制

风量分配包括把风流从一个地方导引到另外一个地方,这个时候需要考虑风流之间的阻力、空气压力和风流流速之间的关系,通过这些参数可以预测风流重新分配后的结果。

对矿井整体通风系统的控制主要是通过地面风机。增加矿井地面风机压力对矿井最偏远的地方只能产生极微小的影响,因此,增加地面风机压力是无法解决矿井偏远区域通风气流不足的问题的。地层压力可能导致顶板、巷道两帮和底板的整体变形,从而导致风阻增大,因此,为维持有效通风必须对巷道进行维护。

持续调控主要通风机是不现实的。煤矿地面风机系统的通风能力设计的裕量比较大(一台或多台风机工作,一台或多台风机备用),地面风机要经常进行切换运行,以确保在地面某一风机停机或进行日常维护检查时,井下风流不中断。

5 瓦斯抽采

关键信息

工业化国家的经验表明，良好的瓦斯抽采投入能够减少高瓦斯矿井由于瓦斯原因导致的停采时间，提供更安全的采煤环境，提高瓦斯利用效率以及更多瓦斯减排的机会。

总体来说，利用现有知识和技术，煤矿瓦斯抽采问题都可以解决。在采用了良好的瓦斯抽采实践后，或当前采用的技术仍然不能满足解决瓦斯问题时，才需考虑引近新技术或者进行技术创新。在引入任何新技术之前，都应对其进行严格的测试，以确保安全性不被打折扣，最佳实践得以贯彻。

合理的安装、维护、定期监测以及实施系统的钻孔计划，能够提高瓦斯抽采系统的性能。

在煤矿中，转运浓度处于爆炸范围内或接近爆炸范围的瓦斯气体混合物是十分危险的行为，应予以禁止。

5.1 瓦斯抽采及其面临的挑战

瓦斯抽采的目的是在产生高纯度瓦斯的源头、在其进入矿井巷道之前对其进行采集。出于监管目的，释放到通风风流中的瓦斯量不能超过系统将瓦斯稀释到规定的安全水平的通风能力。然而，社会强烈希望能够最大限度地实现瓦斯捕捉，这有助于提高安全性、缓解环境问题以及实现能源的回收利用。

瓦斯捕捉的方法有很多种。选择不合适的方法或者方法使用不当，将会导致瓦斯抽采效率的降低和进入的空气过量，形成浓度不高的抽采瓦斯，当这些瓦斯浓度处于爆炸范围内或接近爆炸范围时运输，就会产生危险。

5.2 全球通用的瓦斯抽采的基本原则

由于地质条件和开采条件各异，不同的煤田采用了不同的瓦斯抽采方法。

瓦斯抽采通常分为预抽采和后抽采两种技术。预抽采技术是指在煤矿开采启动之前将瓦斯从煤层中移除，而后抽采技术为捕捉由于开采扰动引起的岩层移

动、松弛和透气性增加而从周围煤层中释放出来的瓦斯及其他气体。附录 1 提供了最常见的瓦斯抽采方法的摘要。本章中描述的预抽采技术主要针对井工煤矿，对露天煤矿的情况主要在第 6 章讨论。

在一般地质条件下，利用良好的后抽采技术，通常能够在长壁区捕捉到总量的 50% ~ 80% 的瓦斯。在大多数情况下，抽采矿井中 50% 的瓦斯并不困难。即使是在最具挑战性的开采条件下，采用后抽采技术，通常可抽出 30% 或以上浓度的瓦斯，除非有极端情况的发生。采用预抽采技术，通常可抽出 60% 或以上浓度的瓦斯。

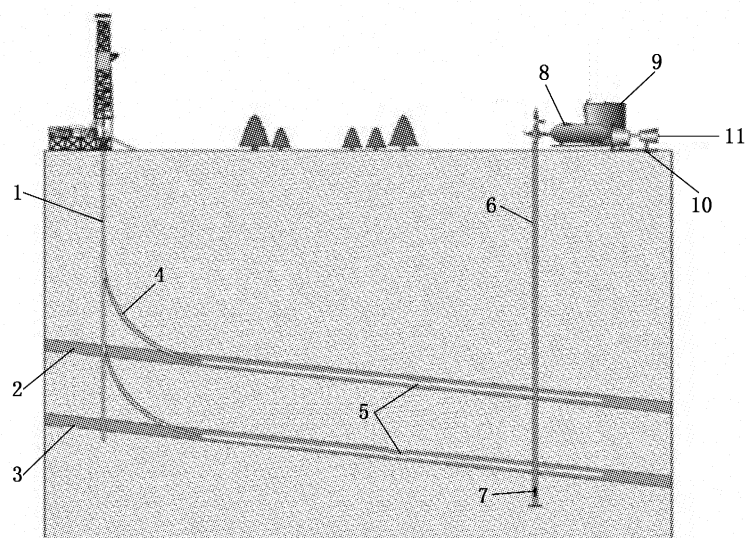
5.3 预抽采技术基础

预抽采技术通过在本煤层中钻孔或从地面钻孔来实现。如果正在开采的煤层是主要的瓦斯源，那么从工作面煤层直接进行预抽采，将是降低瓦斯含量的唯一手段。有时出于降低突出风险的考虑（参见案例 3），也有必要进行预抽采。在开采前进行预抽采，瓦斯抽采系统几乎不受岩层扰动的影响，通常可以提取出纯度相对较高的瓦斯。预抽采一般能够生产出稳定的、高纯度的瓦斯，前提是煤层透气性好、瓦斯含量充足。大量的瓦斯涌入掘进巷道通常表明本煤层具有中度或高度透气性，这样的煤层具有实施预抽采和瓦斯利用的潜能。

煤层的透气性直接影响煤层瓦斯抽采所需的时间。煤层的透气性越低，瓦斯抽采使得煤层中的瓦斯含量降至要求均值所需的时间就越长。另外，煤层透气性越低，煤矿开采前为了达到预期的瓦斯含量标准所需的钻孔数量就越多。抽采时间和钻孔作业成本决定了之后特定条件下预抽采的可行性。

在全球范围内，煤矿预抽采技术有多种形式。螺旋钻孔技术一般应用于井下 100 ~ 200 m 长度的本煤层钻孔。然而，对于 1000 m 或更长的钻孔，可以使用井下定向钻孔技术，从而提高抽采效率。此外，在矿井不太深的情况下，可以在地面进行大范围的煤层钻孔和抽采。预抽采煤层的透气性系数处于约 0.5 ~ 10 毫达西 (mD)（即大约 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 之间）甚至更小时，已证实可以采用地面至本煤层钻孔和抽采技术。预抽采和后抽采相结合的技术已在澳大利亚成功实施，这是一种地面至本煤层和井下至本煤层的定向钻孔技术。在澳大利亚的这个矿井中，瓦斯涌出峰值为 9500 L/s，而为实现长壁回采的高产高效，其瓦斯抽采效率应达到 80% ~ 85% (Belle, 2016)。由于地面至本煤层抽采系统的运营成本过高和效果欠佳，澳大利亚过去一直倾向于使用井下本煤层抽采技术 (Belle, 2016)。但是澳大利亚和美国 (Von Schonfeldt, 2008) 的经验表明，地面至本煤层抽采的技术也是可行的，该技术应优于井下本煤层钻孔技术，因为地面至本煤

层钻孔在煤矿开采前就可以进行作业，因此受到采动影响较小（Black 和 Aziz, 2009）。如图 5-1 所示为一个用于在开采启动前从煤层中抽采瓦斯的钻孔配置。图 5-1 中，在两个可开采的煤层中先打一个先导井，从先导井侧面钻两个侧井分别通到两个煤层。两条侧井到位后，再打一条竖井与之前的水平井对接，水和瓦斯从竖井中排出后，把先导井关闭或废弃。如图 5-2 所示为后抽采的替代方案，其中高低位钻孔、定向钻孔或导向钻孔（开采前的）也可以采用大体相同的配置。



1—导向井；2—煤层 1；3—煤层 2；4—造斜段，坡度 11°，间距 30.5 m；5—水平井；6—垂直井；
7—井下泵；8—气体分离器；9—采出水；10—压缩机；11—通往消费市场的天然气管道

图 5-1 从地面开水平钻孔采前预抽采示意图

对于高透气性 (>10 mD) 的浅层和中等深度煤层，从地表钻水力液压垂直竖井（也被称为“水力压裂井”），传统上应用于预抽采，主要应用在美国，非常成功。在美国东部，在不影响煤矿安全的前提下使用水力压裂法，但使用该方法之前，应谨慎确定该技术是否适用于具体的地质条件和采矿条件。

地面钻孔技术的优点是可以独立于采矿作业进行，应用的可行性取决于钻孔的深度、煤的特性以及地形状况。

5.4 后抽采技术基础

世界上的许多煤田，煤层透气性低（透气性 <0.1 mD），煤质软且有断层，预抽采技术并不适宜使用。还有些国家的浅层煤炭储量已几乎开采殆尽，采深不断增加，这种情况越来越普遍。在这些煤田中，有效的瓦斯抽采严重依赖于放顶煤引起的岩层裂隙，因为这些裂隙增加了煤层的透气性。

后抽采技术主要是将采矿扰动释放出来的瓦斯在其进入矿井风道或工作煤层上方（有时也会在下方）的扰动区之前将其截获。

在本煤层上方或下方有一个或多个煤层的时候，从这些煤层释放出的瓦斯量可能显著超过本煤层释放出的瓦斯量，这主要取决于煤层厚度和煤层的瓦斯含量。因此，与预抽采技术相比，后抽采技术往往可以抽采更多的瓦斯量。为了确保瓦斯抽采的高效和安全利用，需要有足够高的瓦斯浓度，这要求对后抽采系统的设计要更严谨、管理要更严格。煤层顶板和底板中瓦斯的赋存程度越高，后抽采就显得越重要。

英国高瓦斯、长壁后退式采煤且有高地层应力、有自燃倾向煤层，实现达产

背景情况：煤矿产能 100 万 t，采深 980 m，采高 2 m。煤层透气性超低，巷道具有严重的水平应力和底鼓现象。除此之外，开采煤层还易于自燃。该矿的相对瓦斯涌出量为 $50 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

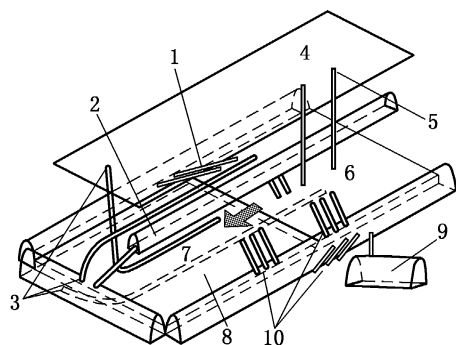
由于煤层的低透气性，并且在高水平应力下高低位钻孔成孔率低，导致瓦斯抽采困难且纯度太低。因此无法采用预抽采技术。另外由于煤层自燃风险高，且对预留煤柱的尺寸要求较大，阻碍了多种通风方式的使用。

解决方案：在工作面后设置专门的本煤层高低位钻孔，向下打 100 m 的钻孔以减少底板瓦斯涌出的风险。回采速度虽然很快，但是仍然有足够的时间连接每一个钻孔和瓦斯抽采管道。

更多相关信息，参见案例 1。

如图 5-2 所示为后抽采技术的透视图，该技术可以在长壁采区采煤完成后继续开展瓦斯抽采，图 5-2 显示了 3 种钻孔方式。

- 水平导向钻孔：从巷道或特别设置的“瓦斯抽采巷道”（即瓦抽巷）钻孔。钻孔可钻入周围岩层，采煤后引起周围岩层松动，岩层松动导致瓦斯进入该



- 1—通向长壁前顶板的平钻孔；2—瓦抽巷顶板钻孔；
3—较大直径的通向顶板、作业煤层或底板的斜钻孔；
4—地表；5—长壁向的垂直钻孔；6—采空区；
7—本煤层；8—底板；9—与瓦斯抽采系统相连的
密封的瓦抽巷；10—在长壁前/后通向顶部/
底部的小倾角钻孔

图 5-2 各种采后抽采钻孔方法

区域，松动岩层就成为瓦斯向上飘逸的通道，该区域成为瓦斯汇聚和收集点。图 5-2 描述了顶板上方岩层和底板向下到下部岩层的钻孔。

- 高低位钻孔：图 5-2 展示了多种钻孔方法，用于收集和抽采岩层松动后释放出来的瓦斯，顶板和底板的岩层松动是采煤去应力的结果。在开始回采前，提前将一排钻孔钻入采煤工作面的上覆岩层中，随着工作面的形成和随后回采面的向前推进，上覆岩层依次松动，因而该类型钻孔往往比采前预抽采的效果要好。总的来说，长壁

面后的高低位钻孔能够获得更高的瓦斯抽采效率，并且保持更高的瓦斯浓度。然而，在某些情况下，沿空留巷需要建垛墙，还需要密封采空区，避免空气进入，使采空区残煤自燃的风险降到最低。

- 从地面向采空区钻孔：通常在煤炭开采前，从地面钻孔到目标采空区的顶板处。随着采煤作业的推进，这一区域形成塌陷和裂隙，钻孔的下开口部分在局部真空的状态下，从底部负压抽采向上飘逸的瓦斯。必须注意瓦抽泵的负压不能过高，以获取最大抽采能力的同时，避免吸入过量空气导致瓦斯浓度降至 30% 以下。当采空区瓦斯浓度低于 25% 时，必须关闭该区域钻孔。

在长壁工作面上方或下方开一条瓦抽巷，抽采位于工作面扰动区内的瓦斯，是减少邻近煤层瓦斯涌入在采工作面的有效手段。

采煤后的瓦斯抽采策略，可以采用上述技术中的一种或者数种。后抽采方案的选择和配置取决于目标区域所需的瓦斯抽采效率、开采条件和地质条件，以及该技术是否适合于其最大的瓦斯流量及成本。图 5-2 描述的是后抽采的多种选项，高低位钻孔、导向钻孔、定向钻孔，这些钻孔配置方法与预抽采方法大体上是相同的。后抽采方法的缺点在于钻孔的成孔问题，在某些情况下成孔率不高可能会影响瓦斯的抽采。

一些瓦斯抽采方法，比如，穿过密闭墙，把瓦斯抽采管道插入采空区的方法，过量空气可能进入采空区，导致采空区瓦斯浓度被稀释到爆炸区间。这种或

类似的其他一些瓦斯抽采方法只能捕捉到浓度较低的煤矿瓦斯，效率非常低，还容易使得爆炸性混合气体在采空区末端处产生积聚，应该予以避免。这些瓦斯抽采方法在预防瓦斯层的形成方面通常也没有良好效果。

假定进入矿井的通风量保持恒定不变，瓦斯抽采效能降低会导致巷道内瓦斯浓度快速升高。因此，瓦斯抽采系统需要持续、仔细的监测和管理。

5.5 瓦斯抽采系统的设计考量

瓦斯抽采系统的设计抽采能力，应满足抽采煤矿所有来源的瓦斯最大总量（瓦斯和空气），包括工作面、移除了设备的废弃工作面和废弃（关闭）区域。

利用瓦斯预测法可以测算出通过管道传输的最大瓦斯纯量，先估算一个最低的瓦斯抽采浓度，正常抽采时的浓度肯定比这个估算值要高；然后再估算管道内最大的混合瓦斯流量。在真空泵全开的情况下，测算的瓦斯流量应在抽采系统能力设计允许的范围之内。

瓦斯质量由瓦斯抽采系统的设计决定，而不是由瓦斯本身固有的或自然的特性决定。出于安全和效率的综合考虑，低于 30% 的瓦斯纯度应被视为是不可接受的。井下系统瓦斯纯度的维持取决于封孔的质量、正确的联孔安装、对单个钻孔的系统调节，以及地面设施的抽吸负压等。增加真空泵负压将会加大瓦斯流量，但也会导致吸入更多的空气，进而降低抽采瓦斯的浓度。反过来，减少真空泵负压会减少总的混合气体的涌出量，但有利于提高抽采瓦斯的纯度。更重要的是，只有在对井下地质情况充分了解的基础上，才可以对地面真空泵的吸力和井下混合气体流量进行调节，还需要和井下工作面通风监管人员时刻保持沟通。

在规划、实施和管理瓦斯抽采系统时，应考虑以下因素：

- 钻孔、监测和监管的安全。
- 地层稳定及维护钻孔的必要辅助系统。
- 瓦斯钻孔配置，需考虑到后抽采顶、底板钻孔预期性能的差异。
- 抽采能力、管道直径、泵和辅助设施要求。
- 抽采管路的选址、安装和调试。
- 疏水和脱水设施。
- 抽采系统和辅助设施相关的运营管理和保养维护。
- 对钻孔、管道网络、地面抽放泵站的监控管理。
- 保护长壁回采工作面瓦斯管道，避免出现破裂。

澳大利亚高瓦斯涌出地区的高性能长壁作业

背景情况：澳大利亚的一个煤矿，一条新的长壁区，煤层厚度 2.8 m，瓦斯相对涌出量 8~17 m³/t，埋藏深度 250~500 m。瓦斯涌出的预测表明，仅煤层源的瓦斯涌出相对量 15~30 m³/t，总瓦斯流量 9.5 m³/s。

解决方案：迄今为止，该矿已成功地采用了传统的地面到采空区钻孔（位于上隅角采空区后部，孔径 300 mm，间距 50 m），以减少通风系统的压力。这一做法（采空区抽采加通风）使得瓦斯捕获率大幅提高，均值 75%、峰值 85%，提供了高纯度瓦斯（CH₄ 浓度大于 90%）。

更多相关信息，参见案例 3。

5.6 井下瓦斯管道基础设施

瓦斯管道基础设施建设应该采用合适的材料，如钢、玻璃钢（GRP）和聚乙烯（PE）均可用作瓦斯管道材料。

GRP 管道相对脆弱，所以不适宜在采煤作业区使用；然而，与钢管相比，这种管道易于安装和处理，使之成为地面主输送管道的首选材料。

在空间受限的区域，管道很容易受到物理损伤（例如，因巷道变形或无人车辆通过），这些区域应使用钢管连接，并使用柔性接头。

有些国家采用 PE 管，但这种管道在高温情况下有可能会软化，应避免在井下使用。一些国家的安全监管机构允许在通风良好的地方，并在具有资质的煤矿安全人员的监督下使用 PE 管；而在其他一些国家，则完全禁止使用 PE 管。此外，为降低静电放电的风险还需要采取防静电措施。

不管采用什么材料，即使是在监管最严格的矿井中，管道系统也是最容易遭到破坏的，管道系统的主要潜在威胁是采矿设备，即管道会受到运行中的采矿设备的挤压、碾压或撞击，包括矿车、绳索运输系统、机车及其货载，还有爆破活动，以及岩层的运动和顶板的坍塌。因此，井下瓦斯抽采系统的设计和操作应该考虑到系统完整性被破坏的风险。

5.7 瓦斯抽采系统的监测

应该使用手动或远程监控系统来确定瓦斯抽采系统的有效性。监测质量的好坏取决于传感器的可靠性、安装位置、维护、校准和使用方法。

单个钻孔、瓦斯管网以及地面瓦抽站都需要监测，监测的参数包括混合气体的流量、瓦斯浓度、压力和温度。为了使流量数据标准化，还应记录大气压力。在某些情况下，排放到矿井中的瓦斯，可能含有较重的气态烃，如乙烷和丙烷。这些碳氢化合物会破坏常规的红外气体探测系统的反应，导致对瓦斯的测量不准确。应注意选择能够校正气态烃干扰的监测设备，以确保测量的准确性。

应通过监测来评估已安装系统的实际性能与最初的设计性能之间的差异。

在包括美国在内的一些国家，监管机构要求监测、汇报、核实煤矿的温室气体排放情况。

6 瓦斯的利用和减排

关键信息

井工煤矿是人为甲烷排放的最大来源之一，通过实施减排的最佳实践可以大大减少这些甲烷的排放。甲烷对温室效应的影响是二氧化碳的 28 ~ 34 倍，是全球最重要的温室气体。

大部分井工煤矿产生的甲烷可以被利用或销毁，包括开发利用抽采瓦斯、燃烧多余的瓦斯，也包括风排瓦斯的利用或销毁。利用恰当的技术和市场条件，应该可以达到瓦斯近零排放的目标。

仓促上马煤矿瓦斯开采项目，有时会忽视必要的安全和工程标准，导致煤矿出现新的安全隐患。任何煤矿瓦斯项目的规划，都应避免增加井下新的风险。

6.1 煤矿瓦斯与延缓气候变化

减少瓦斯排放是全球重点关注的问题之一，其中煤矿发挥着非常重要的作用。甲烷排放占全球人为温室气体排放的 20%，而由煤矿排出的瓦斯占到人为温室气体总排放量的 8%，或约每年 4×10^8 t 的 CO_2 当量（USEPA, 2012；IPCC, 2014）。与煤炭燃烧产生的二氧化碳排放相比，虽然全球煤矿瓦斯的排放量所占比重相对较小，但是其影响是巨大的。就单一煤矿来看，其瓦斯的总排放量有可能相当可观，其总量可以相当于每年超过 1Mt 的二氧化碳排放量。值得一提的是，回收和利用煤矿瓦斯在技术上是可行的，在商业上也得到了验证，为煤炭工业短期和中期的温室气体减排提供了有吸引力的解决方案。

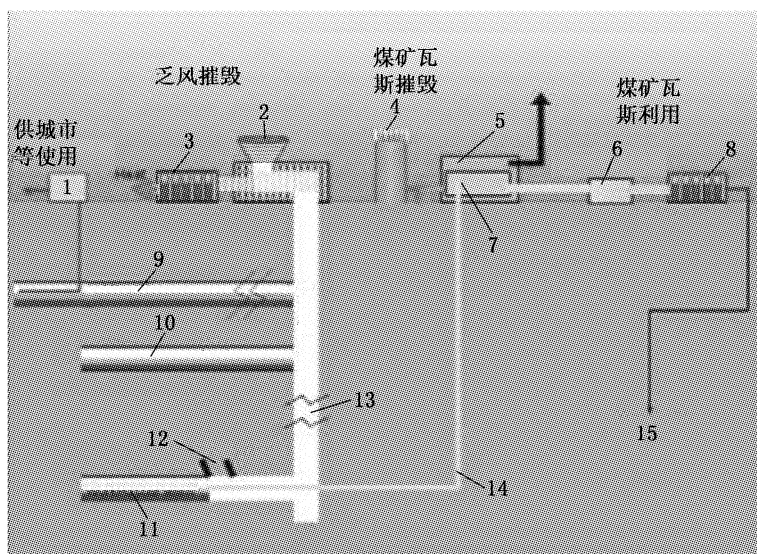
6.2 作为能源的矿井瓦斯

瓦斯抽采和利用可为煤矿企业经营带来可观收益。抽采出的煤矿瓦斯可以直接使用或通过瓦斯发电间接使用，实现其价值。另外，还可以通过能源销售或相关的成本节约为煤矿带来经济回报。此外，瓦斯利用产生的收益可以用于煤矿安全生产的再投资，从而增加瓦斯利用的内在价值。在全球更加关注气候变化的影响和采矿业的可持续性的同时，煤矿瓦斯的抽采和利用既是企业社会责任战略的

核心组成部分，其本身又是煤矿生产企业一个非常重要的优势。

6.2.1 井工煤矿瓦斯

现有技术能够优化能源回收，并消除很大一部分井工煤矿排放的瓦斯（图6-1）。采用良好的瓦斯抽采标准和实践是煤矿生产企业获得稳定且高质量瓦斯的基础，有助于推动实现低成本的瓦斯利用。由于开采情况的变化，使用的设备偶尔也会出现故障，或者需要停工检修，瓦斯的抽采量会出现波动，在上述情况出现时，瓦斯不能被完全利用，未被利用的瓦斯需要通过火炬燃烧来摧毁，以最大限度地减少排放。无法捕捉或利用的瓦斯由通风空气稀释后，以风排瓦斯的形式排放到大气中。减少风排瓦斯排放的技术已经被开发多年。一般来说，在技术上把浓度0.20%以上的风排瓦斯氧化是可行的，并且全球已经有一些商业项目投入运行。



1—煤层气；2—乏风；3—热；4—火炬燃烧；5—抽采站；6—瓦斯处理；7—瓦斯抽采；
8—发电；9—原煤煤层；10—煤层或开采过的煤层；11—采空区；12—钻孔；
13—瓦斯抽取；14—瓦斯抽采管道；15—国家电网

图6-1 瓦斯近零排放能源回收优化

安全必须始终作为井工煤矿瓦斯管理的最高优先等级。仓促上马煤矿瓦斯开采项目，有时会忽视必要的安全和工程标准，导致煤矿出现新的安全隐患。任何

煤矿瓦斯项目的规划，都应避免增加井下新的风险。

6.2.2 露天煤矿瓦斯

露天煤矿可以利用已开发并投入应用的煤层气开采技术捕捉瓦斯。露天煤矿如果在开采前不进行有效的瓦斯抽采，瓦斯将会自然排放到大气中，为了使成本效益更加明显，钻孔方案必须与煤矿的开采计划和时间计划相协调，也需要与煤矿生产作业相协调，确保瓦斯资源在矿井开采时有充足的机会得以回收，使煤矿投资物有所值。

露天煤矿一般是设计成露天矿坑或剥皮开采，无论哪一种设计都为瓦斯抽采提供了机遇，同时也充满了挑战。剥皮开采通常沿目标煤层走向布置作业层，把地表覆盖层剥离。随着开采的推进，从矿坑中剥离的泥土会堆积在已采过的区域（采空区）。采掘活动开始前从矿坑向目标煤层打垂直钻孔，钻孔不会受到采矿活动的扰动，为保证抽采效果，开采前的垂直钻孔数量一定要打足打够。抽采目标煤层瓦斯也可以直接从地面向目标煤层钻孔（图6-2）。如果把钻孔设计在正好位于扰动区域下方的目标煤层内，则这些钻孔尤其有效。随着地表覆盖层的剥离，下部煤层受到扰动而变得松弛，某种程度上是增加了煤岩的透气性，提高了抽采效率。

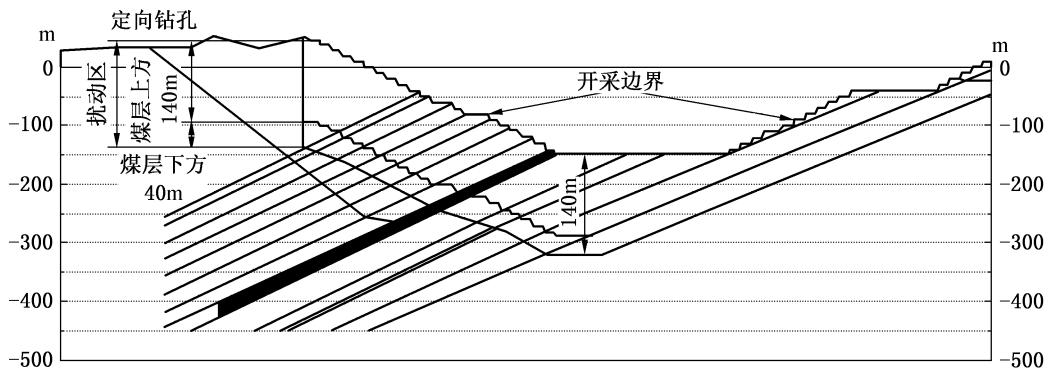


图6-2 通过条带矿井的横断面显示定向钻孔的可能位置

露天矿坑一般设计成一层层同心圆水平面或陆架，从最上层的地表开始挖掘覆盖层，逐步延伸到基坑底部，坑壁的作用是稳定边坡，防止边上的岩石脱落或坑壁垮落。运输道路位于陆架上，以便煤和（或）矸石可以被运送到地面并存放在矿坑的边缘。与露天剥皮开采的矿山一样，布置抽采钻孔的位置和时机必

须与露天矿坑的规划相协调。图 6-3 说明钻孔的布置如何与规划的矿坑进度相协调。

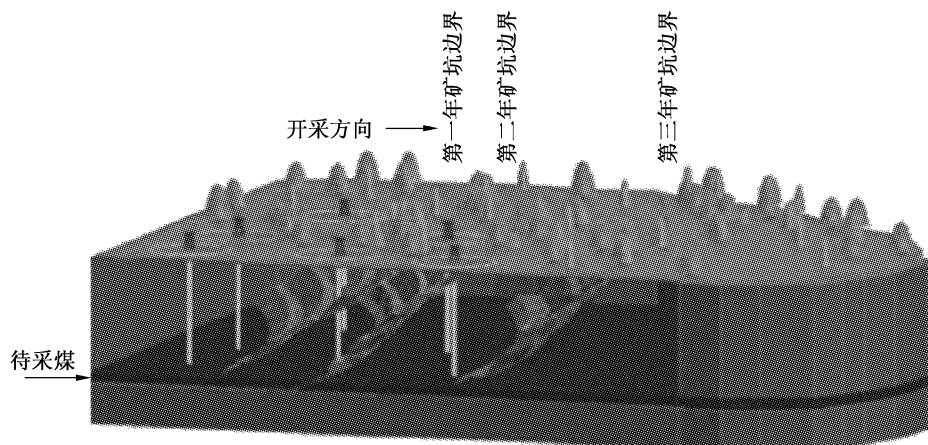


图 6-3 与露天煤矿规划扩建有关的垂直钻孔剖面示意图

开始采煤之前，就从地表垂直钻孔到目标煤层进行瓦斯抽采，美国的粉河煤田（Powder River Basin）一直使用这种瓦斯抽采方法。瓦斯成功抽采的关键在于露天煤矿运营者与相关煤层气产权所有者之间的密切协调。就上述露天煤矿而言，矿的所有权属于美国政府，为了鼓励天然气的生产，美国土地管理局降低了煤矿运营者需要缴纳的“特许权使用费”和“租赁租金”，提供这种激励措施的目的在于确保宝贵的天然气资源不会随着煤矿的开采而被丢弃。本案例中，由于给煤矿运营者提供了瓦斯抽采的投资激励，采煤的同时还可以额外生产出具有商业价值的天然气，从而避免了煤矿瓦斯向大气的排放（USEPA，2014 年）。

6.3 瓦斯利用的选项

浓度 30% ~ 100% 甲烷的煤矿瓦斯有多种潜在用途：①在钢炉、窑、锅炉和工业燃烧器中作燃料；②内燃（IC）发动机或发电机发电燃料；③注入天然气管道；④化肥行业作原料；⑤作为汽车燃料（液化天然气或压缩天然气）。如果不是在开采现场使用天然气，特别是对民用客户来说，有时需要建造储存罐，以确保满足用气高峰时的需求，并在气体开采不连续的情况下起到缓冲作用。建储存罐成本较高，除额外占用土地，还影响美观，而且存储的大量易燃气体混合物存在风险，因此许多成功运营的瓦斯电厂通常不建储存罐，而是选择瓦斯气与产气煤矿直接连接运行。

全球甲烷倡议 (www. Global Goo. org) 已经在世界各地正在运行和废弃的煤矿中确认了 200 多个煤矿瓦斯 (包括风排瓦斯) 利用项目。如图 6-4 所示为煤矿瓦斯 (包括风排瓦斯) 利用项目类型的分布, 其中, 发电项目占到利用项目的接近 50%。据统计, 发电项目提供了大约 709 MW 的发电能力, 非发电项目每年实现瓦斯销售 $2.716 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。2013 年度, 瓦斯利用项目减排了相当于 $2.94 \times 10^7 \text{ t}$ 的二氧化碳当量 (全球甲烷倡议, 2015)。

迄今为止, 大多数瓦斯利用的项目分布在澳大利亚、中国、捷克共和国、德国、波兰、俄罗斯、乌克兰、英国以及美国, 在墨西哥、哈萨克斯坦、土耳其、罗马尼亚和南非也有很多这样的项目。随着碳减排市场的完善, 碳减排在一些国家越来越受到重视, 这些瓦斯利用项目除了生产瓦斯气能源商品, 还产生碳信用商品或其他环保商品 (见第 7 章), 促进了瓦斯利用项目在许多国家不断增加, 特别是中国。一些瓦斯项目类型不产生直接效益, 其主要收益来源是碳信用 (例如, 瓦斯火炬燃烧、风排瓦斯氧化摧毁), 如果没有碳信用市场的支持, 此类瓦斯项目将增长乏力。

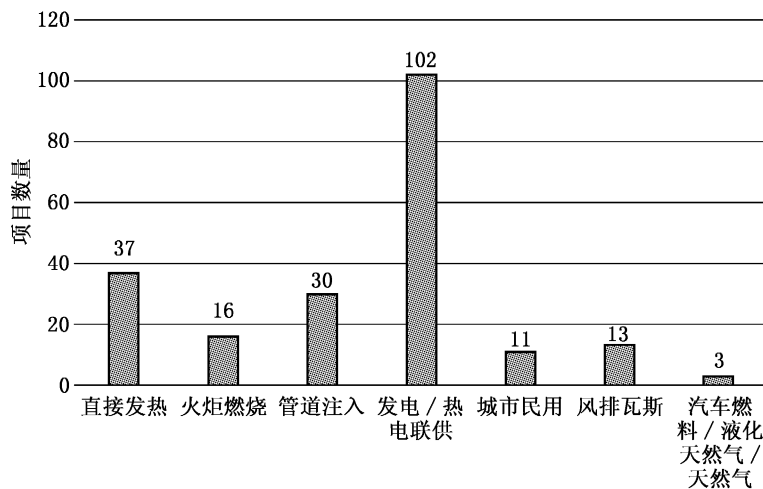


图 6-4 全球范围内煤矿瓦斯项目类型的分布

6.4 抽采瓦斯的利用和减排

抽采瓦斯的利用取决于所产生的瓦斯的数量和质量。历史上看, 瓦斯浓度至少需要达到 30% 以上才能被利用, 但近年来, 随着技术的发展, 市场上出现了

一种新型内燃发动机，这种发动机可以使用浓度低于 30% 的瓦斯作燃料。本书把中/高浓度和低浓度 (<30%) 的瓦斯利用作了区分，因为运输低浓度瓦斯混合气体是非常危险的，应该避免。

6.4.1 中 - 高浓度煤矿瓦斯

出于运输安全考虑，一般要求抽采系统的瓦斯流量和质量稳定，且最低浓度为 30%。有些瓦斯利用项目只有用高质量的、预抽采的瓦斯，商业上才是可行的，并不存在所谓的“最佳用途”。每个项目都应单独评估，依据其生产瓦斯的质量、数量、市场、矿井、运营和法律允许的条件等来评估。例如，在德国，利用煤矿瓦斯发电的主要驱动因素是电价补贴，以此鼓励煤矿上马瓦斯发电项目。美国拥有完善的天然气管道运输系统，这种系统得益于天然气价格补贴，推动了瓦斯项目的发展。表 6-1 对瓦斯的终端用途进行了比较，简要说明了其优缺点。获取更多信息，请访问信息的主要来源网站，包括煤层气推广计划 (CMOP) (<https://www3.epa.gov/cmop/>) 和全球甲烷倡议网站 (www.globalmethane.org)。

中国煤矿瓦斯发电/减排联产项目开发

背景情况：瓦斯抽放站（瓦抽站）抽出的瓦斯纯度不是一个固定值，有时会低于瓦斯利用和捕捉效率所允许的 30% 的最小值。由于长壁采煤周期的变化和不同煤层中工作阶段的不同，瓦斯量会有所波动，因此，应合理确定瓦斯电厂的设计能力，确保 85% 的发电能力，满足投资要求。项目的目标之一是优化能源回收并尽量减少温室气体排放。

解决方案：加强高低位钻孔的管理，改进封孔措施，提高瓦斯浓度。改进瓦斯抽采的辅助设施，更换高阻流的监测仪表，制定提高瓦斯捕捉的计划；实施预抽采计划，即提前在两个采面进行密集钻孔，捕捉高浓度的瓦斯。以上综合措施，为瓦斯抽采额外贡献了 23% 的抽采量，剩余部分瓦斯则由采煤过程中的顶板高低位钻孔贡献。

更多相关信息，参见案例 5。

6.4.2 低浓度瓦斯

不合适的瓦斯抽采方法和较差的执行标准都会导致瓦斯抽采捕捉效率低，吸入过量空气还会导致抽采的瓦斯浓度很低，有时会使瓦斯混合气体浓度处于爆炸范围内。本书强烈建议不要试图运输或使用处于爆炸范围内的瓦斯，以避免灾难

表6-1 煤矿瓦斯利用对比

用途	实施方式	优势	劣势
直接发电	通过燃气发电机发电，煤矿自用或并网输电	<ul style="list-style-type: none"> • 技术成熟 • 余热回收为矿区建筑物供暖、为矿工洗浴提供热水及用于井筒的加热 	<ul style="list-style-type: none"> • 电力输出不稳定性且有中断可能，因此，对电网可能会造成不利影响，需要矿主对设备进行定期维护 • 项目初期投资成本高
高品质瓦斯，通过管道输送实现商业销售	对煤矿瓦斯进行提纯，提升质量品质	<ul style="list-style-type: none"> • 可当作天然气使用 • 在气价高的地方，盈利可观 • 管道设施完善的地方，采用商业销售是不错的选项 	<ul style="list-style-type: none"> • 对管道瓦斯纯度要求高 • 提纯成本高 • 仅适用于预抽采的高品质煤矿瓦斯或者提纯后的煤矿瓦斯 • 需要有合适的输送管网
中等品质瓦斯，当地“城镇”生活或工业用热	浓度大于30%的瓦斯，供当地城镇区域供暖，工业使用，例如利用瓦斯产热烧窑	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料成本低 • 就近服务 • 对瓦斯品质要求不高 	<ul style="list-style-type: none"> • 需要对传输系统进行初期投资和运营维护 • 供气不太稳定 • 应对高峰需求时需要增加储气罐
作化工原料用	高质量瓦斯可用于炭黑、甲醛、合成燃料和二甲基醚的生产原料	未能使用的高质量煤矿瓦斯的另一个利用途径	<ul style="list-style-type: none"> • 加工成本高 • 不能享受清洁发展机制(CDM)碳信用交易补贴
煤矿生产用热	供暖、烹饪、锅炉、选煤烘干、矿工住宅采暖	<ul style="list-style-type: none"> • 余热利用，取代煤炭 • 清洁、低成本能源 	相对于商业外用，煤矿就地瓦斯余热利用收益不明显
机动车燃气	高品质预抽采的瓦斯可以制成压缩天然气或液化天然气使用	<ul style="list-style-type: none"> • 市场广阔 • 与高价汽柴油相比，更具竞争优势 	<ul style="list-style-type: none"> • 加工、储存、处理和运输成本高 • 提纯标准很严格

注：符合要求的项目，都存在取得碳信用额度、可再生能源额度或电价补贴收益的可能。

性的爆炸。灾难性的爆炸除了危及煤矿工人的生命安全，还对煤矿造成结构性损害，加大煤矿的运营成本。

6.4.3 抽采系统中低浓度瓦斯的提纯技术

多数情况下，提升煤矿抽采瓦斯（CMM）的品质，尤其是来自采空区的瓦斯，很有益处。重点是提高井下瓦斯抽采的标准，避免因后期提纯瓦斯而增加新的成本。提高抽采标准既能提供高品质的瓦斯，又可以强化矿井的安全。

采用瓦斯提纯技术也是提升瓦斯品质的方法。投资瓦斯提纯系统价格不菲，因此在安装提纯系统之前，应该非常小心地评估提纯瓦斯系统的成本，并权衡这样的成本增加对于煤矿瓦斯项目的目标实现是否值得。如果提升瓦斯品质是必须做的，那么最简单的解决方案是将低品质的采空区瓦斯与高品质的预抽采瓦斯相混合，以达到最佳的效果。另一种提升瓦斯品质的方法是清除煤矿瓦斯中所含的污染物（氧气、氮气、二氧化碳和一氧化碳，还有硫化氢），使用的基本技术有：①变压吸附（PSA）；②分子筛吸附（MSA）；③低温分离。

- 变压吸附：大多数变压吸附“脱氮”系统，在每个压力循环中，宽孔碳分子筛优先吸附甲烷，使甲烷在瓦斯混合气体中的比例随每个循环而增加。变压吸附系统的甲烷吸附率高达95%，该系统可基本实现无人值守运行。

- 分子筛吸附：分子筛吸附就是采用可调分子筛的变压吸附过程，其筛孔隙最小可调整到0.1 Å（电磁辐射波长单位，1 Å = 0.1 nm）。当瓦斯混合气中的惰性气体含量超过35%时，分子筛吸附将失去经济性。

- 低温分离：低温分离技术是一种规范且经济的提升瓦斯纯度方法，该技术使用一系列热交换器，先使高压瓦斯气液化，然后再把甲烷分离出来。在所有提纯技术中，低温分离技术的甲烷回收率最高，约为98%，但该装置价格昂贵，因此更适合大型项目。

《提升煤矿瓦斯品质，达到管道煤气标准》（美国环保署出版）：系统供应商的商业运营报告（USEPA-430-r-08-004）包含了关于提升煤矿瓦斯品质的附加信息。<http://USEPA.gov/cmop/docs/red24.pdf>。

6.4.4 火炬燃烧

如果煤矿瓦斯利用不具备可行性时，那么对煤矿瓦斯进行火炬燃烧销毁将是一个不错的选择。理想情况下，每一个瓦斯利用项目都应该配备火炬燃烧，在设施出现故障或者计划内维修需要临时关闭设施时使用，避免瓦斯直接排入大气。在矿井生产的初期，瓦斯的抽采还没有达到商业上的可行水平时，火炬燃烧煤矿

瓦斯可最大限度减少瓦斯向大气的排放，实现环境保护。

一些国家的煤炭企业和行业管理部门都不赞成火炬燃烧瓦斯，因为他们担心火焰可能会从抽采系统传导到井下，从而引起爆炸。实施火炬安全燃烧的最低要求是：统筹考虑火焰和雷管、密封件、传感器和其他安全管理，并将其纳入到严格的系统设计当中。煤矿瓦斯火炬燃烧已经在澳大利亚、中国、英国和美国等国家成功实施。

火炬燃烧可以是开放的“点天灯”式燃烧，也可以是封闭式（地面）燃烧，封闭式燃烧比“点天灯”式燃烧的投入大，摧毁瓦斯的效率比开放式要高。在“理想情况”下，两种方式摧毁瓦斯的效率差不多是相等的，可以接近98%~99%。但是当受到风和其他因素影响时，“点天灯”式燃烧的效率会急剧下降（阿尔伯塔大学，2004年）。而且，在很多情况下“点天灯”式燃烧是不被认可的。例如，高达九成的封闭式燃烧项目已经取得CDM执行委员会的承认，而“点天灯”式燃烧项目仅有五成得到承认（CDM执行委员会，2009年）。封闭式燃烧的燃烧效率和产生的减排量都是可以测量出来的。在美国加州，空气资源委员会默认封闭式的燃烧效率是99.5%， “点天灯”式的燃烧效率是96%（CARB，2014）。最后要注意的是，由于封闭式燃烧火焰不外露，能够更好地管理燃烧污染物，所以封闭式燃烧具有更大的优势。

6.5 低浓度风排瓦斯（VAM）的减排或利用

到目前为止，井工煤矿是煤炭行业中最大的瓦斯排放源，据估计，全球70%以上与煤炭相关的瓦斯排放都来自于风排瓦斯。在瓦斯浓度小于1%的情况下，煤矿风排瓦斯通常排入大气中。目前，以煤矿风排瓦斯为主要燃料源的技术应用，商业上是否可行取决于碳信用额、其他激励或补贴带来的收益。碳信用额交易对风排瓦斯项目的回报是积极正面的，据报道，目前的市场起步价格是10~15美元/t二氧化碳当量。

近年来，通过热氧化技术摧毁矿井极低浓度风排瓦斯的技术得到了大力发展。最初，这些热氧化技术的主要目的是减少温室气体排放，然而，热氧化技术与余热回收利用技术相结合以后，可以实现向煤矿及周边区域供暖，或将热能应用于余热发电机组，现阶段企业对利用热氧化技术进行余热回收利用的兴趣变得越来越浓。

目前市场上可用的两种氧化技术一是蓄热式热氧化器（RTO）技术，二是被称为热力逆流反应器（TFRR）和再生催化氧化器（RCO）技术，也被称为

催化逆流反应器（CFRR）。这两种方法都利用流逆过程来维持反应堆核心的温度，仅仅是所使用的催化剂有所不同。在应用于风排瓦斯之前，热氧化技术已经在商业和制造业的污染控制领域被广泛应用，特别是用于处理挥发性有机物、有难闻味道的其他空气污染物。在澳大利亚、中国和美国的一些煤矿，具有商业规模的风排瓦斯蓄热式热氧化器已经成功安装并运行，发挥了减排瓦斯的作用。在澳大利亚，风排瓦斯作为内燃机的燃料，利用蓄热式热氧化器技术，建设风排瓦斯坑口电厂，风排瓦斯和余热回收得到了全面应用。与此同时，风排瓦斯的再生催化氧化技术也已经完成了工业性试验，证明了其可行性。

在不添加外来燃气的情况下，目前浓度低于 0.2% 的风排瓦斯通常无法进行使用，然而，全球许多矿井的风排瓦斯浓度都在 0.2% 以下，业界正在对此展开技术研究，力争降低可使用浓度的最低门槛。使用风排瓦斯发电需要优化所使用瓦斯的浓度，并增加进入氧化装置的风排瓦斯浓度。方法之一是在风排瓦斯中添加其他来源的瓦斯，如来自采空区或预抽采系统的瓦斯，达到提高混合浓度的目的。如果考虑提升风排瓦斯混合浓度，由于存在爆炸风险，不要添加低品质（浓度 < 30%）的抽采瓦斯。浓度 > 30% 的高品质煤矿瓦斯如果用于发电，应进行项目可行性评估。

实施各类减排项目，除了实现有效的减排外，还需要考虑安全问题。具体到 RTO 蓄热式热氧化项目，瓦斯浓度处于爆炸下限之上时，即瓦斯在空气中浓度为 5% 左右时，安全问题会变得非常突出。人们已经认识到，由于影响煤矿正常生产且安全运行的因素众多，煤矿中经常会出现一些意外情况，导致风排瓦斯浓度升高。其实，只要有应用蓄热氧化技术的地方，无论在哪个行业，都存在类似的安全问题。在任何情况下，风排瓦斯减排项目的设备都不可以用来处理处于爆炸范围内的瓦斯混合气体，应该建立相应的预防机制，避免危险情况的发生。

自 20 世纪 70 年代以来，其他使用蓄热氧化技术的行业，是通过将预防和缓解措施相结合的方式来解决安全问题的。按标准程序，经验丰富的蓄热式热氧化器供应商都会根据 IEC 61511 和 IEC 61508（AS61511 和 AS61508）和其他国际标准进行风险评估和管理，制定工程技术标准体系，通过使用仪器仪表等手段，确保工业生产过程的安全。

中国风排瓦斯

背景情况：很长一段时间内，由于碳信用交易机制尚未建立，企业缺乏开展瓦斯减排项目的内在动机，风排瓦斯的利用和减排项目在中国一直没有作起来。

解决方案：新兴的清洁发展机制碳交易市场为实施风排瓦斯减排项目提供了金融驱动力。国有矿业集团与清洁发展机制项目开发商、领先的技术供应商共同合作，采用“单床无火”的蓄热式热氧化技术，设计、委托和运营商业风排瓦斯利用示范项目。河南郑州某煤炭企业，开发 RTO 项目，为矿工的淋浴和附近建筑供暖提供了热水。余热回收应用了蓄热式热氧化器技术，再通过“气-水”热交换器换热，从废气中回收余热。

更多相关信息，参见案例 7。

成熟的风排瓦斯系统供应商应作到如下安全保障：

- 对可能的不安全状况进行检测，检测到不安全状况时，关闭蓄热式热氧化器，并将风排瓦斯直接排空至大气。
- 确保在检测到任何不安全状况时，立即切断蓄热式热氧化器与煤矿井下的物理和电气联结。
- 确保主通风机扩散器与 RTO 管道系统及输送到减排机组再次联结时，不含有爆炸性瓦斯混合物。
- 设计管道系统时，通过设计不同的管道阻力，使一部分管道段内的混合瓦斯流速大于可能的瓦斯火焰传播速度，而另一部分管道段内的混合瓦斯速度大幅降低，以利于混合气体中夹带的粉尘脱落。
- 在到达蓄热式热氧化器之前，控制瓦斯的浓度，即回风中的瓦斯浓度最好不要超过 2.5% 的上限，以避免不安全状况的出现。

此外，有必要确保蓄热式热氧化器、再生催化氧化器和用来传输矿井风排瓦斯到反应堆的基础设施不会产生额外的“反压”，以免增加矿井主要通风机的负荷和功率消耗，包括增加瓦斯分析仪和其他一些安全设备（如避雷器，旁路系统）的功率消耗。

煤矿实施风排瓦斯利用项目时，应设计井下通风竖井瓦斯浓度和回风扩散塔瓦斯浓度的监测装置，即可在多个点分别监测。当回风瓦斯浓度略高于爆炸范围下限 2.5% 时，应当用新鲜空气进行通风稀释，当回风瓦斯浓度远远高于 2.5%

时，应使用旁路系统将从扩散器排出的高浓度瓦斯直接排空到大气中。为了防止高浓度瓦斯进入蓄热式热氧化器，旁路关闭装置必须设置在远离扩散器的位置，以便系统有足够的时间给测量装置和执行机构发出指令并作出反应。控制高浓度风排瓦斯流向蓄热式热氧化器的多个关闭装置，应该分别独立设置，确保高浓度瓦斯不会进入蓄热式热氧化器。

其他正在开发的风排瓦斯技术包括：催化单反应器（CMR）；低品质燃料涡轮机，据报道，该涡轮机可以使用浓度为 1.5% 或更低浓度的风排瓦斯；还有利用风排瓦斯与废煤粉作混合燃料的回转窑（Su, 2006）；另外，利用催化剂的 RCO 商业开发技术研究也在进行中，有制造商报告了一种单通道催化工艺的开发情况，该工艺可以在较低的温度下运行，并且具有比常规的蓄热式热氧化器具有更高的可用性，与蓄热式热氧化器类似，单通道催化工艺产生的热量可以被用来发电。

风排瓦斯减排装置的商业案例包括：由蓄热式热氧化器装置供应商 Biothermica 安装在阿拉巴马州 Jim Walters 资源公司的单机组蓄热式热氧化器装置；由 MEGTEC 公司安装在中国重庆市大通煤矿的六套蓄热式热氧化器装置组成的热水供应装置；由 DÜRR 公司安装在美国西弗吉尼亚州 CONSOL 能源公司 McElroy 矿的三套蓄热式热氧化器装置（图 6-5）。

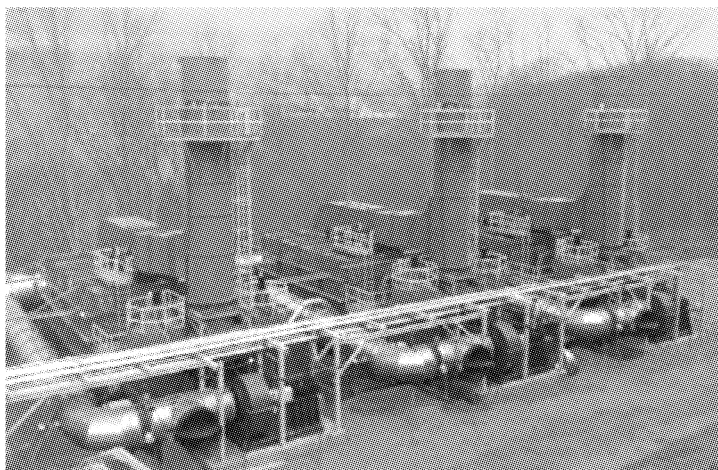


图 6-5 由杜尔（DÜRR）公司安装在美国 McElroy 矿的处理风排瓦斯的三套蓄热式热氧化器装置

澳大利亚风排瓦斯

背景情况：由于风排瓦斯风量大、瓦斯浓度极低等特点，之前，世界各地均未见开展大规模风排瓦斯利用或减排项目的先例。

解决方案：煤矿业主与制造商合作，该制造商曾在另一个叫作 Appin 的煤矿安装过一套 RTO 装置。具体做法是：安装四套 RTO 装置，有效利用这四套 RTO 作为特殊的炉子，产生的热能并入原有的循环蒸汽为动力的电厂，从而实现极低浓度风排瓦斯为燃料参与发电运行。该电厂（图 9-10）以风排瓦斯为燃料，设计处理能力 $250000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ （相当于 $4247.52 \text{ m}^3/\text{min}$ ）的风排瓦斯，达到矿井回风扩散塔排出总量的 20%。

该电厂风排瓦斯平均浓度按照 0.9% 设计。

2015 年前，由于煤炭和碳市场行情等原因，上面所述的风排瓦斯减排项目中，只有西弗吉尼亚的项目还在运行（图 6-5）。但是，杜尔（DÜRR）和福特曼（Fortman）报告，他们在中国新开发了若干个风排瓦斯/煤矿瓦斯（VAM/CMM）的氧化和利用项目。2015 年 5 月，首个项目正式在中国山西潞安矿业集团高河煤矿运行。共设计安装 12 套装置，瓦斯处理能力： 10^6 Nm^3 的风排瓦斯（折纯量）， $60000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 煤矿瓦斯（折纯量），RTO 余热发电能力 30 MW（图 6-6）。



图 6-6 安装在中国高河煤矿的杜尔（DÜRR）风排瓦斯（处理）系统

6.6 瓦斯监测

如果对抽采的瓦斯浓度可以进行精确地测量和控制，则瓦斯利用的效率和安全性可以得到明显提高。

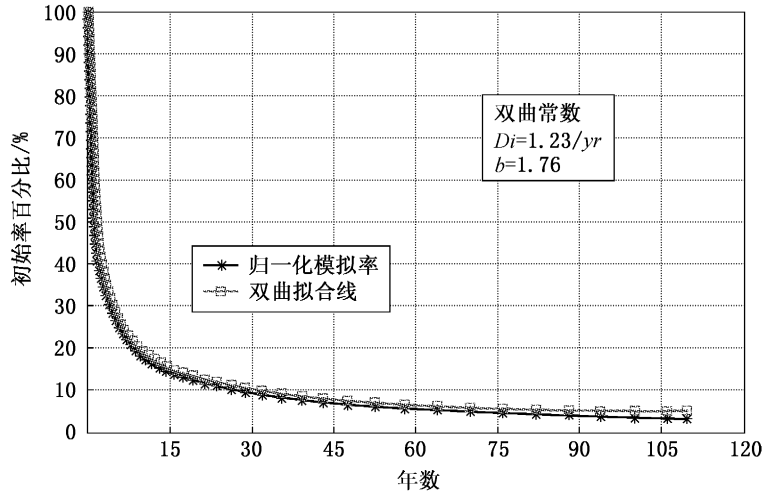
无论是作为能源使用还是实施火炬燃烧减排，如果能得到瓦斯浓度的准确数据，则瓦斯输送的安全性将会极大提高。而且，获益的远不止是安全性本身，瓦斯产品质量的商业利益或减排收益也会得到相应的提高。例如，瓦斯发电机对进气浓度的波动非常敏感，持续稳定的气源能够增加发电机的效率，同时减少运行和维护（运营管理）成本；利用天然气管道输送的瓦斯，必须满足非常严格的产品标准，否则就会被管道运营商退货，甚至是被处罚。

对于风排瓦斯项目来说，在项目设计之初，需要准确测量通风流量，以便于对风排瓦斯的总量和浓度及其波动情况进行评估，这一点至关重要。一旦项目正式运行，全面的监测系统将不断提供各类运行数据，对于申报了碳减排的项目，减排量的精准测量尤其重要。正常情况下，煤矿业主自行开展的瓦斯测量主要是出于煤矿安全原因，或出于优化通风系统的考虑。要连续对风排瓦斯排放情况进行监测，瓦斯分析仪要持续或定期采样测量，与温室气体减排有关的“议定书”多处条款都提到了这些测量要求。

6.7 关停和废弃矿井中瓦斯的利用

当煤矿井下停止产煤时，受开采活动扰动的地层内残煤中的瓦斯有一个解吸过程，瓦斯气体仍会继续流入井工煤矿作业区。对于高瓦斯矿井，这个解吸过程可能会持续多年，但是煤矿关闭后其解吸速度会迅速下降。即使关闭矿井的作业区被地下水淹没，水退去以后解吸过程还会恢复。因此，煤矿所有者可能面临潜在的长期责任，包括：瓦斯逸散到地面形成爆炸风险，对矿区公众造成危害，以及持续的温室气体排放。抽采或消除关闭井工煤矿中的瓦斯，有助于减少潜在危险、减少排放，甚至还可能创造额外收入。工作矿井和废弃矿井密封区域内的瓦斯，虽然瓦斯管理技术和优先等级不同，但不存在本质区别。

如果打算从一个废弃的矿井中开采瓦斯，强烈建议对瓦斯预计产量进行评估，评估时要考虑到封闭矿井内会出现地下水涌入的可能，导致瓦斯抽采活动不得不提前退出。目前已经有基于科学预测的多种方法，可以评估出废弃煤矿的瓦斯储量、瓦斯涌出的衰减量和可抽采量（美国环境保护署，2004；Lunarzewski & Creedy, 2006；Lunarzewski, 2009）。如图 6-7 所示为一个典型的通风条件下、废弃但未被水淹的高瓦斯矿井瓦斯衰减曲线。



(数据来源: 2004 年美国环境保护署)

图 6-7 废弃高瓦斯矿井的瓦斯衰减曲线和瓦斯储量潜力
 (按年度绘制的衰减曲线)

7 成本和经济问题

关键信息

全球瓦斯抽采系统的安装和运行实践得到了长足发展，使得煤矿瓦斯利用业务需求更加强劲，瓦斯的利用领域越来越宽，成功的利用实践也使煤矿业主获得了潜在的商业回报和实在的运营利润。一些特殊的瓦斯利用项目要求高品质、高浓度的瓦斯，而进行瓦斯提纯和提浓往往意味着比较高的额外成本投入，在此情形下，可以通过改进井下瓦斯抽采系统，实现抽采瓦斯的品质提升，从而避免增加与瓦斯提纯相关的额外高成本。

7.1 瓦斯抽采的成本与经济

在现代煤矿中，从获得所期望的金融投资回报角度来看，持续高水平的煤炭生产是必不可少的。加快采掘速度、提高煤炭单产往往会导致瓦斯涌出量的增加，但不能仅仅因为有瓦斯浓度超限的可能就轻易改变正常的煤炭生产计划，也不能仅仅因为有瓦斯相关事故的可能就牺牲煤炭生产安排。

违反瓦斯安全标准可能导致被罚款，如果造成爆炸事故，还会危及人的生命安全。任何人的生命安全受到伤害都是我们无法接受的，应该尽力避免。致命事故除了直接影响矿工家属外，还会对所在煤炭公司及其员工造成损失，这些损失可能远超出金钱范畴，例如刑事责任、赔偿、停产和可能导致的违约罚金等。大型煤矿单起伤亡事故造成的损失从200万美元到800万美元不等，其中包括停产损失、诉讼费、赔偿以及惩罚性罚款。重大事故的花费仅在罚款和处罚方面就可能高达2.2亿美元。在一些国家，矿井重大事故会导致煤矿停产一段时间，直到煤矿监管机构完成调查工作，并确认不会再发生类似事故。重大事故也可能导致煤矿永久性关闭。

瓦斯抽采成本是煤矿整体生产和运营成本的不可分割部分。因此，对有效的瓦斯抽采活动进行投资正当合理，这些投资可以确保井下作业在安全、合法的前提下完成生产计划目标，这一点在财务数据上也能体现出来。在地质条件允许的情况下，一个现代化高产高效矿井年产量可以达到 $(2 \sim 5) \times 10^6$ t，假定煤炭价

格为 60 美元/t, 那么, 任何由于瓦斯制约因素耽误了生产, 导致煤炭产量减少 10%, 将意味着煤矿所有者 1200 万 ~ 3000 万美元的年收益损失。

采用良好的瓦斯抽采系统, 或者减轻了井下通风压力, 从而降低了通风功率和相应的电力成本, 或者有利于增加煤炭产量, 从而提高了煤矿整体收益。总之, 在瓦斯抽采方面增加的投入, 可以在其他方面得到回报。

7.2 瓦斯抽采成本的比较

瓦斯抽采系统的成本取决于许多因素 (如设备、服务、劳动力、地面通道、征地), 并且不同国家之间差别明显。由于各个国家的地质和开采条件不同, 不可避免地造成了这些成本差异, 且差异较大。即使在同一个国家内部, 地质和采矿条件不同, 各矿的瓦斯抽采成本也不同。表 7-1 所示为采用不同瓦斯抽采方法的吨煤相对成本比较 (以 2015 年的价格计算)。基础数据来自中国 and 澳大利亚, 假定的工作面基准条件是: 高瓦斯长壁采区, 长 2000 m, 宽 250 m, 井深 600 m, 煤层厚度 3 m, 矿井规模为年产量 $(2 \sim 5) \times 10^6$ t。

表 7-1 采用不同瓦斯抽采方法的吨煤生产成本比较 (以 2015 年的价格计算)

瓦斯抽采方法	主要采用技术	主要成本构成	主要成本变量	吨煤成本美元/t
井下预抽采	煤层中沿采面长度定向长钻孔	专业钻机和设备	钻孔直径和长度	0.5 ~ 3.7
	跨采区旋转头钻机	旋转头钻机和设备	钻孔直径和长度	0.7 ~ 4.6
从地面向煤层的钻孔预抽采	垂直竖井和常规压裂增透	钻孔总承包, 下套管和压裂服务; 对废弃采空区进行封闭	钻孔深度和所穿透的煤层数量	1.4 ~ 11.1
	地面到本煤层水平打钻井	钻孔总承包、套管和专业化的井下导向钻孔作业; 对废弃采空区进行封闭	钻孔深度和水平井总长度; 钻孔出现困难时成本会迅速上升	1.2 ~ 9.3
井下后抽采	井下高低位钻孔 (从已有的巷道打钻孔)	旋转钻机及设备	钻孔直径和长度	0.1 ~ 1.9
	瓦抽巷	新掘进一条用于瓦斯抽采的巷道	瓦抽巷的长度和断面尺寸 (本煤层上部或下部)	0.4 ~ 13.0

表 7-1 (续)

瓦斯抽采方法	主要采用技术	主要成本构成	主要成本变量	吨煤成本 美元/t
井下后抽采	向上(或向下)打钻孔 或导向水平钻孔	专业钻机和井下导向钻探设备	转弯半径处打钻孔比较困难	0.6~4.6
地面后抽采	采空区钻孔	钻孔总承包, 套管; 采空区密封	深度	1.6~17.6

注: 表中为高度概括的数值, 并没有考虑地面抽采成本随深度的变化。

选取的瓦斯抽采方法必须符合采矿和地质条件。比如, 井下打高低位钻孔时, 如果开采层的顶板上部只有少量煤岩层时, 向本煤层上部打钻效果就很不理想。随着采深的增加, 从地面向开采煤层打钻孔成本可能很高, 因此, 直接从井下打钻孔将更具有经济吸引力。

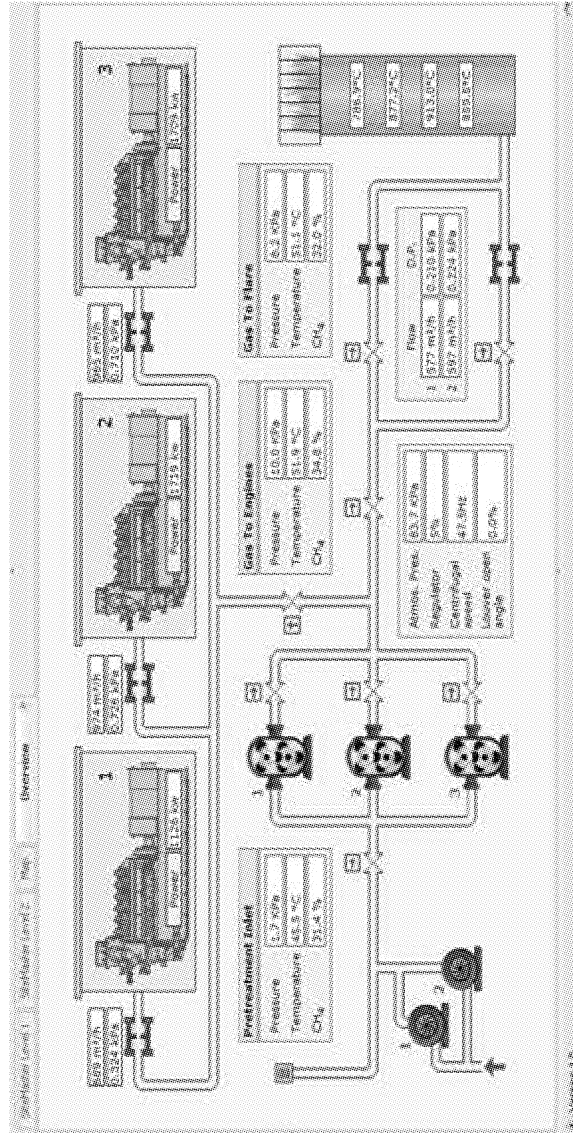
在高瓦斯矿井中, 要安全实现煤炭生产高产高效, 可能需要多种方式的组合。地质条件越复杂, 瓦斯抽采的成本越高。在保证井工煤矿安全的前提下, 瓦斯抽采系统设计应有足够裕量, 即允许某个钻孔或某条瓦抽巷失效的情况下, 安全生产活动不受影响。据估算, 按纯瓦斯计, 抽采井下煤矿瓦斯的成本范围是 0.07~0.28 美元/m³。

7.3 瓦斯利用的成本与经济

利用抽采瓦斯发电需要额外的投资, 但发电本身也能增加收益, 降低矿井的用电成本。关于财务问题, 投资发电项目时, 需要考虑煤矿的瓦斯品质是否适合, 瓦斯供应是否稳定, 还需要考虑项目的机会成本和融资渠道等。

对于煤矿瓦斯热电联产电厂(包括瓦斯提纯在内的所有设备)每兆瓦的电力(兆瓦级电能)投资成本约为 100 万~150 万美元, 采用国际标准的高效发电机。对于热电联产电厂的整个生命周期来说, 根据平均发电量得出运行与维修成本约为 0.02~0.025 美元/(kW·h)(2008)。

瓦斯电厂的财务状况取决于以下因素: 可用的瓦斯量, 发电转换效率, 设备的可靠性(即发电小时数), 是否有匹配的电力用户, 所发电能否并网, 煤矿自用电力和余热的折算收益。鉴于不管在什么情况下的煤矿瓦斯抽采都与煤矿安全生产息息相关, 因此一般不考虑抽采瓦斯的边际成本, 尽管在某些情况下, 为了提高瓦斯抽采量或瓦斯品质, 可能会有一些成本的增加。瓦斯发电项目成功的关键是把良好的项目设计、经过验证的设备、稳健的运行与维修方案以及实时性能监测组合起来。图 7-1 所示为某瓦斯电厂的效能监控系统。



(由福尔马克电子和辛迪克可持续自然资源公司提供)

图 7-1 某瓦斯电厂的效能监控系统

(煤矿瓦斯发电和减排: 三台瓦斯发电机组和一个瓦斯燃烧减排系统, 实时监测运行, 显示煤矿瓦斯的流程图和运行参数)

确定煤矿瓦斯电厂的规模时，必须考虑煤矿正常开采情况下，产生的瓦斯量和瓦斯浓度是会变化的，必要时，还必须提高瓦斯抽采标准以确保抽采出的瓦斯可以被安全地利用。瓦斯电厂的发电装机容量与煤矿可获得的瓦斯量相匹配，一般按抽采瓦斯量峰值的85%考虑，峰值情况下部分瓦斯不能被发电机组全部利用，可以实施“火炬燃烧”以最大限度保护环境（图7-2）。一些瓦斯电厂运行状况不佳，很大原因是装机容量设计过大，可提供的瓦斯气量不足，难以满足瓦斯电厂年7500 h的经济运行时长。因此，机组设计容量绝对不能以瓦斯气体供应峰值为计算基准，而应以瓦斯连续可用的基本量为基准。

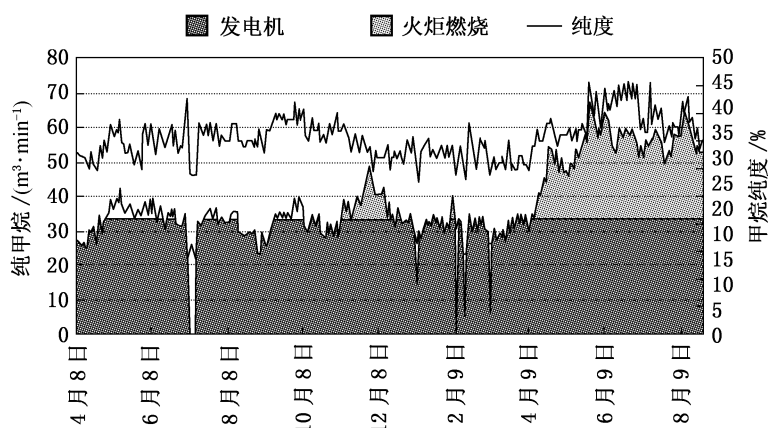


图7-2 利用瓦斯发电和燃烧减排
(根据瓦斯流量和纯度的波动，优化煤矿瓦斯的抽采能力和利用水平)

当后期煤矿瓦斯的抽采量提高以后，瓦斯电厂可以相应增加一些机组。瓦斯量和发电装机容量的大致匹配关系是：4 m³/min 的瓦斯纯量可以满足1 MW 的发电机组需求。

煤矿瓦斯除了当作燃料发电之外，还有其他广泛的用途，例如用作民用燃气，用于锅炉制热，以及如第6章所述的用作化工生产原料。因此，瓦斯利用的经济性很大程度上取决于把它用在什么地方，普遍的观点认为瓦斯用于发电难度比较大。

煤矿排放的瓦斯绝大部分是以风排瓦斯的形式排入大气，使用风排瓦斯必须遵循一定的原则。风排瓦斯氧化过程中释放的热量，可以用来产生蒸汽进而发电。浓度0.5%、风量35 Nm³/s 的风排瓦斯用于乏风氧化发电机组，可与差不多

1.3 MW 的发电装机容量相配套。为了保证风排瓦斯发电的持续稳定，常常需要在风排瓦斯中添加高品质的抽采瓦斯，以此来优化风排瓦斯发电的能效。从发电成本看，风排瓦斯发电的单位发电成本是传统抽采瓦斯发电成本的两倍以上，但从“环境机会成本”看，投资风排瓦斯发电可以实现碳减排增加 4~5 倍，投资其他项目则未必会有碳减排。目前，在税费补贴不到位和现有电价情况下，如果没有长期的碳减排收益保障，风排瓦斯发电不具有商业可行性。此外，改进瓦斯抽采系统，降低抽采瓦斯的成本，增加利用抽采瓦斯发电的比重，也可以减少风排瓦斯。

发电电价、“碳信用”的价格，以及其他激励措施，如免税，在很大程度上决定了利用煤矿抽采瓦斯或风排瓦斯发电的经济性。

中国三大煤矿企业的煤矿瓦斯利用和瓦斯减排

背景情况：三大煤矿总产能 1.4×10^7 t/a，瓦斯抽采量 $140 \text{ m}^3/\text{min}$ ，直接排入大气。煤矿方希望安装现代化的瓦斯发电机组，并利用先进技术实现最大限度的发电，但是其缺乏利用煤矿瓦斯发电的经验，它们的瓦斯浓度和瓦斯流量也不稳定。

解决方案：该矿业公司与具有丰富煤矿瓦斯利用经验的国际开发商合作，在 3 个高瓦斯煤矿建设和运营煤矿瓦斯热电联产项目。国际矿业管理团队提供全部设备，中方提供土地、负担设计费和土建工作。作为联合国气候变化框架公约下的清洁发展机制项目，三个利用项目都成功获得注册，年减排超过 10^6 t 二氧化碳当量。

更多相关信息，参见案例 6。

7.4 碳融资和其他激励措施

在一些国家、地区或省份，碳减排信用额（ERCs）提供了一种额外的融资选项，用于补充传统的银行贷款或私募股权投资形式的项目融资。在澳大利亚、加拿大、中国、欧盟、哈萨克斯坦和美国等主要煤炭开采国，产生了多种形式的温室气体“碳控排放交易”项目，此外，允许把煤矿瓦斯的利用列入温室气体的“自主减排”补偿目录。2014 年 4 月 25 日，美国加利福尼亚空气资源委员会（CARB）批准了最新的煤矿瓦斯利用补偿议定书，其中包括，2020 年之前，在运行的或废弃的井下煤矿以及露天煤矿均给予瓦斯减排补偿。2014 年 6 月 4 日，

中华人民共和国国家发展和改革委员会新批准了贵州某煤矿瓦斯利用项目为中国“自主减排”项目。这些碳减排项目所产生的“国内核证减排量”，可以在中国境内的七个碳排放试点交易所中进行交易。

温室气体碳减排项目获得补偿的前提是：项目类型必须在补偿名录内，并完成注册登记。所有注册的减排补偿项目必须具有真实性、可测量性和可验证性。对于一些项目来说，如在中国实施的“自主减排”项目，要求项目要具有充分的“额外性”，即使用一套“方法论”来判定项目是否满足条件，如同清洁发展机制条款中对“碳信用”的认定一样。煤矿业主要对项目的“额外性”进行详细的论述，说明该减排项目如果按传统的做法，在技术和融资方面都存在困难；而且，如果没有项目减排的“碳信用”补贴，煤矿业主宁愿放弃实施该减排项目。一般来说，项目的减排资格认定和“额外性”认定工作发生在项目早期阶段，这类认定工作意味着项目煤矿业主或项目开发者需要多投入一些人力和财力成本。

或者，温室气体项目还可以使用标准化的“基于效果”或“基于类型”的认定补偿方法，从而减少对每一个项目都进行是否具备“额外性”的论证和验证成本。建立标准化的方法论进行投入计算应该包括煤矿业主方前期的研发支出。煤矿开采实践千变万化，因而，试图在跨区域、大范围内建立一个统一的“方法论”也有困难。在美国，“加州空气资源委员会”和“气候行动储备”所采用的是“基于类型”的标准化方法论。

其他资金支持瓦斯利用项目的激励措施包括赠款、税收抵免、绿色投资计划和上网电价补偿计划（例如在德国和捷克共和国）。在没有这些额外的激励措施的情况下，碳融资已经被证明是一种有效的市场化工具，可以触发煤矿瓦斯项目的实施，特别是那些仅仅是单纯销毁瓦斯的项目，例如风排瓦斯项目。作为鼓励减排的政策工具，在澳大利亚和世界银行，“按项目效果进行奖励”也越来越受到关注。

碳融资能够带来杠杆效应的基础是：一个标准单位的碳减排量相当于一吨二氧化碳。这样计算的话 70 m^3 的瓦斯大约相当于一吨二氧化碳（假设全球变暖潜力的潜能值为 21）。计算时必须考虑通过销毁瓦斯以及每吨瓦斯燃烧所释放的 2.75 t 二氧化碳的收益。粗略估计，装机 1 MW 的煤矿瓦斯发电机组，使用 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 的纯瓦斯排放量每年可减少 30000 t 二氧化碳排放量。根据常规的系统运行时间和效率， 1 MW 的煤矿瓦斯发电机组比同等功率的风力发电机组减排量多七倍。

在选择利用碳融资杠杆和/或其他激励措施之前，要考虑的问题包括信贷机

制、流程和交易成本、时间、复杂性、当地规则以及减排信贷价格的不确定性。完全按照温室气体注册中心的要求登记碳补偿具有一定的难度，可能需要一些专业指导，特别是在项目设立、初步验证和验证期间。

根据《京都议定书》2008—2012年实施的清洁发展机制，允许发达国家在发展中国家应用已批准的方法开发和申请核证减排量。2005—2012年，该机制推动了中国境内128个煤矿瓦斯项目的开发，并获得中华人民共和国国家发展和改革委员会的批准。并非所有项目都符合核证减排量，由于“京都议定书”规定的内容2012年到期，这个国际上唯一可以进行碳交易的市场逐渐萎缩，核证减排量的市场价格急剧下降。尽管如此，清洁发展机制的激励措施加强了中国煤矿瓦斯产业的发展，带来了国际投资，推动了瓦斯抽采项目的发展和先进的瓦斯技术的应用。自2012年以来，清洁发展机制不再适用于中国新增的煤矿瓦斯项目。不过，中国自身启动了国内七个独立的省级温室气体减排试点交易所。通过类似于清洁发展机制的审定过程，来管理中国内部的核证减排量交易，最终的仲裁者是中国国家发展和改革委员会。中国政府计划在2016年引进国家碳排放交易体系并到2020年实现全面运行。这是全球最大的碳交易市场，可以为在中国扩展煤矿瓦斯项目提供大量机会；然而，中国现有的环境标准强制要求浓度30%以上的煤矿瓦斯必须予以利用，换句话说，只有低浓度瓦斯的利用项目才能被认定为核证减排量，意味着30%以上浓度的瓦斯利用不具有额外性。尽管中国政府计划通过限制煤炭行业的增长来降低对煤炭的依赖性，但在短期内煤矿会继续成为温室气体排放的主要来源。2014年，碳减排价格在中国几个试点交易所之间差别很大，每吨二氧化碳从3.2~10.5美元不等。未来一段时期，预测中国核证减排量平均价格大概率在3.2~6.5美元之间。

加州空气资源委员会负责的加州瓦斯捕获交易计划，提供了区域内实体（如发电厂）的温室气体减排补贴。加州空气资源委员会已声明，只要煤矿瓦斯捕捉项目符合补偿协议，就将煤矿瓦斯减排视为符合条件的补偿类型。该协议可适用于美国的井工煤矿、露天矿和废弃矿井，但从运行中的煤矿抽采出瓦斯并通过管道直接销售的被认为是“正常生产经营”，不具有“额外性”，因而不能享受补贴。第一个报告周期将在2020年到期，据报道，2014年每吨二氧化碳减排量的补贴价格为8~10美元不等。加州空气资源委员会于2014年与魁北克温室气体减排计划正式挂钩，并与墨西哥、哈萨克斯坦和中国的减排计划代表举办了研讨会。

相对于清洁发展机制（CDM）这种带有强制性质的碳交易，国际上还有一些“自主减排”的交易机制，自主减排的项目可以在“自主减排”机制下登记注

册、计算相应的“核证减排量”，并进行交易。只是“自主减排”的碳交易市场规模较小，交易价格也比较低（每吨二氧化碳 1~3 美元）。通过买家和卖家双边协商，2014 年美国曾卖出每吨二氧化碳 5 美元的价格。

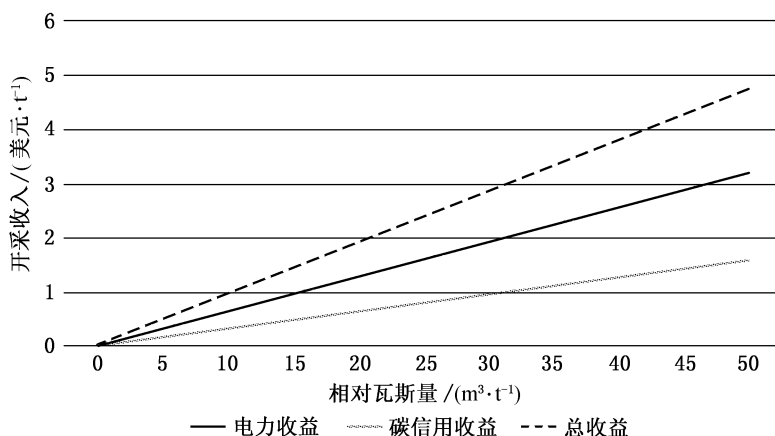
在北美，有许多“温室气体减排计划”对煤矿瓦斯的利用项目进行支持。其中“气候行动方案”对美国井下煤矿瓦斯的利用进行协议补偿；“核证碳标准计划”则对全球井工煤矿、露天矿和废弃矿的瓦斯利用项目进行协议补偿。“美国碳注册计划”对国际瓦斯利用项目进行补偿，该机构完全采用 CDM 清洁发展机制 ACM0008 条款。

一座瓦斯热电联产的电厂，以运营时间 10 年算，每减排 1 吨二氧化碳相当于为电厂总投资节省了 3~5 美元。与项目产生的“碳信用”有关的成本支出包括：相关文件的准备、批准、碳减排量的核实、有关劳务成本、用于瓦斯利用或销毁的设备投入及其维护费用。

例如，一个中等瓦斯的矿井（瓦斯相对涌出量为 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤矿），瓦斯利用后的净二氧化碳排放量为每吨煤 0.040 t，而一个超高瓦斯矿井（相对涌出量为 $40 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤矿），二氧化碳排放量为每吨煤 0.158 t。这个数据的假设前提是煤矿瓦斯的抽采率达到 40%，而且抽采瓦斯的利用率达到 80%。如果没有重大地质或采矿条件限制，且能够较好地采用最佳实践方法和标准的项目，上述抽采和利用水平是最保守的估计。还用上面的例子，如果一个中等瓦斯矿井每年生产 $4 \times 10^6 \text{ t}$ 煤炭，那么采用瓦斯抽采和利用，年减少的二氧化碳的排放量约为 $1.58 \times 10^5 \text{ t}$ ；同等产量的超高瓦斯矿井，采用瓦斯抽采和利用后，年二氧化碳减排量约为 $6.33 \times 10^5 \text{ t}$ 。

碳市场和碳交易时机决定减少二氧化碳排放量的实际价值。2015 年美国碳市场二氧化碳的价格总体上介于每吨 6~10 美元之间。按照减排购买协议（ERPA），每吨二氧化碳 8 美元的价格计算（40% 的瓦斯捕捉效率和 80% 的利用率），如果投资一个年产量为 $4 \times 10^6 \text{ t}$ 的中等瓦斯含量的（即 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ ）煤矿，且瓦斯量比较稳定，则其年综合收益大约有 301 万美元，包括：瓦斯利用产生的碳减排信用交易收益 130 万美元、发电收益 175 万美元（ $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 纯瓦斯，可装机容量 5 MW，单位电价 5 美分，年运行 7000 h）、天然气销售收益以及其他相关联的成本节约收益。图 7-3 显示了电力和碳信用（ERC）销售产生的以吨煤模拟计算的收入，横坐标为瓦斯相对量，用 m^3/t （纯量）表示，纵坐标为以吨煤计算的分项收益和总收益，用 US\$/t 表示。如果以每吨碳信用的中位价格 8 美元计，则减排收益对总收入的贡献是 33%。如以低位价格 6 美元或高位价格 10 美元计，则减排收益对总收入的贡献分别是 27% 或 38%。煤矿瓦斯发电项目

的经济吸引力当然也取决于项目的资金投入和运营成本。



(由辛迪克可持续自然资源公司提供)

图 7-3 煤矿瓦斯发电的双重收益

(不同瓦斯量下的吨煤收益: 电力收益、碳信用收益)

要获得比较高的实质性回报, 高瓦斯矿井是最好的。一个年产煤 4×10^6 t 的超高瓦斯矿 (瓦斯相对涌出量为 $40 \text{ m}^3/\text{t}$), 瓦斯减排碳收益可得 800 万美元, 并具有 20 MW 的发电潜能, 电力收益 700 万美元。因此, 潜在总收入可以达到 1500 万美元。假设建设瓦斯电厂的资金成本是 120 万美元/MW, 那么投资回收期为不到 2 年。

只有提供准确的瓦斯流量和浓度, 证明项目可以产生碳减排量, 减排项目才有可能实现经济回报。对瓦斯抽采和利用项目的审查会越来越严格——煤矿业主必须提供足够可靠的证据, 证明项目确实产生了碳减排量。监测和计量的复杂性经常被低估, 这可能会导致安全风险和收入损失。

7.5 瓦斯利用的机会成本

随着煤炭价格的上涨, 煤炭企业可能会选择投资于煤炭产量的提高, 而不是投资煤矿瓦斯发电。反之, 随着煤炭价格的走低, 投资煤矿瓦斯发电就变得很有吸引力。第三方对瓦斯利用项目的投资, 即碳融资——以预期碳资产为担保的项目贷款, 为煤矿实施瓦斯利用项目提供了新的资金支持方式, 增加了煤矿实施瓦斯利用项目的融资渠道, 从而使以前弃之不用的瓦斯有机会创造新的

价值。

7.6 瓦斯利用的环境成本

目前，大多数煤炭企业将瓦斯抽采列为采矿成本，而将瓦斯利用或环境减排划归额外的投资成本。然而，随着减缓气候变化和回收清洁能源成为价值链的内在部分，煤矿业主可能更需要从更整体的视角来看待这些成本因素。未来，可能要求煤矿企业在矿井的安全需求之外，再提高瓦斯抽采性能，以实现保护环境的目标。

假设“生产经营一切照旧”，据测算，中国煤矿开采过程的瓦斯排放影响的内化成本约为每吨煤 12 美元（2007 年的能源部门管理援助计划）。到目前为止，还没有一个国家试图把如此之大的成本摊到煤炭开采成本里，但财务数据表明，如果无法将环境排放降到最低，煤矿可能会付出很大代价。例如，俄罗斯已经对煤矿排放的瓦斯处以罚款，只不过远低于上述数字。

8 为政策制定者提供的结论和总结

自工业革命以来，煤炭在世界一次能源生产中始终占据重要地位。在可预见的未来，主要的新兴经济体、工业化经济体、转型中的经济体，以及全球经济，将继续受益并依赖于煤炭能源。截至 2013 年，煤炭供应占全球初级能源供应总量的 29%，占全球电力供应总量的 41%，占全球钢铁和铝供应总量的 70% 以上。尽管中国在努力减少煤炭消费，但由于中国和印度的需求大幅增长，国际能源署 (IEA) 预计全球煤炭产量到 2020 年将会继续增长 (IEA, 2015a, IEA 2015b, 世界煤炭协会 (World coal Association))。

浅层的煤炭储量已经接近枯竭，由于煤炭开采深度在增加，煤层瓦斯含量越来越高，煤炭开采和瓦斯管理将越来越具有挑战性。与此同时，社会对环境的要求越来越高，并期望煤炭行业具有更安全的工作条件。

在理想的情况下，现代化的煤矿企业认识到采用全面的瓦斯管理体系的好处，该体系可以建设性地整合井下瓦斯控制、瓦斯利用，以及减少有害气体排放。同样，从政策和监管的角度来看，对煤矿瓦斯实施全方位管理，将会带来多方面的益处。建立和执行安全的瓦斯开采、输送和利用规定，将会提升瓦斯排放标准，增加清洁能源生产，并促进矿井瓦斯减排。

工业化国家的经验表明，投资于良好的瓦斯抽采实践，矿井由于瓦斯超标、超限停工的时间将减少，开采环境将更安全，瓦斯利用以及煤矿瓦斯减排的机会将会更多。本书应被认为是今后制订发展战略和方案的起点，在大幅度减少矿井瓦斯排放的同时，支持必要的安全和实践改进，以提高煤矿的安全性。

本书的主要原则如下：

(1) 在瓦斯爆炸风险管理方面，全球煤矿产业已经具有丰富的认知和经验。在全球范围内，已经积累了大量有关瓦斯的赋存、预测、控制和管理的行业知识和具体应用，这些经验可以显著降低煤矿瓦斯的爆炸风险。然而，治理潜在的瓦斯突出风险存在知识差距，在极低透气性煤层，提高瓦斯抽采效果的课题仍有待突破。

(2) 无论有什么条件限制，煤矿工人的安全都是首要的，在这方面不应该有任何妥协。仅仅通过立法或仅仅采用最先进的技术，是难以保证高瓦斯煤矿的

安全工作条件的。相反，合理有效的管理系统、管理组织和管理实践是安全运营的基础。煤矿实现安全生产的其他关键要素包括对管理层和劳动者进行适当的教育和培训，在审查和实施安全措施的过程中，要鼓励加大安全方面的人力投入。

(3) 为使爆炸风险最小化，应将风险评估方法与加强通风、瓦斯监测和利用的安全法规相结合。该评估方法有助于提高瓦斯抽采的数量和质量。在正常稳态情况下，煤矿井下瓦斯涌出是可预测的，而不容易预测的是非正常涌出和瓦斯突出事故，但其发生的条件是众所周知的，而且降低风险的详细方法已经开发出来了，一旦确认有存在重大风险的地方，就应该应用这些方法消除风险。在这种情况下，安全的工作条件取决于瓦斯治理方法实施和监测的严谨性。安装井下监测装置，不仅是为了矿井作业的安全，还要收集和利用监测数据进行安全规划，这一点怎么强调都不为过。

(4) 通风系统是矿井瓦斯治理的关键组成部分。矿井通风系统要达到 3 个目的：①给井下工人呼吸提供新鲜空气；②控制井下空气温度；③有效地稀释或去除有害气体和空气中的吸入性粉尘。

(5) 解决煤矿瓦斯问题，改进瓦斯抽采系统通常是一个比单纯增加矿井通风风量更快速、更具成本效益的解决方案。利用现有知识和技术，煤矿现实的瓦斯问题一般都可以得到解决。只有在现有技术无法提供满意的解决方案，或者在应用了最佳实践之后还不能满足要求时，才会考虑引进新技术或者创新技术。通过适当的安装、维护、定期监测和系统地实施钻孔计划，可以提高瓦斯抽采系统的性能。

(6) 在矿井内输送浓度处于或接近爆炸范围内的瓦斯 - 空气混合物是很危险的，应予以禁止。空气中的瓦斯浓度在 5% ~ 15% 范围内时，具有爆炸危险性。作为一种常识，应该严格遵守“安全系数”的规定，控制实际瓦斯浓度，使之远离爆炸区间，即：爆炸下限的 2.5 倍以下（瓦斯浓度 2% 以下），爆炸上限的 2.0 倍以上（瓦斯浓度 30% 以上）。

(7) 井工煤矿是人为瓦斯排放的重要来源（约占全球人类瓦斯排放的 8%），但通过实施瓦斯抽采利用最佳实践，井工煤矿的瓦斯排放可以大幅度减少。瓦斯产生温室效应潜能是二氧化碳的 28 ~ 34 倍，是全球最重要的温室气体。大部分井工煤矿产生的瓦斯可以被有效回收利用，少部分需要通过火炬燃烧等方式将其销毁，来缓解其所带来的全球变暖效应。抽采瓦斯可以用来发电，风排瓦斯氧化后可以进行余热利用。在适当的技术和良好的市场条件下，最终实现“近零排放”的目标。

(8) 安装和运行高效瓦斯抽采系统，并将抽采的瓦斯加以利用。全球范围内，已经实施的煤矿瓦斯利用项目大都实现了盈利，可以说，煤矿瓦斯商业化应用的前景非常广阔。某些特殊的终端用户需要高纯度的瓦斯，这种情况下，可以通过改进井下瓦斯抽采系统，获得高品质的瓦斯，从而避免高成本的瓦斯提纯。

9 案例研究

下面是世界各地在产煤矿瓦斯抽采利用的部分案例，为读者提供了前面反复讨论过的，并且已经实施了最佳实践的成功案例（表9-1），同时也列举了一些未采用最佳实践造成严重后果的负面案例。

表9-1 案例研究目录

序号	国家	煤炭生产效率	通风控制	瓦斯捕捉和控制	瓦斯利用	瓦斯减排	爆炸预防	注释
1	英国	√		√				
2	德国	√	√	√				
3	澳大利亚	√	√	√	发电	利用/ 火炬燃烧	是	突出预防
4	澳大利亚	√	√	√				突出预防
5	中国			√	煤矿瓦斯发电和 余热利用	利用/ 火炬燃烧		
6	中国			√	煤矿瓦斯发电和 余热利用	利用/ 火炬燃烧		
7	中国				风排瓦斯供热	风排瓦斯		
8	澳大利亚				风排瓦斯发电	风排瓦斯		
9	南非	√	√					房柱式采煤
10	新西兰						经验教训	

案例1~3讨论了3个井工煤矿项目，包括项目的评估、规划和瓦斯管理做法，主要解决瓦斯治理问题。

案例4介绍了在有突出倾向的煤层，如何建立有效的管理系统，确保矿井作

业安全。

案例 5 和案例 6 表明了如何提高瓦斯抽采的效率，以及如何将煤矿瓦斯抽采与利用（减排）有效结合，近而从实质上消除瓦斯向大气中的排放。

案例 7 和案例 8 集中研究了风排瓦斯的利用和减排。

案例 9 讨论了采用房柱式采煤法的煤矿中降低爆炸风险的问题，案例 10 说明了未采取最佳实践的悲剧性后果。

案例研究力求简洁明了，并且突出每个案例的重点。

【案例 1】高瓦斯、高应力、有自燃倾向的后退式长壁开采煤矿，实现按计划达产（英国）

初始条件：采深 980 m，采高 2 m，采用后退式长壁开采方法，瓦斯相对涌出量为 $50 \text{ m}^3/\text{t}$ ，煤炭产量 10^6 t/a ，煤层具有高自燃风险和超低透气性，工作面进风和回风巷道有底鼓现象，水平应力很大。

瓦斯治理问题：由于该煤层的透气性超低，因此不能采用预抽采技术。又由于水平应力高，无法打顶板走向“高位抽”钻孔，所以瓦斯抽采的量很小，且浓度很低。该煤层有自燃风险，且煤层稳定性差，留煤柱的面积大，妨碍了通风方式的有效配置，如无法采用多路进风或其他配风措施。

解决方法：与本煤层内钻孔不同，本方法是在采过的煤层施工，即沿顶、底板打高低位钻孔，由于是在空顶区打钻，因此需要使用特殊支护措施，通风方式则采用“尾部返回”系统，如图 9-1 所示，风量为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 。最佳的钻孔方式

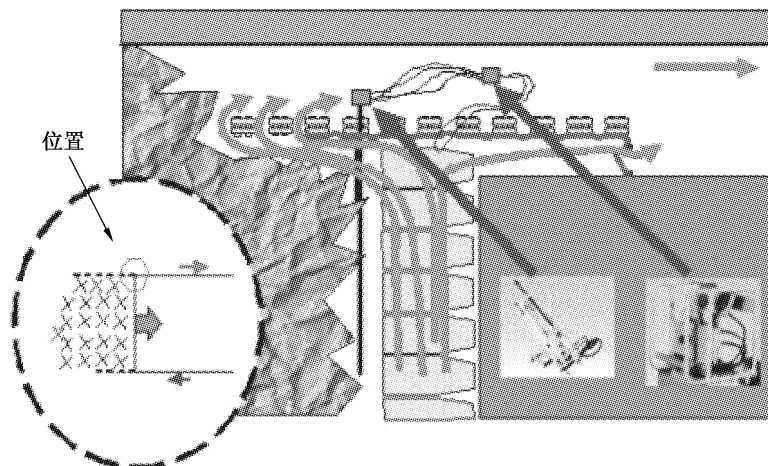
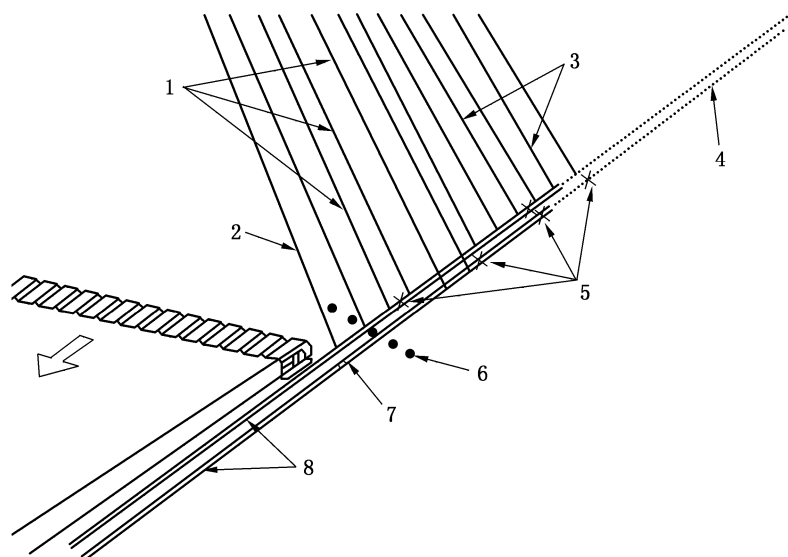


图 9-1 “尾部返回”系统

是施工与巷道呈合适角度的一排上仰孔，这些上仰孔与煤层平面呈 55° 角，孔间距 7.5 m ；向下的底板钻孔，其孔间距为 100 m 。通过以上措施，最大限度地抽采从顶、底板涌出的瓦斯，从而实现工作面瓦斯不超限，达产达效。

所有高位钻孔要连起来，最后并入高位孔瓦斯收集管道，同理，低位钻孔并入低位孔瓦斯收集管道，高位和低位收集管道要平行安装。每一个钻孔与其中一个管道连接，当抽采的瓦斯浓度下降后，要调节相应管道的负压以防止瓦斯被过度稀释，仍然保持高浓度瓦斯的钻孔应该切换到另一个高负压的收集管道上。这种“交互”作业须持续进行，任何时候需要至少保持 8 个钻孔与瓦斯抽采系统连接（图 9-2）。粗调节足以使瓦斯的质量和数量得以优化，而且在不需要人员冒险进入危险的采空区调整单个钻孔的情况下，瓦斯抽采率达到了 67%。



1—8~16 个活动钻孔，高纯度，高流量；2—最后打出的钻孔，高纯度，递增流量；
3—塌孔和破裂孔；4—管道破裂和泄漏范围；5—闭锁阀；6—进入采空区安全界限；
7—开式阀；8—甲乙管道范围

图 9-2 “交互”（高低位抽采）系统

后退式长壁开采速度非常快，钻孔作业的时间空间都有限，因此必须在大约 10 h 的时间内完成一个钻孔的开钻、立管、密封，并连接到收集管道。这些工作是通过高低位钻机完成的，钻机的驱动动力来自液压支架的液压回路（图 9-3）。



图9-3 高低位钻机

【案例2】高瓦斯涌出地区长壁回采工作面的高效生产 (德国)

初始条件：长壁工作面，采高 1.5 m，采长 300 m，计划产量 4000 t/d，工作面推进速度 50 m/周。上覆岩层厚度为 1200 m，煤层倾角接近水平，没有对煤层提前进行脱气。相对瓦斯涌出量预测：顶板瓦斯涌出量为 $25 \text{ m}^3/\text{t}$ ，工作煤层涌出量为 $3 \text{ m}^3/\text{t}$ ，底板涌出量为 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ （共计 $36 \text{ m}^3/\text{t}$ ）。煤层具有自燃倾向。

瓦斯治理问题：工作面最大瓦斯绝对涌出量为 $1.875 \text{ m}^3/\text{s}$ ($112.5 \text{ m}^3/\text{min}$)，这个浓度的瓦斯必须进行稀释或抽采以满足安全的要求。预抽采已被评估且被认定为不可行。有两个主要的制约因素：第一，工作面的最大通风量为 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，能稀释的最大瓦斯量只有 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ($22.2 \text{ m}^3/\text{min}$)，即使按照监管当局调整后的 1.5% 浓度要求（原规定工作面允许瓦斯浓度为 1.0%），即把安全系数从 5.0 下降到了 3.3，工作面的瓦斯仍然处于超限状态。而且，新规定所指的允许工作面最高瓦斯浓度为 1.5% 是有条件的，需要加强现场瓦斯流量监测和改进瓦斯抽采的条件，且只能在特定的地点进行，并要采取额外的措施，以确保风险不会显著增加。第二，该区域巷道条件不适用 1.5% 的允许瓦斯浓度标准，只能采用 1% 的标准。

解决办法：采用 Y 型通风系统（图 9-4）的设计目的是进一步引入 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 的风流，并使通过工作面的空气增加至 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ，通往工作面后部的风流稀释了从煤层和采空区排出的瓦斯。这样的通风配置可以配合高低位钻孔，每一个钻孔都要连接到抽采系统，且可以进行独立监测和负压调节。通常情况下，与在工作

作面宽度 350 m (图 9-5), 计划的每周采煤量为 200000 t。

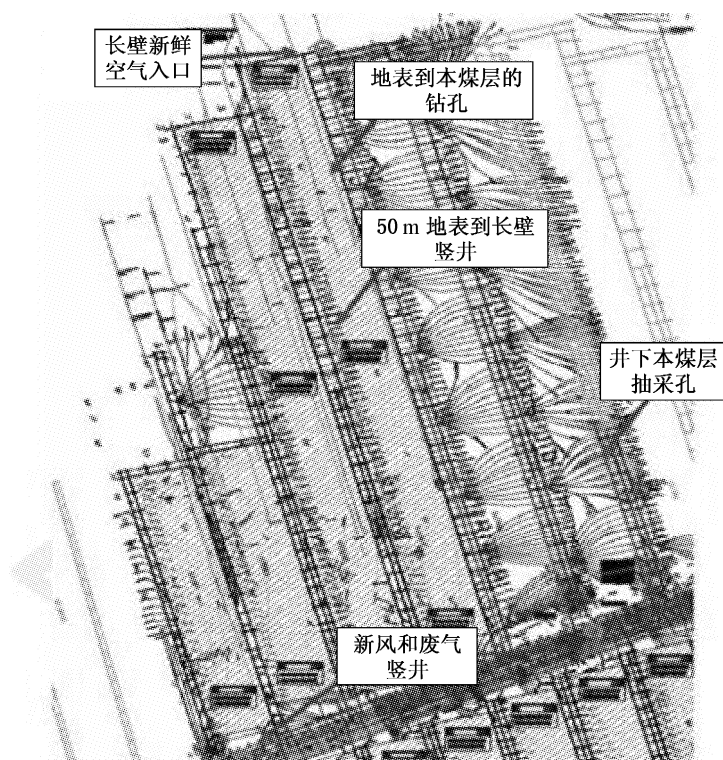


图 9-5 矿井通风与瓦斯抽采系统布置图

由于潜在的瓦斯含量很高, 煤矿不得不掘出 3 条进风巷道, 目的是通过提高通风能力充分稀释瓦斯。与传统的 U 型通风系统相比, 3 条进风巷道能够向回采工作面回风侧提供更多的新鲜空气用于瓦斯稀释, 而且不会增加工作面的风速。这是目前澳大利亚唯一采用 3 条进风巷道的煤矿。

瓦斯治理问题: 瓦斯涌出量预测表明, 来自煤层的相对瓦斯量大约为 $15 \sim 30 \text{ m}^3/\text{t}$ 。在计划产量的条件下, 相当于 $3500 \sim 7000 \text{ L/s}$ 的瓦斯, 瓦斯涌出量通常随采深的增加而增加。然而, 之前在相邻矿区的研究表明, 可能还存在大量其他来源的瓦斯, 从而极大增加瓦斯总涌出量。前 3 个工作面采用已有的设计后发现, 其瓦斯涌出是可控的, 但是相比于较浅的煤层, 实际涌出量略高于预期。由此推测到更深层的工作面, 其瓦斯涌出量将超出可研阶段的预测值, 有可能达到 9500 L/s 。

解决方法：把地面钻孔和本煤层钻孔（Mrd）相结合，并辅以井下定向孔和穿层钻孔为核心的瓦斯含量测试，避免掘进阶段瓦斯突出和摩擦点火的风险。矿井底部区域先前已经采用紧密半径钻孔（TRD）技术进行了预抽。

原计划采用3条掘进巷的方案是正确的，该方案给回采工作面提供的通风能力为 $100 \sim 120 \text{ m}^3/\text{s}$ （按照回风巷道瓦斯浓度不超过2.0%的规定，相当于稀释纯瓦斯的最高限制是 $2000 \sim 2400 \text{ L/s}$ ）。值得注意的一点是，1994年发生的莫拉（Moura）矿难中11名矿工死亡后，昆士兰州的煤矿规章、方针、惯例和实践阻止煤矿完全采用美国式的通风系统。然而，如果适当考虑潜在爆炸性混合物的位置以及加强对自然的控制，那么伤亡事故还是有可能得到避免的。

因为这些区域中的实际稀释瓦斯能力远低于回采工作面总的瓦斯涌出量，因此需要改变策略。到目前为止，该矿已经成功实施了传统的地面到采空区的钻孔抽采（位于回风侧，孔径300 mm，间距50 m），以减少通风系统中的瓦斯。利用这种方案实现了平均80%的瓦斯抽采率（采空区抽采加通风稀释），峰值情况下（浓度大于90%的纯瓦斯），则抽采率可达到约85%。

瓦斯收集设施位于地面，采用直径450 mm的管道，包括井下定向孔和垂直连接的管道。所有来自井下预抽、地面“半径钻孔”预抽及采空区钻孔的瓦斯，都被抽送到采空区移动泵站和中央泵站，然后再送入瓦斯电站发电，发电机组装机容量为 $16 \times 2.0 \text{ MW}$ 。能够被瓦斯发电机使用的瓦斯量大约为 2200 L/s ，多余的瓦斯会被火炬燃烧。该矿井的政策是尽一切可能避免将捕捉的瓦斯直接排入大气。

在未来布置回采工作面时，如果要把85%的采空区瓦斯排放到通风系统中，问题还是存在的。该矿现在正努力利用沿着长壁走向钻出长约2 km的长钻孔，先提前预抽较厚的顶部目标煤层。采煤作业开始后则作为采空区顶板抽采孔使用，目的是抽采工作面裂缝带的瓦斯。未来如果采深进一步增加，需要实施预抽采，也可以考虑采用常规的多煤层“完整井压裂”的办法。

【案例4】具有高突出危险煤层的安全开采（澳大利亚）

初始条件：自1895年以来，澳大利亚煤矿记录了超过700起突出事故，涉及到煤与瓦斯、二氧化碳等不同混合物，有一些还造成了人员伤亡。

瓦斯治理问题：位于新南威尔士州（NSW）的布利煤层（Bulli）是一个特别成问题的高突出危险煤层，新南威尔士州有许多煤矿在开采布利煤层的煤。第一次有记录的突出事故发生在1895年左右，自那以后已经发生过12起因突出引起的伤亡事故。继1991年7月在南布利煤矿发生与爆炸有关的伤亡事故之后，在矿业监察局的倡议下，成立了许多行业工作组，以对风险进行评估审查。经过

分析，引入了突出管理计划（OMP）的概念。1994年，通过实际应用发现该“突出管理计划”是有缺陷的，并且在西崖（Westcliff）煤矿又发生了一起与突发相关的伤亡事故，这表明迫切需要更严格的方法。在高瓦斯地区取得成功的方法，在一些含有高二氧化碳地区的矿井中却未必能产生积极的效果。将煤炭生产集中在少量的高产长壁矿中并进行密集生产，要求更快的掘进速度。这种情况下，控制突出和瓦斯涌出风险是保持采矿作业正常运行的基本前提条件。

解决方法：新南威尔士州矿业监察局试图通过发布实践指南来解决这些问题，该指南向煤矿管理部门解释了如何加强和实施严格的突出管理制度。下面的《突出采矿指南》摘录中反映了采用这种方法的必要性（矿产资源部，新南威尔士州，1995年）：

“煤矿监察局在调查突出事故方面的丰富经验表明，即使在知道拟采取的程序，并且事实上已经采取规范程序的情况下，对风险的防范依然缺乏一定程度的确定性。换句话说，非常明显，与其说突出风险管理是一个技术问题，不如说是管理与控制问题。因为往往会发现，我们已经拥有最好的技术，却缺乏应用这些技术的有效管理体系。”

为促进安全生产，突出管理计划（OMP）必须包含对责任、程序和协议的描述，以推进安全工作。突出管理过程涉及煤层瓦斯含量监测、地质构造及本煤层钻孔结果的分析。瓦斯抽采是降低开采煤层中的瓦斯含量使其低于临界浓度的主要预防机制，被认为是将突出风险最小化的有效手段（Lama, 1995）。当突出风险非常明显，没有缓解迹象时，继续钻孔无法提供有意义的额外数据，这时就需要实施突出状况下的开采程序。突出情况下的开采程序的设计意图是最大限度地减少工人的危险，并在危险区域提供应急防护设施。

自此以后，澳大利亚高突煤层矿井普遍实施了有效的管理程序，煤矿开采的安全性与营利性都得到了提高。

【案例5】煤矿瓦斯发电与瓦斯减排一体化项目的开发（中国）

初始条件：2007年5月，在海拔1600m的某偏远煤矿，一套新型地面瓦斯抽放站（简称瓦抽站）安装完毕。该矿具有 5×10^6 t/a的煤炭生产能力，瓦斯相对涌出量为 $17.7 \text{ m}^3/\text{t}$ ，抽采的瓦斯平均流量为 $22 \text{ m}^3/\text{min}$ 。煤矿总的瓦斯抽采率为15%，剩余85%的瓦斯随通风系统排入大气。

瓦斯治理问题：瓦抽站抽出的瓦斯浓度经常变化，有时低于30%的瓦斯利用下限浓度，瓦斯涌出量也随井下煤层变化和作业阶段的变化而产生波动。为了

符合投资回报的要求,煤矿瓦斯发电厂的装机容量需要量身定制,以确保发电机组容量与瓦斯可用量相匹配(以峰值瓦斯的85%为基准选择机组容量)。本项目的目标之一是优化能源回收和减少温室气体的排放,这就需要把瓦斯发电与火炬燃烧集成在一起。由于这项技术是首次在中国应用,因此,还存在技术转让的问题。

解决方法:当地和国际上的瓦斯抽采、电力和系统工程方面的专家组成了一个专家团队。专家团队与煤矿方面的工作人员就瓦斯安全输送、项目规模确定、部门间整体配合、收益保障等方面进行了密切合作。

通过适时调整高低位钻孔负压,加强钻孔密封,提高了抽采瓦斯的浓度;改进了制约瓦斯抽采能力的配套辅助设施;替换了阻力大的流量监测设备;制定了提高瓦斯抽采率的计划。提前在两个接替工作面进行密集钻孔预抽采,不仅提高了瓦斯浓度,而且抽采的瓦斯量也得到了补充,最终贡献了23%的抽采瓦斯,其余的瓦斯则来自后抽采及顶板高低位钻孔。因为高低位钻孔是在工作面的前方施工,工作面采过以后,有些钻孔会损坏,使得抽采效果变得很差。该矿曾在工作面后方的采空区上部钻了一个试验井,抽采效果还不错,该技术由于监管原因,以前在当地从未被实践过。

一期工程安装5 MW的瓦斯发电机组,冬季还能利用余热给周边建筑物和进风井筒供暖。配套安装的还有:标称5000 m³/h的火炬燃烧装置,专业的瓦斯利用和富余瓦斯火炬燃烧远程性能监测系统。

一旦瓦斯抽采能力取得显著增长,抽采量达到50 m³/min纯瓦斯,将启动二期工程建设,计划2009年10月实施,届时,总发电装机容量将达到12 MW。

【案例6】三大煤矿瓦斯的减排与利用(中国)

初始条件:位于中国山西省太原市附近的三座综合煤炭生产能力达 1.4×10^7 t/a的大型煤矿,能够捕捉原本排放到大气中的瓦斯量约为140 m³/min,存在进一步改进煤矿瓦斯抽采的空间。一方面,国家、地方和公司的政策需要寻找一种既能利用煤矿瓦斯生产清洁能源,又能减少温室气体排放的方法;另一方面,高涨的电价是刺激煤矿发电自用的一个主要因素。

利用和减排问题:煤矿运营者希望安装现代化的瓦斯发电机并利用该技术实现最大限度的发电,但是缺乏利用煤矿瓦斯的经验。煤矿运营者希望采用进口技术来学习并实施瓦斯抽采、利用和减排的最佳实践,然而,却要面对融资、运营和保养进口设备的困难。过去进口到中国的技术,由于缺乏操作经验以及未能在预防性保养上投资,所以往往以失败而告终。此外,煤矿中还存在瓦斯浓度和流量不稳定的问题,这些问题都有待解决。

本案例中所有项目地点都位于山区，海拔最高为 1600 m，而且受到冬季降雪和夏季正午高温的极端天气的影响。因此，项目建设在冬季不能安全有效地进行，而且要求设备能够适应较大范围的气候变化。

解决方法：

1. 项目建设

一家大型的国有煤矿公司及其运营的子公司与一家国际项目开发商合作，在 3 个高瓦斯煤矿建设并运营煤矿瓦斯（CMM）热电联产项目。该项目是注册在联合国气候公约（UNFCCC）下的清洁发展机制（CDM）项目。在该项目中，国际矿业管理团队提供所有的设备，而中国煤矿方面提供土地及设计和土建工程资金。在项目设计和开工之前，每一个项目都需要进行可行性研究，并需要得到政府相关部门的批准。此外，依据中国政府规定，设计必须由专业认证的设计院来完成。项目开发者的工程团队与中国设计院合作，帮助他们了解引进的新技术，同时鼓励采用西方标准，尤其是在健康和安全方面的标准。在项目建设之前，要进行环境影响评估的准备、审查并获得正式批准。

经批准后，在工程采购合同（EPC）下，启动工程设备供应和安装的公开招标程序。随后与中标人讨论技术细节和协议的最终条款。由于冬季条件恶劣，所以一年中可以进行施工的时间只有 8~9 个月。项目的实施计划日程见表 9-2。

表 9-2 实施计划

活 动	D 矿	T 矿	M 矿
与合作伙伴签署联合合作协议	2007 年 8 月	2008 年 3 月	2008 年 3 月
启动现场准备工作	2007 年 7 月	2009 年 7 月	2009 年 3 月
发电设备运营第一阶段	2008 年 5 月	2011 年 7 月	2011 年 8 月
发电设备运营第二阶段	2010 年 11 月	预计 2016 年 9 月	2014 年 11 月

煤矿瓦斯（CMM）项目场址是在土壤条件较差的丘陵地带劈山填沟形成的。发电机安装在集装箱式容器内，以防止产生噪声污染，并确保发电机燃烧的排放控制符合最新的标准。

由于 T 矿项目用地的征地问题，以及 2009 年 2 月发生的严重瓦斯事故，占据了煤矿和集团管理层的大部分时间，从而导致了该矿煤矿瓦斯（CMM）热电联产项目的严重耽搁。后来，一场旷日持久的保修纠纷案，使瓦斯发电厂在工程

完工后近两年的时间依然不能完全达产。当地设计人员计划引入一个大型的煤气站以缓冲煤矿瓦斯（CMM）供应波动的问题，由于监管原因，这个煤气站一直未投入使用，但这些对项目整体已经算不上重大的影响了。

由于瓦斯冷却系统能力不足，导致 M 矿瓦斯电厂的初始性能低于计划值，但后来这一问题得到了修正。

这三个项目都成功地注册为联合国气候公约（UNFCCC）下的清洁发展机制（CDM）项目，而且每年减排超过 10^6 t 二氧化碳当量。三个矿井的减排核证都已经成功完成，该项目可以持续运行 10 年。已经安装的发电设备总容量超过 30 MW，T 矿项目的扩建也在考虑中。这些项目为贫困矿区创造了约 65 个新的就业机会，不仅对当地经济发展有利，而且改善了当地的基础设施。

2. 工程问题和解决方案

技术转让是重要的组成部分。国际矿业管理团队和一个经验丰富的采矿和工程团队提供了技术援助。尽管如此，当地煤矿运营者对于新的思想仍然存在一些抵触情绪，尤其是现存的但已过时的设计惯例和规则，会与新思想产生冲突。

为了积累运行国外先进、复杂的瓦斯发电机的经验，瓦斯电厂采用分阶段建设，这也为煤矿赢得了改进瓦斯抽采和提升瓦斯质量的时间（图 9-6 和图 9-7）。技术提供商负责进行培训，并提供技术支持，他们在太原设有项目开发服务办公室，从该项目开发办公室开车到各矿点的距离不算太远。此外，还开发了专有的远程监控系统，提高了对故障警告的快速响应，并优化了减排。



图 9-6 在 D 煤矿的煤矿瓦斯电厂第一期

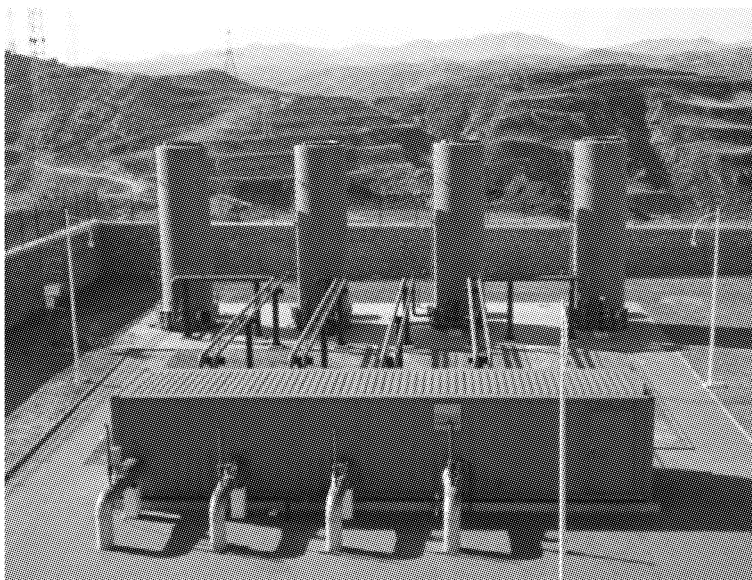


图9-7 在T煤矿的火炬燃烧系统

针对极端天气,设计适当的保护措施,以确保瓦斯预处理系统、发动机、监测和控制系统全天候正常运行。尽管如此,夏季和冬季遇到严峻状况仍会制约瓦斯发电机的负载能力,并延长停机维护时间。

国际矿业管理团队与当地煤矿合作,以提高瓦斯管理标准并确保瓦斯浓度始终保持在30%以上,从而保证瓦斯抽采、输送和利用的安全性。在中国相应国家标准没有到位的情况下,国际矿业管理团队为煤矿瓦斯发电厂制定了一个指导性操作文件。由于新技术的采用和重视程度的提高,煤矿钻孔钻探校准、瓦斯抽采管道放水、地面瓦抽站的负压控制均得到了显著改善。

表9-3总结了这些项目的总体绩效。由于与工厂运营、维护和煤矿瓦斯供应相关的一些因素,以及煤矿瓦斯流量随着煤炭产量的变化而变化,同时受到地质问题、井下工作面搬家倒面和煤矿维护检修等活动影响,发电效率达到80%的目标尚未实现。发电厂的发电效率计算方法:发电机运行的时间百分比×发动机负载率的百分比。

尽管交易“核证碳减排量”的回报不是很高,但这三个煤矿的瓦斯利用项目仍按设计实现了减排目标,即发电后富余的瓦斯和发电机停机期间的富余瓦斯,都通过火炬燃烧予以销毁。

表 9-3 煤矿瓦斯项目效果总结

CMM 项目 煤矿	CDM 项目在 UNFCCC 的注册时间	发电装机 (2015)/ MWe	燃烧处 理容量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	通常情况 下的年度 电力输出/ ($\text{MW} \cdot \text{h}$)	到 2017 年 6 月的累积 电力输出/ ($\text{MW} \cdot \text{h}$)	通常情 况下的 减排量/ ($\text{tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$)	整体电厂 发电效率/ %	整体燃烧 处理的效 率/%
D 矿	2009 - 03 - 09	11.9	1 × 5000	69300	380200	385000	66	20
T 矿	2010 - 12 - 17	12.2	4 × 2000	62000	266900	482000	59	90
M 矿	2010 - 12 - 03	7.5	2 × 1500	一期工程 24700	120400	192800	75	80

虽然瓦斯电厂进一步加强了操作管理和设备维护，完善了备品备件储备，开展了设备预防性维护及技术培训，但本案例所涉及的三个项目仍然存在提升发电效率的潜力。余热回收系统仅在冬季（大约 5 个月）运行，D 矿用于竖井加热，另外两个矿则是为矿区提供热水和冬季采暖。由于瓦斯电厂位于偏僻山区，如何实现三座煤矿瓦斯项目的废热全年都能被利用，并实现商业价值，目前还没有确定。

经验教训：本案例说明了煤矿瓦斯发电、余热回收系统和废气处理单元是如何集成到一个系统中的，在这个系统中，几乎所有瓦斯都可以被利用或销毁——这是采矿实现近零排放的关键一步。近零排放对煤矿的益处就是节约能源，并利用余热回收的清洁能源来烧水、供暖和井筒加热，代替以前产生污染的燃煤锅炉。

投资最先进技术的煤矿瓦斯利用项目，仅仅靠高电价是支撑不起来的。在本案例中，技术拥有方的技术转让和相关的碳融资起到了有效的推动作用。

不应该低估煤矿瓦斯项目获得必要的同意和批准所需要的时间，而且在制定项目时间和进度时必须考虑到极端寒冷天气条件，以及在这种情况下施工的危险性，设备安装和设计也必须满足全天候运行的要求。

如果煤矿引进他们不熟悉的技术，那么就必须准备随时在项目所在地获得技术支持和专业服务。此外，设备的性能不仅取决于其初始的技术规格和安装质量，而且与运行中操作和维护状况密切相关。

【案例 7】风排瓦斯（VAM）（中国）

氧化处理风排瓦斯，不仅可以产生余热制取热水，还能够减少风排瓦斯对大

气环境的破坏。

初始条件：中国河南省某大型煤矿，煤炭年产量为 1.5×10^6 t，年瓦斯排放量 1.2×10^7 m³。其中风排瓦斯占排放总量的 56%，剩余 44% 瓦斯排放来自瓦斯抽采系统。风排瓦斯浓度范围 0.3% ~ 0.7%。

瓦斯治理问题：中国之前从来没有风排瓦斯利用或减排的先例，因为在没有“碳信用”的情况下，开展这种项目得不到奖励刺激。

解决方法：新兴的清洁发展机制（CDM）市场为实施风排瓦斯减排项目提供了融资驱动力。国有矿业集团与清洁发展机制项目开发商以及领先的技术供应商合作，以设计、托管运营的模式实施了风排瓦斯商业示范项目，该项目采用“单床无焰”RTO 氧化装置（图 9-8）。该项目是首个在京都议定书框架内得到验证并注册的 CDM 风排瓦斯项目。



图 9-8 风排瓦斯的减排和能源回收在中国实施

项目的基础设施留有扩建余地，未来如果矿方希望扩大规模，还可以增加机组。

煤矿风排瓦斯氧化装置由单台 RTO 组成，满负荷处理能力为 62500 Nm³/h（即 17 Nm³/s），占风排瓦斯总量 375000 Nm³/s 的 17%。设备与主要通风机之间为间接连接，这样如果 RTO 装置因故停机时，默认风排瓦斯直接排入大气。重要的安全措施包括设置足够长度的通风管道，以便在紧急情况下（例如检测到风排瓦斯浓度过高）有时间操作溢流闸门，将所有瓦斯混合气体直接旁路排入大气。主扇从井下正常抽出的风排瓦斯浓度，足以使 RTO 保持运行所需要的温度。该项目于 2008 年 10 月投入运营，瓦斯减排效率达 97%。“碳减排量” CER 取决于减排的瓦斯数量，通常单台 RTO 每年可减排 20000（风排瓦斯浓度 0.3% 时）~ 40000 t（风排瓦斯浓度 0.6% 时）的二氧化碳当量。当风排瓦斯浓度低于 0.2% 的 RTO 自维持水平时，系统自动关闭。

风排瓦斯的利用：郑州矿业集团的余热利用装置用于为矿工淋浴提供热水以及为附近的建筑物供暖。RTO 氧化产生的热量，通过在 RTO 及其排气管之间安装的气-水换热器进行热交换，从而实现尾气余热回收。

表 9-4 比较了在不同风排瓦斯浓度的情况下，分别设定加热水温为 70℃ 和 150℃ 时，通过尾气余热交换能够回收的能量值。该表也给出了初级换热可回收的能量，即从蓄热式热氧化器内部直接生产的热值。热能的生产是线性的，即两套 RTO 生产的热能是单套设备的两倍。

表 9-4 在不同条件下，处理能力 250000 Nm³/h 的 RTO 装置可回收的热量

尾气余热交换结果	MW		
	乏风浓度 0.3%	乏风浓度 0.6%	乏风浓度 0.9%
目标水温为 70℃ 时	1	8	15
目标水温为 150℃ 时	不可行	2	10
RTO 内产生的热值	3	11	18

【案例 8】风排瓦斯（澳大利亚）

风排瓦斯氧化过程中释放能量，产生热蒸汽驱动传统的汽轮发电机组发电。由此实现风排瓦斯利用及减排的目的。

初始条件：澳大利亚新南威尔士州某大型煤矿，浓度为 0.9% 左右的风排瓦斯通过回风扩散塔排放到大气中。另外，附近还有一个喇叭口，专门用于将浓度超过 25% 的抽采瓦斯排入大气。

瓦斯治理问题：风排瓦斯具有风量大、瓦斯浓度极低的特点，之前世界上尚无大规模的风排瓦斯利用和减排的先例。2001—2002 年，澳大利亚必和必拓公司的艾平煤矿（Appin Colliery of BHP Billiton）曾做了一个小规模试验项目，来验证 RTO 蓄热式热氧化装置的可行性。该试验项目应用小型 RTO 处理风排瓦斯，产生热蒸汽，为期 12 个月。试验表明，该 RTO 装置在风排瓦斯浓度波动的情况下，具备长期处理风排瓦斯和有效回收热能的能力。

解决方法：与艾平煤矿（Appin Colliery）使用的 RTO 设备制造商合作，该矿将四套 RTO 装置产生的热蒸汽集成到一起，将其并入该矿原有的蒸汽为动力的发电厂循环蒸汽系统，即把 RTO 当成特殊的蒸汽制造炉，使用浓度极低的风排瓦斯作为燃料（图 9-9）。该项目的实施得到了政府方面实质性的拨款资助。

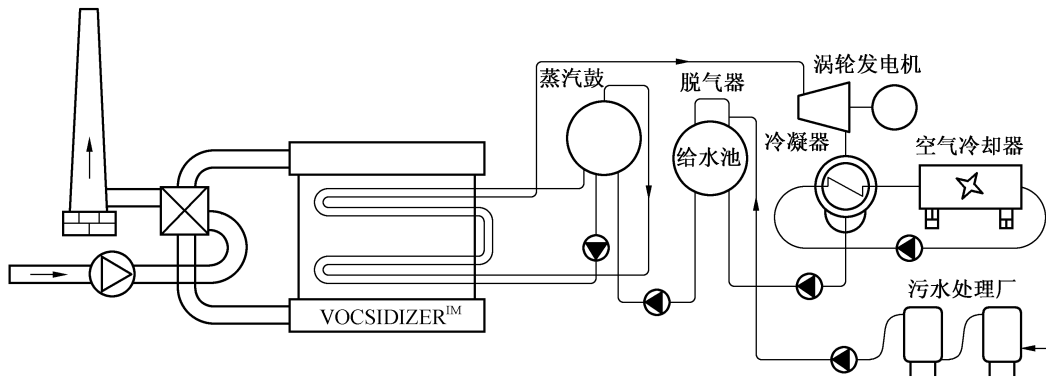


图 9-9 利用瓦斯发电，削减风排瓦斯，回收能源

以风排瓦斯氧化发热产生热蒸汽，推动汽轮机发电，该装置设计处理风排瓦斯能力 $250000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ （即 $150000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ），相当于矿井乏风总量的 20% 得到了利用，如图 9-10 所示。系统处理风排瓦斯的基准浓度按照 0.9% 设计，RTO 装置允许风排瓦斯浓度小范围内的波动，但为了使汽轮发电机转速平稳及保持连续运行，风排瓦斯提供的蒸汽能量应尽量保持稳定。本案例中，当风排瓦斯浓度低于 0.9% 时，25% 或更高浓度的抽采瓦斯会被注入到风排瓦斯中，以确保 RTO 在最佳工况下运行。

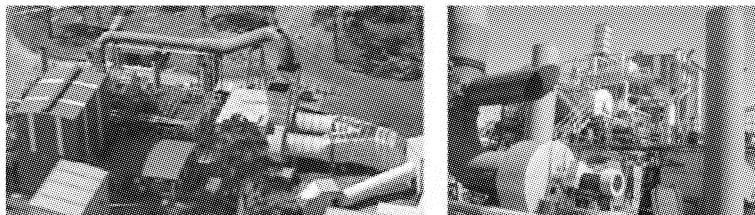


图 9-10 风排瓦斯处理和发电 (WestVAMP)

风排瓦斯电厂于 2007 年 4 月全面投运。第一个财政年度（2007 年 7 月至 2008 年 6 月）报告显示，该电厂运行稳定率为 96%，其中包括两次计划内的维修停机。到 2014 年 10 月，该发电厂已经产生了 150 多万个碳减排信用额度，发电 $240000 \text{ (MW} \cdot \text{h)}$ 。

成功的以风排瓦斯为燃料的蒸汽轮机发电厂应具备的条件：

- (1) 风排瓦斯的浓度应达到 0.7% 以上。
- (2) 风排瓦斯的风量不低于 500000 Nm³/h (300000 Nm³/min)。
- (3) 附近应该有抽采瓦斯源 (浓度不低于 25%)，当风排瓦斯浓度不足时，用抽采瓦斯补充。
- (4) 要有补给水用于机组冷却。
- (5) 选址应该靠近高压配电网，以方便所发电上网。
- (6) 在可行的情况下，应考虑蒸汽冷却循环产生的余热利用，包括用余热制热水、供暖，或采用其他冷却方式。

只有在解决了潜在的安全隐患之后，才可以考虑使用煤矿抽采瓦斯进行提纯。另外，由于抽采瓦斯中的低浓度瓦斯具有爆炸风险，因此要避免使用爆炸浓度范围的瓦斯。

【案例 9】房柱式采煤法爆炸风险的降低 (南非)

初始条件：大采高煤层 (4~6 m)，瓦斯含量低 (0.5~2 m³/t)。使用机械化的房柱式采煤法，如果爆炸的话后果严重。在这个特殊的采矿区，需要通过监管和采取实际措施来减少风险。按照 Landman 观点，这种情况下，约 75% 的爆炸是发生在工作面入口处或接近入口处的地方，而主要的点火源是摩擦起火 (Landman, 1992)。然而还有大量爆炸事故不是发生在工作面区域，这种情况说明了房柱式开采中通风方法控制瓦斯难度很大。房柱式采煤作业中的风流和长壁作业中的风流有所不同，风流流向在房柱式巷道内存在不稳定倾向，巷道交叉切口处，经常会出现突然的风流增加或减少。

在煤层顶板瓦斯情况不明的情况下，煤层储量越大、发育越充分的采区，越容易产生瓦斯积聚，特别是通风不是很好且有明火的条件下，是相当危险的 (表 9-5)，这种危险必须得到控制 (Creedy & Phillips, 1997)。

表 9-5 房柱型矿井瓦斯分层着火危险性评价

潜在问题	出现问题的可能原因	预防措施
未能阻止火花	<ul style="list-style-type: none"> • 掘进时局部通风不充分或不可靠 • 通风系统设备问题 • 截齿磨损、喷雾堵塞、喷雾水压低 	<ul style="list-style-type: none"> • 合理的设计和和设备保护 • 高标准和维护 • 有效的监控
未能排除火花源	<ul style="list-style-type: none"> • 与连续采煤机相关的电力和摩擦点火源 • 吸烟以及其他违规行为 	<ul style="list-style-type: none"> • 对员工进行严格培训和检查 • 加强入井前的安全检身

表9-5 (续)

潜在问题	出现问题的可能原因	预防措施
未能驱散瓦斯层	<ul style="list-style-type: none"> • 通风能力不足 • 局部通风布置不合理 	<ul style="list-style-type: none"> • 制定瓦斯管理流程 • 使用便携式通风器和其他合适的设备
未能检测到瓦斯层	<ul style="list-style-type: none"> • 监测位置不正确 • 缺乏合适的监控设备 • 工作人员培训没有到位 	<ul style="list-style-type: none"> • 作好现场监测点的设计 • 使用合适的监控探测器 尤其是在大采高的巷道 • 加强培训
未能阻止瓦斯分层	<ul style="list-style-type: none"> • 通风量太低 • 通风运行不可靠 	<ul style="list-style-type: none"> • 制定通风规划 • 增强针对顶板的局部通风
未能阻止瓦斯的涌出	瓦斯涌出是井下煤矿开采的一种自然结果	<ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯抽采

瓦斯治理问题：工作面的局部通风，是从到达工作面的最近的一条进风巷吸入空气来完成的。已采区域由大量棋盘式的巷道和煤柱构成，因此所需要的风量很大，而且很难均匀分配，这些都会影响通风的效果。为了确保主要的风流到达工作面，井下的已开采区会用临时的隔离板封闭起来，因此工作面后面的封闭区域会出现瓦斯聚集现象。

在水与瓦斯压力大的矿井，顶板锚杆钻孔和已经开口的抽采钻孔布置比较密集，这些钻孔经常是导致顶板塌方的原因之一。当瓦斯从这些钻孔中缓慢涌出时，会形成大面积的瓦斯层，而且除非瓦斯检测仪安装位置非常接近顶板，否则这些瓦斯很难被检测到。另外，在巷道比较高的地方安装检测仪也有一定难度。

解决方法：在局部区域进行采煤时，通过本煤层钻孔进行瓦斯预抽采有助于瓦斯的控制。由于区域面积小，煤层上覆顶板和底板不会受到大的开采扰动，因此一般不采用顶底板的高低位钻孔抽采。而在瓦斯含量低的煤层中，预抽采也没多少效果。因此，在瓦斯含量较低的煤层中，更为实际的解决方案应该是改善通风。

由于风量的供应总量是有限的，所以在工作面和已采区实行同样的通风标准是不切实际的。因此，工作的重点是引进一种有效的监测手段，能够在这些不同的环境情况下进行瓦斯监测，这个监测方案要包含顶板的瓦斯探测，作业区总体

的瓦斯监测，已采区域的瓦斯监测，尽管给已采区域分配的风量并不大。

工作面被认为是最高风险区，而政府监管机构已经制定了针对通风系统的一套专业准则（矿物和能源部，1994）。在这个准则中，基本的标准就是易燃瓦斯浓度要低于1.4%，为了确保这一点，建议采取以下措施：

- (1) 穿过最后一条巷道的风速不得低于1.0 m/s（许多煤矿选择安装了连续的远程风速检测仪）。
- (2) 在巷道中使用有效的辅助通风设备（局部通风设备）。
- (3) 有规律地测量和记录关键的通风数据。
- (4) 高瓦斯区段的检查间隔时间不要超过1 h。
- (5) 局部通风系统如果停止运行，则机械割煤机自动断电。
- (6) 在接近火成岩侵入体和地质异常的瓦斯涌出风险区时，要采取特别的预防措施。
- (7) 进行掘进作业时，要进行持续的瓦斯监测。
- (8) 强制要求连续采煤机自带冲洗装置。

【案例 10】派克河（Pike River）煤矿的瓦斯爆炸事故（新西兰）

初始条件：派克河煤矿位于新西兰南岛西海岸的格雷茅斯（Greymouth）北部偏东北向46 km处。地面装置和基础设施基本完成，并因其杰出的地面环境设计和实施而获得了环保奖（图9-11）。



图9-11 地面设施反映该地区的环境敏感性，以及建筑物如何与森林融合

这个矿区的井下情况与地面条件完全相反。井下开采条件复杂，主要是因为不可预知的地质条件使得井下掘进计划严重延迟。

煤矿建设成本超出了预期，建设资金面临巨大压力，煤矿业主为了弥补大量的资金需求，在条件不具备的情况下安装了首采面并进行试生产。矿井采用水力采煤法，在井下靠近上风竖井的位置安装了一个主要通风机。但是，该竖井稳定性方面还存在问题，在井下，无法作为紧急情况下的矿工逃生第二出口。矿工出入井的唯一路线是通过 3 km 远的巷道。

在这个煤矿，瓦斯没有被认为是一种潜在危险。在勘探开发过程中，没有获得关于煤矿瓦斯赋存与排放特征的系统性数据，只有当瓦斯出现问题的时候才草率地尝试控制。此外，矿井的部分电气设备没有按照矿山防爆标准进行设计和安装。

职业健康和安全的责任不到位。董事会没有积极参与健康和安全管理，所有运行和安全问题由煤矿经理说了算。尽管煤矿设有一个分管安全的经理和一个安全委员会，但都是没有发挥什么作用。矿方对外委托开展了一项研究，这项研究列出了主要的安全问题，但是所列的安全问题矿长和经理一个都没有处理。现场屡次检测到瓦斯浓度处于爆炸范围区间，但该矿没有采取过任何措施。由于管理不专业，人员流动性很高，应对井下状况的只有毫无经验的员工和承包商。

该国的监管体制改革，取消了以前对全国煤矿健康和安全的严格、独立的监管。政府重组了矿业监管部门，所谓监管更加依赖于煤矿的自我约束和管理。合格的煤矿监管人员太少，需要做的工作量很大，监管人员极少到井下现场查看，管理规章流于形式。

存在的问题：2010 年 11 月 19 日发生了一起爆炸事故，几天之后，在煤矿被封闭注入惰性气体之前，又发生了三次更大的爆炸和一次火灾（图 9-12）。共有 29 名矿工遇难。

当时地面的工作人员忽视了控制室内的警报，他们没有立刻发现爆炸事故，直到 40 min 后才拨打紧急救援电话。事故发生 100 min 后，有两名幸存者逃到地面上，但是现场并没有人来接他们。

警察有处理紧急情况的责任，但缺乏处理煤矿事故方面的经验。煤矿没有进行过应急演练，并且缺乏经过恰当评估的井下数据。由于无法确定井下风险状况，所以没有允许矿方自己组织的救援队下井。

矿工家庭和矿区在这场灾难中深受打击。公众对受影响的家庭提供了很多帮助，但是有关当局缺乏相应的行动，这让民众很气愤和失望。矿井恢复安全后，遇难者的家属申请下井，希望收回家人的遗体，虽然向家属提供技术咨询的采矿

专家认为再次进入矿井是安全的，但是在派克煤炭有限公司倒闭之后，最终接手该矿的国家矿业公司拒绝让家属进入矿井中。



图9-12 在第三次爆炸后的上风竖井发生火灾

解决方法：急需一个解决方案来确保这样的悲剧不再重演。事故的根本原因在于矿井原有的安全管理机制远远不能应对发生的事态。

因此设立了皇家委员会，负责确定以及报告发生爆炸和造成伤亡的原因，制定涉及搜救效果、救援、恢复的条例，以及解释如何合理地使用和实施该条例。

皇家委员会认为对事故的管理远不尽如人意，原因如下：

- 矿山管理部门对爆炸进行确认和报告的第一反应迟缓。
- 应急响应程序既无实质内容又没进行过演练。
- 警方负责事故的控制，但缺乏准备，而且也不懂如何进行管理。
- 在缺乏专家领导和协调的情况下，无法作出安全地进入矿井的决定。
- 没有采取寻找回遇难者遗体的实质性行动，与遇难者的家属缺乏信息沟通，令遇难者家属非常气愤。

发生爆炸的几个直接原因：存在大范围的瓦斯涌出和集聚，以及潜在的点火源，包括不符合防爆要求的电气设备。

导致风险升级的环境因素还包括：

- 由于地质原因，矿井不能如期完成建设，导致煤矿财务紧张，煤矿急于出煤缓解资金状况，在完善基础设施建设和妥善处理安全问题之前，盲目投入生产。

- 通风能力和瓦斯抽采都不足。
- 缺乏经验丰富的井下员工。
- 工人没有有效地参与健康和安全管理。
- 尽管反复出现瓦斯超限的警告，但没有采取任何管理措施。
- 矿方缺乏对健康和安全管理检查。
- 政府制定的煤矿安全法规不起作用，执行不力。

皇家委员会于2012年11月5日发布的报告中提出了16项主要的建议，其中包括：

- 有必要对新西兰的健康和安全法规及其管理和实施作出重大变革。
- 应改善公司治理结构，以便更好地管控风险，从组织内部监督健康和安全。
- 矿山管理者应采用最佳实践的瓦斯控制（提到了联合国欧洲经济委员会的文件）。
- 健康和安全管理应有工人参与，为安全工作多提供一份保障。

经验教训：本案例研究表明，制定和实施有效的、针对性强的法规非常重要，监督和管理应由经验丰富的采矿专家进行。在生产条件严峻的情况下，煤炭生产和创收必须接受独立的监管，矿工职业健康和安全的起点在董事会的会议室。

派克河煤矿在爆炸事故发生后被关闭。煤矿经营失败的案例给我们敲响了警钟：事故的代价高昂，在高瓦斯矿井开展有效的瓦斯治理，绝对必要。

附录1 瓦斯抽采方法比较 (摘自 Creedy, 2001)

方法	描述	优点	缺点
从地面向下打垂直钻孔进行预抽采	用于压裂一个或多个煤层, 高压液体从地面钻孔注入, 通过注射一种支撑材料使煤层产生裂隙。因此, 瓦斯和其他流体能够通过煤层流动, 不受周围煤的阻力限制就可以进入钻孔。其他钻孔方法也会被用到, 如高透气性煤层中进行简单的钻孔	<ul style="list-style-type: none"> 在采矿前, 提前把瓦斯去除 通常可获得拥有商业价值的高浓度瓦斯 抽采瓦斯活动独立于井下采煤作业 开采水力压裂的煤层区域时, 顶板条件通常不会受到不利影响 煤层开采过后, 钻孔仍然可以使用, 当作采空区瓦斯抽采的钻孔 增加了减少瓦斯向大气中排放 (减少温室气体排放) 的机会 	<ul style="list-style-type: none"> 成本高 需要建设地面瓦斯收集管网 涉及土地所有权、方便人员进出场地等问题, 地面设施布置安排存在困难 压裂作业可能会产生废水处理的问题 煤层较深时, 透气性可能比较低, 效果有限 深煤层钻孔受到打钻成本制约 煤层本身受压裂后应有比较高的透气性 钻孔与井下采煤计划协调起来比较困难 钻孔设计要求的专业性比较强
井下本煤层水平钻孔预抽采	从井下巷道或竖井底部打长钻孔, 进入规划的长壁采煤工作面, 并在较长一段时间内抽采瓦斯, 以减少瓦斯涌入巷道和未来的长壁采煤工作面	<ul style="list-style-type: none"> 工作面开采之前, 提前抽采瓦斯 抽采的瓦斯浓度高, 适合利用 瓦斯抽采独立于采煤作业 成本低于从地面向下的垂直钻孔方式 适用于高透气率的深度开采煤矿 降低具有高突倾向煤层的突出风险 为高瓦斯矿井的快速掘进创造条件 提前收集“后抽采”技术不容易捕捉的瓦斯 	<ul style="list-style-type: none"> 钻孔必须在工作面开采之前完成 煤层必须具有中等以上的透气性, 以便在合理的时间内显著降低煤层的瓦斯含量 只能减少开采煤层的瓦斯涌出, 对开采扰动引起的临近层瓦斯涌出没有效果 在煤层中的某些位置, 水涌、钻孔的稳定性和定向控制都有可能出现问题 需要经过训练的、井下的瓦斯钻探团队

(续)

方法	描述	优点	缺点
从地面到开采煤层定向钻孔预抽采	先钻出垂直或倾斜的钻孔, 再从这个钻孔往下进行定向钻孔, 进入深度 1000 m 以上的单个或多个目标煤层。采用多种煤层钻孔配置, 使瓦斯抽采效果最大化。成本效益最优的配置是把顶板应力方向也考虑进去	<ul style="list-style-type: none"> • 工作面开采之前, 提前抽采瓦斯 • 抽采的瓦斯纯度高, 适合利用 • 瓦斯抽采独立于采煤作业 • 比垂直压裂并能更有效地抽采瓦斯 • 在开采煤层上部的钻孔, 卸压抽采时还能再次利用 • 钻孔布置可以很灵活, 不受地面地形特征的限制 	<ul style="list-style-type: none"> • 成本高 • 不是所有的煤层都适合打定向钻孔 • 为保持抽采效果, 需要作好排除钻孔内积水的安排 • 对煤层的透气性有要求, 至少适中, 不能太低 • 如果钻孔出现问题, 一般不容易矫正 • 需要具备专业的钻孔设备和技能
对瓦斯涌出的预防性抽采, 在掘进巷道的顶板打短钻孔, 进行预抽采	为了控制顶板砂岩层离散裂缝的瓦斯气体涌出, 在掘进巷道顶板岩层钻垂直短孔。用于抽采上部煤层或岩层裂缝或砂岩涌出的瓦斯。为了减少掘进巷道机械摩擦起火的风险, 有时也会在开采之前提前释放瓦斯, 即在工作面前方的顶板上进行低角度钻孔	是一种降低摩擦起火风险和抑制瓦斯涌出的低成本方法	<ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯流量较低 • 如认为有必要, 可以与瓦斯抽采系统网连接

(续)

方法	描述	优点	缺点
高低位 钻孔卸压 抽采	与采空区上方或下方成一定角度, 从长壁工作面的回风巷道进行钻孔, 并与瓦斯抽采系统相连接。在一些回退式长壁采煤矿井中, 与采煤工作面前面的钻孔相比, 工作面后部的钻孔性能更好。然而, 进入回采工作面后部有时比较困难, 抽采效率也不能持续很久	<ul style="list-style-type: none"> • 工作面推进时瓦斯的抽采效率比较高 • 非常适用深部煤层的工作面 • 能够以较短的钻孔距离直达主要瓦斯源 • 抽采的瓦斯用管道输送到地面固定抽放站, 便于商业销售或就地使用 • 对低透气煤层很有效 • 在易受影响的工作面, 底板钻孔可以降低瓦斯突然涌出的风险 • 钻孔方式比较灵活, 且容易调整 • 是成本最低的瓦斯抽采方法 	<ul style="list-style-type: none"> • 后退式采煤工作面较高的瓦斯抽采率难以维持很久 • 为了达到最大的效果, 需要在工作面的后部也钻孔 • 钻孔的服务寿命普遍较短 • 煤炭开采引起裂隙, 释放出的瓦斯又被通风空气所稀释, 导致瓦斯抽采系统中会混入浓度比较低的瓦斯 • 需要训练有素的井下钻孔团队 • 井下管道等基础设施需要通向地面瓦抽站或在回风巷道一个安全的地点对瓦斯进行安全处置
从地面 钻孔至采 空区的后 抽采	<ul style="list-style-type: none"> • 选定钻孔坐标不要偏离待开采煤层, 从地面向下打钻孔, 达到裂隙带时要加装套管以防止煤层裂隙造成钻孔的塌孔, 通常会在处于吸气段的套管壁上开一些槽形孔, 方便把周围煤岩层的瓦斯抽出来 • 有时候, 在钻孔达到开采煤层上部30 m的位置后, 会进行变径, 即再往下到开采煤层时的开口钻孔直径比上面的钻孔直径小一些 • 安全可靠的钻孔方法还包括: 钻孔通到与工作煤层相交的位置后, 最下端30 m一段孔需要进行注浆固孔 • 钻孔终孔的位置一般落在回风巷的一侧 	<ul style="list-style-type: none"> • 瓦斯抽采独立于采煤作业 • 能够抽采采空区绝大部分的瓦斯 • 浅层到中等深度采空区成本效益比较好的抽采方法 • 可获得浓度比较高的瓦斯, 钻孔服务寿命可长达数月 • 可以随采煤计划的改变灵活调整 • 能收集更多的瓦斯, 减轻工作面瓦斯涌出的压力 	<ul style="list-style-type: none"> • 由于地质和技术原因, 容易出现采空区钻孔失效 • 在较深煤层钻孔时成本很高 • 如果采空区上部有主要含水层, 钻孔有被矿井水灌入的风险 • 不能直接抽采工作面底板涌出的瓦斯 • 采面推进过程中不能进行采空区瓦斯钻孔抽采, 直到采过一定的距离后, 才能进行采空区钻孔操作, 以防止通风空气进入地面瓦斯抽放站 • 需要建设造价昂贵的地面管线基础设施, 以收集采空区瓦斯 • 仅适用于没有地面条件限制的地方

(续)

方法	描述	优点	缺点
待采煤层上方或下方的定向长水平钻孔抽采	定向钻孔技术的使用非常普遍。其钻孔相对标高一般在目标煤层的上方（也可以是下方）大约 20 ~ 30 m 的水平面，长钻孔可以完全覆盖该待采盘区。如果在上述相对标高水平找不到合适的钻场，那么也可以在工作面开采水平布置钻场，然后利用钻头的导向系统，把钻孔引导到需要的相对标高水平	<ul style="list-style-type: none"> • 采煤之前先采气的预抽采模式 • 与在本煤层打高低位钻孔相比，抽采效率可能更高些 • 采气活动与采煤活动分离，不受采煤干扰 • 可以获得高浓度的瓦斯 • 瓦斯来源靠近采煤工作面 	<ul style="list-style-type: none"> • 定向钻孔成本相对较高 • 不适用于松软的煤岩层 • 修理塌陷或损坏的钻孔很困难 • 采煤作业出现变化时，钻孔系统无法相应调整 • 能否在采煤之前形成满意的瓦斯抽采系统，取决于钻孔作业的精度 • 需要专业的井下钻孔技术和设备
高抽巷或底抽巷（瓦抽巷）卸压抽采	待采煤层上部或下部开掘一条巷道，该巷道的端头与瓦斯抽采系统管道相连接。在瓦抽巷密封前，配合施工排放钻孔，可以增加瓦抽巷的抽采能力	<ul style="list-style-type: none"> • 本方法可以与巷道高低位钻孔方法配合使用 • 比单纯采用高低位钻孔的方法抽采效率高 • 瓦斯抽采独立于煤炭开采活动 • 如果能够把现有或废弃的巷道改作瓦抽巷使用，可以降低抽采成本 • 一般可以获得浓度较高的瓦斯 	<ul style="list-style-type: none"> • 从开采煤层通到瓦抽巷成本很高 • 由于存在通风空气进入瓦抽巷的可能，给有自燃倾向的煤层带来风险 • 除非是在相当厚的煤层中，否则成本太高 • 采煤作业出现变化时，钻孔系统无法相应调整 • 如果瓦抽巷与采煤工作面之间的岩层非常坚硬，此方法可能无效
地面向本煤层的定向钻孔的后抽采	将井下本煤层定向钻孔技术应用于地面本煤层的定向钻孔。类似于井下本煤层定向钻孔	<ul style="list-style-type: none"> • 不需要在井下打钻作业 • 可以把部分旧孔再利用，比如之前有地面到本煤层预抽采的垂直钻孔 	<ul style="list-style-type: none"> • 成本太高 • 旧孔再利用时，会出现旧孔已经不能用的情况，因为先前的旧钻孔在采动干扰过程中可能被破坏掉 • 从有效控制瓦斯角度看，本方法无法替代井下工作面附近的高低位钻孔

(续)

方法	描述	优点	缺点
采空区设置硐室或插入管道的后采抽采技术, 抽采采空区的瓦斯	在工作面后面的采空区建造一个抽采硐室, 并将其连接到瓦斯抽采系统。另一种方法是, 从工作面后部把瓦斯抽采管道插入密闭后的采空区, 抽采采空区的瓦斯。瓦斯管道随着工作面推进而相应延伸	<ul style="list-style-type: none"> • 有利于降低工作面上隅角的瓦斯浓度 • 进入该区域的瓦斯量减少 	<ul style="list-style-type: none"> • 容易导致易燃气体混合物的产生和传播, 造成极大危险 • 由于瓦斯浓度不高, 抽采过程中“大马拉小车”, 瓦斯抽采效率不高 • 抽采的瓦斯量也很小
从切眼到采空区的后抽采(前一方法的变体)	切眼是连接采煤工作面进回风巷的巷道, 有分割工作面与采空区的作用。瓦斯抽采系统在切眼处与采空区瓦斯抽采管连接	<ul style="list-style-type: none"> • 在某些情况下, 可代替高低位钻孔的作用 • 瓦斯活动独立于煤炭开采活动 • 降低回风隅角瓦斯浓度 	<ul style="list-style-type: none"> • 容易导致易燃气体混合物的产生和传播, 造成极大危险 • 由于瓦斯浓度不高, 抽采过程中“大马拉小车”, 瓦斯捕捉效率不高 • 捕获效率普遍偏低 • 只有切眼与采空区之间的巷道适合, 才能采用本方法 • 额外的切眼成本

缩 略 语

CBM	Coalbed Methane	煤层气
CDM	Clean Development Mechanism	清洁发展机制
CERs	Certified Emission Reductions	核证减排量
CFRR	Catalytic Flow Reversal Reactors	催化逆流反应器
CH ₄	Methane	甲烷
CMM	Coal Mine Methane	煤矿瓦斯
CMR	Catalytic Monolith Reactor	催化单体反应器
CNG	Compressed Natural Gas	压缩天然气
CO ₂	Carbon Dioxide	二氧化碳
CO ₂ e	Carbon Dioxide Equivalent	二氧化碳当量
ERPA	Emission Reduction Purchase Agreement	减排购买协议
ERUs	Emission Reduction Units	减排单位
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program (World Bank)	能源部门管理援助计划 (世界银行)
GHG	Greenhouse Gas	温室气体
GWP	Global Warming Potential	全球变暖潜能
IBRD	International Bank for Reconstruction and Development	国际复兴开发银行
IC	Internal Combustion	内部燃烧
I&M	Inspection and Maintenance	检查与保养
JI	Joint Implementation	联合实施
kWh	Kilowatt - hour	千瓦时
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然气
L/s	Litres per Second	升/秒
m	Metre	米
m/s	Metres per Second	米/秒
m ³ /d	Cubic Metres per Day	立方米/天
m ³ /s	Cubic Metres per Second	立方米/秒
mD	Millidarcy (in common usage, equivalent to approximately 10 ⁻³ μm ²)	毫达西(常见的用法,相当于约 10 ⁻³ μm ²)

MRD	Medium Radius Drilling	中半径钻孔
MSA	Molecular Sieve Adsorption	分子筛吸附
Mt	Million (10 ⁶) Tonnes	百万吨
Mtpa	Million Tonnes per Annum	百万吨/年
MW _e	Megawatt of Electricity Capacity	兆瓦级电能
Nm ³	Normal Cubic Metres	常规立方米
PSA	Pressure Swing Adsorption	变压吸附
scfm	Standard Cubic Feet per Minute	标准立方英尺 1 分
t	Tonne (metric) – equivalent to 1.102 short tons	公吨 (公制) 相当于 1.102 短吨
t/d	Tonnes per Day	吨/天
TFRR	Thermal Flow Reversal Reactor	热力逆流反应器
TRD	Tight Radius Drilling	紧密半径钻孔
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe	联合国欧洲经济委员会
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	联合国气候变化框架公约
VAM	Ventilation Air Methane	风排瓦斯
VERs	Verified Emission Reductions	核实减排量
USBM	United States Bureau of Mines	美国矿务局

专业术语表

在煤矿和煤矿瓦斯行业，不同管辖范围和不同地区所使用的术语和缩略语仍存在混淆。除了本书列出的术语，联合国欧洲经济委员会还另外编写了针对煤矿瓦斯的术语表，对术语和定义作出更加全面的说明，并强调了在不同领域的使用方法。（参见 www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf）

风门：矿井通风系统中设置的门，它起着隔断风流不引起通风气流短路的作用，同时又为行人井下提供方便。

局部通风：把一定比率的主要通风机风流通过辅助通风机和导管导向独头巷（比如：入口）。

后退 - 回风：一种临时的通风安排，在 U 型长壁的回风末端，转移部分空顶区域的风流，同时也方便布置钻孔，防止采空区瓦斯在工作面上隅角聚集。

通风竖井：将含有瓦斯气体的空气从工作区直接排放到地面的竖井，通常不供人或材料使用。

盲巷：单向掘进巷道，需要辅助通风。

房柱式开采法：一种开采方法，多头采煤，留下未开采的煤柱支撑顶板。

抽采效率：瓦斯抽采系统中抽采的瓦斯以体积计与瓦斯释放总量的比值。瓦斯释放总量是抽采的瓦斯总量和排放到矿井通风系统中的瓦斯相加之和。抽采效率通常以百分比表示，抽采效率可以应用于单个长壁面或整个矿井。

煤面瓦斯：采煤机在工作煤层采煤时所释放出的瓦斯。

煤层气：煤层中天然存在的富含甲烷气体的总称，通常含有 80% ~ 95% 的甲烷，其他乙烷、丙烷、氮气和二氧化碳的比例较低。在国际通用术语中，是指通过地表钻孔的方式，从未开采煤层中回收的甲烷。

煤矿瓦斯 (CMM)：从煤矿生产矿井中抽采的瓦斯，是甲烷和其他碳氢化合物以及部分水蒸气的混合物。由于采动裂隙，空气会不可避免地泄漏到瓦斯抽放钻孔或通道，井下管道系统接头处理不好也会造成空气泄漏，使得瓦斯被空气和其他氧化物稀释。本定义指的是：无论是开采前还是开采后，井工矿井中捕捉到的任何瓦斯，及从地表向采空区抽采的任何瓦斯。煤炭开采前抽采的煤矿瓦斯纯

度高，只有通过采矿获取的瓦斯才能称为“煤矿瓦斯”。

外部瓦斯：不能直接归因于煤层来源的瓦斯。

瓦斯抽采：一种为避免瓦斯进入煤矿巷道而采集煤层中天然存在的瓦斯的方法。利用预抽采技术，可以在煤矿开采之前将瓦斯从煤层中去除，也可以用后抽采技术从煤层中去除。如果要抽采的气体的主要成分是甲烷的话，一般称为瓦斯抽采。这种方法也被称为矿井脱气。

采空区（美式英语：gob）：如果煤矿采用长壁采煤法，煤被采完以后，上覆岩层破裂、渗透，顶板坍塌，上部形成裂隙，应力减少，开采层下部则相对受影响较小。在美国通常使用 gob 这一术语，其他地方，通常使用 goaf。

甲烷抽采：参见瓦斯抽采。

天然气：一般是指从煤层以外的地质层抽采的瓦斯气体（即从“常规”瓦斯存储区）。这种气体主要成分可能是甲烷，且有可能最初来源于煤层。

突出：在煤矿采煤过程中，从新暴露的工作面上，伴随着大量瓦斯（甲烷、二氧化碳或混合物）剧烈喷涌而出的煤或岩石。

预抽采（采矿开始前）：在煤炭开采前抽采瓦斯。

后抽采（采矿开始后）：抽采煤炭开采过程中释放出的瓦斯。

呼吸性粉尘：粉尘中的微小颗粒，可进入并损害人体肺脏。

露天矿瓦斯：由于露天煤矿开采而释放出来的、矿床及周围地层中所蕴含的甲烷。

风排瓦斯（VAM）：煤层中释放的甲烷进入通风系统，并由通风井排出的低浓度瓦斯，浓度一般在 0.1% ~ 1.0% 范围内。

参 考 文 献

- [1] Belle, B. (2016) . *Underground Mine Ventilation Air Methane (VAM) Monitoring – An Australian Journey towards Achieving ‘Accuracy’* . Anglo American Coal, Australia.
- [2] Black, D. & Aziz, N. (2009) . *Reducing Coal Mine GHG Emissions Through Effective Gas Drainage and Utilisation*. 2009 Coal Operators Conference, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Illawarra Branch, pp. 217 – 224.
- [3] California Air Resources Board (2014) . *Compliance Offset Protocol Mine Methane Capture Projects Capturing and Destroying Methane From U. S. Coal and Trona Mines*. Adopted April 25, 2014. Sacramento, California USA.
- [4] CDM Executive Board (2006) . *Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane*. Meeting 28. Bonn, Germany: Clean Development Mechanism (CDM) Executive Board.
- [5] Coward, H. F. (1928) . *Explosibility of atmospheres behind stoppings*. Trans Inst Min Engs, 77, pp. 94 – 115.
- [6] Creedy, D. P. (1986) . Methods for the Evaluation of Seam Gas Content From Measurements on Coal Samples. *Mining Science and Technology*, Vol. 3, pp. 141 – 160. Amsterdam: Elsevier.
- [7] Creedy, D. P. (2001) . *Effective Design and Management of Firedamp Drainage*. UK Health and Safety Executive, Contract Research Report 326/2001, pp. 48, 1 annex, HSE Books.
- [8] Creedy, D. P. & Phillips, H. R. (1997, July) . *Methane Layering in Bord – and – Pillar Workings*. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report. Project COL 409. Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.
- [9] Creedy, D. P. , Saghafi, A. , & Lama, R. D. (1997, April) . *Gas Control in Underground Coal Mines: IEA Coal Research*. International Energy Agency (IEA) CR/91, pp. 120. London: The Clean Coal Centre.
- [10] Creedy, D. P. , Lunarzewski, L. (2001) . *Gas Drainage Management System for Modern Coal Mines*. Seventh International Mine Ventilation Congress. Krakow, Poland, 17 – 22 June.
- [11] Department of Mineral and Energy Affairs (1994, October) . Guidelines for a Code of Practice for the Ventilating of Mechanical Miner Sections in Coal Mines in terms of Section 34 (1) of the Minerals Act 1991. Second Edition, Ref. GME 16/2/1/20.
- [12] Department of Mineral Resources, NSW. (1995) . Outburst Mining Guideline. Coal Mining Inspectorate and Engineering Branch, MDG No. 1004.
- [13] Diamond, W. P. & Levine, J. R. (1981) . *Direct Method of Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results*. Report of Investigation 8515. Pittsburgh, PA (U. S.) . United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- [14] Diamond, W. P. & Schatzel, S. J. (1998) . Measuring the Gas Content of Coal: A Review.

- Int. Journ. of Coal Geology* 35, pp. 311 – 331. Amsterdam; Elsevier.
- [15] ESMAP (2007, July) . *A Strategy for Coal Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) Development and Utilisation in China; Formal Report 326/07.* p. 109. Washington, D. C. The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) /WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) .
- [16] Gaskell, P. (1989) . *A Study of Sub – Surface Strata Movement Associated with Longwall Mining.* PhD. Thesis. University of Nottingham.
- [17] GMI (2015) . International Coal Mine Methane Projects Database. Global Methane Initiative. Washington, D. C. USA. www.methanetomarkets.org.
- [18] IEA (2014) . *Medium – Term Coal Market Report 2014.* Paris, France; International Energy Agency (IEA) .
- [19] IEA (2015a) . *2015 Key World Energy Statistics.* Paris, France; International Energy Agency (IEA) .
- [20] IEA (2015b) . *Medium – Term Coal Market Report 2015.* Paris, France; International Energy Agency (IEA) . December 18, 2015.
- [21] ILO (2006) . *Code of Practice on Safety & Health in Underground Coal Mines.* Geneva, Switzerland. International Labour Organisation.
- [22] IPCC 2014; Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I , II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)] . IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. (ILO) .
- [23] IPCC (2007) ; *Climate Change 2007; Synthesis Report. Contribution of Working Groups I , II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)] . Geneva, Switzerland; International Panel on Climate Change (IPCC) .
- [24] Janas, H. F. & Opahle, M. (1986). Improvement of Gas Content Determination. *Glückauf – Forschh* 47, pp. 83 – 89. Essen, Germany.
- [25] Kissell, F. N. (2006) . *Handbook for Methane Control in Mining.* Pittsburgh, PA (U. S.) : Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health.
- [26] Kissell, F. N. , et al. (1973) . *Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design.* Report of Investigation RI7767. U. S. Bureau of Mines.
- [27] Lama, R. D. (1995) . Safe gas content threshold value for safety against outbursts in the mining of the Bulli seam. Int. Symp. cum Workshop on Management & Control of High Gas Emission & Outbursts Wollongong, 20 – 24 March 1995.
- [28] Landman, G v R. (1992) . *Ignition and initiation of coal mine explosions.* PhD. Thesis, University of the Witwatersrand, p. 252.

- [29] Marshall, James S. , et al (2011) , “Surface Mine Methane Emissions and Project Opportunities “ , Power Point Slides , presented at the Global Methane Initiative All – Partnership Meeting 12 – 14 October 2011 , Park Inn , Krakow , Poland Retrieved from : https://www.globalmethane.org/documents/events_coal_101411_tech_marshall.pdfMSHA (2009) . *Injury experience in coal mining* , MSHA IR1341. Washington , D. C . ; U. S. Department of Labor , Mine Safety & Health Administration (MSHA) .
- [30] Moreby, R. (2009) . Private communications.
- [31] SAWS (2009) . China State Administration of Worker Safety.
- [32] Shi Su, et al. (2006, January) . *Development of Two Case Studies on Mine Methane Capture and Utilisation in China*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) .
- [33] University of Alberta. (2004) . *Flare Research Project: Final Report 1996 – 2004*. Kostiuk, L. , Johnson, M. , and Thomas, G. Edmonton, Alberta, Canada; University of Alberta.
- [34] USEPA (2012) . *Global Anthropogenic Non – CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990 – 2030*. USEPA 430 – S – 12 – 002. Washington, DC, USA. December 2012.
- [35] www USEPA.gov/climatechange/USEPAactivities/economics/nonco2projections.html.
- [36] USEPA (2006a) . *Global Anthropogenic Emissions of Non – CO₂ Greenhouse Gases: 1990 – 2020*. USEPA – 430 – R – 06 – 003. Washington, D. C. , USA.
- [37] USEPA (2006b). *Global Mitigation of Non – CO₂ Greenhouse Gases*. USEPA – 430 – R – 06 – 005. Washington, D. C. ; U. S. Environmental Protection Agency.
- [38] USEPA (2004) . *Methane Emissions from Abandoned Coal Mines in the United States; Emission Inventory Methodology and 1990 – 2002 Emission Estimates*. Washington, D. C. , USA. April 2004.
- [39] von Schoenfeldt, H. (2008, January) . “Advanced CMM and CBM Extraction Technologies.” CBM Conference. Singapore.
- [40] WCA (2014) . *Coal Facts 2014*. World Coal Association. September 2014. London, United Kingdom.

附加参考资料

- [1] Boxho, J. , Stassen, P. , Mücke, G. , Noack, K. , Jeger, C. , Lescher, L. , Browning, E. , Dunmore, R. , & Morris, I. (1980) . *Firedamp Drainage Handbook for the Coalmining Industry in the European Community*, p. 415. Coal Directorate of the Commission of the European Communities. Essen; Verlag Glückauf GmbH.
- [2] Brandt, J. & Kunz, E. (2008) . *Gas Drainage in High Efficiency Workings in German Coal Mines*. Presentation at the 21st World Mining Congress, session “Methane Treatment,” pp. 41 – 50. Krakau.
- [3] Creedy, D. P. (1996) . *Methane Prediction in Collieries. Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Final Report, Project COL 303*. Johannesburg, South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.
- [4] ESMAP (2008, December) . *Economically, socially and environmentally sustainable coal mining sector in China; World Bank Report No. 47131*, pp. 258. Washington, D. C. : The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) /WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) .
- [5] Hinderfeld, G. (1985) . State and Perspectives of Gas Drainage. *Bergbau 2*, pp. 7. Essen, Germany.
- [6] Kravits, S. J & Li, J. (1995, March) . Innovative in – mine gas recovery techniques implemented by Resource Enterprises. In: *International Symposium – Cum – Workshop on Management Control of High Gas Emission and Outbursts*, pp. 523 – 532. Wollongong, NSW, Australia.
- [7] Lama, R. D. & Bodziony, J. (1998) . Management of outburst in underground coal mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 83 – 115, Amsterdam; Elsevier.
- [8] Lunarzewski, L. W. (1998) . Gas Emission Prediction and Recovery in Underground Coal Mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 117 – 145, Amsterdam; Elsevier.
- [9] Lunarzewski, L. , Creedy D. P. (2006) . *Australian Decommissioned Mines Gas Prediction*. ACARP 2005 Project C14080 Newcastle, Australia, September 18.
- [10] Mine ventilation handbook, Mine Ventilation Society of South Africa.
- [11] Moore, S. , Freund, P. , Riemer, P. , & Smith, A. (1998, June) . *Abatement of Methane Emissions*. Paris, France: InternationalEnergy Agency (IEA) Greenhouse Gas R&D Programme.
- [12] Mutmansky, J. M. & Thakur, P. C. (1999) . *Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines*, pp. 46.
- [13] Noack, K. (1998) . Control of gas emissions in underground coal mines. *Int. Journ. Of Coal Geology 35*, pp. 57 – 82. Amsterdam; Elsevier.
- [14] Schlotte, W. & Brandt, J. (2003) . *50 Years of Coal Research – Gas Emissions, Ventilation and Climate*. Glückauf 139, pp. 402 – 408. Essen, Germany.
- [15] Sdunowski, R. & Brandt, J. (2007) . Optimizing the Gas Drainage in High Performance Longwalls. *Glückauf 143*, pp. 528 – 534. Essen, Germany.

- [16] Skiba, J. (2009, November) . Central Mining Institute of Katowice. Personal communication.
- [17] Somers, M. J. & Schultz, H. L. (2008) . *Thermal Oxidation of Coal Mine Ventilation Air Methane*. 12th U. S. /North American Mine Ventilation Symposium 2008, Reno, NV (U. S.) : Wallace.
- [18] Thakur, P. C. (1997) . Methane Drainage from Gassy Mines – A Global Review. *Proc. of the 6th Int. Mine Vent. Congr.* pp. 415 – 422. Pittsburgh, PA (U. S.) .
- [19] USEPA (2003, July) . *Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane*. USEPA – 430 – R – 03 – 002. Washington, D. C. ; U. S. Environmental Protection Agency. [www. USEPA. gov/cmop/resources/index. html](http://www USEPA. gov/cmop/resources/index. html)
- [20] USEPA (2009, July) . *Coal Mine Methane Finance Guide*. USEPA – 400 – D – 09 – 001. Washington, D. C. ; U. S. Environmental Protection Agency.
- [21] USEPA (2009, July). *Coal Mine Methane Recovery; A Primer*. USEPA – 430 – R – 09 – 013. Washington, D. C. ; U. S. Environmental Protection Agency.
- [22] USEPA (2008, January) . *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System Suppliers*. USEPA – 430 – R – 08 – 004. Washington, D. C. ; U. S. Environmental Protection Agency.
- [23] Xu, T. , Tang, C. A. , Yang, T. H. , Zhu, W. C & Liu, J. (2006) . International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (2006) 905 – 919.

致 谢

赞助机构

联合国欧洲经济委员会（欧洲经委会）是联合国五个区域委员会之一，它是来自北美、西欧、中欧、东欧以及中亚一共 56 个国家聚会的论坛。联合国欧洲经济委员会的主要活动领域包括：经济合作与一体化、环境和人类住区、统计、可持续能源、贸易和运输。联合国欧洲经济委员会通过政策分析，实现其制定发展公约、制度和标准，以及提供技术援助的目标。（www.unece.org/energy/se/cmm.html）可持续能源委员会（SEC）成员国讨论能源相关议题，例如煤矿的开采和煤矿瓦斯问题。煤矿瓦斯专家组是可持续能源委员会的一个下属机构，定期针对煤矿开采生命周期中释放出的瓦斯管理、捕捉和利用等议题展开讨论，并对最佳实践经验进行推广。

全球甲烷行动倡议组织（GMI）是一个国际化公私合作组织，其与世界各国政府机构共同致力于促进产生甲烷的 5 个关键领域的项目开发：农业生产、煤炭开采、城市固体废弃物、石油和天然气系统以及废水处理。全球甲烷行动倡议组织在 2004 年启动了以减少温室气体（GHG）排放为目标的（行动）计划，这与包括《联合国气候变化框架公约》在内的其他国际公约的目标是相吻合的。与其他温室气体不同，甲烷是天然气的主要成分，可以转化为可利用的能源。因此，减少瓦斯的排放是减少温室气体成本有效的办法，同时还可以促进能源安全、推动经济发展、改善空气质量，并且提升矿工安全保障水平。全球甲烷行动倡议组织由 42 个成员国和欧洲经济委员会组成，这覆盖了大约全球 70% 的人为的甲烷排放量。针对煤矿瓦斯，全球甲烷行动倡议组织煤炭委员会组织了煤炭瓦斯回收和利用领域的权威专家，通过一系列的讲习班、培训、考察和能力建设活动，（促进）全球最先进的技术成果及实践经验方面的信息共享。（www.global-methane.org）

译者后记

《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南(2018)》由联合国出版委员会授权山西焦煤集团公司翻译出版。山西卓越瓦斯研究中心具体承办了全书的编译工作。

山西焦煤集团公司是中国最大的炼焦煤生产企业,在煤矿开采实践中,不断探索矿井瓦斯治理和综合利用,并深入有效地开展了瓦斯抽采与利用的国内外技术合作。山西卓越瓦斯研究中心是由山西焦煤集团公司主导设立的社会公益组织,致力于煤矿安全生产、清洁能源利用和温室气体减排,与联合国瓦斯专家委员会建立了长期业务合作关系。

本书修订说明、前言、综述部分,及第1、2、3、6章由刘效林编译,第4章由赵晋华编译,第5章由蒋璋编译,第7、8章由皮振林编译,第9章及附录1由刘艳红编译。在此,向在本书编译出版过程中给予大力支持和帮助的机构、组织和专家们表示衷心的感谢!

囿于译者水平,缺憾在所难免。恳请读者批评指正,以利于我们再版时修订,并不断改进我们的工作。

编译委员会
2019年6月

责任编辑：赵金园
封面设计：于春颖

ISBN 978-7-5020-7158-5



9 787502 071585 >

定价：40.00元