

联合国欧洲经济委员会

甲烷市场化合作计划

# 有效抽采及利用煤矿区煤层气 最佳实施方案指南

欧洲经济委员会 能源系列 第 31 号文件



联合国

纽约 日内瓦 2010 年

## 说明

本文中所提到的名称及内容表述不代表联合国秘书处就任何国家、领域或地区或其当局的法律地位、或关于边境或边界的规定的任何意见。

文中提到的公司、生产过程或产品，并非联合国所认可。

该中文版本非联合国官方译本。

Copyright © United Nations, 2010 for English edition

Copyright © United Nations, 2010 for Chinese edition

All rights reserved worldwide

## 前言

在过去两个世纪里，煤炭已经成为全球一次能源生产的重要来源，而在不久的将来，煤炭也将继续成为全球主要能源。煤炭开采所释放的甲烷对井下开采环境造成严重的安全威胁，瓦斯事故每年都会导致巨大的人员伤亡。然而瓦斯管理并不仅仅是出于对安全方面的考虑。直接将甲烷排放到大气中，尤其是通过抽放系统排出，会造成永久性的能源损耗，而产生的排放物也会对气候变化造成不利影响。幸运的是，我们可以利用有效协调的解决方案来处理这些问题。

尽管目前有许多的关于煤炭行业甲烷管理方面的技术文献，但缺乏一个是内容丰富且适合高级管理人员使用的指南。《有效抽采及利用煤矿区煤层气最佳实施方案指南》一书就是为了填补这一空白而编制的。指南以简洁明了的方式阐述了煤矿瓦斯的抽采及利用的原则和标准，为决策者提供了扎实的认识基础，以便直接引导政策与商业决策的制定。我们相信本指南对于实现零死亡率和避免瓦斯爆炸风险是至关重要的，同时能够有效降低煤矿瓦斯排放对环境的造成影响。变化必须从高层开始。

这份指导性文件同时也能成为学生、甚至技术专家了解甲烷管理关键原则和参考的一份介绍性读物。实际上，作为整个动议的一部分，一些组织机构投资重印了1980年由Verlag Glückauf出版社于为欧洲经济共同体委员会首次出版的《瓦斯排放手册》（*Firedamp Drainage Handbook*），这本权威的技术参考手册意义重大。

我们希望强调的是，《最佳实践指南》并不会取代或逾越国家法律、国际法或其他合法缔结的契约。此处所说的原则是为了完善现有法律法规和监管框架所提供的指导，同时也是为了行业及监管机制的进一步发展，开展更安全和更有效的实践。

指南的编写者旨在促进煤矿行业的安全生产，并回顾最近发生的一些事故以及过去所发生的死亡事故，希望他们所做的工作能够对煤炭企业的安全生产有所帮助。

2010年2月

联合国欧洲经济委员会

甲烷市场化合作伙伴计划

# 目录

前言 .....	3
目录 .....	4
致谢 .....	8
缩略词 .....	10
术语汇编 .....	12
执行概要 .....	14
第一章 导言.....	18
关键信息 .....	18
1.1 文件的目标.....	18
1.2 问题 .....	18
1.3 瓦斯抽采、利用和减排.....	19
第二章 瓦斯治理的基本因素.....	21
关键信息 .....	21
2.1 煤矿瓦斯治理的目标.....	21
2.2 瓦斯灾害的发生.....	21
可燃气体混合物的点燃.....	23
2.3 减少爆炸风险.....	23
2.4 监管和管理原则.....	24
高效的安全监管框架.....	24
执行.....	24
安全生产条件下瓦斯浓度限制.....	25
瓦斯的安全输送和利用.....	26
降低火灾风险.....	26
第三章 煤矿瓦斯的赋存、释放与预测.....	27
关键信息 .....	27
3.1 简介.....	27

3.2 煤层瓦斯的赋存.....	27
3.3 瓦斯释放过程.....	27
3.4 煤矿相对涌出量.....	28
3.5 了解煤矿的瓦斯涌出特征.....	29
3.6 测量现场瓦斯含量.....	29
3.7 煤矿瓦斯流量的实际估算.....	31
<b>第四章 矿井通风.....</b>	<b>33</b>
关键信息 .....	33
4.1 通风遇到的挑战.....	33
4.2 通风设计的关键.....	33
4.3 高瓦斯工作面的通风.....	34
4.4 通风系统的电力要求.....	36
4.5 掘进巷道的通风.....	36
4.6 通风监控.....	37
4.7 通风控制.....	37
<b>第五章 瓦斯抽采.....</b>	<b>38</b>
关键信息 .....	38
5.1 瓦斯抽采及其带来的挑战.....	38
5.2 全球范围瓦斯抽采的基本原则.....	38
5.3 预抽的基本原理.....	38
5.4 边采边抽的基本原理.....	40
5.5 瓦斯排采系统设计.....	41
5.6 井下瓦斯管道基础设施.....	42
5.7 对瓦斯抽采系统的监控.....	42
<b>第六章 瓦斯利用与减排.....</b>	<b>44</b>
关键信息 .....	44
6.1 煤矿瓦斯与减缓气候变化.....	44

6.2 煤矿瓦斯是一种能源.....	44
6.3 利用方式的选择.....	45
6.4 煤矿瓦斯的减排和使用.....	46
6.4.1 中高浓度瓦斯.....	47
6.4.2 低浓度瓦斯.....	47
6.4.3 低浓度瓦斯提纯技术.....	48
6.4.4 点火炬.....	48
6.5 矿井风排瓦斯 (VAM) 的治理和利用.....	49
6.6 甲烷监控.....	49
<b>第七章 成本和经济性分析.....</b>	<b>51</b>
关键信息.....	51
7.1 瓦斯抽采的商业运作.....	51
7.2 瓦斯抽采成本比较.....	51
7.3 甲烷利用的经济价值.....	52
7.4 碳融资和其他激励措施.....	54
7.5 利用的机会成本.....	56
7.6 环境成本.....	57
<b>第八章 总结.....</b>	<b>58</b>
<b>第九章 案例分析.....</b>	<b>60</b>
案例研究 1：英国-高瓦斯煤层，岩层地应力巨大，后退式长壁开采，易自燃，实现计划产量.....	61
案例研究 2：德国-高瓦斯长壁工作面的高效作业.....	64
案例研究 3：高效长壁作业与高瓦斯排放量-澳大利亚.....	66
案例研究 4：降低房柱式开采的爆炸风险-南非.....	68
案例研究 5：煤层气（煤矿瓦斯）热电联产的发展/减排方案-中国.....	70
案例研究 6：风排瓦斯（VAM）- 中国.....	71
案例研究 7：风排瓦斯（VAM）- 澳大利亚.....	73

附件一 瓦斯抽采方法比较.....	75
参考文献 .....	83
补充材料 .....	85

## 致谢

### 主办单位

联合国欧洲经济委员会(UNECE)是联合国五大区域委员会之一，是来自北美、西欧、中欧、东欧以及中亚等56个国家聚会经济合作机制的论坛，共同探讨如何加强成员国间的经济合作。欧洲经济委员会的主要活动领域包括：经济合作、环境和人居环境、统计、可持续能源、贸易、工业与企业发展、木材以及交通运输等。通过政策分析、制定公约、法规和标准及提供技术援助等途径实现其共同目标。[www.unece.org/energy/se/cmm.html](http://www.unece.org/energy/se/cmm.html)

甲烷市场化伙伴计划是一项由 30 个伙伴国及欧洲委员会于 2004 年共同建立的国际性公私合作伙伴关系计划，该计划的重点是希望通过在煤炭开采、垃圾填埋、石油和天然气及农业等四个关键领域开展甲烷回收和利用项目，促进具有经济性的甲烷减排。其中煤炭分委员会通过召开研讨会、培训考察和能力建设等活动，邀请煤矿瓦斯回收和利用方面的专家分享在煤矿瓦斯回收利方面的最新技术和实践经验。[www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org)

### 结构

该指南是由专门负责提供指导和总体规划的指导委员会提出,由五名在井下通风和瓦斯抽采方面全球知名的技术专家所组成的技术专家小组共同起草。然后该文件草案首先由顾问的专家组进行审阅，在确保信息清楚有效的情况下，再由技术评审小组进行评定。

### 项目指导委员会

- Pamela Franklin, Co-chair, M2M Coal Subcommittee
- Roland Mader, Vice Chairman, UNECE Ad Hoc Group of Experts on Coal Mine Methane
- Raymond C. Pilcher, Chairman, UNECE Ad Hoc Group of Experts on Coal Mine Methane
- Carlotta Segre, Secretary, UNECE Ad Hoc Group of Experts on Coal Mine Methane
- Clark Talkington, Former Secretary, UNECE Ad Hoc Group of Experts on Coal Mine Methane

### 技术专家小组

- Bharathe Belle, Anglo American
- David Creedy, Sindicatum Carbon Capital Ltd.
- Erwin Kunz, DMT GmbH & Co. KG
- Mike Pitts, Green Gas International
- Hilmar von Schoenfeldt, HVS Consulting

### 顾问小组

- Yuriy Bobrov, Association of Donbass Mining Towns (Ukraine)



- Graeme Hancock, World Bank
- Martin Hahn, International Labour Organization
- Hu Yuhong, State Administration for Worker Safety (China)
- Sergei Shumkov, Ministry of Energy (Russian Federation)
- Ashok Singh, Central Mine Planning & Design Institute (India)

#### 技术评审小组

- John Carras, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)
- Hua Guo, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia) Li Guojun, Tiefsa Coal Industry Ltd. (China)
- Glyn Pierce Jones, Trolex Ltd. (UK)
- B.N. Prasad, Central Mine Planning & Design Institute (India)
- Ralph Schlueter, DMT GmbH & Co. KG (Germany)
- Karl Schultz, Green Gas International (UK)
- Jacek Skiba, Central Mining Institute of Katowice (Poland)
- Trevor Stay, Anglo American Metallurgical Coal (Australia)
- Oleg Tailakov, International Coal and Methane Research Center, Uglemetan (Russian Federation)

除上述人员之外，主办单位还希望对在项目的最初阶段发挥了重要作用的 Luke Warren 表示感谢。

## 缩略词

CBM	煤层气
CDM	清洁发展机制
CERs	核证减排量
CFRR	催化
CH <sub>4</sub>	甲烷
CMM	煤矿瓦斯
CMR	整体式催化反应室
CNG	压缩天然气
CO <sub>2</sub>	二氧化碳
CO <sub>2</sub> e	二氧化碳当量
ERPA	减排量购买协议
ERUs	减排量单位
ESMAP	能源部门管理援助计划
GHG	温室气体
GWP	全球变暖潜能
IBRD	国际复兴开发银行
IC	内燃
I&M	检查维修
JI	共同减量
kWh	千瓦时
LNG	液化天然气
l/s	升/秒
m	米
m/s	米/秒
m <sup>3</sup> /d	立方米/天
m <sup>3</sup> /s	立方米/秒

mD	毫达西（日常应用中约相当于 $10^{-3}$ （微米 <sup>2</sup> ））
MRD	中半径水平钻井
MSA	分子筛吸附
Mt	百万吨
Mtpa	百万吨/年
MW <sub>e</sub>	兆瓦
Nm <sup>3</sup>	标米
PSA	变压吸附
scfm	标准体积
t	吨
t/d	吨/天
TFRR	热力双向流反应器
TRD	极小转弯半径钻井
UNECE	联合国欧洲经济委员会
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
VAM	风排瓦斯
VERs	自愿减排量
USBM	美国矿业局

## 术语汇编

在煤炭和煤层气行业，不同地区对某些术语和缩写的使用还存在一些混淆。除了这里所列出，联合国欧洲经济委员会(UNECE)还制定了一个《煤矿瓦斯术语和定义汇编》，就此类术语在不同地区的使用情况做了更详尽的说明。

([www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3\\_e.pdf](http://www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf)).

**风门：**由一组门组成的装置，该装置保障人员和设备从矿井通风回路的一端到达另一端时不会引起这两地之间的气体流通。

**局部通风：**主通风回路中的一部分空气通过辅助风扇和风道被直接导入到独头巷道的入口处。

**后退式回风系统：**在 U 型通风长壁开采面的回风末端设置的一种临时通风装置。该装置将工作面后的一部分空气转移，使瓦斯抽放钻孔能够将这部分空气排出，从而防止采空区瓦斯浓度过高而进入工作面末端。

**冒泄井：**一种垂直井，通过该井可将工作区中含有瓦斯的空气排出。

**独头巷道：**只有单一入口的需要进行局部通风的掘进巷道。

**房柱式开采(房柱法)：**一种沿着巷道每隔一段距离进行开采，在煤房之间保留煤柱以支撑顶板的采煤方法。

**捕集(抽采)率：**甲烷排放系统中捕集到的甲烷(体积)与总共释放出的甲烷之间的比例。释放出的瓦斯包括抽放的瓦斯和排放到矿井通风空气中的瓦斯的总和。通常用百分比表示，它可以表示单个长壁工作面或整个矿井捕集(或抽放)效率。

**煤前瓦斯：**在割煤机采煤过程中从煤层工作面释放出的瓦斯。

**煤层气：**对煤层中自然发生的富含甲烷气体的通称，通常含有 80% 至 95% 的甲烷，以及少量的乙烷、丙烷、氮气、二氧化碳。从国际普遍使用情况看，这个术语是指利用表面钻孔的方法从未开采煤层中所回收的甲烷。

**煤矿瓦斯：**是指利用井下甲烷抽放技术从工作煤矿中捕集到的一种气体，是一种由甲烷与其他碳氢化合物以及水蒸气所组成的混合物。由于开采活动导致的裂隙，以及井下管道系统的连接问题，不可避免地导致空气泄露到瓦斯抽放钻孔或泄放通道中，煤矿瓦斯经常被空气以及相关的氧化物所稀释。该定义包含任何从井下捕集的瓦斯，无论是通过采前预抽还是采后抽放，以及所有从表面采空井中抽放的瓦斯。采前预抽的煤矿瓦斯可能具有较高的纯度。

**外来气：**是指除了煤前瓦斯之外的其他瓦斯排放。

**沼气：**煤矿瓦斯的别称。

**瓦斯抽采：**在煤层中捕集自然发生的瓦斯以防止其进入矿井通风巷道的方法。通过利用预抽采技术可以在开采前将瓦斯从煤层中抽出，也可以利用采后抽放技术将那些由于开采过程扰动导致煤层中产生的瓦斯从煤层中抽出。如果甲烷是所要捕集瓦斯的主要组成部分，则其经常被称为甲烷抽采。

**采空区：**已经通过长壁开采后遗留下的破碎的可渗透空洞区，采空区的顶板冒已落陷，进而要  
在上部底层，以及在工作煤层的下方（程度较轻）进行压裂和应力解除。美国通常用 gob 一词表示采  
空区；而在其他地区通常用 goaf 一词表示。

**甲烷抽采：**参见**瓦斯抽采**。

**天然气：**通常是指从地质层而非从煤层所抽采的瓦斯（例如，从“传统的”天然气储量）。天然气  
主要应由甲烷组成，但其最初也可能来自煤层。

**预抽（预抽采）：**在进行煤炭开采前进行的瓦斯抽采。

**边抽边采（开采后的抽采）：**抽采来自开采活动中所释放的甲烷。

**呼吸道尘埃：**能够进入并导致人体肺部损伤的灰尘颗粒。

**风排瓦斯：**从煤层排出的甲烷进入通风系统，并以较低的浓度从通风井中排出，浓度范围通常  
为 0.1% 至 1.0%（按体积计算）。

## 执行概要

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。未来一段时期，主要的工业经济、新兴经济、过渡经济乃至全球经济仍将依赖煤炭能源。目前，煤炭占全球一次能源消费总量的 25%，占电力行业能源消耗的 40%，占钢铁业和铝业能源消耗的近 70%。国际能源署(IEA)指出，2030 年新兴经济体的能源需求将增长 93%，其中大部分增长来自中国和印度。煤炭将成为满足这部分需求的重要来源。(IEA, 2009)。

由于煤炭产量的日益增长，煤炭采深也随之增大。世界许多国家的浅层储量逐渐枯竭，开采不断向深部及高瓦斯煤层延伸，生产也将更富挑战性。同时，社会对煤矿安全生产和环境保护提出了更高的要求。《实施有效抽采及利用煤矿区煤层气最佳实施方案指南》对于减少经常与煤炭生产相伴的瓦斯灾害、减少温室气体排放以保护环境具有重要意义。

### 煤矿瓦斯对安全和环境问题的挑战

世界各国的煤炭行业、政府、贸易机构及职业安全专家均为瓦斯爆炸事故的频发性和严重性而深感忧虑，尤其在一些新兴经济体国家，情况令人堪忧。为了科学有效地控制风险，需要在全世界范围内推广好的开采方法，即便是在发达国家，煤矿也无法避免安全风险。无论什么地点及开采条件，瓦斯事故的风险是可以有效降低的。

甲烷是一种易燃易爆气体，爆炸界限为 5%~15%。在这个范围内，或即使浓度比规定下限低 2.5 倍或比上限高 2 倍的甲烷气体，因存在爆炸风险而不能进行运输、收集或利用。

煤矿对瓦斯风险进行有效管理的同时也能减少温室气体排放。甲烷是一种重要的温室气体，其温室效应是二氧化碳的 20 倍。煤矿是甲烷主要的排放源。甲烷占全球温室气体总排放量的 14%，而煤矿所排出的甲烷占全球甲烷排放量的 6%，约相当于每年排放 4 亿 t 二氧化碳当量(MtCO<sub>2e</sub>)。到 2020 年煤矿瓦斯的排放还将有所增加(甲烷市场化 2008；政府间气候变化专门委员会, 2007；美国环保局, 2006a)预计到 2020 年，煤矿瓦斯的排放量将达到 7.93 亿 t 二氧化碳当量。(ESMAP, 2007)

### 煤层气赋存及治理

在井工矿的一定深度下，大量甲烷以自然形态储存于煤层中，含量通常达 80%-95%。受采动影响，煤层会释放出煤层气(煤矿瓦斯)。只有当煤层气(煤矿瓦斯)与空气混合后，才具有可燃性并存在爆炸隐患。

在某些地质条件下，煤矿也排出大量的二氧化碳(如澳大利亚，法国，南非和中欧)。煤层中的二氧化碳对矿井通风系统管理有重要影响。

在采煤过程中，为了降低爆炸风险，值得赞许的办法包括通过通风系统等途径快速稀释混合气体，将浓度控制在安全范围内，避免瓦斯浓度达到爆炸范围。当矿井中的瓦斯流量超过通风系统的能力，为保证能够充分稀释瓦斯浓度，则可以在瓦斯涌入到巷道前通过抽采系统将其抽出。

瓦斯抽采系统包括选择适当的捕集方法和有效的抽采系统。良好的抽采系统能把瓦斯浓度控制在爆炸界限最高值的两倍以上(30%或以上)，确保安全抽采和运输，并在有条件的情况下对其进行利用。

## 瓦斯治理相关规定

最大限度降低爆炸风险的方法应与实施有效的矿井通风和瓦斯利用安全规程相结合，可以同时提高瓦斯的抽采数量与质量。

此外，制定实施瓦斯抽采、运输、利用安全规程不仅有利于提高抽采标准，更能增加清洁能源供给、促进温室气体减排。

## 井下瓦斯预测

虽然各国的具体情况不同，但是在一般情况下，根据其地质及开采条件井工矿的瓦斯流量是可预测的。由于煤层间、井下水系及瓦斯互相牵制的复杂关系，目前对于深部开采及多层开采仍缺乏可靠的瓦斯涌出量预测方法。尽管如此，关于瓦斯流量、瓦斯抽采、通风要求及其利用的理论有很多，可以在煤矿开采规划中加以利用。

根据瓦斯的特点，不正常的瓦斯涌出或突出是很难预测的，但在何种条件下容易发生瓦斯突出是可知的。因此遵循正确的指导可以更有效地管理这类风险。

开采活动有时候会影响临近的天然气储层，导致难以预测的瓦斯突出，涌出量可能是预期的两倍。类似的情况可以在开采前期通过预测数据和测量数据对比可知。

## 通风系统的作用

高瓦斯采煤工作面的最大抽采率主要由两种因素决定：1) 矿井通风能力，是指将瓦斯稀释到安全浓度的能力；2) 矿井瓦斯抽采系统效率。

运营成本是设计矿井通风系统的决定因素。通风系统的电力消耗是矿井运营中最大的开支，与空气流量的三次方成正比。因此，建设瓦斯抽采系统或提高抽采效率通常比增加通风量更节省成本。

## 瓦斯抽采

瓦斯抽采的目的是在瓦斯进入巷道前，从源头抽采浓度较高的瓦斯。从严格监管的角度来看，只有足够的抽采量才能保证通风系统的风量不会超标。事实证明，实现瓦斯抽采最大化能够保障安全生产、减少环境污染、促进能源利用。

瓦斯抽采主要包括采前预抽和边抽边采。采前预抽是直接降低煤层瓦斯流量的唯一方式。因此，如果抽采煤层是瓦斯涌出的主要来源，那么预抽就显得尤为重要，但通常这种技术只适用于中-高渗透率的煤层。边抽边采包括由于采煤释放出来的瓦斯在进入通风巷之前的抽采,还包括有时在工作面上方或下方的采动区域的抽采。边抽边采可以包括地面钻孔和井下钻孔。

抽采方法的选择不当和实施效果差都会导致抽采率较低、大量气体涌入工作面。如果抽采浓度达不到安全水平（如抽采浓度低于 30%），将对瓦斯运输与利用产生负面影响。

通过正确安装与维护、定期监测和系统的钻孔规划，能够明显提高抽采系统的能力。

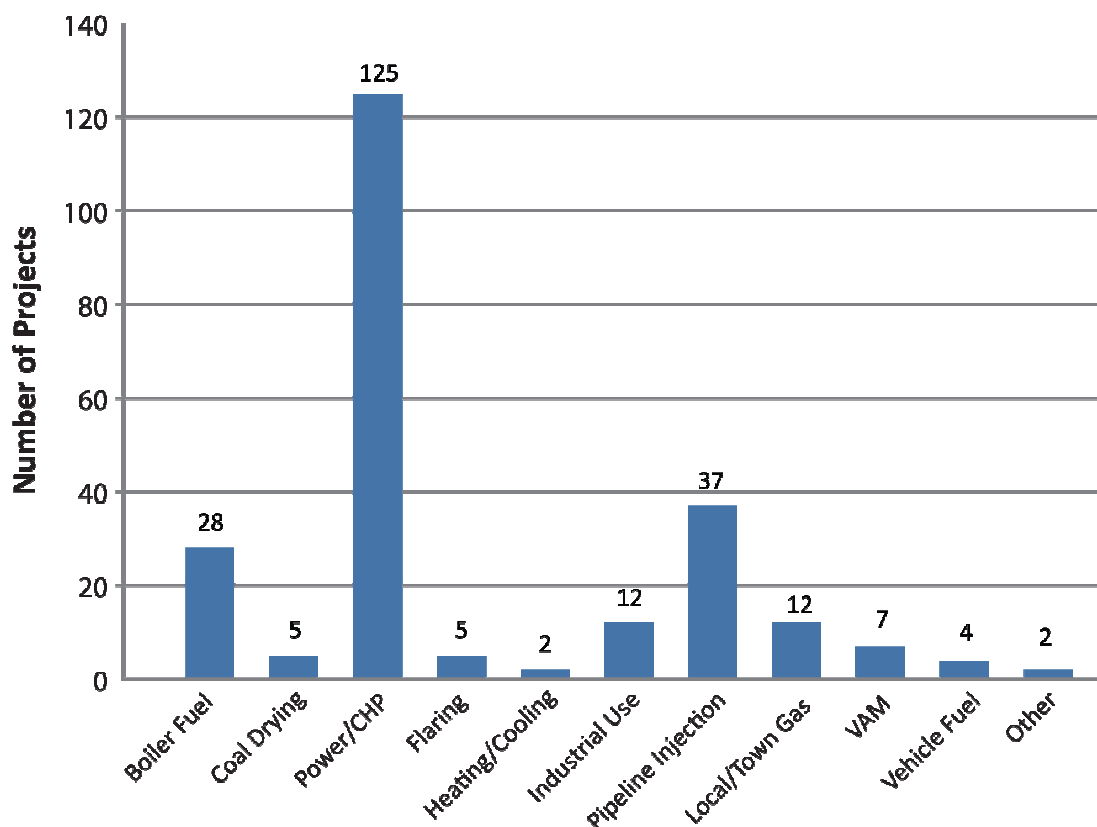
有实例可以证明能够建立和管理高效的瓦斯抽采系统。是否具有高效的瓦斯治理系统是保证高瓦斯井工矿能否盈利的一个主要决定因素。

世界各地煤矿的实践经验表明，投资建设高效的瓦斯抽采系统可以缩短因瓦斯问题而停工的时间、更安全的开采环境，而且还可以促进瓦斯利用，实现减排。

## 甲烷利用与减排

煤矿瓦斯是一种具有多种用途的清洁能源。图 1 总结了全球范围内已知的煤矿瓦斯项目的分布情况，包括正在运营中、建设中、规划中以及过去开展过的项目。该数据是来自国际甲烷市场化合作伙伴计划建立的、包含了全球 240 多个项目的数据库。如图所示，主要项目类型包括发电、进入天然气管道和锅炉燃气（基于项目数量）。

**图 ES-1 全球各类项目煤矿瓦斯利用情况** 根据利用类型，本图显示了国际甲烷市场化合作伙伴计划掌握的全球上正在运行和开发中的煤矿瓦斯项目的总数。



注：Number of Projects——项目数量； Boiler Fuel——锅炉燃烧； Coal Drying——煤炭干燥； Power/CHP——发电/热电联产电厂； Flaring——点火炬； Heating/Cooling——供暖/供冷； Industrial Use——工业用途； Pipeline Injection——管道输送； Local/Town Gas——当地名用/城市用气； VAM——风排瓦斯； Vehicle Fuel——汽车燃料。

（来源：甲烷市场化伙伴计划，2009）



瓦斯提纯技术已经被开发并广泛应用（如在美国），用来去除高浓度煤层气中的杂质-尤其是预抽阶段的煤层气-使之符合严格的管道质量标准。对于其他利用方法，可能不需要应用成本较高的提纯技术，而是通过提高井下瓦斯抽采标准，避免高成本投入。

通过合适的设备与处理程序，未被利用的瓦斯可以通过点火炬的方式安全销毁，从而实现温室气体排放最小化。全球变暖系数（GWP）大于 20 的甲烷经过燃烧可以转换成 GWP 仅为 1 的二氧化碳。（IPCC, 2007）

未进入抽采系统的瓦斯将被稀释到矿井风排瓦斯中，然后直接排入大气，其甲烷浓度通常在 1% 以下。尽管浓度很低，但风排瓦斯却是全球最大的甲烷排放源。目前已有几处煤矿（如澳大利亚、中国和美国）正在开展矿井乏风利用示范项目和商业化项目，采用热氧化技术实现减排（如乏风发电），同时还不断涌现出其他矿井乏风减排技术（如催化氧化）。

## 成本与经济性分析

有效的瓦斯抽采可以降低爆炸风险，从而降低发生事故的风险。风险的降低进而又能促使相关投入减少。尽管各国因瓦斯相关事故造成的损失有所差别，但损失都很大。例如，某个典型的采用长壁开采的高产矿井，如果由于瓦斯相关意外或事故导致该矿井每年停产或关闭 10% 的时间，将造成 800 万到 1600 万美元损失。一起事故对一个大型煤矿所造成的损失在 200 万到 800 多万美元之间，包括各种停产损失费、诉讼费用、赔偿费用和罚款等。

同时，瓦斯抽采还能促进瓦斯回收利用。此类能源回收项目本身具有经济性，如煤层气销售或瓦斯发电、制成汽车燃料或其他以瓦斯为原料的产品等。

瓦斯回收与利用项目不断增加，其中包括自愿减排量（VERs）、核证减排量（CERs）等形式的碳减排额度或其他如单位减排量（ERUs）等收入来源。潜在的碳融资机会可能是煤矿瓦斯利用项目具备经济可行性的关键因素，否则有些项目在经济性方面毫无吸引力可言。此外，碳融资可能是某些减排项目的唯一收入来源，如矿井乏风氧化（无能源回收）或煤矿瓦斯销毁等。

矿井乏风同样可以用于发电，但是，如果没有碳收入或其他鼓励措施（如电价优惠或投资组合标准），利用矿井乏风进行商业化发电是不可行的。

目前，由于投资发电固定设备与基础设施的机会成本较高，大多数煤矿的决策投资可能更倾向于扩大煤炭生产，而非开发煤矿瓦斯利用项目（尤其是发电）。然而，为了实现未来的环保目标，煤矿企业却可能需要进一步改善瓦斯抽采效果，以达到严格的矿井安全标准。这样做既可提高瓦斯抽采浓度，也为瓦斯回收利用项目提供额外的激励。

## 结论

采取全面综合的方法，控制煤矿瓦斯释放到工作面及随后排放到大气中的数量，将对整个矿井的安全生产、大气环境，尤其对温室气体减排，带来诸多益处：

- 世界各国已在甲烷赋存、预测和治理方面积累了丰富的经验，目前相关推广应用将有助于加强煤矿安全生产。实施好的瓦斯抽采方法，可以大大降低煤矿的瓦斯爆炸风险。
- 高效的瓦斯抽采系统可以提高矿井生产力，所以建设完善的抽采系统具有很好的商业价值，同时也有利于获得高浓度的煤矿瓦斯，为开发利用带来较大商机；
- 甲烷是一种重要的温室气体，因此通过瓦斯抽采利用、矿井乏风氧化等措施可以大大降低甲烷排放。

# 第一章 导言

## 关键信息

各种规定应以保障煤矿工人的安全为根本，这一点不可忽视。

应把建立爆炸风险最小化评估方法与执行健全的通风和利用安全规程相结合。

最理想的情况是煤矿企业能够深刻认识到建立完善的瓦斯管理系统所带来的益处，包括井下瓦斯治理、甲烷利用和温室气体减排。

### 1.1 文件的目标

该文件旨在指导煤矿所有者、开采者、政府监管部门和政策制定者设计和建立安全有效的井下瓦斯抽采控制系统，促进煤矿安全开采，降低因瓦斯事故造成的人员伤亡及财产损失。

进行瓦斯抽采重要的附加效益在于能够回收甲烷，优化利用原本被浪费的能源。因此，制定这份指导性文件的重要意义在于促进和鼓励煤矿进行瓦斯抽采利用，实现温室气体减排。最终希望通过采用以下途径能够加强全球煤炭开采的可持续性发展，改善煤矿财务情况：

- 争取达到零死伤和零财产损失的目标；
- 为全球煤炭行业在安全生产、应对气候变化、企业社会责任等方面起到示范作用；
- 在发达经济体与新兴经济体间搭建交流与合作的平台；
- 在企业和政府及监管部门间建立必要的联系；
- 使煤矿瓦斯抽采成为风险管理的一部分。

该指导性文件目的在于提供“原则性导向”，也就是说不是在不考虑现场具体条件、地质条件和实际开采的情况下提出一个硬性规定。正是因为认识到不存在普遍解决方案，该文件只制定了一系列能够在具体实际中得到适当应用的宽泛的原则。通常随着时间的推移，服务于这些原则的技术也会持续不断地发展进步。文件还简要列出了本行业在国际上一些较好的实践经验。

该文件并非全面详尽的甲烷抽采技术手册。文件的最后将列出参考文献和其他补充材料。

### 1.2 问题

煤炭无论在工业化国家还是在新兴经济体国家都是重要的能源。为了满足庞大的能源需求，特别是来自迅速崛起的经济体的需求，煤矿承受着巨大的压力，不得不加大开采力度以增加产量，有时甚至超出了安全生产所允许的生产能力，由此导致采煤工作任务过重，常以牺牲安全为代价进行开采。瓦斯的存​​在给煤矿带来了一系列安全问题，需要通过专业途径进行有效治理。井下瓦斯爆炸在众多煤炭开采国的发生概率很小，但每年还是会造成了数千人员的伤亡。

一起事故可能造成多人死亡。表 1.1 显示了 2000 年以来在一些国家发生的最严重的煤矿爆炸事故。通过有效的瓦斯治理，可以避免类似悲剧的发生。

表 1.1 2000 年以来的重大煤矿爆炸事故

国家	日期	煤矿	死亡人数
----	----	----	------

中国	2005年2月14日	阜新孙家湾煤矿海州立井	214
哈萨克斯坦	2006年9月20日	Lenina, Karaganda	43
俄罗斯	2007年3月19日	乌连诺夫斯卡雅煤矿, Kemerovo	108
乌克兰	2007年11月19日	扎夏德科煤矿, Donetsk	80
美国	2006年6月2日	西弗吉尼亚州萨戈煤矿	12

由于开采活动造成的扰动，从煤层和周围地层释放出的瓦斯一旦进入矿井就有可能引发事故。释放的瓦斯量是煤炭开采率、煤层与围岩初始瓦斯含量的一个函数。

各国的监管部门都对井下通风巷道的瓦斯浓度设置了最高限。因此，释放到工作面的瓦斯成为煤炭生产的一个制约因素。

为了减少井下瓦斯造成的灾害，各国政府在安全生产亟需相关指导。根据资料，全球各地井工矿的事故死亡率差别很大。例如，两个国家的煤矿百万吨死亡率可能相差30倍<sup>1</sup>。

煤矿都会面临安全风险，即便是在现代化的井工矿，瓦斯相关事故也时有发生。先进技术能够降低爆炸引起的死亡事故风险，但仅仅依靠技术不足以解决这一问题。管理、组织结构、矿工、培训以及监管和执行系统都是风险管理的重要组成部分。了解瓦斯治理的基本原则是设计有效的控制机制和系统的基础。所有爆炸事故最终都能反映出一个问题——煤矿没有严格执行安全操作规定。

甲烷是一种重要的温室气体，其温室效应是二氧化碳的20倍(IPCC, 2007)。煤矿是甲烷主要的排放源。甲烷占到全球温室气体排放量的14%，煤矿所排放的甲烷占全球甲烷排放量的6%，约相当于每年4亿t二氧化碳当量(MtCO<sub>2</sub>e)(EPA, 2006a; IPCC, 2007; 甲烷市场化伙伴计划, 2008)。预计到2020年，煤矿瓦斯的排放量将达到7.93亿t二氧化碳当量。(ESMAP, 2007)90%以上的煤矿瓦斯排放都来自井工矿(EPA, 2006b)；其中约有80%是通过矿井通风系统排放到大气中的，其甲烷浓度通常低于1%。

目前已经有一些技术能够大大减少煤炭开采过程中的甲烷排放问题。想要成功运用这些技术需要在各国政府和全球煤炭行业的共同努力下通过适当的融资渠道才能实现。

### 1.3 瓦斯抽采、利用和减排

几个世纪以来，由于在技术和应用方面都有很大进步，煤矿中的瓦斯抽采和利用并不算新事物。关于瓦斯抽采最早的记录是在1730年的英国。在近代，瓦斯抽采系统在20世纪上半叶被引入欧洲<sup>2</sup>。18世纪，煤矿瓦斯就已被用于照明，19世纪80年代有了相关的记录。

<sup>1</sup>根据2008年的中国和美国煤矿井下开采造成的死亡人数(官方数据)。2008年，中国报告煤矿事故死亡人数为3215人，井工矿煤炭产量为25.65亿吨(假设所报告的煤炭总产量的27亿吨中的95%都是来自井工矿)，井工矿百万吨死亡率为1.25(SAWS, 2009)；美国报告了12例井工矿死亡，而煤炭产量为3.24亿吨，井工矿百万吨死亡率为0.037(MSHA, 2009)。

<sup>2</sup>包括1937在波兰上西里西亚盆地和1943在德国建立的抽采系统。

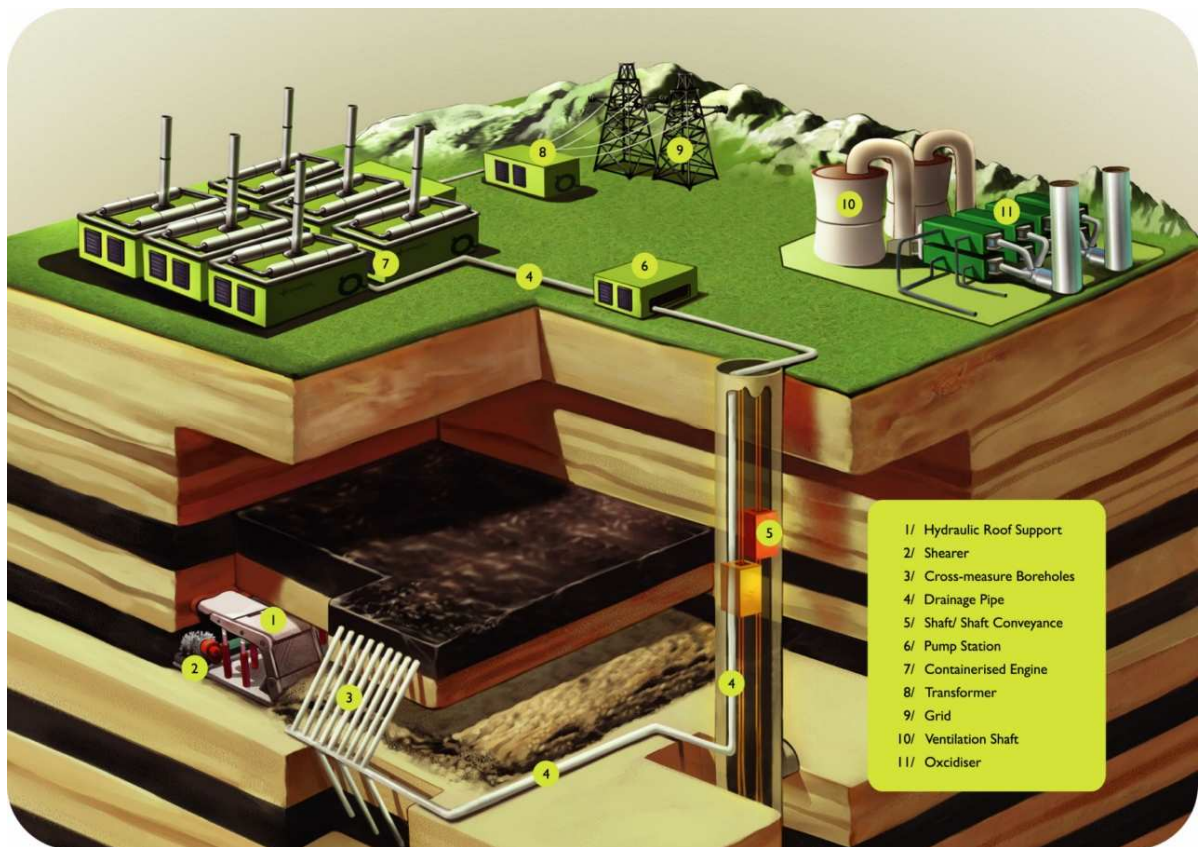
到了 20 世纪 50 年代，最初由德国人发明的抽采瓦斯的方法开始在整个欧洲得到应用。自上世纪 60 年代以来，抽采的瓦斯越来越多地被人们利用，最初只是应用于煤矿的锅炉和一些工业过程，随后被用于发电、管道运输和民用燃气。

图 1.1 是煤矿井下和地面设施的三维截面图。该图显示了井下抽采和瓦斯捕集系统的复杂性和内部关联性，系统配有将煤矿瓦斯用于发电的地面设备。该图还显示了从通风井排出的风排瓦斯的治理情况。

目前，全球有数百个煤矿瓦斯回收和利用项目正在建设或运行中。例如，据甲烷市场化伙伴计划预计，在全球有 14 个国家中已经运行、正在运行或正在开发的项目总共有 240 个（2009）。煤矿瓦斯被广泛用于发电；其他利用方式包括锅炉燃料、注入天然气输送管道、民用燃气、工业燃气、作为汽车燃料的原材料，如：液化天然气 (LNG) 或 压缩天然气(CNG)，以及煤炭干燥。

在某些情况下，由于受到现场具体条件或市场的限制，需要销毁无法进行经济回收和利用的甲烷（例如，燃放并由此转换为二氧化碳）。这能够降低排放的全球变暖潜能值（GWP）。在一些国家，通过自愿和承诺的碳汇市场，这一部分的减排量同样具有作为碳汇中获得收益的潜力。

图 1.1 煤矿瓦斯回收和治理井下抽采系统和地面设施示意图



注：1——液压支架；2——刨煤机；3——抽放钻孔；4——抽放管；5——罐笼；6——泵站；7——发电机组；8——变压站；9——电网；10——风井；11——氧化装置。

(来源: Courtesy of Green Gas International)

## 第二章 瓦斯治理的基本因素

### 关键信息

制定并实施瓦斯抽采、运输和利用的安全法规，鼓励提高甲烷排放标准，增加清洁能源，提高减排量。

在瓦斯爆炸事故风险管理方面，世界上很多国家都有丰富的经验

仅仅通过立法或先进的技术无法在高瓦斯矿井条件下实现安全生产。相反，合理且有效的管理系统、管理机构和管理经验才是保证安全生产的根本。煤矿安全生产的其他关键要素包括对管理层和工人进行适当的教育和培训，并在应用安全生产实践后，鼓励工人积极参与。

### 2.1 煤矿瓦斯治理的目标

瓦斯治理系统的主要目标就是降低井下发生瓦斯爆炸和窒息的风险。通常长壁式采煤工作面只需要进行通风就可将回风巷中的甲烷浓度控制在 1% 以下。然而，如果工作面的甲烷涌出量较高，则必须采用通风和抽采相结合的措施。有效治理瓦斯、实现安全生产是扩大瓦斯利用的前提。

防护措施必须到位，这是重要的第二道防线，可以降低爆炸发生时的扩散程度。过去瓦斯治理的不足之处在于没有可替代的预防措施，而这一点正是本指导方针的核心。

### 2.2 瓦斯灾害的发生

瓦斯通常的甲烷含量达 80%-90%，以自然形态储存于煤层中。由于煤炭开采，煤层受到挠动，将释放出瓦斯。只有与空气混合后，瓦斯才具有可燃性，并存在爆炸隐患。

在某些地质条件下，煤矿也排出大量的二氧化碳。二氧化碳比空气重，当它在空气中的浓度达到 5% 时会具有毒性，在浓度低于 1% 也会对人体产生影响。

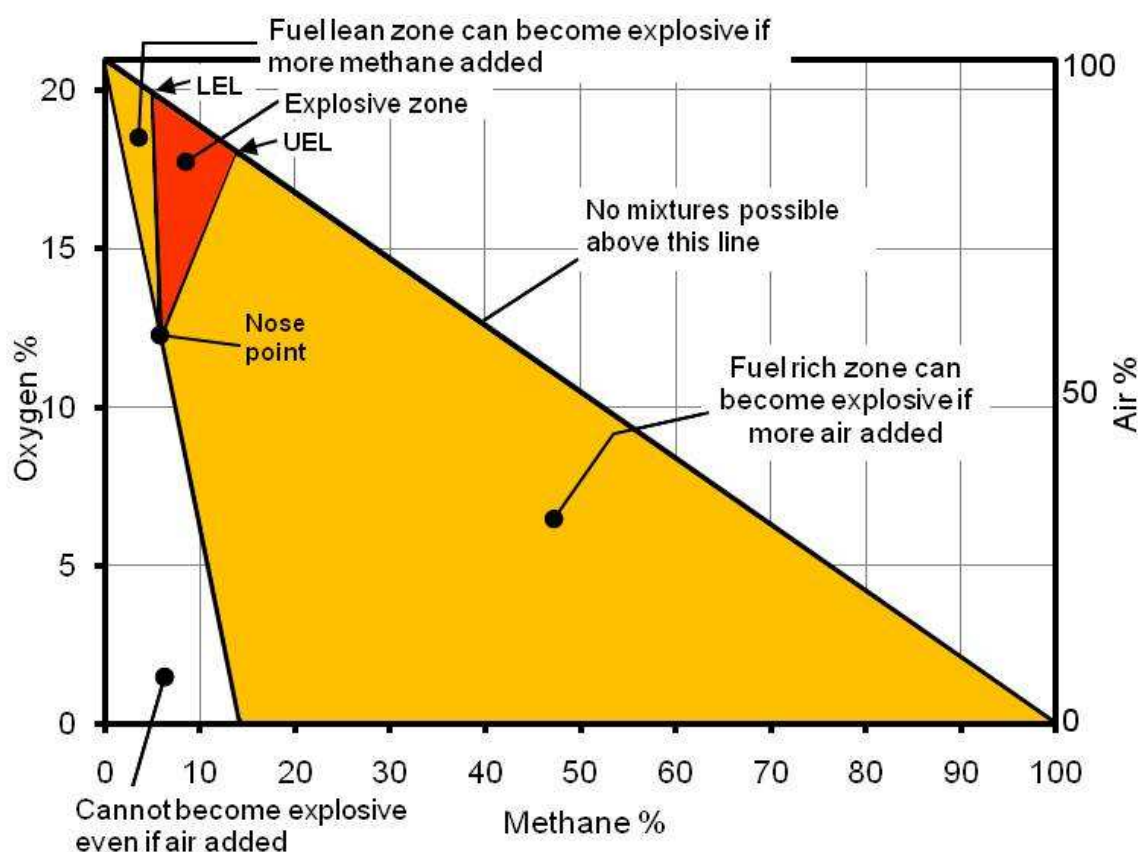
甲烷是一种无色、无味的气体；因此需要利用测量仪器才能确定它的存在。当甲烷与氧气混合到一定比例时具有可燃的，如图 2.1 所示。

在大气压下，甲烷在空气中的最容易发生爆炸的浓度为 9.5%（按体积计算）。在井下狭小的空间里，由于未燃气体在燃烧（遇到明火）之前被压缩，最大爆炸压力会有所提高。

在缺氧的条件下，例如在密闭的采空区，只有涌入空气才能形成爆炸混合物。当人处于甲烷浓度过高的环境中会遇到窒息的情况。由于井工矿空间有限，甲烷的大量积累不可避免会导致爆炸。

甲烷还有分层的特性，当工作面的通风量不足时，瓦斯会在矿井工作面的顶板附近形成水平聚集层。之所以发生这种现象，是因为甲烷比空气轻，其密度仅为空气的 0.55 倍。在通常情况下，风量达到每秒 0.5 米(m/s) 就可以防止类似情况发生，但在有些时候井下的通风量可能无法达到标准。进行通风设计时应注意到阻止甲烷形成聚集的各种变量，如：层的宽度、通风巷道的倾斜度、瓦斯涌出率、通风等(Creedy & Phillips, 1997; Kissell, 2006)。

图 2.1 爆炸混合物的形成



注：Oxygen——氧气；Methane——瓦斯（甲烷）；Air——空气；Nose point——；LEL——爆炸下限；UEL——爆炸上限；Explosive——爆炸三角区；Fuellean zone can became explosive if more methane added——燃料贫乏区域，混入更多的甲烷将使其具有爆炸性；No mixtures possible above this line ——线上部分为没有可能性的混合；Fuelrich zone can become explosive if more air added——燃料富有区域，混入更多的空气将使其具有爆炸性；Cannot become explosive even if air added——即使添加空气也不具有爆炸性

（来源：Moreby, 2009；根据 Coward, 1928）

还有一些情况下，由于通风量不足，甲烷与空气无法混合，也可以形成聚集层，并且可能顺着或逆着通风方向移动。由于可以为点火源和大量的可燃混合物提供了通道，这一甲烷聚集层可能会使火焰蔓延迅速，因此增加了发生爆炸的风险和严重性。一旦甲烷与空气混合，将无法自然分离。

煤矿经营者通过建造障碍物或密封墙将不再进行开采的矿区（例如，废弃的长壁采空区，有时是生产长壁工作面的采空区）与主要通风系统进行隔离。由于地层运动，类似的通风障碍或密封墙无法达到完全封闭的程度，也就意味着无法完全阻止瓦斯涌入采煤巷。由于通风的波动性或是气压的原因，容易发生爆炸的混合气体可能在通风密封墙的后方聚集，并涌入到通风巷道。

煤矿的高风险区域—煤层的甲烷浓度在爆炸范围的区域—长壁工作面后面的采空区和综采采煤机的采煤区域。由于吸入了过量的空气，爆炸混合物也可能在有设计缺陷或运行不良的瓦斯抽采系统中形成。

相比长壁采煤法，房柱式采煤法（无残留矿柱回采）对邻近层所产生的扰动更小一些。因此，采用房柱式采煤法的煤矿的瓦斯涌出量通常要比长壁式开采的煤矿低一些。然而，由于工作面很难实现充足的通风，采用房柱式采煤法的煤矿的爆炸风险并不低于长壁开采。在这类煤巷中甲烷主要来自开采煤层。由于通风不足以及来顶板排放，独头巷道的甲烷-空气混合物可能在顶板聚集（参见案例 4）

### 可燃气体混合物的点燃

电火花，钢撞击石英岩导致的高温，岩石下落导致的绝热压缩，铝与铁的撞击、雷击、吸烟器具、炸药和雷管、自燃、无遮火焰等都可能点燃甲烷-空气混合物。

在现代煤矿中，使用功能越来越强大的岩石-煤炭切割机械设备带来了严重的摩擦起火问题。与其他点燃方式相比，岩石-煤炭切割设备导致的瓦斯爆炸十分频繁，说明完全控制瓦斯灾害在技术方面存在困难。

### 2.3 减少爆炸风险

该指南的主要强调爆炸预防的根本原则，在煤矿设计项目时，这项原则对于有效控制瓦斯风险至关重要。这里提到的原则与现代煤炭开采企业已经实施的实现零事故和零爆炸目标的风险管理体系具有相同的意义。

煤矿瓦斯爆炸风险管理涉及大量各种不同的活动（参见方框图 2.1），需要有良好的组织工作和明确的责任分工。通过防止甲烷-空气混合物的形成，降低爆炸风险，并采取措施确保混合物与潜在的火源分离，是最安全的做法。

重要的是在矿井中控制可燃气体的稀释、扩散和分布，尽量降低燃烧的可能性。通过下列方式可以尽量减小与井下可燃气体相关的风险：利用通风将其稀释到安全的浓度；利用专门的装置为采煤机通风；将瓦斯运出采煤区域；同时，如果有需要，可以在瓦斯进入通风巷道之前通过钻孔或抽采管道将瓦斯抽出。

降低爆炸风险的基本原则如下：

- 在可能的情况下，阻止易爆气体混合物产生（例如，利用高效的抽采方法，通过通风阻止并消除瓦斯聚集层）。
- 如果无法阻止易爆气体混合物的产生，则应尽量减少易爆混合物的量（例如，在通风系统中迅速将其稀释到安全浓度）。
- 隔离气体混合物与潜在的火源（例如，通过利用专门的端区通风系统，防止瓦斯在电机附近聚集，或应避免在长壁开采区域的回风巷道中用电）。
- 尽量避免火源（例如，不安全的电器、明火、吸烟等）。
- 通过瓦斯抽采保持甲烷浓度，来减缓气压波动，从而控制采空区、封闭区的瓦斯排放。

### 方框 2.1 典型的煤矿瓦斯爆炸风险管理机制和程序

- 使用防爆电器设备和电缆
- 控制井下爆炸物及其使用
- 提供充足的防火和救援设施
- 瓦斯抽采规划、设计和实施
- 抽出的瓦斯的排放控制
- 进入矿井和工作区域的控制
- 禁止携带违禁品下井
- 井下巷道的检查
- 使用防静电材料
- 监督开采
- 机电设备使用和维护
- 规定禁止使用不合适的设备
- 监督机械和电器设备操作
- 井下禁止吸烟
- 通风规划
- 矿井通风的控制
- 监控和测量井下甲烷的浓度
- 局部通风
- 掘进工作面瓦斯抽采
- 预防摩擦起火
- 安装甲烷探测器
- 员工素质
- 安全培训
- 安放抑爆装置
- 张贴警告标志和告示

## 2.4 监管和管理原则

### 高效的安全监管框架

安全主管机构负责构建有效的安全监管框架，为行业提供一个连贯而清晰的指南。安全主管机构的地位和职责要明确，不能与其他管理机构重叠。

综合性的煤矿瓦斯安全法规并不能完全保证安全生产，只有得到煤矿监管者、煤矿管理层、监察人员和矿工理解、应用并贯彻实施，才能发挥作用。具有预见性的风险管理和自下而上地落实安全职责是预防瓦斯事故的关键。只有管理者和矿工都理解瓦斯抽采和治理过程的基本原则，才能对事故有预见性。因此，培训和传授相关知识成为成功的安全规划不可或缺的要素，同时，可以随时获得关于瓦斯事故及其原因的报告。安全管理和培训项目的对象应包括煤矿的所有工作人员和承包商。

### 执行

通过进行详细的井下检查，政府监察员严格审查安全条件，为管理者提供专业指导，审核法规的执行效果，同矿山检查员一道检查是否遵守法规，并纠正任何发生的偏差，或对那些有意忽视规



定和危险的行为进行惩罚。有效的安全监管体系还必须涉及受瓦斯问题影响的矿主。为确保有效的风险管理，重点必须放在事故和事件的预防上，而不是事后进行的惩罚。

成功的职业健康和安全风险管理不仅涉及到监管机构和煤矿企业，还应包括矿工，必须将他们视为平等的参与者。正如《国际劳工组织井工矿安全和健康实施守则》(ILO, 2006)中提到的，工人有权在安全的环境下工作，包括有权汇报潜在危险而不必担心受到报复。此外，作为实现安全生产的参与者，工人有职责支持安全生产工作、维护安全的开采环境。

### 安全生产条件下瓦斯浓度限制

由于一些硬性规章会抑制创新，应谨慎使用。而物理性指标应加以重视，例如瓦斯在空气中的爆炸界限。所有产煤国家对矿井通风巷道中的甲烷或可燃气体浓度上限都有相应的规定。根据具体的活动情况和爆炸风险强度，在矿井的不同区域采用不同的瓦斯浓度限制，并为瓦斯输送和利用设定最低安全浓度，尽量降低井下发生爆炸的风险（表 2.1）。

表 2.1 各国对瓦斯浓度上限的规定及建议值

限定的可燃甲烷浓度[%]	澳大利亚	中国	德国	印度 <sup>h</sup>	南非	英国	美国	安全系数 <sup>a</sup>
总体浓度上限	1.25	1.0	1.0	1.25	1.4	1.25	1.0	3.6 – 5.0
回风巷道的浓度上限	2.0 <sup>b</sup>	1.5 <sup>g</sup>	1.5	0.75	1.4	2.0 <sup>b</sup>	2.0 <sup>b</sup>	2.5 – 6.7
利用的浓度上限	na <sup>e</sup>	30	25	na <sup>f</sup>	na <sup>f</sup>	40	25 <sup>c</sup>	1.7 – 2.7
井下管道输送的浓度上限	na <sup>e</sup>	na	22	na <sup>f</sup>	na <sup>f</sup>	na <sup>e</sup>	na <sup>d</sup>	1.5

(a) 安全系数表示甲烷在空气中的浓度低于规定下限 5%或高于上限 15%的范围；

(b) 表示没有电的情况；

(c) 对于美国的通风规划中进行甲烷过滤没有相关规定；

(d) 由于采空区瓦斯浓度较低，通常采用地面井进行抽采，因此不列入考虑；

(e) 由当地的风险评估确定；

(f) 很少或没有应用，因此无需处理；

(g) 非行人回风巷为 2.5%；

(h) 在印度，根据 1952 年的矿山法，1957 年印度煤矿法中规定了甲烷浓度标准。

只在甲烷浓度达到警戒水平时做出反应并不能确保安全的开采条件。重要的是要明确所测到浓度的实际地点，然后根据测量结果再采取行动。工业化国家的矿业立法通常集中在与预期的风险程度相应的监督和控制工作上。

## 瓦斯的安全输送和利用

由于瓦斯一旦发生爆炸容易影响采煤区域，进行运输和利用是非常危险的。各国的煤矿安全法规对瓦斯安全运输和利用最低浓度的规定各不相同，范围从 25%到 40%不等。通常最低要求是瓦斯的浓度至少要达到最高爆炸浓度上限的两倍（例如 30%或更高）<sup>3</sup>。如果瓦斯浓度远高于上限时，这时的甲烷纯度很高不会发生燃爆，因而进行运输不会导致爆炸；在这种情况下，通过灭火技术可以消除在瓦斯/空气中火焰。相反，如果在管道中点燃浓度较低的瓦斯（例如，范围在 5%至 15%），可能会导致管道中的火焰向管道两头加速蔓延，造成强烈的爆炸，对煤矿安全造成威胁。

## 降低火灾风险

多数煤炭开采国在井下材料的类型和使用方面都制定了相应的法规，以尽量减小火源的风险。但并非所有的潜在火源都可以被消除。

开采设备需要使用电力。安全用电取决于采用防火和本质安全标准，使用带有防护的电缆和安全的连接插头，并执行严格的检查维护(I&M) 程序。通常，法规禁止在特定的长壁开采区的巷道中用电，因为该区域的瓦斯浓度或其他可燃气体浓度可能突然升高至接近安全极限（例如，超过 1%）。

通过使用锋利的切割齿、适当的洒水装置和机器通风系统，可能尽量降低采煤机因摩擦起火带来的风险。运输带也可能因为过热产生火花，但可以通过定期的检查维护大大降低风险。不当的行为，例如在井下抽烟，也可能引起爆炸。

---

<sup>3</sup>在没用使用电力的情况下，甲烷浓度应至少低于爆炸下限的 2.5 倍（例如，低于 2%的甲烷），这是最佳实践的最大值；如果使用了电力，需要采用更高的安全系数。

## 第三章 煤矿瓦斯的赋存、释放与预测

### 关键信息

在正常稳定的条件下，煤矿的瓦斯流量都是可以预测的。

尽管不正常的瓦斯涌出或突出很难预测，但何种条件下容易发生瓦斯突出则是可知的。目前已经有了降低类似风险的具体方法，同时，这些方法将用于被认定为有重大风险的地方。在这种情况下，开采条件是否安全取决于瓦斯治理方法的实施与监控是否严谨。

为了确保生产矿井的安全，有两点十分重要，一是在工作矿井安装井下监控设备，二是在矿井生产规划时，收集足够的数据并加以利用。

### 3.1 简介

随着煤炭产量的增加，生产逐渐向高瓦斯煤层延伸，现代化高产煤矿都面临着瓦斯流量越来越高的问题。出于安全、生产规划、通风、瓦斯利用、温室气体排放控制等考虑，根据煤炭生产率的情况，了解煤矿瓦斯的赋存、排放特点以及预测瓦斯流量等方面的知识是十分必要的。

### 3.2 煤层瓦斯的赋存

煤层中自然生成的瓦斯主要由甲烷构成（通常占 80% 到 95%），其次是少量其它碳氢化合物气体、氮气和二氧化碳。煤矿中各种甲烷、水蒸气、空气和相关氧化物混合通常被统称为“煤矿瓦斯”。

甲烷是深埋于地层下的煤炭发生化学反应的产物。以现代沼泽中发现的植物碎片为例，如果我们将这些材料埋在足够深的地层中，并经过长期的煤化反应过程，这些材料将由潮湿的有机碎屑逐渐变成煤炭。如果煤炭受到的温度越高、压力越大、时间越长，其成熟度就越高，瓦斯产量也越高。煤化作用过程产生的瓦斯要比目前煤层中所发现的瓦斯多。流失的瓦斯从古老的地层中溢出，然后通过地下水系排出，或是赋存于在围岩的孔隙和构造中。这种瓦斯会在邻近的渗透性地层（如砂石）中聚集，或是被有机页岩吸收。如果这些瓦斯被周围不渗水的地层封住，并且在开采前一直未受到扰动，会成为煤矿瓦斯的重要来源。与其他岩石类型相比，煤炭中甲烷的含量非常高。吸附过程使甲烷分子进入煤炭物质，其密度是类似液体的密度。在纵向煤层中，甲烷含量通常随着煤层的深度和等级的变化进行系统性地增加。瓦斯含量-深度梯度因不同煤田而有所不同，且反映出含煤盆地的地质历史。在一些含煤盆地中，甲烷含量随着煤层深度的增加而增加，最终达到一个最大值然后再下降。

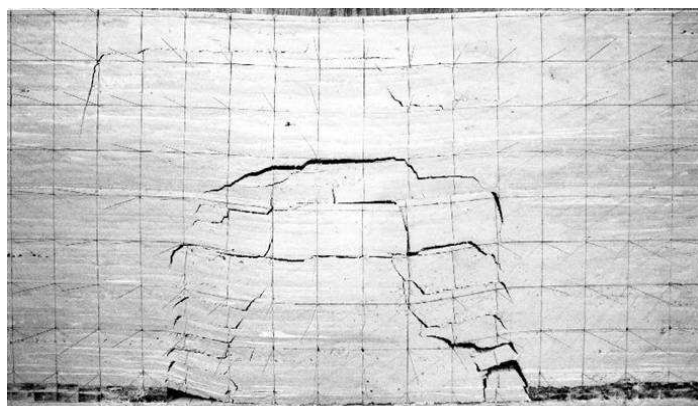
### 3.3 瓦斯释放过程

一旦受到开采活动的影响，煤矿与围岩中自然产生和赋存的瓦斯便会释放出来。瓦斯释放的速率与数量取决于煤矿中瓦斯的初始数量（瓦斯含量）、受到开采扰动的煤层的分布情况与厚度、含煤地层的硬度、煤巷的布置、煤炭生产率和煤层的渗透性。瓦斯流量会随着开采活动对地层的干扰率的变化而变化。因此，在特殊的地质背景中，开采期间所释放的瓦斯总量与采煤率的增加成比例增加。然而，在特定情况下，还会出现煤与瓦斯突出，或是瓦斯突出事故。

在澳大利亚和某些地区的一些开采煤层吸附了大量二氧化碳和甲烷，相比只含有甲烷的煤层，就算这些煤层中气体总含量低于预期数值，还是有发生煤与瓦斯突出的危险。因此，必须测量现场各种气体的含量，评估是否需要进行预抽。

欧洲的一些学者（Creedy 等人，1997 年 04 月）研究显示，瓦斯释放过程中，形成了一个应力解除拱形区间或干扰区，该区域是从长壁工作面上方 160 米延伸至 200 米进入顶板，从长壁工作面下方延伸 40 米至 70 米进入底板。图 3.1 的石膏模型图片显示了区域形成后，对区域上覆部分的破坏影响。该模拟过程，对确定区域上方应力解除的程度有非常重要的作用，此区域能够看到煤层的明显分层和断裂以及其他煤层松动现象，从而提高渗透性并打开瓦斯运移的通道。现在已经建立起了一些理论和经验模型，对此过程进行解释说明。

**图 3.1 与长壁工作面平行的剖面图模型，显示煤炭开采造成的地层裂隙和形成的采空区。**



(参照 Gaskell 建模, 1989 年)

煤层回采会导致地表沉陷。长壁工作面与地表之间的所有煤层受到扰动后，应力解除的拱形区间中的瓦斯会进入工作面。有时地表和浅基坑的钻孔可能会有部分瓦斯释放出来，而这部分瓦斯在开采期间正常是不会释放的。但是，钻孔或基坑同样可以作为未抽采瓦斯的释放通道，从而产生地表和井下危害。

### 3.4 煤矿相对涌出量

通常“绝对”（或“相对”）瓦斯涌出量用来表示一个矿井或长壁采区的出气状态。它采用与瓦斯含量相同的计量单位（如每吨煤涌出的甲烷量，或  $\text{m}^3/\text{t}$ ），但是在概念上却有所不同。<sup>4</sup>绝对涌出量等于所有来源释放的甲烷总量与参照期内煤炭的总产量相除的结果，理想的参照期为一个星期甚至更长时间。即是测量在给定时间内进行开采，每吨煤所涌出的甲烷（ $\text{m}^3$ ）。所测量的瓦斯涌出并不仅仅来自开采煤层，还包括受到扰动的所有地层，因为由于开采过程而留下的空隙导致这些地层变得松散。一般来说，煤矿的相对涌出量等于或高于  $10 \text{ m}^3/\text{t}$ ，则矿井被视为高瓦斯矿。不过，在诸如英国、美国等国的煤矿中，也曾遇到过相对涌出量高达  $50\text{-}100 \text{ m}^3/\text{t}$  的情况，但这并不常见(Kissell 等人，1973 年)。

<sup>4</sup> 3.6 对含气量进行了定义与说明。

### 3.5 了解煤矿的瓦斯涌出特征

在采煤面回采期以及随着长壁支护的前移随后放顶期间，工作面回风段将出现最大瓦斯流量。统计研究显示通常峰值流量上升将超过平均流量的 50%（Creedy 等，1997 年 04 月）。瓦斯预测方法通常利用这种关系估算通风量。为了符合强制的瓦斯通风要求，这是十分必要的。

随着时间的推移，尽管不断进行的开采活动增加了新的瓦斯气源，但因开采而对煤矿造成扰动所释放的瓦斯量依然不断减少，而瓦斯排放量，由这些瓦斯来源的持续排放量相加决定。所以，相对涌出量（即每开采一吨煤所排放的瓦斯量）可在长壁工作面的开采周期内增加。当煤炭生产停止时，瓦斯会继续从煤层中解吸出来，或从非煤地层中涌出，但速度有所降低。当一个煤矿经过几天停工后再开始采煤时，瓦斯涌出量一开始要低于稳定生产状态下的值。

大多数实践方法计算涌出量时都假定了稳定煤炭生产状态下和统一排放特征。虽然这种方法适合大多数的规划需要，但煤炭开采企业依然需要考虑到其他次可预测性低因素。因此，风险控制方法对于降低重大事件发生的可能性是至关重要的。例如，在某些矿井中会遇到煤与瓦斯突出的情况，而这些矿井的特点就是瓦斯含量较高而煤的渗透性较低。我们可以确定一些最有可能导致瓦斯突出风险性的地质因素或开采因素，但无法确切地预测实际发生率。煤矿管理者可以通过严格预防和控制的解决方法来解决煤与瓦斯突出问题，通常包括通过预抽将瓦斯含量降低到临界点以下。

长壁开采法的底板容易出现瓦斯向工作面，或者接近工作面的巷道突出。当底板含有较硬的砂石层，而另一煤层位于开采煤层 40-60 米范围以下时，这种类型突出的概率很大。尽管瓦斯突出预测仍然存在一些问题，一般可以采用在底板打一系列有规律的钻孔防止瓦斯增压来进行预防。

瓦斯突出会造成大量财产损失和严重的人员伤亡。如果空气/甲烷混合气在可燃范围内，石头与金属撞击所产生的火花同样可以点燃煤矿瓦斯。

有时煤矿开采会对天然气储集层产生扰动，从而导致高达两倍的瓦斯排放量。天然气储集层可能处于带有煤层的同一层间，并且以含煤层层序组成部分的形式出现。由于地质过程形成的阻塞或是封闭了瓦斯转移通道，这部分瓦斯最终将在开采期间释放出来。虽然开采前并不容易意识到此类情况，但是应通过比较测量数据与预测数据来警惕可能发生的问题。为了确保生产矿井的安全，应该安装井下监控设备，同时收集并利用安全规划所需数据。

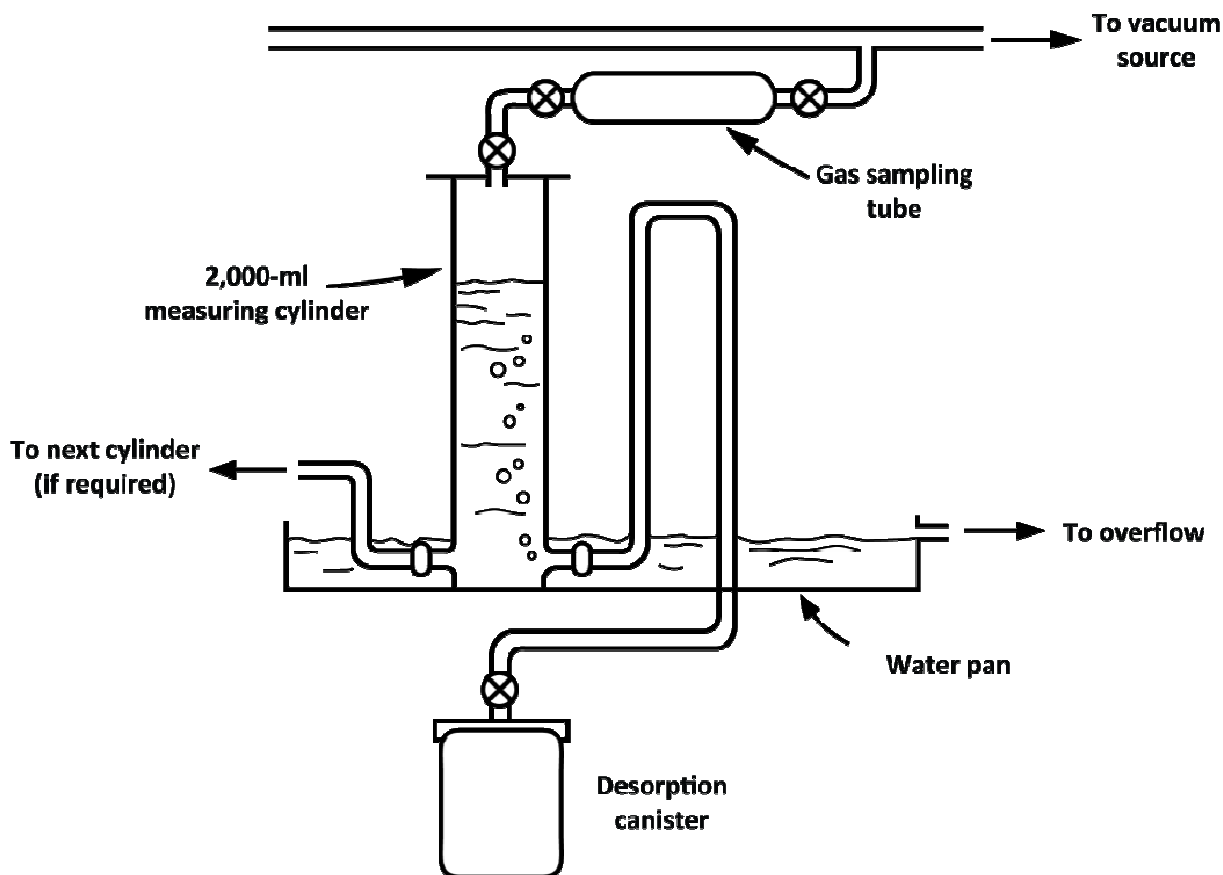
### 3.6 测量现场瓦斯含量

为确保安全生产，设计瓦斯抽采与通风系统必须了解煤所吸附的瓦斯量和较大孔隙中压缩的瓦斯量，虽然孔隙中压缩的瓦斯量很少。瓦斯含量指的是每单位质量的煤所含的瓦斯体积（ $m^3/t$ ），与相对涌出量有所区别。<sup>5</sup> 测量瓦斯含量的基本方法是取得煤样并将其密封，尽可能保持新鲜状态。煤样尽量以接近储集层的温度保存，这时煤样可以进行解吸。所测量出的释放率允许考虑采样前损失的瓦斯量。图 3.2 显示的是一个用于收集并测量瓦斯含量的装置图，瓦斯是由密封罐中的煤样解吸出来的。该系统的使用程序包括从钻孔中收集煤样，将煤移入罐中密封。定期将罐中瓦斯流入量筒中，测量并记录瓦斯的体积。通过取得气样进行化学分析得出瓦斯的主要成分。然后通过打碎煤块测量其释放量，从而测定初次试验后煤中所存留的瓦斯。美国矿业局（USBM）瓦斯含量测量法是最常用的一项技术，通常需要几天到几周时间（Diamond 和 Levine，1981 年）。为满足矿井生产需要，欧洲和澳大利亚已经研发出快速解吸法，提供快速测量结果。此外，对于渗透性较低的煤矿，也已经开发出分压与统计的方法（Creedy，1986）。由于煤层含有矿物质和煤（瓦斯主要吸附在有机

<sup>5</sup> 与产煤量相比，采矿期间溢出的瓦斯含量。

物上)，瓦斯通常成无灰基状态。有时对气体组分进行分别测量；在大多数情况下，甲烷为该气体的主要成分。自然界中煤层甲烷含量由痕迹量级到  $30 \text{ m}^3/\text{t}$  不等。

图 3.2 瓦斯含量测量装置（澳大利亚标准）



注：To vacuum source—至真空源；Gas sampling tube—瓦斯采样管；2000ml measuring cylinder—2000 毫升量筒；To next cylinder (if required) — 至下一个量筒（如有需要）；To overflow—溢出；Water pan—集水盘；Desorption canister—解吸罐

（根据，Diamond 与 Schatze，1998）

### 3.7 煤矿瓦斯流量的实际估算

相关研究机构已经开发出各种严谨的理论瓦斯涌出流量预测与模拟的模型。对实用来讲，煤矿应该将瓦斯涌出模型和当地的实际情况及经验结合起来，使模型更为可靠。这些模型需要输入各种参数，包括煤层气含量、煤层和煤岩层的力学性能、采矿几何图以及产煤率。用户可以根据相关资料，建立属于自己的模型，或购买专有软件。涌出量包括相对涌出量，指的是每吨煤所释放出的瓦斯量（单位为  $\text{m}^3/\text{t}$ ），和绝对涌出量，即稳定状态下每分钟的流量（ $\text{m}^3/\text{min}$ ）或每秒钟的流量（ $\text{l/s}$ ）。

瓦斯模型可预测煤炭产量增加将对瓦斯流量产生怎样的影响。此外，还可以预测最大可控流量以及相应的最大煤炭产量，预测值受到以下参数的影响：

- 长壁工作区域回风段中可燃性瓦斯浓度的限制值；

- 可在采区循环的可用通风量与流量体积；传送到长壁工作面的流量取决于井巷的数量，生产区的通风配置和矿工可接受的最大速率；
- 如果进行瓦斯抽采，则可不断维持瓦斯抽采捕集。



## 第四章 矿井通风

### 关键信息

矿井通风系统是一个有效将瓦斯从巷道中排出的总系统的关键组成部分。建立矿井通风系统主要有三个目标：1) 为矿工提供新鲜空气；2) 控制矿井中的温度和湿度；3) 有效稀释和去除有害气体和空气中的可吸入颗粒。

与单纯地增加通风相比，改善甲烷抽采系统是一个更加快捷和经济的解决煤矿瓦斯问题的方案。

### 4.1 通风遇到的挑战

矿井需要进行有效的通风是制约某些煤矿的煤炭生产的根本因素。要确保高瓦斯采煤工作面达到最大安全开采率，就应当将稀释污染物的通风能力且与甲烷抽采率相结合。

通风是在井下巷道中稀释和排除有害气体的主要方法。它可以调节风速和风量，以确保稀释瓦斯和煤灰，降低矿井温度。进入采煤工作面的新鲜空气越多，对瓦斯的稀释能力就越强。但是稀释过程受到矿井可获得的通风量和可忍受的最大风速的限制。

通风压力与通风量的平方成正比。因此，在风量适度增加的同时，也要求压力有大幅度的增加，这会导致穿过采空区和通风门会有更多的泄露。过量的风流穿过采空区可能增加自燃的风险，并可能损坏瓦斯抽采系统。

井下巷道通风所需的风量和允许的污染物水平通常是由当地政府部门规定。如果通风系统的设计只是为了符合法律规定的最低风量或风速要求，可能不足以维持安全的生产环境。由于这个原因，通风系统设计规格必须考虑可预期到的最严重的污染物水平。

对于通风系统的设计规格而言，甲烷被认为是主要的污染物和最危险的气体。如果设计的通风系统能够排出或有效控制主要污染物，那么在污染物低于该水平的情况它也可以有效地进行处理。

### 4.2 通风设计的关键

通常，空气是由位于矿井表面的抽风机被抽出（压入）的。因此，矿井中的空气压力低于大气压力。一旦风机发生故障，矿井中的通风压力就会上升，采煤区域的瓦斯则无法自然释放。

随着开采深度和强度的增大，循环通风的复杂程度也随之增加，通过矿井中进风巷道和回风巷道之间的连接门泄露的可能性就越大。进入复杂的大型矿井的独头巷道和采煤工作面的新鲜空气有限，因此，这些地方需要使用额外的局部通风装置。虽然如此，必须提供充足的空气使掘进工作面能够以平行方式而非串联的方式进行通风；如果是串联通风，掘进工作面一旦发生的瓦斯问题就会迅速地影响到下一个掘进面。最好的做法是将甲烷浓度超过最大值规定范围的采区下游的所有工作地点的电力供应全部切断。

通风要求是不断变化的。随着煤矿的发展和通风区域的增加，通风需求也在不断增加，有时，需要设立额外的通风井，更新风机，或拓宽现有的通风巷道。

对于通风网络模型的建立可以采用专用的软件，并定期进行实际的压力和流量测试，以便在发生变化时对模型进行校准并检查系统的性能。

在可能的情况下，应对通风系统进行设计，平衡各通风“分叉”和分支的风量。这降低了对安装流量控制装置（如：风门）的需求。这些装置使人员通道对通风分支的通风量产生了良好的效果。

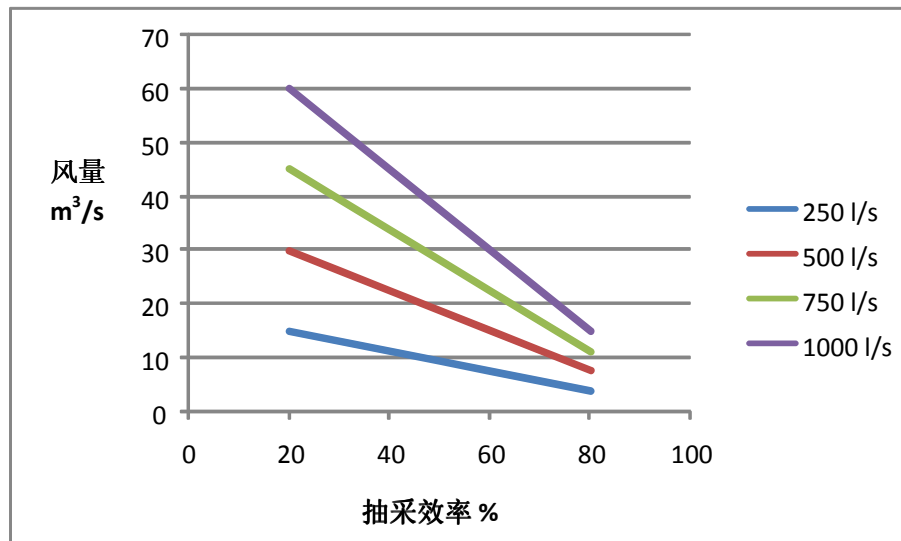
地面风机的设计应达到满足矿井通风的要求。地面风机通常可以在一定的范围内进行调整，确保它们能够满足要求而不会导致空气动力不稳定。在一些老矿井中老旧的地面风机通常处在最大负荷下运转。在这种情况下，为了提高矿井各处的通风量，只能改善通风网络。

### 4.3 高瓦斯工作面的通风

不同的采煤工作面所要控制的由煤炭开采所导致的瓦斯、灰尘和温度问题的具体程度不同。主要的瓦斯风险存在于部分或全部开采（无论是采用长壁开采法或是房柱式开采法）且不能再安全进出的煤层区域（例如，采空区）。所有的长壁或房柱式回采操作都直接与聚集着甲烷、缺氧空气和其他有害气体采空区的接触。也包括未抽采的甲烷，以及不断从采空区的煤中持续排放出的瓦斯。

通过以下两种方式之一，便可对这些气体进行处理。首先，让它们进入矿井中，有充足的空气可将通风巷道中预计的最大瓦斯流量稀释至安全浓度范围内（图 4.1）。如图 4.2 所示，这是一个采用 U 型通风的长壁工作面，50% 的瓦斯抽采能力便能够处理总流量 800 l/s (48 m<sup>3</sup>/分钟) 的纯甲烷<sup>6</sup>。效果最好的多入口长壁工作面 70% 的抽采能力能够处理 5,333 l/s (320 m<sup>3</sup>/min) 的纯甲烷，效率提高了六倍。<sup>7 8</sup>

图 4.1 将长壁工作面瓦斯浓度稀释至 2% 所需的风量，允许达到峰值。



(来源: Courtesy of Sindicatum Carbon Capital)

其次，只要当地的自燃倾向或地层情况允许，一部分瓦斯可能会转移到一个工作面后的泄放通道或穿过老采空区，在主要的回风巷道或泄放井中释放（例如，采区的含瓦斯空气通过竖井排

<sup>6</sup>单一进风巷道和单一回风巷道，甲烷最大浓度 2% 和 30 m<sup>3</sup>/s 风速。

<sup>7</sup>多入口，甲烷最大浓度 2% 和 120 m<sup>3</sup>/s 风速。

<sup>8</sup>在这两种情况下，峰值可以高于平均数的 50%。

放)。“泄放”系统的效率取决于井内巷道中通风压力的分布,这些巷道可以通过通风巷道中的部分阻梗(调节器)进行调整。一些国家规定泄放通道中的甲烷浓度必须低于 2%,以降低发生爆炸的风险。

由于空气中有灰尘颗粒物,通过采煤工作面的风量有一个实际的最高限,将风量控制在这个限度内不会造成工作环境不达标。采煤工作面的风量限度限制了传统 U 型通风系统(图 4.2)可达到的通风量。在风量不足以稀释巷道内排放的瓦斯时,可以通过采用各种配置的矿井布局(如“三通”或“Y”型通风)引入额外的空气,如图 4.3 所示。然而,这类通风系统需要更多的投资,例如,建设额外的巷道。在图 4.2 和图 4.3 中,蓝色宽箭头显示采煤方向,淡蓝色箭头表示空气从入口进入后的流动方向,红色箭头表示回风的方向。

无论采用哪种系统或布局,必须为采煤机提供足量的新鲜空气、稀释煤前瓦斯(在预抽采之后剩余的瓦斯),以符合法规的要求。所选择的布局应能够在有效的抽采钻孔分布,达到最高的通风标准。如果没有达到这个标准,将会导致抽采效率较、通风要求更高,并且会降低煤炭生产率。

图 4.2 传统的 U 型通风系统

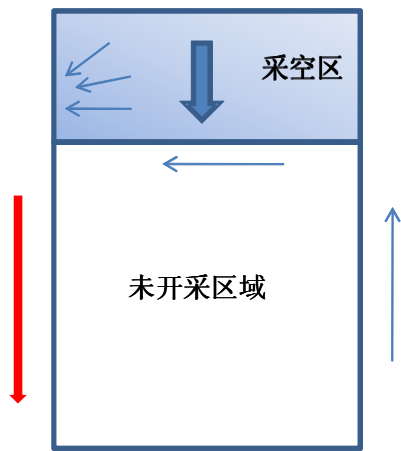
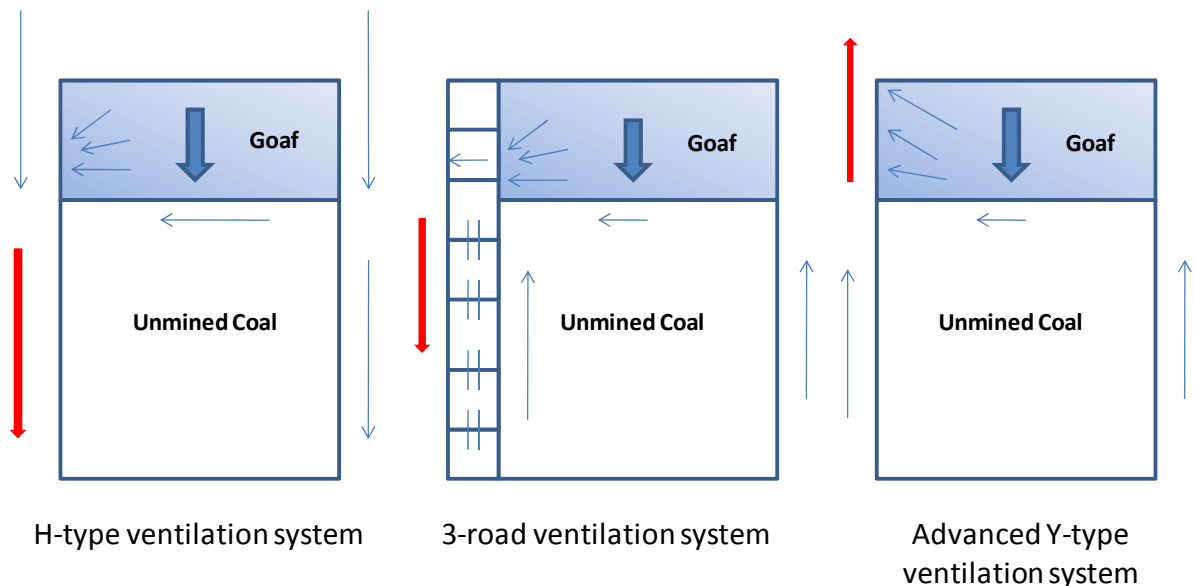


图 4.3: 在高瓦斯长壁采煤工作面使用的通风布局



注：GOAF——采空区；Unmined Coal——未开采区域；其他依次是：“H”型通风系统；三风路通风系统；“Y”型通风系统。

与后退式长壁开采相比，前进式长壁开采利用穿层钻孔进行瓦斯控制和调节的方法相对简单。然而，由于后退式长壁开采产量更高，世界上多数长壁式开采都采用后退式，同时进行了通风配置，尝试结合一些采煤面后通风（如“Y”“H”通风）和后退式回风系统等<sup>9</sup>。

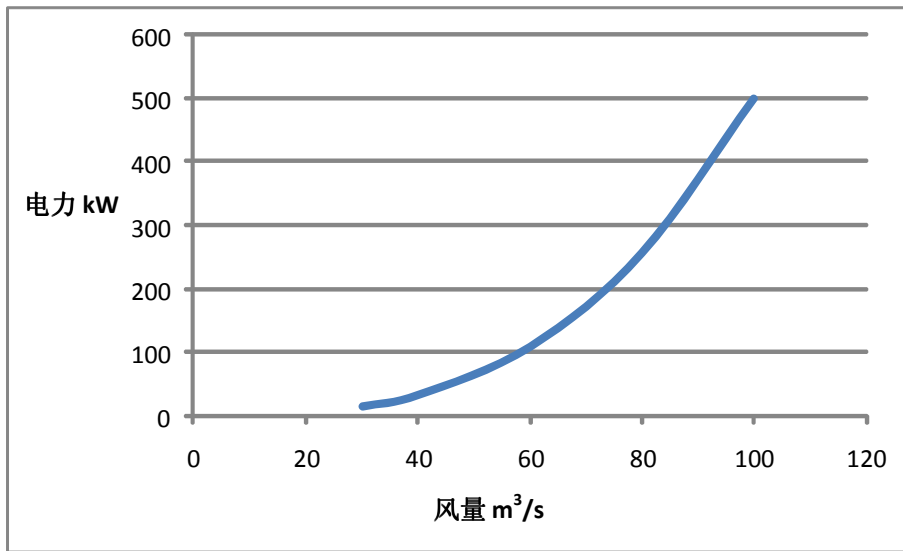
通风系统应采用一些方法，比如在长壁开采面两端创建一个压力梯度，确保可燃气体混合物不会进入开采工作面。这涉及到了要在巷道中和特定点的通风装置中使用调节器（部分阻梗），以便将风流沿着采后废弃的一边导出。

甲烷分层现象表明矿井中通风不足。出现甲烷分层表明需要进行瓦斯监控、风速不足以稀释瓦斯层、可能需要改善瓦斯抽采，应该从源头解决这个问题。

#### 4.4 通风系统的电力要求

只要在通风量有甚微的变化，矿井通风系统对电力消耗可能会出现更大的需求，由此导致通风成本增加。通风系统的电力需求，是煤矿运营成本中最大的开支之一，它与风量成正比。因此，利用瓦斯抽采或增加其抽采系统效率通常比增加通风量的更具经济性。增加通风量可能涉及在矿井中增建大量的基础设施。

图 4.4 通风空气电力要求与风量的关系



(来源: Courtesy of Sindicatum Carbon Capital)

#### 4.5 掘进巷道的通风

对独头巷道和房柱开采法，对瓦斯进行有效控制可以通过提供局部通风系统并结合采煤机附带的通风装置稀释采煤过程中释放出的瓦斯。

<sup>9</sup>参见图 9.1，在案例 1 中，有一个回风系统的例子。

顺煤层巷道通常采用辅助风机和风道系统进行通风，可采用抽排或强制排风或两者的组合。局部通风系统发生任何故障，都有可能马上引发瓦斯灾害。一旦瓦斯聚集，必须实施专门的措施保证瓦斯安全重新进入巷道。为了减少瓦斯聚集的危险，某些矿井允许井下风机在特定条件下短暂的停运后自动重启。

由于断电、机械故障和有缺陷的辅助风机导致的通风系统故障，是许多重大瓦斯相关事故发生的主要原因，所以矿井有必要建立双电源供电，以及安装地面备用设备和井下辅助风机，作为对主风机系统的补充。

#### **4.6 通风监控**

通风监控可以通过两种基本方法实现：1) 连续使用固定的风速变换器将数据传输到表面；2) 定期使用手动校准设备。

流量连续监测的准确性取决于若干因素：转换器的位置、适当的校准，以及巷道的横断面积。由于受到开采扰动，这些因素随着时间的推移可能发生变化。由于采区和掘进巷道对安全生产至关重要，应对这些区域进行连续监测。

测量地点不能停放在机车或其他车辆，因为这会使现场的风速产生间歇性的变化。

手持翼式风速器适合在矿井的任何地方使用，包括不稳定区域，因为每个风速器都可以检查通风巷道的大小。必须定期校准风速测量装置，以确保其准确性。

#### **4.7 通风控制**

分布控制包括在以损失其他地方的通风量为代价的情况下，重新将通风导向一个地方。风阻、压力和风速之间的关系是已知的，可以用于预测通风重新分布结果。

矿井通风系统主要是通过地面风机进行总体控制。增加煤矿不同地面风机的压力对煤矿偏远区域的风速所产生的影响是微乎其微的，因而可能无法依靠增压来解决偏远工作区域的通风量不足的问题。地层压力可能造成顶板、支柱和底板的收敛，导致风量增加；因此，必须对巷道进行维护，确保巷道按照设计要求，保持高效的通风。

不建议对主风扇进行连续的控制和调整。井下保持相对稳定的风量能够大大减小自燃危险，并有助于监控风量和污染物水平。当矿井中建有备用的地面风机系统（一个或多个风机运行，而另一个或一些风机为备用机），建议使用风机转换设备，以确保矿井地面风机在日常维护或检查时，通风不会受到影响。

## 第五章 瓦斯抽采

### 关键信息

工业化国家的经验表明，加大对瓦斯抽采系统的投资将减少由于瓦斯危险造成的矿井停产，带来更安全的开采环境，促进瓦斯利用，并减少煤矿瓦斯的排放。

煤矿瓦斯抽采问题通常可以通过应用现有的理论和技术得以解决。当新的技术获得工业试验成功时或当现有的技术无法提供满意的解决方案时，才考虑引进新的或创新技术。在引进任何技术之前，必须对矿井进行严格的测试，确保不会降低安全水平，并且能够继续维持最佳实施方案。

通过适当的安装、维护和定期检测，及系统化钻孔实施计划，可以改善甲烷抽采系统的性能。

当甲烷-空气混合物达到爆炸浓度范围或接近爆炸浓度范围时，进行运输是一种危险的做法，应当被禁止。

### 5.1 瓦斯抽采及其带来的挑战

瓦斯抽采的目的是在高浓度瓦斯进入矿井通风巷道之前，在其源头将其抽采出来。就监管目的而言，释放到矿井通风系统中的瓦斯量不得超过通风系统将气体污染物稀释到安全浓度的能力；而最大程度地抽采瓦斯对改善作业安全、缓解环境压力和能源回收都有明显的促进作用。

瓦斯抽采方法有许多。如果选择的方法不当或实施不利则会导致抽采率低，抽采瓦斯浓度低等问题。对低浓度瓦斯的进行输送或利用的过程中，当瓦斯浓度处在或接近爆炸范围时，可能会造成瓦斯灾害。

### 5.2 全球范围瓦斯抽采的基本原则

全球煤矿的地质和开采条件各不相同，从而出现了不同的瓦斯抽采技术。

传统的瓦斯抽采方法分为两种：采前预抽和边采边抽。采前预抽是指在开采前，对即将开采煤层的瓦斯进行抽采，而边采边抽是指抽采由于受到开采活动导致的裂隙增加、泄压及渗透率增加煤层和周围岩层的瓦斯。附件一对最常见的甲烷抽采方法进行了汇总。

在地质条件简单地区，边采边抽技术在长壁开采区域可以抽采 50% 至 80% 总量的瓦斯。多数情况下可以实现 50% 的抽采目标。在除地质条件极复杂情况下，边采边抽的瓦斯浓度应在 30% 以上；而采前欲抽瓦斯浓度应在 60% 或以上。

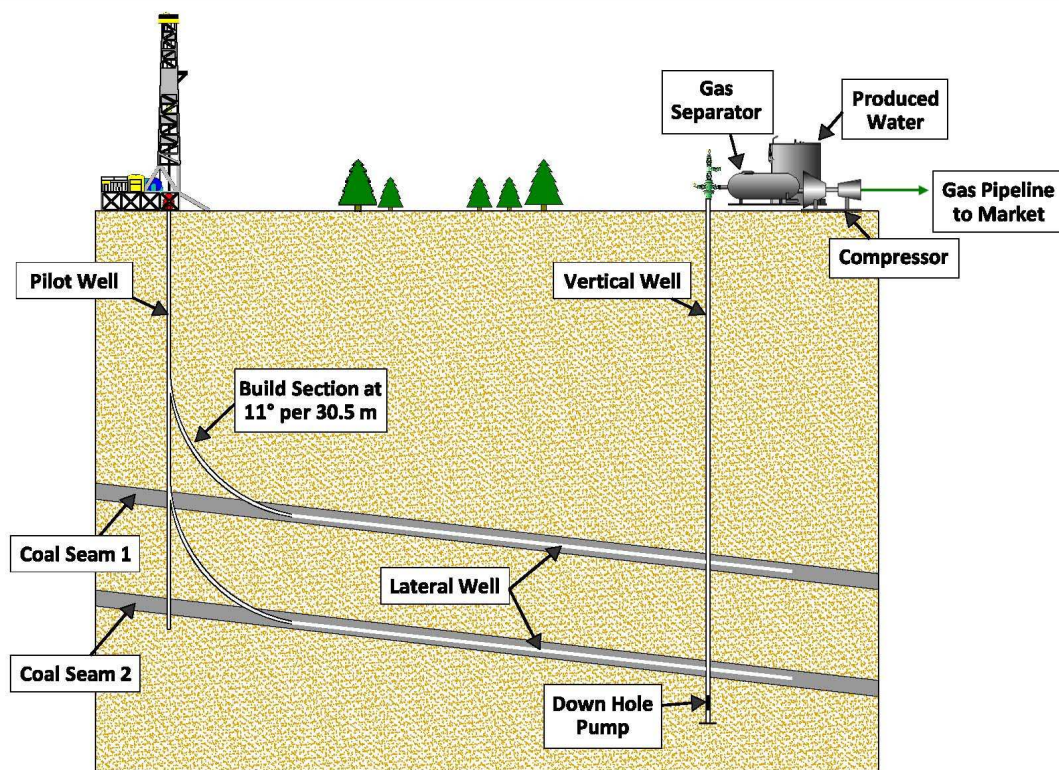
### 5.3 预抽的基本原理

预抽采是从本煤层直接减少瓦斯流量的唯一方法，如果本煤层是主要的瓦斯排放源，则预抽采显得尤为重要。对于降低突出风险，预抽也是必要的。由于抽采是在开采前进行的，抽采系统不容易受到地层运动的影响，而且如果可行的话，通常可以抽采较高浓度的瓦斯。如果煤层的渗透率和甲烷含量满足瓦斯流量要求，那么在开采前对煤层进行抽采，通常可以获得高浓度的瓦斯。大量的瓦斯涌入初次开采巷道预示着煤层具有中-高渗透率，具备高效预抽和进行瓦斯利用的潜力。

煤层的渗透率直接影响煤层进行充分抽采所需要的时间。煤层的渗透率越低，则煤层瓦斯含量降低至达到规定的平均水平需要更长抽采时间。另一方面，渗透率较低的煤层需要打大量的抽采钻孔，以便在开采之前瓦斯含量达到理想的水平。在某一地条件下，抽采所需的时间和钻孔的成本决定了预抽的可行性。

目前，全球的煤矿采用的预抽采技术各不相同。通常采用旋转钻井技术打 100 米至 200 米的顺层钻孔。但对于 1000 米或更长的钻孔，则采用井下定向钻孔技术，从而提高抽采效率。此外，矿井深度不深的情况下，可以从地面打大强度的顺层钻孔进行抽采。在煤层渗透率大约为 0.5 (mD) -10 mD (如，大约  $5 \times 10^{-4} (\mu\text{m})^2$  至  $10^{-2} (\mu\text{m})^2$ ) 或更低时的条件下进行预抽，顺层定向钻孔技术是一种有效的方法。澳大利亚的煤矿瓦斯涌出量高达 8,000 l/s，长壁抽采效率要求达到 80%，他们采用的是先进的地面定向钻孔技术、预抽和边抽边采相结合的方法进行抽采(Moreby, 2009)。澳大利亚和美国的经验(Von Schonfeldt, 2008) 表明，如果可以实施地面顺层钻孔，会比井下顺层钻孔更具优势，因为钻孔可以在开采活动之前进行，因此，有效抽采时间不会受到煤炭开采活动的影响(Black & Aziz, 2009)。图 5.1 显示了可在开采活动之前进行瓦斯抽采的钻孔分布方案。在这个方案中，将通过第一个试验井对两个可开采层进行，该井在两个煤层中分别打一平行的钻孔。水平钻井完成后，再打另一个垂直井，与两个水平井相交。垂直井产生的水和瓦斯，试验井完井或废弃。图 5.2 显示了边采边抽技术，但穿层钻孔和定向或导向钻孔（开采前）可以采用同样的配置进行。

图 5.1 从地面横向井进行采前抽采的方案



注：Pilot Well——试验井；Coal Seam1——煤层 1；Coal Seam2——煤层 2；Build Section at 11 per 30.5m——构造截面倾角为每 30.5 米 11°；Lateral Well——水平井；Down Hole Pump——下孔泵；

Vertical Well——垂直井； Gas Separator——气体分离器； Produced Water——产出水； Compressor——压缩机； Gas Pipeline to Market——市场用气管道；  
(来源: Courtesy of Raven Ridge Resources, Incorporated)

## 5.4 边采边抽的基本原理

在各类煤田中，渗透率低 ( $<0.1$  mD) 和具有某些地质特点（如：软煤，断层）的煤层并不适用于采预抽采技术。在许多国家，由于浅层煤炭资源逐渐枯竭，开采活动逐渐向深部转移，类似情况已越来越普遍。随着煤炭开采的不断深入，采用的甲烷抽采技术是否有效取决于地层塌陷所造成的压裂程度和渗透率的改变。

边采边抽抽采方法是指因开采扰动而释放出来的甲烷，在其进入主要通风巷道之前将其抽放，阻止其进入开采煤层之上或之下的扰动区域。

如果在开采煤层的上方或下方有一个或多个煤层，那么这些煤层的瓦斯排放量可能大大超过主要依靠煤层厚度和瓦斯含量的煤层。因此，与预抽相比，更多的瓦斯可能经常采用边采边抽技术进行抽采。为了确保对高浓度瓦斯的有效抽采和安全利用，需要相关人员进行认真的设计和管理。高瓦斯开采煤层的顶板和底板发生的事故越大，边采边抽采就越重要。

图 5.2 是一张抽采技术的概况图，这些技术可以用于边采边抽对长壁开采工作面进行瓦斯抽采。图中显示了钻孔的三种模式：

- 水平定向钻孔：在运输巷或专门的钻场打钻。将钻孔打进卸压的地层中，抽采卸压层及逸散到卸压层的瓦斯。这个示意图显示钻孔可以达到工作面的顶板岩层和底板岩层。
- 穿层钻孔：这里显示的是在各种配置下进行的钻孔并设计,用于抽取因受到采煤过程的应力解除而卸压的顶底板岩层中的瓦斯。其中一组是从后退式长壁开采面预先将钻孔打到至采煤工作面后方的顶板岩顶。这类钻孔比之前提到的在开采前打的钻孔效果要好一些，这是由于上述钻孔在长壁开采面形成后工作面通过岩层，它们不可避免地会遭到破坏。通常，在长壁开采工作面后方实施穿层钻孔，抽采效率会更高一些，并且比在开采工作面前方实施钻孔所抽采的瓦斯浓度更高一些。然而，这种方法需要在工作面后方建造废石垛墙作为入口，在有些情况下还需要建造一堵封闭墙，与采空区形成隔离。工作面后方采空区的敞开巷道的一侧封闭墙主要是用于加强巷道的支撑力度，并将采空区与空气隔离，最大程度地减少自燃风险。
- 地面采空区钻孔：通常在煤炭开采前，从地面向采空区的上方打钻孔，用于抽采从卸压和压裂的地层向上移动的瓦斯。这些钻孔通常是在部分真空的条件下进行抽采的。必须注意的是，确保吸力不要过大，否则可能抽出过量的矿井风排瓦斯，且会将甲烷浓度降至 30%。当浓度降低到低于 25% 至 30%时, 必须进行封孔。

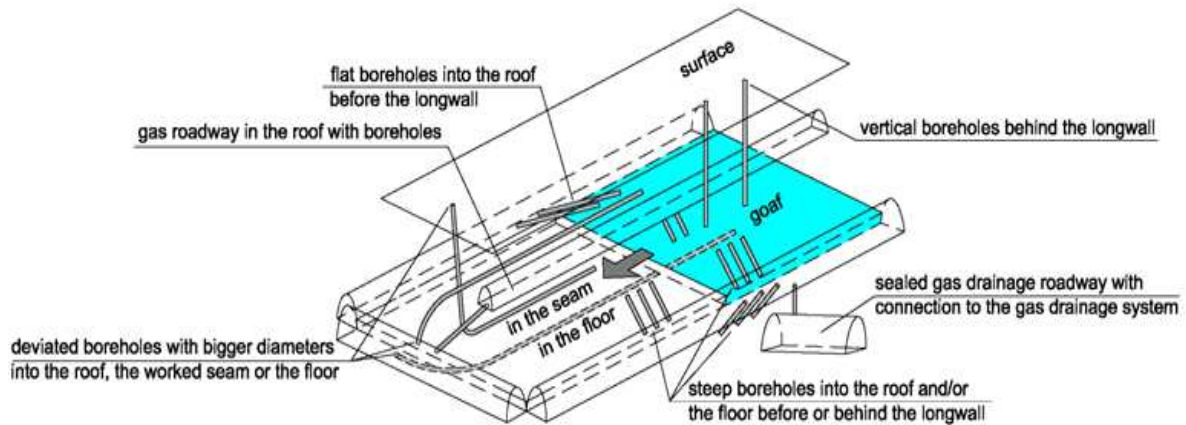
除了在图 5.2 中显示的技术之外，在扰动区域中，从长壁采煤工作面上部或下部的钻场 driving gas，以及从先前的巷道抽采瓦斯，都是减少工作面瓦斯涌出的有效途径。

边采边抽瓦斯抽采策略可以采用以上技术，或者几种相结合。边采边抽抽采计划的选择和配置取决于所需的瓦斯抽采效率、开采条件和地质条件、针对瓦斯量最大的区域所采用的技术的可持续



性，以及成本问题。图 5.2 显示了边抽边采的途径，但在许多相同条件的区域，穿层钻孔及定向钻孔可以同时实施，以便在开采前就可以对工作面进行抽采。

图 5.2 边抽边采的钻孔方法



(来源: Courtesy of DMT GmbH & Co. KG)

**注：** Flat boreholes into the roof——打入顶板的钻孔； Gas roadway in the roof with boreholes——顶板瓦斯抽放巷钻孔； Deviated boreholes with bigger diameters into the roof, the worked seam——顶板、地板和本煤层中的斜交钻孔； Vertical boreholes behind the longwall——采空区地面垂直钻孔； sealed gas drainage roadway with connection to the gas drainage system ——与抽采系统连接的密闭抽放巷； steep boreholes into the roof and/or the floor before or behind the longwall——工作面前后方打入顶地板的斜交钻孔。

一些瓦斯抽采方法，如穿过采煤工作面后面的阻隔区域在采空区铺设抽采管道，抽采大量空气用来稀释系统中那些有时处于爆炸范围内的瓦斯。应避免采用这种及其他只抽采低浓度煤矿瓦斯的甲烷抽采系统，因为它们的效率非常低，并容易造成在采空区中后退式长壁开采的回撤端聚集易爆气体混合物。而且在防止甲烷层的形成和迁移方面，这些抽采方法基本上是无效的。

抽采率下降导致通风巷道甲烷浓度的迅速增加（假定进入矿井的风排瓦斯流量保持恒定）。瓦斯抽采系统需要连续监控和制定详尽管理制度。

### 5.5 瓦斯排采系统设计

在设计瓦斯抽采系统时，应考虑能够处理来自矿井各个部分预期的最大瓦斯混合物（甲烷和空气）流量，其中包括开采工作面、废弃面（设备从这里被移开），以及废弃区域（关闭的或封闭的）。

可以通过一种甲烷预测方法来预测甲烷气体的预期量。根据正常运行条件下可能产生的最高预期抽采的最低浓度（纯度）的瓦斯流量，可以得出通过管道网络传输的最大流量。当所有的泵同时运行时，得出的流速应在系统的计划容量之内。

瓦斯浓度是瓦斯抽采系统的一个设计特点，并不是固有的或自然特点。无论从安全角度还是效率角度考虑，空气中瓦斯纯度低于 30%的甲烷被认为是不可接受的。井下抽采系统瓦斯纯度的保持取决于钻孔封闭的质量，包括立管的适当安装，个别钻孔的系统调整，以及地面抽采设备所施加的吸力。为了增加瓦斯流量而增加吸力将会导致更多空气的吸入，因此会降低瓦斯的纯度。相反，降低吸力将会降低总的混合气流量，但会提高瓦斯纯度。更重要的是，地面设备的吸力和流速应仅仅在全面了解井下状态的条件下进行调整，并需要与通风监督员随时沟通。

甲烷抽采系统规划、实施和管理需要考虑下列因素：

- 安全地进行钻孔、监控和管理；
- 地面的稳定性和必要的支持系统，以保持钻孔的稳定性；
- 出于对顶底板边抽边采钻孔预期性能有所不同的考虑，进行瓦斯抽采钻孔配置。
- 抽采容量、管道直径、抽采泵和基础设施；
- 抽采管道网络的位置、安装和试运行；
- 聚水器和除水设备；
- 抽采系统和基础设施的运行控制和维护保养；
- 对钻孔、管道网络和表面抽采设备的监控；
- 防止长壁回撤工作面的瓦斯抽采管道被压碎。

## 5.6 井下瓦斯管道基础设施

瓦斯抽采管道基础设施应使用适当的材料。可以采用玻璃纤维增强塑料(GRP)和聚乙烯(PE)制成的瓦斯抽采管道。

GRP 相对比较易碎，不宜用在煤矿生产区域；但与钢管相比，由于 GRP 安装简便，因此成为主管线的首选材料。

在空间受到限制和管线容易受到损坏的地方（例如，巷道变形或电池士机动矿车）应采用钢管，并使用专门的柔性连接使管线更容易移动。

一些国家使用聚乙烯(PE)管道，但应避免这些管道的接合处或一些井下部分的高温熔化风险。有些国家的安全监管者允许在有资质的安全人员监督下在通风良好的区域展开这项实践；而在另一些国家，这种做法却被认为是不可接受的。此外，需要采用传导介质以降低静电放电的风险。

无论选择何种材料或在什么位置上，即便是在监管良好的矿井，井下管道系统都非常容易受到损坏。损坏这些管道的主要“潜在来源”是开采设备，包括矿物传送器、绳索运输系统、机车及其负载，以及爆破活动。地层运动和顶板塌陷也是造成管道损坏的潜在原因。因此，抽采系统应被设计并运行在一个整体破坏限制风险的前提下。

## 5.7 对瓦斯抽采系统的监控

应采用人工或远程监控系统来确定瓦斯抽采系统的效力。监控质量取决于传感器的可靠性、位置、维护、校准和使用等因素。

需要对抽采管道系统的每个钻孔、瓦斯抽采管道以及表面甲烷抽采泵房一一进行测量。需要监控的数据包括混合物流量、甲烷浓度、表压和温度。需要记录大气压力的度数以促进流量数据的标准化。在有些情况下，抽出的或从矿井巷道中排放出的瓦斯包含其他成分，例如，水汽、硫化物、

或重烃可燃气（例如，乙烷或丙烷），这些都可能导致甲烷测量的不准确。还应该考虑设计一个能够纠正任何其他情况的监控和测量程序，以确保测量的准确性。

监控应该能够用于对照原设计理念对实际安装系统的性能进行评估。

## 第六章 瓦斯利用与减排

### 关键信息

井工矿是甲烷人为排放的主要来源之一，但通过实施好的实践可大大降低其排放。二氧化碳是全球最重要的温室气体，而甲烷的温室效应是二氧化碳的 20 倍以上。

采矿业可以对大多数井工矿产生的甲烷进行利用或销毁。途径包括利用抽采的瓦斯、点火炬销毁多余抽采瓦斯，以及对矿井风排瓦斯（VAM）进行利用或摧毁。通过利用适当的技术和市场条件，最终的目标是实现甲烷零排放。

在开发煤层气（煤矿瓦斯）项目的热潮中，人们有时会忽略必要的安全技术标准，这引发了煤矿新的隐患。在甲烷利用规划过程中应避免增加井下风险。

### 6.1 煤矿瓦斯与减缓气候变化

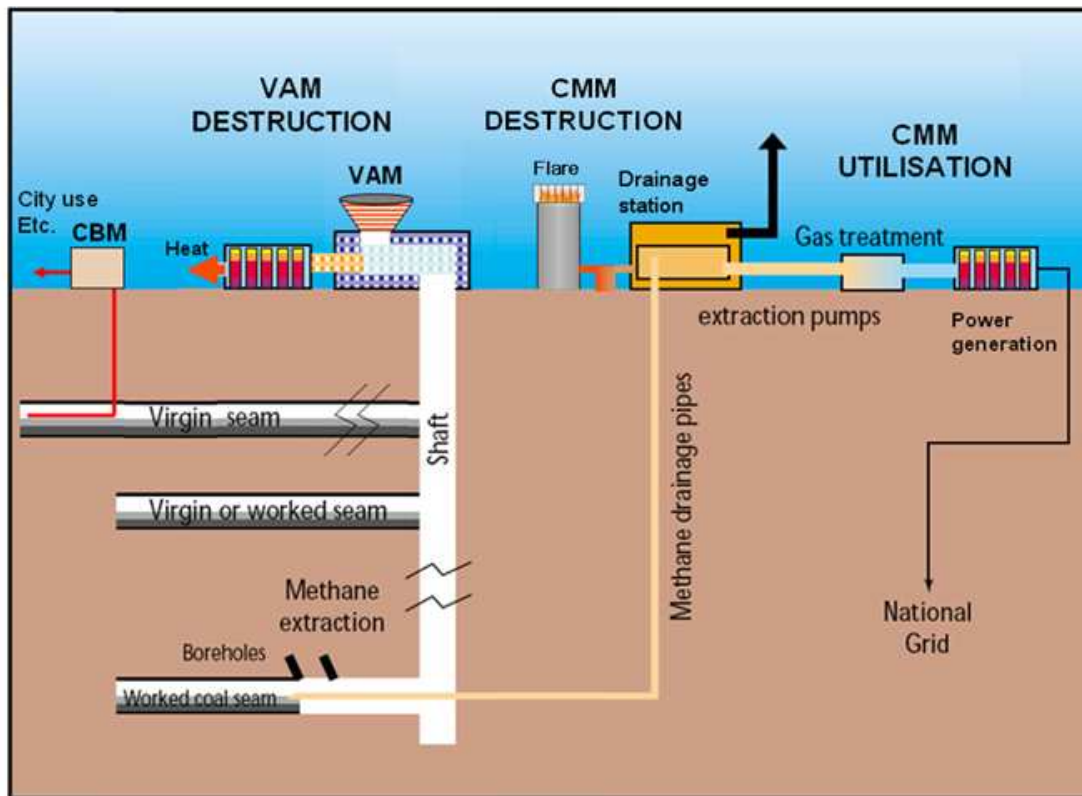
减少甲烷排放是全球范围内需要优先解决的问题，其中，煤矿扮演着重要的角色。甲烷的排放占全球人为温室气体排放量的 14%，而煤矿的甲烷排放量占甲烷总排放的 6%，即每年排放 4 亿 t 二氧化碳当量(MtCO<sub>2</sub>e) (EPA, 2006a; IPCC, 2007; Methane to Markets, 2008)。相比其他与煤相关的温室气体排放（例如，燃烧煤产生的二氧化碳），全球煤矿瓦斯的排放量相对较小，但并不表示减排煤矿瓦斯不重要。更重要的是，许多煤矿瓦斯回收及利用技术已经投入市场，其效果也得到验证。这使得煤矿瓦斯利用成为煤炭行业近期和中长期温室气体减排的一个具有吸引力的方案。

### 6.2 煤矿瓦斯是一种能源

瓦斯抽采利用可以为煤炭开采带来较高的附加值。抽采的煤矿瓦斯可直接作为能源或用来发电，使得自然资源得以充分利用。反过来，这又能够通过能源销售或节约成本，为煤矿带来经济回报。此外，瓦斯利用可以将获得的收益再投资到煤矿安全设备和运行中，从而增加其内在价值。

现有的技术能够优化能源回收，且能够基本上减少绝大部分由于煤炭开采所排放出的甲烷（如图 6.1）。良好的瓦斯抽采标准和实践能够获得稳定且可利用的瓦斯，促进实现以最低成本进行瓦斯利用的目标。由于开采条件的差异性，瓦斯供应将会有所波动，且利用设备不时会发生故障或需停工检修和保养。未被利用的瓦斯可以点火炬销毁，尽量降低排放量。无法捕集和利用的瓦斯将被稀释并排放到大气中。多年来，风排瓦斯减排技术不断发展。总的来说，在浓度高于 0.20% 的条件下进行风排瓦斯氧化，从技术上是可行的。目前全球有若干个风排瓦斯商业化项目正在运作。

图 6.1 以近零排放开采方式优化能源回收



(来源: Courtesy of Sindicatum Carbon Capital)

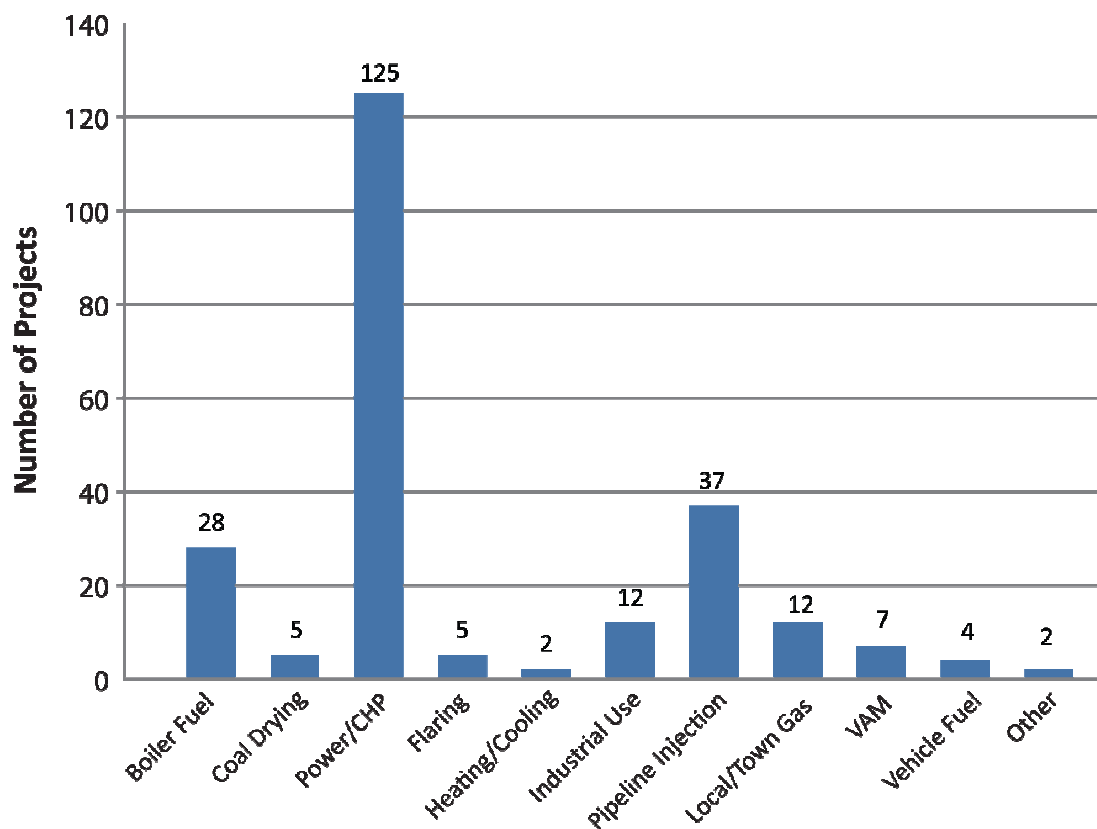
进行井工矿瓦斯治理时，一定要将安全工作作为重中之重。在开发煤层气（煤矿瓦斯）项目的热潮中，人们有时会忽略必要的安全技术标准，这引发了新的隐患。在甲烷利用规划过程中应避免增加井下风险。

### 6.3 利用方式的选择

在各种不同的利用方法中，甲烷含量为 30%-100%的煤矿瓦斯的潜在用途包括：1) 炼钢炉、窑炉和锅炉的燃料；2) 通过内燃机或汽轮机发电；3) 注入天然气管道；4) 生产肥料的原料；5) 汽车燃料（LNG 或 CNG）。对于瓦斯的其他利用，尤其是对城市消费者，需建造储罐以满足他们的峰值需求，缓和瓦斯抽采中断时的供应。煤矿瓦斯发电厂通常能够避免巨额成本、土地利用、视觉影响，以及大量储存可燃气体等相关风险，在与煤矿相结合的过程中，许多煤矿瓦斯电厂的运行都获得了成功。

甲烷市场化合作计划([www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org)) 已经在全球范围确定了 240 个正在运营中、建设中、规划中以及过去开展过的项目。图 6.2 概括了煤矿瓦斯/风排瓦斯项目类型的分布情况，主要集中在发电、天然气管道和锅炉方面。总的来说，各类项目发电装机容量达 1,263 MW，供热能力达 156MW，天然气年销售达 15.82 亿  $m^3$ ，年减排量 700 万 tCO<sub>2</sub>e (Methane to Markets, 2009)。

图 6.2 全球煤矿瓦斯项目的分布情况



注：Number of Projects——项目数量； Boiler Fuel——锅炉燃烧； Coal Drying——煤炭干燥； Power/CHP——发电/热电联产电厂； Flaring——点火炬； Heating/Cooling——供暖/供冷； Industrial Use——工业用途； Pipeline Injection——管道输送； Local/Town Gas——当地名用/城市用气； VAM——风排瓦斯； Vehicle Fuel——汽车燃料。

（来源：甲烷市场化伙伴计划，2009）

迄今为止，大部分甲烷抽采利用项目主要集中在澳大利亚、中国、捷克共和国、德国、波兰、俄罗斯、乌克兰、英国和美国。随着碳市场的出现，在一些国家，碳减排项目除了生产能源产品，还创造了碳信用额度或其他环境商品（见第 7 章）。这大大促进了一些国家相关项目的发展，尤其是在中国，这也刺激了单独依靠碳信用额度作为主要收入来源的项目类型的增长。

#### 6.4 煤矿瓦斯的减排和使用

抽采的甲烷是根据其产出的瓦斯的数量和质量而被加以使用的。历史上，进行利用的甲烷的最低浓度要求是 30%。近几年，市场上开始出现内燃机，能够对浓度小于 30%的煤矿瓦斯进行利用。因为运输低浓度瓦斯是十分危险的，应该避免利用。本指南将进行利用的煤矿分为中/高浓度和低浓度(< 30%)两类。

### 6.4.1 中高浓度瓦斯

出于安全方面的考虑，此类技术通常要求来自抽采系统的瓦斯流量较为平稳而且质量相对较高，其甲烷浓度的最低值为 30%。一些可行的商业化项目仅使用通过预抽获得的高浓度的瓦斯。我们认为“最佳使用方法”没有一个统一的标准。基于产出的瓦斯的质量以及当时的市场条件、开采条件、和法律条件，每个项目都应根据其自身特点和优势进行评估。例如，在德国，固定收购价格已经成为煤矿瓦斯利用的主要拉动因素，并促进了煤矿瓦斯发电的发展。在美国，许多煤矿已获得了完善的天然气运输系统以及有利的天然气价格，因此推动了许多天然气管道销售项目的成功。表 6.1 比较了最普遍煤矿瓦斯的利用方式，简要地介绍了其优点和缺点。欲了解更多信息可以去浏览信息的主要来源：甲烷市场伙伴计划网站([www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org))。

**表 6.1 煤矿瓦斯利用方式的比较**

用途	应用	优点	缺点
发电	瓦斯发电机发电，煤矿自用或上网	<ul style="list-style-type: none"> <li>已验证的技术</li> <li>废热回收，为矿区供暖、矿工澡堂及矿井供暖和冷却提供热能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>容易受影响和遇到输出波动的问题；不利于上网；</li> <li>例行检修要求煤矿高度重视</li> <li>项目初始阶段投资巨大</li> </ul>
高浓度管道瓦斯	提纯，生产高浓度瓦斯	<ul style="list-style-type: none"> <li>相当于天然气</li> <li>定价高的区域可获利</li> <li>对有良好的管道基础设施的地方是很好的选择</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>管道净化标准高，净化成本较高</li> <li>只可用高质量的预抽采或处理过的煤矿瓦斯</li> <li>需要合理的管道准入</li> </ul>
中等浓度民用燃气或工业用气	浓度大于 30%的甲烷可用作民用燃气、区域供暖和工业锅炉等	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料成本低</li> <li>区域效益</li> <li>对净化要求不高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>输送系统和检修成本高</li> <li>浓度和供应量有所波动</li> <li>项目经营者应对高峰需求的投入高</li> </ul>
化工原料	高浓度瓦斯用于制造炭黑、甲醛、合成燃料和二甲基醚（DME）	<ul style="list-style-type: none"> <li>对多余的高浓度瓦斯进行利用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工成本高</li> <li>产生碳排放时不纳入清洁发展机制</li> </ul>
煤矿自用	用于矿工宿舍的供暖、供气、锅炉和烘干煤粉	<ul style="list-style-type: none"> <li>代替煤使用</li> <li>干净，能源成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>矿区内利用要比矿区外更经济</li> </ul>
汽车燃料	对预抽的高浓度瓦斯和煤层气进行提纯，生产 CNG 和 LNG	<ul style="list-style-type: none"> <li>滞留的甲烷进入市场</li> <li>车辆燃料价格高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工、仓储、处理和运输成本高</li> <li>提纯标准高</li> </ul>

注意：如果项目能够达到规定标准，那么这些项目就符合获得碳信用、新能源信用或固定收购价格的资格。

### 6.4.2 低浓度瓦斯

错误的抽采方法和安装实施标准低将导致抽采率低，过多的空气混入会导致产生的瓦斯浓度低，有时可能达到爆炸界限内。该指南强烈反对处在爆炸界限范围内的瓦斯进行运输或利用，避免对矿工造成生命威胁及引发危及矿井财产安全的爆炸事故，最终导致开采运行成本的增加。

### 6.4.3 低浓度瓦斯提纯技术

在某些具体情况下，提高煤矿瓦斯的质量还是非常有益的，特别是采空区抽采的瓦斯。一开始重点应集中在提高井下瓦斯抽采标准上，避免造成与瓦斯提纯相关的高成本。这不仅能提高瓦斯质量，也能改善煤矿安全。

第二个途径是提高瓦斯质量。提高瓦斯质量的系统造价可能很昂贵。所以在安装系统之前，应特别注意对该途径进行评估，根据煤矿瓦斯项目的目标权衡成本和利润。如果想要提高瓦斯质量，最简单的方法就是将采空区的低浓度瓦斯与预抽采的高浓度瓦斯混合，获得最合适的浓度。还有一种方法是过滤煤矿瓦斯中的杂质（氧气、氮气、二氧化碳、一氧化碳和硫化氢），具体方法包括以下三种基本技术：1）变压吸附（PSA）；2）分子筛吸附（MSA）；3）深冷分离。

- 变压吸附：在大多数变压吸附（PSA）脱氮装置系统中，每次增压循环大孔径碳分子筛都优先吸附甲烷。这个过程回收富甲烷气体，甲烷含量会随着每次循环而增加。变压吸附可以回收高达95%的可利用的甲烷，且可进行连续运行，并不需要特别关注。
- 分子筛吸附：分子筛吸附（MSA）是通过利用一个可调节分子筛来进行变压吸附的过程。分子筛的筛孔可以调节到0.1埃。如果使用含量超过35%的惰性气体，成本会很高。
- 深冷分离：深冷分离是一种提高天然气领域中低规格气体的质量的基本解决办法，十分具有经济性。这一方法使用一系列热交换器将输入的高压瓦斯气流进行液化。相比其他提纯技术，深冷设备能够最大限度地回收甲烷，其回收率可达98%。但由于其成本高，所以更适用于大型项目。

美国环保局报告《提高煤矿瓦斯质量，符合管道标准：系统供应商的业务状况（EPA-430-R-08-004）》中包含了一些关于提高抽采煤矿瓦斯质量的信息。<http://epa.gov/cmop/docs/red24.pdf>

### 6.4.4 点火炬

煤矿瓦斯点火炬是一种瓦斯治理方法，在煤矿瓦斯利用不可行的情况下，这种方法具有一定的吸引力。理想的情况是，每家利用工厂都配备了点火炬设备，在设备发生故障时、需要暂停设备进行定期维修时以及在开采初期当甲烷产量未能达到商业化规模之前使用。这将最大程度地降低甲烷排放，在未进行甲烷利用的情况下实现环境保护。

一些国家的煤炭行业和矿井监管机构认为点火炬会导致火焰通过抽采系统传回矿井导致爆炸，反对进行点火炬。最基本的一点是实施点火炬要求遵守严格的设计规程，并在装置中安装阻火器、密闭器、传感器和其他安全设备。一些国家的煤矿瓦斯点火炬项目，如澳大利亚、中国和英国，已经成功地运营。从理论上讲，其安全风险和已经获得完善应用的煤矿瓦斯锅炉没有什么区别。

可以采用露天的“烛台”式燃烧或密闭（地面）燃烧。密闭式燃烧的成本要远远高于露天燃烧，但其销毁效率也较高。在理想条件下，两种方式的效率几乎是相同的，都能够达到98%至99%，但当受到风力或其他因素影响时，露天燃烧的效率会大大降低(University of Alberta, 2004)。例如，清洁发展机制执行理事会设定密闭燃烧的默认效率为90%，而露天燃烧为50%(CDM Executive Board, 2009)。密闭燃烧的实际效率可以测量并利用。最后一个考虑因素是密闭式燃烧更美观，由于燃烧的火焰是不可见的且能够更好处理污染物。



## 6.5 矿井风排瓦斯 (VAM) 的治理和利用

显然，井工矿是煤炭行业逃逸性甲烷排放最大的来源，而预计全球煤矿开采相关的70%的甲烷排放是来自井下风排瓦斯。风排瓦斯的甲烷浓度通常低于1%。

最近几年，已经开发出通过热氧化来销毁矿井风排瓦斯中极低浓度甲烷的技术。其主要目的就是降低温室气体排放。其中一些技术可能与热回收系统相结合，为矿区供暖，或通过汽轮机发电。

当前市场上有两种氧化技术，一种是蓄热式热力焚化炉 (RTO) 也被称为热力双向流反应器 (Thermal Flow-Reversal Reactor, TFRR)，另一种是蓄热式催化燃烧法 (regenerative catalytic oxidizers, RCO)，也被称为催化剂双向流反应器 (Catalytic Flow-Reversal Reactor, CFRR)。这两种技术都是利用逆流过程来维持反应器的核心温度。但有所不同的是，在蓄热式催化燃烧法中，氧化过程需要使用催化剂。在应用于矿井风排瓦斯之前，这些技术已经在制造业的污染控制中得到广泛的商业应用，特别是在氧化挥发性有机物、废弃或其他空气污染物的应用。澳大利亚、中国和美国的一些煤矿，已经建立了具有商业规模的蓄热式热力焚化炉 (RTO)，开展甲烷减排示范项目。在澳大利亚，已经成功地运行了风排瓦斯能源回收示范项目，主要通过在内燃机中利用风排瓦斯作为燃烧空气，并建设在坑口电厂中采用蓄热式热力焚化炉 (RTO) 将风排瓦斯转化为电能。该技术已经在试验装置中获得了验证。

通常在没有使用其他燃料的情况下，当前的风排瓦斯技术是无法处理浓度低于0.2%的甲烷的，但由于全球许多煤矿都要求风排瓦斯的浓度低于0.2%，降低浓度限制的研究工作也正在进行中。利用风排瓦斯进行发电可能需要优化进口处的瓦斯浓度，并提高进入氧化设备的风排瓦斯的浓度。目前采用的方法是与其他来源（如采空区抽采或预抽的煤矿瓦斯）的瓦斯混合以提高浓度。由于存在爆炸风险，如果考虑了混合就不应使用抽采的低浓度瓦斯(<30%)。高浓度瓦斯 (> 30%) 可以从成本较低的发电调集，这将作为项目可行性的一部分进行评估。

有必要确保RTOs/RCOs和将矿井回风输送到反应器所需的基础设施不会在矿井的风机上造成额外的回压，最大程度地降低多余的功率消耗，并包含甲烷分析器和其他安全设备（例如，阻燃器、旁路系统）。

正在开发的风排瓦斯技术还包括整体式催化反应器 (CMR)、利用浓度低于1.5%的风排瓦斯稀燃汽轮机，风排瓦斯与废煤屑混合燃烧的回转窑(Su, 2006)。

目前，以风排瓦斯为主要燃料的利用技术的商业可行性取决于碳信用额度所提供的收入。根据有关报告，当碳信用额度达到5美元-10美元/tCO<sub>2</sub>e时，项目具有较好的收益率。

## 6.6 甲烷监控

如果能准确地测量抽出瓦斯的实际浓度，可大大提高甲烷的利用效率和安全性。

如果可以获得实际甲烷含量的数据，便可以用于能源转换或燃烧的抽采瓦斯进行安全运输。所带来效益远远超出安全的范畴，能够扩大甲烷利用的市场，增加甲烷利用或减排的产品。例如，燃气发动机所适应瓦斯浓度变化范围很小，而稳定的瓦斯产量将增加发动机的效率，降低运行和维护 (O&M)成本。输入到天然气管道中的甲烷必须满足严格的规格要求，否则将遭天然气管道运营商拒绝甚至处罚。

对于通风项目而言，重要的是在项目设计之前准确地测量通风流量，以便评估风排瓦斯的浓度和总流量。一旦开始运行，完整的监控体系将提供运行数据，而监控项目对准确测量减排量尤其重

要。这里提到的监控方案可能要求与通常煤矿的监测方案完全不同，因为采煤活动对甲烷的监控主要是出于对安全方面的考虑，而测定通风量是为了优化通风方案。例如，许多温室气体议定书要求对通风量排放进行连续的监控，并持续或定期对瓦斯进行采样分析。

## 第七章 成本和经济性分析

### 关键信息

建设高效抽采系统和加强瓦斯利用，是一个新的经济增长点。煤层气潜在的用途范围很广，也已在全球范围内进行了商业化应用并获得了收益。通过抽采瓦斯的提纯来提高甲烷浓度的成本较高，这可以通过改善井下瓦斯抽采效率加以避免。

### 7.1 瓦斯抽采的商业运作

为了从投资中获得经济回报，现代煤矿必须持续、高强度地进行煤炭开采。回采率的提高往往造成瓦斯排放增加。煤炭的持续开采，既不能因为无法控制矿井瓦斯浓度不超过安全标准而受到限制，也不能因瓦斯相关事故而受到影响。违反法定安全标准可能会遭到罚款处罚或是导致危及矿工生命的爆炸事故。任何人员伤亡都是所难以接受的，因此必须努力避免此类事故的发生。重大生产安全事故不仅会对工人家属造成直接影响，也会对公司及其员工造成损害，如刑事责任、赔偿、生产停滞、及可能的违约罚款等导致的经济层面上的损失等等。因大规模采矿作业中发生的单起重大死亡事故而导致生产停滞、赔偿金及罚款将付出 200 万美元至 580 万美元或更高的代价。在有些国家，一起严重煤矿事故会导致持续数周、大范围的煤炭开采停滞，事故调查完成并采取整改措施以前，不能恢复生产。

瓦斯抽采成本是煤炭开采生产和运营成本中不可分割的一部分，因此，我们有充分的理由进行高效瓦斯抽采的投资，以控制整体成本、保障安全和完成生产目标。下面让我举例说明高效瓦斯抽采对财政方面的影响。在中等厚煤层（如，约 3 米）采用现代高产长壁开采法，如果地质条件好的话，年产量可达到 200 万到 400 万公吨煤。假如煤炭价格为 40 美元/吨，那么受到瓦斯排放相关的限制导致减缓或停滞生产的时间（总生产时间的 10%）都将给矿业公司造成每年 800 万到 1600 万的收益损失。

一旦瓦斯抽采系统到位，对额外瓦斯采集工作的投资将可以通过降低井下通风用电成本或提高煤炭开采潜力来实现，从而提供了节约成本或获得额外收益的机遇。

### 7.2 瓦斯抽采成本比较

瓦斯抽采系统成本取决于很多因素（如设备、服务、劳动力、地表进入权限、土地征用）并且各国之间也有很大差异。地质和采矿条件的不同造成的成本差异使得各国的平均成本差别很大。表 7.1 显示的是每吨煤瓦斯排放的平均相对成本比较（2009 年价格）。该项比较的基础是假定对一个长 2 公里，宽 250 米，深 600 米的 3 米厚的煤层进行工作面抽采，并以中国和澳大利亚数据为基准，其抽采率为 2.0Mtpa 至 0.5Mtpa。

表 7.1 2009 年美国各种瓦斯抽采方法每开采一公吨煤炭时的相对成本

方法	基本技术	主要成本项	主要成本变量	预计成本（美元/吨）
井下采前预抽	沿采煤层内定向、深长钻孔技术	专业钻孔技术人员及设备	钻孔直径及长度	0.4-3.2
	穿过采煤面旋转式钻孔技术	旋转式钻孔装备	钻孔直径及长度	0.6-4.0
地面预抽采	常规压裂式垂直井	承包钻井、套管及压裂服务废弃点的封埋	钻孔深度及需要完成的采煤面数量	1.2-9.6
	地表、矿内层多分支矿井技术	承包钻井、套管和专业化的定向井下钻孔服务；废弃点封埋	钻孔深度及层内横向钻孔长度；当钻井难度提高时，成本会迅速增加。	1.0-8.0
边抽边采—井下	穿层钻孔（现有巷道）	旋转式钻孔装备	钻孔直径及长度	0.1-1.6
	排水廊道	开拓额外巷道	采煤层工作面上/下距离和巷道尺寸	0.3-11.2
	超毗邻（或亚毗邻）钻孔，或定向水平钻孔	专业钻孔人员和定向井下钻孔设备	半径弯曲处钻孔困难	0.5-4.0
地面抽采	采空区钻孔	承包钻孔和套管服务废弃点封埋。	深度	1.4-15.2

说明：以上数值只是总体概括得出的，并未说明表面和井下排放之间的成本差异。

抽采方法一定要适用于当地的采矿和地质条件。例如，井下穿层钻孔可钻到煤层顶板较少的采煤工作层的上部地层，但它无法提供有效的瓦斯控制。地表抽采法的成本随着抽采深度的增加而逐步增加，井下抽采法在财务方面的吸引力由此也与日俱增。

在高瓦斯煤矿中，需要将各种方法组合应用才能安全地实现高采煤率。抽采系统的成本伴随地质条件复杂性的增加而上升。考虑到钻孔或排放通道出现问题或可能给井下开采安全带来的威胁/危害，系统内部应该留有足够冗余。按纯甲烷计算，井下抽采煤矿瓦斯的典型运行成本预计为 0.06 美元/m<sup>3</sup> 到 0.24 美元/m<sup>3</sup>。

### 7.3 甲烷利用的经济价值

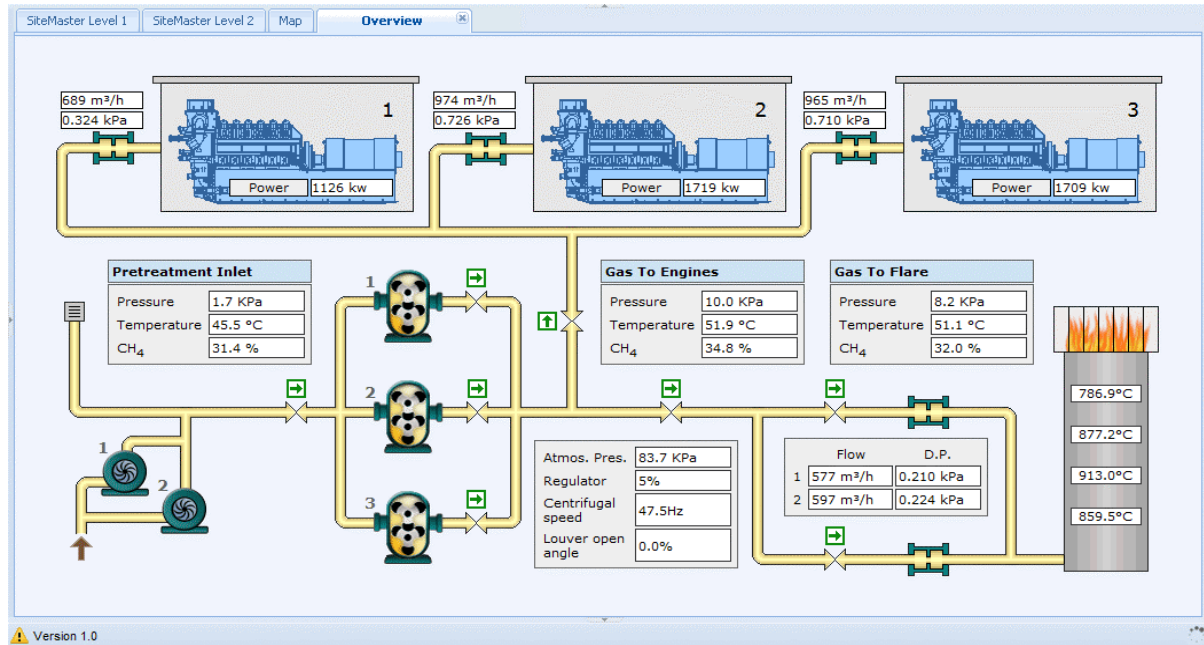
虽然将所抽采瓦斯运用于发电还需要有额外的投资，但可以带来一定的经济收益，并可降低煤矿的电力成本。投资发电时要考虑的经济问题包括瓦斯供应量和浓度的可变性、机会成本及资金来源。

对于使用国际标准高效发电机的煤矿瓦斯热电厂，每兆瓦电力的投资成本（所有设备包含瓦斯处理）大约为 100 万至 150 万美元。热电厂整个生命周期内所产电力的运营和维修成本（全包含在内）平均约为 0.02 美元到 0.025 美元/千瓦时。

煤矿瓦斯发电厂的经济效益取决于瓦斯的可获得性、设备的可靠性（以及由此导致的运营时间）、用户或国家电网的认可，以及电力收入或煤矿通过利用煤矿瓦斯发电而节省的成本。由于抽采瓦斯是出于安全和煤炭生产方面的考虑，抽采的边际成本不包括在本研究范围之内。在有些情况

下，额外的成本包括提高瓦斯流量和浓度所需要的成本。良好的项目设计、使用已经验证过的设备、完善的运行维护方案，以及实时监控对于项目的成功至关重要。图 7.1 显示了典型监控软件的截图。

**图 7.1 煤层气（煤矿瓦斯）发电和减排** 实时监控显示了三台瓦斯发电机和一组瓦斯燃放装置的工作流程图及性能参数

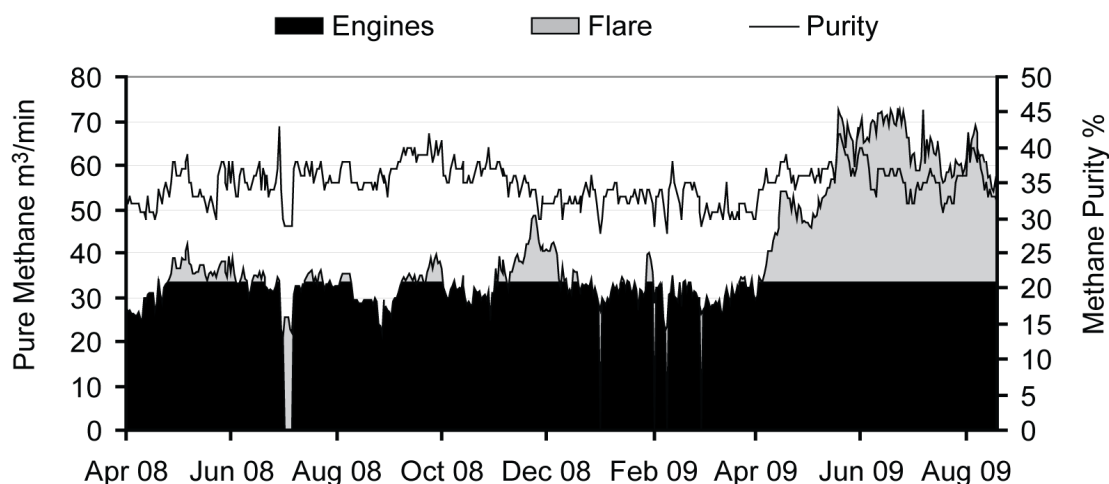


(由 Formac Electronics 公司和 Sindicatum Carbon Capita 公司提供)

对煤矿瓦斯发电厂进行规模分类时，必须考虑到与正常采矿活动相关的瓦斯流量和纯度的可变性。另外，如果必要的话，必须提高抽采标准以确保瓦斯达到了安全、合法利用的浓度。可根据历史数据来确定在可获得一定采前预抽瓦斯（例如，85%）条件下的潜在发电装机容量，并燃烧剩余未使用的瓦斯（图 7.2）。如同很多业绩不佳的大型煤矿瓦斯发电厂所展现的那样，这种做法非常重要，因为煤矿瓦斯发电厂的经济运行需要超过年均 7500 小时的最长运行时间投入。因此，燃气发电机的容量设计不应是为了利用最大负荷燃气供应，而应考虑到瓦斯可获得性的安全负荷。甲烷的质量和数量达到峰值（朝向较低）时应将其燃烧，从而获得最大环境效益。

随着瓦斯捕集（技术）的不断完善，可进一步增加发电机组，且速度为 4 m<sup>3</sup>/min 纯甲烷流量可支持约 1MW<sub>e</sub> 的发电容量。

图 7.2 利用抽采的煤矿瓦斯的甲烷流量和纯度波动来显示发电机和燃烧的优化的容量和用途



注：左纵轴——纯瓦斯量；右纵轴——瓦斯浓度  
(由英国辛迪克碳资金有限公司 *Sindicatum Carbon Capital* 提供)

除发电外，煤矿瓦斯还有很多其他利用方式，比如民用燃气、锅炉燃料及第六章所讨论的化学制品原料。在那些情况下，经济效益很大程度上取决于具体情况，通常认为发电是一件很困难事情。

因为大部分煤矿瓦斯排放都是以 VAM 形式出现的，大部分 VAM 的利用是能够得到保证的。VAM 氧化放热，此热能可用于产生蒸汽及发电。以  $35\text{Nm}^3/\text{s}$  的流速，含有 0.5% 甲烷通风流量的 VAM 氧化单元可产生约  $1.3\text{MW}_e$  的电力。为了获得持续的电力产出，需要抽采瓦斯来源以稳定 VAM 浓度。要取得更好的效果，则需要有相对较高的 VAM 浓度。每单元所产电力的资金成本是传统煤矿瓦斯发电的两倍多，且其减排环境机会成本比同等投资可能要大 4 至 5 倍。在目前能源价格及缺乏较高固定收购价格的情况下，若没有长期稳定的碳减排收益，VAM 发电在商业上是不可行的。除此之外，改善瓦斯抽采能够以较低成本进行电力生产，从而实现 VAM 减排。

煤矿瓦斯或 VAM 发电的经济效益很大程度上取决于一些特殊项目的电价及减排信用额度或其他激励措施的价值。

#### 7.4 碳融资和其他激励措施

减排信用额度为一些国家提供了一种额外的融资选项，补充了传统的通过银行贷款进行的项目融资或股权融资等方式。目前有各种各样的排放信用机制，例如，灵活的清洁发展机制 (CDM) 和《京都议定书》的联合履约机制 (JI)，以及一些自愿机制，都是这类额外融资选项的基础。

其他一些有助于甲烷利用融资的机制包括政府奖助、税款减免、绿色投资计划 (GIS) 和固定收购价格 (例如，在德国和捷克共和国)。在没有这些激励措施的情况下，碳融资成为了触发煤矿瓦斯和 VAM 利用项目实施的首选融资方案。

碳融资能够带来的杠杆效应的基础是 1 个单位的减排量相当于 1 吨的二氧化碳。体积为 66.4 m<sup>3</sup> 的甲烷大约相当于 1 吨的二氧化碳。计算必须考虑销毁甲烷所获得的收益，甲烷的温室气体的排放效率比二氧化碳高出 20 倍，每吨甲烷燃烧排放出的 2.75 吨 CO<sub>2</sub>。根据经验，装机容量为 1 MW 的煤矿瓦斯发电生产使用 250 m<sup>3</sup>/h 的纯甲烷排放可以每年减少 30,000 吨 CO<sub>2</sub> 的排放。根据运行时间及系统的效率，将产生超过 1-MW。风力发电机 7 倍的减排效果。

在选择利用碳融资杠杆和/或其他激励措施的优势时，需要考虑的事项包括信用机制、处理和交易成本、时间、复杂性、当地法规、减排额度的不确定性。下面以清洁发展机制（CDM）和联合履约机制（JI）为例，进一步详细阐述其中的一些事项。

京都议定书条件下实施的清洁发展机制（CDM）允许发达国家开发并要求从发展中国家（非附件 1）批准的方法学的应用中获得核证减排额度（CER）。联合履约机制（JI）促进非清洁发展机制（non-CDM）国家和/或排放上限低于京都议定书规定标准的国家的项目。在授予减排额度方面有各种不同的自愿标准。自愿减排额度（VER）项目并不受制于《联合国气候变化框架公约》下的清洁发展机制（CDM）和联合履约机制（JI）项目严格的以及耗时的验证过程的限制；但自愿减排额度（VER）的市场规模很小而且价格大大低于 CER。

一个符合清洁发展机制（CDM）和联合履约机制（JI）资质的项目必须提供有力的“额外性”证明。额外的项目是指那些能够将人为温室气体排放降低到在没有这个项目的情况下所发生的水平；例如，与正常运营的情况进行比较。就减排潜力而言，运行 10 年的煤矿瓦斯热电共生发电厂的投资成本大约为 3-5 美元/吨 CO<sub>2</sub> 当量。核证减排额度（CER）和自愿减排额度（VER）涉及到 CDM/JI 项目的准备、批准、验证以及维护成本，加之甲烷利用/销毁设备及其维护方面的成本。在考虑到了所有的成本，包括资金成本/融资风险、专业化 CDM/JI 服务，总计成本可以达到 10 美元/CER 或 ERU。

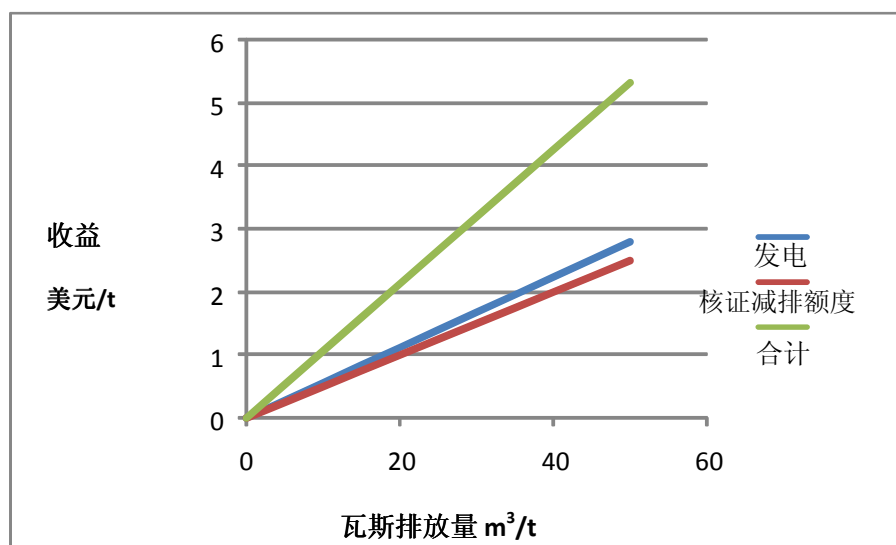
例如，按总值计算，普通的高瓦斯煤矿（具体排放为 10 m<sup>3</sup>/t）的每吨煤炭生产可获得 0.042 CER 的收益，而瓦斯非常高的矿井（具体排放量为 40 m<sup>3</sup>/t）的收益可达 168 CER/吨煤<sup>10</sup>。该计算假定 40% 的瓦斯被抽采，其中 80% 被利用。对那些应用最佳实践方法和标准且不存在重大地质或开采限制的项目而言，这个水平可以被认为是最低水平。核证减排额度（CER）和自愿减排额度（VER）的实际价值取决于市场和销售的时机。

在对普通的高瓦斯（如 10 m<sup>3</sup>/t）4 Mtpa 矿井利用的投资中，减排购买协议（ERPA）的价格为 12 美元/吨 CO<sub>2</sub>（捕集 40% 瓦斯，其中利用 80%），将每年从 CERs 或 ERUs 中获得 2 百万美元的收益；还有从发电或瓦斯销售获得的收益或成本节省<sup>11</sup>。假定瓦斯供应稳定，捕集到的瓦斯将足以达到 5 MWe（每年 250 万 m<sup>3</sup> 纯甲烷生产大约 1 MWe）的发电能力。发电收入大约为 0.05 美元/千瓦时。而每年 7000 小时运行的总收入将达到 175 万美元。减排和发电的总收入将达到 375 万美元。在这种情况下，碳信用额度几乎使这个项目的收入翻了一倍。如图 7.3，显示了生产的煤炭发电和核证减排额度（CER）销售中所获得的收益（单位：美元/吨）与该矿相对甲烷排放量（单位：m<sup>3</sup>（纯）/t）之间的关系。

<sup>10</sup>仅仅被销毁，但可以从替换的燃煤发电中带来一些燃料转换的利益

<sup>11</sup>CER 税收没有补贴。

图 7.3 煤矿瓦斯发电带来的双重收益：捕集 40% 的瓦斯，80% 被利用。



高瓦斯矿井则存在获得更大的回报潜力。在一个高瓦斯矿井 (具体排放为 40 m<sup>3</sup>/t) 生产 4 Mtpa 将能够获得 800 万美元的减排收益，并具有 20MW<sub>e</sub> 以上的发电潜力，可带来 900 万美元的收益。因此，潜在的总收益为 1700 万美元<sup>12</sup>。

只有在可以通过提供的甲烷流量和纯度的准确测量而验证减排量的情况下，减排项目的资金回报才具备可能性。甲烷抽采与利用项目已经（并很有可能）更严格地要求提供减排的可靠证明。监控和测量的复杂性经常被低估，而这会导致安全风险和收入的损失。

### 7.5 利用的机会成本

甲烷利用设备的平均资金成本取决于所选择的利用过程的规模和类型。在最初对利用资金成本的估算中，合理的估算值为 1 美元/吨。相比之下，在中国扩大煤炭生产能力的边际成本预计大约为 12 美元/吨（而许可证、批准、资源、地质、开采条件、井下和地面基础设施，以及市场容量等）。向煤炭生产能力方面（而不是瓦斯利用）每吨投资 1 美元，可使得煤炭生产能力增加 1/12，或 0.083 吨。因此，例如，通过将用于瓦斯利用的资金用于增加煤炭生产能力，一个 4-Mtpa 煤矿的生产能力可以提高至 1.083 x 4 = 4.332 Mtpa。在煤炭价格为每吨 30 美元的情况下，每年可获得大约 1000 万美元的额外收入。每吨 2.50 美元的机会成本较高，因此，多数煤矿的投资决策将倾向于扩大煤炭生产能力而不是煤矿瓦斯发电。而如果可以获得减排信用额度的额外收入，例如，由于煤矿具体的甲烷排放超过 20 m<sup>3</sup>/t (参见以上图 7.3)，发电可作为经济上可行的选项。这个观点的论据是煤矿瓦斯发电只是额外的。随着煤炭价格的升高，煤矿瓦斯发电变得更加缺乏吸引力。

如果在利用方面有第三方投资，情况就完全不同了，由于受到碳融资的支持-这对于一个煤矿而言，是一个极具吸引力的提议—可以节省机会成本，而过去未被使用的甲烷能够创造额外的价值。

<sup>12</sup> 强调 CER 税收没有补贴。



## 7.6 环境成本

当前，多数采煤公司认为瓦斯抽放是一种开采成本，而瓦斯利用或缓解排放所发生的成本被归类为额外的投资成本。然而，由于缓解气候变化和回收清洁能源逐渐成为这个价值链中的重要组成部分，煤矿运营商需要用更加全局性的角度来审视这些因素。今后，可能要求煤矿改善瓦斯抽采工作，除满足矿井安全需求以外，还要达到环保方面的目标。

在“正常运行”的情况下，预计中国从事煤炭开采将甲烷排放影响内化的成本大约为 12 美元/吨（ESMAP, 2007）。没有任何一个国家会要求强制性投入如此大的成本，但所提供的成本率表明，如果不能使排放最小化，煤矿就要承担潜在的成本。例如，俄罗斯已经对煤矿瓦斯排放征收罚款，但其费率远远低于上述数字。

## 第八章 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。未来一段时期，主要的工业经济、新兴经济、过渡经济乃至全球经济仍将依赖煤炭能源。目前，煤炭占全球一次能源消费总量的 25%，占电力行业能源消耗的 40%，占钢铁业和铝业能源消耗的近 70%。国际能源署(IEA)指出，2030 年新兴经济体的能源需求将增长 93%，其中大部分增长来自中国和印度。煤炭将成为满足这部分需求的重要来源。(IEA, 2009)。

世界许多国家的浅层储量逐渐枯竭，开采不断向深部及高瓦斯煤层延伸，生产也将更富挑战性。同时，社会对煤矿安全生产和环境保护提出了更高的要求。

理想的情况是，现代化煤矿企业意识到建设一个有效整合井下瓦斯治理、利用、减少甲烷排放的全方位的瓦斯管理体系的益处。同样，从政策和监管角度看，一个综合的煤矿瓦斯管理系统将带来多重收益。制定并实施瓦斯抽采、运输和利用的安全规程将促进甲烷排放标准的提高，增加清洁能源，减少排放。

工业化国家的经验表明，投资建设高效的瓦斯抽采系统可以缩短因瓦斯问题而停工的时间、更安全的开采环境，而且还可以促进瓦斯利用，实现减排。这份指导性文件应该看作是改善必要安全生产实践、促进煤矿安全生产、减低煤矿甲烷排放而制定战略和开发项目的起点。

这份文件的关键原则如下：

**1. 在瓦斯爆炸事故风险管理方面，世界上很多国家都有丰富的经验。**在全球范围内各类项目应用并积累了很多关于瓦斯赋存和治理的知识和实践经验，有助于大大减少煤矿瓦斯爆炸风险。

**2. 各种规定应以保障煤矿工人的安全为根本，这一点不可忽视。**仅仅通过立法或先进的技术无法在高瓦斯矿井条件下实现安全生产。相反，合理且有效的管理系统、管理机构和管理经验才是保证安全生产的根本。煤矿安全生产的其他关键要素包括对管理层和工人进行适当的教育和培训，并在应用安全生产实践后，鼓励工人积极参与。

**3. 应把建立爆炸风险最小化评估方法与执行健全的通风和利用安全规程相结合。**在正常的条件下，煤矿的瓦斯流量都是可以预测的。根据瓦斯的特点，不正常的瓦斯涌出或突出是很难预测的，但在哪种条件下容易发生瓦斯突出是可知的。这些降低类似风险的具体方应该用于被认定为有重大风险的地方。在这种情况下，安全的开采条件取决于瓦斯治理方法的实施与监控措施是否严谨。安装井下监控系统最重要的是不仅为了煤矿安全，也为安全规划收集和利用数据。

**4. 通风系统是煤矿生产系统的重要组成部分，其作用之一是在开采过程中排出甲烷。**矿井通风系统旨在取得以下三个目标：1) 为矿工提供新鲜空气；2) 控制井下温度；3) 有效稀释和去除有害气体和空气中可吸入灰尘。

**5. 完善瓦斯抽采系统，既能快速解决煤矿瓦斯治理问题，又具备经济性，比单纯加强通风更有成效。**

煤矿瓦斯抽采问题通常可以通过应用现有的理论和技术得以解决。当新的技术获得工业试验成功时或当现有的技术无法提供满意的解决方案时，才考虑引进新的或创新技术。通过适当的安装、维护和定期检测，及系统化钻孔实施计划，可以改善甲烷抽采系统的性能。

**6.浓度接近或处于爆炸极限内的瓦斯在输送时十分危险，应该禁止。**甲烷是一种易爆气体，在空气中爆炸的浓度范围在 5%至 15%之间。作为一般的经验法则，应该严密监控安全系数：浓度低限的至少 2.5 倍和最高限的 2.0 倍。

**7.井工矿排放的甲烷约占全球因人类活动排放的甲烷总量的6%，这其中大部分甲烷可以通过一些措施实现减排。**甲烷的温室效应值超过二氧化碳的20倍，(IPCC, 2007)，而二氧化碳是全球最重要的温室气体。多数从井下煤矿产生的甲烷都可以被有效地回收和利用，或被销毁（通过将其转换为二氧化碳而减缓其对全球变暖的影响）。选项包括抽采气体的能源回收，燃烧抽出的多余瓦斯，利用或减排煤矿风排瓦斯。凭借正确的技术和市场条件，最终实现甲烷的近零排放的目标。

**8.建设高效抽采系统和加强瓦斯利用，是一个新的经济增长点。**煤层气潜在的用途范围很广，也已在全球范围内进行了商业化应用并获得了收益。通过抽采瓦斯的提纯来提高甲烷浓度的成本较高，这可以通过改善井下瓦斯抽采效率加以避免。

## 第九章 案例分析

以下案例研究为读者提供了七个实例。该指导性文件对世界各地矿井中所实施的最佳实践范例进行了讨论研究。案例研究 1、2、3 分别对三个长壁矿井所实施的评估，规划与甲烷管理措施进行了讨论，这些措施均用于解决甲烷控制问题。案例研究 4 重点处理如何降低房柱法采矿的爆炸风险。案例研究 5 则对甲烷的捕获与发电利用进行了检验。而案例研究 6 和 7 重点研究风排瓦斯（VAM）的消减与利用。

这些案例研究内容十分简要，旨在强调每个案例中的关键要点。

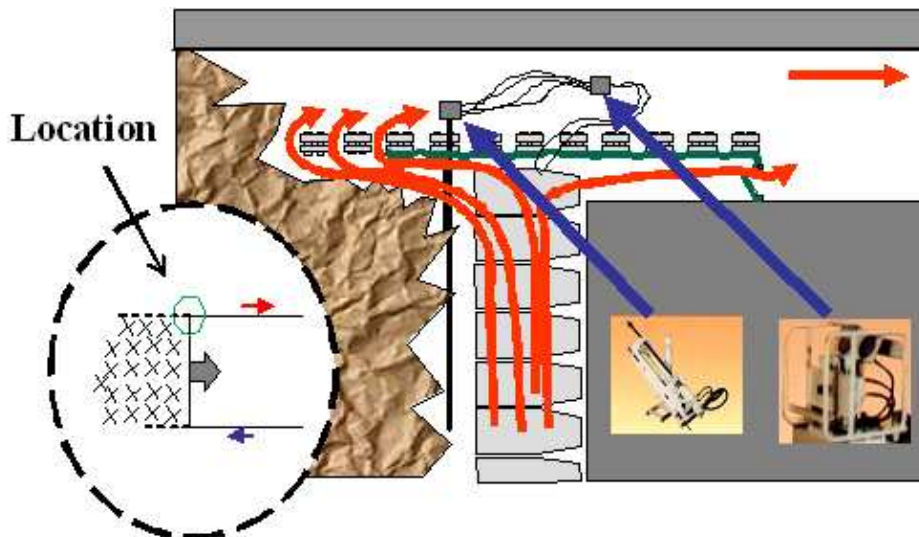
### 案例研究 1：英国-高瓦斯煤层，岩层地应力巨大，后退式长壁开采，易自燃，实现计划产量

**初始条件：**作业深度 980 米，高 2 米的后退式长壁开采工作面，相对涌出量为  $50 \text{ m}^3/\text{t}$ ，计划煤产量为  $1 \text{ Mtpa}$ ，高危自燃煤层，超低渗透率，采煤工作面水平应力巨大，与长壁开采巷道（一进一回）的底板隆起问题。

**瓦斯治理问题：**煤层渗透率低，实施预抽采不可行。由于工作面的长壁前面斜上方的穿层测压钻孔受地应力高的干扰，瓦斯抽采量和抽采浓度都较低，而为了保证稳定性，高危自燃与较大煤柱也不能使用多进口或卸放通道系统。

**解决方案：**在配有专门的支护和通风装置的“回-返”系统中，通过在工作面后方打穿层测压钻孔，利用  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  通风量，实现指定产量（图 9.1）。最佳井位布置为一系列向上的钻孔，与巷道相互垂直，与煤层平面成向上倾斜  $55^\circ$  角，相距 7.5 米。向下的钻孔间隔 100 米以最大程度地降低底板涌出风险。

图 9.1 回-返系统

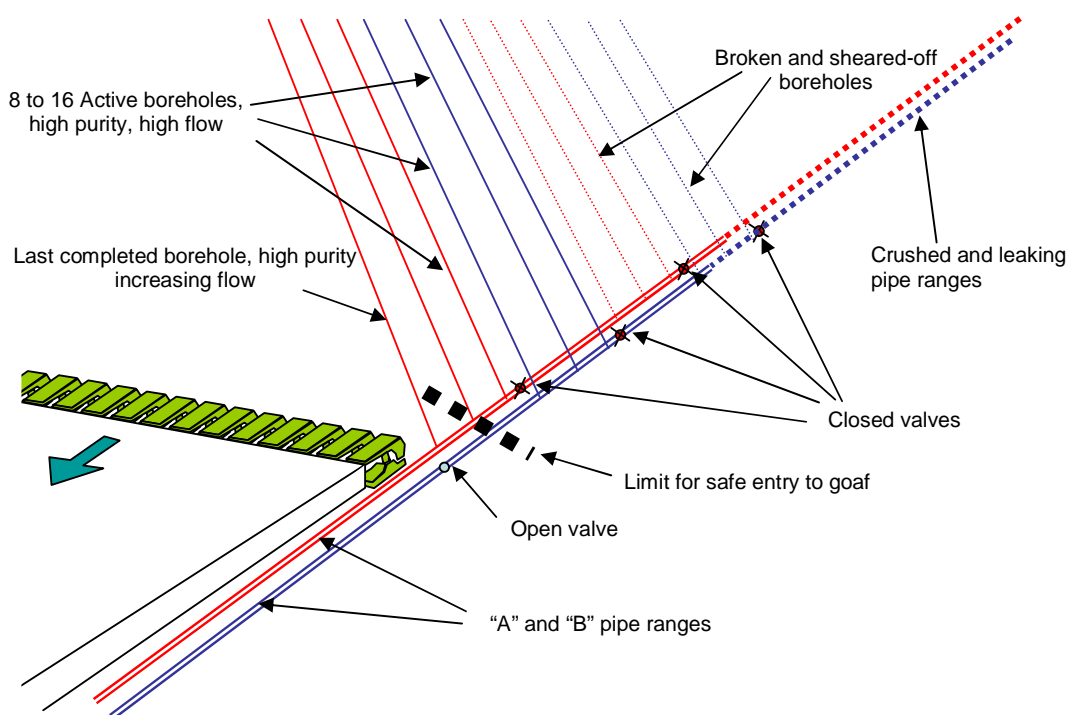


Location——上隅角

(Green Gas International 公司提供)

平行安装两个抽采管道。钻孔逐渐与其中一个、管道相连，直到瓦斯浓度降低；然后调整该管、防止瓦斯稀释过度，之后将钻孔连接另一抽采管道。然后继续进行这项“蛙跳式”过程，任何时候都必须至少保持 8 个钻孔与瓦斯抽采系统相连（参见图 9.2）。这种粗调整足以优化瓦斯质量与数量，并且，在没有要求人员冒险进入危险采空区调整个别钻孔的情况下，实现 67% 的抽采率。

图 9.2 “蛙跳式前进”系统



注：8 to 16 Active boreholes, high purity, high flow——8-16个钻孔，高浓度、高流量；Last completed borehole, high purity increasing flow——最新完成的钻孔，高浓度，流量处于上升阶段；Open valve——开放阀门；Closed valves——关闭阀门；Limit for safe entry to goaf——采空区安全分界线；“A” and “B” pipe ranges——A、B管道；Crushed and leaking pipe ranges——破碎的、泄漏的管道；Broken and sheared-off boreholes——被破坏的、钻孔；

(Green Gas International 公司提供)

长壁回采的速度很快，而钻井作业的可用空间十分有限，因此必须打下每个钻孔后安装并密封立管，然后在约 10 小时的周期内将其连接到抽采管道。这可通过一个小型便携式强力钻孔机实现（图 9.3），由液压支架的液压回路提供电源，不消耗额外的电能。

图 9.3 穿层测压钻杆



(EDEC0 公司提供)

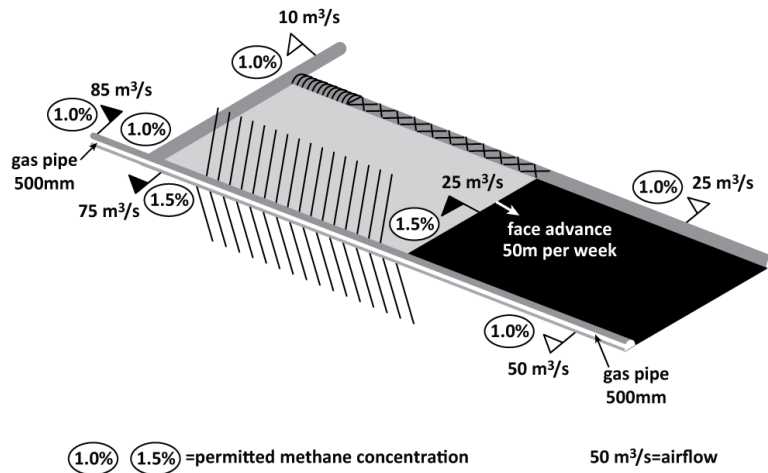
## 案例研究 2：德国-高瓦斯长壁工作面的高效作业

**初始条件：**煤层厚度为 1.5 米、工作面长度为 300 米、计划产量为 4000 吨/天，工作面推进速度约为 50 米/周。覆盖层厚度为 1200 米，煤层接近水平状态，前期无抽采。瓦斯预测显示出顶板的相对瓦斯涌出量为 25 m<sup>3</sup>/t，开采煤层的相对瓦斯涌出量为 3 m<sup>3</sup>/t，底板的相对瓦斯涌出了为 8 m<sup>3</sup>/t（共计 36 m<sup>3</sup>/t）。已知该煤矿易于自燃。

**瓦斯治理问题：**安全范围内的瓦斯最大流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s (112.5 m<sup>3</sup>/min)。预抽已评定为无效。主要存在以下两种制约因素：一个是长壁采煤工作面的最大允许风量为 25 m<sup>3</sup>/s，瓦斯流量最多可稀释为 0.37 m<sup>3</sup>/s (22.2 m<sup>3</sup>/min)，虽然采矿管理局已将甲烷浓度限制从 1.0% 提高到 1.5%（安全因素由 5.0 降低至 3.3）。这一变化是以增强监测与瓦斯抽采为前提。重要的是，此类变化只在特定情况下发生，并需要采取其他额外措施确保风险不会明显增加。另一个因素是风巷的回风浓度，允许的最大浓度为 1%。

**解决方案：**设计 Y 型通风系统（图 9.4）在穿过工作面的 25 m<sup>3</sup>/s 气流中引入另外的 50 m<sup>3</sup>/s 空气，这两股气流结合在一起通过该工作面后部，将采煤工作面和采空区排放出来的甲烷进行稀释。通风设施允许实施穿层测压钻孔，将其连接到排放系统并分别进行监测和调节。相比在工作面前部实施钻孔，一般在长壁工作面后部钻孔可以实现较高的抽采率和抽采浓度。这些钻孔具有较长的使用寿命和高效性，预计可捕获 70% 的顶板瓦斯和 40% 的底板瓦斯。

图 9.4 Y 型通风长壁工作面，工作面后方顶板与底板实施先进的通风设计与抽采钻孔



注：Gas pipe 500mm——瓦斯抽放管（500mm 管径）；Permitted methane concentration——允许的瓦斯浓度；Face advance 50m per week——工作面前进速度为 50m/周

（来源：德国 DMT 公司(DMT GMBH & CO. KG)）

工作面后部开放的采空巷道一侧的密封装置（矸石墙）用于增强巷道支护，将采空区与空气入口处相隔，从而最大限度地降低自然风险以及产生爆炸范围内的甲烷浓度。

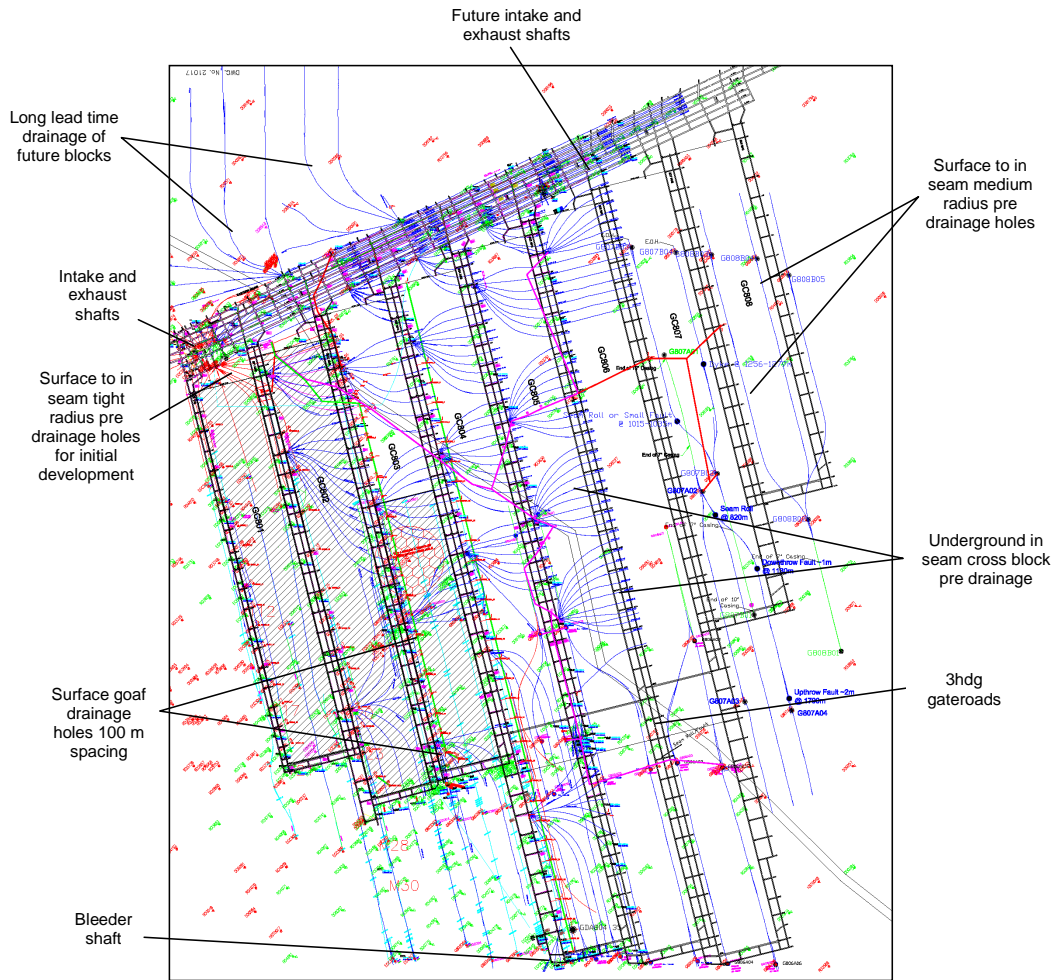


根据计划，向外回风 1% 的极限浓度最终将煤炭产量限制为 4000 吨/天。瓦斯抽采系统可抽采约 80,000 m<sup>3</sup>/d 的纯甲烷，并用于发电。尽管开采条件十分严峻，但是依靠先进的通风设计和高效的瓦斯抽采是能够成功的。

### 案例研究 3：高效长壁作业与高瓦斯排放量-澳大利亚

**初始条件：**一系列新的长壁区块，煤层 2.8 米高，甲烷含量范围为 8-14 m<sup>3</sup>/t。覆盖层厚度为 250-500 米，其地面通道一般不受地表特征限制。通过预抽采，相对瓦斯涌出量必须减至 7.5 m<sup>3</sup>/t 以下才符合防突规范，并低于摩擦点火的限制 5.75 m<sup>3</sup>/t。正常冒落带含有一个单一煤层底板和 8 个煤层顶板，其煤层厚度为 10-15 米。长壁区块宽为 300 米，长为 3600 米（图 9.5），产量为 11000 吨/周。

图 9.5 煤矿分布图显示的瓦斯抽采系统



(来源: Moreby, 2009 年)

为了想获得较大的瓦斯排放量，使煤矿从一开始就要在长壁上建设三平条巷，从而为瓦斯稀释提供更大的通风能力。与常规的 U 型通风系统相比，为了稀释瓦斯，三条平巷法向长壁工作面的回风巷提供更大的风量，而不增加工作面风速。目前，这是澳大利亚唯一一个使用三条平巷的矿井。

**瓦斯治理问题：**预测显示，煤层的相对涌出量很可能为 15-30 m<sup>3</sup>/t。从计划产量来说，这相当于 3,500-7,000 l/s CH<sub>4</sub>，通常随着深度而增加。但是，以前对邻近矿井的研究表明，大量游离瓦斯将使总排放率明显增加。前三个长壁工作面的涌出量均控制在设计范围内，但相对较浅的深度的涌出量

要高于预期。根据外推法得出，对更深的长壁工作面来说，涌出量将超过可行阶段的预测，其涌出量可能达到 9500 l/s。

**解决方案：**通过结合地面与煤层内曲率半径钻井（MRD）技术，并辅以用于瓦斯含量测试的取芯井下定向井和顺应井，使其达到开发阶段突出与摩擦着火限度。利用极小转弯半径钻井（TRD）技术对初始井底区域进行预抽采。

原来采用三平巷的计划十分正确，提供 100-120 m<sup>3</sup>/s 的通风回路容量为 120 m<sup>3</sup>/s (2.0%返风限度时，为 2000- 2400 升/秒 CH<sub>4</sub>)。值得注意的是，继 1994 年的莫拉煤矿灾难（矿工死亡人数达 11 人）之后，昆士兰当地相关部门出台了各种煤矿规章制度、指南和惯例，为了防止煤矿使用全美式通风排放系统。但是，经过适当考虑后，对向可能爆炸的混合物所在位置进行控制排放，控制自燃都是有可能的。

在任何情况下，这些块体中排放系统实际的稀释能力将远低于总的长壁瓦斯排放率，同时还需要其他策略。迄今为止，该矿井已经成功使用常规方法从表面到采空区排钻孔（直径 300 毫米，间距 100 米，位于后挡板返风一侧），从而减少了进入在通风系统中的瓦斯量。该策略已经实现了平均 65% 的捕获量（采空区抽采加上通风），其峰值约为 80%，以及较高的气流纯度 (>90% CH<sub>4</sub>)。

瓦斯收集设施位于地面，包括从垂直连接到井下定向井，利用直径 450 毫米的管道。源于井下预抽，地面 MRD 预抽和采空区钻孔的所有地表气流均用于一个中心泵站。大约每秒 2200 升的气体将从该泵站排入 16 x 2.0 MW 的瓦斯内燃机中燃烧。该场地政策是为了避免可能直接排放所捕获的气体。

必须认识到，向通风系统排放从采空区捕集到的 65% 的瓦斯对这个系统来说是有问题的。因此现在煤矿同样试图利用沿长壁轴线钻了约 2000 米长的钻孔进行预抽较厚顶板的目标煤层。这些钻孔将首先用于预抽采，当井下开采工作完成后，它们将作为采空区抽采孔，用于抽取较近工作面的瓦斯。常规多层完压井可能会被视为要在进一步更深层工作之前进行其他预抽采。

#### 案例研究 4：降低房柱式开采的爆炸风险-南非

**初始条件：**在具有严重爆炸危险性、瓦斯含量较低（1-2 m<sup>3</sup>/t）、煤层较厚（4-6 米高）的特殊采矿区域使用机械化房柱法开采，需要进行一些规范的实用措施来降低爆炸风险。大约有 75%的爆炸发生在工作面进口处或其附近，主要是由摩擦起火造成的（兰德曼，1992 年）。非地面区域发生的很多爆炸都强调了房柱式煤矿中利用通风法控制甲烷的困难性。由于纵向巷道与横向切面相交的地方反复出现突然膨胀和收缩，导致房柱法中的气流与长壁法中的气流有所不同。而在大部分工作的一些横切面中气流也可能静止。

高产区的气体增加将构成重大风险，而这些风险应是可控制的。其中，这些部分的特点是未检测到的甲烷顶板层中火焰传播与通风不良(Creedy 和 Phillips, 1997 年)。

**表 9.1 对房柱式煤矿中甲烷层起火风险的评估**

潜在故障	发生故障的可能原因	预防措施
防止引燃失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>平巷中辅助通风系统不良或不可靠</li> <li>设备通风系统存在缺陷。</li> <li>截齿磨损，喷嘴堵塞，水压低。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用适当的设计和保护设备。</li> <li>较高的维护标准。</li> <li>有效的监测。</li> </ul>
排除火源失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>与连续采矿机相关的电源与摩擦火源</li> <li>吸烟和其他非法活动</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对全体员工进行严格的培训和监督。</li> <li>在煤矿入口处搜查违禁物品。</li> </ul>
分散甲烷层失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>通风能力不足</li> <li>局部通风措施不当</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲烷控制程序。</li> <li>压气引射式通风机与其他配套设备可用。</li> </ul>
探测甲烷层失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>监测位置不正确。</li> <li>缺少合适的监测设备。</li> <li>工作人员的训练不足。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定点监测计划。</li> <li>合适的监控探头，尤其是高角度巷道部分。</li> <li>培训。</li> </ul>
防止甲烷分层失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>通风量太低。</li> <li>通风不可靠。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通风规划。</li> <li>局部增强顶板通风。</li> </ul>
防止甲烷涌出失效	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲烷涌出是井下采煤作业的自然结果。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲烷抽采。</li> </ul>

**瓦斯控制问题：**工作面的通风要求辅助通风将空气从最后的通过巷道中赶走。采矿区由大量棋盘式的巷道和煤柱构成，由于需要大量空气并很难将其均匀分布，整个区域无法进行有效地通风。为了确保主要的通风流能够到达工作面，将通过临时的隔离板隔离这些已开采区；因此气体可以在工作面后的密封区域逐渐积累。

在水和甲烷积累的煤矿中，压力可能是顶板坍塌所引起的，并散置了顶锚钻孔和一些开放的自流排放钻孔。从大量甲烷层以较低速度溢出的一些瓦斯将仍无法探测，除非离顶板很近，而较深水平的巷道应用困难。

**解决方案：**采用偏提取开采法的瓦斯控制可以通过层内法，预抽采法加以辅助；由于并没有大量分布顶底板含煤层，所以很少需要进行边抽边采。在瓦斯含量低的煤层，预抽采效果并不佳。因此，瓦斯抽采并不是该区域的可行之选。需要一个改善通风措施的实用解决方案。

要使已开采区与作业区的通风标准相同这一点并不切实可行，原因是空气供应有限。因此，这些变化情况所强调的是引进有效的监测表，包括顶板中的气体探测和房柱式工作面主体中空气速率监测。其中，这些区域的通风量已经在密封期间降低了。

工作面是风险最高的区域，政府监管部门已经针对通风机械化部分制定了一系列的操作规范（矿物资源与能源部，1994 年）。可燃气体浓度的基本标准是必须低于 1.4%。为了确保这一点，推荐使用以下措施：

- 最后通过巷道中空气的最大速率不得低于每秒 1.0 米（很多煤矿选择安装连续远程速度监视器）。
- 在平巷中使用有效的辅助通风系统（次级通风系统）。
- 定期测量并记录重要的通风数据。
- 每隔一段时间对含有气体的部分进行检查，间隔时间不得超过 1 小时。
- 如果二次通风系统停止工作，机械切割进行自动电隔离。
- 接近伴有火成侵入和地质异常特征的涌出风险区时，要采取特殊预防措施。
- 对正在开采的平巷中进行连续性的气体监测。

## 案例研究 5：煤层气（煤矿瓦斯）热电联产的发展/减排方案-中国

**初始条件：**2007 年 05 月在距离煤矿上方 1600 米的偏远山区安装并建成了一个新的地面瓦斯提取厂，其煤炭产能为 5 Mtpa，相对涌出量为 17.7 m<sup>3</sup>/t，抽采瓦斯的平均流速为每分钟 22 m<sup>3</sup>。整体煤矿甲烷捕获率为 15%，剩余的 85% 经由通风空气排出。

**瓦斯控制问题：**提取厂中瓦斯纯度会不断变化，有时会低于允许使用和气体捕获效率的最小值 30%。由于长壁开采周期和不同煤层中工作阶段的变化，预计抽采瓦斯量会出现波动；因此，煤层气发电厂的能力大小必须能够确保 85% 符合投资要求。该项目的目标是，优化能源回收，最大限度地降低温室气体排放。需要一个综合发动机和火炬系统-中国首例；因此，预计技术转让要求较高。

**解决方案：**该项目聘用了一支致力于瓦斯抽采、电力和系统工程的本地专家及国际专家组成的团队，他们与煤矿工作人员并肩作战，以确保气体输送，项目规模比例和工厂整合与绩效。

通过增强横向测量钻孔的密封与调整从而提高甲烷纯度。增加抽采基础设施的气体容量，置换高阻流量监测设备，并为增加瓦斯捕获制定一个计划。两个长壁盘区上的密集型预抽采钻井提供气体富集，同时补充气流，从而最终占据 23% 的抽采气体，而剩下部分则来自边抽边采，顶板穿层测压钻孔。后者是在工作面前方钻挖，不可避免地会受到一些损害并在采空区中表现不佳。示范钻井是在采空区工作面后方进行钻挖，其表现良好，但因地方管制原因尚未采用该技术，并且这一抽采法从未在该区域实际应用过。

该方案的第 1 阶段涉及 5 兆瓦电力的安装，其废热回收用于冬天建筑物采暖和进入通风气体。同时，还安装大约每小时 5000 立方米的照明装置。一家致力于为设备的使用与破坏设计并安装远程性能监视系统的专业公司参与其中。

一旦瓦斯捕获显示已提高到每分钟 50 m<sup>3</sup> (纯) 以上，则于 2009 年 10 月实施第 2 阶段建设从而将发电能力提高至 12 兆瓦。

## 案例研究 6：风排瓦斯 (VAM) – 中国

### 风排瓦斯 (VAM) 减排与风排瓦斯氧化作用释放出的能量生成热水

图 9.6 中国的风排瓦斯减排与能源回收



(由郑州矿业集团、MEGTEC 系统和法国 EcoCarbone 公司提供)

**初始条件：**该大型煤矿位于中国河南省，其煤炭产能为 1.5Mtpa，每年甲烷排放量约 1200 万立方米。在整个抽采项目的排放物中，VAM 占 56%，而剩余的 44%为甲烷。VAM 浓度在 0.3%-0.7%之间。

**瓦斯控制问题：**中国以前从未对风排瓦斯进行减排或利用，原因在于没有理由开展此类缺少碳信用额的项目。

**解决方案：**现在运行的 CDM 市场为金融驱动者提供了实施 VAM 减排项目的机会。国有采矿集团与 CDM 项目开发者和领先技术供应商一起合作，设计、委托并运行利用单层无焰再生式氧化热处理系统 (RTO) 的商业化 VAM 示范项目。在项目开发者的协助之下，该项目成为首次在京都议定书的框架中批准并注册的 VAM CDM 项目。

该项目是第一个商业化示范项目，但是煤矿中所使用的具体 VAM 技术是自然模块，能够将多个单位聚集在一起作为单一操作装置。这将允许煤矿可以估计该项目可以处理巨大数量的 VAM。在同一矿业集团下，还可以向其他煤矿部署额外的 VAM 单元。

煤矿中 VAM 装置主要由单个 RTO 组成，其产量为 62,500 Nm<sup>3</sup>/h (17 Nm<sup>3</sup>/s)，占 375,000 Nm<sup>3</sup>/s 总轴流量的 17%。实际上，与煤矿通风机的连接是间接的。这样如果 VAM 处理装置停止，所有通风空气将进入大气中。而一项重要的安全布置包括通风管道必须足够长，以便在发生紧急情况（例如，如果检测到瓦斯浓度太高）时，能够有时间运行旁通阀门使气流通过阀门。RTO 能够在 0.2% 甲烷时自激运行，因此在该煤矿产生的 VAM 浓度范围内成功运行。

该项目于 2008 年 10 月正式运行，其破坏效率为 97%。核证减排量 (CER) 取决于破坏甲烷的数量，单个单元每年二氧化碳当量的范围为 20,000 吨 (0.3% CH<sub>4</sub>) -40,000 吨 (0.6% CH<sub>4</sub>)。由于使用无焰氧化技术，该系统不会生成氧化亚氮排放物。甲烷浓度低于自激水平的 0.2% 时，系统将会关闭。

RTO 内部可释放出大量的能源。该装置在煤矿上产生热水可供矿工洗澡，也可为附近的建筑供暖。通过 RTO 与其排气管之间安装的空气-水热交换器，实现热能回收，主要回收加热排出的废气中的大量能量。下表对不同 VAM 浓度在 70 摄氏度和 150 摄氏度的水中分别回收的能量进行了比较。

表 9.2 不同 VAM 浓度情况下，一个 VAM 立方装置中回收的能量

二次热交换结果	0.3 % VAM 浓度	0.6 % VAM 浓度	0.9 % VAM 浓度
70℃的水	1 MW	8 MW	15 MW
150℃的水	-不可能-	2 MW	10 MW



## 案例研究 7：风排瓦斯 (VAM) – 澳大利亚

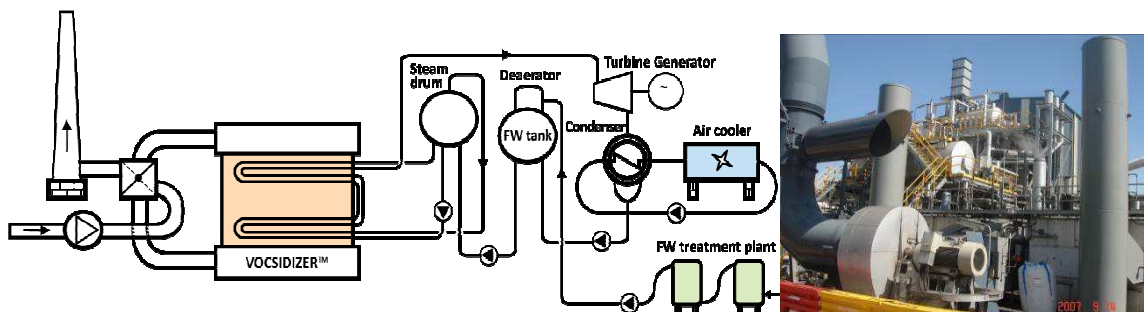
### VAM 减排与利用 VAM 氧化中释放的能量发电

**初始条件：**澳大利亚新南威尔士州的一个主要煤矿出来的 VAM 排放到大气中，其甲烷浓度约为 0.9%。此外，还向 evasée 附近的大气中排放了浓度在 25% 以上的矿井气。

**瓦斯控制问题：**由于排放量大流和极度稀释甲烷浓度的特性，世界各地已经进行过大规模的 VAM 利用或减排。必和必拓公司(BHP Billiton)在 2001 年-2002 年期间在澳大利亚的安平煤矿 (Appin Colliery) 进行了为期 12 个月的小规模 VAM 利用或减排示范。在这个项目中，小型 RTO 已经对 VAM 进行处理并利用释放的能量产生蒸气-显示出长期处理 VAM 浓度自然变化的能力和长期的能源回收率。

**解决方案：**通过与安平煤矿中使用 RTO 的制造商协同工作，该煤矿在蒸气发电设备的蒸气循环中使用了四个 RTO，有效利用 RTO 作为特殊蒸气炉，使其能够在极度稀释的 VAM 燃料上运行。政府给予了矿业公司大量的补助资金用于该项目的实施。

图 9.7 VAM 减排与能源回收发电



(由 MEGTEC 公司和必和必拓公司的 Illawarra 煤炭部门提供)

该 VAM 发电厂用于处理 250,000 Nm<sup>3</sup>/h (每分钟 150000 标准立方英尺或 SCFM) 的通风空气，与 evasée 煤矿中 20% 总量相一致。该发电装置的设计是基于平均 0.9% 的 VAM 浓度。这些 RTO 是用于处理 VAM 浓度的变化，但是如果蒸气轮机以最优速度不断运行，那么在 VAM 浓度处于设计点时，通风气体中处理的能源则要保持相当稳定的状态。因此，当 VAM 浓度低于设计点，即煤矿浓度为 0.9% 时，在运行风机前，要注入 25% 或更高浓度的矿井气。

该 VAM 发电厂于 2007 年全面运营。第一个全财年 (2007 年 07 月到 2008 年 06 月) 报告的可用发电装置为 96%，包括两个计划的维护停机。截至 2009 年，整个厂已经产生了 50 万之多的碳信用额 (在新南威尔士本地交易计划内交易)，其发电量超过 80000MWh。

对于一个成功的 VAM 发电厂，必须满足以下条件：

- VAM 浓度必须在 0.7% 以上。
- 可用通风量最小值为 500,000 Nm<sup>3</sup>/h (300,000 scfm)。
- 必须含有可用于注入通风空气中的矿井气以弥补 VAM 浓度的不足。

- 必须含有可用补给水用于冷却。
- 高电压配网附近的位置用于发电输出。

6.3 节将对利用抽采甲烷的 VAM 富集进行了探讨。必须避免使用低浓度甲烷，防止爆炸风险的出现。

## 附件一 瓦斯抽采方法比较

方法	描述	优点	缺点
使用地面垂直钻孔的预抽法	利用压裂液通过地面钻井对一个或多个煤层进行压裂。通过注入支护材料使煤层保持开裂状态。因此，瓦斯和其他液体能够从煤层溢出，进入钻井时不会受到周围煤层的阻碍。其他完井法也被广泛应用，如在渗透率高的煤矿中形成简单的孔洞。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 开采前抽采瓦斯。</li> <li>• 通常可以获得具有商用价值的高浓度瓦斯。</li> <li>• 不受井下开采活动的影响。</li> <li>• 完成煤层水力压裂时，通常不会对顶板条件产生负面影响。</li> <li>• 开采后可能转换为采空井。</li> <li>• 降低煤矿向大气排放甲烷的机会(温室气体减排)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 成本较高。</li> <li>• 需要地面输送管道配合使用。</li> <li>• 受所有权、开采权和视觉侵扰等问题的影响，地面设施安排比较困难。</li> <li>• 需对偶尔产生的盐水进行处理。</li> <li>• 深部煤层的渗透率可能很低。</li> <li>• 对于深部煤层而言，钻井成本过高。</li> <li>• 煤层必须具有天然裂隙和较高的渗透率。</li> <li>• 与开采规划很难协调。</li> <li>• 完井设计是一项非常专业的工作。</li> </ul>
使用本煤层水平钻孔的预抽法	从井下巷道或竖井底部钻出较长的钻孔，进入今后将要进入的煤炭工作面，并进行较长的时间的瓦斯抽采，以减少进入掘进平巷和以后长壁采煤面的瓦斯流量。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 开采前去除瓦斯。</li> <li>• 生产适宜利用的高纯度瓦斯。</li> <li>• 瓦斯抽采不受采煤活动的影响。</li> <li>• 与从地面垂直钻孔相比，成本较低。</li> <li>• 适用于受到煤层渗透性影响的深矿井。</li> <li>• 能够降低突出事故多发煤层的突出风险。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 必须在开采前进行钻孔。</li> <li>• 煤层必须具备中等或较高的自然渗透性，以便在一段时期内大大降低煤层瓦斯的含量。</li> <li>• 仅仅能降低工作煤层中的瓦斯排放量，而不能降低受到长壁开采干扰的临近层的瓦斯排放。</li> <li>• 在一些具体煤层中，水体排放、钻井稳定性和钻井的定向控制都会成为问题。</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"><li>• 在高瓦斯掘进面允许较高的开发速度。</li><li>• 可去除在边抽边采期间无法拦截的瓦斯。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 需要配备经过良好训练的井下瓦斯钻探团队。</li></ul>
--	--	--	--

方法	描述	优点	缺点
利用穿层定向钻进的方法	<p>钻开一个垂直或倾斜的孔，从此处开始定向钻进进入目标煤层或随后的煤层，长度可达 1000 米或更长。利用各种复杂层内钻进配置，使效能最大化；其中最具成本效益的方法是考虑地层应力方向。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 开采前去除瓦斯。</li> <li>• 产生适宜利用的高纯度瓦斯。</li> <li>• 瓦斯抽采不受采煤活动的影响。</li> <li>• 与垂直压裂井相比，具有更高的瓦斯回收率。</li> <li>• 工作面上部煤层的钻孔有可能在边抽边采中再次被利用。</li> <li>• 钻进位置比较灵活，不受地面条件的限制。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高成本。</li> <li>• 并不是所有煤层都可钻进。</li> <li>• 要求除水措施必须保持有效。</li> <li>• 需要煤层渗透性适中。</li> <li>• 发生问题的钻孔不容易矫正。</li> <li>• 需要专业的钻进设备和技术。</li> </ul>
利用掘进巷道顶板浅层钻孔的方法	<p>在掘进巷道的顶板层钻入垂直浅孔，来控制矿井瓦斯从砂岩顶板岩层上离散的裂缝中排出。瓦斯可能来自于煤层的上部并与压裂层接触，也可能在砂岩中自然发生。有时在工作面前方的顶板中进行低角度的钻孔，以便在开采前释放甲烷，从而降低掘进设备摩擦起火的风险。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 从降低摩擦起火风险和控制沼气排放方面来说，这个方法成本较低。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 瓦斯流量较低。</li> <li>• 如果有必要，可以与甲烷排放系统连接。</li> </ul>

方法	描述	优点	缺点
利用穿层测压钻孔的边抽边采	<p>从长壁工作面的回风巷道开始在采空区上方或下方以某个角度进行钻孔，并将该钻孔与瓦斯抽采系统相连。</p> <p>在一些后退式长壁矿井中，在工作面后方钻孔获得的抽采效果要比那些在回采工作面前预埋孔的好。然而，有时很难维持后退式工作面后方的通道。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在掘进的长壁工作面可能会获得较高的捕集率。</li> <li>可应用于较深煤层工作面。</li> <li>到达主要瓦斯源的钻进距离较短。</li> <li>在煤矿现场，瓦斯可以被抽采并用管道输送到一个普通的固定的表面位置，以便进行商业化开发或利用。</li> <li>可有效用于渗透率较低的煤层。</li> <li>底板钻孔能够降低易受影响的工作巷道中瓦斯突出的风险。</li> <li>钻进方式比较灵活且容易改变。</li> <li>瓦斯抽采方法成本最低。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在后退式工作面无法获得持续的高效甲烷捕集。</li> <li>为使效果最大化，需要在后退式长壁工作面后方进行钻孔。</li> <li>钻孔的使用寿命通常较短。</li> <li>由于通风空气通过开采活动导致的地层破裂进入瓦斯抽采系统，所以只能获得中低纯度的甲烷。</li> <li>需要受过培训的井下钻井队。</li> <li>地面和回风巷道安全释放地点需要建设井下管道基础设施。</li> </ul>
利用地面采空区钻孔的边抽边采	<p>开凿一个通风孔，并与位于工作煤层不远的地方位置连接套管。</p> <p>在底部套管，通常钻孔的生产长度内有沟槽。</p> <p>有时要钻一个钻孔并在煤层上方30米处进行套管连接，然后钻一些较小直径的无套管钻孔，在煤炭开采面之前或之后通过工作层水平面。如何安全可靠的选择钻孔地</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>瓦斯抽采不受井下正常工作的影响。</li> <li>能够从长壁采空区排出大量的矿井瓦斯。</li> <li>该方法已经过可靠验证，并具有成本效益，适用于较浅或中等深度的煤层。</li> <li>经常可以获得一定高纯度的瓦斯。使用寿命</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对于较深煤层而言，成本较高。</li> <li>在有大量积水的工作煤层，有涌水的风险。</li> <li>在工作面底板，没有可直接瓦斯抽采的煤层。</li> <li>为防止瓦斯泄露到地面，在采煤工作面已经经过钻孔并相距一定距离之前，不</li> </ul>

	<p>点涉及到钻入工作煤层的界面，并在底部 30 米进行水泥灌浆。通常钻孔位于长壁工作面回风一侧。</p>	<p>可以持续几个月。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 可对开采规划中的变化做出回应。</li> </ul>	<p>能对采空区进行钻孔。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 搜集可以利用的瓦斯需要昂贵的地面管道基础设施。</li> <li>• 只在没有地面进入限制的地方可行。</li> <li>• 可能会流出比排入井下工作区更多的瓦斯。</li> </ul>
--	---	---	--

方法	描述	优点	缺点
利用工作层的上方或下方定向水平深孔的边抽边采	在工作层上方或下方20-30米处的相应水平面 通过利用定向钻孔技术打出一系列的钻孔 长度覆盖整个长壁工作面的长度。 如果在适当的水平面找不到适当的钻孔点, 则钻孔将从开采平面转到需要的水平面。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 也许可用于采前预抽采法中。</li> <li>• 与开采煤层的穿层钻孔相比, 可获得更高的捕集效率。</li> <li>• 瓦斯抽采活动与煤炭生产活动相独立。</li> <li>• 可获得高纯度的瓦斯。</li> <li>• 从工作面采线附近的瓦斯释放点捕集瓦斯。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 定向钻进成本相对较高。</li> <li>• 遇到膨胀岩或软煤时问题较大。</li> <li>• 维修坍塌或损坏的钻孔较为困难。</li> <li>• 对于开采运行变化的回应缺乏灵活性。</li> <li>• 为确保在煤炭开始生产之前完成合格的系统, 钻进时需要具有较高的准确性和速度。</li> <li>• 需要专业的井下钻进技术和设备。</li> </ul>
从平巷上面或下面进行边抽边采	在开采前 在工作煤层上方和下方开凿一条巷道。 然后该巷道在中途停止并利用管道通过风墙与瓦斯抽采系统相连。 在封闭之前, 抽采巷道的影响区域可能会受到钻孔钻进风机的影响而被扩大。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可以通过来自平巷的穿层钻进加以补充。</li> <li>• 与从开采煤层的穿层钻进相比, 可获得更高的捕集效率。</li> <li>• 瓦斯抽采活动要与煤炭生产活动相分离。</li> <li>• 为了降低成本, 有时可利用现有巷道, 或上方或下方的旧工作区以及煤炭生产区域。</li> <li>• 通常可获得一定纯度的瓦斯。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 从工作煤层到平巷的通道开凿成本较高。</li> <li>• 由于通风泄露, 易自燃煤层有火灾风险。</li> <li>• 除非在适当厚度的煤层进行, 否则成本较高。</li> <li>• 对于开采运行变化的回应缺乏一定灵活性。</li> <li>• 在抽采平巷和长壁工作面之间如果有较坚硬的地层, 效率会比较低。</li> </ul>



<p><b>利用从地面向层内定向钻进</b>的边抽边采</p>	<p>一种相对较新的定向钻孔技术应用方法，从地面钻孔进入工作层上方，实现与井下边抽边采定向钻进类似的配置。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 无需进入井下通道。</li> <li>• 有可能通过重复利用用于预抽采的地面到层内钻孔实现。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高成本。</li> <li>• 在开采期间，可能会损坏一些可重复使用的预抽采钻孔。</li> <li>• 不能替代工作面附近用于实现有效瓦斯控制的井下穿层钻孔。</li> </ul>
---------------------------------	---	--	--

方法	描述	优点	缺点
从长壁采空区的井室和管道中进行的边抽边采	井室建于工作面后的采空区，并通过风墙连接至瓦斯抽采系统。或者，当工作面后退时，展开工作面起始线附近带有开口端的瓦斯排放管。	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低后退式长壁工作面的返回端的甲烷浓度。</li> <li>进入该区域的瓦斯量降低。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>容易导致可燃气体混合物的捕集和运输，而造成不可接受的灾害。</li> <li>由于捕集到的瓦斯纯度较低，需要高容量瓦斯排放系统。</li> <li>捕集效率低。</li> <li>捕集的瓦斯量小。</li> </ul>
从横切面进入长壁采空区的边抽边采法（上述方法的变异形式）	从沿着工作区的平行通道开凿横切面并与采空区相交。瓦斯抽采系统通过横切面的一个风墙与一个管道相连。	<ul style="list-style-type: none"> <li>在一些情况下，能够降低穿层瓦斯排放钻进的需求。</li> <li>瓦斯抽采活动不受采煤活动的影响。</li> <li>降低在长壁工作面返回端的甲烷浓度。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>容易导致可燃气体混合物的捕集和运输，而造成不可接受的灾害。</li> <li>由于捕集到的瓦斯纯度较低，需要高容量的瓦斯排放系统。</li> <li>通常捕集效率较低。</li> <li>只有当横切面至采空区之间可以建造一个适当巷道的情况下才可行。</li> <li>需要额外的横切面成本。</li> </ul>

## 参考文献

- 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.
- CDM Executive Board. (2006). *Tool to determine project emissions from flaring gases containing methane*. Meeting 28. Bonn, Germany: Clean Development Mechanism (CDM) Executive Board.
- Coward, H.F. (1928). *Explosibility of atmospheres behind stoppings*. *Trans Inst Min Engs*, 77, pp. 94 – 115.
- 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.
- 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.
- 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.
- Creedy, D.P., Saghafi, A., & Lama, R. (1997, April). *Gas Control in Underground Coal Mines: IEA Coal Research*. International Energy Agency (IEA) CR/91, pp. 120. London: The Clean Coal Centre.
- 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*.
- 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.
- 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.
- ESMAP. (2007, July). *A Strategy for Coal Bed Methane (CBM) and Coal Mine Methane (CMM) Development and Utilization in China: Formal Report 326/07*, pp. 109. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development (IBRD)/WORLD BANK Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
- Gaskell, P. (1989). *A Study of Sub-Surface Strata Movement Associated with Longwall Mining*. PhD. Thesis. University of Nottingham.
- IEA. (2009). *World Energy Outlook*. Paris, France: International Energy Agency (IEA).
- ILO. (2006). *Code of Practice on Safety & Health in Underground Coal Mines*. International Labour Office (ILO).

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).

Janas, H. F. & Opahle, M. (1986). Improvement of Gas Content Determination. *Glückauf-Forschh* 47, pp. 83 – 89. Essen, Germany.

Kissell, F. N. (2006). *Handbook for Methane Control in Mining*. Pittsburgh, PA (U.S.): Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health.

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.

Landman, G v R. (1992). *Ignition and initiation of coal mine explosions*. PhD. Thesis, University of the Witwatersrand, pp. 252.

Methane to Markets Partnership. (2008). *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*. Washington, D.C.: Methane to Markets Administrative Support Group.

Methane to Market Partnership. (2009, September). International Coal Mine Methane Projects Database. [www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org).

MSHA (2009). *Injury experience in coal mining*, MSHA IR1341. Washington, D.C.: U.S. Department of Labor, Mine Safety & Health Administration (MSHA).

Moreby, R. (2009). Private communications.

SAWS (2009). China State Administration of Worker Safety.

Shi Su, et al. (2006, January). *Development of Two Case Studies on Mine Methane Capture and Utilization in China*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).

University of Alberta. (2004). *Flare Research Project: Final Report 1996-2004*. Kostiuk, L., Johnson, M., and Thomas, G. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta.

US EPA. (2006a). *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: 1990-2020*. EPA-430-R-06-003. Washington, D.C. (U.S.): U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2006b). *Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases*. EPA-430-R-06-005. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

von Schoenfeldt, H. (2008, January). "Advanced CMM and CBM Extraction Technologies." CBM Conference. Singapore.

## 补充材料

- 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.
- Brandt, J. & Kunz, E. (2008). *Gas Drainage in High Efficiency Workings in German Coal Mines*. Presentation at the 21<sup>st</sup> World Mining Congress, session “Methane Treatment,” pp. 41 – 50. Krakau.
- 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.
- 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).
- Hinderfeld, G. (1985). State and Perspectives of Gas Drainage. *Bergbau 2*, pp. 7. Essen, Germany.
- 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.
- Lama, R.D. & Bodziony, J. (1998). Management of outburst in underground coal mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 83 – 115, Amsterdam: Elsevier.
- Lunazewski, L .W. (1998). Gas Emission Prediction and Recovery in Underground Coal Mines. *Int. Journ. of Coal Geology 35*, pp. 117 – 145, Amsterdam: Elsevier.
- Mine ventilation handbook, Mine Ventilation Society of South Africa.
- Moore, S., Freund, P., Riemer, P., & Smith, A. (1998, June). *Abatement of Methane Emissions*. Paris, France: International Energy Agency (IEA) Greenhouse Gas R&D Programme.
- Mutmansky, J. M. & Thakur, P.C. (1999). *Guidebook on Coalbed Methane Drainage for Underground Coal Mines*, pp. 46.
- Noack, K. (1998). Control of gas emissions in underground coal mines. *Int. Journ. Of Coal Geology 35*, pp. 57 – 82. Amsterdam: Elsevier.
- Schlotte, W. & Brandt, J. (2003). *50 Years of Coal Research – Gas Emissions, Ventilation and Climate. Glückauf 139*, pp. 402 – 408. Essen, Germany.
- Sdunowski, R. & Brandt, J. (2007). Optimizing the Gas Drainage in High Performance Longwalls. *Glückauf 143*, pp. 528 – 534. Essen, Germany.
- Skiba, J. (2009, November). Central Mining Institute of Katowice. Personal communication.
- 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.

Thakur, P.C. (1997). Methane Drainage from Gassy Mines – A Global Review. *Proc. Of the 6<sup>th</sup> Int. Mine Vent. Congr.* pp. 415 – 422. Pittsburgh, PA (U.S.).

US EPA. (2003, July). *Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane.* EPA-430-R-03-002. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. [www.epa.gov/cmop/resources/index.html](http://www.epa.gov/cmop/resources/index.html)

US EPA. (2009, July). *Coal Mine Methane Finance Guide.* EPA-400-D-09-001. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2009, July). *Coal Mine Methane Recovery: A Primer.* EPA-430-R-09-013. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (2008, January). *Upgrading Drained Coal Mine Methane to Pipeline Quality: A Report on the Commercial Status of System Suppliers.* EPA-430-R-08-004. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.