

联合国欧洲经济委员会

有效回收利用
废弃煤矿瓦斯最佳
实践指南

欧洲经济委员会能源丛书第 64 辑



联合国

2020年，日内瓦

联合国版权 © 2019

世界各地，版权所有

有关复制或复印节选的请求，请发送至copyright.com上的版权审批中心。

关于权利和许可包括附属权利的其他所有问题，请发送至：

United Nations Publications, 405 East 42nd St, S-09FW001, New York, NY 10017, United States of America。邮件：permissions@un.org；网站：<https://shop.un.org>。

本文中的调查结果、解释和结论纯属作者的观点，不一定反映联合国或其官员或会员国的观点。

本文所用名称和地图上显示的资料的编列方式并不意味着联合国对任何国家、领土、城市、地区或其当局的法律地位或对其边界或疆界的划分表示任何意见。

本出版物以英文、俄文、西班牙文和中文发行。

联合国出版物，由联合国欧洲经济委员会发行。

图片来源：封面，INFINIS, Blisthorpe Site

第10页，图2.4, D. Creedy, K. Garner, Coal Mine Methane Extraction and Utilisation from Abandoned Coal Mines Workshop, UK-China Cleaner Coal Technology Transfer, UK Department of Trade and Industry, 21 May 2002, Beijing

第47页，图9.2, Mingas-Power GmbH

第50页，图9.4, N. Butler, HEL-Ease Ltd

第51页，图9.5, N. Butler, HEL-Ease Ltd

第52页，图9.6, N. Butler, HEL-Ease Ltd

第58页，图9.9, M. Coté, Coal Mine Methane in Colorado Market Research Report 2016

ECE/ENERGY/128

ISSN: 2078-5879

eISBN: 978-92-1-004494-3

前言

煤炭仍然是许多国家能源构成的核心。随着采煤活动的推进以及煤矿的关闭和废弃，煤炭储量不可避免地将会枯竭。废弃的煤矿在关闭多年后仍在排放瓦斯，但在许多产煤区，瓦斯排放仍然没有得到控制，排放数据未进行统计。

瓦斯是一种强大的温室气体，最近的研究表明，大气中瓦斯的影响比预想的要广泛得多。煤矿是第四大人为瓦斯排放源，仅次于油气部门、垃圾填埋场和畜牧业。技术的进步使得大幅减少高瓦斯矿井的瓦斯排放成为可能。关闭的煤矿可以提供一个不大但却重要的机会，来开发一种被称为废弃煤矿瓦斯的清洁能源，这种能源可以被开采利用。捕集和利用废弃煤矿瓦斯好处多多，例如，可以提高安全生产水平、减少温室气体排放、优化能源供应、增强环境效益。而从废弃煤矿中回收瓦斯的技术已经比较成熟。

本书旨在为企业、政府和财务高级决策者(所有这些决策者在决定实施最佳实践方面都发挥着不可或缺的作用)提供简单明了的高层指导，从而提高人们对废弃煤矿瓦斯所带来的机会和危险的认识。关于煤矿瓦斯的捕集和利用的建议原则和标准已在《煤矿瓦斯有效抽采与利用最佳实践指南》中列出。本书是对这一指南的补充，主要是考虑停止开采和关闭矿井后继续排放瓦斯的问题，目的是延长煤矿开采生命周期。

《有效回收利用废弃矿井瓦斯最佳实践指南》不会替代或取代法律法规或其他具有法律约束力的文书，无论是国家规定还是国际条约。明确的法律框架和扶持政策有助于将瓦斯推向市场。本书的原则旨在提供指导，以补充现有的法律和监管框架，并支持煤炭后开采项目的开拓，以通过优化回收和利用本来会排放到大气中的瓦斯，减少煤炭开采周期内的总排放量。为了更好地了解这类排放的增长潜力，请欧洲经济委员会成员国和全球瓦斯行动倡议成员考虑如何通过将废弃地下煤矿的瓦斯排放纳入国家清单，提高他们对这一排放源的规模和增长率的了解。

在煤矿瓦斯专家委员会的指导下，波兰和中国等国建立了国际卓越煤矿瓦斯治理中心，以推广煤矿瓦斯抽采和利用方面的最佳实践。这些中心还要在本国推广废弃煤矿瓦斯捕集和利用方便的最佳实践。在其他国家，我们希望本指南对负责管理矿山关闭和废弃煤矿瓦斯的类似机构或组织在研究利用废弃煤矿瓦斯资源的选项时能有所帮助和借鉴。

联合国欧洲经济委员会
执行秘书
奥尔加·阿尔加耶罗娃



致谢

主办单位

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，是来自北美、西欧、中欧、东欧及中亚的56个国家共同打造经济合作手段的论坛。欧洲经委会的主要活动领域为：经济合作与一体化、环境政策、森林、住房与土地、人口、统计、可持续能源、贸易和运输等。欧洲经委会通过政策分析、制定公约、法规和标准及提供技术援助来实现其目标。成员国在可持续能源委员会讨论与能源相关的议题，如煤矿开采和煤矿瓦斯。煤矿瓦斯专家委员会作为可持续能源委员会的一个附属机构定期召开会议，讨论问题并推广在管理、捕集和利用煤矿开采生命周期中释放的瓦斯气体方面的最佳做法(www.unece.org/energy/se/cmm.html)。

全球瓦斯行动倡议是一项国际公私合作伙伴关系组织，它与世界各地的政府机构合作，在以下五个关键的瓦斯生产部门促进项目开发：农业运营、煤矿、城市固体废物、石油和天然气系统以及废水处理。全球瓦斯行动于2004年启动，与包括《联合国气候变化框架公约》在内的其他国际协议组织协同工作，以减少温室气体排放。瓦斯不同于其他温室气体，它是天然气的主要成分，可以转化为可用能源。因此，减少瓦斯排放就是减少温室气体排放、提高能源安全、促进经济增长、改善空气质量和提高工人安全的一种低成本高效益的方法。全球瓦斯行动倡议由44个伙伴国家和欧洲经济委员会组成，其所在区域的瓦斯排放量约占世界人为瓦斯排放量的70%。关于煤矿瓦斯，全球瓦斯行动倡议的煤炭小组委员会聚集了煤矿瓦斯回收和利用方面的主要专家，通过一系列研讨会、培训班、考察交流和能力建设活动，分享最新技术和实践经验(www.globalmethane.org)。

编排结构

美国国家环境保护局通过全球瓦斯行动为本指南的起草工作提供了财政、技术和行政支持。

本指南的主要作者是辛迪克可持续资源公司的戴维·科瑞迪先生，瑞文瑞格可持续资源公司的雷蒙德·皮尔彻先生和HEL-East Ltd的尼尔·巴特勒为共同撰稿人。

知识、经验和案例分析由以下人员供稿：

- 克莱门斯·巴克豪斯，A-技术装备有限公司
- 迈克尔·孔蒂，红宝石峡谷工程
- 雅努什·尤雷茨卡和杰吉·哈德罗，波兰地质学会，案例分析由波兰国际卓越煤矿瓦斯治理中心供稿
- 詹姆斯·马歇尔，瑞文瑞格可持续资源公司

在欧洲经委会煤矿瓦斯专家组的指导下，以下人员在本文件创作过程中提供了技术指导 and 编辑审查：

- 迈克·德拉比克先生，联合国欧洲经济委员会
- 雷蒙德·皮尔彻先生，瑞文瑞格可持续资源公司
- 沃尔·哈罗沙卡女士，美国国家环境保护局/全球瓦斯行动倡议
- 克拉克·托金顿先生，先进资源公司

主办单位还要感谢梅瑞迪·埃文斯和太平洋西北国家实验室的纳扎尔·霍洛德所做的编辑工作。

本指南还借鉴了英国沃德尔阿姆斯特朗与未来能源解决方案和中国应急管理部信息研究院(煤炭信息研究院)2002年5月1日至2003年4月30日为在中国建立一个废弃煤矿瓦斯项目咨询中心所开展的工作。这项工作由联合王国外交和联邦事务部通过其应对气候变化挑战基金提供经费支持。

目录

前 言.....	III
致 谢.....	IV
缩略语.....	X
术语汇编.....	XI
内容提要.....	XIII
1. 导言	1
关键信息	1
1.1 目标.....	1
1.2 废弃煤矿瓦斯概述.....	1
1.3 废弃煤矿瓦斯瓦斯的抽采.....	2
1.4 部分国家的废弃煤矿瓦斯排放和开采情况.....	3
2. 废弃煤矿瓦斯排放源	7
关键信息	7
2.1 废弃煤矿瓦斯的运移.....	7
2.2 废弃矿井中的瓦斯成分.....	11
3. 量化废弃煤矿瓦斯资源和预测瓦斯流量	15
关键信息	15
3.1 废弃煤矿瓦斯资源.....	15
3.2 废弃煤矿瓦斯储量.....	16
3.3 预测废弃煤矿瓦斯流量.....	17
4. 评估抽采和利用废弃煤矿瓦斯的可行性	19
关键信息	19
4.1 评估影响废弃煤矿瓦斯项目可行性的因素.....	19
4.2 瓦斯生产战略.....	20
4.3 废弃煤矿瓦斯的用途.....	21
5. 优化废弃煤矿瓦斯生产	25
关键信息	25
5.1 控制进气.....	25
5.2 控制地表水和地下水.....	26

6.	废弃煤矿瓦斯项目开发	29
	关键信息	29
	6.1 案头研究综述	29
	6.2 储层检测	30
	6.3 预可行性研究	31
	6.4 全面可行性研究	31
	6.5 为废弃煤矿瓦斯项目融资	32
	6.6 废弃煤矿瓦斯项目设计和运营	33
	6.6.1 关键设计和运行参数	33
	6.6.2 具体设计标准	33
	6.6.3 防雷设计	34
	6.6.4 阻火器	35
	6.6.5 瓦斯分析及其对安全、监控和测量的影响	35
	6.6.6 抽采装置设计	35
	6.6.7 瓦斯销毁或利用装置	36
	6.6.8 利用装置的商业风险与资源评估	36
	6.6.9 运行和维护	36
	6.6.10 远程监控	36
7.	便利和促进废弃煤矿瓦斯抽采和利用的政策和监管机制	39
	7.1 矿山管理在准备关闭矿山时的作用	39
	7.2 瓦斯所有权	39
	7.3 对逸散瓦斯的负责	40
	7.4 基础设施接入	41
	7.5 经济和财政激励措施	41
	7.6 碳融资	41
8.	总结和结论	43
9.	案例分析	45
	案例分析 1: 德国 — 北莱茵—威斯特法伦州鲁尔煤田	45
	案例分析 2: 波兰—上西里西亚盆地	48
	Morcinek – Kaczyce 煤矿	48
	Żory 煤矿	48
	案例分析 3: 英国 — 英国的废弃煤矿瓦斯利用情况	49
	Selby Group Stillingfleet 煤矿	50
	Harworth 煤矿	51
	案例分析 4: 美国 — 科罗拉多州 North Fork 河谷	54
	案例分析 5: 美国 — Elk Creek 许可区废弃煤矿瓦斯项目	57

附录	61
附录 1: 废弃煤矿瓦斯储层特点检测制度	61
附录 2: 废弃煤矿瓦斯预可行性研究的要素	62
附录 3: 矿井关闭时对矿井入口的工程处理手段	64
附录 4: 废弃煤矿瓦斯项目建设和运营所需设备和服务	65
参考文献	67

表目录

表 1.1	最大的废弃煤矿瓦斯生产国	5
表 2.1	美国伊利诺伊州含煤盆地废弃矿井的瓦斯成分样本	12
表 4.1	选定的废弃煤矿瓦斯最终用途的一般特征	22
表 7.1	瓦斯所有权	40
表 9.1	鲁尔河谷的部分废弃煤矿瓦斯项目	46
表 9.2	North Fork 河谷的地下煤矿	55

图目录

图 1.1	Avion煤矿、Divion煤矿和Desiree煤矿的瓦斯年产量和累计产量	5
图 2.1	在停止采矿后形成的瓦斯潜在运移途径	8
图 2.2	关闭但不完全封闭的矿井的瓦斯和压力监测	9
图 2.3	瓦斯压力随时间变化的曲线图，在 (a) 中递减，表明矿井空隙没有充水，在 (b) 中递增，表明矿井空隙正在充水	10
图 2.4	英国废弃矿井上的排气口	10
图 3.1	废弃煤矿瓦斯储层概念模型	16
图 3.2	废弃煤矿瓦斯涌出量递减曲线	17
图 3.3	显示干矿井与浸水矿井的潜在涌出量递减率差异的曲线图	18
图 4.1	全球废弃煤矿瓦斯项目	22
图 9.1	鲁尔产煤区的位置	45
图 9.2	Lohberg 发电站	47
图 9.3	Lohberg 发电站发电量和瓦斯浓度分布图	47
图 9.4	Stillingfleet 煤矿的通风设备	50
图 9.5	Stillingfleet 煤矿瓦斯抽采装置	51
图 9.6	Harworth 煤矿燃气发动机	52
图 9.7	Harworth 煤矿排放预测	52
图 9.8	North Fork河谷作业煤矿和废弃煤矿分布图	56
图 9.9	Elk Creek 废弃煤矿瓦斯发电项目	58

缩略语

ACM	经批准的整合方法学(《气候公约》)
AMM	废弃煤矿瓦斯
CARB	加利福尼亚清洁空气资源委员会
CDM	清洁发展机制
CERs	核证减排量
CH₄	瓦斯
CHP	热电联产
CMM	煤矿瓦斯
CNG	压缩天然气
CO₂	二氧化碳
CO₂e	二氧化碳当量
EPA	美国国家环境保护局
ETS	碳排放权交易体系(欧盟)
GHG	温室气体
GIS	地理信息系统
GMI	全球瓦斯行动
GWP	全球变暖潜势
kWh	千瓦时
m	米
m³/d	立方米/天
m³/m	立方米/分
m³/t	立方米瓦斯/吨煤
Mt	百万吨
Mtpa	百万吨/年
MWe	兆瓦
MWh	兆瓦时
NRDC	国家发展和改革委员会(中华人民共和国)
scfm	标准立方英尺/分钟
SOCM	国有煤矿
t	吨(公吨) — 相当于1.102 短吨(美国)
t/d	吨/天
TCVM	乡镇煤矿
UNECE	联合国欧洲经济委员会
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
VERs	自愿减排量

术语汇编

在煤炭和矿井瓦斯行业内，不同辖区内和不同辖区之间所使用的术语和缩略语仍然相当混乱。除了本文列出的术语之外，欧洲经委会还编制了一份《煤矿瓦斯术语和定义汇编》，重点介绍了不同地区使用术语的情况。

术语汇编见以下网址：http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm4/ECE.ENERGY.GE.4.2008.3_e.pdf。

废弃煤矿瓦斯 — 弃煤矿中残留的瓦斯，在某些情况下是由微生物新产生的瓦斯，这种瓦斯位于被采矿作业裂隙带、煤层和其他含气地层中。

废弃煤矿瓦斯资源 — 残留在采矿作业卸压后的裂隙带、煤层和其他含气地层中的废弃煤矿瓦斯总量，加上任何最近生成的生物瓦斯。

废弃煤矿瓦斯储量 — 在允许施加的最大抽采压力(密闭矿井为50千帕至70千帕)下可开采的资源量(须考虑到地下水回升)。

内容提要

在可预见的未来，随着各国继续以更快的速度开采和耗尽煤炭资源，关闭煤矿以及由此产生的废弃煤矿瓦斯排放将一直是一个重要的现实问题。许多发达国家的情况便是如此，这些国家的煤炭产量不断下降，煤矿不断关闭。不过，一些发达经济体和发展中经济体的情况也是如此，在这些国家，煤炭生产仍将在能源供给中发挥重要作用，关闭的煤矿不断被新矿所取代。因此，已经关闭和即将关闭的煤矿的排放总量可能是巨大的，而且会越来越大。对全球煤矿瓦斯排放的预测表明，2010年，废弃煤矿瓦斯占煤矿瓦斯排放总量的17%，到2050年，这一比例可能会增加到24% (Kholod et al, 2018)。

有商业价值的煤炭储量耗尽后便停止采煤，但这并不能停止瓦斯排放，必须对不受控制的地表排放风险、温室气体排放问题和利用机会所造成的现有废弃煤矿瓦斯的规模和潜在排放率进行评估。评估排放的新方法(使用遥感、测量大气中的瓦斯浓度、精确定位来源以及基于煤炭历史产量的估计)可能有助于各国更全面地识别和清查瓦斯资源。要更准确地估计累计排放量，便应着重关注这一潜在的重要排放来源，这也可能推动构建扶持性的政策框架，从而激励投资。

在人口稠密的成熟矿区，地表瓦斯排放风险尤其令人担忧。在许多情况下，可以通过被动通风来减轻风险。在有大量废弃煤矿瓦斯的地方，可能会有机会主动抽采瓦斯，并将其作为一种清洁能源加以利用。主动抽采瓦斯还将有助于将地表排放风险降至最低。

一旦停止采矿，用来防止作业矿井被浸没的地下水抽排作业通常会停止，从而导致工作面被浸没。这还可能导致可利用的废弃煤矿瓦斯资源逐渐减少，并可能降低从产气点到气藏的连通性。浸水速度可能因水文地质、工作面的范围和深度不同而有所不同。在少数情况下，为保护更深的工作面免受浸没，可能还会继续抽排地下水。

因此，在关闭矿山时，应检查潜在的环境影响，并设计和实施适当的工程措施，以将对环境的风险降至最低。这些措施加上关闭后的监控设施，可以有效管理矿山关闭后的排放和风险。

可以在评估安全风险和环境风险之时，评估抽采和开发废弃煤矿瓦斯的潜力以及采取适当控制措施的必要性。仅凭废弃煤矿中有瓦斯存在并不足以构成拟定废弃煤矿瓦斯抽采和利用计划的理由，作为第一步，需要进行预可行性研究。

已有用于估算废弃煤矿瓦斯资源和储量的方法可用，使用的方法应以正确的物理原理为基础，使用可追踪的数据源，识别不确定性和潜在风险，并陈述所有假设。

估算的不确定性不可避免，因为很难获得关于废弃工作面渗水的准确数据，而且随着抽吸压力的增加，进气可能会带来问题。考虑到这种不确定性，应对储量进行打折，并对折扣系数作出有理有据的解释。

并不是所有的废弃煤矿都适合废弃煤矿瓦斯项目。必须存在有利的采矿和地质条件，但最关键的条件是要有合适的最终用户产生对瓦斯的需求。如果没有废弃煤矿瓦斯能源市场，就不可能有一个可行和可持续的项目。不过，在一些国家，作为碳抵消项目，也可以采取火炬焚烧的办法来摧毁瓦斯。经验表明，在项目的预可行性研究和可行性研究阶段所做的努力可以大大减少操作中的问题和未来的成本。

1. 引言

关键信息

- 在煤炭产量下降的国家和煤炭产量稳定或增长的国家，关闭煤矿是自然资源开发周期的一部分。
- 废弃煤矿瓦斯排放是煤矿开采周期不可避免的副产品，可能会持续数十年。
- 如果管理和控制不当，废弃煤矿瓦斯的逸散排放可能会造成地表危害。
- 在某些情况下，经以前的长壁工作面卸压但尚未开采的煤层中残留的废弃煤矿瓦斯是一种可开采的重要清洁能源。
- 瓦斯是一种强大的温室气体，在100年的时间框架内，其全球变暖潜势是二氧化碳的28至34倍，但由于其大气寿命仅为12年，因而其10年内的全球变暖潜势还要高得多，为二氧化碳的84倍。
- 回收和利用废弃煤矿瓦斯还可以带来重要的社会效益，包括实现技术开发和创造就业机会。
- 废弃煤矿瓦斯的可释放量取决于各种因素，包括开采层中未开采的煤量、原地煤的残余瓦斯含量以及工作面的涌水率。
- 即使地质条件和技术条件有利，但缺乏有力的监管框架也可能使项目失去吸引力，甚至完全不可行。

1.1 目标

本指南旨在帮助矿山经营者、瓦斯资源开发商、政府监管机构、石油和天然气许可证颁发当局、再开发机构和政策制定者考虑瓦斯资源，查明煤矿关闭和废弃后继续释放瓦斯的潜在危害，并提高人们对此问题的认识。

抽采和利用废弃煤矿瓦斯的重要连带效益是，显著降低地表排放失控的风险，开发一种原本会被浪费的清洁资源，并减少温室气体的排放。

废弃煤矿瓦斯抽采和利用项目还有助于实现负担得起的清洁能源、气候行动等联合国可持续发展目标。

1.2 废弃煤矿瓦斯概述

废弃煤矿瓦斯是指煤矿关闭后，由于大量地层和煤炭受到扰动，在受采矿活动特别是长壁开采扰动的含气岩层中的残余瓦斯。在某些情况下，近期的微生物活动也可

以产生额外的瓦斯。由于煤矿周围的地层破裂以及覆盖在基岩上的地表沉积物的性质，废弃井巷往往封堵困难，容易发生渗漏。因此，可能会出现逸散排放，造成公共危害和温室气体排放，并有可能损失能源。例如，瓦斯运移到封闭结构后存在爆炸危险，释放到大气中的瓦斯具有很高的全球变暖潜势，在100年里是二氧化碳的28至34倍 (IPCC, 2014)，对气候变化影响很大。¹ 然而，由于瓦斯的大气寿命较短，只有12年，因此，如果将时间框架缩至10年，瓦斯的全球变暖潜势便增加到二氧化碳的84倍，这放大了瓦斯回收和利用对减缓气候变化的好处。除了瓦斯排放造成危害和气候变化加剧之外，煤矿关闭后还可能出现地表不稳定和矿井水污染的问题。

气候变化的紧迫性、其它环境目标以及来自可再生能源和天然气的应用正在减少人们对煤炭能源的依赖。许多主要的工业发达国家的煤炭产量严重下降，已在关闭煤矿。然而，即使在煤炭工业活跃的发达国家和发展中国家，关闭煤矿也是自然资源开发周期的一部分。虽然大规模的煤矿关闭计划可能会减少煤炭供应，但瓦斯的排放潜力可能会持续数十年(头十年的排放量最高，商业价值最大)。在可预见的未来，关闭煤矿以及由此产生的废弃煤矿瓦斯排放仍将是一个重要的现实问题。因此，已经关闭和即将关闭的煤矿的排放总量可能是巨大的，而且数量还会增长。对全球煤矿瓦斯排放的预测表明，2010年废弃煤矿瓦斯占煤矿瓦斯排放总量的17%，到2050年这一比例可能会增加到24% (Kholod et al, 2018)。

各国已经做出了相当大的努力，鼓励在产煤矿捕集和利用瓦斯，但对减少排放和开采废弃煤矿瓦斯的重视程度较低。除了减缓气候变化之外，回收和利用废弃煤矿瓦斯还可以带来重要的社会效益。煤矿大面积关闭往往会引发严重的地区性经济社会问题。大多数发达国家都颁布了关闭煤矿和关闭后的责任标准，² 但在许多发展中经济体，往往很少有或根本没有确定责任方，缺乏关闭后责任管理的财务和监管规定。废弃煤矿瓦斯的回收和利用可以创造新的就业机会，尽管贡献的就业机会有限，但仍然值得欢迎。在废弃煤矿瓦斯资源丰富的地方，可能有机会开发工业园，因为这种潜在的低成本清洁能源可以为企业带来丰厚的利益。

地质、技术和市场因素直接影响废弃煤矿瓦斯项目的成功与否，此外，在考虑开发废弃煤矿瓦斯资源时，监管环境可能是一个关键因素。即使地质条件和技术条件有利，但缺乏有利的监管框架也可能使项目失去吸引力，甚至完全不可行。需要考虑的监管因素有：矿山安全法规、许可流程、所有权、进入便利、环境法规、税收、关闭后的责任问题和财务法规。政策制定者可以发挥重要作用，确保这些因素不会妨碍废弃煤矿瓦斯资源的商业利用。

1.3 废弃煤矿瓦斯瓦斯的抽采

利用现有技术和管理手段可以从废弃矿井中抽采瓦斯，从而为环境、经济、社会和公共安全带来重大利益。

¹ 28倍的全球变暖潜势未计入气候-碳循环反馈，是更常用的瓦斯全球变暖潜势数值。34倍的全球变暖潜势含气候-碳循环反馈，后者测量气候变化引起的碳储量变化的间接影响(见IPCC, 2014)。

² 美国矿山安全和健康局，《联邦法规汇编》第30集75.1204、新南威尔士州《2014年工作健康和安(矿山和石油场所)条例》及昆士兰州《2017年煤矿安全和健康条例》。

从废弃矿井抽采瓦斯的方法不同于从工作矿井捕集和采收瓦斯的方法。一旦矿井封闭、与大气隔绝，来源于地下的瓦斯都可以在一个生产地点抽采。从密封良好的原高瓦斯矿井中回收的瓦斯浓度通常在15%到90%之间，而且没有氧气。其他主要气体成分可能是氮气(包括脱氧空气)和二氧化碳。有时会出现低浓度的一氧化碳和乙烷等微量碳氢化合物。

进入废弃矿井工作面抽采瓦斯是通过以前的立井或巷道进行的。当这些都不合适时，例如，如果它们已经塌陷，或者没有安装通风管道，则可以从地面钻一个抽气井，与地下工作面相交。最初，可能有足够的储层压力供在地面生产废弃煤矿瓦斯。不过，最终需要抽吸或负压，才能从矿井裂隙(包括前采空区)、从封闭层和卸压的原位煤中抽出瓦斯。瓦斯成分可能因瓦斯浓度的不同而异，不仅每个矿井的瓦斯浓度不同，而且从矿井的不同部分抽采瓦斯时瓦斯的浓度也会有所不同。影响瓦斯质量的主要因素是空气稀释，而空气是从密封不良的地表入口吸入矿井的。不受控制的空气渗漏会降低瓦斯中的瓦斯浓度，还会限制可达到的压力和流量。必须将进气量降至最低，以确保瓦斯浓度和流量的稳定。在某些情况下，吸入废弃矿井的空气可能会引起煤层自燃，释放一氧化碳。

可释放的废弃煤矿瓦斯的数量取决于各种因素，包括开采层中未开采的煤量、煤的残余瓦斯含量以及工作面的浸水率。

个体小型矿山的废弃煤矿瓦斯项目除非进行整合，否则不太可能具有商业价值。将中小型废弃煤矿瓦斯项目与工作矿井的煤矿瓦斯计划相结合，可以形成满足高峰需求的瓦斯气源和在需求低谷时储存瓦斯的储气库，从而提高灵活性和盈利能力。

据报告，在欧洲，废弃煤矿瓦斯抽采场的抽采量等于甚至超过了从生产矿井获得的煤矿瓦斯流量(Backhaus, 2018)。在这些例子中，可能存在大量的相对较新的生物瓦斯。

除非为安全和/或环境原因所需，否则，为减少排放而焚烧废弃煤矿瓦斯的做法目前并不普遍。在一些国家，这可能导致与瓦斯许可证持有者的潜在冲突，并且除了美国的废弃煤矿瓦斯项目可以参与一些碳市场以外，对焚烧废弃煤矿瓦斯并没有什么激励措施。本文稍后将更详细地讨论政策驱动因素。

1.4 部分国家的废弃煤矿瓦斯排放和开采情况

表 1.1 列出了最大的废弃煤矿瓦斯生产国所避免的瓦斯排放量。应该指出，许多废弃矿井的排放量往往是估算而不是测得的，估算使用的是公认的方法，如政府间气候变化专门委员会的方法³或美国国家环境保护局制定的方法。⁴这与报告的作业矿井排放量形成鲜明对比，后者通常是为了跟踪环境绩效或为了健康和风险监控而测得的。一般来说，这会导致报告的废弃煤矿瓦斯排放量具有更大的不确定性。

³ 气专委(2006年)。《2006年气专委国家温室气体清单指南》，第2卷：能源。第4章，逸散排放。2006年。瑞士日内瓦。https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf。

⁴ 美国国家环境保护局(2004年)。美国废弃煤矿的瓦斯排放：排放清单估算方法和1990-2002年排放量估算。2004年。美国华盛顿。https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm_final_report.pdf。

中国：中国已经查明了潜在的废弃煤矿瓦斯资源(Coté, 2018b)。据报告，至少有3万个乡镇煤矿被废弃，但其中大多数可能规模太小，不值得开发废弃煤矿瓦斯项目。此外，还查明了120个废弃的国有煤矿。其中，据报告有50个煤矿具有生产废弃煤矿瓦斯的潜力。2017年共关停煤炭产能1.5亿吨。但是，一些因素限制了中国利用废弃煤矿瓦斯的潜力，包括浸水速度往往很快，密集开采导致一些地区的大部分气源被清除，以及关于煤矿关闭后土地、财产和资源的所有权 and 责任的监管不明确。Liu (2018)描述了两个废弃煤矿瓦斯的案例分析，并重点说明了未来可以开发的地域。

德国：根据全球瓦斯行动倡议国际煤矿瓦斯项目数据库的数据，德国已经部署了超过35个废弃煤矿瓦斯项目，所有这些都涉及发电或热电联产。(GMI, 2017)。截至2015年，共有94台废弃煤矿瓦斯火力热电联产机组(一个项目通常涉及多台热电联产机组)，总装机容量为120兆瓦。⁵ 这些废弃煤矿瓦斯项目每年产出超过500兆瓦时的电力和75兆瓦时的热量，同时避免了230万吨二氧化碳排放(Backhaus, 2017)。德国的大部分废弃煤矿瓦斯项目始于21世纪初，当时该国新的可再生能源政策为废弃煤矿瓦斯和煤矿瓦斯火力发电制定了特殊的上网电价。与此同时，每年报告的废弃矿井温室气体排放量从2000年的500万吨二氧化碳当量下降到2015年的仅1.8万吨二氧化碳当量(UNFCCC, 2017)。据估计，2015年现有废弃煤矿瓦斯项目利用了德国废弃煤矿瓦斯排放总量的99%(Denysenko et al, 2019)。

法国：法国最后一座煤矿La Houve于2004年关闭，但法国开始回收和利用废弃煤矿瓦斯是在1978年，当时是为了应对1973年开始的中东石油危机，这场危机导致高油价持续了数年。从那时起，法国北部的几个高瓦斯废弃煤矿生产的瓦斯已经注入瓦斯管道，用于发电。多年来，这些活动都由法国国家煤炭公司Charbonnages de France的前子公司Gazenor进行，Charbonnages de France于2008年解散。瓦斯生产主要来自Avion、Divion和Desiree三个煤矿。图 1.1 列出了这些废弃矿井的瓦斯年产量和瓦斯累计产量(Moulin, 2019)。

上市公司Francaise de l'Energie于2016年收购了Gazenor，目前控制着约1,500平方公里的特许矿区，并运营着废弃煤矿瓦斯生产场地和5个发电设施，装机容量为9兆瓦。从1978年至2018年年底，Avion煤矿生产了10.68亿立方米瓦斯，Divion煤矿和Desiree煤矿分别生产了3.25亿立方米和1.45亿立方米瓦斯。2018年，这三个矿井的瓦斯年产量为2,600万立方米。据Francaise de l'Energie估计，使用瓦斯燃料替代煤炭，每年可以避免排放超过60万吨的二氧化碳。

英国：到1990年，英国几乎80%的井工煤矿已经关闭，到2010年，很大一部分废弃煤矿瓦斯已经被排放或得到利用(Fernando, 2011)。从小型煤矿、低瓦斯煤矿和关闭超过10年并被水浸的矿井中抽采废弃煤矿瓦斯被认为是不可行的。截至2018年，已关闭煤矿150个，开发废弃煤矿瓦斯发电供气项目近30个，但它们不一定同步运营。截至2017年10月，在运营的废弃煤矿瓦斯项目有13个。其中12个项目用于发电(总装机容量为78兆瓦)，一个项目用于注入瓦斯管道(Kholod et al, 2018)。英国现行的废弃煤矿瓦斯项目利用了废弃煤矿排放瓦斯总量的58%左右。英国废弃煤矿

⁵ Backhaus, Clemens (2017年)。德国北莱茵-威斯特伐利亚地区的废弃煤矿瓦斯利用经验。废弃煤矿瓦斯研讨会。欧洲经委会煤矿瓦斯专家委员会。2017年10月23日。瑞士日内瓦。
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7.Mr._Backhaus.pdf

表 1.1 最大的废弃煤矿瓦斯生产国

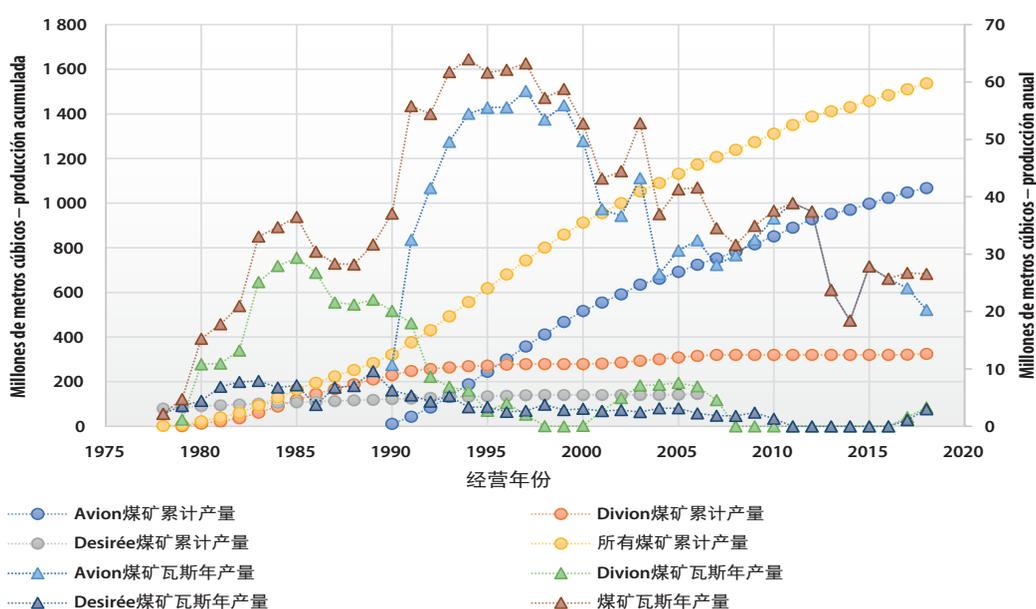
国家	项目数量	避免的排放量 (百万吨二氧化碳当量)	废弃煤矿瓦斯的主要用途
中国	不详	据信不大	不详
捷克共和国	10	0.36	发电
法国	5	10.60	工业用途
德国	40	5.71	发电
英国	20	0.64	发电
美国	20	2.70	管道销售

资料来源：EPA, 2015, CMM Country Profiles; EPA, 2017, U.S. GHG Inventory。

瓦斯排放量从2000年的140万吨二氧化碳当量降至2015年的44.1万吨二氧化碳当量(UNFCCC, 2017)。

美国：美国有7,500个废弃煤矿，其中524个是高瓦斯煤矿(EPA, 2017; Global Methane Initiative, 2015)。从历史上看，美国的废弃煤矿瓦斯项目向已有的天然气管道注入；不过，废弃煤矿瓦斯发电和火炬焚烧项目的数量近年来有所增长。目前在45个煤矿共有19个废弃煤矿瓦斯项目。其中有一些综合项目，包括3个将3-5个煤矿组成一个单一项目的废弃煤矿瓦斯项目、1个汇集14个煤矿的瓦斯的废弃煤矿瓦斯项目以及3个与现有的煤矿瓦斯项目合并的废弃煤矿瓦斯项目(Coté, 2018a)。由于废弃煤矿瓦斯利用量的增加，废弃煤矿瓦斯净排放量从2000年的880万吨二氧化碳

图 1.1 Avion煤矿、Divion煤矿和Desirée煤矿的瓦斯年产量和累计产量



资料来源：Moulin, J., 2019。

当量减少到2017年的640万吨二氧化碳当量。2017年释放的废弃煤矿瓦斯总量增加到920万吨二氧化碳当量，其中270万吨二氧化碳当量用于发电和管道瓦斯销售(EPA, 2019)。煤炭生产仍然是美国能源结构的重要组成部分；但是，由于来自其他燃料的竞争以及长壁开采增产的持续趋势，井工煤矿的数量从2008年的583个下降到2017年的237个。⁶最近关闭的许多煤矿可能会带来利用废弃煤矿瓦斯的可行机会。

⁶ 美国能源信息管理局。《2017年度煤炭报告》和《2008年度煤炭报告》。2018年11月和2010年3月，华盛顿。可查阅 <https://www.eia.gov/coal/annual/>。

2. 废弃煤矿瓦斯排放源

关键信息

- 当煤矿关闭时，矿井的通风主扇停止工作，地下空间的瓦斯组成和分布快速发生根本性的变化。
- 瓦斯和其他危险气体将运移到压力较低的区域，如果没有遇到不渗透地层或含水层，还会运移到地表，可能造成严重的健康危害和安全危害。
- 矿井可能会灌水，阻碍额外的排放，但当水到达地表时，溶于水的气体可能会释放出来。
- 可以采取一系列行动，降低在废弃矿井及其附近产生的环境风险和安全风险，包括安装环境监控系统、加强矿井入口的工程密封、主动抽采瓦斯等。
- 必须理解所有这些变化的含义，并对后果进行管控。
- 只要残煤、地下巷道和瓦斯的所有权得到明确界定，关闭矿井的环境问题就可以得到解决。

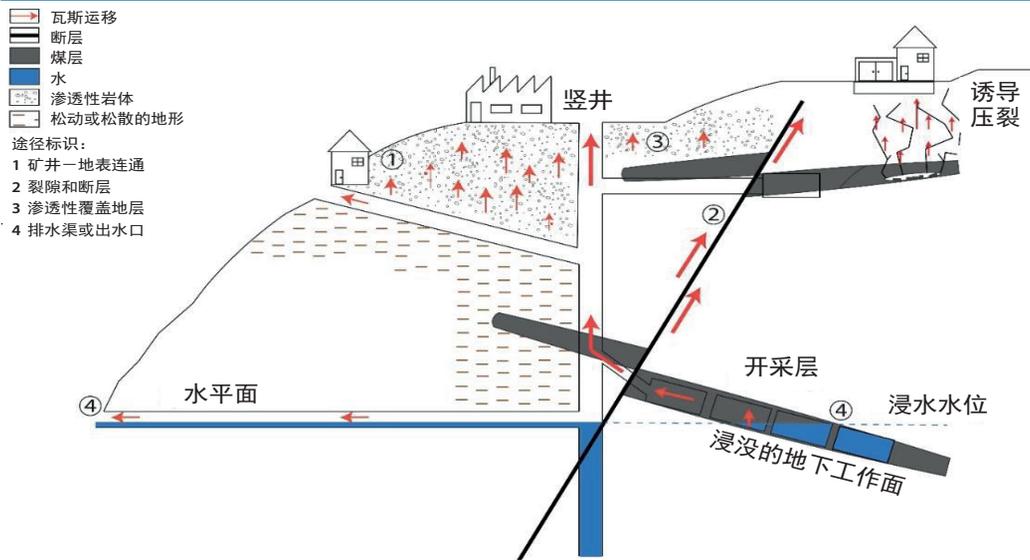
2.1 废弃煤矿瓦斯的运移

当矿井关闭时，矿井的主要通风机停止工作，气体可以通过相互连通的巷道在矿井工作面自由运移。由于瓦斯密度小，积存在空气和其他矿井气体上部，因此，它将上升到地表入口和存在地下连通的浅露头工作面。到达地表的最常见途径为通过废弃矿井入口渗漏，或通过上覆的裂隙砂岩从浅工作面渗漏，特别是在只有一层薄薄的表层矿床覆盖的地方(图 2.1)。

这种运移在关闭的矿井位置造成危险状况，时间长达数十年之久，并且也对任何邻近的作业矿井造成威胁。此外，废弃煤矿瓦斯运移还会增加评估废弃煤矿瓦斯资源的难度。

在某些情况下，潜在的危险矿井气体可能会进入建筑物，并在那里积聚，造成安全风险。在欧洲和亚洲有多个前煤矿区发生了事故。在英国，所有主要的煤田都曾一度受到矿井瓦斯地面排放的影响。但并不是所有的煤矿关闭都必然会导致瓦斯排放问题，因为从1947年到1998年，英国有900多个煤矿关闭，在此期间只发生了大约75起地面瓦斯排放事故。然而，可能还有更多的事故没有被发现。在1990年代，平均每年发生约3起新事故，其中60%以上是由瓦斯透过废弃的旧矿井井口渗漏所致。虽然在居民楼发生过瓦斯着火事故，但没有人员伤亡。相比之下，窒息性气体(二氧化碳和氮气)排放导致了多人死亡。

图 2.1 在停止采矿后形成的瓦斯潜在运移途径



资料来源：Adapted from INERIS, 2019. Post-Mining Hazard Evaluation and Mapping in France.

在法国，法国国家工业环境与风险研究所受委托研究与废弃矿井相关的危险，并出版了两本手册。最新的手册提供了关于采矿后危险评估和分析的信息，以协助地方当局和规划部门(INERIS, 2019)。新手册中提到之前的一本手册(INERIS, 2016)，其中就关闭矿井和废弃煤矿的潜在危险气体排放问题提供了指导。已确定的风险分级排列，从矿井内未达到爆炸下限的有毒和/或易燃气体造成窒息的低风险，到矿井气体高速率排放时的窒息或爆炸的高风险。

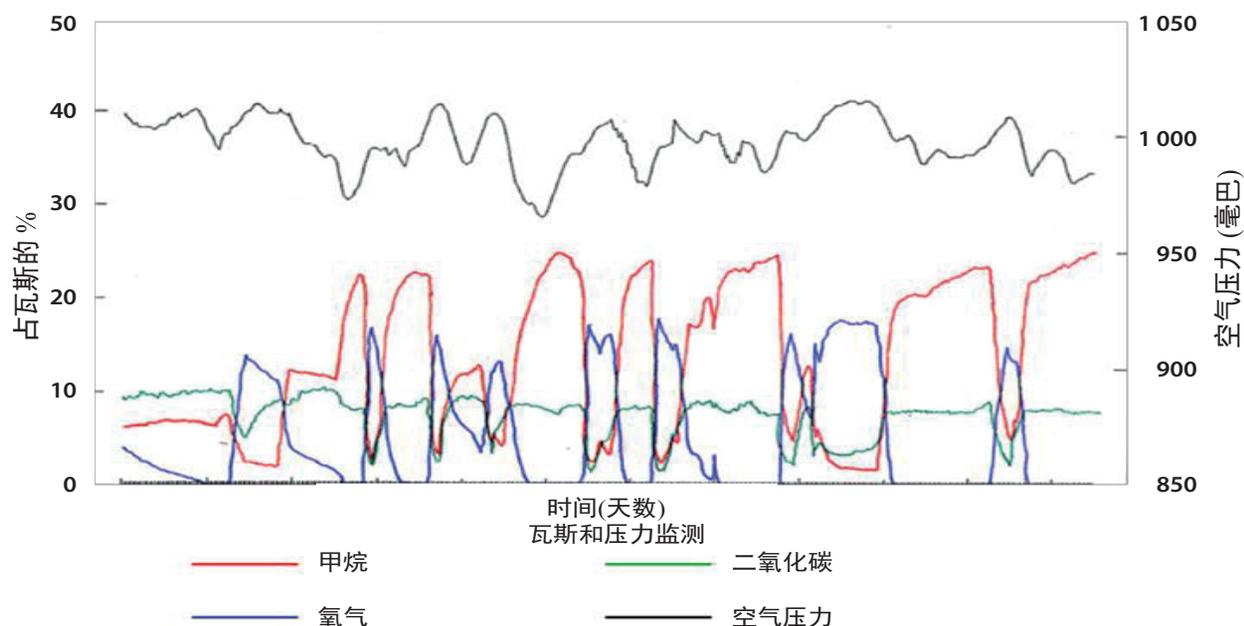
德国对废弃煤矿瓦斯的兴趣始于1990年代，当时矿井关闭数量开始增加。最初的担忧仅限于瓦斯泄漏给当地居民带来危险的地区(Backhaus, 2017)。

在哈萨克斯坦，特别是在第二次世界大战开始后，许多煤矿开发后又迅速关闭。1940年代至1970年代，这种开发和关闭经常是在没有充分计划的情况下进行的。瓦斯通过运移流出原地下矿井工作面和采空区，继而导致现矿区和前矿区地表的瓦斯危险增加。在之后的几十年里，人们发现，哈萨克斯坦中部矿区的许多建筑物和住宅区建在原通风井和巷道之上。瓦斯浓度突然增加、自燃、地表不稳定和死亡时有发生(Ostapov, 2006)。在其它情况下，为了避免灾难性事件，政府不得不重新安置居民、拆除建筑物、关闭工业设施。

尽管没有来自最大煤炭开采国中国的数据，说明在上方有建筑的废弃矿场的瓦斯危害，但很可能问题已经存在，只是尚未检测到而已。如图2.2所示，随着大气压力的变化，矿井工作面通过任何未密封或未完全密封的地面连通“吸入和呼出”，瓦斯浓度视进气情况呈现周期性的增减。

当大气压力上升时，空气往往流入废弃的矿井，产生富含空气的矿井混合气体。当大气压力下降时，气流方向发生逆转，将日益少氧而富含瓦斯的混合气体带向地表。矿井瓦斯问题通常是在大气压力迅速下降之时或之后随即在地面表现出来的。

图 2.2 关闭但不完全密封矿井的瓦斯和压力监测



资料来源：Creedy, D. P., and K. Garner, 2002。

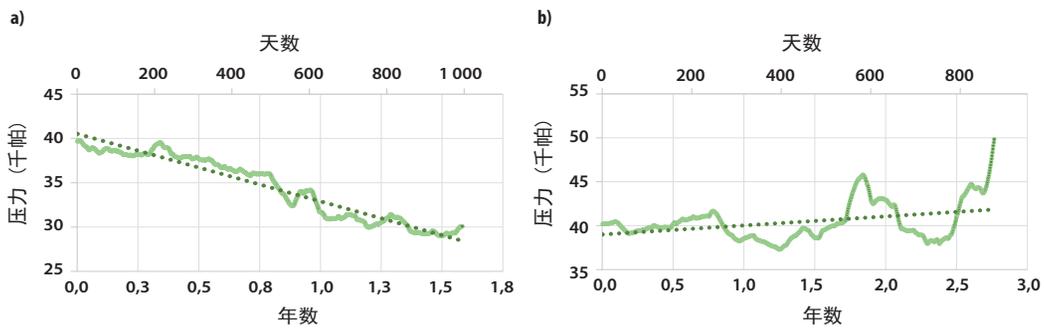
矿井水位的上升会改变矿井裂隙的压力，并可能迫使瓦斯流出矿井或进入其他渗透性地层。最终水位将取决于区域水文环境。但是，关闭的矿井可以继续抽水，以保护邻近的位于下山方向的其他生产矿井，防止隔离煤柱被冲破时可能会发生的涌水和透水。在评估废弃煤矿瓦斯资源时，了解这两个因素的相互作用至关重要。应在一段时间内进行多次测量，以记录呼出吸入和裂隙压力的总体变化。应该确定水位，了解或估计浸水速度。例如，最近关闭的矿井看起来瓦斯产量很高，从而导致存在大量瓦斯资源的估计，但产量可能是水位迅速上升压缩气体并增加压力的结果。在图 2.3a 所示的例子中，矿井空隙的总体压力随着时间的推移减小，这表明裂隙没有充水，但图 2.3b 所示的矿井压力却随着时间的推移增加，这表明矿井可能正在充水。显然，如果矿井裂隙继续充水，那么，正在解吸瓦斯的煤层将被水覆盖，水柱的重量所施加的压力最终将大于解吸压力，足以阻止瓦斯从煤层中流出。

含煤盆地的大规模开采会导致不同年龄、不同深度的工作面相互连通。这种相互连通在矿井关闭后为瓦斯远距离运移提供了机会，并且在某些情况下，会在刚刚关闭的矿井范围以外造成地表瓦斯排放问题。

关闭矿井不受控制的瓦斯排放通常可分为以下几类：

- 点源排放，即只能在几平方米的地面上检测到，通常可追溯到一个封闭不良的掩埋的矿井井筒旧址。
- 局部排放，即瓦斯从特定的矿井入口逸出，并沿着浅层渗透性运移途径运移，影响到数十平方米的地面。

图 2.3 瓦斯压力随时间变化的曲线图，在(a)中递减，表明矿井空隙没有充水，在(b)中递增，表明矿井空隙正在充水



资料来源：Pilcher, R., 2019, 未公布的数据建模和分析。

- 大面积排放，即瓦斯透过浅层高瓦斯工作面正上方的大片露头渗透性地层上的地表覆盖物运移到地面。

作为煤矿关闭程序的一部分，应评估出现此类危险的可能性。关闭废弃矿井的井筒很难完全密封严实。随着废弃工作面中地下水的回升，瓦斯压力可能增高，加剧逸散排放和瓦斯向地面逸出。安装可控制瓦斯释放的被动通风口可以降低风险(图 2.4)。在更复杂的情况下(已发现有大规模涌出区)，主动抽气可以减少地表瓦斯危害的可能性，但这种瓦斯的纯度和数量可能不一定值得商用。

图 2.4 英国废弃矿井上的排气口



资料来源：Creedy, D. P., and K. Garner, 2002。

可以通过以下方法减少废弃矿场及其附近产生的环境风险和安全风险：

- 增强对矿井入口(立井、斜井和平硐)的密封设计；
- 稳定浅层工作面和矿井入口，以防止地面进一步移动；
- 透过矿井密封件安装瓦斯泄压通风口；
- 使用废弃煤矿瓦斯主动抽采系统；

- 拦截和处理排放的矿井水；
- 安装环境监测系统；
- 关闭矿场后进行检查和监测；
- 在工业、商业和住宅建筑内安装结构性瓦斯屏障和地下通风装置，以防止危险气体进入。

只要残煤、地下巷道和瓦斯的所有权得到明确界定，关闭矿井的环境问题就可以得到解决(框图1)。

框图 1. 处理关闭煤矿的环境危害的监管机构实例

英国煤炭管理局作为政府机构，负责处理与所有权已交还给它的废弃煤矿相关的历史遗留问题。为了发现和预防潜在的问题，对这些废弃煤矿实施了一项检查和监控方案。应急响应并确保任何事故一经报告便能迅速得到处理。监控方案的活动包括：

- 测量矿井通风口的瓦斯成分、流量和压力，以确保瓦斯排放得到控制；
- 检查阻火器和通风口，以确保它们未被堵塞；
- 测量竖井中的水位并监测井眼、排水量和水质；
- 在监控、通风和水处理场所维持安全；
- 审核和审查结果。

英国煤炭管理局就是一个例子，它是由政府成立组建的一个机构，负责接管废弃煤矿的所有权，并获得授权和资金来处理威胁公众安全的历史遗留问题。它作为煤炭和前矿井工作面的拥有者，还负责监督煤矿的相互作用、关闭煤矿的工作和关闭废弃煤矿瓦斯计划的工作。还需要注意的是，尽管管理关闭的矿井可以减少安全隐患，但除非对瓦斯加以利用，否则这种管理并不会减少总排放量。

2.2 废弃矿井中的瓦斯成分

废弃煤矿工作面中最常见的气体是二氧化碳、氮气、水蒸气、氧气和瓦斯。这些气体的比例从一个煤田到另一个煤田可能有很大的不同，在一些废弃的低瓦斯矿井中，可能只存在微量瓦斯。在一些原高瓦斯矿井中也可能检测到乙烷和其他烷烃。如果抽采废弃煤矿瓦斯的来源是煤层，则由于乙烷与瓦斯的解吸比例差异，而使瓦斯的解吸结果增加，因为长链烷烃分子的解吸时间晚于瓦斯。源自非煤储层的废弃煤矿瓦斯的成分可能明显不同。由于碳质材料低温氧化或燃烧不完全的结果，可能存在一氧化碳。硫化氢和其他微量气体会给矿井瓦斯带来一种特有的气味。低浓度

的异味气体通常不会对健康构成危害，但可能会造成异味困扰。出于环境和安全原因，瓦斯的相对浓度非常重要，但它在规划瓦斯的潜在最终用途时，也是一个关键因素。

表 2.1 说明了在伊利诺伊州含煤盆地的废弃煤矿中发现的瓦斯成分的多变性。瓦斯成分的范围受许多因素控制，其中最重要的是为防止矿井进气而进行密封的质量。

伊利诺伊州下属县	矿井或井眼	深度 (英尺)	瓦斯成分						热值 兆焦/ 立方米
			CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	
Christian	Joe Simkins #1		16.3	1.1	63.1	19.0	0.5	0.2	7.5
Clinton	Breese-Trenton	435	11.8	0.4	27.1	60.3	0.2	0.1	23.1
Clinton	Pessina #1		10.2	0.3	20.7	68.8	n.d.	n.d.	25.9
Franklin	Zeigler	380	5.9	0.6	28.8	64.7	n.d.	n.d.	24.4
Franklin	Peabody #1	535	8.2	0.7	13.8	77.3	0.2	n.d.	29.2
Gallatin	B & W Coal		0.1	20.7	79.2	n.d.	n.d.	n.d.	-
Montgomery	G. Stieren. Crown #1	362	5.5	n.d.	24.4	69.8	0.2	n.d.	26.5
Perry	F. Hepp. Bernard Mine	105	19.0	0.8	56.8	23.4	n.d.	n.d.	8.8
Randolph	Moffat Coal #2		3.3	11.6	85.1	n.d.	n.d.	n.d.	-
St. Clair	Peabody Coal. test hole	126	0.3	n.d.	10.5	89.2	n.d.	n.d.	33.6
Saline	Charter Oil #1A		n.d.	0.6	12.8	75.9	9.5	n.d.	35.8
Saline	A. Farris. Dering Mine	460	4.0	0.5	5.2	90.3	n.d.	n.d.	34.1
Saline			5.5	0.1	3.4	90.9	n.d.	n.d.	34.3
Saline	Wasson Mine shaft		6.2	0.6	40.7	51.0	1.5	n.d.	20.2
Saline	M.L. Devillez #3		3.3	4.1	50.8	41.8	n.d.	n.d.	15.8
Saline	W. Duncan. Cook-Spear #1	439	5.7	0.3	7.3	85.7	n.d.	n.d.	32.4
Saline	Adams Unit #1 (Sahara #10)		6.2	0.2	2.2	90.2	n.d.	n.d.	34.2
Saline	Jade Oil. Dering Mine		6.2	1.5	8.9	83.4	n.d.	n.d.	31.4
Saline	Sahara #10 Mine	445	8.7	3.5	64.8	23.0	n.d.	n.d.	8.7
Saline	Dan January		3.1	0.7	9.8	86.3	n.d.	n.d.	32.6
Saline	J. Wilson. Sahara (O'Gara #8)	405	6.1	0.2	3.1	90.6	n.d.	n.d.	34.2
Saline	Frank Genet Mine		8.6	0.8	n.d.	90.1	n.d.	n.d.	34.0
Saline	Sahara #1 Mine		7.0	3.7	72.7	16.6	n.d.	n.d.	6.3
Vermilion	Bunsenville Mine		6.5	14.4	79.1	n.d.	n.d.	n.d.	-

资料来源：Demir, I., et al, 2004。

注：ND = 未检测到。

氧气和氮气含量高表明进气的比例高，而碳氢化合物浓度较高的矿井则表明井口相对密封良好，空气在高气压期间无法渗透进矿井。由于工作面的布局或关闭后的下沉以及顶板坍塌，矿井可能被分隔，如果没有直接连通，气体无法从一个区域流到另一个区域，则矿井内部的瓦斯成分便会不同。

3. 量化废弃煤矿瓦斯资源和预测瓦斯流量

关键信息

- 考虑到矿井水回升、连接巷道浸水以及控制进气可能需要的工程施工的影响，要评估潜在可采瓦斯储量，第一阶段工作是确定废弃煤矿瓦斯储层的特性。
- 废弃煤矿瓦斯储层由煤层和地层内的任何其他含气岩组成，这种地层经过以前的长壁采煤已经卸压。在某些情况下，储层内也可能有生物瓦斯。
- 废弃的矿井巷道提供了将废弃煤矿瓦斯引向选定的生产井、竖井或平巷的通道。
- 非垮落实采煤法(如房柱采煤法)的卸压效果明显不如长壁采矿法，在计算瓦斯资源量时通常被排除在外。
- 利用矿井关闭前的实测瓦斯涌出量数据，外推指数或双曲线衰减曲线，可估算出潜在瓦斯生产流量。
- 使用抽采泵进行生产测试可确定实际流量。
- 有新鲜空气通过封闭不良的地表入口渗漏到矿井工作面时，瓦斯抽采的效果会受到影响。

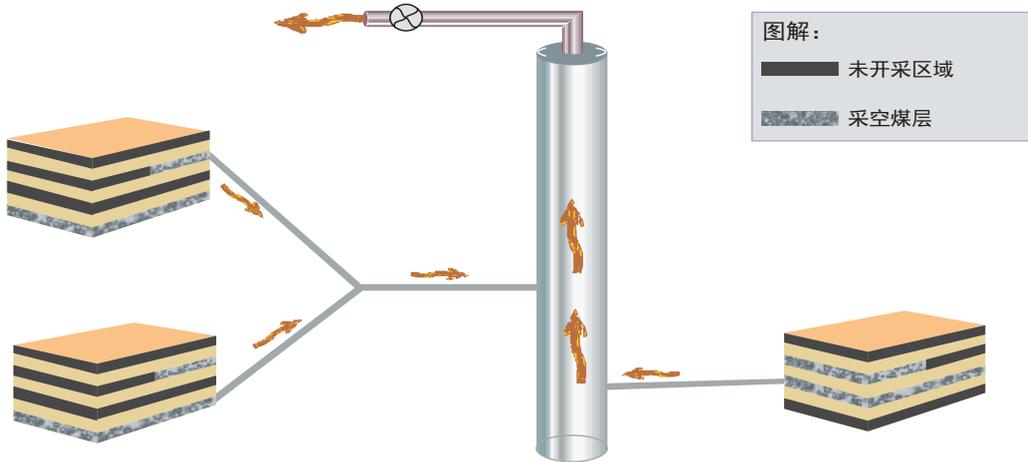
3.1 废弃煤矿瓦斯资源

源自煤层的废弃煤矿瓦斯数量取决于原开采影响区内，开采后剩余煤层的厚度和残余瓦斯含量。可以使用一个简单的模型对废弃煤矿瓦斯资源量进行地质评估，该模型的评估依据是矿井平面图、地质记录、涌水量数据和原位瓦斯含量等测量信息。

图 3.1展示了废弃煤矿瓦斯储层的概念模型。

在欧洲开展的研究表明，长壁废弃煤矿瓦斯储层通常包括顶板以上160米至200米和底板以下40米至70米的煤层(UNECE, 2016)。如果存在强矿压岩层，特别是在顶板部分，则卸压高度可能会大幅降低。顶板、底板和未开采煤层瓦斯只有一部分在开采过程中涌出，其数量取决于受扰动的未开采煤层与已开采煤层的邻近度以及透气性。如果连续开采多层叠置煤层，那么，在确定残余瓦斯资源量时，必须考虑每一个工作面的累积脱气效应。

图 3.1 废弃煤矿瓦斯储层概念模型



资料来源：Creedy, D. P., and K. Garner, 2002。

3.2 废弃煤矿瓦斯储量

废弃煤矿瓦斯储量是指在考虑了浸水率后可抽采的瓦斯量。随着原有工作面的水位上升，浸水将逐渐隔绝废弃煤矿瓦斯资源。这不仅会减少可采气藏量，而且还可能浸没连接巷道，隔绝部分工作面。局部浸水会限制地面抽采泵在整个废弃工作面施加负压抽采的能力。矿井关闭前的抽水记录显示了可能的涌水量，但封闭矿井入口和拆除地表水管可能会减小这一数值。

虽然从技术上讲，可以对矿井作排水处理，以最大限度地提高废弃煤矿瓦斯抽采量，但这在经济上通常不太可行。向地表排放地下水也可能受到严格的环境法规的约束，而且可能使事情变得更加复杂，并增加成本。因此，废弃矿井的水位是制约废弃煤矿瓦斯抽采前景的一个重要因素。在矿井被浸没之前，开采废弃煤矿瓦斯的“机会窗口”通常有限。

地下巷道提供了将地面泵的抽吸压力传递到主要气源点的途径，需要抽吸来产生压力梯度，以保证煤中的瓦斯解吸，吸力越小，采收的瓦斯越少。因此，采气过程很大程度上依赖于进入采空区的一次煤层的瓦斯解吸和瓦斯抽采泵多次停车抽采的解吸瓦斯。如果只有较少的瓦斯流量，可能只需要大量多次的停抽瓦斯即可维持生产流。在所需的低流量下，多次的停抽造成的压力损失是微不足道的。在某些情况下，有新鲜空气通过封闭不良的地表入口渗漏到矿井工作面时，瓦斯的抽采效果会受到影响。

在安装瓦斯抽采系统之前已经废弃多年的矿井中，一些采空区可能已积聚了矿井水，将瓦斯置换到了巷道和浅煤层工作面中。置换后的瓦斯可用于生产，如果加压，初始阶段可获得高流量。但是，可用瓦斯的总量可能太少，无法支持废弃煤矿瓦斯的商业开发。

一旦采空区浸水，相关主要气源就不能再向工作面释放瓦斯。瓦斯资源并未丢失，但在恢复解吸过程之前需要先排水。

总体而言，废弃煤矿瓦斯的可采储量取决于以下因素：

- 已采煤层和扰动区域内任何含气岩层或煤层的残余瓦斯含量；
- 原有工作面的裂隙体积和浸水率；
- 原有采区与采空区的连通性；
- 煤的解吸特性和瓦斯压力；
- 地表密封件的质量。

3.3 预测废弃煤矿瓦斯流量

利用矿井关闭前的实测瓦斯涌出量数据，外推指数或双曲线衰减曲线，可估算出潜在瓦斯流量。使用抽采泵进行生产测试可确定实际流量。重要的是要知道，快速浸水会导致瓦斯流量急剧下降，导致回收率大幅降低。废弃矿井工作面中瓦斯压力高，表明系统密封良好，水位上升导致增压。

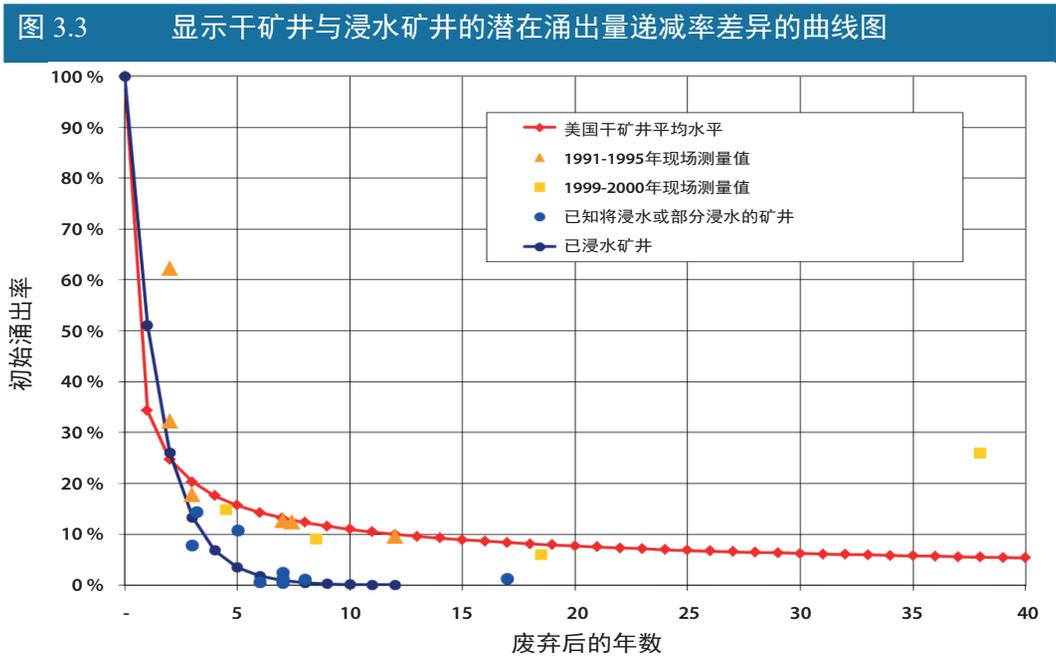
基于实测数据的外推双曲线递减曲线常用于估算废弃矿井的瓦斯涌出量 (图3.2)。在没有出现新的扰动因素的情况下，递减曲线下方的总面积代表可采废弃煤矿瓦斯。但是，仅从几个数据点推断废弃煤矿瓦斯涌出量的做法本质上并不可靠，因为没有考虑不同已采煤层的裂隙体积不同，因此水回升率也可能不同。

确定废弃煤矿瓦斯可开采量的可靠流程将包括使用地质、采矿和残余瓦斯含量数据计算原地废弃煤矿瓦斯。储层边界由以往长壁卸压区的范围确定，而瓦斯资源则是以往长壁开采扰动的未开采煤层中残留的瓦斯。

图 3.2 废弃煤矿瓦斯涌出量递减曲线



资料来源：Coté, M., 2018c。



资料来源：Coté, M., et al al, 2003。

可采瓦斯量取决于矿井工作面的连通性、入口密封标准和浸水率。可以使用实测或估计的各采煤层的涌水量和空隙估值，来估计各煤层的浸水率。因此，废弃煤矿瓦斯储量与浸水深度呈函数关系(图 3.3)。

例如，在英国，平均可解吸的残余瓦斯含量通常为参考煤层原始瓦斯含量的25%-50%。对上覆煤层已被大面积开采的废弃煤矿瓦斯储层，一阶估算的取值为25%；如果工作面仅限于单个已开采煤层，但采动卸压范围内有多个煤层，则取值为50%。在大部分情况下，取值应介于两者之间，35%的默认值被认为是合适的。

残余的可解吸瓦斯含量也可以通过经验关系来估算(Creedy & Kershaw, 1988)，这种经验关系可从对原有工作面钻孔测得的瓦斯含量中得出 (Creedy, 1985)。

结合水位与时间的函数关系以及瓦斯储量与深度的函数关系，可以获得废弃煤矿瓦斯储量与时间的函数关系(Kershaw, 2005)。

4. 评估抽采和利用废弃煤矿瓦斯的可行性

关键信息

- 废弃煤矿瓦斯计划能否在商业上取得成功，这将取决于其与市场上其他燃料和能源相比是否具有竞争力。
- 废弃煤矿瓦斯项目的可行性评估须考虑采矿、地质、地表和规划问题，以及瓦斯和电力市场及政策环境。
- 废弃煤矿瓦斯计划有多种用途可选，取决于一系列因素，包括能源价格、瓦斯供应、激励措施等因素。
- 废弃煤矿瓦斯项目的开发和实施应包括一项明确的瓦斯生产战略，并认识到生产来源很可能是一种正在衰竭的资源。

4.1 评估影响废弃煤矿瓦斯项目可行性的因素

废弃煤矿瓦斯项目的可行性评估须考虑采矿、地质、地表和规划问题，以及瓦斯和电力市场及政策环境。这类计划不仅要解决瓦斯抽采的技术挑战，例如控制进气量和水回升率，还要满足最终用户的要求。

研究的详细程度和结果的可靠与否取决于矿井的关闭状态和是否有记录可用。典型的情形有：

1. 矿井已经废弃了一段时间，几乎没有留下记录，可用的经验数据有限；
2. 矿井近期废弃，有良好的历史数据可用，但存在一些空白；
3. 矿井正在关闭过程中，所有相关数据均可获取。

废弃煤矿瓦斯计划能否在商业上取得成功，这主要取决于其在市场上与其它燃料和能源相比是否具有竞争力。影响废弃煤矿瓦斯利用的因素有：

- 是否有瓦斯可以利用及其数量和质量；
- 客户要求和合同条件；
- 是否有替代燃料及其成本；
- 监管和法律框架；
- 政府通常因利用废弃煤矿瓦斯可带来的社会效益而创造的任何激励措施；

- 投资和运营成本；
- 进入场地的通道。

并非所有的废弃矿井都适合开采废弃煤矿瓦斯。一些封闭的矿井中，已开采煤层的瓦斯含量低，会产生脱氧空气和二氧化碳的混合物(窒息性气体)。但是也有例外。据报道一个低瓦斯矿井已成为废弃煤矿瓦斯抽采源，这可能是由于微生物产生瓦斯(Backhaus, 2018)。

如果已经进行了大面积煤炭开采，或者在已开采煤层之上和之下的地层中煤层很少，则废弃煤矿瓦斯的开发潜力可能不高。其它因素也会影响在一个废弃矿井开发废弃煤矿瓦斯项目是否适宜(框图 2)；一般而言，这些都与控制进气的能力和废弃工作面内的水回升率有关。

框图 2. 具有废弃煤矿瓦斯项目前景的矿井的主要特点

- 存在大面积互联互通的废弃工作面；
- 未开采煤层中的大量煤炭因开采不足和过度开采而卸压(即已开采煤层上方和下方有很厚的煤层)；
- 采用长壁垮落法；
- 未开采煤层中残留大量瓦斯；
- 涌水量极少；
- 有能力作为关闭计划的一项工作减少进水；
- 矿井布局引导水流向最低工作面，主要巷道很少积水或没有积水；
- 矿井入口数量很少；
- 有未充填竖井或平巷可抽采瓦斯，或有适合打通抽采瓦斯井眼的地点；
- 以往对矿井的处理记录良好；
- 与浅部露头工作面无连接，这样就不会有空气渗入；
- 有地表通道供基础设施进入并进行开发；
- 瓦斯发电或小规模发电在当地有市场，能源价格较高。

4.2 瓦斯生产战略

在确定瓦斯生产战略以使收入和客户利益最大化时，有多种选择可供考虑：

- 在矿井关闭之前，使用常规瓦斯抽放技术尽可能多地抽采瓦斯，这时主要瓦斯抽采地点尚可进入，抽采过程尚可控制。

- 在关闭和早期密封后最大限度地抽采，这时瓦斯流量最高，以便在水浸没气源之前尽可能多地采收瓦斯。
- 生产废弃煤矿瓦斯以满足特定用户的需求。

还应考虑优化使用正在衰竭的废弃煤矿瓦斯源：

- 以低于最大抽采率的速度生产和利用废弃煤矿瓦斯，但由于地下水持续回升，可采瓦斯储量可能会减少。
- 仅为满足高峰需求生产废弃煤矿瓦斯，以便从高峰电价中获益。
- 如果废弃煤矿瓦斯生产成本低于天然气购买价格，则与天然气联合发电。
- 使用便携式成套发电系统，以便重新安置过剩产能，但必须有替代地点，随时准备接收剩余设备。

4.3 废弃煤矿瓦斯的用途

废弃煤矿瓦斯计划有多种用途，与天然气的用途类似。在选择最合适的最终用途时，需要考虑能源价格、瓦斯和电力输送安排、监管和激励措施、基础设施和接入、规划、环境问题、企业目标和客户要求。

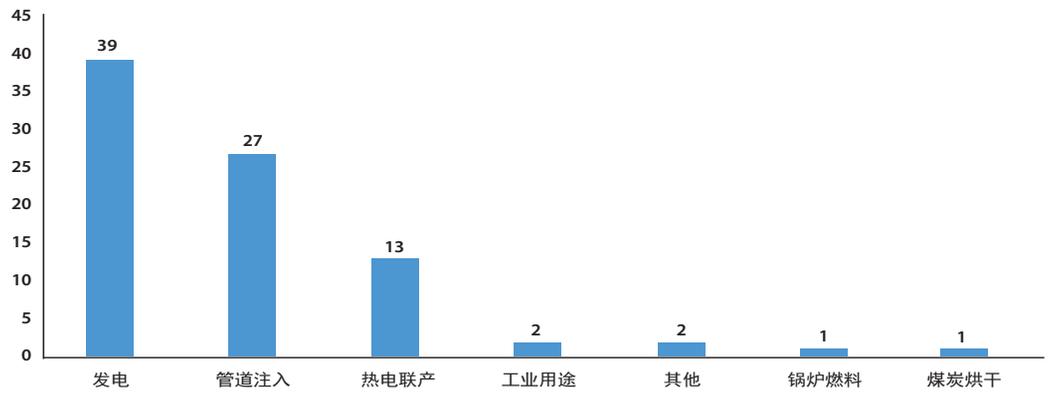
根据瓦斯质量和其他因素，瓦斯的商业用途有：

- 电力生产；
- 工业和/或城市地区的热电联产；
- 通过现有管道实现商业天然气市场供应；
- 通过本地管道提供本地工业用热；
- 在天然气中掺加低质量废弃煤矿瓦斯，但控制添加量，使管道天然气仍符合要求；
- 化工原料；
- 小型微型涡轮机和燃料电池；
- 车用燃料(相当于压缩天然气)；
- 减少温室气体排放(例如火炬焚烧)的货币化效益。

最常见的瓦斯商业用途是发电(包括热电联产)和出售管道天然气。图 4.1 显示了向全球瓦斯行动国际煤矿瓦斯项目数据库报告的部署在全球各地的现行废弃煤矿瓦斯项目的用途分布情况(Global Methane Initiative, 2016)。

废弃煤矿瓦斯的每种用途在技术上都有其特定的制约和优缺点(表 4.1)。

图 4.1 全球废弃煤矿瓦斯项目



资料来源：Global Methane Initiative, 2016。

表 4.1 选定的废弃煤矿瓦斯最终用途的一般特征

最终用途	应用	优点	缺点	瓦斯质量要求 (% CH ₄)
注入天然气管道	高质量废弃煤矿瓦斯 (净化后)	相当于天然气，在瓦斯价格较高、管道基础设施发达的市场上很有吸引力	需要高质量废弃煤矿瓦斯，靠近且能接入天然气管道。如果达不到质量要求，需作昂贵的净化处理。	瓦斯含量 95%-97%
掺加到天然气中	向天然气管道注入不定量和低质量的废弃煤矿瓦斯	方便使用低质量废弃煤矿瓦斯，否则这些废弃煤矿瓦斯会被排入大气	只能添加少量废弃煤矿瓦斯，以确保天然气质量控制规格范围内，废弃煤矿瓦斯的价格较低，商业价值有限。在注入前必须避免潜在的爆炸性混合物。	>25 %
工业直接用热	中等质量瓦斯供当地工业和商业用途，以及居民区供暖	低成本能源，瓦斯需要的处理程序有限，有潜力要按需生产	长期瓦斯供应数量和质量可能会有问题，还须考虑当地管道的成本或与现有工业管道的连接情况。	>35 %
发电和余热利用(热电联产)	燃气发电机，必要时带热回收功能	成熟的技术可以在有限范围内按需发电，可以用于调峰(高峰电价)，废热可以利用。	资本投入高，只有在电价合理偏高的情况下才可行，长期瓦斯流量和质量不确定，瓦斯资源随着时间的推移减少，接入电网成本可能很高。	>35 %
其他用途	化工原料、车用压缩天然气和液化天然气、微型涡轮机和燃料电池	利基用途，取决于地点和需求。	通常需要昂贵的净化过程，通常使瓦斯浓度达到管道质量或更高的瓦斯比例	

迄今为止，废弃煤矿瓦斯计划主要是通过本地输配管道向本地工业用户供应瓦斯，或者供给现场壳装往复发电机组。最终用途的选择取决于地方和国家能源价格、地方市场需求、政策重点和激励措施、运输成本和项目投资成本。在英国，已经修建了向工业用户供应废弃煤矿瓦斯的专用管道。

废弃煤矿瓦斯的管道和热能使用有诸多优势：抽采和供应简便、投资成本低、市场灵活。如果没有其他天然气供应，用户可能会为废弃煤矿瓦斯等清洁燃料支付高价。但是，在有天然气供应的地方，废弃煤矿瓦斯可能需要以较低价格出售，才能赢得并保持市场份额。影响废弃煤矿瓦斯作为燃气的因素有：

- 为直接注入输配管道网络而压缩瓦斯的成本；
- 是否有允许注入的瓦斯成分；
- 是否有邻近的现有管道以及是否需要建设管道网络；
- 在供应期内维持最低的瓦斯质量；
- 可获取替代燃料源用于瓦斯浓缩或后备供应；
- 气网供气的接入、控制和调节；
- 是否有现场或下游储气设施，以及是否存在对此类设施的需求；
- 是否有邻近的本地工业用户；
- 瓦斯处理需求和成本；
- 用于管道网络或存储的陆路通道；
- 压缩天然气市场。

如果瓦斯质量和产量都很高，而且项目靠近天然气管道网络，那么，向较大的市场销售可能是一个有吸引力的选项。如果生产的瓦斯符合特定标准，则可以将废弃煤矿瓦斯出售并运输到商业管道。管道运营商通常有非常严格的瓦斯质量标准，瓦斯必须达到这些标准才能获准注入。制定浓度限制是为了防止无限制地引入有毒气体、水蒸汽、二氧化碳和氧气。管道中的水气和二氧化碳会导致锈蚀，有毒气体会导致终端使用现场发生危险，氧气会导致爆炸危险。虽然现有技术可以将瓦斯净化至天然气标准，但这种工艺在许多国家不太可能在商业上具有可行性。

瓦斯也可用于燃料电池和微型涡轮机，以满足现场发电需求或为能耗需求低的客户提供服务，但这些技术由于规模通常较小，因此目前成本较高。

废弃煤矿瓦斯利用计划可能涉及从单个或多个废弃矿井中抽采和利用瓦斯。在作业矿井中，将废弃煤矿瓦斯计划和在产煤矿瓦斯计划联系起来可能也有好处。废弃煤矿瓦斯的产量可以根据需要进行调整，而在产煤矿瓦斯必须持续抽采，以保障工作矿井的安全。因此，废弃煤矿瓦斯可以与在产煤矿瓦斯一起使用，以满足瓦斯需求高峰。当需求较低时，也可以将过剩的在产煤矿瓦斯储存在废弃矿井中。多种气源可使瓦斯供应更有保障，而且可以控制和维持所需瓦斯纯度。

无论最终用途如何，废弃煤矿瓦斯计划都要求在供应合同有效期内以规定的流量和浓度输送瓦斯。要对废弃煤矿瓦斯计划进行有效管理，需要了解导致瓦斯成分、压

力和流量发生变化的过程，特别是矿井水位上升可能产生的影响。因此，需要对废弃工作面内的水回升率和水位进行监测。

瓦斯热值(调整至不含水气的标准温度和压力条件的上限或下限)是国际上首选的能源供应衡量尺度，应作为合同事项和废弃煤矿瓦斯系统性能评估的基础。

用**废弃煤矿瓦斯发电**通常是通过往复式发动机实现的。先进的燃料管理系统和远程监控系统使这些计划几乎无需人工即可运行。大部分废弃煤矿瓦斯计划可能适合基本负荷发电用途(24小时)，但在某些情况下，可以受益于更高的高峰发电(调峰)电价。

影响选择废弃煤矿瓦斯发电的因素有：

- 现有配电基础设施的位置、容量和额定值；
- 接入和连接国家电网的费用；
- 与输出发电的计量和控制相关的成本；
- 现场用户的功率要求；
- 现场基础设施的容量；
- 土地和通道要求；
- 现场或本地利用产生的余热；
- 存在的上网电价或其他清洁能源补贴。

5. 优化废弃煤矿瓦斯生产

关键信息：

- 废弃煤矿瓦斯计划成功的根本在于尽量减少废弃工作面漏气和控制涌水。
- 可以在煤矿关闭计划中纳入使废弃煤矿瓦斯抽采量最大化的工程措施，如果在关闭前实施这些措施将更具成本效益。

5.1 控制进气

控制进气需要有效处理所有与废弃煤矿瓦斯计划相关的矿井入口，不仅仅是与本矿井相关的入口，还有任何与相邻矿井互联互通的工作面。至关重要的是，要根据矿井平面图识别所有入口，找到并检查它们的地表位置。

矿井入口可以是立井，也可以是斜井，有提供最低安全标准的简单支护方式，也有复杂的工程结构。处理方案不仅要考虑到有必要形成有效气密密封，还要确保地基稳定和公共安全。

设计任何工程措施都需要考虑：

- 现有基础设施和竖井/平巷施工细节；
- 岩头深度和岩土特性；
- 表层材料的性质和深度；
- 控制地表水；
- 处理通风管道及风硐等；
- 拆除竖井陈设；
- 现有和未来的地面设施；
- 矿井入口周围的工作面通道；
- 土地所有权和使用权；
- 未来土地使用情况；
- 监控条款；
- 维护要求。

对井工矿井的入口进行处理时将需要建造一个井帽或平巷风墙。关键因素是：

- 对于立井密封件而言，最关键的设计因素是表层材料的深度和性质。
- 对通风管道及风硐应进行密封处理。
- 应在坚硬地基上建造巷道风墙，并将其固定在天然地层中。
- 穿过任何井帽或风墙的管道应该是气密的，全长直径恒定，无弯曲，安装后可防止积水。
- 如果要用于废弃煤矿瓦斯生产，则至少应安装两根抽气管道穿过井帽或风墙。
- 管道直径大小应足以将压降限制在设计的最小值。
- 应提供通往管道和阀门的安全通道，以便进行监控和维护。

附录3概述了处理矿井入口的工程选项，以方便关闭矿井后进行废弃煤矿瓦斯检测和抽采。

5.2 控制地表水和地下水

矿井关闭后，除非一直抽水，否则废弃工作面的积水会上升。不断上升的水位将填满废弃工作面，不仅隔绝未采煤区(气源)，还会隔绝地下巷道形成的运移途径。水回升率因矿而异。一个矿井被完全浸没可能需要数月到数年的时间不等，这取决于涌水速度和工作面延伸的范围。在矿井正常回采期间，将收集关于工作面的涌水位置和涌水量、抽排到地表的水量以及已经发生浸水的工作区的信息。

在关闭矿井时，可以设计和安装一些工程措施，以尽可能减少进水的影响，并控制水的流向。近期如有利用瓦斯的计划，则这种措施往往能发挥最大的价值。这种措施包括：

- 采取措施尽量减少地表水通过矿井入口进入；
- 在立井或平硐中放置泥塞(或类似物)，以限制水通过这些路线流入更深的工作面；
- 通过井眼、管道或巷道将不同采矿区连接起来，以控制水流和积水；
- 修建水坝；
- 在巷道内的低点安装管道，以输送瓦斯；
- 建设监测点，以便对水回升率进行评估；
- 继续使用或安装排水设施。

必须注意，从涌出量来看，如果瓦斯不能被迅速利用，控制矿井浸水会增加瓦斯涌出量。

作为矿井关闭计划的一部分，对水回升率进行有效管理需要找出主要连接巷道内可能积水的低点。可以穿过这些区域安装气密管道，即使巷道被浸没，也能防止相邻采矿区隔绝。这在立井和平硐底部或主巷道中可能尤为重要，因为这些地方的堵塞可能会影响到大范围的工作面，并显著减少废弃煤矿瓦斯采收量。

如果可能，应利用可进入的立井和平硐进行水位监测。可以利用竖井内的现有管道，例如以前的压缩空气管道或水管。

安装适当的监测设备将有助于评估水位上升的影响，并在适当情况下采取补救措施。这可能涉及向特定目标层位打通钻孔。可使用随钻套管技术以安全钻透老采空区和工作面，而不会造成钻井液流失或有害气体涌出。

6. 废弃煤矿瓦斯项目开发

关键信息：

- 开发废弃煤矿瓦斯项目须进行一系列研究，首先是基本的案头研究综述，然后是预可行性研究和全面可行性研究。
- 案头研究应主要依赖现有的技术文档，但也可包括被动或主动的储层检测。
- 除了更深入的地质、工程和运营分析之外，预可行性研究和全面可行性研究还可引入必要的政策、市场和财务分析，以满足投资者的要求。
- 废弃煤矿瓦斯项目投资者必须确信，预计投资回报与风险程度相称。
- 一旦决定实施废弃煤矿瓦斯项目，接下来就要设计、开发、建造和运营瓦斯抽采和瓦斯销毁/利用装置。
- 废弃煤矿瓦斯装置的流程设计关键参数是：操作人员的安全、公共安全和充分的环境保护措施。
- 尤其应注意火源、减少爆炸风险，但项目设计和运营也应考虑到非烃类气体，包括一氧化碳和二氧化碳。
- 应定期进行安全审核，以确保遵守风险管理流程。
- 可以设置远程监测控制系统，以便实时识别运营问题，使装置管理人员能够快速解决问题。

6.1 案头研究综述

采矿记录、报告和平面图中包含关于废弃煤矿瓦斯储层的重要信息。可以说，废弃煤矿瓦斯储层是一系列不连续的“叠置煤层”，它们因以往的长壁开采而已卸压。这些已开采区通过采区巷道在单个叠置煤层内相互连接，这些采区巷道又连接到矿井主巷道，再回到矿井底部区域，最终达到地表。各叠置煤层中的卸压煤层数量不一，巷道和采空区联络巷道的条件和导水性也不同。通过检测和分析，可以确定成分特点。废弃煤矿瓦斯储层说明所需的关键内容有：

- 使用的采矿方法和气藏可能的垂直范围；
- 卸压煤的体积和组成气藏的叠置煤层的数量；
- 煤层之间的间隔地层的类型和特点；
- 煤层以外的潜在气源；

- 煤的特点和瓦斯含量；
- 水流和水源；
- 矿井关闭前被水浸没的区域；
- 会引起积水并导致堵塞的矿井主要巷道低点；
- 与其他矿井相连的井下联络巷道；
- 不同工作层之间的主要井下联络巷道；
- 与浅地表工作面的联络巷道和潜在进气；
- 可能成为进气来源的未记录在案的工作面和矿井入口；
- 矿井入口数目和尽量减少进气和进水所需的工程规模；
- 现有的瓦斯生产运营情况。

需要确定进水、水流量和可能的矿井水回升等储层的关键特点，同时也要考虑到进气的可能性。还可以确定合适地点，以连接废弃工作面进行抽采，包括使用竖井、平巷或专用井眼。如果现有立井或巷道不合适(可能因为已完全塌陷)，那么就需要井眼。通常的做法是在总体稳定的区域打通抽采废弃煤矿瓦斯钻孔，与可以实现与废弃工作面网络的良好连接的巷道相交。

6.2 储层检测

案头研究综述最初用于开发关于储层的三维概念模型。然而，在决定最大产量、总可采量和瓦斯质量的关键问题上仍存在不确定性，问题包括：

- 水位和水回升；
- 潜在的露天矿洞；
- 通过地表入口进气的可能性；
- 地面抽采点与储层之间的连通性；
- 地下储层的导水性。

因此，良好的做法是监测从废弃矿井入口自然涌出的瓦斯浓度和流量(被动检测)，并进行瓦斯抽采泵检测(主动检测)，以确定储层在商业上是否具有可行性。**附录 1** 总结了一系列检测结果和可能的解释。

只有当所有矿井入口的密封水平都达到合理标准时，才能进行主动检测。检测泵可以连接到现有通风管上。在没有合适的联络巷道的情况下，必须钻一个测试钻孔与工作面相连接。瓦斯抽采泵检测可以确定储层的流量特性。这种检测可以提供以下信息：地表抽采点与地下工作面之间的流动阻力、进气量、相互连接的矿井巷道和采空区的等效阻力、矿井水回升的影响以及潜在的瓦斯成分和流量。不能单独考虑

现场检测的结果，而应该结合废弃煤矿瓦斯储层的演变模式，否则可能会做出错误的解读，并影响方案的设计。

6.3 预可行性研究

需要进行预可行性研究，使潜在投资者相信拟议的项目具有经济价值，而且可能影响结果的主要技术和行政因素已经查明。预可行性研究应列入显示关键信息的计划，以帮助项目的新成员迅速清楚地了解项目建议的内容。高质量的数据将减少不确定性。关键因素的历史监测数据和最新监测数据都必不可少，特别是关于瓦斯含量、采矿过程中的涌出量、进水情况和进水位置以及水位的数据。项目是否能得到支持最终将取决于其经济和技术价值。

预可行性研究包括对煤矿进行基本的地质和采矿调查，以及高水平的市场评估和基本的财务分析。预可行性研究作为市场和财务分析的一部分，应尝试确定激励机制和其他激励政策以及可能的不利因素。在可行范围内，不妨对政策机制的潜在成本和收益进行量化。附录 2 列出了预可行性研究中应考虑的要害。

6.4 全面可行性研究

虽然预可行性研究可以提供特定地点的数据进行初步评估，但为了取得项目融资，进行全面的可行性研究不仅是可取的，而且往往也是必需的。除其他检测外，可行性评估可能包括将抽采泵连接到已密封的矿井，以确定废弃煤矿瓦斯储层的生产特征。因此，可能需要工程建造来密封矿井入口或提高现有密封标准。这一阶段可能会产生大量资金支出，因此，只有在预可行性研究显示有前景时，才会开展这一阶段的工作。

可行性研究的主要内容有：

- 建造或加强进井密封件和生产管道；
- 被动瓦斯检测(自然排出的瓦斯流量和成分)；
- 抽采泵检测(在一定抽采率范围内产生的压力趋势、瓦斯流量和成分)；
- 对被动监测和主动监测结果的分析；
- 根据需要对进井密封件和其它任何渗漏路径开展的补救和调查工作；
- 更详细的地质调查；
- 全面抽采和利用计划的详细设计和成本核算；
- 市场调研；
- 法律和监管分析；
- 财务评估。

框图 3 可投资的废弃煤矿瓦斯项目须符合以下条件：

- 已查明重大储量，项目预期寿命为10年或10年以上；
- 项目目标明确易懂，可以实现；
- 瓦斯所有权属明确，开发商拥有生产权；
- 已确定管理结构和关键决策者；
- 已获得当地政府批准和支持(包括资金)；
- 技术风险可量化且可控；
- 已选择适合社区所具备的技能的技术；
- 可在早期阶段产生收入；
- 已确定客户并洽谈了稳定的供货合同；
- 将累积重大的环境和社会效益；
- 两三年内可能回收资本；
- 有长期的瓦斯使用/销售前景。

6.5 为废弃煤矿瓦斯项目融资

废弃煤矿瓦斯项目寻求资金的一个先决条件是，必须符合产生预计收入的技术标准，预计收入概况通常在预可行性评估中确定，细节在全面可行性研究中确定。在评估项目可行性时，一个重要的考虑因素是监管环境，第7章中对此有更详细的阐述。政策和法规可以确定税收和财政激励机制，并减轻公司在获得所有权或基础设施使用权方面所面临的行政负担，从而影响投资回报和盈利前景。在某些情况下，环境、政治和社会驱动因素也可能起到重要作用。

潜在废弃煤矿瓦斯项目的投资者需要确信以下几点：

- 已经具备所有必要的批文，特别是关于废弃煤矿瓦斯生产权的批文；
- 这是一个可靠的技术项目；
- 瓦斯有市场，买方愿意支付合理的价格；
- 项目文件清楚透明，项目目标明确易懂，可以实现；
- 项目规模够大，值得在构建财务安排和行政管理方面作出所需的努力；
- 与项目相关的技术和财务风险可量化且可控；
- 预计投资回报与风险程度相称；
- 现金流的时间点和确定性。

如果项目有复制的余地，则投资者可能愿意接受利润较低的第一个项目，因为他们知道获得的经验将从后续项目中得到合理回报。

如第7章所述，可能会有各种财政激励机制，以提升废弃煤矿瓦斯项目对投资者的吸引力。

有关煤矿瓦斯项目融资的更多信息，请参阅美国国家环境保护局的《煤矿瓦斯融资指南》。⁷

6.6 废弃煤矿瓦斯项目设计和运营

对废弃煤矿瓦斯项目的技术和经济价值进行充分评估后一旦决定实施，下一步便是项目的设计、开发、建设和运营。

6.6.1 关键设计和运行参数

在煤矿开采活跃期，井下矿工的安全是所有瓦斯抽采和利用/销毁装置的关键设计参数。矿井废弃后仅限于地面作业，所以侧重点发生了变化。与大部分工业活动一样，废弃煤矿瓦斯装置的关键流程设计参数关乎以下两方面的安全：操作人员以及可能住在附近的居民或参观/闯入现场者的安全，以及包括排放管理、雨水径流和工业废物的适当处置在内的环境保护措施。

装置的安全性通常分为两个部分：与矿井裂隙相关的瓦斯安全(即瓦斯如何从矿井中逸出)以及瓦斯抽采和利用/销毁装置的工艺安全。

主要危险是矿井瓦斯可能引起火灾或爆炸。

只要从事此类装置的设计，就必须进行初步调查，以确定适用于该装置的法定条例(当地法律)。这包括确定参数以确保符合本地土地规划和许可要求。

环境合规性在许多国家得到严格执行，并且应该是任何废弃煤矿瓦斯项目选址的优先考虑，以遵守监管要求并展现良好的环境管理。至少，场地施工和操作应尽可能少向大气排放污染物和粉尘，适当处置废物和废水，有效控制雨水排放，保护地下水资源。视场地位置而定，还应注意限制对动植物的影响。

从总体角度和监管角度考虑安全、健康和环境保护等问题之后，还必须考虑具体的设计标准。

6.6.2 具体设计标准

- 遵守当地法律法规；

⁷ 美国国家环境保护局。《煤矿瓦斯融资指南》(2019年7月更新)。EPA-400-D-09-001。2019年7月，华盛顿特区。https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/cmop_finance_guide_march_2016_revision.pdf

- 遵守地方许可证要求；
- 矿井裂隙的瓦斯完整性(核实竖井周围的矿井裂隙是否有瓦斯泄漏，或周围地质环境中是否可能有瓦斯泄漏，或如果处于真空状态，则核实是否有矿井进气现象)；
- 矿井裂隙泄漏位置(逸出点或进气点)；
- 场址和装置，包括围栏、警告标志、探测器和远程警报(如无人值守)的安全性；
- 当地住宅或工业设施及其对设施设计的影响；
- 气井设计，包括排气和隔离设施；
- 排气设施设计(含危险区半径)；
- 瓦斯管道设计；
- 排水设施(通常是简单的气水分离罐，或带水冷回路或散热风扇的冷却器)；
- 抽采装置设计；
- 利用或销毁装置设计；
- 远程监控系统；
- 防雷和接地设计；
- 防噪设计；
- 民用设计；
- 电气连接(用于电源供应和可能的网络输出)；
- 瓦斯输出连接；
- 工艺安全风险评估；
- 运营安全风险评估；
- 环境风险评估。

上表高度概括了废弃煤矿瓦斯装置的设计考虑事项。本节为特定的优先级项目提供以下进一步指导。

6.6.3 防雷设计

事实证明，闪电是一种常规点火源，会点燃作业矿井和废弃矿井中的可燃混合气体。设备应正确接地，以符合地方法规，并在必要时加入电源跳闸装置。

应适当考虑装置设施与井口或矿井连接是共用接地还是分隔接地。

6.6.4 阻火器

废弃煤矿瓦斯抽采和利用装置的一个主要设计特点是，在瓦斯管道内使用阻火器来防止火焰蔓延。阻火器的设计旨在暂时阻挡火焰通过易燃瓦斯与空气混合物的传播路径。在选择阻火器时，务必聘用合格的专业工程师，以确保安装设计匹配的阻火器。视点火源和阻火器位置而定，可能需要不同类型的阻火器。

阻火器通常与自动系统一起使用，自动系统监测受保护侧的温度，阻火器通常与自动系统一起使用，自动系统衡量受保护侧的温度，自动与驱动隔离阀耦合，以切断流向阻火器的气流并熄灭火焰。

6.6.5 瓦斯分析及其对安全、监控和监测的影响

废弃煤矿瓦斯装置周围的瓦斯浓度受到监测，其中有几个原因。装置操作员使用个人瓦斯探测器来确保自身安全，并将其作为检测瓦斯泄漏的后备装备。在建筑物中安装固定的瓦斯探测器，以监测不受控制的瓦斯逸出，并通常辅之以烟雾和一氧化碳传感器，以探测火势和燃烧产生物。通常在瓦斯管道内安装可燃气体浓度和氧气传感器，以确保爆炸性混合物不会被输送。为了确保高度安全，可能需要使用备援仪器。如果有经济激励机制，则瓦斯读数必须准确可靠。在安全关键装置中，检测和过程响应都必须迅速。

除了瓦斯、乙烷和丙烷之外，还可能存在其他烷烃，从而提高了瓦斯的热值，并拓展了空气与瓦斯混合物的易燃范围。通常用于监测瓦斯的红外探测器同时也对乙烷交叉敏感，如果不认识到这一点，就可能会导致瓦斯读数虚高。

如果易燃范围对利用或销毁过程具有重要意义，则可以用勒夏特列原理来修正易燃范围。提高利用或销毁过程中的瓦斯压力或温度，易燃范围也会扩宽，特别是上限会提高。如果废弃煤矿瓦斯混合物中存在空气，并且空气正在被压缩，这就变得非常重要。瓦斯中的可燃气体含量通常用“瓦斯百分比”来表示；例如，含有20%氮气和80%可燃气体的瓦斯会被描述为瓦斯含量80%。

煤矿瓦斯含水饱和且有温度，因此，瓦斯检测和采样设备在设计时需避免因干燥、倾倒或加热而积聚凝析油。除瓦斯外，一氧化碳(一种低温氧化产物、地下矿井着火产生的气体)、二氧化碳和氮气也总是存在于废弃煤矿瓦斯之中。

6.6.6 抽采装置设计

需要抽采装置从废弃的矿井裂隙中抽取瓦斯到地面，并将瓦斯加压输送到销毁或利用装置。通常，在废弃煤矿瓦斯装置中，抽采装置可以是干泵，其中使用的是正排量鼓风机、通风机或离心压缩机，也可以是液环真空泵，即从采矿作业中继承来的抽采装置。液环泵的优点是，其真空吸力大于干泵。但是，液环泵的水封冷却回路需要密集维护，与干泵系统相比，其寄生电力负载需求可能更高。液环泵的另一个缺点是，其向利用装置输送的瓦斯被来自水封系统的温水和来自水封冷却系统的化学污染水完全饱和。

可以将瓦斯抽采装置放在以前的矿井建筑中，但更常见的做法是放在模块化集装箱内，随着废弃煤矿瓦斯储层资源枯竭，可以很便捷地将这些集装箱搬迁到其他场地。

6.6.7 瓦斯利用或销毁装置

从环保角度而言，设计等级应该是利用、销毁、排空(最坏情况)。从安全角度而言，也可以应用这种等级，利用和销毁的安全特征相似，瓦斯都是以封闭和受控的方式燃烧；最坏的情况是排空，将可燃空气/瓦斯混合物排放到大气中，有可能着火。不过，阻火器将阻止火焰返回废弃矿井。应在排气位点设置安全围栏，如果可能的话，要远离居民区。阻火器需要定期维修，无人值守的站点应定期检查，以确保安全。

6.6.8 利用装置的商业风险与资源评估

除了能够提供可靠和充足的收入之外，影响废弃煤矿瓦斯项目取得商业成功的主要因素是，能否对瓦斯资源量作出准确估算，并使瓦斯资源估计量与抽采和利用装置的规模适当匹配。计算机建模可用于矿井空隙估算和瓦斯产量预测，但在投资前项目设计阶段，进一步进行压力检测，通常会产生更可靠的矿井空隙资源数据。

废弃煤矿瓦斯技术通常运用成熟的设备，其中一些可能是专门为煤矿瓦斯或垃圾填埋气抽采和利用项目而开发的。

遇到一个矿井的废弃煤矿瓦斯采收率低于预期的情况，半移动式集装箱抽采装置和利用装置容易搬迁，从而降低商业风险，但前提是有其他废弃煤矿瓦斯站点。废弃矿井的数量越多，半移动式抽采和利用基础设施资产的使用效率就越高。例如，一家公司的五个矿井都有废弃煤矿瓦斯项目，如果一个矿井的瓦斯产量不足，则可以将装置搬到另一个瓦斯产量超过预期的矿井。

6.6.9 运行和维护

抽采和利用装置的运行和维护由一般操作员和半熟练员工进行，但需有机械和电气专家待命，随叫随到。燃气发动机和发电机的维护工作可能也需要设备供应商培训的专业人员。

需要定期进行安全审核，以确保监管合规并维持运营标准，同时评估培训或进修需求。

6.6.10 远程监控

一般情况下，废弃煤矿瓦斯站点无人值守，由项目所有者或承包商远程监控。抽采系统和利用/销毁系统通常由可编程逻辑控制器控制，往往远程连接到中央控制系统或操作员/管理层的电脑。在设备远离硬连线互联网的地方，也可以使用全球移动通信系统或手机数据连接。当装置因故障或瓦斯参数超标而停机时，自动警报系

统会通知操作员和管理人员。借助入侵者警报和远程摄像头，可以保障无人值守站点的安全。

附录 4 列出了可能需要的设备和服务。

7. 便利和促进废弃煤矿瓦斯抽采和利用的政策和监管机制

关键信息：

- 政策和法规必须促进对废弃煤矿瓦斯排放最大限度的抽采和利用或销毁。
- 一些国家的经验为其他希望利用废弃煤矿瓦斯潜力的国家提供了宝贵经验。
- 清晰实用的废弃煤矿瓦斯所有权对于这类项目的成功部署至关重要。
- 制定法规，引导矿山运营商设计和安装回收系统，以便在矿山废弃后进行瓦斯采收，可以鼓励开展更多的废弃煤矿瓦斯项目，并进一步减少排放。
- 除了健康的能源商品市场之外，减税或有针对性的经济和财政激励措施也能刺激废弃煤矿瓦斯项目。
- 碳市场也可以推动废弃煤矿瓦斯项目的发展。

7.1 矿山管理在准备关闭矿山时的作用

好的政策是可以创建一个平台，鼓励矿主与废弃煤矿瓦斯开发商合作，以确保矿井的设计在关闭过程中促进废弃煤矿瓦斯的生产和回收。例如，有吸引力的补贴或温室气体减排可以使废弃煤矿瓦斯项目在经济上具有可行性，为矿主/经营者和废弃煤矿瓦斯项目开发商双方提供收入来源。

政策中还应纳入一种机制，以避免或解决在产煤矿和附近的废弃煤矿瓦斯生产商在互动时所产生的争端。

7.2 瓦斯所有权

清晰界定所有权可以帮助企业降低废弃煤矿瓦斯项目的风险。同样，在某些情况下，将废弃煤矿瓦斯的所有权转让给第三方可以降低项目的财务风险，实现对资源的开发。废弃煤矿瓦斯项目取得成功的国家已经取消了对瓦斯所有权转让的限制，无论是将其作为瓦斯出售还是转化为电力，从而创造了一个有利的环境(表 7.1)。

国家	瓦斯所有权
美国	归联邦和私人所有 — 废弃煤矿瓦斯项目通常需要获得瓦斯气所有权，程序因州和土地所有者而异。
法国	归政府所有 — 运营商可被授予特许权，但出于安全目的安装的一些现有地面设施，如井口，属政府所有。视具体情况而定，特许权所有者可获准使用这些政府设施。
德国	归联邦所有 — 获得废弃煤矿瓦斯所有权的程序简单高效。
英国	归政府所有 — 生产和利用废弃煤矿瓦斯需要石油勘探和开发许可证或瓦斯抽放许可证。
中国	归国家所有 — 废弃煤矿瓦斯的情况尚不明朗。煤炭和煤层气许可证是分开的。利用煤矿瓦斯不需要煤层气许可证。
乌克兰	归政府所有 — 乌克兰目前没有废弃煤矿瓦斯项目，但是瓦斯所有权可能会被下放，就像煤矿瓦斯和其它瓦斯所有权一样。
澳大利亚	归国家所有 — 州政府和联邦政府认为废弃煤矿瓦斯是一种石油产品。各州的规定各不相同，但在所有情况下，废弃煤矿瓦斯开发商都必须获得石油许可证。

资料来源：美国环境保护局，2019；以及Denysenko, A., et al., 2019；根据Coté, M., 2018略有改动。排放与项目准备，全球瓦斯论坛，欧洲经委会会外活动，加拿大多伦多，2018年4月16日。

要解决矿山所有权方面的关切，可能需要研究法律对废弃煤矿瓦斯的处理办法。例如，在哈萨克斯坦，《底土法》将所有储量分为商业储量(“表内储量”)和非商业储量(“表外储量”)。⁸目前，该项法律将废弃煤矿瓦斯视为一种废弃的非商业资源，并未就各实体如何获得这种“表外”资源的所有权提供指导。最近，哈萨克斯坦宣布，打算采用大多数经合组织国家使用的分类标准，即矿产储量国际报告标准委员会制定的矿产储量报告国际标准。这或许能简化获得和转让废弃煤矿瓦斯资源所有权的程序。

7.3 对逸散瓦斯的负责

可以对废弃煤矿瓦斯运营商提出要求，要求其在项目终止时实施特定的设计措施，从而使场址保持安全状态。废弃煤矿瓦斯抽采的一个好处是，与没有构建抽采计划的情况相比，运行抽采计划能够降低地表排放风险。但是，如果政策要求废弃煤矿瓦斯运营商承担长期责任，则将给项目造成抑制效应。

⁸ 这种分类为前苏联国家所独有，在矿产储量国际分类标准中没有准确的对应标准。有关各种分类的更详细描述见Weatherstone, 2008。

7.4 基础设施接入

废弃煤矿瓦斯项目通常只有在容易进入天然气和电力市场时才具有可行性。如果难以进入市场，就必须在现场或当地使用瓦斯才能开展项目，而需求和价格因素通常决定了这种模式缺乏竞争力。因此，市场准入是一个关键的政策问题。

与此同时，输送和利用废弃煤矿瓦斯的方式必须安全。一项关键原则是，浓度达到或临近爆炸范围的瓦斯混合物(CH₄占5-15%)不应通过管道输送或用于发电。

7.5 经济和财政激励措施

帮助瓦斯利用项目获得资金的激励措施有：税收抵免、降低特许权使用费、清洁能源激励措施(如在德国和美国几个州实施的措施)等。例如，在英国，对废弃煤矿瓦斯项目可免收气候税。在德国，如瓦斯用于发电，废弃煤矿瓦斯项目便可获得有利的“市场溢价”。美国的几个州还降低了在州有土地上生产废弃煤矿瓦斯的特许权使用费。在法国，至少有一家公司在特许经营许可有效期内获得了废弃煤矿瓦斯发电的上网电价保证价(Moulin, 2019)。

7.6 碳融资

事实证明，碳融资是一种有效的市场工具，可以启动在清洁发展机制和加利福尼亚州清洁空气资源委员会下的煤矿瓦斯项目 (UNECE, 2016)，并且在适用的情况下同样可以很好地支持废弃煤矿瓦斯项目的开发。确定明确的方法有助于促进碳融资并降低项目风险。方法学可提供明确的规则，说明什么类型的项目符合条件，以及如何估算减排量，这种信息对于项目开发商确定项目是否可行至关重要。

根据2008年至2012年在《京都议定书》下实施的清洁发展机制，发达国家可以通过在发展中国家(非附件1国家)和发达国家(附件1国家)运用核准的方法，开发和申请核证减排量或减排单位。在清洁发展机制的推动下，中国国家发展和改革委员会(发改委)在2005至2012年期间共批准了128个煤矿瓦斯项目。但并非所有项目都符合核证减排量的条件，2012年以后，由于唯一具有规模的减排额度市场——欧洲碳排放权交易体系——对核证减排额度的需求太少，核证减排量的价格急剧下跌。尽管如此，清洁发展机制的激励措施还是吸引了国际投资，改进了瓦斯抽放并推动了瓦斯利用技术，从而大大推动了中国煤矿瓦斯产业的发展。然而，自2012年起，已无法在中国注册新的清洁发展机制项目。《联合国气候变化框架公约》批准的利用和销毁煤矿瓦斯的清洁发展机制方法(ACM0008 版本 08.0)也适用于废弃煤矿瓦斯，废弃煤矿瓦斯补偿有可能在中国全国碳排放权交易体系下而适用。然而，迄今为止，还没有任何清洁发展机制废弃煤矿瓦斯项目注册。

由加利福尼亚州清洁空气资源委员会管理的加利福尼亚州上限和交易计划为相关实体(如发电厂)提供温室气体排放配额。只要项目符合《煤矿瓦斯捕集项目履约补

偿协议》，该委员会就将废弃煤矿瓦斯减排视为合格的碳补偿类型。⁹ 该《协议》适用于美国的井工矿、露天矿和废弃矿井。截至2019年7月，有五个废弃煤矿瓦斯项目根据该方法获得了加州的补偿。

目前，国际上还有很多温室气体方案可供减排项目注册，但是这些项目的市场很小，价格很低，而且与煤矿相关的减排量很难出售。

⁹ <http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/protocols/mmcp/protocol.htm>.

8. 总结和结论

废弃煤矿瓦斯是煤矿排放生命周期的一部分，在某些情况下，在矿山停止开采后还可以延续几十年。废弃煤矿瓦斯具有良好的利用特性，一个充满瓦斯的煤矿如能得到良好的密封处理，通常可以生产瓦斯浓度在15%-90%之间的废弃煤矿瓦斯，并且几乎不含氧气。这些特性与煤矿瓦斯的生​​产不同之处在于，煤矿瓦斯供应会随着煤层中残余瓦斯的耗尽而逐渐降低。然而，具有重要生源成分的废弃煤矿瓦斯储层不一定会表现出类似的枯竭特征。随着地下水系统回升并逐渐浸没矿井，使煤层无法解吸瓦斯，同时可能造成矿井分隔从而限制瓦斯从源头到生产点的输送，因此，可抽采瓦斯的体量可能进一步缩小。

并非所有废弃矿井都适合进行废弃煤矿瓦斯抽采。

一般来说，废弃煤矿瓦斯项目的规模通常相当于同一煤矿的煤矿瓦斯项目的10-25%，但多个废弃矿井可以合并成一个规模更大的项目。不过，在欧洲的一些矿场，在煤矿开采期间，废弃煤矿瓦斯的抽采量与煤矿瓦斯流量相当，在有些地方，废弃煤矿瓦斯产量甚至超过了以前的煤矿瓦斯产量(Backhaus, 2018)。出现后一种情况的原因可能是，除化石瓦斯之外还产生了新的生物瓦斯，或是天然气随着时间推移从其他地层运移到空隙中。

废弃煤矿瓦斯项目比煤矿瓦斯项目简单，因为采矿作业已经停止，生产活动不需主要服从于安全的考虑。然而，若矿井关闭前没有为废弃煤矿瓦斯回收做好准备，工作面局部浸水以及工程设计不良的入口阻碍储层的瓦斯渗透能力，从而导致产量和瓦斯质量低下，这种优势就很可能丧失。

在关闭具有废弃煤矿瓦斯生产潜力的矿井时需要考虑的问题有：

- 能否进入地下工作面，从竖井或平巷中抽采瓦斯；
- 能否在地下安装瓦斯管道，将矿井的密封部分与抽采点连通，并穿过可能积水和堵塞连接的巷道倾斜区域；
- 能否使用矿井巷道作为瓦斯流通的管道；
- 核查地表密封件的完整性，防止大气渗漏。

政策框架也是决定项目是否可行的重要因素。关键问题有：所有权、转让所有权的能力、获得激励措施(如面向可再生能源的激励措施)以及税收和特许权方面的好处以及确保为项目保留废弃煤矿瓦斯而对矿井作密封处理的政策等。

由第三方开展的废弃煤矿瓦斯项目可能会因为需要申请新的许可证或执照变得更加复杂，由此可见煤层气所有权的重要性。在一些国家，废弃矿山的​​地表和地下所有权以及瓦斯权属不明，从而阻碍了投资。

成功的废弃煤矿瓦斯回收和利用项目有以下一些好处：

- 利用原本可能排放到大气中浪费掉的资源提供能源。
- 通过阻止瓦斯释放提供环境收益，而瓦斯作为温室气体的效力是二氧化碳的28到34倍。
- 通过替代原本会使用的污染性更强的燃料(如煤炭)提供额外的环境收益。
- 视当地条件而定，废弃煤矿瓦斯计划的发电可能较其他方案更具竞争力。
- 如果适用，有资格被纳入碳抵消机制，从而提供额外的投资机会。
- 在过去的煤矿区提供就业机会。
- 防止地球表面不受控制的瓦斯渗漏，这种渗漏会对公众构成危害。

9. 案例分析

案例分析 1：德国 — 北莱茵—威斯特法伦州 鲁尔煤田

鲁尔煤田曾经是欧洲最大也是最重要的产煤区之一 (图9.1) (Dodt & Drecker, 2018)，其首个硬煤深井矿于1820年代生产。在1850年的鼎盛时期，该地区运营的煤矿有近300个，1956年采矿业就业人数达到顶峰，达到60多万名工人。然而，2019年初，博特罗普的Prosper-Haniel矿场关闭，德国结束了近200年的煤炭工业开采史。

为了促进从化石燃料向可再生能源过渡，1991年德国制定了《电力上网法》，这是世界上第一个绿色电力上网电价方案。2000年，该法被德国通过的《可再生能源法》所取代，后者虽然多年来几经修改，但其中的一系列法律规定了上网电价，以鼓励可再生能源发电。2014年和2017年，又对法律进行了修改，以便让所有可再生能源项目从上网电价过渡到拍卖制度。

从2002年至2004年，项目开发商利用《可再生能源法》，在鲁尔河谷的几个高瓦斯煤矿建立了废弃煤矿瓦斯项目(表 9.1)。

图 9.1 鲁尔产煤区的位置



资料来源：Dodt, J., M. Drecker, 2018。

表 9.1 鲁尔河谷的部分废弃煤矿瓦斯项目

煤矿	煤矿运营年份	年均煤炭产量 (百万吨)	矿山作业时的 瓦斯爆炸事件	发电地点	装机容量 (兆瓦)	总发电量 (吉瓦时)	运营年份	减排(吨二氧 化碳当量)	说明
Lohberg	1号井: 1909-2005年 2号井: 1909-2005年	1.3 - 2.5		Lohberg	7 x 1.3	510.4	2002 年 至今	1 861 028	矿井没有完全密封, 空气侵入污染了废弃煤矿瓦斯。
Niederberg1	1号井: 1912-2002年 3号井: 1954-2001年	2.0 - 2.8	1次 爆炸 -3人 死亡	Neukirchen	4 x 1.3	494	2004 年 至今	1 802 470	矿井已密封, 没有明显的空气侵入
Minster Achenbach	1897- 1992年	0.13	5次 爆炸 -117人 死亡	Christemark	1 x 0.4 1 x 1.0	25.8	2003- 2007 年	141 030	煤矿已浸水, 限制了可利用的废弃煤矿瓦斯
Dorstfeld	1859-1963年	0.85 - 1.1	2次 爆炸 -12人 死亡	Wilberd	0.2	25.1	2001 年 至今	91 855	采矿期间出现过气体逸出至居民楼的现象; 废弃煤矿瓦斯生产和浸水中止了这种现象, 但废弃煤矿瓦斯产量有限
Lothringen	1号井: 1872-1967年 2号井: 1895-1967年	1.1 - 1.4	1次 爆炸 -115人 死亡	Corvin1	4 x 1.3 1 x 0.6	96.8	2004 年 至今	352 940	附近有许多废弃但没有密封的井筒, 导致废弃煤矿瓦斯生产受到污染。
Erin 6	1号井: 1887-1983年 6号井: 1943-1983年	1.1 - 1.4	2次 爆炸 -6人 死亡	Corvin2	1 x 1.3	207.8	2004 年 至今	757 638	

资料来源: Marshall, J., 2019, 数据由Mingas-Power GmbH和A-TEC Anlagentechnik GmbH提供。

在每个矿区, 利用一台或多台道依茨垃圾填埋瓦斯发电机组建造了瓦斯回收项目, 其燃料由矿井采空区中抽出的废弃煤矿瓦斯提供, 产生的电力出售给当地电网 (图 9.2)。表中报告的减排量可归因于在项目寿命期内用燃气发电取代燃煤发电实现的总减排量。每个项目报告的减排量包括出售电力给电网取代燃煤发电而实现的电网减排, 以及与销毁用于发电的废弃矿井瓦斯相关的减排量。

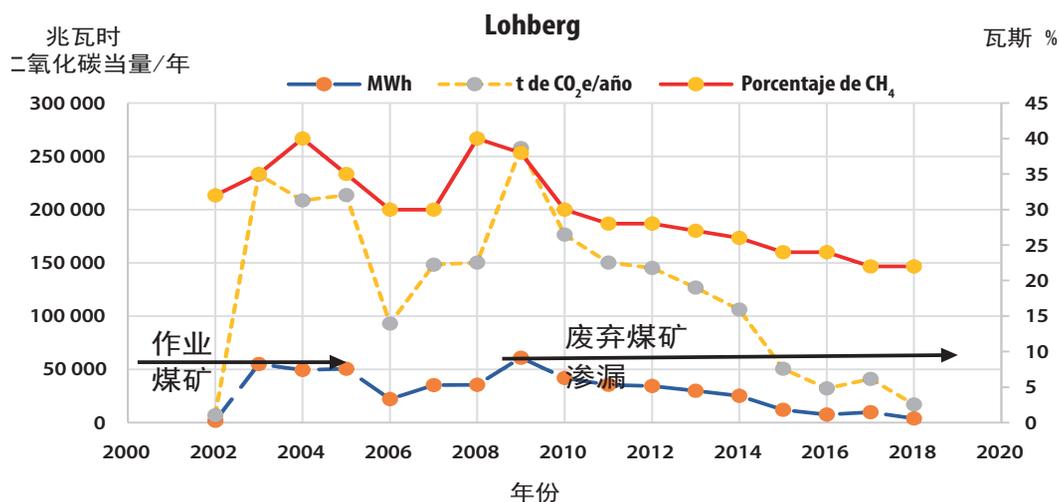
图 9.2 Lohberg 发电站



资料来源：Mingas-Power GmbH。

《德国联邦采矿法》承认，采矿活动不会随着矿井关闭而结束，因此要求矿山经营者提供一份具体的废弃方案来修复矿区，方案必须在放弃采矿许可证之前得到矿业管理局的批准。许多充满瓦斯的矿井空隙仍然与大气相通。由于许多老钻孔和井筒密封不严，不受控制的瓦斯增压会导致瓦斯运移到含水层、建筑物内和位于废弃矿井上方地表的其他结构中。将用于对空隙进行脱气的管道安装在填充的立井中，可以使从地下空隙中产生的瓦斯通过脱气管道逸出，从而减少地面不受控制的瓦斯运移。除了矿井瓦斯不受控制地渗漏到大气中之外，缺乏可靠的密封墙还会导致废弃

图 9.3 Lohberg发电站发电量和瓦斯浓度分布图



资料来源：Mingas-Power, A-TEC Anlagentechnik。

煤矿瓦斯的浓度在生产过程中出现波动。鲁尔区的许多矿井都在地下相通，从高瓦斯矿井中抽采的瓦斯常常被低瓦斯矿井中的空气进一步稀释，使这一问题进一步恶化。项目开发商已经了解到，如果不对真空泵的抽吸压力进行调节，瓦斯浓度将随着时间的推移而下降，这将对项目的运营和经济成功产生负面影响。图 9.3 描述了的例子清楚地表明，Lohberg 矿井的井筒没有完全密封。随着废弃矿井开始发电作业，2009 年开始抽吸瓦斯，空气被引入矿井，稀释了煤矿瓦斯。到第二年，瓦斯浓度进一步下降。这一趋势在随后几年中得到延续，瓦斯浓度从 2008 年的 40% 左右降至 2018 年的 25%。随着开采瓦斯中瓦斯浓度的持续降低，发电机组的效率受到负面影响，发电量也因此减少。

案例分析 2：波兰—上西里西亚盆地

1989 年至今，波兰已关闭大约 40 个煤矿。其中大部分煤矿几乎不含瓦斯。剩余的几个关闭的高瓦斯矿井中，有两个开发了废弃煤矿瓦斯利用项目。值得一提的是，最近关闭的矿井均含瓦斯，而且大多数作业矿井也含有瓦斯，因此，波兰未来废弃煤矿瓦斯项目的潜力巨大。

Morcinek – Kaczyce 煤矿

矿井运营年份：1986-2000 年

地质信息：开采煤层的平均厚度为 1.32 米至 1.44 米，开采深度为 950 米至 1,100 米。含煤岩系的年代为上石炭纪(纳缪尔期—威斯特法期)，煤成熟度为 HVBA-MVB(美国材料与试验协会标准)。煤层结构复杂，难以开采。

瓦斯涌出量：采煤期内相对日均涌出量(含气性)为 30 立方米/吨。

瓦斯产出模式和产量：通过一口从地面钻至 680 米深处采空区的采空井生产废弃煤矿瓦斯。2001 年开始生产瓦斯，截至 2017 年底，瓦斯年产量为 229 万立方米。

最终用途：主要的最终用户是捷克共和国帕斯科夫的 Green Gas DPB 公司，瓦斯通过管道输送。

Żory 煤矿

矿井运营年份：1979-1998 年

地质信息：开采煤层相对较薄，厚度很少超过 2 米，开采深度为 400 米至 830 米。含煤岩系的年代为上石炭纪(威斯特法期)，煤成熟度为 HVBB-HVBA(美国材料与试验协会标准)。开采煤层的最大瓦斯含量为 12 立方米/吨(干燥无灰基)。

瓦斯涌出量：采煤期内开采煤层相对年均涌出量(含气性)为 10.5-54.0 立方米/吨；绝对涌出量从 46 立方米/分钟(1987 年)至 18 立方米/分钟(1996 年)不等。采煤期间释放的瓦斯总量为 25,600 万立方米。

瓦斯产出模式和产量：通过钻至Żory煤矿内采空区和钻至邻近未开发的Jankowice-East煤田(与Żory煤矿工作面相连)内平巷的地面井生产废弃煤矿瓦斯。2012年，Żory矿区内的第一口钻井投产，深度为209米；截至2017年底，该井最新瓦斯年产量为325万立方米。2013年，另一口生产井钻至Jankowice-East煤田平巷；截至2017年底，该井最新瓦斯年产量为193万立方米。

最终用途：使用燃气发动机发电和供热。

波兰对废弃煤矿瓦斯的鼓励政策或激励措施

生产煤层气(包括废弃煤矿瓦斯)无需缴纳特许权使用费，购买用于煤层气开发的政府所有地质数据的费用仅为10%。

有一个全国紫色证书交易计划，用于支持电力和热力生产商开采矿井瓦斯或沼气厂生产的瓦斯。然而，只有运营商使用高效热电联产装置通过热电联产生产能源，从而实现适当水平的一次能源节约，废弃煤矿瓦斯才能被纳入这类支持的范围。

2018年，出台了一项关于利用废弃煤矿瓦斯的新法规，允许政府拥有的负责关闭矿山的矿业重组公司在矿山废弃过程中回收废弃煤矿瓦斯，只要出于安全和环境考虑证明合适，无需许可证。这一法规填补了法律空白，过去由于没有允许瓦斯利用活动的法规，煤炭生产停止后释放的瓦斯不得不排放到大气中。

经验教训与结论

尽管有上述激励措施，但迄今为止，波兰仅开展了两个废弃煤矿瓦斯利用项目。主要原因是采收废弃煤矿瓦斯的许可手续冗长而复杂。在波兰，《地质和采矿法》将废弃煤矿瓦斯视同于其他天然气矿床。因此，必须满足碳氢化合物许可过程的所有要求，这既费时又费钱。此外，由于在投资者申请煤层气生产许可证之前必须完成矿井废弃手续，因此，废弃煤矿瓦斯利用项目的启动时间会进一步延迟。由于废弃矿井的瓦斯涌出量呈现双曲线递减曲线，而完成所有废弃工程需要几年的时间，届时废弃煤矿瓦斯储量可能已大幅减少。

此外，使用紫色证书获得的支持水平被认为不足以满足废弃煤矿瓦斯利用项目，因为这种支持主要针对的是出于安全考虑作为采煤的副产品采收煤矿瓦斯的煤矿，其假设成本为零，而在采收废弃煤矿瓦斯时必然产生大量成本。

鉴于上述评论，建议对法律进行修改完善。

案例分析 3：英国—英国的废弃煤矿瓦斯利用情况

自1952年以来，约有1,300个井工矿井被关闭，特别自1979年以来，关闭了大约130个井工矿。1990年代中期，Alkane Energy公司在英国率先开始利用废弃煤矿瓦斯，或是钻入密封的矿井工作面，或是进入密闭井筒，项目总数大约15至20个(目前所有项目的装机容量为43兆瓦)。1998年，英国主要的地下煤矿公司UK Coal Mining开始效仿Alkane 的做法，在自营的高瓦斯矿井中安装矿井瓦斯利用装置，

共完成六个项目。随着矿井的关闭，其中一些项目从生产矿井项目转为废弃矿井项目。目前有三个为Arevon Energy公司所有的项目还在运营(目前所有项目的装机容量为14兆瓦)。本案例分析将考察其中的两个项目。

Selby Group Stillingfleet 煤矿

矿井运营年份：1988-2004年

地质信息：约克郡煤田；Barnsley煤层。开采煤层的平均煤层厚度约为3米，井深700米。总体而言，地质条件复杂，存在断层。

瓦斯涌出量：中等瓦斯煤矿。Stillingfleet煤矿在地下与若干其他煤矿相连，因此瓦斯储量庞大。

瓦斯产出模式和产量：从封闭的井筒顶部抽采废弃煤矿瓦斯。2019年抽采的瓦斯流量约为770 标准立方米/小时，瓦斯浓度约为80%至85%。在大约600毫巴(绝对真空度)的抽吸真空下，通过容积式风叶鼓风机抽采瓦斯。该矿的气密密封性极好，可形成强真空，不会出现进气。

最终用途：瓦斯用于配有6千伏交流发电机的往复式燃气发动机，与电网相连。

图 9.4 Stillingfleet 煤矿的通风设备



资料来源：Butler, N., HEL-East Ltd.

图 9.5 Stillingfleet 煤矿瓦斯抽采装置



资料来源：Butler, N. HEL-East Ltd..

Harworth 煤矿

矿井运营年份：1923-2006年。

地质信息：东部奔宁盆地煤田；顶部硬煤，Blyth煤层，深处软煤，Haigh Moor 和 Swallow Wood煤层。平均煤层厚度约为2米，井深850米。总体而言，地质条件复杂，存在断层和高瓦斯煤。

瓦斯产出模式和产量：从进风井井帽顶部抽采废弃煤矿瓦斯。2019年抽采的瓦斯流量约为1080标准立方米/小时，瓦斯浓度约为35%。在大约600毫巴(绝对真空度)的抽吸真空下，使用液环真空泵抽采瓦斯。矿井对井口进行了封闭，但没有完全密封，因此可以抽取的真空有限，会有一些进气。

最终用途：瓦斯用于配有415伏交流发电机的往复式燃气发动机，可最高转换为11千伏与电网相连。

减排量

英国对废弃煤矿瓦斯的鼓励政策或激励措施

有一段时间，英国鼓励发展煤矿瓦斯，这间接支持了一些作业矿山的煤矿瓦斯项目，最终成为废弃煤矿瓦斯项目。然而，英国对废弃煤矿瓦斯发电的财政支持很少，唯一的激励措施是免除气候变化税。

图 9.6 Harworth 煤矿燃气发动机

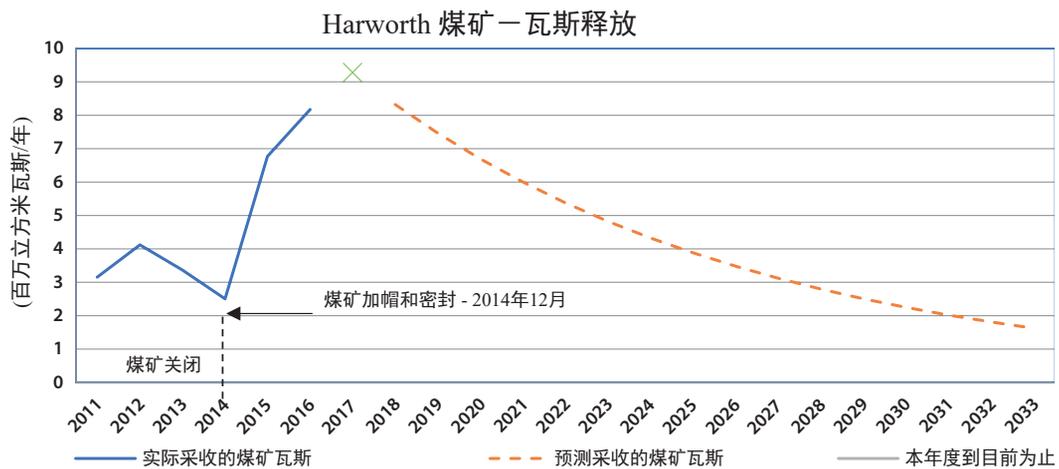


资料来源：Butler, N., HEL-East Ltd.

1999年，英国碳排放权交易体系鼓励运营中的高瓦斯煤矿从简单直接向大气排放瓦斯转而投资于瓦斯利用或焚烧。因此，上文提到的六个项目是在一些运营的矿井交付使用的，从而无意中建立了可以在矿井关闭后用于废弃煤矿瓦斯利用的基础设施。

针对废弃煤矿瓦斯项目没有类似的碳排放权交易体系激励措施，但废弃煤矿瓦斯电力项目可免去英国气候变化税，实质上被视作等同于可再生发电形式。英国气候变化税是一种面向英国非家庭用户的能源税。其目的是提供一个激励机制来提高能效、减少温室气体排放。2019年，能源税的税率为0.00847英镑/千瓦时。

图 9.7 Harworth 煤矿排放预测



资料来源：Robinson, A., Arevon Energy 首席运营官。

矿井关闭时，在停止开采后的一年内会出现一个瓦斯涌出高峰期。这种瓦斯涌出峰值被称为“红利”瓦斯。如果一个矿井在关闭前没有利用项目到位(即在矿井运行期间到位)，或者没有计划在关闭后立即安装发电设备，或者矿井密封严密，气体无法逸出(存在潜在危险)，那么，这种宝贵的红利瓦斯将永远流失到大气中。在许多情况下，第一年的红利瓦斯可以支付整个发电厂的安装费用。因此，需要采取政策激励措施，鼓励在矿山关闭之前开发废弃煤矿瓦斯。

经验教训和结论

在设计废弃煤矿瓦斯抽采装置时，由于瓦斯是从矿井中抽采出来的，因此往往温暖而潮湿，所以一旦进入地面管道系统就会出现凝结水，尤其是在冬天。应注意规划和安装合适的集水器和排水系统，以清除整个系统中的液态水，防止水侵入抽采装置(如果适用)和利用装置。

应在系统内安装阻火器，位置在瓦斯抽采点和利用装置之间，以及在任何通风系统中，以防止通过可燃空气/瓦斯混合物聚集的管道回流的瓦斯着火。可燃空气/瓦斯混合物可能出现在正在启动利用装置的废弃矿井，也可能出现在系统在安装抽采装置之前发生渗漏的地方(即在真空侧)。没有利用装置的废弃矿场也可能出现可燃空气/瓦斯混合物，那里的气压波动会导致瓦斯和空气在井下混合。

理想情况下，项目应在矿井关闭前规划和启动，以利用矿工的知识以及关闭时已知的瓦斯成分和释放率。这种时间安排还能让废弃煤矿瓦斯项目开发商得以利用并受益于矿山测量员在评估矿井渗水率方面的经验。最后，废弃煤矿瓦斯项目开发商能够在矿井关闭后立即受益于红利瓦斯峰值。

事实证明，总的来说，根据资源总量和规模以及开发商可利用的项目数量，安装多个集装箱式燃气发动机发电机组而不是在建筑内安装固定燃气发动机装置，不仅在技术上简便，而且在经济上也实惠。如果发生废弃煤矿瓦斯资源高估的情况，固定基础设施将导致大部分投资不被使用或利用不足，负载系数和投资回报率低下。相反，如果使用集装箱式发电机，它们可以用于其他项目，或许用于另一个瓦斯储量被低估的项目。

视煤田情况而定，我们预计在任何矿群中适合废弃煤矿瓦斯项目的矿井不会超过10-20%。这类矿井通常为：a) 高瓦斯矿井，b) 在采矿过程中曾经抽放瓦斯的矿井，c) 估计不会快速渗水的矿井。

废弃煤矿瓦斯资源可能很难估算。在矿山尚未关闭时进行项目估算最为准确，因为有经验的矿工可以帮助规划，可以看到实际的瓦斯产量，并对记录进行分析。如果一个矿井已经关闭多年，那么在可能的情况下，可以对矿井工作面进行试钻，下挖测试抽吸井/抽采井，然后对矿井进行采收测试，以评估空隙大小和瓦斯资源。成熟的地质建模软件可用来评估废弃煤矿瓦斯的空隙大小和瓦斯资源。然而，模型输出取决于模型所使用的数据输入的质量，并且模型用户应该在结果中纳入不确定性因素。在英国，有一家开发商开展了大量建模工作，生成了足以建设一个20兆瓦的发电厂的储备当量。然而，在新钻的井眼与工作面相交后，获得的瓦斯量只够产生6兆瓦的电力。这形象地说明，建模工作必须与物理测试相结合。

废弃煤矿瓦斯计划已经在英国运行了20多年，没有过因利用废弃煤矿瓦斯而导致任何重大安全事故或爆炸的报道。

案例分析 4：美国—科罗拉多州 North Fork 河谷

North Fork河谷位于科罗拉多州西部的德尔塔县和冈尼森县，已有100多年的地下煤矿开采历史，其中两座煤矿于1903年开始运营，煤矿开采煤层是Somerset煤田位于下白垩统Mesaverde地层的Paonia页岩段和Bowie页岩段。截至2017年，North Fork河谷的煤炭开采量略高于3.23亿吨。这是一种优质烟煤，热能含量高(~11.6兆焦)，灰分、硫和汞的含量非常低，尤其适合发电，因为它符合美国所有现行环境标准。2003年，四个煤矿的煤炭产量达到了峰值，总产量为1,650万短吨，占全州产量的46%。2013年，该河谷具有采矿权的煤矿仅有三个：West Elk煤矿、Bowie煤矿和Elk Creek煤矿，煤炭产量约1,000万吨，雇佣员工近1,000人，排放的瓦斯达到6,650万立方米(949,952吨二氧化碳当量)。2017年，仅剩West Elk煤矿尚在运营，产量为480万短吨，占全州煤炭产量的43.4%，从通风和抽放系统排放的瓦斯有2,600万立方米(441,938吨二氧化碳当量)。Bowie煤矿目前处于闲置状态，因为该煤矿已在其现行租约的采矿计划内开采完其煤炭储量。Elk Creek煤矿因一场大火而停止了生产，之后矿主已经开始复工。

目前在North Fork河谷至少有14座废弃煤矿(表9.2)，总占地面积约为5,600公顷，从每个煤矿的煤炭总产量来看，废弃矿井总空隙容积约为9,100万立方米(图9.8)。Bowie煤矿关闭后，West Elk煤矿一旦储量开采完后也将关闭，该地区又将增加1.31亿立方米的废弃矿井空隙。

表9.2中列出的煤矿所开采的所有煤层都含有瓦斯，其中几个较大的长壁煤矿需要一个瓦斯抽放计划，以减轻矿井生产过程中通风的压力。因此，可以肯定地说，大多废弃矿井空隙中都含有浓度不同的瓦斯气体。此外，还从密封入口、通风管道和废弃钻孔中检测到渗漏的瓦斯。

North Fork Energy LLC是Vessels Coal Gas的子公司，在2016年废弃的Elk Creek煤矿经营着一个废弃煤矿瓦斯项目，每天可捕集约8,000立方米瓦斯。该项目始于2012年，当时煤矿仍在开采中，迄今已销毁瓦斯约达7,000万立方米。Vessels公司与其他各方一起，对该地区若干高瓦斯矿井抽放瓦斯的其它用途进行了调研，但由于缺乏天然气管道，而且该地区的电力销售价格非常低，因此，火炬焚烧一直是经济上可行的减排方法。不过，在科罗拉多州的可再生能源计划下，Vessels公司还通过谈判达成了一项为期15年的电力购买协议，向当地公用事业公司Holy Cross Energy出售3兆瓦的电力。

另一个火炬焚烧项目正在规划阶段；总部位于佛罗里达州南部的Hubbard Creek Coal Gas LLC正计划对从闲置的Bowie煤矿上方通风孔产生的煤矿瓦斯进行火炬焚烧。

North Fork河谷的煤矿租约全都在联邦所有的土地上，这意味着，美国土地管理局是负责所有自然资源开采的监管机构。

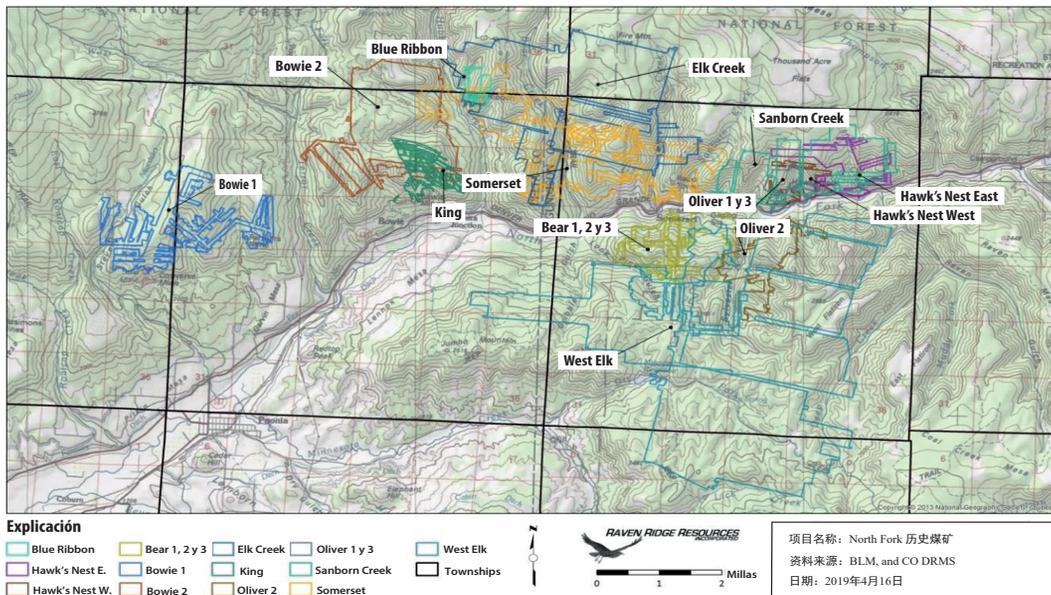
表 9.2 North Fork河谷的地下煤矿

煤矿	现状	运营年份	矿山平面 面积(百万 平方米)	矿山平 面面积 (公顷)	煤炭 总产量 (百万吨)	矿井空隙 体积(百万 立方米)	占总空隙 体积百分 比(%)
Bear #1, 2, 3	废弃	1932-1996年	6.6	659.6	9.1	6.3	2.8%
Bowie #1	废弃	1976-1998年	4.1	405.9	16.1	11.0	5.0%
Elk Creek	废弃	2002-2013年	17.4	1736.3	49.4	33.9	15.2%
King	废弃	1903-1974年	1.1	111.3	3.0	2.1	0.9%
Oliver #1 & 3	废弃	1923-1960年	1.0	96.2	1.4	0.9	0.4%
Oliver #2	废弃	1945-1954年	2.4	241.6	0.8	0.5	0.2%
Sanborn Creek	废弃	1992-2003年	6.1	607.6	16.8	11.6	5.2%
Somerset	废弃	1903-1985年	14.3	1431.9	31.2	21.4	9.6%
Hawk's Nest West	废弃	1937-1982年	1.1	113.2	2.9	2.0	0.9%
Blue Ribbon	废弃	1956-1963年 1977-1984年	0.4	36.9	0.6	0.4	0.2%
Hawk's Nest East	废弃	1975-1982年	2.0	203.3	2.0	1.4	0.6%
废弃煤矿总数			56.4	5 643.8	133.2	91.5	
Bowie #2	闲置	1997-2016年	8.3	825.7	42.6	29.3	13.2%
West Elk	作业中	1992 年至今	42.1	4 205.8	148.1	101.7	45.7%
总数			106.7	10 675.2	323.9	222.5	

资料来源：Marshall, J., 2019, 未出版数据汇编分析。

美国的一些开创性案例奠定了最终解决因试图获得捕集和利用煤矿瓦斯和废弃煤矿瓦斯的权利所产生的问题的法律框架。有两个重要的先例使出租与煤矿资源搭配的瓦斯资源权的权力和义务蒙上了阴影。第一个案例是具有里程碑意义的《AMOCO Production Company诉南方尤他部落案526 U.S. 865, 875 (1999)》，在此案中，美国最高法院裁定，根据1909年和1910年《煤炭土地法》签发的煤炭租约并不转让捕集和利用天然气的权利。内政部上诉委员会作为内政部的上诉审查机构，负责裁决与公共土地及其资源的利用和处置有关的争端，该委员会裁定，使用石油和瓦斯租约不是捕集瓦斯的适当机制。行政法官在裁决中指出，瓦斯气体(如煤矿瓦斯和废弃煤矿瓦斯)是开采煤矿时无意产生的副产品，不构成矿床，因此不能通过正常的油气租约租赁。为了纠正这一问题，美国土地管理局发布了第2017-037号指示备忘录，通过修改现有的煤矿租约并将该机制纳入新签发的煤矿租约，允许捕集和出售这种被称为废矿瓦斯的副产品瓦斯。不幸的是，第2017-037号指示备忘录被第2018-018号指示备忘录废除，原因是担心采矿企业因此受到不适当法规的约束，从而可能对煤矿开采经济产生不利影响。不过，指示备忘录并没有说美国土地管理局没有权力，并坚持认为获得捕集和利用这些副产品瓦斯之权利的行动是法律允许的和自愿的。

图 9.8 North Fork河谷作业煤矿和废弃煤矿分布图



资料来源：Raven Ridge, 2019, 未出版数据汇编分析。

美国土地管理局的固体燃料处负责监管煤炭产业，包括煤炭开采的整全部年限，从颁发许可到停止开采后解除煤炭租约。因此，固体燃料处用以批准煤矿瓦斯捕集的唯一机制是通过煤炭租约；然而，在标准的联邦煤炭租约中，并没有关于在煤炭开采过程中火炬焚烧、减排或以其他方式捕集瓦斯的文字。所以，煤炭承租人必须与美国土地管理局协商达成一项租约附录或修正案。但是，现在尚无法确定美国土地管理局将如何监管瓦斯捕集工作，或者如何从开采费的角度对瓦斯进行估值。

一旦承租人放弃煤矿租约，矿井被正式废弃，便存在更多不确定性，因为美国土地管理局没有针对废弃煤矿瓦斯的官方政策。美国土地管理局科罗拉多州主管发表声明称，废弃煤矿瓦斯捕集项目的授权属土地管理局的液体矿产处负责，而且需要石油和瓦斯租约。授权程序要求项目发起者指定石油和瓦斯销售地块，然后由美国土地管理局为指定区域下的地质层中所含各种潜在矿藏进行打包租赁销售。项目发起者必须成为销售中标者才能获得租约。但遗憾的是，州主管还表示，科罗拉多州可能更适合在其各种空气质量计划下监管废弃煤矿瓦斯的捕集工作。

在如何管理煤矿瓦斯方面缺乏明确的政策和方向，这使矿业公司得以在不解决瓦斯涌出相关问题的情况下继续经营，并成为进一步开发这一巨大资源的障碍。

2017年，North Fork 煤矿瓦斯工作组成立，其目标是针对North Fork 地区的煤矿瓦斯教育、减排和经济利用制订和实施一项综合战略。工作组的创始成员包括县级长官、该地区的矿山工作人员、科罗拉多州参议员和众议员，以及各种环保团体、电力公司及科罗拉多州各相关政府机构的代表。目前，工作组正与美国土地管理局地区办公室合作，鼓励制定官方政策，促进煤矿瓦斯的利用和/或减排。

2019年1月，科罗拉多州参议员Bennet和众议员Neguse推出了《CORE法案》，即《科罗拉多州户外娱乐和经济法案》(H.R. 823)，其中有两个条涉及煤矿瓦斯租赁(第305

条和第306条)。该法案要求开发一个试点项目，促进对科罗拉多州西部的加菲尔德县、冈尼森县、德尔塔县和皮特金县地下煤矿中的逸散瓦斯涌出的捕集、有益利用、减排和/或封存。该法案已于2019年6月6日提交国会，并已经过审议和修订，等待进一步行动。

案例分析5：美国—Elk Creek 许可区废弃煤矿 瓦斯项目

Elk Creek 许可区废弃煤矿项目(下称项目)位于美国科罗拉多州冈尼森县。Elk Creek 煤矿于2001年开业，2012年开始用煤矿瓦斯发电，是美国用煤矿瓦斯发电的最大井工煤矿。项目由Vessels Coal Gas公司(VCG)开发，目前仍由该公司运营。该矿于2016年2月关闭并废弃，煤矿瓦斯项目转变为多矿废弃煤矿瓦斯项目，参加的有Elk Creek煤矿和四个相邻的废弃煤矿—Sanborn Creek煤矿、Hawks Nest East煤矿、Hawks Nest West煤矿和Somerset煤矿。Sanborn Creek煤矿于2003年关闭，而其他三个煤矿在1980年代已经关闭。该矿群所有矿井在作业时都被认为是高瓦斯矿，尤其是Elk Creek 煤矿和Sanborn Creek 煤矿，其日均瓦斯涌出量分别为14.4万和15万立方米。

项目由背景不同的公司组成的独特合作关系发展而来。2012年，Vessels Coal Gas公司与Oxbow Mining公司(煤矿运营商)、Holy Cross Electric公司(公用事业公司)和Aspen Skiing Company公司(最终用户和出资方)联手建立了价值600万美元的煤矿瓦斯项目。该地区的批发电价很低，仅为0.03美元/千瓦时，这在美国市场属于正常，因此，项目需要环境属性提供的额外收入才能实现财务可行。

项目除了向一家农村电力公司出售电力之外，还在经济上受益于两项相互独立的州府激励政策—加利福尼亚州合规补偿计划下的碳补偿额度和科罗拉多州公共事业委员会批准的可再生能源额度。由于电价较低，因此碳补偿额度对项目的经济可行性至关重要。从2016年到2018年，项目产生了超过50万吨二氧化碳当量的减排量(碳补偿)，相当于美国公路上少了36,000辆汽车。2018年，碳补偿价值约为13美元/吨二氧化碳当量，可再生能源额度又增加大约0.01美元/千瓦时。

自1800年代后期以来，Somerset 煤田的上白垩统地层中所含的高挥发分A类和B类烟煤在多达四个煤层开采，深度从150米到850米不等。单个煤层的厚度在2至5米之间，区域内的煤碳总厚度约为13米。在山区，煤层瓦斯含量与覆盖层的厚度基本呈函数关系，较深的煤层的含量可高达10立方米/吨。五个煤矿的所有废弃矿井工作面部分重叠，形成一个废弃煤矿瓦斯影响区，可以从两大地区采收。因此，能采收瓦斯的只有两个煤矿的矿井—Elk Creek 煤矿(包括来自 Somerset 煤矿的煤矿瓦斯)和Sanborn Creek 煤矿(包括来自Hawks Nest煤矿的煤矿瓦斯)。

Elk Creek煤矿废弃后，VCG公司继续以封闭式瓦斯火炬焚烧系统运营3兆瓦的发电厂，瓦斯采收量约5万立方米/天。废弃煤矿瓦斯是从地下矿井工作面抽取的，然后通过采矿作业期间安装的瓦斯抽采泵供应给瓦斯销毁/最终使用技术。项目将三个1兆瓦(1,500马力)的Guascor稀薄燃烧燃气发动机用于发电，同时使用一个Abutec火炬焚烧系统。现场的变电站将电力接入46千伏电网，然后通过输电线输送到电力

设施和滑雪场。项目向电网输送电力的可靠性很高，在采矿作业期和废弃期，项目平均每年运行时间为90-95%。

瓦斯流量计和瓦斯分析仪可用于连续测量项目活动销毁的瓦斯量。此外，发动机运行时间和火炬温度也受到持续监控，以确保瓦斯得到销毁、碳补偿计划合规。所有数据由现场的可编程逻辑控制器收集，保存和存储在场外计算机上。

图 9.9 Elk Creek 废弃煤矿瓦斯发电项目



资料来源：Coté, M., 2016。

该项目预计将运营至2026年。2019年至2020年，VCG公司计划将项目扩展到目前没有采收瓦斯的废弃矿井的其他区域。变电站的容量最多可将9兆瓦的电力输入电网。

在项目的开发、许可和六年的运营过程中，Vessels Coal Gas公司总结了一些经验教训。

- 需要考虑限制最终利用或销毁设备中燃烧煤矿瓦斯产生的标准污染物(即氮氧化物、一氧化碳等)的许可要求；
- 需要在各级监管机构开展教育和宣传，以了解单个项目的煤矿瓦斯和废弃煤矿瓦斯排放量及碳中和；
- 必须认识到瓦斯产量预测的不确定性，在作经济评估时纳入高一中一低各种情况；
- 在介绍项目时，必须指出次生环境效益，如排放减少的瓦斯不仅是一种温室气体，还是一种挥发性有机化合物和臭氧化学前体；

- 必须指出减少短期气候污染物的好处，因为根据气专委第五次评估报告，瓦斯的全球变暖潜势为86 (20年)；
- 在项目开发过程中吸引当地利益相关方和公司的参与有其益处。

附录

附录 1：废弃煤矿瓦斯储层特点检测办法

储层特点	检测	结果
水位与水回升	<ul style="list-style-type: none"> 在地下储层关键点进行水位监控。可能需要勘测井眼来补充现有的监控设施 改变现有排水方案，以评估工作面所有部分的水回升程度 进行水质分析 	<ul style="list-style-type: none"> 确认水位，或者在某些情况下确认水位没有上升到特定水平 明确水回升率 说明地下工作面的导水程度 考虑水质问题和排放办法
开放的空隙	<ul style="list-style-type: none"> 监测被动通风口，观察瓦斯压力、温度随时间的变化 	<ul style="list-style-type: none"> 检测结果可以说明废弃煤矿瓦斯储层的体积，但不考虑煤层解吸瓦斯的情况 压力波动大但流量较低可能表明空隙很小，因此可能是高阻力系统或已发生浸水
进气	<ul style="list-style-type: none"> 进行主动瓦斯泵测试以监测抽采的瓦斯的氧气浓度 在原矿井入口周围使用浅尖探测来探测煤矿瓦斯向地表的渗漏 在矿井入口附近进行冒烟测试 监控站之间进行互动，提示运移路线 	<ul style="list-style-type: none"> 在抽采的瓦斯中检测到氧气表明废弃煤矿瓦斯储层出现进气 可以进行更多测试和检查，以确定可能的渗漏源 进气会稀释瓦斯并降低可向矿井施加的吸力 需要对原矿井入口进行工程修复 发现抽采管道系统的潜在问题 结果可以表明修复工程是否奏效
地表与地下的连通性	<ul style="list-style-type: none"> 测量地表和地下之间的压力损失，可用主动泵测试澄清结果 使用主动瓦斯泵测试确认连通的完整性 	<ul style="list-style-type: none"> 可以计算出地表与地下连通的阻力，并可以通过实地测试确认阻力值 压力损失过多可能表明地下连通不良，这会阻碍瓦斯抽采，并可能妨碍达到预设速率
地下导水性	<ul style="list-style-type: none"> 进行主动泵测试，从工作面抽采瓦斯 使用离瓦斯抽采点一定距离的监测站来确认抽吸压力的范围。在矿井关闭前，可用矿井通风机进行此项测试 	<ul style="list-style-type: none"> 确认工作面的导水性。抽吸压力的快速增加和流量减少可能表明部分堵塞或空隙极小 确认主要矿井巷道的状态和导水性
瓦斯成分	<ul style="list-style-type: none"> 使用便携式仪器监控瓦斯成分随时间的变化。检测到： <ul style="list-style-type: none"> 瓦斯 二氧化碳 氧气 高级碳氢化合物 硫化氢 其他气体 流量测量 压力测量 	<ul style="list-style-type: none"> 监测结果和瓦斯分析将提供瓦斯(不仅仅是瓦斯)的热值 热值单位应用于财务评估 识别可能导致运营/维护问题或不可接受的环境排放的潜在污染物 发现不受控制的进气 瓦斯回收方面的一般储层特征

附录 2：废弃煤矿瓦斯预可行性研究的关键要素

- 废弃矿井瓦斯方案及其位置说明，调查、开发和生产时间表以及决策阶段的暂定日期。
- 矿井关闭之前和之后的瓦斯流量监测结果、瓦斯抽放历史和关闭日期(如果矿井已经废弃)。可以从矿井运营期间进行的调查中获得有关矿井关闭后的瓦斯产生潜力的宝贵信息，包括煤层瓦斯含量、瓦斯抽放流量、通风井排出空气中的瓦斯流量以及受主风机影响的程度，以此作为与原有浅层工作面的连通性指标。
- 根据工作面上方剩余的卸压煤量和煤层瓦斯含量对瓦斯资源进行的初步估算。这需要用一个具有代表性的地质剖面记录所有已开采和未开采的煤层。在估算可能采收的瓦斯体积(废弃煤矿瓦斯储量)时，应考虑抽采过程中的水回升和可达到的抽吸压力。
- 有记录的矿井入口(竖井、斜井、平硐和辅助井眼)的数量、位置和细节。
- 对存在未记录的矿井入口的可能性的评估。
- 密封竖井和巷道使其达到适合废弃煤矿瓦斯抽采的气密标准的成本；这与许多发展中国家的传统密封做法存在本质区别。应考虑到距离合格地面(岩头)矿井入口截面区域的深度和需要移除的任何现有地面建筑。废弃煤矿瓦斯计划的经验表明，所产生的问题往往与密封件设计不良导致的进气有关。
- 为证明密封良好以及瓦斯产量和质量而拟进行的生产测试计划的细节。
- 在矿井关闭之前，为最大程度获取瓦斯而开展的地下工程措施，例如，通过使水流改道和安装管道、使用现有管道，在竖井中放置密封件，以确保输送瓦斯通过可能发生浸水的区域。
- 关于流入矿井的水源和水量的详细信息，以及在关闭矿井时控制水量的办法。这可能需要在安装和使用排水装置，其费用将由废弃煤矿瓦斯项目承担。
- 确定任何现有的地面基础设施、地面通道以及清理和准备场地的费用。
- 对瓦斯利用方案、现有瓦斯储存和分配基础设施、可能的工业和商业客户以及当地当前电价和中低热值瓦斯进行的评估。该项研究还应报告是否需要任何新的基础设施以及相关成本。
- 使用其他来源的瓦斯(如煤矿瓦斯或天然气)补充供应的做法。
- 在当地增加就业、工作机会流失和经济刺激方面可能产生的社会影响；废弃煤矿瓦斯计划可能是已关闭矿井的第一个再开发项目。
- 通过控制地表和大气中的瓦斯排放实现的环境影响和利益。
- 安全问题。
- 许可和土地使用权、矿产和瓦斯所有权。

- 包括所有土木工程和测试计划在内的全面可行性研究的初步财务评估和估计成本。
- 查明的不确定性因素和知识空白点。
- 拟议的调查和监控策略。

附录 3：矿井关闭时对矿井入口的工程处理手段

背景	问题	工程考虑因素
在岩头建井帽	<ul style="list-style-type: none"> 井帽深度受限于地表入口，需要支持深度挖掘以便进入 进行挖掘的工作区 井帽基面的地质和技术特性 	<ul style="list-style-type: none"> 进行挖掘以便进入基面 在岩头合格地层上建造的井帽，无稳定性问题 井帽嵌入天然地层，形成有效密封，可以使用额外的密封剂来防止井帽下的渗漏 如果需要，可以在井帽周围建造额外的低渗透屏障
在深填井壁上建井帽	<ul style="list-style-type: none"> 填充材料的地质和技术性质及深度 在井壁上构建井帽的稳定性 对通风管道作密封处理的进入通道 	<ul style="list-style-type: none"> 在井壁和填充材料上构建井帽的稳定性和实用性 需要挖掘的深度有限 为构建有效密封件需要在井帽和井壁周围建造额外外围屏障 对通风管道进行密封处理
对立井进行止浆塞处理	<ul style="list-style-type: none"> 填充材料的地质技术性质和深度 构建止浆塞的稳定性 进入通风管道的能力 止浆塞的深度和厚度 需要填充竖井来支撑止浆塞的模板 	<ul style="list-style-type: none"> 放置止浆塞时不能降低井壁的渗透性 安装穿过止浆塞的管道 井壁附近需要额外支撑来支撑止浆塞 提供额外保护屏障和对通风管道作密封处理的可选方法
对斜巷入口作密封处理	<ul style="list-style-type: none"> 距离岩头的深度以及填充材料的地质和技术特性 门户建设方法 对地表水进入的控制 进入限制 	<ul style="list-style-type: none"> 将支撑风墙嵌入天然地层，以形成有效的支撑和密封 风墙厚度和填充材料的性质 必须防止风墙处积水 对风墙和附近的地层进行灌浆 通过风墙对管道进行分级

附录 4：废弃煤矿瓦斯项目建设和运营所需设备和服务

设备/技术	服务/活动
<ul style="list-style-type: none"> ■ 地面钻井 — 包括打通瓦斯生产井眼的导向技术和随钻套管技术 ■ 有效密封矿井入口的瓦斯膜及其他产品和技术 ■ 灌浆注入 ■ 排水泵、排水管道和控制系统 ■ 水处理 ■ 地面瓦斯抽采泵和控制系统 ■ 固定和可移动监控 ■ 瓦斯收集管道和控制阀 ■ 带有远程报警装置的操作和安全监控系统 ■ 瓦斯压缩装置 ■ 电气开关设备 ■ 远程通信系统 ■ 瓦斯成分(热值)和流量的测量 ■ 测量设备 ■ 瓦斯处理和清洁工艺 ■ 为检测泄漏而在瓦斯输送前添加的气味 ■ 利用设备 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 确定项目的性能要求 ■ 确定设备规格 ■ 设计土木工程、对地表入口进行处理、准备场地和施工、安装废弃煤矿瓦斯设备和相关基础设施 ■ 准备合同 ■ 评估投标 ■ 监督现场工程 ■ 编制健康与安全计划 ■ 审查信息 ■ 调试和解决问题 ■ 制定健康与安全政策和计划 ■ 签订瓦斯销售和电力购买协议 ■ 确定管理结构 ■ 制定操作程序 ■ 制定紧急(包括呼叫)程序 ■ 制定审计和审查政策 ■ 监控环境 ■ 制定检修计划 ■ 管理项目 ■ 提供技术支持 ■ 联络客户 ■ 发展业务 ■ 进行财务监控

参考文献

- A-TEC ANLAGENTECHNIK. Data provided on Lohberg mine and power generation station.
- A-TEC ANLAGENTECHNIK. Data provided on AMM Projects in the Ruhr Valley.
- ROBINSON, A., Chief Operations Officer, Arevon Energy. Data provided on Harworth Mine Emissions Forecast (Estimated Curve Showing Bonus Peak Gas).
- BACKHAUS, C., (2017). Experience with the utilization of coal mine gas from abandoned mines in the region of North-Rhine-Westphalia, Germany. Presentation at Workshop on Coal Mine Methane and Abandoned Mine Methane in the context of Sustainable Energy. United Nations Economic Commission for Europe. Geneva, Switzerland. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7.Mr._Backhaus.pdf.
- BUTLER, N., HEL-East Ltd. Data on, and pictures of Stillingfleet Mine and Harworth Colliery.
- CEC, (1998). Practical control of gas emission risks to the surface environment following mine closure. Draft Final Report on ECSC Research Project 7220-AF/014.
- COTÉ, M., R. COLLINGS AND C. TALKINGTON, (2003). Methane Emissions Estimates & Methodology for Abandoned Coal Mines in the United States, in 2003 International Coalbed Methane Symposium Proceedings, May 5-9, 2003.
- COTÉ, M., (2016). Coal Mine Methane in Colorado Market Research Report, Retrieved from https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/atoms/files/Coal%20Mine%20Methane%20Report%202016%20FINAL%203_2016.pdf, p. 7.
- COTÉ, M., (2018a). Maximizing Value of Abandoned Mine Methane, Global Methane Forum, Toronto, Canada, 17 April 2018.
- COTÉ, M., (2018b). Significance of Abandoned Mine Methane Emissions and Preparing for Projects, Global Methane Forum UNECE Side Event, Toronto, Canada, 16 April, 2018.
- COTÉ, M. (2018c). Maximizing the value of abandoned mine methane [slide 15, PowerPoint presentation]. Retrieved from: <https://www.globalmethane.org/gmf2018/presentations/0417MaximizingValueofAMM.pdf>.
- CREEDY, D.P. AND KERSHAW S. (1988). Firedamp prediction – a pocket calculator solution. The Mining Engineer. Inst of Mining Engineers, Vol. 147, No. 317, Feb., pp. 377-379.
- CREEDY, D.P (1985). The origin and distribution of firedamp in some British coalfields. University of Wales, Dec 1985.
- CREEDY, D. P. AND K. GARNER (2002). Coal Mine Methane Extraction and Utilisation from Abandoned Coal Mines Workshop, UK-China Cleaner Coal Technology Transfer, UK Department of Trade and Industry, 21 May 2002, Beijing.
- DEMIR, I., D. MORSE, S. D. ELRICK, AND C. A. CHENOWETH, (2004). Delineation of the coalbed methane resources in Illinois: Illinois State Geological Survey Publication, Circular 564, p. 66.
- DENYSENKO A., M. EVANS, N. KHOLOD, N. BUTLER, V. ROSHCHANKA, (2019). Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. EPA Publication No 430R19003. March 2019.
- DODT, J. AND M. DRECKER, (2018). Multimedia Documentation of the Coal-Mines in the Ruhr District, International Cartographic Association, ICC Proceedings, p. 8.
- EPA, (2015). Coal Mine Methane Country Profiles, Global Methane Initiative. Available at https://www.globalmethane.org/documents/Toolsres_coal_overview_fullreport.pdf.
- EPA, (2017). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2015., U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/2017_complete_report.pdf.
- EPA, (2019). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2017., U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2017>.
- EPA, (2019). Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA Publication No: 430R19003. March 2019. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-03/documents/legal-regulatory-status-amm_epa.pdf.

- FERNANDO, S., (2011). Update of Estimated Methane Emissions from UK Abandoned Coal Mines, WSP Environment and Energy, Department of Energy and Climate Change, 25th May 2011.
- GLOBAL METHANE INITIATIVE (2016). International Coal Mine Methane Projects List, Global Methane Initiative. Available at <https://globalmethane.org/sectors/index.aspx?s=coal>.
- 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, IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151.
- INERIS, Colletif, (2006). L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. INERIS-DRS-06-51198/R01, Available at <http://www.ineris.fr/guide-pprm>.
- INERIS, 2019. Post-Mining Hazard Evaluation and Mapping in France. Ineris- DRS-19-178745-02411A, www.ineris.fr/en/post-mining-hazard-evaluation-and-mapping-france.
- KERHAW. S., (2005). Development of a methodology for estimating emissions of methane from abandoned coal mines in the UK, White Young Green for the Department for the Environment, Food and Rural Affairs, (GA01039), 2005.
- KHOLOD N., M. EVANS, R. C. PILCHER, M. COTÉ, R. COLLINGS, (2018). Global CMM and AMM Emissions: Implications of Mining Depth and Future Coal Production, Pacific Northwest National Laboratory; Raven Ridge Resources; Ruby Canyon Engineering, Global Methane Forum, Toronto, 16 April 2018.
- LIU, W., (2018). Status and Potential of AMM Project Development in China, Global Methane Forum, Toronto, 16 April 2018.
- MARSHALL, J., 2019. Data provided on AMM Projects in the Ruhr Valley modified after data provided by Mingas-Power GmbH and A-TEC Anlagentechnik GmbH and compiled by C. Backhaus.
- MARSHALL, J., 2019. Unpublished data compilation and analysis (data provided by Mingas-Power GmbH and A-TEC Anlagentechnik GmbH and compiled by C. Backhaus).
- MINGAS-POWER. Data provided on Lohberg mine and power generation station.
- MOULIN, J., (2019). Personal interview with R.C. Pilcher, 2 July 2019.
- PILCHER, R.C., (2019). Unpublished data modelling and analysis.
- UNECE, (2016). Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines. 2nd edition. ECE ENERGY SERIES No. 47. United Nations Economic Commission for Europe. Geneva, Switzerland. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/cmm/docs/BPG_2017.pdf.
- UNFCCC, (2017). Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed data by Party, United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at: http://di.unfccc.int/detailed_data_by_party.
- RAVEN RIDGE, 2019. Unpublished data compilation and analysis.
- OSTAPOV, K., (2008). "Consequences of Closure of Unprofitable Mines of the Karaganda Coal Basin for the Purposes of Ecologic and Technical Safety// Последствия закрытия убыточных шахт Карагандинского угольного бассейна в целях экологической и технической безопасности." К.Н. Оспанов // Охрана труда Казахстана. – 2006. – №6(6). – С.38-41.
- WEATHERSTONE, N., (2008). International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves - Status, Outlook and Important Issues. World Mining Congress & Expo 2008. Available at: http://www.criirco.com/isr_mineral_resources_reserves0908.pdf.

