

煤炭洁净利用与煤化工技术丛书

煤矿区煤层气 利用技术

吴立新
赵路正
主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

● 煤炭洁净利用与煤化工技术丛书

煤矿区煤层气利用技术

主编 ● 吴立新 赵路正

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

煤矿区煤层气利用技术/吴立新, 赵路正主编.
—北京: 中国石化出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-5114-2724-3

I. ①煤… II. ①吴… ②赵… III. ①煤层—地下气
化煤气—资源利用—中国 IV. ①P618.110.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055955 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或
者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100014 电话: (010)84271850

读者服务部电话: (010)84289974

http: //www. sinopec-press. com

E-mail: press@ sinopec. com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

850 × 1168 毫米 32 开本 3.25 印张 78 千字
2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
定价: 15.00 元

《煤矿区煤层气利用技术》 编委会

主编 吴立新 赵路正

编者 任世华 樊金璐 罗 腾 曲思建
郝继锋 余 洁 肖乃友 安 斌
段 静 王春晶 陈贵锋 刘立麟
刘 敏 王 琳 王 晶 王 通

The top of the page features a detailed line-art illustration of an industrial facility, including several tall distillation columns, storage tanks, and piping, set against a background of diagonal hatching lines.

前言

Preface

煤层气利用对增加清洁能源供给、改善大气环境、保障煤矿安全等具有重大战略意义。在全社会的高度关注和政府的大力倡导下，中国煤层气利用取得较大进展。2012年，中国煤层气利用量 $58 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，比2006年增长了4.04倍。但是我们也清醒地认识到，中国煤层气利用率偏低，2012年井下抽采利用率33.3%，每年约 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 煤层气空排到大气中，与中国丰富的煤层气资源极不匹配。因此，加大煤层气利用关键技术和装备的研发和攻关势在必行。

煤矿区煤层气是煤层气开发利用的主要方式，根据国内外煤矿区煤层气利用技术发展趋势，不同浓度煤层气均能实现有效利用。中高浓度煤层气(甲烷浓度大于30%)易实现利用，逐渐形成民用、发电、工业燃料、CNG作汽车燃料、液化、化工原料利用技术体系，但装备大型化、成套化、高效化、运行稳定性需突破。低浓度煤层气(甲烷浓度在1%~30%)在安全输送及发电、变压吸附提浓、深冷液化提浓、掺烧方面进展较大，仍需加强攻关，加大示范力度。极低浓度煤层气(又称乏风，甲烷浓度小于1%)在氧化燃烧供热或发电已开展工业试验，尚处于起步阶段，需进一步加大研究与示范。

围绕煤矿区煤层气利用技术发展需求，本书系统梳理了多种煤层气利用技术的技术原理、技术特点、发展现状以及技术发展趋势，重点涵盖了煤矿区煤层气作民用燃料技术、煤矿区煤层气发电技术、煤矿区煤层气作工业燃料技术、CNG作汽

车燃料技术、煤矿区煤层气浓缩净化富集技术、煤矿区煤层气液化技术、煤矿区煤层气作化工原料技术。

本书可为能源类生产和使用企业及煤层气相关技术人员了解最新煤层气利用技术动态、技术发展和示范进展情况提供重要参考和技术指导，为推动煤层气利用技术的进步起到积极促进作用。随着煤层气利用技术的进步，相关内容也在不断更新。因研究人员水平有限，谬误之处在所难免，恳请专家同仁批评指正。



目 录

Content

第1章 绪 论	(1)
1.1 煤矿区煤层气涵义	(1)
1.1.1 煤层气组分分析	(1)
1.1.2 煤层气成因分析	(2)
1.1.3 煤层气特征及性质分析	(4)
1.1.4 煤矿区煤层气涵义	(6)
1.2 煤矿区煤层气利用的战略意义	(7)
1.2.1 保障煤矿安全生产,提升国际形象	(7)
1.2.2 优化能源结构,增加清洁能源供给	(9)
1.2.3 有效减排温室气体,改善大气环境	(10)
1.2.4 可持续发展,成为国民经济新增长点	(10)
1.3 煤矿区煤层气利用方式	(11)
第2章 煤矿区煤层气作民用燃料	(14)
2.1 煤矿区煤层气民用概况	(14)
2.2 民用煤层气质量要求	(16)
2.3 民用煤层气量	(17)
2.4 储气罐	(18)
2.5 输配管网	(24)
2.6 经济分析	(27)
第3章 煤矿区煤层气作发电燃料	(29)
3.1 煤矿区煤层气发电概况	(29)

3.2	中高浓度煤层气发电技术	(31)
3.3	低浓度煤层气发电技术	(39)
3.3.1	低浓度煤层气安全输送与发电技术	(39)
3.3.2	低浓度煤层气气水二相流安全输送及 发电	(41)
3.4	极低浓度煤层气发电技术	(42)
3.4.1	流转反应器技术(逆流氧化技术)	(43)
3.4.2	贫烧燃气轮机技术	(47)
第4章 煤矿区煤层气作工业燃料		(51)
4.1	中高浓度煤层气作锅(窑)炉燃料	(51)
4.2	极低浓度煤层气作辅助燃料助燃	(52)
4.2.1	常规粉煤发电站助燃	(52)
4.2.2	废煤/尾煤/矿井乏风在旋转炉内混合 燃烧	(53)
4.2.3	废煤/尾煤/矿井乏风在流化床内混合 燃烧	(53)
4.2.4	内燃发动机助燃	(54)
4.2.5	常规燃气轮机助燃	(54)
4.2.6	极低浓度煤层气助燃技术发展趋势	(55)
第5章 压缩煤层气作汽车燃料		(56)
5.1	压缩煤层气汽车原理概述	(56)
5.1.1	CNG 汽车改装原理	(56)
5.1.2	CNG 汽车供气系统的工作原理	(57)
5.1.3	CNG 汽车对气源的要求	(57)
5.1.4	加气站工艺	(58)
5.2	煤层气作汽车燃料技术发展	(58)
5.2.1	天然气作汽车燃料发展概况	(58)
5.2.2	煤层气作汽车燃料发展概况	(59)
5.2.3	煤层气作汽车燃料案例分析	(61)

第6章 煤矿区煤层气浓缩提纯技术	(62)
6.1 低温深冷分离技术	(62)
6.2 变压吸附浓缩技术	(63)
6.2.1 技术原理	(63)
6.2.2 低浓度煤层气除氧浓缩技术	(64)
6.3 气体膜分离技术	(72)
6.4 常用浓缩提纯中的应用比较	(73)
第7章 煤矿区煤层气液化技术	(74)
7.1 煤矿区煤层气液化技术发展概况	(74)
7.2 高浓度煤层气液化技术	(76)
7.3 含氧煤层气低温分离液化技术	(78)
第8章 煤矿区煤层气作化工原料	(81)
8.1 煤矿区煤层气作化工原料发展概况	(81)
8.2 煤层气制甲醇	(83)
8.3 煤层气制甲醛	(85)
8.4 煤层气制炭黑	(86)
8.5 煤层气制氢	(88)
8.6 煤层气制合成氨	(90)
8.7 燃料电池发电	(91)
参考文献	(93)

第1章 绪论

1.1 煤矿区煤层气涵义

1.1.1 煤层气组分分析

根据《中国小百科全书》中有关煤成气^①定义可知,煤成气可分为两个大类,即煤生气和煤层气。其中,煤生气是由碳质页岩、煤层等生气母岩内运转出来的那部分煤成气,可分为分散煤生气和集中煤生气两个小类,后者可聚集成气藏,类似于天然气气田或气藏,具有较高的工业价值。煤层气又称煤矿瓦斯、煤层甲烷,是基本上未逸散运移出煤层生气层的、以吸附或游离状态赋存于煤层及周围岩石的煤成气。

与煤生气相比,煤层气更多的吸附于煤层中,因此,在进行煤层气开采时,出现天然气气井或油井“井喷”现象的情况并不多见,这无疑增加了煤层气开采利用的难度。

煤层气组分以甲烷为主,还包括少量重烃气体(如乙烷、丙烷、丁烷、戊烷)以及二氧化碳、氮气、氢气和惰性气体等非烃类气体。据 A. R. Scott 对产自美国 1380 多口煤层气井的 985 个气样的分析结果,煤层气平均气成分为:甲烷占 93.2%、重烃占 2.5%、二氧化碳占 3.1%、氮气占 1.1%。

虽然煤层气主要成分是甲烷,但是在不同盆地,同一盆地的不同部分、不同煤层、不同埋深、不同煤阶以及不同煤层气

^① 煤成气指煤或煤系地层形成的天然气,即含煤页岩中的腐植型(干酪根Ⅲ型)有机物在成煤过程中形成的以甲烷为主的天然气。一般煤成气的甲烷含量>95%、重烃<5%、含氮气7%~16%和二氧化碳<5%。

井之间，煤层气组分往往出现较大差异。表 1-1 显示了不同种类煤层气组分数据，便于对比，亦列举了常规天然气的组分。

表 1-1 煤层气及常规天然气组分数据表 (据孙茂远, 1998)

气体种类	气样地点	层位	深度/ m	气体组分/%				煤阶
				CH ₄	C ₂₋₅	CO ₂	N ₂	
井下抽采 煤层气	辽宁铁法大隆	J ₃ -K ₁	330	93.02		1.14	5.74	气煤
	黑龙江鹤岗南山	J ₃ -K ₁	281	66.55		0.4	33.71	气煤
	内蒙古包头河滩沟	J ₁₋₂	261	79.46	4.75	0.1	15.63	焦煤
	四川重庆天府	P ₂	780	89.12	8.75	0.64	1.5	焦煤
	河北开滦赵各庄	C ₃	965	92.45		5.64	1.9	无烟煤
	山西阳泉五矿	C ₃	482	82.06	0.01	0.79	17.05	无烟煤
地面煤 层气	江西丰城曲式 1 井	P ₂	960	94.62	3.49	0.38	1.51	焦煤
	河北人城大参 1 井	P ₁	1205 ~ 1271	97.94		0.23	1.83	焦煤
	美国黑勇士盆地	C ₃		96.05	0.01		3.45	气-焦煤
常规天 然气	冀中坳陷泉 20 井	E _{s1}	2180 ~ 2251	86.36	10.01	1.2	1.55	
	冀 骅 坳 陷 岗 深 13 井	E _{s3}	3809 ~ 3960	76.27	19.07	3.31	0.17	
	四川盆地卧 18 井	C	3805 ~ 3830	98.04	0.6	1.07	0.28	
	四川盆地威 28 井	Z ₂ ~ Z ₃	2988 ~ 3316	86.41	0.09	4.48	7.62	

从表 1-1 中可以看出，煤层气与天然气的气体组分相似，均以甲烷为主。不同之处在于：煤层气含 C₂ 以上的重烃很少，天然气一般含有 C₂ 以上的重烃。

1.1.2 煤层气成因分析

煤层气成因学说较多，但目前多数学者认为煤层气是在煤化作用过程中形成的。煤层气的成因过程为：植物体经过微生物的生物化学作用转化为泥炭，历经以物理化学作用为主的地质作用，向不同程度变质煤转化(如表 1-2 所示)，在煤化作用过程中，伴随成煤物质复杂的物理化学变化，同时生成以甲烷为主的气体。

根据气体生成机理的不同，可以将煤层气的成因类型分为

生物成因和热成因两类。

1. 生物成因气

生物成因气主要形成于煤化作用的未成熟期，它是有机质在微生物降解作用下的产物。生物成因气有原生和次生两种类型。

表 1-2 成煤过程中甲烷(瓦斯)生成量试验情况 m^3/t

研究单位	变质阶段	未变质煤	低变质煤		中变质煤			变质煤	
		褐煤	长焰煤	气煤	肥煤	焦煤	瘦煤	贫煤	无烟煤
煤科总院 西安 研究院	阶段 产气量	38 ~ 68	3 ~ 25	10 ~ 54	27 ~ 102	55 ~ 170	108 ~ 246	134 ~ 333	268 ~ 393
	累计 产气量	38 ~ 68	41 ~ 93	48 ~ 122	65 ~ 170	93 ~ 238	146 ~ 314	172 ~ 401	306 ~ 461
石油 开发 规划 院	阶段 产气量	38 ~ 68	4 ~ 31	7 ~ 58	9 ~ 108	48 ~ 176	86 ~ 230	114 ~ 321	168 ~ 390
	累计 产气量	38 ~ 68	42 ~ 99	45 ~ 126	64 ~ 176	86 ~ 244	124 ~ 298	152 ~ 389	206 ~ 458

(1) 原生生物气

原生生物气是在煤化作用早期(镜质组反射率 $R_0 < 0.5\%$)，在较低的温度(一般低于 50°C)，煤层埋藏较浅($< 400\text{m}$)以及细菌参与和作用等条件下，微生物对有机质发生分解作用而形成以甲烷为主的生物成因气。

(2) 次生生物气

次生生物气的地球化学组成与原生生物气相似，主要差别在煤岩的热演化阶段。在次生生物气的形成阶段，镜质组反射率 R_0 值范围很宽(一般为 $0.3\% \sim 1.5\%$)，且煤层一般被抬到浅部。

2. 热成因气

热成因气主要形成于煤化作用的成熟期和过成熟期。它是在温度和压力作用下,煤有机质发生一系列物理化学变化,随着煤变质程度不断加深,煤层由低阶向高阶演化,煤中碳含量丰富起来,开始进入热成因气阶段。根据生成阶段不同,热成因气可分为热降解气和热裂解气。

(1) 热降解气

热降解生气阶段主要发生在煤化作用的长焰煤到瘦煤阶段(镜质组反射率 R_0 为 0.5% ~ 1.9%)。这一阶段发生的化学反应主要是在热力作用下($<250^{\circ}\text{C}$)生成大量烃类物质,并且以生气为主。气态烃组成仍然以甲烷为主,同时重烃含量逐渐增加。

(2) 热裂解气

热裂解生气阶段主要发生在煤化作用的瘦煤到无烟煤初期阶段(镜质组反射率 $R_0 > 1.9\%$)。这一阶段在高温($>250^{\circ}\text{C}$),残余的干酪根、液态烃和部分重烃发生裂解生气。所生气体仍然以甲烷为主,重烃含气量较低。

与煤层气成因相比,天然气成因要复杂的多。天然气根据产状可分为气藏气^①、气顶气^②、溶解气^③等类型,它的成因理论学说目前可归为有机成因气和无机成因气两大学派。前者主张天然气是在地质历史上由分散在沉积岩中的生物有机体转化而成的,有机成因气又可分为生物成因气、油型气、煤型气。后者认为天然气是在地下深处高温高压条件下由无机物变成的。目前也有学者认为天然气两种成因兼具,只是一种为主,一种为辅。

1.1.3 煤层气特征及性质分析

对煤层气而言,煤层既是气源岩,又是储集岩。煤层具有一系列独特的物理、化学性质和特殊的岩石力学特征,因而使

- ① 基本上不与石油伴生,通常单独聚集成矿藏的天然气。
- ② 与石油共存于同一油气藏中,并呈游离态存在于油气藏顶部的天然气。
- ③ 溶解于石油或水中的天然气。

煤层气在贮气机理、气井的产气机理和产量动态等方面与常规天然气有明显差异(如表1-3所示),表现出明显的特征。

1. 吸附性

吸附性指煤层吸附煤层气的能力,即单位质量煤中所含煤层气的体积,包括吸附煤层气量和游离煤层气量。煤层气的赋存状态包括吸附态和游离态,但以吸附相态为主,达95%以上。

表1-3 煤层气与常规天然气特征对比

对比项目	煤层气	常规天然气
组 分	甲烷为主	甲烷和重烃等烃类气体
气体的贮存	气体的绝大部分被吸附在煤的内表面上,孔隙空间中很少或没有游离气	气体以游离态贮集在岩石的孔隙空间中
埋藏深度	埋藏浅,一般在300~1500m	埋藏深,≥1500m
渗透性	渗透率低,井距小	渗透率高,井距大
单井产量	单井产量低(几千m ³ /d)	单井产量高(~几十万m ³ /d)
生产期限	生产期限长(20~30年)	生产期限短(8~10年)
气井生产状况	气产量随时间而增加,直至达最大值,然后下降。起初主要是水,气水值随时间而增大	气产量开始很大,然后随时间而降低。起初,没有水或很少水产出,气水值随时间而减少
增产措施	必须压裂,提高单井产量	气井压力大,自喷
生产方式	排水—降压—产气	储层压力流向井筒

这与天然气在常规储集层中以游离相态存在的储气方式截然不同。对于常规天然气来讲,其储层以砂岩、页岩等为主,赋存于空隙之中,在常规的压力和温度条件下,主要呈现游离态。

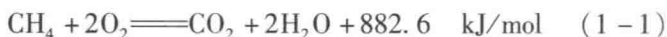
2. 渗透性

煤层渗透性决定着煤层气在煤层中流动难易程度,是本煤层抽采煤层气难易程度的重要指标。与美国煤层相比,中国煤

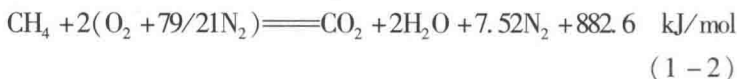
层渗透率较低, 平均在(0.002 ~ 16.17) mD^①。其中渗透率小于0.1 mD 的占 35%; 0.1 ~ 1.0 mD 的占 37%; 大于 1.0 mD 的占 28%; 大于 10 mD 的很少。这也增大了煤层气采收的难度。

3. 爆炸性

当甲烷和空气混合到一定浓度(5% ~ 16%), 有火源(温度 650 ~ 750℃)存在时, 即可发生爆炸, 同时伴有强大声响、高温火焰以及高压冲击波等, 其反应式如式(1-1)和式(1-2)所示, 将会危及煤矿正常生产与矿工的生命安全。



或



中国煤矿安全生产规范中明确规定, 在煤炭生产过程中必须严格控制生产工作面以及回风巷瓦斯浓度, 避免出现瓦斯堆积引起瓦斯事故的发生。

4. 热值高

煤层气平均热值与常规天然气热值相当。国外的煤层气热值介于 36.25 ~ 39.46 MJ/m³, 中国煤层气高位发热量值介于 33.64 ~ 36.92 MJ/m³, 与国外煤层气比较, 相对低一些。

1.1.4 煤矿区煤层气涵义

在煤层气开发中, 结合煤炭生产布局开展的煤层气开发活动是瓦斯区煤层气开发。开发方式包括地面预抽、井下预抽、采煤过程中抽和采煤后抽等。煤矿区煤层气开发是中国煤层气开发的一种重要形式。

目前开发煤层气的企业主要有两类:

一类是煤炭企业, 出于煤矿安全与能源资源利用的考虑, 围绕煤矿安全生产, 采取一切可以采取的措施手段, 先

① mD 为毫达西符号, 是渗透率常用单位。1 mD = 0.987 × 10⁻³ μm²。

抽气后采煤，在采煤前尽可能短的时间快速有效降低煤层和围岩中煤层气含量，使原本高瓦斯矿井转变为低瓦斯矿井，防治瓦斯灾害，同时实现采煤采气一体化，达到煤矿区煤层气抽采利用。

另一类是专业煤层气公司，以中联煤、中石油、中石化为代表，侧重能源开发，以规模化长期稳定生产煤层气，实现商业利益为目的，主要通过勘探选区寻找到煤储层条件好、有煤层气开发潜力的有利区块，进行地面大规模勘探开发，通过售气获得直接经济利益。

1.2 煤矿区煤层气利用的战略意义

1.2.1 保障煤矿安全生产，提升国际形象

与发达国家以石油、天然气为主的能源结构相比，中国能源结构以煤炭为主。伴随煤炭开采，煤矿安全问题一直是国内外关注的焦点。与世界各主要产煤国煤矿安全状况相比，中国煤矿安全生产形势十分严峻。2001年全国煤矿发生各类煤矿事故3802起，死亡5670人；“十一五”至“十二五”期间，原煤产量逐年递增，事故起数、死亡人数均大幅下降，但形势依然严峻。每年发生煤矿灾害事故由2005年的3306起降至2012年的779起，下降了76.43%，死亡人数由2005年的5938人降至2012年的1384人，下降了76.69%。2001~2012年中国煤矿事故死亡人数及事故起数如图1-1所示。

1980~2000年期间，美国百万吨死亡率从0.17下降到0.03，俄罗斯在1.09~0.44间变化，印度由1.25下降到0.42。中国的百万吨死亡率由1980年的8.17下降到2000年的5.0，2012年降为0.374。虽有下降但与国外还存在很大差距，中国煤矿的百万吨死亡率仍然是世界主要采煤国中最高的。开采条件复杂的四川、云南、重庆、贵州地区百万吨死亡率分别

为 3.02、1.10、2.78 和 0.65。

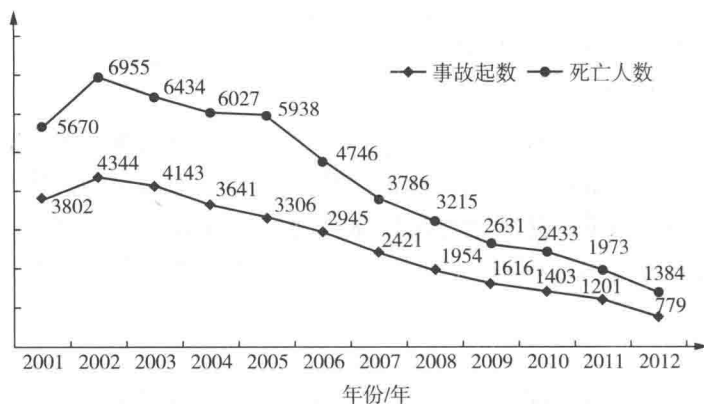


图 1-1 2001 ~ 2012 年中国煤矿事故死亡人数和事故起数

根据近年来事故资料,煤矿瓦斯仍然是煤矿安全事故的“第一杀手”。在一次死亡 3 人以上重特大事故中,瓦斯事故占到 55%;一次死亡 10 人以上特大事故中,瓦斯事故占到 80%。频繁发生的煤矿瓦斯事故,不仅给国家和人民造成巨大经济损失和生命损失,还严重影响煤炭企业的正常生产以及煤炭工业的持续发展,同时对中国的国际形象造成极大伤害。2012 年,发生瓦斯事故 72 起、死亡 350 人,与 2005 年相比,瓦斯事故减少 342 起,少死亡 1821 人,分别下降 82.60%、83.88%。近年来,全国煤矿瓦斯事故总体情况如表 1-4 所示。

表 1-4 2005 ~ 2012 年全国煤矿瓦斯事故总体情况

年份/年	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
瓦斯引起事故起数	414	327	272	182	157	135	119	72
瓦斯引起死亡人数	2171	1319	1084	778	756	593	533	350

通过地面开发煤层气、井下抽采煤层气等不同开发方式,切实实施先采气后采煤,采煤采气一体化,不仅可以降低煤矿