

赵建忠 著



煤层气水合物理论与技术

THEORY AND
TECHNOLOGY OF
COAL-BED GAS HYDRATES



科学出版社

煤层气水合物理论与技术

赵建忠 著

国家自然科学基金项目(51074111)

国家自然科学基金项目(50506018)

山西省基础研究计划项目(2011011005)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对煤层气利用环节特点,详尽介绍了水合物的性质和工业技术,首次提出了采用气体水合物技术储运与提纯含氧煤层气的基本研究方案和理论,并结合大量系统实验,形成从合成、利用到分解与评价完整的科学体系。随着煤矿开采深度的增加,煤层瓦斯含量还会增加,不仅大量浪费能源,而且加剧环境的温室效应,煤层气水合物提纯与储运技术的研究可为低甲烷浓度煤层气储运与提纯技术提供一条新的技术途径,对于实现能源与环境的可持续发展、实施以优质能源为主的能源发展战略与合理调整能源结构具有重要意义。

本书可供从事采煤专业及煤层气与瓦斯利用领域的专业技术人员在工作中参考,也可供高等院校师生、相关企业的科研部门研究人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气水合物理论与技术 / 赵建忠著. —北京: 科学出版社, 2011
ISBN 978-7-03-031233-4

I. ①煤… II. ①赵… III. ①天然气水合物—研究 IV. ①P618.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第100344号

责任编辑: 胡 凯 龚 勋 / 责任校对: 何晨琛
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年9月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2011年9月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 1—1 500 字数: 220 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

煤层气也称矿井瓦斯， CH_4 含量达95%以上，是优质的清洁燃料和化工原料，是一种新型洁净能源。我国煤层气已探明的储量约为 $(3\sim 3.5)\times 10^{13}\text{m}^3$ ，居世界第三位；同时，我国又是世界上最大的煤层气排放国家，煤层气年排放量约为 $(8\sim 10)\times 10^9\text{m}^3$ ，约占全球排放量的1/4。由于瓦斯浓度偏低且缺乏有效的储运、提纯技术以及管理技术因素，大量抽放瓦斯被作为废气直接排入大气，既浪费能源又对环境造成严重污染；另外，输气管道缺乏是制约我国煤层气发展的又一重要外部因素，在已有的和正在建设中的中小型煤层气试验开发井网范围内基本没有输气管道。因此，对煤层气不能进行有效提纯与经济储运，长期严重地制约着有关方面对其进一步投入开发和勘探的热情，不仅严重威胁煤矿安全生产，而且直接影响着煤层气工业产业链的形成，成为其进一步发展的瓶颈。煤层气中的 CH_4 在 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 、 $3\sim 8\text{MPa}$ 下与水能够生成固态气体水合物，这种固体水合物在常压下具有较好的稳定性， 1m^3 该固体水合物分解时能释放出 $160\sim 200\text{m}^3$ 的 CH_4 ，其巨大的储气能力和相对温和的储气条件备受重视，另外，在安全性方面还有其优越性，使其成为对煤层气加工处理与储运的优选方式。因此，对煤层气水合反应过程及其水合物相关性质进行基础研究，为煤层气加工处理与储运提供理论指导和技术支持，具有重要的科学意义和应用价值。

作者经过多年的深入研究分析，提出采用气体水合物技术储运与提纯含氧煤层气的基本研究思想和理论。本书通过大量实验，系统研究了煤层气水合物在不同条件下储运特性与气体成分变化的影响规律，较详细地推导了气体水合物生成与分解的反应—扩散物理模型，从理论数值计算方面研究了气体水合物颗粒生成与分解的机理与影响因素，并与其他储运工艺在工业生产中的技术经济进行评价，深入地分析了煤层气水合物理论与技术的各环节特性，为这一技术的推广与应用奠定了理论基础。

本书获得国家自然科学基金项目(50506018、51074111)和山西省基础研究计划项目(2011011005)的资助。特别感谢赵阳升教授多年来对我的学术指导、关怀与鼓励，同时，也要感谢众多专家、领导和同事在多年的科研合作中给我的启迪与帮助。

本书中也包含了一些其他人的研究成果，在此引用是为了保持本书的完整性与可读性，对于引用的文章与成果，已尽可能标注，难免有个别遗漏，敬请

谅解。

由于作者的水平有限，本书所介绍的学术观点与认识如有不当之处，肯请同仁批评指正。

作 者

2011 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 煤层气资源概况	1
1.1.1 煤层气资源	1
1.1.2 煤层气开发现状	2
1.1.3 煤层气利用前景	4
1.2 中国煤层气资源利用现状	5
1.2.1 常规煤层气利用技术	5
1.2.2 低浓度瓦斯直接利用技术	7
1.3 煤层气浓缩与储运技术	11
1.3.1 煤层气浓缩技术	11
1.3.2 煤层气储运技术	15
第 2 章 气体水合物性质与水合物技术	19
2.1 引言	19
2.2 水的结构和性质	20
2.2.1 氢键	20
2.2.2 水分子和冰的结构	21
2.2.3 水的物理性质	23
2.2.4 液态水的结构模型	24
2.3 气体水合物的结构与性质	25
2.3.1 水合物的结构	26
2.3.2 水合物的性质	27
2.3.3 二元水合物	31
2.4 气体水合物研究现状	32
2.4.1 相平衡热力学研究	33
2.4.2 气体水合物生成动力学	34
2.4.3 水合物分解动力学	36
2.5 天然气水合物资源与开采技术	37
2.5.1 天然气水合物全球资源分布	37
2.5.2 天然气水合物开采方法	38

2.6 气体水合物工业技术	42
2.6.1 天然气水合物储运技术	42
2.6.2 混合气体的气体水合物提纯技术	44
2.6.3 其他水合物工业技术	46
第3章 煤层气水合物合成的实验研究	49
3.1 水合物合成实验装置	49
3.1.1 实验室合成装置的强化方式	49
3.1.2 国内外实验装置的现状及其主要问题分析	50
3.1.3 基于喷射的半间歇式水合物合成方案设计	53
3.1.4 实验装置简介	54
3.1.5 PW30-14 型水合物试验台结构组成与设备技术指标	57
3.1.6 PW30-14 型试验装置性能评价及主要应用	62
3.2 喷雾方式下煤层气水合物合成实验	62
3.2.1 实验样品	62
3.2.2 实验方法与实验过程概述	63
3.2.3 实验结果与分析	65
3.2.4 纯水条件下气体水合物合成反应	67
3.3 SDS 溶液条件下的气体水合物合成反应	70
3.3.1 表面活性剂及机理	70
3.3.2 SDS 浓度的确定	71
3.3.3 反应过程特性	72
3.4 SDS 溶液条件对水合物合成的影响	76
3.4.1 宏观特性	76
3.4.2 压力对表面活性剂体系反应的影响	78
3.4.3 表面活性剂浓度对水合物反应的影响	79
3.4.4 综合影响因素分析	81
第4章 喷雾方式下水合物形成机理与动力学分析	83
4.1 引言	83
4.2 水合物生成热力学条件	83
4.3 水合物生长过程分析	88
4.3.1 微观生长过程	88
4.3.2 宏观生长过程	90
4.4 液滴生成水合物物理模型	91
4.4.1 物理模型分析	91
4.4.2 模型参数确定	93

4.5 气体水合物模型的分析与讨论	96
4.5.1 反应率随时间变化	96
4.5.2 颗粒半径对反应的影响	98
4.5.3 温度与压力对反应机理影响	99
第 5 章 煤层气水合物分解实验与动力学模型	104
5.1 引言	104
5.2 煤层气水合物分解实验	105
5.2.1 实验装置	105
5.2.2 实验概述	106
5.2.3 分解实验结果	107
5.3 气体水合物分解的物理模型	110
5.3.1 水合物分解过程概述	110
5.3.2 物理模型	111
5.3.3 参数确定	113
5.3.4 水合物分解实验与理论数值对比	114
5.4 煤层气水合物分解条件对分解机理影响	115
5.4.1 0℃ 以上分解	115
5.4.2 0℃ 以下分解	116
5.4.3 颗粒总分解时间	118
5.4.4 颗粒粒径对分解机理影响	119
第 6 章 气体水合物技术浓缩含氧煤层气实验研究	122
6.1 引言	122
6.2 工业气体分离技术	123
6.2.1 变压吸附(PSA)	123
6.2.2 低温液化	125
6.2.3 膜分离	128
6.3 气体水合物技术提纯含氧煤层气的机理	131
6.3.1 水合物提纯技术	131
6.3.2 水合物技术提纯机理	132
6.4 实验装置与方法	134
6.4.1 实验与测试装置	134
6.4.2 实验样品	135
6.4.3 实验方法	136
6.5 高甲烷浓度含氧煤层气的提纯实验	137
6.5.1 反应过程温度与压力变化	137

6.5.2 气体浓度变化	141
6.6 低甲烷浓度含氧煤层气的提纯实验	143
6.6.1 促进剂对水合物生成条件的弱化实验	143
6.6.2 含氧煤层气提纯效率分析	144
第 7 章 煤层气水合物储运的技术与经济分析	147
7.1 引言	147
7.2 水合物储运条件选择	147
7.3 储运安全性分析与比较	149
7.4 经济指标分析与对比	150
7.4.1 生产过程理论能耗计算	150
7.4.2 运输过程费用	152
7.4.3 投资成本的比较	154
7.4.4 综合成本比较	155
7.5 煤层气水合物生产线工艺简介	156
参考文献	159

第 1 章 绪 论

1.1 煤层气资源概况

1.1.1 煤层气资源

煤层瓦斯，又称煤层气，它是在煤的形成过程中生成并赋存于煤层及煤系地层的一种天然气，主要成份是甲烷(CH_4)，其中还混杂有其他气体组分。我国是煤炭生产和消费大国，国有矿井中高瓦斯矿井占到了 44%，建国以来，发生煤与瓦斯突出事故 1 万余次，占世界突出事故总数的三分之一以上，其中最大的一次突出，突出煤炭和岩石量约 12 780t，瓦斯 $1.5 \times 10^6 \text{m}^3$ ；1949 年以来，煤矿中发生的一次死亡百人以上的特大事故共 24 起，其中瓦斯(或有瓦斯参与)爆炸事故占 22 起，造成严重伤亡事故和经济损失^[1,2]。同时瓦斯也是一种温室气体，其温室效应是二氧化碳的 20 多倍，对臭氧层的破坏能力是二氧化碳的 7 倍，而且排放到大气中的煤层气中还混杂有 CH_4 的同系物、 H_2 、 H_2S 、 CO 、 NO 、 NH_3 、 SO_2 、乙醛、汽油蒸气、汞和砷的蒸气、 CO_2 、 N_2 、 Ar 、 He 以及 Rn 、 Th 、 Ac 等放射性物质，不仅污染大气，对人体健康也有害。按照政府间气候变化工作组 (IPCC) 1996 年修订的指南要求，对我国地下开采、露天开采和矿后活动甲烷涌出量进行了估算，扣除抽放瓦斯中利用的甲烷后，得出煤矿排入大气的甲烷量为 $1.0597 \times 10^{10} \text{m}^3$ ；根据联合国的一份报告，中国煤矿在开采过程中每年向大气中排放的 CH_4 量达 $1.94 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，约占世界采煤排放 CH_4 总量的三分之一，已引起国际社会的密切关注^[3]。

与燃煤相比，煤层气是一种较洁净的矿物能源和资源。煤层气燃烧的灰分排放量为燃煤的 0.68%， SO_2 排放量为燃煤的 0.14%， CO_2 排放量为燃煤的 60%，同时，煤层气燃烧值非常高，达到 7 979~8 869 kcal/ m^3 。我国煤层气资源丰富，分布广泛，自 20 世纪 80 年代以来，煤炭、地矿和石油系统的研究机构和专家先后从不同角度对我国煤层气资源进行过多次估算，其中得到普遍认可的是煤炭科学研究总院西安分院的估算结果，即全国煤层气资源总量为 $(3.0 \sim 3.5) \times 10^{13} \text{m}^3$ 。煤层气勘探开发尚处于起步阶段，国家还没有制订统一的煤层气储量标准，目前煤层气储量估算主要参照天然气储量计算方式进行，根据已有的煤层气井组试验结果，我国目前煤层气探明储量仅为 $1.0 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，主要集中在沁水

煤田南部^[4]。

煤层气资源的地域分布受煤炭资源分布的制约，二者的分布状况基本一致，其主要气田储量分布如图 1-1 所示。在我国，煤层气资源分布相对集中在三江—穆棱河盆地、渤海湾盆地、南华北盆地、晋中南含煤区、萍乐坳陷、湘中南地区、鄂尔多斯盆地、四川盆地、川南—黔北含煤区、六盘水含煤区、准噶尔盆地、吐哈盆地和伊宁盆地 13 个含煤盆地(地区)。这 13 个含煤盆地(地区)的煤层气资源量共计为 $3.084 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，占全国资源总量的 94%。除准噶尔、吐哈和伊宁盆地外，其余 10 个含煤区均位于我国东部和中部地带，煤层气资源共计达 $2.227 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，占全国资源总量的 6.8%^[5]。

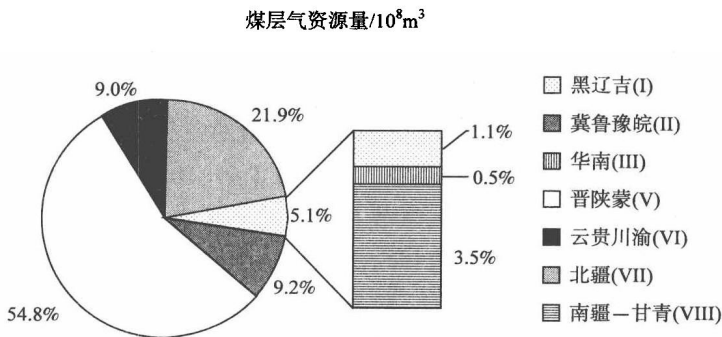


图 1-1 我国煤层气含气带资源量分布

1.1.2 煤层气开发现状

虽然我国煤层气资源十分巨大，但在当前的技术经济条件下有开采价值的资源量(埋深小于 1000m 的资源量)只占总资源量的 1/3。根据资源及市场条件，目前，我国煤层气勘探开发最有利区块主要包括：沁水盆地、淮南和淮北地区、鄂尔多斯盆地东缘(柳林、三交)、三江—穆棱河地区、阜新地区及南方的六盘水地区。这些地区煤层气资源占全国资源量的四分之一，煤的演变程度高低不等，据初步勘探，只要技术合理、措施得当、选位正确，其煤层气地面开发井均可获得工业气流^[6]。

近年来，随着井下抽放瓦斯规模的不断扩大，抽放瓦斯也逐渐成为煤层气资源中不可或缺的重要组成部分。矿井瓦斯抽放的主要目的是为了降低矿井通风系统的负担和预防瓦斯突出事故的发生，它为高瓦斯、瓦斯突出矿井防治瓦斯灾害、改善安全面貌、发展煤炭生产和提高经济效益发挥了重要作用；同时，也将瓦斯(煤层气)作为一种资源开发出来，加以利用。虽然矿井瓦斯抽放无法

形成规模效益,但它适应范围广泛,技术和投资要求不很高,而且在我国当前煤层气产业发展条件下,它是唯一正在产生着实际社会效益、环境效益和经济效益的开发方式。我国煤层气井下抽放已有 50 多年的历史,经过近 50 年的发展,我国矿井瓦斯抽放利用工作从无到有,从小到大。全国近年来矿井瓦斯抽放利用情况如表 1-1 所示。从表 1-1 中所列数据可以看出,无论是抽放矿井数或是抽放量,都是逐年上升的。截至 1998 年的 47 年中,累计抽放瓦斯 $1.2321 \times 10^{10} \text{m}^3$,矿井瓦斯抽放率一般不到 25%,仅 1998 年达到 27.8%,瓦斯利用量一般在 $4.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右,利用率约为 70%,2000 年全国井下煤层气抽放量为 $8.158 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。随着环保意识的加强,更多煤层气利用设施的建成投产,以及国家和企业更加注重安全生产,预计未来 10 年煤矿井下煤层气抽放将会有较大的发展。2005 年,我国共有 228 座煤矿进行煤层气抽采,煤层气抽采总量达到 $2.133 \times 10^9 \text{m}^3$ 。

表 1-1 全国瓦斯抽放利用情况统计表^[5]

年份	抽放矿井/个	抽放量/ 10^8m^3	利用量/ 10^8m^3	利用率*/%
1995	149	6.00	4.44	74.00
1996	146	6.34	4.39	69.24
1997	157	7.29	4.38	60.08
1998	162	7.42	3.62	48.79
2000	180	9.0	5.35	62.35
2003	190	15.0	6.29	41.38
2004	214	19.3	6.03	31.26
2005	228	21.3	7.35	34.46
2006	264	26.1	5.54	21.19

注:据国家煤炭工业局资料整理。

* 瓦斯利用率是指利用量占抽放量的百分比。

我国的瓦斯抽放技术,从早期只能对高渗透性煤层进行本煤层抽放(如抚顺矿区),逐渐发展到对低渗透性煤层进行邻近层卸压瓦斯抽放;到了 20 世纪 80 年代,为适应煤矿机械化和综合采煤技术的发展形势,在瓦斯抽放技术上采用顶板专用瓦斯巷道(即高抽巷),在底板专用瓦斯抽放巷道中向煤层群打网格式穿层钻孔,顺煤层水平长钻孔等综合抽放方式。从总体上讲,我国瓦斯抽放技术是成熟、先进的;在一些矿区,如重庆松藻矿区的瓦斯抽放技术达到了世界先

进水平。

我国煤层气地面开发试验已从单井试验向井组试验过渡,一些煤层气开发项目已显示出商业化开发前景。在地面钻井回收煤层气方面,我国自 70 年代开始在抚顺和焦作等矿区进行地面煤层气预抽试验,并从 90 年代初开始引进国外煤层气开发技术,目前,已进入全面勘探开发阶段。我国已钻成 200 多口煤层气地面井,单井最高日产量达 $16\,000\text{m}^3$,基本掌握了适合我国煤储层特征的煤层气勘探开发技术,为煤层气的商业化开发创造了条件^[7]。

近几年,我国煤层气国内自营和对外合作均取得了较大进展^[8]。截至 2000 年底,中联煤层气公司在沁水盆地东南部共钻了 11 口井,其中 TL-003、TL-006 和 TL-007 井分别获得了日产 $7\,000\text{m}^3$ 、 $10\,000\text{m}^3$ 、和 $16\,000\text{m}^3$ 以上的工业煤层气流。中国石油天然气集团公司也于 1999 年完成了 6 口井的井组试验,其中,晋试 1 井的单井日产量达 $7\,000\text{m}^3$ 。在对外合作方面,截至今年 3 月份,中联煤层气公司与美国 Texaco、Arco、Phillips、Greka 石油公司及澳大利亚的 Lowell 石油公司等共签署了 11 个合作开发煤层气的产品分成合同。11 个合同的总面积约 $21\,000\text{km}^2$,预测煤层气资源总量近 $1.65\times 10^{12}\text{m}^3$ 。

1.1.3 煤层气利用前景

我国的能源消费结构很不合理,2010 年一次能源的生产和消费结构为:煤炭 66.1%,石油 20.5%,水电 6.8%,天然气 5.3%,核电 0.9%,其他 0.4%,与 2005 年相比,煤炭、石油比重分别下降 3.0% 和 0.5%,天然气增加 2.5%。天然气在能源结构中的比例远远低于世界平均水平(24%)。据预测,到 2020 年,我国天然气探明储量 $6.0\times 10^{12}\text{m}^3$,产量 $(0.9\sim 1.12)\times 10^{11}\text{m}^3$,缺口 $(0.8\sim 2.2)\times 10^{10}\text{m}^3$ 。尽管天然气缺口可通过进口天然气和液化石油气解决,但在成本和安全上均存在问题。煤层气主要成分与天然气相似,与其他非常规气如页岩气、水合物等相比,煤层气是一种近期内最为现实的气源,具有巨大的开发潜力。加快煤层气开发可以安全可靠地缓解天然气短缺的局面。我国煤层气资源量中的 $1.4\times 10^{13}\text{m}^3$ 分布在我国中东部地区,不仅煤层气地质条件简单,而且市场条件优越。我国目前除井下抽放利用初具规模外,我国煤层气地面勘探开发也获得突破,中联煤层气有限责任公司在沁水煤田东南部屯留区块、中国石油天然气集团公司在晋城区块累计获得了 $7.54\times 10^{10}\text{m}^3$ 的探明地质储量、 $3.5\times 10^{11}\text{m}^3$ 控制储量。2003 年 3 月沁水盆地的屯留区块已经开始向郑州等城市供气,标志着我国煤层气勘探开发进入了新阶段。美国煤层气 2001 年产量为 $4.5\times 10^{10}\text{m}^3$,这表明煤层气不仅能够成为天然气工业的重要补充,而且还可以形成独立的产业。据预测,到 2020 年,我国煤层气产量将达

到 $2.2 \times 10^{10} \text{m}^3$, 为常规天然气产量的 1/5, 并形成独立的煤层气产业体系, 成为常规天然气的战略补充^[9]。

随着社会的进步和发展, 在 21 世纪, 人们将更加重视可持续发展战略。为实现国民经济持续、快速发展, 必须坚持保护和建设生态环境、净化家园, 节约和有效利用能源资源。为此国家将大力推进开发和使用天然气等洁净能源。另外, 从国家石油安全战略考虑, 必须减少国民经济和人民生活对石油资源的依赖程度, 开拓替代能源。我国人均拥有天然气产量不足 20m^3 , 相对发达国家(如英国人均达 1300m^3 以上)差距很大, 天然气消费量在一次能源消费结构中仅占 5% 左右。这种局面远远不能适应国民经济的发展和人民生活水平提高的需要。改变这种被动局面, 只靠常规天然气是不能解决问题的, 国家在大力加强常规天然气开发的同时, 十分重视煤层气这种非常规天然气的开发利用问题。因此, 煤层气在未来我国的能源构成中将具有广阔的发展空间^[10]。

1.2 中国煤层气资源利用现状

1.2.1 常规煤层气利用技术

煤层气富含甲烷, 经浓缩净化后也可代替天然气。它的开采和利用不仅可以缓解我国天然气的不足, 消除煤矿井下开采的灾害因素和造成大气污染、温室效应的一个重要的有害源, 同时, 还可为碳一化工提供原料, 用以开发高附加值化工产品或中间体。煤层气综合利用价值很高, 除民用外, 还可用于发电、供热、汽车燃料, 还能生产炭黑、甲醛和合成氨等化工产品。一般而言, 从生产矿区井下抽放系统回收的煤层气甲烷浓度低, 并含有杂质; 而在未开采地区采用地面钻井生产的煤层气浓度高、质量好。中等质量的煤层气适合当地民用或供井口煤层气电厂发电; 高质量煤层气适合输入天然气管道系统, 输送到远方用户, 供应大城市居民、电厂、化肥厂和化工厂使用^[11]。

目前, 我国煤层气产量主要来自井下抽放系统, 地面井回收的煤层气尚未形成规模。井下抽放系统回收的煤层气为中热值燃气, 其 CH_4 浓度为 30%~50%。这种中热值煤层气主要用作民用燃料和工业锅炉燃料, 少量用于发电和生产化工产品^[12]。我国有 3 个矿区已建立了煤层气发电项目, 另有 3 个矿区用煤层气生产炭黑产品, 而用煤层气作民用燃料的矿区已超过 20 个。阳泉市近十年来利用井下混合瓦斯, 加泵抽集存储于总容量约为 $2.0 \times 10^5 \text{m}^3$ 的储气罐中, 日供气约 $5.0 \times 10^5 \text{m}^3$ 以上, 实现 6 万户居民的供气。1982 年国家将矿井瓦斯利用工程正式纳入国家节

能基本建设投资计划,到目前为止,已建成瓦斯利用工程 60 多个。2000 年,煤层气利用量达 $5.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。近年来,随着气价逐步放开和各煤炭企业对煤层气作为一种资源认识的加强,作为商业项目来开发煤层气已在多个矿区展开^[13]。晋城无烟煤集团公司是最早利用煤层气发电的企业之一,其投入运营的煤层气电站总装机容量已达 5840kW,目前,该公司正计划建一座 120MW 的煤层气电厂。由抚顺矿务局和沈阳煤气公司共同投资承建的由抚顺向沈阳供气的抚顺煤层气开发利用工程,总投资 2.26 亿元,目前,一期工程已完成,铺设管路 43km,供气能力达 $1.04 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。已建设贮气罐总容量达 650km^3 ,输配主干线约 620km,供气 22 余万户。同时,还开发了瓦斯发电、生产化工原料、烧炉窑、锅炉等一系列工业生产项目。目前,中国的煤层气利用主要是在矿区,通过短距离管道供应附近用户。民用主要是供居民炊事、采暖及公用事业用气;工业应用主要是矿区矿井通风流预热、热水锅炉、煤的干燥及通风空气预热,并有少量煤层气用于生产炭黑、甲醛等化工产品。利用天然气作燃料代替汽油的汽车已在部分大中城市普及,天然气资源需求量增大,天然气供需矛盾日渐突出,煤层气代替部分天然气已是大势所趋。一些煤矿已经利用井下抽放的煤层气作汽车燃料,代替了矿区交通运输车辆用油,取得了很好的经济效益,也取得了丰富的经验。目前,主要利用的是高浓度煤层气和中浓度煤层气,利用高浓度煤层气作汽车燃料,储气量大,充一次可行驶 100 余 km; 100km 耗气 30.82m^3 ,比燃油费用大为降低。中浓度煤层气(35%~40%)型汽车, 1m^3 煤层气可代替汽油 0.4kg,对于短途客运或货运车,用中浓度煤层气作燃料经济效益非常可观。2002 年底开始,在山西省沁水县建设的枣园煤层气压缩站已经将沁水煤层气运往省内的长治、太原销售,用于城市公用交通燃料之一,这是中国陆采煤层气产业首次实现商品化。同时,山西能源产业集团有限责任公司的车载压缩煤层气项目也已开始投入商业运营,利用亚洲开发银行贷款建设沁水煤田至阳城、晋城、高平、长治、潞城市的煤层气管道输送项目和煤层气加气站项目,都正在积极开展之中。

为了扩大煤层气的利用范围,并代替常规天然气,需要提高煤层气的质量和保证气体的质量波动最小。主要的改善煤层气质量的方法是:加强监测和控制、增加采前抽放和进行气体富集。采用上述第一种方法来减少生产过程中煤层气流的空气夹带是最经济的手段之一。如果要将煤层气压缩后进入天然气管道长距离输送,甲烷浓度要达到 95%以上。高质量煤层气更适用于工业原料、汽车燃料和燃气轮机发电等用途。

另一方面,煤炭产量的迅猛增长造成瓦斯的直接排放量的急剧扩大,2000 年煤炭产量为 $1.232 \times 10^9 \text{t}$, CH_4 排放量为 $9.746 \times 10^9 \text{m}^3$,中国煤矿通风 CH_4 的排放随着产量的增加而增加。根据估算,2004 年中国煤矿通风 CH_4 的排放达到

$1.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 是同期中国天然气总产量的 $1/3 \sim 1/2$, 截至 2020 年, 根据我国权威部门专家预测, 煤炭产量最低将达到 $2.4 \times 10^9 \text{ t}$, 如果不采取通风瓦斯回收措施, 到时中国煤矿通风 CH_4 的排放量将达到 $1.7 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上。随着中国煤矿开采深度的增加, CH_4 含量也会增加, 然而, 抽放的煤层气大部分被排空, 利用率只有 41%。全国有抽放系统的矿山平均抽出率约为 23.8%, 浓度平均为 26%, 而在该浓度条件下, 缺乏有效的利用手段。同时, 由于利用手段单一, 部分浓度高于 30% 的抽出瓦斯仍然被排空。我国目前主要的煤矿瓦斯利用手段是民用, 而其他工业利用规模较小^[14]。由于甲烷浓度范围在 5%~16% 的低浓度煤层气有爆炸危险, 通常被禁止直接利用。根据国家《煤矿安全规程》规定, 甲烷浓度低于 30% 的煤层气不得利用。因此, 我国的煤层气利用率一直偏低。国家安监总局信息研究院院长黄盛初认为, 针对煤层气利用率在近几年呈下降趋势的问题, 国家应支持建立煤层气利用示范项目, 研究适合中国煤层气利用新技术并推动在中国的发展, 而当前重点是开发低浓度煤层气利用技术和通风瓦斯利用技术, 应尽快研究制定低浓度煤层气利用的相关法规和政策。我国瓦斯抽放的另一个问题是抽放浓度过低, 多数煤矿生产企业在为安全服务的抽放思想指导下, 矿区瓦斯抽放浓度偏低, 部分矿井抽出瓦斯中甲烷浓度低于 30%, 而在该浓度条件下, 瓦斯缺乏有效的利用手段, 同时, 利用手段单一, 导致部分浓度高于 30% 的抽出瓦斯仍然被排空。目前, 大部分排空的抽放甲烷属于低浓度甲烷, 其浓度低于 25%, 无论是民用还是工业用都很难对这部分甲烷进行减排利用, 所以减排煤矿甲烷的主要策略应该是加强抽放管理, 力争抽取更多、浓度更高的甲烷。浓度 30% 以下的煤层气利用方法包括发电技术和辅助燃料技术, 对技术手段与装备要求非常苛刻, 没有得到大规模推广。

1.2.2 低浓度瓦斯直接利用技术

目前, 我国在煤矿低浓度瓦斯直接利用技术的研究主要有: ①煤矿低浓度瓦斯发电技术; ②煤矿低浓度瓦斯燃(焚)烧技术; ③矿井乏风瓦斯利用技术^[15]。

(1) 煤矿低浓度瓦斯发电技术

瓦斯发电是煤矿低浓度瓦斯利用的最佳途径。目前, 瓦斯发电主要有 3 种方式: 大功率燃气轮机发电、蒸汽轮机发电和往复式内燃机组发电。利用燃气轮机和蒸汽轮机发电一次性投入大, 建站周期长, 要求燃气流量充足, 只适合瓦斯抽采量大且气体成分较稳定的大型矿井。燃气轮机的热效率不超过 30%, 蒸汽轮机的热效率更低, 仅为 10% 左右。利用内燃机组发电, 一次性投入低, 建站周

期短,内燃机组台数和功率范围可根据瓦斯气量的大小进行确定,电站移动方便,非常适合大、中、小型煤矿。因此,内燃机组发电是目前解决瓦斯利用最佳途径。

由于低浓度瓦斯中的主要可燃成分(CH_4)含量低,成分随机性变化较大,难以采用常规的燃气发动机进行发电。

山东胜利动力机械厂根据煤矿抽出的低浓度瓦斯的特点,专门研制了一种低浓度瓦斯发电机组,功率为 500kW。该发电机组在进气方式上采用了具有自主知识产权的微电子控制技术,能根据瓦斯浓度的变化自动调节混合气的空燃比,较好地解决了传统燃气机因可燃气体浓度变化而造成发动机熄火、爆燃、排气管放炮、进气管回火等安全问题^[16]。但是,由于我国现行《煤矿安全规程》第 148 条规定:利用瓦斯时,瓦斯浓度不得低于 30%。因此,煤矿低浓度瓦斯发电技术在我国推广应用还存在一定的政策限制。

胜利动力机械集团有限公司采取多级阻火装置,较好地解决了低浓度瓦斯发电机组本身的安全问题,但主要安全隐患存在于低浓度瓦斯输送管道系统。低浓度瓦斯利用时,利用端可能产生的火源会使整个输送管路系统中的低浓度瓦斯处于非常危险的状态,一旦发生爆炸,将造成重大损失。因此,低浓度瓦斯利用必须具有能够确保瓦斯输送安全的技术和设备设施。为此,煤炭科学研究总院重庆研究院与山东胜利动力机械集团共同进行了低浓度瓦斯安全输送成套技术与装备研制^[17]。煤炭科学研究总院重庆研究院建立了低浓度瓦斯输送管道爆炸试验系统,管道直径分别为 500mm 和 700mm。通过研究输送管道低浓度瓦斯燃烧爆炸和传播特性及阻爆机理,开发了瓦斯输送管道安全保障系统监测监控技术及装备、管道泄爆阻爆技术及装备、管道瓦斯自动快速切断技术及装备和管道瓦斯爆炸传播喷粉抑制技术及装备。采用“多级防护、可靠性优先”的原则,对相应的安全装备进行优化组合,形成绝对可靠的安全保障系统^[18]。并在此基础上制订了低浓度瓦斯相关如下标准:

- 1) 煤矿低浓度瓦斯管道输送安全保障系统设计规范;
- 2) 瓦斯管道输送水封阻火泄爆装置技术条件;
- 3) 瓦斯管道输送自动阻爆装置技术条件;
- 4) 瓦斯管道输送自动喷粉、自动阻爆装置通用技术条件;
- 5) 煤矿低浓度瓦斯与细水雾混合安全输送装置技术规范;
- 6) 煤矿瓦斯输送管道干式阻火器通用技术条件;
- 7) 瓦斯输送管道安全监控系统通用技术要求。

一旦这些标准获得批准并发布执行,下一步将对现行《煤矿安全规程》中关于瓦斯利用的相关条款进行修改,消除煤矿低浓度瓦斯发电技术的政策限制,从而将大力促进低浓度瓦斯发电技术在我国的应用。