



高等教育“十三五”规划教材
中国矿业大学卓越安全工程师教材

矿井瓦斯防治

主 编 程远平

Kuangjing Wasi Fangzhi

Kuangjing Wasi Fangzhi

非
外
借

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等教育“十三五”规划教材
中国矿业大学卓越安全工程师教材

矿井瓦斯防治

主 编 程远平

副主编 王海锋 王 亮 周红星

刘洪永 吴冬梅 李 伟

刘清泉

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是矿业类高等学校规划教材,同时也是中国矿业大学安全工程专业卓越工程师班系列教材之一。本着追踪学科前沿、强化理论基础、培养应用能力的宗旨,指导全书内容的编排和撰写。全书系统地论述了煤层瓦斯赋存与流动规律、煤矿瓦斯灾害及其分级、煤矿瓦斯灾害防治的技术体系、煤矿采前采中采后抽采瓦斯方法、煤矿瓦斯抽采装备、煤矿瓦斯防治技术管理、煤与瓦斯突出防治、煤矿瓦斯爆炸防治、煤矿瓦斯综合利用、煤矿瓦斯抽采设计等内容。

本书可供高等院校安全工程和采矿工程等相关专业师生作为教材使用,亦可作为煤炭企业技术人员、管理干部及科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿井瓦斯防治/程远平主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3238 - 0

I. ①矿… II. ①程… III. ①煤矿—瓦斯爆炸—防治—高等学校—教材 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 200739 号

书 名 矿井瓦斯防治
主 编 程远平
责任编辑 周 红
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 26 字数 649 千字
版次印次 2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷
定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

《矿井瓦斯防治》一书由我国著名的煤矿瓦斯防治专家俞启香教授在中国矿业大学讲义(1987)基础上编著完成,作为高等院校的教学用书于1992年由中国矿业大学出版社出版,先后发行了2万余册。该书被中国矿业大学等十余所矿业类高校的矿山通风与安全专业(后更名为安全工程专业)所选用,1996年获煤炭工业普通高等学校优秀教材奖二等奖。为适应我国煤矿瓦斯防治的发展需要,2012年俞启香、程远平两位教授对《矿井瓦斯防治》1992年版进行了全面修订。《矿井瓦斯防治》为我国煤矿瓦斯防治领域培养了大批教学、科研、工程技术和管理等方面的骨干力量,为我国煤矿安全事业的发展作出了重要贡献。

《矿井瓦斯防治》出版后的20多年间,中国煤炭工业先后经历了1997年亚洲金融危机的困难时期、2000年以来的经济快速发展时期以及近年来的产能过剩时期。我国煤炭产量从2000年的0.999 Gt,增加到2014年的3.87 Gt,而后降至2015年的3.75 Gt。1997~2005年间,受亚洲金融危机时期的安全投入缩减及经济快速发展时期的煤炭产量过快增长影响,瓦斯事故次数与死亡人数整体呈现增加趋势。从2005年起,国家每年安排30亿元国债资金,支持煤矿安全技术改造。国家科学技术部和国家自然科学基金委员会也加大了对煤矿安全科研工作的支持力度。经过多年的努力,我国的煤矿安全生产工作取得了显著进步,年死亡人数由2005年的5 938人下降到2015年的588人,其中瓦斯事故年死亡人数由2 171人下降到171人。瓦斯防治成绩的取得与科技进步密不可分,在“六五”到“十五”研究成果基础上,“十一五”和“十二五”期间我国煤矿瓦斯防治科学研究工作取得重大进展,“十一五”最具代表性的成果是形成了一批煤矿瓦斯防治方面的技术标准、规范和管理规定,初步实现了煤矿瓦斯治理的规范化、程序化和制度化;“十二五”最具代表性的成果是发展了煤矿瓦斯抽采的理论模型、新技术、新装备,初步实现了瓦斯防治的科学化。为了充分反映我国煤矿瓦斯防治方面的科技进步,提高煤矿安全生产人才培养水平,满足卓越工程师培养的需要,我们专门编写《矿井瓦斯防治》一书。

全书共分13章,由煤层瓦斯赋存、煤层瓦斯流动、煤矿瓦斯灾害、煤矿瓦斯灾害分级、煤矿瓦斯灾害防治技术体系、煤矿采前抽采瓦斯方法、煤矿采中和采后抽采瓦斯方法、煤矿瓦斯抽采装备、煤矿瓦斯防治技术管理、煤与瓦斯突出的防治、煤矿瓦斯爆炸防治、煤矿瓦斯综合利用和煤矿瓦斯抽采设计等部分组成。本书集中了我国煤矿瓦斯治理现阶段最先进的理念、抽采理论、抽采技术与抽采装备,是专门为安全工程专业卓越工程师班准备的教材,也可供安全工程和采矿工程等相关专业师生作为教材使用,还可供煤炭企业技术人员、技术管理干部、科研院所研究人员参考使用。

本书由程远平教授担任主编,七位具有博士学位的中青年教师参编。具体编写分工如下:第一章由程远平、刘洪永、王亮、吴冬梅完成;第二章由程远平、刘洪永、刘清泉完成;第三章由周红星、刘洪永完成;第四章与第五章由程远平、王亮完成;第六章由程远平、周红星、王

海锋完成；第七章由程远平、王海锋完成；第八章由程远平、王亮完成；第九章由程远平、李伟、王亮完成；第十章由程远平、王亮、王海锋完成；第十一章由程远平、刘洪永完成；第十二章由程远平、李伟完成；第十三章由程远平、周红星完成。全部书稿由程远平教授统稿、定稿。

本书编写过程中得到了淮北矿业集团的大力支持和帮助。淮北矿业集团地质条件复杂，瓦斯灾害严重，淮北矿业集团与我们研究团队长期保持着密切的合作关系，书中大量的实验室测试数据样本以及现场试验数据来自其下属矿井。国家科学技术部、教育部和国家自然科学基金委员会对我们的科学研究工作给予了资助和鼓励，在此谨向他们表示衷心感谢。

书中不足和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

2016年9月

目 录

| | |
|------------------------------|-----|
| 1 煤层瓦斯赋存 | 1 |
| 1.1 煤矿瓦斯的概念与性质 | 1 |
| 1.2 煤矿瓦斯的生成与组分 | 6 |
| 1.3 煤层瓦斯赋存状态和垂向分布 | 11 |
| 1.4 煤的孔隙特征 | 13 |
| 1.5 煤的瓦斯吸附/解吸性能 | 16 |
| 1.6 煤层瓦斯压力 | 29 |
| 1.7 煤层瓦斯含量 | 38 |
| 参考文献 | 45 |
| 2 煤层瓦斯流动 | 48 |
| 2.1 含瓦斯煤的力学特性 | 48 |
| 2.2 含瓦斯煤的渗透性能 | 66 |
| 2.3 瓦斯流动的耦合作用模型 | 78 |
| 参考文献 | 94 |
| 3 煤矿瓦斯灾害 | 102 |
| 3.1 煤矿瓦斯灾害现状分析 | 102 |
| 3.2 煤与瓦斯突出 | 106 |
| 3.3 煤矿瓦斯爆炸 | 124 |
| 参考文献 | 145 |
| 4 矿井瓦斯灾害分级 | 148 |
| 4.1 矿井瓦斯涌出及影响因素 | 148 |
| 4.2 矿井瓦斯涌出量预测 | 149 |
| 4.3 矿井瓦斯等级鉴定 | 157 |
| 参考文献 | 168 |
| 5 煤矿瓦斯灾害防治技术体系 | 170 |
| 5.1 我国瓦斯防治工作方针、理念与工作体系 | 170 |

| | | |
|-----------|-----------------------------|------------|
| 5.2 | 煤矿瓦斯抽采方法 | 175 |
| 5.3 | 煤矿瓦斯抽采基本指标 | 178 |
| 5.4 | 煤矿瓦斯抽采系统建立条件 | 183 |
| | 参考文献 | 183 |
| 6 | 煤矿采前抽采瓦斯方法 | 185 |
| 6.1 | 地面采前抽采瓦斯方法 | 185 |
| 6.2 | 本煤层采前抽采瓦斯方法 | 194 |
| 6.3 | 邻近层采前抽采瓦斯方法 | 203 |
| | 参考文献 | 223 |
| 7 | 煤矿采中和采后抽采瓦斯的方法 | 226 |
| 7.1 | 煤矿采中抽采瓦斯的方法 | 226 |
| 7.2 | 井上下采后抽采瓦斯方法 | 235 |
| | 参考文献 | 240 |
| 8 | 煤矿瓦斯抽采装备 | 243 |
| 8.1 | 钻机 | 243 |
| 8.2 | 瓦斯抽采管道系统与附属装置 | 247 |
| 8.3 | 瓦斯抽采泵与泵站 | 253 |
| 8.4 | 瓦斯抽采监测系统 | 254 |
| | 参考文献 | 268 |
| 9 | 煤矿瓦斯防治管理体系 | 269 |
| 9.1 | 煤矿瓦斯防治技术管理 | 269 |
| 9.2 | 煤矿瓦斯防治技术经济评价 | 276 |
| | 参考文献 | 290 |
| 10 | 煤与瓦斯突出的防治 | 291 |
| 10.1 | 防治煤与瓦斯突出的工作程序 | 291 |
| 10.2 | 突出预测及效果检验 | 296 |
| 10.3 | 防治煤与瓦斯突出的主要技术措施 | 310 |
| | 参考文献 | 353 |
| 11 | 煤矿瓦斯爆炸防治 | 356 |
| 11.1 | 预防瓦斯积聚与超限措施 | 356 |
| 11.2 | 预防瓦斯引燃的措施 | 371 |
| 11.3 | 防止瓦斯爆炸事故扩大的措施 | 373 |
| | 参考文献 | 380 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 12 煤矿瓦斯综合利用 | 381 |
| 12.1 瓦斯的发电利用..... | 381 |
| 12.2 瓦斯的其它利用..... | 387 |
| 参考文献..... | 389 |
| | |
| 13 煤矿抽采瓦斯设计 | 390 |
| 13.1 抽采瓦斯设计的基础资料及要求..... | 390 |
| 13.2 瓦斯抽采方法及抽采参数..... | 391 |
| 13.3 抽采系统设计流程..... | 393 |
| 13.4 管网系统..... | 394 |
| 13.5 抽采泵选型..... | 395 |
| 13.6 煤矿瓦斯抽采设计流程..... | 397 |
| 参考文献..... | 405 |

1 煤层瓦斯赋存

1.1 煤矿瓦斯的概念与性质

1.1.1 煤矿瓦斯的定义

煤矿瓦斯是井下有害气体的总称。一般包括四类来源^[1], 第一类来源是在煤层与围岩内赋存并能涌入到矿井中的气体; 第二类来源是煤矿生产过程中生成的气体, 例如爆破时产生的炮烟, 内燃机运行时排放的废气, 充电过程生成的氢气等; 第三类来源是煤矿井下空气与煤、岩、矿物、支架和其他材料之间的化学或生物化学反应生成的气体等; 第四类来源是放射性物质衰变过程生成的或地下水放出的放射性情性气体氦及惰性气体氡。在第一类来源中主要是有机质在煤化过程中生成的并赋存于煤(岩)中的气体, 称为有机源气体; 在有火成岩侵入或碳酸盐致热分解生成的二氧化碳经断层侵入的煤田, 存在无机源气体。

这些不同成因的气体具有不同组成成分和性质。煤矿瓦斯中常见组分的主要物理化学性质如表 1-1 所示^[2]。

表 1-1 煤矿瓦斯中常见组分的主要物理化学性质

| 性 质 | 甲烷 CH ₄ | 二氧化碳 CO ₂ | 一氧化碳 CO | 硫化氢 H ₂ S | 乙烷 C ₂ H ₆ | 丙烷 C ₃ H ₈ | 氢 H ₂ |
|--|-----------------------|-------------------------|------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 分子量 | 16.042 | 44.01 | 28.01 | 34.08 | 30.07 | 44.09 | 2.016 |
| 密度/(kg/m ³) (293 K, 101.3 kPa) | 0.716 | 1.98 | 1.25 | 1.54 | 1.36 | 2.00 | 0.09 |
| 相对空气密度 | 0.554 | 1.53 | 0.97 | 1.17 | 1.05 | 1.55 | 0.07 |
| 沸点/°C (101.3 kPa) | -161.49 | -78.50 | -190.0 | -60.33 | -88.60 | -42.04 | -252.7 |
| 临界温度/°C (101.3 kPa) | -82.57 | 31.06 | 12.5 | 100.39 | 32.27 | 96.67 | -239.9 |
| 临界压力/MPa | 4.604 | 7.385 | 74.2 | 9.005 | 4.880 | 4.250 | 12.97 |
| 爆炸下限/% (293 K, 101.3 kPa) | 5.0 | — | 12.5 | 4.3 | 3.0 | 2.1 | 4.0 |
| 爆炸上限/% (293 K, 101.3 kPa) | 15.0 | — | 80.0 | 45.5 | 12.7 | 9.35 | 74.2 |
| 发热量/(MJ/m ³) | | | | | | | |
| 高热值 | 39.82 | — | 12.64 | 25.35 | 70.30 | 101.20 | 12.74 |
| 低热值 | 35.88 | — | 12.64 | 23.37 | 64.35 | 93.18 | 10.79 |

从安全的观点看, 属于可燃可爆炸的气体有甲烷(CH₄)及其同系物烷烃(C_nH_{2n+2})、CO、H₂S、H₂等; 属于有毒的气体有 H₂S、CO、SO₂、NH₃、NO₂、NO 等; 属于窒息性的气体有

CH₄、N₂、CO₂等；属于放射性的气体有氡气。煤矿瓦斯各组分在数量上差异是很大的，煤矿大部分瓦斯来自于煤层，而煤层中的瓦斯一般以甲烷为主，甲烷是煤矿生产中的重大危险源，所以狭义的煤矿瓦斯就是指甲烷。在本书中，除特别注明外，瓦斯就是指甲烷。

1.1.2 煤矿瓦斯的性质

甲烷是无色、无味、无嗅、可以燃烧或爆炸的气体，它对人呼吸的影响与氮相似，可使人窒息。甲烷分子直径为 0.41 nm，其扩散速度是空气的 1.34 倍，涌向煤矿生产空间中的瓦斯能迅速扩散到矿井风流中。甲烷在标准状况下的密度为 0.716 kg/mL，为空气密度的 0.554 倍。甲烷在巷道断面内的分布取决于巷道壁附近有无瓦斯涌出源。在自然条件下，由于甲烷在空气中的强扩散性，所以它一经与空气均匀混合，就不会因其相对密度较空气轻而上浮、聚积。当无瓦斯涌出时，巷道断面内甲烷的浓度是均匀分布的；当有瓦斯涌出时，甲烷浓度则呈不均匀分布。在有瓦斯涌出的巷道壁附近，甲烷的浓度相对较高。在煤矿中有时见到在巷道顶(底)板、冒落区顶部、工作面煤壁积存瓦斯，这并不是由于甲烷的密度比空气小，而是说明这些地点有瓦斯(源)在涌出。甲烷的化学性质不活泼，微溶于水，在 101.3 kPa 压力条件下，当温度 20 ℃ 时 100 L 水可溶解 3.31 L 甲烷；0 ℃ 时 100 L 水可溶解 5.56 L 甲烷。

我国《煤矿安全规程》(简称《安全规程》)规定，矿井总回风巷或一翼回风巷中瓦斯或二氧化碳浓度不得超过 0.75%；采区回风巷、采掘工作面回风巷风流中瓦斯浓度不得超过 1.0%、二氧化碳浓度不得超过 1.5%。我国矿井其他有害气体最高允许浓度见表 1-2。

表 1-2 矿井其他有害气体最高允许浓度

| 名 称 | 一氧化碳 CO | 二氧化氮 折算成二氧化氮 NO ₂ | 二氧化硫 SO ₂ | 硫化氢 H ₂ S | 氨 NH ₃ |
|----------|------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 最高允许浓度/% | 0.002 4 | 0.000 25 | 0.000 5 | 0.000 66 | 0.004 |

1.1.2.1 瓦斯的致灾类型

根据我国煤矿事故的统计分类，煤矿瓦斯事故分为瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出(以下简称突出)、瓦斯燃烧和瓦斯窒息四类，其中前两类发生最多、危害最大。

(1) 煤与瓦斯突出

煤与瓦斯突出是煤层中存储的瓦斯能和应力能的失稳释放，表现为在极短的时间内向生产空间抛出大量的煤岩和瓦斯；持续的时间从一瞬间到几分钟，抛出的煤岩量从几十千克到上万吨、瓦斯量从几十立方米到上百万立方米，并可能诱发破坏性更大的瓦斯爆炸。突出可能发生在钻孔、掘进和煤炭开采过程中，突出可能立即发生也可能有几秒到几分钟的延迟。2004 年 10 月 20 日，郑州大平煤矿发生突出煤岩量 1 894 t、瓦斯量 0.25 Mm³ 的特大型煤与瓦斯突出事故，并引发导致 148 人死亡的特别重大瓦斯爆炸事故。

目前，我国煤矿以每年 10~20 m、局部每年 20~50 m 的速度向深部延深，200 余对矿井的开采深度超过了 800 m，47 对矿井的开采深度超过了 1 000 m，地应力、瓦斯压力不断增大，煤与瓦斯突出灾害日趋严重。

(2) 瓦斯爆炸

煤矿瓦斯爆炸是甲烷和空气组成的处于爆炸界限内的混合气体,在火源的引发下发生的一种迅猛的氧化反应。煤矿井下瓦斯爆炸能够导致大量人员伤亡、摧毁井巷设施、破坏矿井通风系统,甚至能够引发煤尘爆炸、火灾、井巷垮塌和顶板冒落等次生灾害。一般认为,煤矿瓦斯爆炸的甲烷浓度界限为 $5.0\% \sim 15.0\%$,理论上爆炸最猛烈的甲烷浓度为 9.5% 。另外,其他可燃性气体的掺混、引火源温度和环境中的氧气浓度变化等可能导致瓦斯爆炸界限的改变。

瓦斯爆炸需要瓦斯、火源和氧气三要素。爆炸需要的瓦斯来自于瓦斯积聚,煤矿井下采空区瓦斯积聚、瓦斯异常涌出、停电停风、通风系统不合理、通风管理混乱、突出的瓦斯都可能使瓦斯达到爆炸浓度。瓦斯爆炸需要的点火源主要是由违章爆破、电气设备火花引起,另外煤炭自燃、金属撞击等也可能引爆瓦斯。

(3) 瓦斯燃烧

煤矿瓦斯燃烧是高浓度的瓦斯从煤层或岩体中涌出,并与空气混合,在火源存在的条件下发生的扩散燃烧现象。煤矿瓦斯燃烧可能发生在工作面煤壁、瓦斯抽采管路以及一些专用巷道,如专用瓦斯抽(排)放巷等。瓦斯燃烧产生大量的高温、有毒、有害气体,造成一般事故和较大事故,一般不会直接造成特别重大的伤亡事故。

据统计,我国煤矿 2000~2012 年间发生瓦斯燃烧事故 144 起,死亡 440 人。事故大多发生在乡镇煤矿,在一些地质条件复杂、瓦斯含量高的煤层,发生的概率大;采煤工作面和掘进工作面是瓦斯燃烧的常发地点;引燃瓦斯的点火源主要是电火花和爆破火焰。

(4) 瓦斯窒息

瓦斯窒息事故多发生在停风的煤巷或不通风的盲巷中。这些地点由于长时间无新鲜风流的供给,加上持续的瓦斯涌出,环境中的氧气浓度逐步降低,人员进入后可能引起窒息事故。正常大气中氧气浓度约为 21% ,当空气中氧气浓度低于 15% 时,人的肌肉活动能力将明显下降;降低到 $10\% \sim 14\%$ 时,人的判断能力将迅速降低,出现智力混乱现象;降低到 $6\% \sim 10\%$ 时,短时间内将会晕倒,甚至死亡。

瓦斯积聚降低了井巷空气中的氧气浓度,当瓦斯浓度达到 28% 时,氧气浓度将降低到 15% ;瓦斯浓度达到 43% 时,氧气浓度将降低到 12% 。停风的煤巷或不通风的盲巷中涌出的瓦斯还可能是二氧化碳(含二氧化碳的煤岩层)和氮气(瓦斯风化带),普通的甲烷检测仪器无法检测,因此具有更大的危险性。瓦斯窒息一般不会酿成重大以上事故,但仍不容忽视。

按一次事故死亡的人数,我国将事故分为特别重大、重大、较大和一般事故四种类型。其中,一次死亡 30 人及以上的事故为特别重大事故,一次死亡 10 人(含 10 人)至 29 人的事故为重大事故,一次死亡 3 人(含 3 人)至 9 人的事故为较大事故,一次死亡 2 人(含 2 人)以下的事故为一般事故。新中国成立以来,我国煤矿发生的一次死亡百人以上特别重大事故 25 起,死亡 3 930 人,其中瓦斯爆炸事故(包括瓦斯煤尘爆炸和突出事故)18 起,死亡 2 447 人,瓦斯事故起数和死亡人数分别占 62.3% 和 72.0% 。

根据 2014 年煤矿瓦斯事故统计分析结果^[1],全国发生瓦斯事故 47 起、死亡 266 人,其中较大瓦斯事故 18 起,死亡 74 人;重大瓦斯事故 10 起,死亡 162 人;重大瓦斯事故死亡人数占全国煤矿重大以上事故总死亡人数的 70.7% ,说明瓦斯依然是我国煤矿安全生产的最大灾害。28 起较大以上瓦斯事故中,瓦斯爆炸 16 起、死亡 138 人;煤与瓦斯突出事故 9 起、

死亡 63 人;瓦斯窒息事故 2 起、死亡 7 人;煤尘爆燃事故 1 起、死亡 28 人;瓦斯爆炸灾害处于煤矿重大乃至特别重大事故的首位。

我国《煤矿安全规程》根据矿井相对瓦斯涌出量、绝对瓦斯涌出量和瓦斯涌出形式,将矿井瓦斯等级划分为:低瓦斯矿井、高瓦斯矿井和煤(岩)与瓦斯(二氧化碳)突出矿井。根据 2007 年全国各类煤矿瓦斯等级鉴定情况汇总^[5],全国共有矿井 15 071 对,其中突出矿井 647 对、占 4.3%;高瓦斯矿井 2 859 对,占 19.0%。国有重点煤矿共有 887 对矿井,其中突出矿井 180 对,占 20.3%;高瓦斯矿井 168 对,占 18.9%。

1.1.2.2 煤矿瓦斯是清洁能源

煤矿瓦斯是一种清洁能源,1 m³纯甲烷的发热量为 35.9 MJ,相当于 1.2 kg 标准煤的发热量。据最新一轮全国煤层气(煤矿瓦斯)资源评价成果^[6],全国煤层埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源量为 31.46 万亿 m³,相当于我国陆上常规天然气资源总量(30 万亿 m³),其中可采资源量为 10.87 万亿 m³。

2009 年我国煤矿抽采瓦斯 71.83 亿 m³,其中井下抽采 61.7 亿 m³,地面抽采 10.13 亿 m³;井下利用 17.7 亿 m³,地面利用 5.82 亿 m³。2008 年我国煤矿共抽采 58 亿 m³,其中井下抽采 53 亿 m³,地面抽采 5 亿 m³;井下利用 16 亿 m³,地面利用 3.01 亿 m³^[7]。除部分井下移动抽采的瓦斯直接排到矿井回风系统,不能利用外,大部分抽采瓦斯用于发电、工业应用、汽车燃料和民用。2007 年,全国煤矿瓦斯利用量达 14.5 亿 m³,抽采瓦斯利用率达 33.0%;瓦斯发电装机容量 71 万 kW,世界上规模最大的 12 万 kW 瓦斯发电厂已在晋城煤业集团并网发电;民用煤矿瓦斯用户超过 87 万户^[8]。抽采瓦斯利用较好的煤矿企业有阳泉煤业集团、晋城煤业集团、抚顺矿业集团、淮南矿业集团、淮北矿业集团和松藻煤电公司等。

根据我国城市燃气供气标准,1 Nm³燃气的发热量不低于 14.6 MJ。因此,煤矿瓦斯用于城市燃气,其甲烷浓度应不低于 41%。

1.1.2.3 煤矿瓦斯对环境的影响

在评价温室气体对气候变化的影响时,一般使用辐射强迫。在长生命期温室气体中,甲烷是仅次于二氧化碳的第二大辐射强迫的温室气体,在全球人为因素温室气体排放中,甲烷所占的比例为 14.3%(按当量 CO₂ 计算)。在过去的 20 年里,由于甲烷排放到大气中的速度降低,甲烷在大气里的含量没有显著增加,根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2007 年发布的第四次气候变化报告,甲烷在大气中的含量为 1 774 μg/mL,其强迫辐射达到 0.48 W/m²^[9]。

自从联合国政府间气候变化专门委员会在 2001 年发布第三次气候变化报告后,甲烷促使平流层水蒸气含量增加而引起的强迫辐射显著增大,因此,在 IPCC 第四次气候变化报告中,将 100 年时间跨度的甲烷的全球变暖潜势从 23 提高到了 25,这意味着单位质量的甲烷的辐射强迫是二氧化碳的 25 倍,即单位质量的甲烷产生的温室效应是二氧化碳的 25 倍。

根据甲烷的氧化反应,可以计算出燃烧 1 m³甲烷相当于减少 CO₂ 的当量:



$$A = (\text{GWP}_{\text{CH}_4} - \text{CEF}_{\text{CH}_4}) \rho_{\text{CH}_4}$$

式中 ρ_{CH_4} ——甲烷的密度,取 0.716 kg · m⁻³;

GWP_{CH_4} ——甲烷的全球变暖潜势,根据 IPCC 的 AR4,其值为 25;

CEF_{CH_4} ——单位质量甲烷燃烧后释放的 CO₂ 质量,按照分子式 44/16 计算,值为 2.75;

A——单位体积甲烷对应减少 CO₂ 的排放量。

根据以上公式和数据计算可得,燃烧 1 m³ 甲烷相当于减少 15.93 kg 的二氧化碳排放。

根据 2007 年我国瓦斯等级鉴定报告的结果^[5],我国煤矿开采过程中甲烷的排放量为 193 亿 m³ (13.8 Tg),其中国有重点煤矿、国有地方煤矿和乡镇煤矿的排放量分别为 92 亿 m³ (6.64 Tg)、31 亿 m³ (2.2 Tg) 和 70 亿 m³ (5 Tg)。对于 2008 年的鉴定结果^[10],由于瓦斯矿井排放量数据缺失,其总排放量可根据高瓦斯和突出矿井的排放量结合 2007 年数据中高瓦斯和突出矿井与瓦斯矿井的排放量比例进行推算估计。中国煤矿开采甲烷排放量具体数据见表 1-3。

表 1-3 2007~2008 年中国煤矿开采甲烷排放量

| 年份 | 总排放量 | | 高瓦斯矿井和突出矿井排放量 | | 瓦斯矿井排放量 | |
|------|------|------------------|---------------|------------------|---------|------------------|
| | Tg | 亿 m ³ | Tg | 亿 m ³ | Tg | 亿 m ³ |
| 2007 | 13.8 | 193 | 10.4 | 145 | 3.4 | 48 |
| 2008 | 14.5 | 202 | 10.9 | 152 | 3.6 | 50 |

注:1. 甲烷密度取标准状况 0.716 kg/m³,部分加和的结果可能由于四舍五入出现误差;

2. 1 Tg=10⁶t, 1 亿 m³=10⁹ m³;

3. 由于部分矿井的井下抽采瓦斯会排放到矿井回风中,可能导致重复统计。

CO₂ 是全球最重要的温室气体,在人为源温室气体源中 CO₂ 的贡献达到 76.7%,其中大部分源自化石燃料的使用,约占 74%。图 1-1 列出了 2000~2009 年中国的煤炭产量和化石燃料产生的 CO₂ 及二者在全世界所占的比重^[11]。由图 1-1 可以看出,随着中国煤炭产量的快速增长,中国化石燃料所释放的 CO₂ 也逐年大幅攀升。中国化石燃料所释放的 CO₂ 占世界总量的比重和煤炭产量保持着相同的增长速率,在 2008 年,这一比值达到 21.8%。

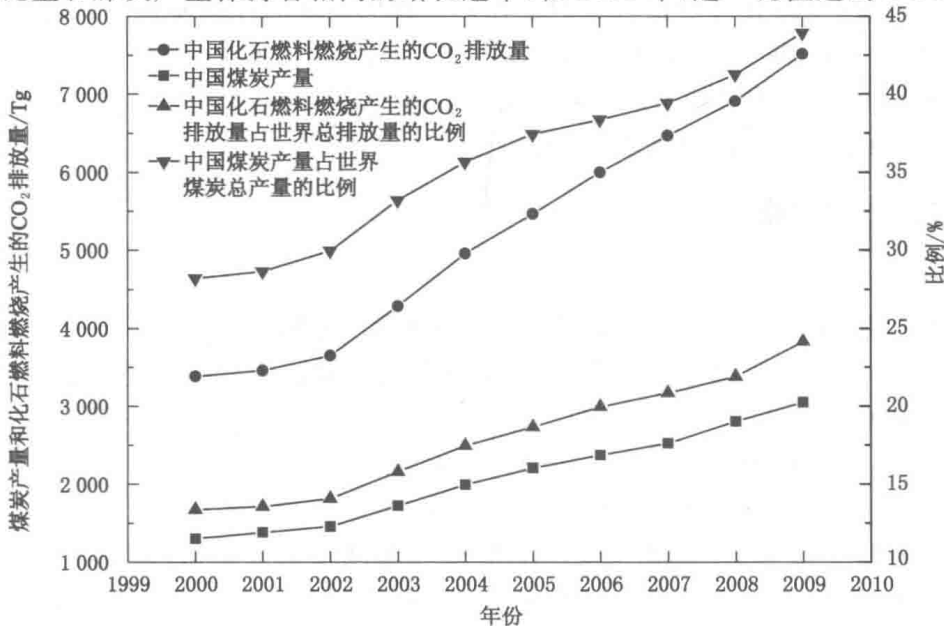


图 1-1 2000~2009 年中国的煤炭产量和化石燃料产生的 CO₂ 及二者在全世界所占的比重

表 1-4 为 2007~2008 年中美两国煤矿开采甲烷排放量(CO₂ 当量)及其与化石燃料燃烧 CO₂ 排放量的比较^[11],从中可以看出,中国这两年由于化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放量大致相当,而中国煤矿开采甲烷排放量则约为美国的 6 倍,远高于美国,但其对温室效应的贡献和化石燃料的使用相比,仍相对较小,前者与后者的比值仅约为 0.05。

表 1-4 2007~2008 年中美两国煤矿开采甲烷排放量(CO₂ 当量)及其与化石燃料燃烧 CO₂ 排放量的比较

| 年份 | 美国 | | | 中国 | | |
|------|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------|
| | 甲烷排放量 (CO ₂ 当量)/Tg | 化石燃料燃烧 CO ₂ 排放量/Tg | 比例 | 甲烷排放量 (CO ₂ 当量)/Tg | 化石燃料燃烧 CO ₂ 排放量/Tg | 比例 |
| 2007 | 58.1 | 6 569.6 | 0.010 5 | 344 | 6 466.1 | 0.053 2 |
| 2008 | 67.3 | 6 371.4 | 0.012 6 | 361 | 6 898.5 | 0.052 3 |

注:1. 化石燃料燃烧 CO₂排放量数据来自 BP(BP plc, 2010),中国煤矿开采甲烷排放量数据根据中国国家煤矿安全监察局的矿井瓦斯等级鉴定报告的统计估算(State Administration of Coal Mine Safety of China, 2008b, 2009),美国煤矿开采甲烷排放量数据来自美国环保署(U. S. EPA, 2010)。
2. 在将甲烷转换为 CO₂当量时采用了 25 的全球变暖潜势。

由此可见,虽然和 CO₂相比,甲烷具有其 25 倍的全局变暖潜势(即温室效应),但由于温室气体的绝大部分仍来自于化石燃料的利用,煤矿开采过程中释放的甲烷对温室气体的贡献很小。

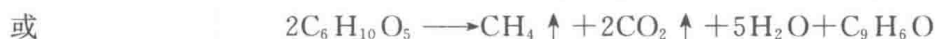
1.2 煤矿瓦斯的生成与组分

煤矿瓦斯是腐植型有机物在成煤的过程中生成的。煤的原始母质——腐殖质沉积以后,一般经历两个成气时期:从植物遗体到泥炭属于生物化学成气时期;在地层的高压高温作用下从褐煤到烟煤直到无烟煤属于煤化变质作用成气时期。瓦斯生成量的多少主要取决于原始母质的组成和煤化作用所处的阶段^[12]。

1.2.1 煤层瓦斯的生成

1.2.1.1 生物化学成煤时期瓦斯的生成

生物化学成煤时期是从成煤原始有机物堆积在沼泽相和三角洲相环境中开始的。在温度不超过 65 °C 条件下,成煤原始物质经厌氧微生物分解成瓦斯。这个过程可用纤维素的化学反应式来概括^[11-12]:



在这个阶段,成煤物质生成的泥炭层埋深浅,上覆盖层的胶结固化不好,生成的瓦斯通过渗透和扩散容易排放到古大气中去,因此生化作用生成的瓦斯一般不会保留在现有煤层内。此后,随着泥炭层的下沉,上覆盖层越来越厚,成煤物质中的温度和所受压力也随之增高,生物化学作用逐渐减弱直至结束,在较高的压力与温度作用下泥炭转化成褐煤,并逐渐进入煤化变质作用阶段。

1.2.1.2 煤化变质作用时期瓦斯的生成

褐煤层进一步沉降,压力和温度作用加剧,便进入煤化变质作用造气阶段。在 100 °C 高温及其相应的地层压力作用下,煤体就会产生强烈的热力变质成气作用。在煤化变质作用的初期,煤中有机质基本结构单元主要是带有羟基(—OH)、甲基(—CH₃)、羧基(—COOH)、醚基(—O—)等侧链和官能团的缩合稠环芳烃体系。煤中的碳素则主要集中在稠环中。一般情况下,稠环的键结合力强、稳定性好,侧链和官能团之间及其与稠环之间的结合力弱、稳定性差。因此,随着地层下降,压力及温度的增大与升高,侧链和官能团不断发生断裂与脱落,生成 CO₂、CH₄ 和 H₂O 等挥发性气体,如图 1-2 所示^[12]。

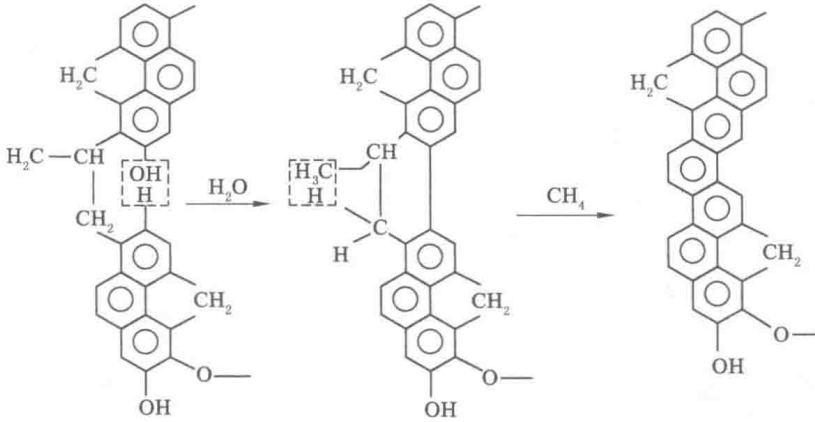
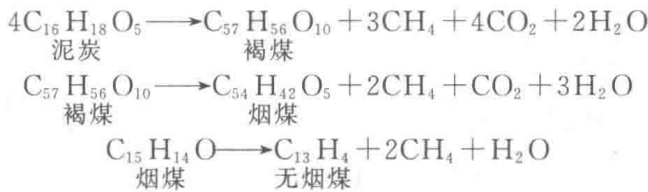


图 1-2 煤化作用(含碳量 83%~92%)成气反映示意图

煤化过程中有机质分解脱出甲基侧链和含氧官能团因而生成 CO₂、CH₄ 和 H₂O 是煤化过程中形成瓦斯的基本反应,可以用下列反应式来表达不同煤化阶段的成气反应:



从上述反应式和图 1-2 可以看出,煤化过程中生成的瓦斯以甲烷为主要组分。在瓦斯产出的同时,芳核进一步缩合,碳元素进一步集中在碳网中。随着煤化变质作用的加深,基本结构单元缩聚芳核的数目不断增加,到无烟煤时,主要由缩聚芳核所组成。从褐煤到无烟煤,煤的变质程度越高,生成的瓦斯量也越多。但各个煤化阶段生成的气体组分不仅不同,而且数量上也有很大变化。

图 1-3 是原苏联学者 B. A. 索科洛夫等人给出的腐植煤在煤化变质阶段成气的一般模型。从图中可以看出,CH₄ 生成是个连续相,即在整個煤化阶段的各个时期都不断地有 CH₄ 生成,只是各阶段生成的数量有较大的波动而已;但重烃的生成则是个不连续相。实验表明,这个以人工热演化产生瓦斯为基础模型与实测的结果在趋势上是一致的。煤的有机显微组分可以分为镜质组、惰性组和壳质组,这些组分产烃的能力大小次序是:壳质组 > 镜质组 > 惰性组^[12-13]。

原苏联学者 B. A. 乌斯别斯基根据地球化学与煤化作用过程反应物与生成物平衡原理,计算出了各煤化阶段的煤所生成的甲烷量,其结果如图 1-4 所示。

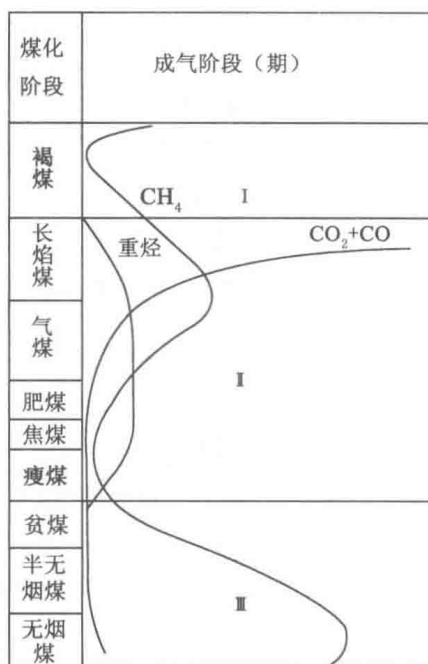


图 1-3 腐植煤在煤化变质阶段成气演化的一般模型

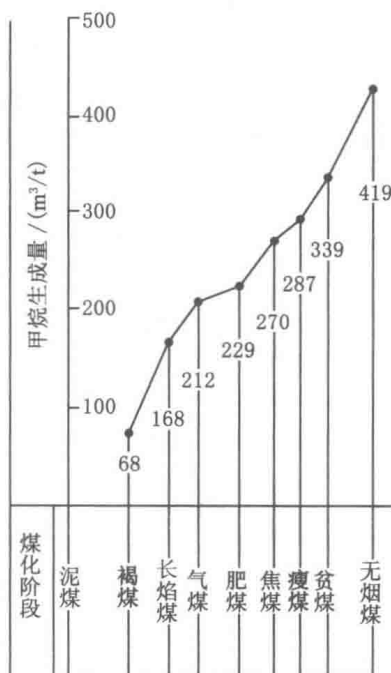


图 1-4 各煤化阶段甲烷生成量曲线

实际上,由于泥炭向褐煤过渡时期生成的甲烷很容易流失掉,所以目前估算煤层生成甲烷量的多少,一般都是以褐煤作为计算起点;但由于自然界的实际煤化过程远比带有许多假设进行的理论计算复杂,所以上述数据只能是近似的,仅供参考。

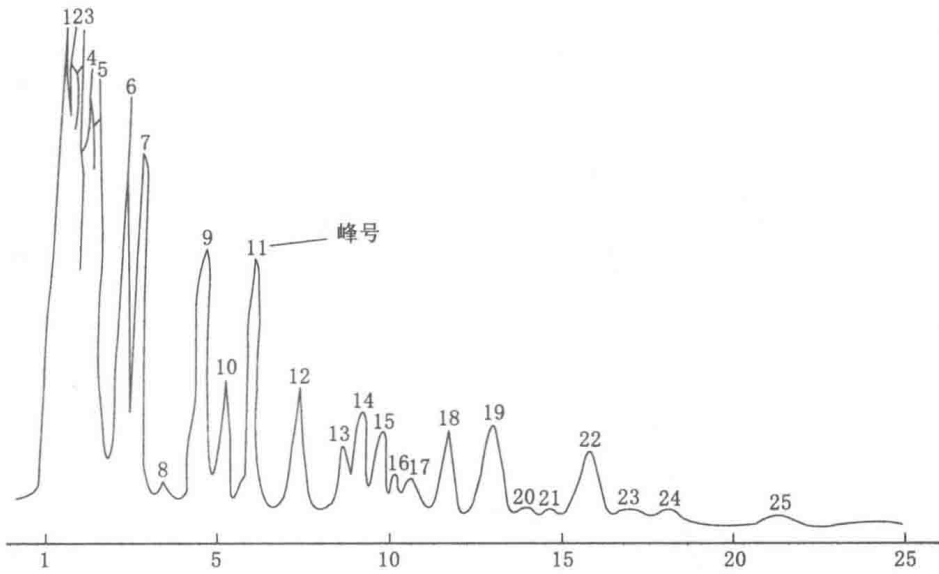
在煤和石油共生矿区,有时煤层瓦斯同油气田的瓦斯侵入有关。例如,四川中梁山煤矿 10 号煤层的瓦斯,与底板石灰岩溶洞中的瓦斯有关,而陕西铜川矿务局焦坪矿井下的瓦斯又与顶底板砂岩含油层的瓦斯有关。

一般来说,世界各国煤田中所含瓦斯以 CH_4 为主,但在某些煤层中还含有 C_2H_6 、 C_3H_8 等重烃气体及 CO_2 等其他气体。例如,甘肃窑街矿区煤二层中富含 CO_2 ,通过对煤二层 CO_2 气体地球化学特征的测试分析,得出煤二层 CO_2 是地壳热动力变质成因,煤田东部 F19 断裂带的周期活动特征对 CO_2 成藏起控制作用。

1.2.2 煤层瓦斯的成分

国内外对煤层瓦斯组分的大量测定表明^[1],煤层瓦斯有约 20 种组分:甲烷及其同系烃类气体(乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷等)、二氧化碳、氮、二氧化硫、硫化氢、一氧化碳和稀有气体(氦、氖、氩、氪)等,其中甲烷及其同系物和二氧化碳是成煤过程的主要产物。当煤层赋存深度大于瓦斯风化带深度时,煤层瓦斯的主要组分是甲烷(>80%)。

图 1-5 和表 1-5 为煤炭科学研究总院抚顺分院(以下简称抚顺分院)得出的煤层中烃类气体组分质谱定性鉴定结果。表 1-6 列出了我国部分煤矿煤层瓦斯组分的分析结果(抚顺分院)。表 1-7 和表 1-8 分别列出了国外几个国家煤层瓦斯组分的测定结果^[2]。

图 1-5 煤层烃类气体组分典型气相色谱图^[3]表 1-5 煤层烃类气体组分质谱定性鉴定结果^[3]

| 峰号 | 组分名称 | 峰号 | 组分名称 |
|----|-----------|----|------------------|
| 1 | 甲烷 | 14 | 环乙烷 |
| 2 | 乙烷 | 15 | 2-甲基己烷 |
| 3 | 丙烷 | 16 | 3-甲基己烷 |
| 4 | 异丁烷 | 17 | 2-甲基环戊烷 |
| 5 | 正丁烷 | 18 | 正庚烷 |
| 6 | 异戊烷 | 19 | 甲基环乙烷 |
| 7 | 正戊烷 | 20 | 1 反 2 顺-4-三甲基环戊烷 |
| 8 | 2,3-二甲基丁烷 | 21 | 1 反 2 顺-3-三甲基环戊烷 |
| 9 | 二甲基戊烷 | 22 | 甲苯 |
| 10 | 三甲基戊烷 | 23 | 3,2-二甲基己烷 |
| 11 | 正己烷 | 24 | 1 顺-3 二甲基己烷 |
| 12 | 甲基环戊烷 | 25 | 正辛烷 |
| 13 | 苯 | | |

表 1-6 我国部分煤矿煤层瓦斯组分测定结果^[3]

| 采样地点 | 煤层 | 煤质 | 煤层瓦斯组分(体积)/% | | | | | |
|-------------------|----|----|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | | | N ₂ | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₄ | C ₃ H ₈ | i-C ₄ H ₁₀ |
| 北票台吉矿—550 m 水平 | 4 | 气肥 | 7.10 | 0.39 | 92.03 | 0.090 8 | 0.007 9 | 0.018 7 |
| 北票台吉矿—550 m, 东三石门 | 5A | 气肥 | 1.42 | 1.60 | 73.07 | 16.18 | 5.49 | 0.713 0 |
| 北票冠山矿—58 m 水平 | 5C | 气肥 | 7.28 | 0.93 | 91.57 | 0.070 4 | 0.001 8 | 0.005 2 |