

新编安全工程专业系列教材

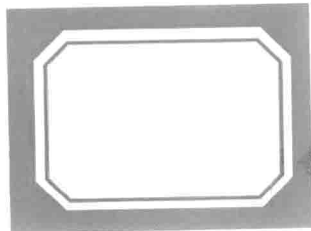
# 矿井瓦斯灾害防治与利用

Kuangjing Wasi Zaihai Fangzhi Yu Liyong

编 著 / 蒋承林 杨胜强 石必明 郭立稳  
张保勇 李晓伟 唐 俊 陈裕佳

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



专业系列教材

# 矿井瓦斯灾害防治与利用

编著 蒋承林 杨胜强 石必明 郭立稳  
张保勇 李晓伟 唐俊 陈裕佳

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书是《新编安全工程专业系列教材》之一,是为培养从事煤矿生产管理的技术应用人才而组织编写的。本书充分体现了当前高等教育人才培养的特点,即注重培养读者的理论水平和实践能力。全书共分6章,内容包括:矿井瓦斯的赋存规律;矿井瓦斯涌出及防治;矿井瓦斯爆炸及预防;煤与瓦斯突出的机理;煤与瓦斯突出的防治;矿井瓦斯抽采及利用。本书以基本概念作为切入点,将基本理论、试验及工程实践结合,使本书由浅入深,顺着从具体到抽象,再由抽象到具体的思路,适应学生循序渐进的学习规律,也适用于工程技术人员的自学需要,能满足科学研究、工程应用和现场技术管理的要求。

本书内容全面,知识系统,结构严谨,理论和实践相结合,着重培养现代实用型科技人才,可作为高等院校采矿工程、安全工程等专业教学用书,也可作为煤矿通风安全管理干部和现场工程技术人员的培养用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿井瓦斯灾害防治与利用 / 蒋承林等编著. — 徐州 :  
中国矿业大学出版社, 2013. 6

新编安全工程专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1862 - 9

I. ①矿… II. ①蒋… III. ①煤矿—瓦斯爆炸—防治—教材②煤矿—瓦斯利用—教材 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 079973 号

书 名 矿井瓦斯灾害防治与利用  
编 著 蒋承林 杨胜强 石必明 郭立稳  
张保勇 李晓伟 唐 俊 陈裕佳  
责任编辑 陈红梅 古惠田  
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 17.5 字数 436 千字  
版次印次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 33.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 《新编安全工程专业系列教材》 编审委员会

顾 问 周世宁

主 任 袁 亮

副 主 任 景国勋 蒋军成 刘泽功

李树刚 程卫民 林柏泉

执行副主任 王新泉 杨胜强

委 员 (按姓氏拼音为序)

柴建设 陈开岩 陈网桦 贾进章 蒋承林

蒋曙光 廖可兵 刘 剑 刘章现 吕 品

罗 云 马尚权 门玉明 孟燕华 倪文耀

宁掌玄 撒占友 沈斐敏 孙建华 孙金华

谭世语 唐敏康 田水承 王佰顺 王宏图

王洪德 王 凯 王秋衡 吴 强 解立峰

辛 嵩 徐凯宏 徐龙君 许满贵 叶建农

叶经方 易 俊 易赛莉 余明高 张德琦

张国华 张敬东 张巨伟 周 延 朱 锴

秘 书 长 马跃龙 陈红梅

# 前 言

煤矿是我国国民经济的基础产业,它为国家建设和人民生活提供必需的能源,在整个国民经济发展中占有非常重要的地位;同时,煤矿又是一个特殊行业,井下作业场所环境恶劣,存在着各种各样的灾害事故隐患。在煤矿灾害事故中,又以瓦斯灾害最为严重。为改善我国煤矿安全状况,保证矿工的安全健康和矿山的长治久安,促进煤炭工业的健康发展,急需培养大批动手能力强,具有工程设计、现场施工和管理能力,同时具有分析问题和解决问题能力的应用型矿业安全人才。这对于提高煤矿的安全管理水平、保障工人的安全与健康、防止重特大事故的发生和减少人员伤亡及财产损失都有十分重要的意义。

矿井瓦斯防治与利用技术是人们在长期的煤矿开采过程中,与矿井瓦斯灾害不断斗争,积累经验,摸索规律,总结提高形成的一项实用技术,它是采矿工程和安全工程(矿业安全工程)等专业必不可少的一门主要专业课。

瓦斯广泛存在于煤层及岩层中,煤矿开采导致瓦斯弥漫于矿井的各种巷道空间,稍不注意就会造成瓦斯灾害。煤矿中的瓦斯灾害主要体现在两个方面:一是这种气体具有爆炸性,要消除瓦斯爆炸的危害,必须将矿井巷道空间的瓦斯浓度控制在爆炸界限之外,需要形成稳定的矿井通风系统,建立准确的瓦斯检测监控系统、可靠的瓦斯爆炸灾害防治系统及有效的煤层瓦斯抽放系统;二是赋存于煤层中的高压瓦斯具有突出危险性,可在很短时间内从煤壁中抛出大量的煤与瓦斯气体,破坏生产设施,危及井下人员的生命安全。要消除突出灾害,必须建立准确可靠的突出预测体系和有效的突出防治体系,将煤与瓦斯突出危险消灭在井下工人所能到达的空间范围之外,即所谓的“御敌于国门之外”。但是,尽管我国在矿井瓦斯防治技术方面经过多年的努力,已经初步建成了一个比较完整的技术体系,但要达到完全消除突出灾害事故,还有很多工作要做。在瓦斯矿井中,必须建立可靠的瓦斯灾害防治体系,同时还必须配备一支懂理论、懂技术、懂管理的瓦斯灾害防治队伍。

本书是根据高等教育采矿工程专业和安全工程专业“矿井瓦斯防治与利用”课程的教学大纲编写而成。通过学习,不仅能够使学生理解国家安全生产方针,而且能够使学生基本掌握煤矿瓦斯灾害的发生机理及防治技术;同时,使学生具有瓦斯矿井管理、矿井瓦斯防治设计和制定瓦斯灾害防治措施的能力,以及具有较强的动手能力和专业技能。

本书共分6章。第1章矿井瓦斯的赋存规律,主要内容包括:矿井瓦斯的基本概念、性质、成因及赋存规律,煤层的特性及对瓦斯赋存的影响,复杂地质条件下煤层瓦斯压力测定

要求及含量的计算方法,煤层中构造煤的形成及对瓦斯含量的影响。第2章矿井瓦斯涌出及防治,主要内容包括:煤层内瓦斯流动的基本规律,瓦斯涌出的定义及涌出量的影响因素,涌出量的预测技术,瓦斯涌出及瓦斯浓度超限的一般治理技术,瓦斯的检测及监控技术。第3章矿井瓦斯爆炸及预防,主要内容包括:矿井瓦斯的爆炸机理,井下瓦斯爆炸的传播及产生的影响,爆炸性气体的安全技术参数,井下爆炸环境对装备的要求,煤矿瓦斯爆炸的原因分析,瓦斯爆炸的预防及抑爆隔爆技术措施。第4章煤与瓦斯突出的机理,主要内容包括:煤矿井下动力现象种类及特征,井下动力现象的分类标准,煤与瓦斯突出的定义,突出的现场观测,突出的一般规律,突出研究的历史及存在问题,煤与瓦斯突出的球壳失稳机理,对井下突出现象的解释及实验验证。第5章煤与瓦斯突出的防治,主要内容包括:石门揭煤突出预测技术,理想石门揭煤的突出预测模型,石门及井筒揭煤突出危险性快速预测技术,煤巷突出预测,采煤工作面的突出预测,区域防突技术,掘进工作面的防突技术。第6章矿井瓦斯的抽采及利用,主要内容包括:瓦斯抽采的目的、条件及意义,瓦斯抽采难易程度及抽采效果的指标,瓦斯抽采的基本要求及其设计的基本内容,瓦斯抽采方法的分类及其布置形式和特点,抽采瓦斯设备与安全装置,瓦斯同采管路与设备的选型,矿井抽采瓦斯的输送及利用,黄田煤矿瓦斯抽采设计实例。

本书既注重一定基础知识和专业知识的掌握,又重视学生基本技能和实际工作能力的培养。本书编写的主要目的就是能够体现现代高等教育的特点,达到“质量一流、特色鲜明、内容丰富、知识准确”的编写要求,全面反映当前国内外矿井瓦斯防治与利用技术方面的最新科技成果及其发展动向。

本书由蒋承林(中国矿业大学)、杨胜强(中国矿业大学)、石必明(安徽理工大学)、郭立稳(河北理工大学)、张保勇(黑龙江科技学院)以及中国矿业大学的李晓伟、唐俊、陈裕佳编著而成。具体分工如下:第1章由张保勇编写,第2章由石必明编写,第3章由郭立稳编写,第4章由蒋承林和李晓伟共同编写,第5章由蒋承林和唐俊编写,第6章由杨胜强编写,附录由陈裕佳编写,全书由蒋承林定稿。

本书在资料整理、图表绘制、计算机录入与排版、校对等方面得到了中国矿业大学研究生徐乐华、田世祥、刘辉辉的大力帮助,他们为完成此书付出了大量艰辛的劳动;在本书的编写过程中,得到了教育部安全类教学指导委员会、中国矿业大学出版社有关领导和工作人员的大力支持和帮助。至此本书完成之际,谨向他们表示衷心的感谢!

著作者

2013年6月

# 目 录

<b>1 矿井瓦斯的赋存与含量</b> .....	1
1.1 矿井瓦斯的 <b>概念与性质</b> .....	1
1.2 矿井瓦斯的 <b>生成</b> .....	2
1.3 矿井瓦斯的 <b>赋存与垂直分带</b> .....	4
1.4 煤层的 <b>孔隙特性与吸附性能</b> .....	7
1.5 煤层瓦斯的 <b>压力及测定要求</b> .....	11
1.6 煤层瓦斯的 <b>含量及影响因素</b> .....	12
1.7 煤层中 <b>构造煤的形成及对瓦斯含量的影响</b> .....	21
<b>复习思考题</b> .....	23
<b>2 矿井瓦斯涌出及防治</b> .....	24
2.1 煤层瓦斯流动的 <b>基本规律</b> .....	24
2.2 瓦斯涌出量及其 <b>主要影响因素</b> .....	29
2.3 矿井瓦斯涌出 <b>来源</b> .....	35
2.4 矿井瓦斯 <b>等级及其鉴定</b> .....	42
2.5 矿井瓦斯涌出量 <b>预测</b> .....	45
2.6 瓦斯 <b>积聚及其防治</b> .....	54
2.7 矿井瓦斯的 <b>检测及监测技术</b> .....	72
<b>复习思考题</b> .....	80
<b>3 矿井瓦斯爆炸及预防</b> .....	82
3.1 矿井瓦斯 <b>爆炸及其机理</b> .....	82
3.2 瓦斯 <b>爆炸的传播及其后果</b> .....	85
3.3 煤矿 <b>爆炸性气体的安全技术参数</b> .....	91
3.4 井下 <b>爆炸环境对装备的要求</b> .....	95
3.5 煤矿 <b>瓦斯爆炸原因分析</b> .....	99
3.6 瓦斯 <b>爆炸的预防及抑爆技术措施</b> .....	104
<b>复习思考题</b> .....	114
<b>4 煤与瓦斯突出的机理</b> .....	115
4.1 煤矿井下 <b>动力现象的种类及特征</b> .....	115
4.2 煤矿井下 <b>动力现象的分类</b> .....	119

4.3	煤与瓦斯突出的现场观测及一般规律 .....	120
4.4	煤与瓦斯突出机理的研究 .....	124
4.5	煤与瓦斯突出的球壳失稳理论 .....	127
	复习思考题 .....	149
<b>5</b>	<b>煤与瓦斯突出的防治 .....</b>	<b>150</b>
5.1	概述 .....	150
5.2	石门及井筒揭煤突出危险性预测 .....	151
5.3	煤巷掘进工作面突出危险性预测 .....	158
5.4	采煤工作面突出危险性预测 .....	164
5.5	煤层的突出危险性鉴定 .....	164
5.6	突出煤层的区域性预测技术 .....	169
5.7	区域性防突技术 .....	171
5.8	局部防突技术 .....	184
	复习思考题 .....	191
<b>6</b>	<b>矿井瓦斯的抽采及利用 .....</b>	<b>192</b>
6.1	瓦斯抽采的目的、条件及意义 .....	192
6.2	瓦斯抽采难易程度及抽采效果的指标 .....	192
6.3	瓦斯抽采的基本要求及其设计的基本内容 .....	195
6.4	瓦斯抽采方法的分类及其布置形式和特点 .....	196
6.5	抽采瓦斯设备及安全装置 .....	216
6.6	瓦斯抽采管路与设备的选型 .....	229
6.7	矿井抽采瓦斯的输送及利用 .....	237
6.8	黄田煤矿瓦斯抽采设计实例 .....	244
	复习思考题 .....	249
	附录 .....	250
	参考文献 .....	267



# 1 矿井瓦斯的赋存与含量

## 1.1 矿井瓦斯的概念与性质

### 1.1.1 矿井瓦斯的概念

矿井瓦斯有广义与狭义之分,广义的矿井瓦斯是指矿井中以甲烷为主的有毒、有害气体的总称,狭义的矿井瓦斯就是指甲烷。从广义上讲,瓦斯由于组分的不同,其性质有很大的差别。从安全的角度可以将这些组分划分为4类:

第一类:可燃性气体,如甲烷等同系烷烃( $C_n H_{2n+2}$ )、环烷烃( $C_n H_{2n}$ )以及  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$  等,这些气体具有可燃烧的特性,与空气混合后在一定浓度范围内往往具有爆炸性或可燃性,对煤矿安全构成严重威胁。

第二类:有毒性气体,如  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  等,这些气体达到一定的浓度时,会直接威胁人的健康甚至生命。

第三类:窒息性气体,如  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  等,这些气体往往赋存在煤体或围岩内,开采过程中大量涌入到生产空间,从而使空气中氧气的浓度降低,造成人员窒息。

第四类:放射性气体,如氡气。

矿井瓦斯从来源来看可分为4类:

第一类:煤层与围岩内赋存并能涌入到矿井中的气体,这一类气体也称为煤层瓦斯。

第二类:矿井生产过程中生成的气体,如爆破时产生的炮烟、机械运行产生的废气等。

第三类:井下空气与煤、岩、矿物及其他材料间的化学或生物化学反应生成的气体。

第四类:放射性物质蜕变过程生成或地下水放出的放射性惰性气体。

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,统称为有机源气体。在有火成岩侵入或碳酸盐受热分解生成的二氧化碳经断层侵入的煤田,还有无机源气体。

### 1.1.2 矿井瓦斯的基本性质

狭义的矿井瓦斯——甲烷,它是一种无色、无味、无臭、可以燃烧或爆炸的气体,标准状态下密度为  $0.716 \text{ kg/m}^3$ ,为空气密度的 0.554 倍。瓦斯的化学性质不活泼,微溶于水,在  $103.3 \text{ kPa}$  及  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,100 L 水可以溶解 3.31 L 甲烷气体, $0 \text{ }^\circ\text{C}$  时可溶解 5.56 L 甲烷气体。在  $2.56 \text{ MPa}$  及  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,164 L 甲烷气体可以与水反应生成 1 L 瓦斯水合物(可燃冰)。

瓦斯在空气中具有较强的扩散性,扩散速率是空气的 1.34 倍,故局部地点较高浓度的瓦斯会自动向低浓度的区域扩散,从而使瓦斯浓度趋于均匀。瓦斯的扩散过程是不可逆的,在煤矿井下巷道中,风流流动一般处于紊流状态,由煤壁等处涌出的瓦斯很容易与空气均匀

混合。因此,在风量充足一般的巷道中,瓦斯的分布通常是均匀的。但是,在有瓦斯涌出的巷道中,瓦斯分布是不均匀的,煤壁附近的瓦斯浓度高,巷道顶部、冒落区顶部往往积聚高浓度瓦斯。瓦斯分布除与其涌出自身特性有关外,主要取决于风速。风速低时,巷道的瓦斯分布不均匀;风速高时,瓦斯分布相对比较均匀。为防止瓦斯局部积聚,《煤矿安全规程》对不同用途的井巷最低风速进行了规定(表 1.1)。

表 1.1 井巷中的允许风流速度

井巷名称	最低允许风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	井巷名称	最低允许风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
架线电机车巷道	1.0	掘进中的岩巷	0.15
运输机巷、采区进、回风巷	0.25	其他通风人行巷道	0.15
采煤工作面、掘进中的煤巷和半煤岩巷	0.25		

### 1.1.3 瓦斯的危害

狭义的矿井瓦斯——甲烷,当其在空气中的浓度上升到 43%,氧气浓度将降到 12%时,人会感到呼吸困难;当其在空气中的浓度上升到 57%,氧气浓度将降到 9%时,人会处于昏迷状态。为避免发生窒息事故,应禁止人员进入井下通风不好的区域。同时,瓦斯易燃易爆,当空气中瓦斯浓度在 5%~16%时,遇到火源就会爆炸,瞬间形成高温高压冲击波,并产生大量一氧化碳。煤矿一旦发生瓦斯爆炸事故,就会造成人员大量伤亡。目前,我国瓦斯灾害占据矿井主要灾害的首位,严重威胁着矿山安全。

瓦斯涌出不但威胁着煤矿的安全生产,同时也是引发温室效应的主要原因之一。在煤炭的生产过程存在着瓦斯气体的大量排放,瓦斯的主要成分甲烷对臭氧层的破坏能力相当于二氧化碳的 7 倍,产生的温室效应相当于二氧化碳的 21 倍。2007 年 6 月,我国颁布的《中国应对气候变化国家方案》提到,2004 年我国温室气体排放总量约为 61 亿吨二氧化碳当量,其中甲烷约为 7.2 亿吨二氧化碳当量(按照 1:21 的当量折算,甲烷排放为 3 428.6 万吨),相关资料表明同年因煤炭开采排放的瓦斯总量约为 140 亿立方米(1 000 万吨),占全国甲烷排放总量的 29%。煤层中绝大部分瓦斯直接向大气排放,既浪费资源,又污染环境。

### 1.1.4 瓦斯的利用

能源问题是制约我国经济和社会发展的主要因素之一,瓦斯作为一种热值高、污染少的洁净能源,是常规天然气最现实可靠的补充或替代能源。据统计,我国陆上煤田埋深 2 000 m 以上的范围内拥有的瓦斯资源量为 36.81 万亿立方米,加强瓦斯抽采利用大有可为。

目前,瓦斯利用主要有工业/民用燃气、瓦斯发电、瓦斯氧化制热、瓦斯固化等。截至 2009 年底,我国民用瓦斯用户约 90 万户,瓦斯发电装机容量达 92 万千瓦。2010 年与 2005 年相比,全国瓦斯抽采量增加 50.5 亿立方米,利用量增加 15 亿立方米,分别上升 219.6% 和 150%。

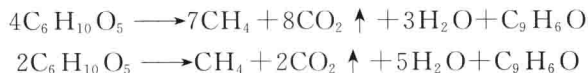
## 1.2 矿井瓦斯的生成

煤矿井下的瓦斯主要来自煤层和煤系地层,因此,矿井瓦斯在很多情况下就是指煤层瓦斯。煤层瓦斯的成因学说多种多样。但国内外多数学者认为,煤中的瓦斯是在成煤的煤化作用过程中形成的,即有机成因说。有机成因说认为,煤的原始母质沉积以后,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;在地层的高温高压作用下,从褐煤到烟煤直到无烟煤属于煤化变质作用成气时期。

### 1.2.1 生物化学成气时期

这个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,腐植体经厌氧微生物分解成甲烷和二氧化碳。这个过程一般可用纤维素的化学反应式来表达:



目前普遍认为,在这个阶段成煤物质生成的泥炭层埋深浅,且上覆盖层的胶结固化不好,故而生成的瓦斯通过扩散和渗透容易排放到古大气中。因此,生物化学作用生成的瓦斯一般不会保留到现在的煤层内。

随着泥炭层的下沉,上覆盖层越积越厚,压力与温度也随之增高,生物化学作用逐渐减弱直至结束;这时,在较高的压力与温度作用下,进入煤化作用阶段,泥炭转化成褐煤。

### 1.2.2 煤化作用成气时期

褐煤层进一步沉降,地层压力与温度作用加剧,便进入煤化变质作用成气时期。据考查,一般在 100 °C 及其相应的地层压力下,煤体就会产生强烈的热力变质成气作用。目前普遍认为,在煤化作用的初期,煤中有机质基本结构单元主要是带有羟基(—OH)、甲基(—CH<sub>3</sub>)、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,故而稳定性好;而侧链和官能团之间及其与稠环之间的结合力弱,故稳定性差。因此,随着地层下降,压力增大,温度升高,侧链和官能团不断发生断裂与脱落,生成 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 等挥发性气体,如图 1.1 所示。

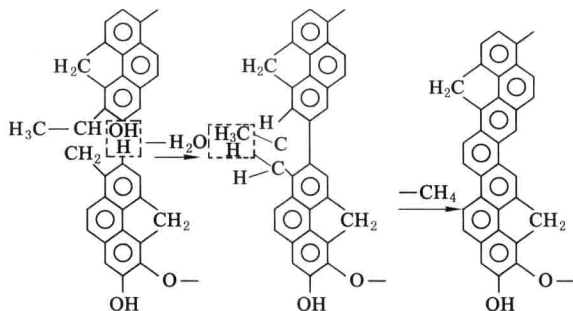


图 1.1 碳化作用(含碳量 83%~92%)成气反应示意图

煤化过程中有机质分解,脱出甲基侧链和含氧官能团而生成的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 是煤成气形成的基本反应,其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。因此,随着煤化作用的加深,基本结构单元中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。所以,从褐煤到无烟煤,煤的变质程度越高,生成的瓦斯量也越多。但值得注意的是,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 1.2 所示为原苏联学者索科洛夫等人给出的腐植煤在煤化作用各阶段成气的一般模式,从中可以看出 CH<sub>4</sub> 生成是个连续相,即存在于整个煤化阶段。

各个时期都不断地有 CH<sub>4</sub> 生成,只是各阶段生成的数量上有较大的波动而已。实践表

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。

原苏联学者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,计算出各煤化阶段的煤所生成的甲烷量,其结果如图 1.3 所示。实际上,由于泥炭向褐煤过渡时期生成的甲烷很容易流失,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。但是,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过程复杂,所以上述这些数据只能是近似值。

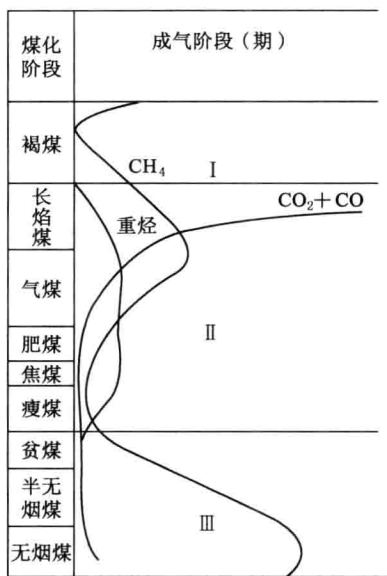


图 1.2 腐植煤在煤化阶段成气演化的一般模式

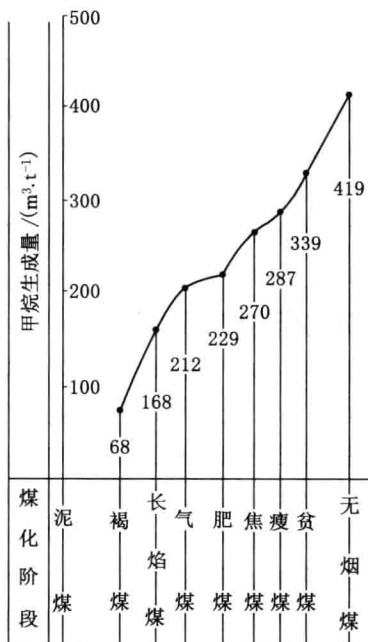


图 1.3 各煤化阶段甲烷生成量曲线

由于地层是一个相互联系的整体,在有些煤系地层中含有油气层,一些煤层中部分瓦斯是由于油气层瓦斯的侵入造成的。例如:四川中梁山煤矿 10 号煤层与底板石灰岩溶洞中的瓦斯相连;而陕西铜川矿务局焦坪煤矿井下的瓦斯又与顶底板砂岩含油层的瓦斯有关。

在波兰的下西里西亚和法国的塞纳煤田的煤层中含有的大量  $\text{CO}_2$ , 则是由于火山活动使碳酸盐类岩石分解生成的  $\text{CO}_2$  气体侵入的结果。在某些煤层中还含有  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  等气体,但一般来说,世界各国煤田中,所含瓦斯均以甲烷为主。

## 1.3 矿井瓦斯赋存与垂向分带

### 1.3.1 矿井瓦斯赋存状态

由于矿井瓦斯的绝大部分来源于煤系地层,所以矿井瓦斯的赋存主要是指煤层瓦斯的赋存。通常,煤是一种具有基质孔隙和天然孔隙的双重孔隙结构体,瓦斯在煤储层中的赋存状态主要有游离状态和吸附状态。此外,我国学者已经合成并于冻土区发现瓦斯的水合物状态。

#### 1) 游离状态瓦斯

游离状态又称为自由状态,这种状态的瓦斯以自由气体状态存在于煤层孔隙或围岩的

孔洞之中,其分子可自由运动,呈现出压力并服从自由气体定律。游离瓦斯量的多少与贮存空间的容积和瓦斯压力成正比,与瓦斯温度成反比。

## 2) 吸附状态瓦斯

吸附状态的瓦斯主要吸附在煤的微孔表面上和煤的微粒结构内部。吸附状态的瓦斯按照结合形式的不同,又分为吸着状态和吸收状态。吸着状态是指矿井瓦斯被吸着在煤体或岩体微孔表面,在表面形成瓦斯薄膜;吸收状态是指瓦斯分子更深入地进入煤的微孔中,进入煤分子晶格中与煤的分子相结合,形成固溶体状态。吸收与吸着的宏观差别仅在于前者的平衡时间长,吸附体的膨胀变形量较大。煤体中瓦斯存在的状态不是固定不变的,而是处于不断交换的动平衡状态,当条件发生变化时,这一平衡就会被打破。由于压力增高或温度降低,部分瓦斯就会由游离状态转化为吸附状态,这一过程称为瓦斯的吸附;当压力降低或温度升高时,部分吸附瓦斯就会由吸附状态转化为游离状态,这一过程称为瓦斯解吸。瓦斯在煤内的存在状态如图 1.4 所示。

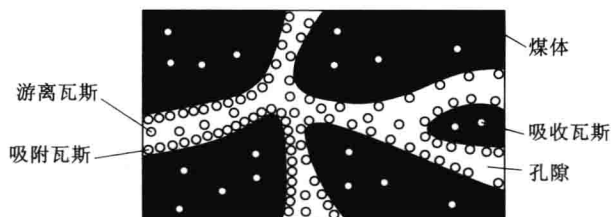


图 1.4 瓦斯在煤内的存在状态示意图

## 3) 水合物状态瓦斯

水合物状态瓦斯(瓦斯水合物)是小分子量瓦斯组分气体(如  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{CO}_2$  等)与水在一定温度和压力条件下络合而成的一种类冰的、非化学计量的、笼形晶体化合物,具有生成条件温和、含气率高、储存稳定安全等特性。

1990 年前后,我国学者俞启香引用原苏联研究成果在国内提出了煤层瓦斯气体可能以瓦斯水化物晶体存在;2000 年,吴强等人对固体瓦斯的生成机理开始了深入研究,首次在实验室合成出并定义为瓦斯水合物,如图 1.5 所示;自 2000 年以来,该课题组研究了瓦斯水合物生成的热力学条件及其主要影响因素,确定了煤层瓦斯水合物存在的可能性;2009 年,煤型气水合物在祁连山南缘永久冻土带的实物发现(图 1.6),佐证了瓦斯水合物研究的科学意义和现实意义。



图 1.5 实验室合成的瓦斯水合物样品

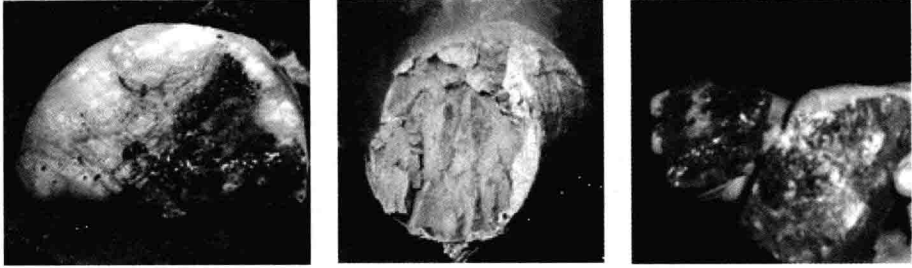


图 1.6 青藏高原多年冻土区获得煤型气水合物实物样品

假如瓦斯水合物自然赋存状态真实存在,由于瓦斯水合物的高含气率,煤层瓦斯水合区周围的瓦斯气体的绝大部分将被水合固结,煤层中赋存介质由气态瓦斯转变成固态水合物,那么其赋存煤层的应力分布将发生较大变化。又由于瓦斯水合物的高分解热,瓦斯络合过程中必将从水合区周围围岩中吸取大量的热量,同时伴随着大量瓦斯气流的传递,所以煤层中会发生较复杂的物质流动和热量传递现象,瓦斯的浓度梯度和围岩的温度梯度也将发生较大的变化。瓦斯水合物的形成将使处于危险状态的煤层体系变得较为稳定,由于大量瓦斯气体的固结,煤与瓦斯突出及瓦斯爆炸事故发生的概率将会大大降低;同时,由于大量的瓦斯气体水合固化后潜藏在煤层中,工作人员在进行瓦斯压力测定,估算煤层瓦斯含量时,如果忽视该相态瓦斯的存在,则会造成煤矿潜在的危险。因此,对水合物状态瓦斯的存在可能性进行探讨具有很重要的理论和实践意义。

### 1.3.2 煤层瓦斯垂向分带规律

当煤层具有露头或直接为透气性较好的第四系冲积层覆盖时,由于煤层中瓦斯不断由煤层深部向地表运移,而地面空气则向煤层中渗透和扩散,造成了煤层瓦斯组分沿赋存深度的带状分布。原苏联矿业研究院格·德·李金通过对顿巴斯和库兹巴斯等煤田大量的煤层瓦斯组分和含量的测定,将煤层中瓦斯组分按赋存深度分为 4 个瓦斯带:二氧化碳-氮气带、氮气带、氮气-甲烷带和甲烷带,如图 1.7 所示。各带的气体成分组成及含量见表 1.2。除甲烷带以外的 3 个带统称瓦斯风化带。

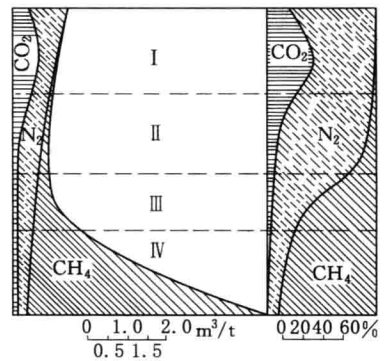


图 1.7 煤层瓦斯垂向分带图

I, II, III——瓦斯风化带;IV——甲烷带

表 1.2 煤层垂向各瓦斯带主要特征

名称	气带成因	瓦斯成分/%		
		N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
二氧化碳-氮气带	生物化学	20~80	20~80	<10
氮气带	空气	>80	10~20	20
氮气-甲烷带	空气和变质	20~80	<10~20	20~80
甲烷带	变质	<20	<10	>80

确定瓦斯风化带和甲烷带的深度是很重要的。在甲烷带内,煤层中瓦斯压力、瓦斯含量以及在开采条件变化不大的前提下瓦斯涌出量都随深度的增加而有规律的增大。研究这些规律及影响因素是防治矿井瓦斯灾害的基本工作之一。

瓦斯风化带上界深度可以根据下列指标中的任何一项确定:

- ① 煤层的相对瓦斯涌出量为  $2\sim 3\text{ m}^3/\text{t}$ 。
- ② 煤层内的瓦斯组分中甲烷及重烃浓度总和达到 80%(体积分数)。
- ③ 煤层内的瓦斯压力为 0.1 MPa(表压)。
- ④ 煤的瓦斯含量达到下列数值:长焰煤  $1.0\sim 1.5\text{ m}^3/\text{t}$ ,气煤  $1.5\sim 2.0\text{ m}^3/\text{t}$ ,肥煤与焦煤  $2.0\sim 2.5\text{ m}^3/\text{t}$ ,瘦煤  $2.5\sim 3.0\text{ m}^3/\text{t}$ ,贫煤  $3.0\sim 4.0\text{ m}^3/\text{t}$ ,无烟煤  $5.0\sim 7.0\text{ m}^3/\text{t}$ 。

## 1.4 煤层的孔隙特性与吸附性能

### 1.4.1 煤的孔隙特征

#### 1) 煤的孔隙的分类

根据瓦斯在煤层的赋存与流动过程中受到的影响,煤中的孔隙分类如下:

微微孔——其直径  $< 2 \times 10^{-6}\text{ mm}$ 。

微孔——其直径为  $2 \times (10^{-6} \sim 10^{-5})\text{ mm}$ ,它与微微孔一起构成煤中的吸附容积。

小孔——其直径为  $10^{-5} \sim 10^{-4}\text{ mm}$ ,它构成毛细管凝结和瓦斯扩散空间。

中孔——其直径为  $10^{-4} \sim 10^{-3}\text{ mm}$ ,它构成缓慢的层流渗透区间。

大孔——其直径为  $10^{-3} \sim 10^{-1}\text{ mm}$ ,它构成强烈的层流渗透区间,并决定于具有强烈破坏结构煤的破坏面。

可见孔及裂隙——其直径  $> 10^{-1}\text{ mm}$ ,它构成层流及紊流混合渗透区间,并决定了煤的宏观(硬和中硬煤)破坏面。

一般情况下,把小孔以上至可见孔的孔隙体积之和称为渗透容积;把吸附容积与渗透容积之和称为总孔隙体积;煤的总孔隙体积占相应煤的体积的百分比称为煤的孔隙率,以“%”表示。

#### 2) 煤孔隙与表面积

煤是孔隙体,其中含有大量的表面积。原苏联矿业研究所的资料表明,各种直径的孔隙表面积同其容积有表 1.3 所列的关系。从表中可知,微微孔和微孔孔隙体积还不到微微孔至中孔孔隙体积的 55%,而其孔隙表面积却占整个表面积的 97%以上;同时,微孔发育的煤,尽管其孔隙率可能不高,可是却有相当可观的表面积。表 1.4 是煤炭科学总院重庆分院测定的一些煤的比表面积。从表中可知,随着挥发分的减小,即煤化程度的增加,煤的比表面积大大增加,这与表 1.3 的结果是一致的。

表 1.3 孔隙直径与其表面积、容积的关系

孔隙类别	孔隙直径/mm	所占总孔隙表面积百分比/%	所占总孔隙体积百分比/%
微微孔	$< 2 \times 10^{-6}$	62.2	12.5
微孔	$2 \times (10^{-6} \sim 10^{-5})$	35.1	42.2



续表 1.3

孔隙类别	孔隙直径/mm	所占总孔隙表面积百分比/%	所占总孔隙体积百分比/%
小孔	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	2.5	28.1
中孔以上	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	0.2	17.2
合计		100.0	100.0

表 1.4 煤的挥发分与比表面积的关系

采样地点与煤层层位	四川鱼田堡矿			四川松藻煤矿		
	四煤			八煤		
	顶板炭	槽口炭	底板炭	顶板炭	槽口炭	底板炭
挥发分/%	17.5	17.43	—	10.85	11.16	10.90
比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	28.69	93.32	27.40	82.08	112.24	56.97
采样地点与煤层层位	江西涌山煤矿					
	三 <sub>2</sub> 煤	三 <sub>3</sub> 煤	二煤	四煤	六煤	
挥发分/%	7.52	5.03	7.70	7.08	10.57	
比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	140.37	184.23	255.13	201.36	165.36	

### 3) 煤孔隙特性的主要影响因素

煤的孔隙特性与煤化程度、地质破坏程度的地应力性质及其大小等因素密切相关。由于这些因素的不同,各矿煤层的孔隙率可在较大的范围内变化,见表 1.5。

表 1.5 我国一些矿井煤的孔隙率

矿井	煤的挥发分/%	孔隙率/%	矿井	煤的挥发分/%	孔隙率/%
抚顺老虎台	45.76	14.05	本溪田师傅 3 煤	13.71	6.7
鹤岗大陆	31.86	10.6	阳泉三矿 3 煤	6.66	14.1
开滦马家沟 12 煤	26.8	6.59	焦作王封大煤	5.82	18.5

影响煤孔隙率大小的主要因素如下:

(1) 孔隙率与煤化程度的关系 如表 1.6 所列,可以看到,从长焰煤开始,随着煤化程度的加深(挥发分减小)煤的总孔隙率体积逐渐减小,到焦、瘦煤的时候达到最低值,而后随煤化程度的加深,总孔隙体积又逐渐增加,至无烟煤时达到最大值。然而,煤中的微孔体积随着煤化程度的增加而增长。

表 1.6 煤的孔隙体积(据马克耶夫煤炭安全研究所)

煤牌号	挥发分/%	孔隙体积/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ 煤)					
		总孔隙		小孔至大孔		微孔	
		区间值	平均值	区间值	平均值	区间值	平均值
长焰煤	46~43	0.073~0.091	0.084	0.045~0.070	0.061	0.021~0.028	0.023
气煤	40~35	0.028~0.080	0.053	0.001~0.058	0.030	0.015~0.034	0.026



续表 1.6

煤牌号	挥发分/%	孔隙体积/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> 煤)					
		总孔隙		小孔至大孔		微孔	
		区间值	平均值	区间值	平均值	区间值	平均值
肥煤	34~28	0.026~0.078	0.051	0.001~0.050	0.025	0.019~0.033	0.026
焦煤	27~22	0.021~0.068	0.045	0.001~0.039	0.019	0.021~0.038	0.026
瘦煤	21~18	0.028~0.065	0.045	0.001~0.036	0.016	0.022~0.033	0.029
贫煤	17~10	0.034~0.084	0.055	0.001~0.052	0.022	0.027~0.052	0.033
半无烟煤	9~6	0.041~0.094	0.065	0.001~0.054	0.023	0.033~0.056	0.044
无烟煤	5~2	0.055~0.136	0.088	0.001~0.076	0.029	0.049~0.062	0.055

(2) 孔隙率与煤的破坏程度的关系 前已述及,大孔决定于强烈的地质构造破坏煤的破坏面,因此煤的破坏越严重,其渗透容积越高,即孔隙率越大,见表 1.7。但是,这种测试是在实验室做的,其结果与煤层在地下的实际状况差异较大。在压力作用下,渗透容积极易改变。

表 1.7 煤的破坏类型与其渗透容积等参数的关系

参 数	煤的破坏类型				
	I	II	III	IV	V
煤中渗透容积/(m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	0.012 06	0.013 05	0.021 55	0.031 36	0.082 5
煤的坚固性系数 <i>f</i>	0.69~2.2	0.25~1.33	0.13~0.52	0.1~0.33	0.1
煤的黏结力 <i>C</i> /MPa	2.43	1.70	1.03	0.72	—
煤的内摩擦角/(°)	38.8	37.5	34.6	33.3	—
煤的瓦斯放散初速度 Δ <i>P</i>	0.5~2.8	0.5~8	1~19.3	3.8~21.7	16.7~22.1

(3) 孔隙率与地应力的关系 压性的地应力(压应力)可使渗透容积缩小,压应力越高,渗透容积缩小越多,即孔隙率减小越多;张性地应力(张应力)可使裂隙张开,使渗透容积增大,张应力越高,渗透容积增长越多,即孔隙率增加越多。卸压(地应力减小)作用可使煤(岩)的渗透容积增大,即孔隙率增高;增压(地应力增高)作用可使煤(岩)受到压缩,渗透容积减小即孔隙率降低。试验表明,地应力并不减小煤的吸附体积,或者减少的不多(因大孔及可见孔的表面积减少),因此地应力对煤的吸附性影响很小。

### 1.4.2 煤的吸附性能

由于气体分子与固体表面分子之间的相互作用,气体分子暂时停留在固体表面上的现象称为气体分子在固体表面上的吸附。具有较大表面积的煤是一种天然的吸附剂,具有良好的吸附性能。煤对瓦斯的吸附属于物理吸附,即瓦斯分子与煤分子之间的作用力是剩余的表面自由力(称为范德华引力)。当气体分子碰到煤表面时,其中一部分就被吸附,并释放出吸附热。在被吸附的分子中,当其热运动的动能足以克服吸附引力场的位垒时可重新回到气相,这时要吸收解吸热,这一现象称为解吸,吸附与解吸是可逆的。由于吸附在煤表面上的瓦斯贴合紧密,其密度类似其液态时的密度。