

非均匀煤层的 瓦斯赋存、流动特性 与等效渗透率理论

Gas Occurrence, Flow Characteristics
and Equivalent Permeability Theory of
Non-uniform Coal Seam

赵洪宝◎著

非
外
借



科学出版社

非均匀煤层的瓦斯赋存、流动特性 与等效渗透率理论

Gas Occurrence, Flow Characteristics and Equivalent Permeability Theory of Non-uniform Coal Seam

赵洪宝 著

国家自然科学基金面上项目“动力扰动对卸压煤体内部微结构影响与增透机理研究”(项目编号: 51474220)

国家自然科学基金面上项目“短壁综放开采顶板破断致冲与控制机理”(项目编号: 51674243)

深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室开放基金资助项目“夹研层对煤层内瓦斯流动特性影响研究”(项目编号: G201603)

河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室省部共建国家重点实验室培育基地开放基金“含不透气夹研煤层的瓦斯流动特性与等效渗透率研究”(项目编号: WS2017A06)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对卸压后、含夹矸层等条件下形成的不均匀煤层的瓦斯赋存与流动特性研究的需要,结合作者多年研究经验和对研究成果的总结,系统地介绍了煤层内瓦斯的赋存与流动特性、影响煤层瓦斯赋存状态与流动特性的因素、表征瓦斯赋存与流动特性的主要参数指标,以及一些根据作者及所带领团队多年进行研究所获得的科研成果。主要内容包括动力冲击对煤体内部微结构的影响、非均匀载荷对瓦斯钻孔周边煤体内部微结构造成的影响、卸压煤体内瓦斯放散与流动特性、含夹矸煤层的瓦斯放散与流动特性、不均匀煤层的等效渗透率理论等。

本书可供从事采矿工程、安全工程、地质工程及石油工程等方面的工程技术人员、科研人员使用,也可作为高等院校相关专业的高年级硕士生、博士生开展相关研究的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非均匀煤层的瓦斯赋存、流动特性与等效渗透率理论=Gas Occurrence, Flow Characteristics and Equivalent Permeability Theory of Non-uniform Coal Seam /赵洪宝著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055885-5

I. ①非… II. ①赵… III. ①煤层-瓦斯赋存-研究 ②煤层-流动特性-研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第305533号

责任编辑:刘翠娜/责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年12月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:400 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着我国国民经济的高速发展,对煤炭资源的需求急剧增加,导致煤炭年产量屡创新高,2014年更是达到了近40亿t。然而,高产能必须以高效的安全形势为基本保障。虽然地下煤炭开采过程所面临的“五大灾害”,即顶板灾害、瓦斯灾害、水害、火灾和粉尘灾害,在过去几年里发生的次数得到了极大降低且灾害造成的死亡人数也急剧下降,重特大灾害的发生得到了根本遏制,但瓦斯灾害在煤矿“五大灾害”中仍是一次导致死亡人数最多的灾害,且这一易于造成群死群伤的危害发生时造成的社会影响非常恶劣,对煤炭工业产生的负面影响不可估量。在所有涉及瓦斯的灾害中,又以煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸对煤炭开采工作产生的影响最大。

若煤层内含有夹矸层后,煤层的完整性将被破坏,煤层的非均匀性将增加,煤层在局部范围可能形成封闭结构而导致瓦斯局部积聚,这些变化将严重劣化这些非均匀煤层内瓦斯的赋存和流动特性,进而有可能增加煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸等涉及瓦斯灾害的发生。当瓦斯被作为一种能源时被称为煤层气,煤层气采收的关键科学问题主要包括气井(钻孔)影响半径和有效抽采时间,而煤储层含有夹矸层后产生的诸多变化,势必将劣化气井(钻孔)影响半径并缩短气井(钻孔)的有效抽采时间。因此,分析和研究因含夹矸层而导致非均匀性增加煤层的力学性质变化、受非均匀载荷时的力学性质变化、采收气井(钻孔)稳定性维护、非均匀煤层的瓦斯赋存与流动特性,建立非均匀煤层的渗透率估算模型,提出非均匀煤层的等效渗透率理论,越来越成为相关工作领域的重点和热点。

本书的研究工作是在国家自然科学基金面上项目“动力扰动对卸压煤体内部微结构影响与增透机理研究”(项目编号:51474220)等科研项目的大力资助下完成的。本书内容上以煤层内含有夹矸层后将增加煤层非均匀性为基本假设,以煤层内含有夹矸层后煤层的非均匀性增加将严重影响其内部瓦斯的赋存与流动特性为前提,围绕由取自典型矿区煤试样和模拟材料共同构成的非均匀煤层开展了大量的相关基础研究,主要包括非均匀载荷作用下煤的力学性质演化、煤样内微结构演化、非均匀载荷对瓦斯抽采钻孔产生的影响、非均匀煤层的瓦斯放散特性和瓦斯流动特性等内容,并在试验研究结果分析和理论分析的基础上提出了非均匀煤层的等效渗透率理论和估算模型,这将从一定程度上揭示非均匀煤层的瓦斯赋存与流动特性及其渗透特性受到的影响规律。

在本书的撰写过程中,通过参加国内外学术大会得到了广大业内前辈和同仁

的指导和帮助，对本书的研究思路、撰写结构等方面起到了点拨和指导作用，在此表示诚挚的谢意；作者带领的科研团队成员，包括张欢、王中伟、胡桂林、李伟、郭旭阳、琚楠松等在本书的撰写过程中也付出了辛勤的劳动和汗水，在此一并表示感谢！

由于作者及其带领的科研团队水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

赵洪宝

2017年8月15日

目 录

前言

第 1 章 煤层与煤层瓦斯	1
1.1 煤及煤层	1
1.2 煤层瓦斯	6
1.3 本章小结	14
第 2 章 煤层瓦斯解吸、流动影响因素与分析	15
2.1 煤层瓦斯解吸吸附影响因素与分析	16
2.2 煤层瓦斯流动影响因素与分析	19
2.3 煤层瓦斯放散特性影响因素与分析	26
2.4 本章小结	30
第 3 章 研究设备的完善与开发	31
3.1 方形型煤制备装置	31
3.2 落锤式煤岩冲击加载试验装置	34
3.3 多向约束摆锤式冲击动力加载试验装置	36
3.4 煤岩细观观测系统	37
3.5 块煤瓦斯放散特性试验系统	40
3.6 非均匀载荷施加试验装置	47
3.7 本章小结	49
第 4 章 动力冲击对煤的表面及内部微结构影响	50
4.1 冲击载荷	50
4.2 超声波与其传播特性	52
4.3 超声波检测	53
4.4 基于超声波检测的冲击载荷对煤岩内部结构影响研究	55
4.5 基于核磁共振(NMR)的动力冲击对煤岩内部微隙结构的影响	67
4.6 冲击载荷下煤岩表面裂隙演化特征细观试验	77
4.7 单次冲击能量大小与煤岩裂隙演化的关系	86
4.8 递增式冲击对煤岩损伤的影响	88
4.9 坚硬颗粒、原生裂隙、非均质性对煤岩表面裂隙扩展路径的影响	97
4.10 本章小结	98

第 5 章 冲击载荷下煤岩表面裂隙扩展分形特征	101
5.1 分形与分数维	101
5.2 根据测度关系求维数的方法	102
5.3 岩石力学中的分形问题与应用	103
5.4 基于 MATLAB 的煤岩裂隙分形维数计算程序	106
5.5 煤岩表面裂隙扩展分形特征	108
5.6 本章小结	112
第 6 章 非均匀载荷对瓦斯钻孔稳定特性影响研究	113
6.1 含孔洞类煤岩多孔材料裂纹扩展量化表征	113
6.2 含孔洞煤裂纹扩展的量化表征	125
6.3 煤体裂纹演化的数值计算与分析	136
6.4 本章小结	148
第 7 章 放散面积和运移路径对煤层瓦斯放散的影响	150
7.1 煤的瓦斯放散特性	150
7.2 放散面积对煤层瓦斯放散的影响	153
7.3 瓦斯运移路径对瓦斯放散的影响研究	168
7.4 本章小结	173
第 8 章 放散面积与放散路径影响下的瓦斯放散机理探讨	175
8.1 瓦斯放散机理与模型的有关认识	175
8.2 煤层瓦斯放散机理的探讨	177
8.3 瓦斯放散物理-数学模型	182
8.4 本章小结	189
第 9 章 卸压作用对瓦斯放散与流动特性影响	190
9.1 采动导致的卸压作用	190
9.2 卸轴压起始载荷水平对含瓦斯煤样力学特性影响	196
9.3 卸围压时含瓦斯煤样力学性质演化	201
9.4 瓦斯放散过程中煤样力学特性演化	206
9.5 线弹性阶段卸轴压煤样内瓦斯流动特性	211
9.6 含瓦斯煤样横向变形与瓦斯流动特性耦合关系	216
9.7 本章小结	222
第 10 章 不均匀煤层瓦斯放散特性试验与理论分析	224
10.1 煤层构成与形态特点	224
10.2 夹矸层对煤层开采的影响	226
10.3 夹矸层对煤层瓦斯的影响	228

10.4	煤体瓦斯吸附解吸理论·····	230
10.5	试验方案与试验步骤·····	233
10.6	夹矸层对煤层瓦斯放散影响机理分析·····	248
10.7	本章小结·····	254
第 11 章	吸附作用对煤层瓦斯流动特性影响研究·····	256
11.1	吸附解吸作用与煤层瓦斯渗流的关系·····	256
11.2	吸附作用对煤层渗透特性影响试验·····	260
11.3	本章小结·····	270
第 12 章	夹矸层对煤层渗透性影响试验研究·····	271
12.1	基于均匀组合介质的等效渗透率理论·····	271
12.2	基于不均匀组合介质的等效渗透率理论·····	275
12.3	不均匀煤层等效渗透率的理论基础·····	279
12.4	含单层夹矸煤层的等效渗透率理论试验验证·····	284
12.5	夹矸层对滑脱因子的影响·····	287
12.6	夹矸层对煤基质吸附膨胀变形的影响·····	293
12.7	含双层夹矸煤层的等效渗透率理论试验验证·····	303
12.8	本章小结·····	308
参考文献	·····	310

第 1 章 煤层与煤层瓦斯

煤炭在世界能源消费结构比例中占近 30%，略低于石油消费。我国煤炭产量居世界第一位，约占世界总产量的 50%，煤作为我国能源稳定的可靠基础能源，在今后一个相当长的时期内仍将是我国的主导能源^[1]。根据《中国中长期能源发展战略研究》，2030 年左右我国煤炭预测产能可达到 30 亿~35 亿 t，至 2050 年将维持在约 35 亿 t 水平，这才能基本满足经济发展对煤炭资源的需求^[2~4]。

1.1 煤 及 煤 层

1) 煤的形成

煤是一种固体可燃有机生物沉积岩。煤是以含碳、氢元素为主，同时含有少量氧、硫、氮、磷及稀有元素的可燃性矿物，是千百万年前的远古时代植物在特殊的环境中经过极其复杂的生物化学、地球化学、物理化学作用后形成的。煤的形成过程可简单表示为如图 1.1 所示。

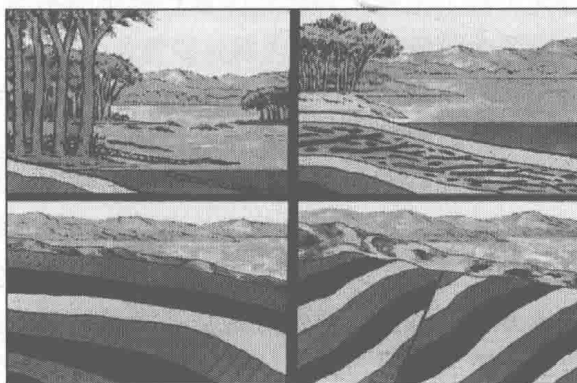


图 1.1 煤的形成过程

从远古时代植物的死亡、堆积到经煤化作用等转变为煤，是一系列的物理、化学演化过程的集合，这个过程集合称为成煤作用。成煤作用根据时间先后关系可大致分为两个阶段，即泥炭化阶段和煤化作用阶段。成煤的基础物质主要是植物，原基础物质组成的不同是影响煤质最重要的因素之一，根据成煤植物的不同，可以划分出以高等植物为主原基础物质形成的腐殖煤和以低等植物为主原基础物质形成的腐泥煤两大类，腐殖煤最为常见而腐泥煤很少，现代煤炭工业开采的对

象中绝大多数是腐殖煤。

(1) 泥炭化阶段。

植物遗体是成煤的基础物质来源。植物遗体能够顺利地堆积并转变为煤需要极其特殊的环境条件。首先要有大量的植物持续的生长、死亡；其次需要特殊的保存植物遗体的环境，需满足能使死亡植物原地堆积且不被氧化的条件，同时具备上述两个条件的环境常见为沼泽。植物大量堆积在沼泽浅部后，在需氧微生物的分解作用下一部分被彻底破坏分解成气体和水，未被分解的稳定部分保留下来并在沼泽水的覆盖下逐渐与空气隔绝，此时厌氧微生物利用植物有机质中的氧发生氧化分解、去羧基和脱水，释放出二氧化碳和甲烷气体(即狭义瓦斯)而形成一种凝胶状、含水分很高的棕褐色物质，这一过程就是泥炭化阶段，而过程中形成的物质被称为泥炭，也可称为泥煤。泥炭随着地壳和地质构造的不断运动下沉直至被覆盖而深埋于地下，当泥炭层被无机沉淀物覆盖后，就标志着泥炭化阶段的结束，煤的形成将进入下一个阶段，即煤化作用阶段。

(2) 煤化作用阶段。

当泥炭化阶段结束后，煤的形成将进入煤化作用阶段。此时，生物化学作用逐渐减弱直至消失，在物理化学和化学作用下泥炭开始向褐煤、烟煤和无烟煤转化，这一过程就是煤化阶段。根据主导作用因素和结果的不同，这个阶段可细分为成岩阶段和变质阶段两个阶段。

①成岩阶段：泥炭化阶段末期，泥炭被覆盖且深埋于地下，其在上覆无机沉积覆盖层导致的压力作用下逐渐被压密，且伴之以失水、胶体老化硬结等物理和物理化学变化，而缓慢地逐渐转变为具有生物岩特征的褐煤过程。这个过程需要的埋藏深度不大，上覆盖层厚度为 200~400mm，温度约为 60℃。在这一过程中，除了发生压实、失水等物理变化之外，也伴有分解和缩聚等化学反应，这些化学反应使泥炭中的植物成分逐渐减少，腐殖酸含量先增加后减少。如果地层继续向下运动，且上覆的覆盖层持续增厚，成煤环境中的温度将明显升高，所处环境的压力也继续加大，成煤作用将进入下一阶段，即变质阶段。

②变质阶段：处于上述复杂环境中且经上述复杂过程形成的褐煤沉降到地层深部后，在持续的地热和高压作用下将会继续发生化学反应，而促使其组成、结构和性质都在发生变化，引起这些变化的主要因素有持续作用、温度和压力。

a. 持续作用：这里所说的持续作用不是指距今地质年代的长短，而主要指作用在时间维度上的延长，即在一定的温度和压力条件下，作用于煤的变质过程的时间长短。持续作用的影响表现在两个方面，一方面，当作用温度值相同时煤的变质程度取决于温度作用时间的长短；另一方面，煤所受短时间较高温度的作用

和受长时间较低温度的作用具有等效作用，即可以达到相同的变质程度。

b. 温度：地热资源是一种宝贵的自然资源，成煤过程中地热资源也起着重要的作用，地热使地温自地表常温层往深部呈逐渐升高趋势，成煤过程中埋藏深度增加的同时将意味着所处环境温度同时增加。大量资料分析表明：成煤过程中的不同煤化阶段所需的温度是不同的，大致表现为：褐煤 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 、长焰煤 $< 100^{\circ}\text{C}$ 、烟煤 $< 200^{\circ}\text{C}$ 、无烟煤 $< 350^{\circ}\text{C}$ 。

c. 压力：压力在煤的物理结构变化中起主要作用，如孔隙率的减小、水分的降低、密度的变化等。但一般的认识是，只有化学变化才可以对煤的化学结构变化起决定性的影响作用。

2) 煤的分类

煤是在特殊的地理环境中，经过一系列的特殊过程形成的一种特殊可燃性矿物。根据形成煤炭资源的原基础植物组成的不同，可将煤分为腐殖煤和腐泥煤两类，而又以腐殖煤最为常见，现代煤炭企业开采的主采煤层多数为腐殖煤。

(1) 腐泥煤。

形成煤炭资源的原基础植物为低等植物或浮游生物时，形成的煤炭资源为腐泥煤。腐泥煤主要有藻煤和胶泥煤两种。藻煤主要由藻类生成，而胶泥煤几乎完全由基质组成，是由一种无结构的腐泥煤植物成分彻底分解形成的，若胶泥煤中矿物含量大于 40%，则此时的胶泥煤被称为油页岩，油页岩也是一种重要的能源资源。

(2) 腐殖煤。

形成煤炭资源的基础植物为高等植物时，形成的煤炭资源为腐殖煤。腐殖煤最为常见，人们通常意义上所指的煤均为腐殖煤。根据煤化程度的不同，腐殖煤可分为以下四大类。

①泥炭：泥炭是植物向煤转化过程中的过渡产物，其内尚保存有大量未分解的植物组织。泥炭含水率较高，刚开采出来的泥炭含水率在 $85\%\sim 95\%$ ，自然风干后的泥炭含水率也在 $25\%\sim 35\%$ ，干燥的泥炭呈棕黑色或黑褐色散碎度高的小块状。我国的泥炭资源主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山、青藏高原和太行山脉范围，储量约为 270 亿 t。泥炭具有丰富的用途，可以作为燃料气和工业原料，可以用来制作优质的活性炭，也可用来制造改良土壤用的腐殖酸肥料。

②褐煤：上述的泥炭若后续经过脱水、压实作用，则转变为有机生物岩，此时矿物外表面呈褐色或暗褐色，称为褐煤。大多数褐煤没有光泽，含水率一般在 $30\%\sim 60\%$ ，自然干燥后的褐煤含水率仍维持在 $10\%\sim 30\%$ ，且易于风化碎裂，不宜长途运输。褐煤和泥炭最大的区别在于已经不含含有未分解的植物组织残骸。褐

煤按照煤化程度的高低也可分为土状褐煤、暗褐煤、亮褐煤和木褐煤。我国的褐煤资源主要分布在内蒙古、云南和黑龙江等省份，储量大约为 900 亿 t。褐煤可用作气化原料，也可用来制作高热值的城市煤气或焦油。

③烟煤：褐煤经受的煤化作用继续发展就形成了烟煤。同属于烟煤范畴的煤炭资源，也具有不同的光泽，但绝大多数呈明暗交替的条带状，比较致密且硬度大。烟煤是分布最广、储量最大、品种最多的煤种。根据煤化程度的不同，烟煤也可细分为长焰煤、不黏煤、气煤、肥煤、瘦煤和贫煤，其中气煤、肥煤、焦煤和瘦煤都具有不同的黏结性，统称为炼焦煤。

④无烟煤：无烟煤是一种煤化程度最高的腐殖煤。无烟煤外观呈灰黑色，具有金属光泽且无明显条带。无烟煤在各煤种中的挥发分最低、硬度最大。无烟煤的主要用途为民用、发电和制造合成氨等。

3) 煤的赋存环境

煤炭资源形成于特殊的地质环境中，成煤后也将赋存于特殊的地质环境中，与煤层直接接触或人工开采活动会涉及的岩层主要是煤层上下一定范围内的岩层，其中位于影响范围附近的煤层之上的岩层称为顶板岩层，而位于煤层之下的岩层称为底板岩层。顶板岩层又分为伪顶、直接顶和老顶，如图 1.2 所示。

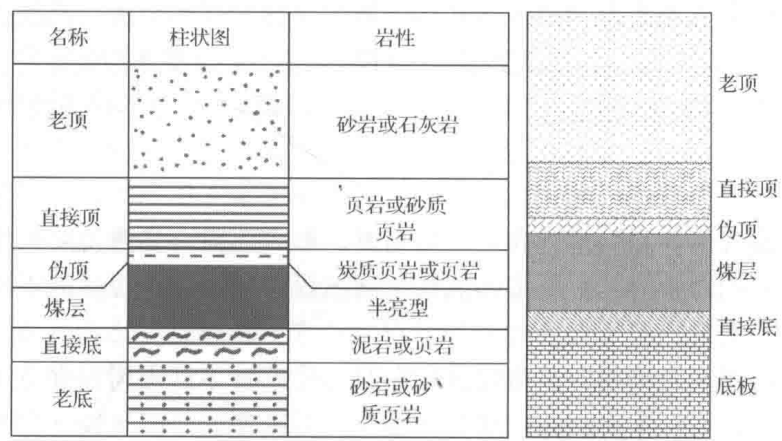


图 1.2 煤层顶底板岩层

(1) 顶板岩层中。

①伪顶：位于直接顶与煤层之间，厚度一般小于 0.5m 或局部不可见，为极易垮落的软弱岩层，岩性一般为泥质页岩、炭质页岩。

②直接顶：位于伪顶上方，一般由一层或几层性质近似的岩层组成，通常由具有一定稳定性且易于随煤炭开采工作的推进而垮落的岩层组成，厚度一般为几米，岩性多为页岩、砂质页岩。

③老顶：位于直接顶上方，为厚而坚硬的岩层，岩性上通常为砂岩、石灰岩等坚硬岩石，该类岩石可悬空较大长度。

(2) 底板中。

①伪底：直接位于煤层之下的薄软岩层，岩性多为炭质页岩或泥岩，一般厚度为 0.2~0.3m。并非全部的煤层都具有伪底结构，常见为缺失状态。

②直接底：直接底是位于煤层伪底之下的硬度较低的岩层，厚度一般在几十厘米到 1m，岩性常见为泥岩、页岩或黏土岩。当直接底为黏土岩时，遇水易于膨胀，这通常是导致煤矿底鼓现象的重要原因之一。

③老底：位于直接底之下，岩性通常为比较坚硬的岩层，常见的如砂岩、石灰岩等。

煤层与顶底板的接触关系可分为三类，即明显接触、过渡接触和冲刷接触。当表现为明显接触时，表明煤层沉积环境变化比较迅速；过渡接触则表明煤层沉积环境变化比较平和；冲刷接触表明煤层沉积环境变化非常急剧。

4) 煤的内部结构

煤是一种各向异性的非均质似多孔介质材料，其内含有丰富的孔隙、裂隙结构，如图 1.3 所示。

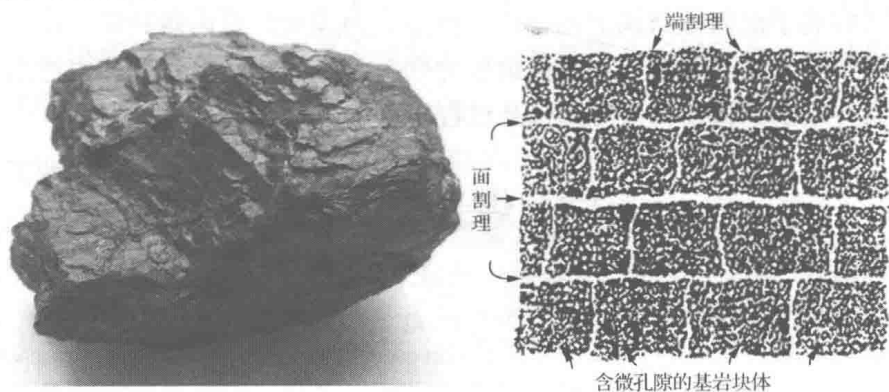


图 1.3 煤的内部微结构

煤体内的微结构中，几何尺度较大且之间相互连通的微结构，一般称为裂隙；而把几何尺寸相对较小且彼此不连通的微结构，称为孔隙。根据煤体内微结构的几何尺寸大小，可将其进行如下分类，如表 1.1 所示。

由于煤中含有大量的孔隙、裂隙微结构，故其内含有大量的内表面积。根据微结构的分类，各尺度微结构各自所占煤内表面积的比例如表 1.2 所示。

虽然如上述，但煤体内的微结构还受到诸多因素的影响，如煤化程度、地质破坏程度、地应力性质及地应力大小等。其中，煤化程度是从煤的形成阶段对煤

表 1.1 微结构分类

微结构名称	几何尺寸范围/mm
微微孔	$<2 \times 10^{-6}$
微孔	$2 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$
小孔	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
中孔	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
大孔	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
可见孔及裂隙	$>10^{-1}$

表 1.2 微结构占煤内表面积之比

微结构名称	直径/mm	内表面积/%	体积/%
微微孔	$<2 \times 10^{-6}$	62.2	12.5
微孔	$2 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$	35.1	42.2
小孔	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	2.5	28.1
中孔	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	0.2	17.2

的内部结构产生的影响，从长焰煤开始，随着煤化程度的提高，煤体内的总微结构体积呈逐渐减小趋势，到焦煤、瘦煤时最小，而后又开始增加，直至无烟煤时达到最大值；煤体的微结构中，大孔的形成取决于地质构造对煤的破坏作用，故煤的破坏越严重，其大尺度裂隙结构所占煤体比例越高；而地应力性质方面，压性地应力将利于煤内微结构的闭合，压性地应力越大，煤内微孔隙中将会有越多的微结构参与到闭合过程中；张性地应力则有利于微结构的张开，张性地应力越大，则会有越多的微结构参与到张开过程中。

1.2 煤层瓦斯

1)煤层瓦斯

煤层瓦斯是伴随于成煤过程中形成的，是一种可燃性的气体，其主要成分为甲烷，即 CH_4 。煤层瓦斯有广义瓦斯和狭义瓦斯之分，广义瓦斯指的是井下有毒有害气体的总称，一般包括：赋存于煤层和围岩内并能涌入到采掘空间的矿井气体，煤炭采掘过程中生成的气体，井下空气与煤岩、物料等发生物理化学作用后生成的气体和煤内含有的放射性物质衰变、蜕变生成的气体。具体包括以下主要气体：甲烷及其同系物烷烃、环烷烃、芳香烃、氢气、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、氨气、一氧化氮、二氧化硫等。狭义瓦斯则主要指甲烷气体，即 CH_4 。它是一种无色、无味、无嗅、可燃或可爆的气体，虽然其无毒，但大量吸入时可因窒息效应导致人员伤亡；甲烷密度是 $0.716\text{kg}/\text{cm}^3$ ，小于空气密度；甲烷气体微溶于水，在标准状况下，100L 水可溶 3.31L 甲烷。

2) 煤层瓦斯的生成

煤层瓦斯是腐殖型有机物在成煤过程中生成的。在此过程中一般包含两个成气时期，即生物化学成气时期和煤化变质作用成气时期，各时期成气量的多少主要取决于原始母质植物的组成和煤化作用所处的阶段。

(1) 生物化学成气时期。

该时期从腐殖型有机物堆积在沼泽相和三角洲相环境中开始，在温度不超过 65°C 的条件下，腐殖体经厌氧微生物分解成甲烷和二氧化碳。这个阶段生成的泥炭层埋藏浅、上覆覆盖层的胶结固化不好，生成的瓦斯极易渗透或扩散到大气中。因此，此阶段生成的瓦斯一般不会留存于煤层中。

(2) 煤化变质作用成气时期。

生物化学成气时期的后期，泥炭层在地层温度和压力的作用下逐渐转化为褐煤，而褐煤层继续下沉且在温度和压力持续作用下继续变质，就进入了煤化变质作用成气时期。此时期内，温度一般为 100°C 左右，褐煤层的上覆覆盖层增厚导致地层压力增加，煤层将发生强烈的热力变质成气作用。煤化作用过程中，有机质分解、脱出甲基侧链和含氧官能团而生成二氧化碳、甲烷和水。随着煤化程度的深入，基本结构单元中缩聚芳核的数目不断减少，生成的瓦斯量不断增加，且由于煤层上覆覆盖层的存在而导致这部分瓦斯被抑留在了煤层中，此过程生成的瓦斯为煤层瓦斯的主要来源。

3) 煤层瓦斯的赋存

煤化变质作用成气时期生成的瓦斯因煤层上覆覆盖层的封闭作用，将大部分赋存于煤层中。瓦斯在煤层内的赋存形式包括三种类型，即游离瓦斯、吸附瓦斯和吸收瓦斯。游离瓦斯以自由形态赋存于煤的各类型的微结构中，是形成瓦斯压力的“源”；吸附瓦斯则是在微孔内占据着煤分子结构的空穴或煤分子间的空间呈吸着状态的瓦斯；吸收瓦斯是进入煤实体内部的一部分特殊的“吸附瓦斯”，如图1.4所示。

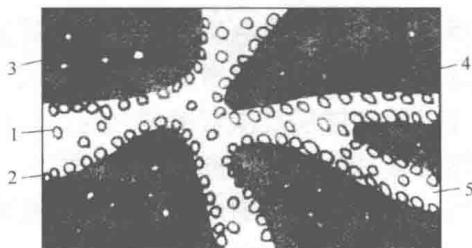


图 1.4 煤层瓦斯赋存形式

1-游离瓦斯；2-吸附瓦斯；3-吸收瓦斯；4-煤基质；5-微结构

在上述三种瓦斯赋存形式中, 游离瓦斯量占煤层内瓦斯总量的 10%~20%, 吸附瓦斯占 80%~90%, 而吸收瓦斯仅占很小很小的一部分, 且煤层内的游离瓦斯和吸附瓦斯处于一种动态的解吸吸附平衡之中。对于赋存于一定地质环境中的煤层来讲, 由于覆盖层厚度的变化和自然逸散作用, 煤层内生成瓦斯时的含气量和煤层现存瓦斯的含气量是不同的, 从而使煤层瓦斯的赋存表现出明显的垂向分带分布特征。煤层内瓦斯的分布沿地层由浅部到深部方向上一般可划分为两个带, 即瓦斯风化带和甲烷带。

4) 煤层瓦斯的几个主要参数

(1) 瓦斯压力。

煤层瓦斯压力是指煤层孔隙内气体分子自由热运动撞击所产生的作用力, 它在某一点上各方向上的大小是相等的, 方向与孔隙壁垂直。煤层瓦斯压力的大小取决于煤层瓦斯含量的大小、瓦斯流动动力的高低及瓦斯动力现象的潜能大小等因素。

煤层瓦斯压力在甲烷带内表现出的分布规律为: 随深度的增加而增大, 多数煤层表现为线性规律, 瓦斯压力增加的幅度, 即瓦斯压力梯度, 则随地质条件的不同而不同, 相同地质条件下的煤层瓦斯压力大致相同, 这一瓦斯压力差则是煤层内瓦斯发生运移的动力源之一。瓦斯压力与埋藏深度的关系可用下式预测, 即

$$p = p' + C(H - H') \quad (1.1)$$

式中, p 为甲烷带内深度为 H 煤层的瓦斯压力, MPa; p' 为甲烷带内深度为 H' 煤层的瓦斯压力, MPa; C 为瓦斯压力梯度, MPa/m, 一般取 0.01 ± 0.005 。

(2) 煤层瓦斯含量。

煤层瓦斯含量是指单位质量或体积的煤中所含有的瓦斯量, 单位一般为 m^3/m^3 、 m^3/t 。

煤层内瓦斯含量是现在煤层内保存的瓦斯量, 它由瓦斯向地表运移的条件、煤层储存瓦斯的性能决定, 主要包括: 埋藏深度、煤层和围岩透气性、煤层倾角、煤层露头、地质构造、煤化程度、地层地质史和水文地质条件等因素。

①埋藏深度: 埋藏深度增加时, 不仅增加了煤层内瓦斯向地表逸散需运移的距离, 也因地应力的增加劣化了煤层及围岩的透气性。因而, 其他条件相同时, 随着埋藏深度的增加瓦斯含量是呈增加趋势的。

②煤层和围岩透气性: 煤层和围岩的透气性越大, 瓦斯在其内的运移、逸散越容易, 瓦斯含量越小; 反之, 则瓦斯利于保存, 煤层瓦斯含量会增加。

③煤层倾角: 在其他条件相同时, 煤层倾角越小, 煤层瓦斯往地表运移所需

克服的流动跃迁边界越多,运移通道越劣化,瓦斯含量越大。

④煤层露头:煤层有露头时,煤层内的瓦斯就有了向地面逸散的出口,露头存在时间越久,瓦斯排放越多;反之,地表无煤层露头的煤层,瓦斯含量越高。

⑤地质构造:地质构造可分为封闭式地质构造和开放式地质构造,地质构造类型的不同导致其对煤层瓦斯含量的影响也不同。封闭式构造将有利于瓦斯的封存,甚至会在煤层局部区域形成瓦斯集聚区,而开放式构造将利于瓦斯的逸散。

⑥煤化程度:煤化程度的高低直接关系着煤层产气量的多少,且煤化程度越高的煤的瓦斯吸附性能越强,故煤化程度与瓦斯含量呈正相关性。但必须讲清楚的是,对于高变质无烟煤的瓦斯含量规律却不从此规律。

⑦地层地质史:地层的地质史反映该区域地层的发展与演化规律,地质史越复杂导致的结果可能有两个,即有利于瓦斯封存结构的形成和不利于瓦斯封存结构的形成。因此,地层的地质史与瓦斯含量的关系不明确,但将非常明显地影响煤层的瓦斯含量。

⑧水文地质条件:地下水也是赋存于煤岩层内的孔隙、裂隙等微结构内的,与瓦斯的赋存空间相同。因此,地下水具有驱替吸附瓦斯、排采游离瓦斯的作用,直接表现为地下水活跃区域内煤层的瓦斯含量通常较低。

在煤层瓦斯含量中,游离瓦斯含量可按照马略特定律计算,即

$$X_y = V \cdot p \cdot T_0 / (T \cdot p_0 \cdot \xi) \quad (1.2)$$

式中, X_y 为煤中游离瓦斯含量, m^3/t ; V 为单位质量煤的孔隙容积, m^3/t ; p 为瓦斯压力, MPa ; T_0 、 p_0 为标准状态下的温度和压力; T 为瓦斯的绝对温度, K ; ξ 为瓦斯的压缩系数,按表 1.3 确定。

表 1.3 瓦斯的压缩系数

瓦斯压力/MPa	温度/℃					
	0	10	20	30	40	50
0.1	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20
1.0	0.97	1.02	1.06	1.10	1.14	1.18
3.0	0.92	0.97	1.02	1.06	1.10	1.14
5.0	0.87	0.93	0.98	1.02	1.06	1.11
7.0	0.83	0.88	0.93	0.98	1.04	1.09

煤中吸附瓦斯含量则可按 Langmuir 方程计算,并考虑煤中水分、可燃物百分比、温度的影响系数等因素,按下式计算:

$$X_x = \frac{a \cdot b \cdot p}{1 + bp} e^{n(t_0 - t)} \cdot \frac{1}{1 + 0.31W} \frac{(100 - A - W)}{100} \quad (1.3)$$