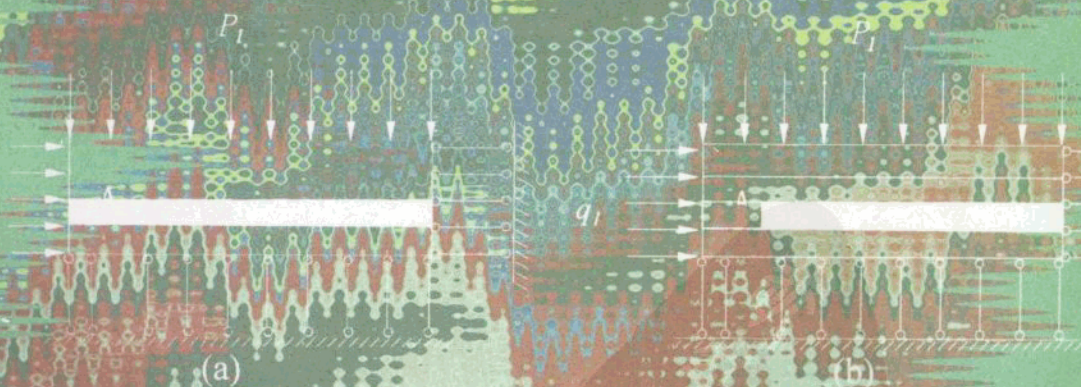


煤和瓦斯突出 固流耦合失稳理论

梁 冰 著



地质出版社

煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论

梁 冰 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书论述了煤和瓦斯耦合作用的机理及本构关系以及煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论的数学模型。具体论述了采用固流耦合失稳理论对煤和瓦斯突出进行数值预测和预报的方法。

本书可供从事煤岩流体力学、瓦斯突出等研究的科技工作者、研究生和大学本科生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论/梁冰著. -北京:地质出版社, 2000.9

ISBN 7-116-03220-7

I. 煤… II. 梁… III. 瓦斯突出-耦合-研究 IV. TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 47506 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:屠涌泉 邱 培

责任校对:李 玲

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 5.5 字数: 135 千字

2000 年 9 月北京第 1 版·2000 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—500 册 定价: 15.00 元

ISBN 7-116-03220-7

T·74

(凡购买地质出版社出版的图书, 如有倒页、缺页、脱页者, 本社发行处负责调换)

前 言

自 1834 年在法国的伊隆克发生了世界上首次煤和瓦斯突出的一个半世纪以来,世界上各采煤国家都相继发生了煤和瓦斯突出,有的矿井发生了岩石和瓦斯突出,各国突出的煤一般为烟煤、无烟煤、褐煤等,突出的岩石大多数情况下均为坚硬的砂岩,也有岩盐、砂质页岩、玢岩等。发生煤、岩石和瓦斯突出时,喷出的气体大体有沼气、二氧化碳,间而也有沼气和二氧化碳的混合气体。无论何种煤、岩石、气体的突出,其本质是一致的,其中以煤和瓦斯突出的发生最为普遍。为了预测和防治煤和瓦斯突出,各国都投入了大量的人力、物力和财力,许多国家建立了专门的研究机构,对其开展研究工作。

通过国内外长期防治煤和瓦斯突出的实践深知,要对突出进行有效的防治和防止,首先需要对突出进行有效的预测。特别是在矿井采区的设计阶段应该对突出作出预测,得出突出发生危险最小的设计方案,并根据预测将防治突出的措施纳入设计之中。对预测无突出危险的区域可以不采取防突措施以节省大量的费用,对预测突出的区域应该认真采取防治措施,这样才能有效而经济地防止突出的发生或减缓突出发生时所造成的危害。这就需要研究煤和瓦斯突出发生的定量化理论,从而为开采过程中预测方法、手段以及防止突出措施的研究提供科学依据,将突出的预测和防治提高到一个新的水平,因而研究煤和瓦斯突出的机理,并提出定量化的发生理论具有重要的现实意义和实际的应用价值,并将产生巨大的经济效益和社会效益。

大量实例表明,煤和瓦斯突出是在瓦斯流体参与和作用下,煤体突然破坏,碎煤和瓦斯大量涌出而发生的动力现象。研究煤和瓦斯突出的机理,在此基础上提出突出发生的判据,予以数学描述,提出解算的方法,从而建立突出发生的定量化理论,不仅需要研究在孔隙瓦斯的力学和非力学作用下的煤岩体的变形和破坏规律,而且还要研究在煤岩体变形破坏过程影响下孔隙瓦斯流体流动的规律,即研究煤岩体和瓦斯固流耦合作用下煤岩体的突然破坏。此问题的研究牵涉到岩石力学、渗流力学等多个学科的交叉。近年来形成的岩体水力学是在研究作为不可压缩流体的地下水与岩体固流耦合作用问题中发展起来的。因此煤和瓦斯突出发生理论的研究将使岩体水力学的研究领域由不可压缩流体拓宽到可压缩流体,并且还要考虑煤岩体对其中的孔隙瓦斯流体的强吸附和解吸作用,以及瓦斯流体对煤体的变形全过程的力学特性及力学响应的显著影响,这使得岩体水力学的研究内容更为丰富和复杂,研究领域更为广阔,扩展成为新的分支学科——岩石流体力学。因此煤和瓦斯突出的研究也将对这一学科的完善和发展作出贡献,具有重要的理论价值和科学意义。

本书研究了煤和瓦斯的固流耦合作用理论,采用内蕴时间塑性理论建立了煤和瓦斯耦合作用的本构关系以及煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论的数学模型和冲击地压统一失稳理论的数学模型,为开采过程中煤和瓦斯突出的数值预测和预报提供理论依据和方法。

由于作者的水平和能力有限,挂一漏万,在所难免,殷切地期望读者予以指正。

作者衷心地感谢导师章梦涛教授多年来对作者科研能力和科研素质的培养。章梦涛老

师以七十余岁的高龄辛勤耕耘着，他那博大精深的胸怀，渊博的知识，对作者一生的学术和工作产生了重要的影响。

本书全部内容倾注了章梦涛教授多年的心血，在此向敬爱的导师章梦涛教授表示崇高的敬意和深深的谢意。

本书内容为国家自然科学基金项目“瓦斯突出的工程分析与控制”的成果，并得到了煤炭科学基金的资助。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 煤和瓦斯突出概论	1
第二节 煤和瓦斯突出发生理论的研究现状	2
第二章 含瓦斯煤的物理力学特征	6
第一节 概述	6
第二节 煤体的空隙结构	6
第三节 煤体的吸附和解吸性能	7
第四节 煤体的渗透性能	8
第五节 煤的变形及强度特性	9
第三章 煤和瓦斯的固流耦合作用	11
第一节 固流耦合问题的研究现状	11
第二节 瓦斯对煤的力学特性和力学响应影响的试验研究	13
第三节 煤体变形对瓦斯渗透性能的影响	21
第四章 煤和瓦斯耦合作用下煤的内时本构关系	24
第一节 概述	24
第二节 内变量及内蕴时间	26
第三节 热力学定律、自由能及内变量的演化方程	27
第四节 内时本构关系的显示方程	30
第五节 内时本构方程中材料常数的确定	35
第六节 内时本构方程的试验验证	36
第五章 煤和瓦斯突出的动力失稳机理	38
第一节 概述	38
第二节 煤体破坏的稳定性分析	39
第三节 突出的失稳机理及判据	42
第四节 失稳理论的数学模型	44
第五节 数学模型的数值解法	46
第六章 失稳理论的其它形式	54
第一节 拉性载荷作用下突出的机理和判据	54
第二节 考虑时间效应的煤和瓦斯突出的失稳理论	56
第三节 温度在煤和瓦斯突出中的作用机理	59
第四节 圆形硐室煤和瓦斯突出的解析解	61
第五节 对煤和瓦斯突出失稳理论的进一步讨论	66

第七章 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论的初步应用	69
第一节 概述	69
第二节 应力、瓦斯压力对突出发生影响的数值模拟试验研究	70
第三节 瓦斯突出的数值分析	74
第四节 突出的失稳预测指标	76
参考文献	79

第一章 绪 论

第一节 煤和瓦斯突出概论

煤和瓦斯突出是煤矿中极其复杂的一种动力现象。它能在很短的时间内由煤体向巷道或采场突然喷出大量的瓦斯及碎煤，在煤体中形成特殊形状的空洞，并造成一定的动力效应，如推倒煤车、破坏支架等。煤和瓦斯突出发生时，粉煤可能充填数百米的巷道，喷出的瓦斯粉煤流有时带有暴风般的性质，可以逆风流运行数千米长的巷道，因此煤和瓦斯突出是威胁煤矿安全生产的严重自然灾害之一。

自 1834 年在法国的伊隆克发生了世界上首次煤和瓦斯突出的一个半世纪以来，世界上各采煤国家都相继发生了煤和瓦斯突出，有的煤矿矿井发生了岩石和瓦斯突出，各国突出的煤一般为烟煤、无烟煤、褐煤等，突出的岩石大多数情况下为坚硬的砂岩，也有岩盐、砂质页岩、玢岩等。发生煤、岩石和瓦斯突出时，喷出的气体大体有沼气、二氧化碳，间而也有沼气和二氧化碳的混合气体。无论何种煤、岩石及气体的突出，其本质上是一致的，其中以煤和瓦斯突出的发生最为普遍。

为了预测和防治煤和瓦斯突出，各国都投入了大量的人力、物力和财力，许多国家建立了专门的研究机构对其开展工作。早在 1914 年法国就成立了防止瓦斯突出的专业委员会。前苏联在 1943 年设立了全苏防止煤岩石和瓦斯突出的中央委员会，指导二十余个研究所、七所高等学校进行研究，同时加强国际交流。联合国西欧国际委员会迄今为止已组织了三次煤和瓦斯突出的专门讨论会，两年召开一次的采矿安全学术会议也将煤和瓦斯突出的研究作为主要内容之一。我国在 50 年代成立了抚顺煤炭研究所承担煤和瓦斯突出的研究工作。60 年代初又成立了重庆煤炭研究所，从事这方面的研究，以后中国矿大、原阜新矿院、原山西矿院、原焦作矿院、重庆大学等高等院校也都将煤和瓦斯突出作为研究方向进行这方面的工作。中国科学院力学研究所以著名的爆炸力学家、中国科学院院士郑哲敏教授为首的学术小组近十余年来一直以煤和瓦斯突出作为研究课题。尽管如此，迄今为止，煤和瓦斯突出仍是世界上煤矿矿井中危害生产和人身安全的严重自然灾害。我国在 1954 年以前仅有少数几对矿井发生强度较低的煤和瓦斯突出。据 1978 年 10 月的统计表明我国突出的矿井已达 267 对，突出总次数累计达到了 7208 次，而到 1981 年增加到 9845 次，占世界突出总数的三分之一，成为世界上突出最严重的国家之一。近年来，由于开采深度不断增加，特别是南方的一些地质构造复杂，煤层不稳定的中小矿井的开采，突出的矿井数、突出的强度和突出的次数每年都在急剧递增，已成为世界之最。我国的能源以煤炭为主，且井工开采的比例很大，即使几十年后，其他能源得到了很大的发展，煤炭的总产量也仍在不断上升。因此，防止煤和瓦斯突出是我国煤炭生产中迫切需要解决的问题。

第二节 煤和瓦斯突出发生理论的研究现状

研究煤和瓦斯突出的发生理论,实际上是研究煤和瓦斯突出发生的判别根据简称判据。所谓煤和瓦斯突出发生的机理即其发生的物理力学过程。煤和瓦斯突出是煤体局部突然破坏而发生的动力破坏现象,煤岩体不发生破坏就没有突出的发生,这一点早已为人们所共识。突然破坏就是指从破坏开始到终止的过程十分迅猛,因此煤和瓦斯突出主要是煤体变形与瓦斯流动耦合作用下煤体突然破坏而发生的力学过程。煤和瓦斯突出发生理论中所讨论的突出发生的判据实际上也就是煤体突然破坏的判据。由于受到当时科学技术的限制,对煤体的破坏过程即破坏机理不可能进行深入研究。煤体任何破坏的判据只能根据煤体破坏的强度理论而建立,再无其他选择,因而早期的关于突出发生理论大多数只是根据何种因素在煤和瓦斯突出中起主导作用而提出的,只能大致回答是什么因素使煤体突然破坏而发生煤和瓦斯突出这一灾害,对煤和瓦斯突出进行定性描述。关于煤和瓦斯突出的发生机理,国内外学者提出了瓦斯主导作用说、地压(即应力)主导作用说、煤质主导作用说以及综合作用说。这些假说,实质上就是早期的煤和瓦斯突出发生的理论。

(1) 瓦斯主导作用说:这是在 30 年代最早提出的突出假说。该假说认为瓦斯是煤体破坏发生的主要因素。其中包括前苏联的 E. H. 沙留金和英国的 R. 威连姆斯等提出的“瓦斯包”说,即认为煤层内存在着高压的“瓦斯包”,当工作面接近“瓦斯包”时,煤壁受到“瓦斯包”的高压瓦斯作用破坏而发生突出。还有其他学者对突出提出了各种有关其它瓦斯作用假说,其总的观点都认为在煤体内存在着高压的瓦斯,而且瓦斯的高压力迅速破坏工作面与高压瓦斯之间的煤层,从而引起煤和瓦斯突出。

(2) 应力主导作用说:该假说认为在煤体破坏发生煤和瓦斯突出的过程中起主导作用的是地压,即煤体应力。前苏联的别楚克、法国的莫连、加拿大的伊格那季耶夫和日本的外尾善次郎分别提出了含瓦斯煤体贮存了大量的弹性势能,当工作面接近该区时,高应力区的弹性势能释放使煤体破坏而发生突出。还有的学者围绕应力集中,或由于震动产生的应力叠加使煤体破坏而发生的煤和瓦斯突出进行了叙述。

(3) 煤质主导作用说:也就是化学本质说,它认为煤质在突出中起主导作用。即煤体破坏时是否发生煤和瓦斯突出现象主要是煤质决定的。还有的学者认为煤体破坏发生突出是煤体内部本身的特殊化学变化引起的。

(4) 综合作用说:该类假说最早是由前苏联的聂克拉索夫斯基在 50 年代提出的,他认为煤和瓦斯突出是由于瓦斯和应力联合作用使煤体破坏而发生的。以后其他学者又进行了补充,认为突出的发生还要考虑煤的物理力学性质,即在煤体破坏引起突出发生时,瓦斯、应力和煤的物理力学性质都起到了作用,或者说是在这三个因素综合作用下发生的。但是不同的学者对瓦斯和应力在突出发生中所起的作用认识又不一致。比利时的伯芝、法国的歌代尔认为瓦斯是突出发生的主要因素,而应力只是突出发生的辅助因素。苏联的 B. B. 霍多特、包布罗夫、日本的矶部俊郎和英国的鲍莱则认为应力是突出发生的主要因素,瓦斯只是辅助的因素。对于应力是以构造应力还是以自重应力为主,霍多特和包布罗夫也各抒己见。

1969 年在联合国西欧经济委员会召开的第二次防止煤和瓦斯突出的国际讨论会上,大

多数国家的代表认为突出不是哪个因素起主导作用的结果,而是与煤层的应力状态、煤体内瓦斯及煤的物理力学性质密切相关,是这些因素综合作用的结果。目前这已成为愈来愈多学者的共识,这也是突出发生理论研究的发展趋势。但是现在仍有学者对单项因素主导作用的学说继续进行研究,提出新的见解,取得新的研究成果。1987年,在北京召开的第21届采矿安全讨论会上,日本的氏平增之,采用有限元方法进行数值模拟,通过煤壁受瓦斯孔隙压力梯度作用产生的拉伸破裂,说明瓦斯对突出的发生起主导作用,而澳大利亚的哈格里费斯通过物理模拟实验所得到的结果说明突出的发生还是应力起主导作用。

我国对煤和瓦斯突出的研究是在本世纪末50年代开始起步的。最初只是着眼于预测和防治方面的研究,因而未见到早期的国内学者在煤和瓦斯突出的发生理论方面的专门论述。

抚顺煤科分院的王佑安教授提出对煤和瓦斯突出的预测要采用煤层应力、煤体内瓦斯状态以及煤的物理力学性质的综合指标作出预测,显然是倾向于瓦斯突出的综合作用说。

重庆分院的于不凡教授在他所著的《煤和瓦斯突出机理》一书中对综合作用说表示赞同。在1984年召开的四川煤矿第二届煤和瓦斯突出的学术讨论会上所作的“国外煤和瓦斯突出研究动态”的报告中也表示他是倾向于包布罗夫的综合作用说的。

实际上即使是突出发生的单项因素起主导作用的学说也并不否认突出是具有一定的物理力学性质的媒体受应力和瓦斯作用破坏而发生的动力破坏现象,只不过强调单项因素为主而已。在综合作用说中虽然承认了三个因素均起作用,但对每个因素在突出发生中所起的作用依然是观点不同。所以在综合作用说中,究竟是应力还是瓦斯在突出发生中起主导作用的问题仍在争论之中。

煤和瓦斯突出是媒体变形与瓦斯流动相互作用和相互影响下,局部媒体突然破坏而发生的现象,实质上是一个很复杂的力学问题和力学现象。通过煤和瓦斯突出的现场实例分析或模拟所得到的突出现象,按简单的力学强度原理,只能对突出发生过程进行表面的定性叙述。将突出作为一个力学现象和力学过程,按照近代的力学理论和方法对煤和瓦斯突出进行研究主要是我国学者在80年代开始的。

重庆大学的鲜学福教授等从媒体变形对突出的作用和影响的角度对煤和瓦斯突出进行了研究。

中国矿业大学的周世宁教授、何学秋博士按照流变力学的理论对煤和瓦斯突出进行了研究,叙述了煤和瓦斯突出发生的流变机理,认为含瓦斯煤蠕变的结果造成突出发生时间滞后的现象。

中国科学院力学研究所郑哲敏教授等在1982年和1985年从数量级及量纲分析的角度分析了突出的机理,详细论述了突出的孕育、启动和停止的过程。建议采用力学中常用的数量级与量纲分析的方法来建立突出发生的定量化的判据,对突出的发生情况进行预测。

1988年俞善炳教授将突出视为稳态情况下,已启动的耦合流体的恒稳推进过程,在一维情况下推出了突出的恒稳推进的微分方程,指出了煤的破碎启动与瓦斯流动的耦合是突出发生的内在因素,在已求得该微分方程解的情况下,推导得出了无量纲的突出发生判据的关系式。

丁晓良等进行了煤在瓦斯一维渗流作用下初次破坏的力学实验研究。实验结果于1989年在《力学学报》上进行了报道。

这些研究深化了煤和瓦斯突出发生机理和发生理论,并将煤和瓦斯突出理论的研究推

向了定量化发展的新阶段。

通过大量的实例观测可以看出煤和瓦斯突出是含瓦斯的煤体突然破坏才发生的动力现象，与冲击地压现象具有一系列的共同特点，二者主要的预测和防治措施几乎相同。冲击地压是在煤体局部高应力区破坏而发生的，破坏过程具有雪崩一样的性质。因此近年来苏联的佩图霍夫、日本的矶部俊郎和中国矿业大学的华安增教授等先后提出了突出就是有瓦斯作用的冲击地压，这一观点已为越来越多的学者所接受。早在1965年Cook（库克）就认识到冲击地压是煤岩体的失稳问题，突出是有瓦斯作用的失稳问题，因此有关学者从失稳的角度开始了突出发生理论的研究。

1988年原阜新矿业学院的章梦涛教授和他的同事们，首先发表了“煤与瓦斯突出失稳理论的初探”。文中根据近代已经搞清的煤岩变形破坏是其内部裂纹裂缝发生发展起主导作用的过程的这一机理，论述了煤与瓦斯突出的发生机理。即认为煤岩体的破坏过程有稳定破坏和失稳破坏两种过程，当煤岩体局部高应力区的应力超过峰值强度，成为具有应变软化性质的非稳定介质时，如果它与周围低应力区所组成的力学变形系统的平衡状态为非稳定，则遇外界扰动将发生失稳破坏过程。该文中还研究了煤体变形裂纹裂缝发展对其中瓦斯储存和流动状态的影响，以及瓦斯的赋存状态和流动情况的变化对煤体变形的影响。提出了煤和瓦斯突出就是煤体变形和流体流动相互作用和相互影响即固流耦合作用下煤体失稳破坏所发生的现象。解释了突出瞬间大量涌出瓦斯的来源，又从煤的脆性蠕变解释了突出发生时间滞后现象的原因。

1991年章梦涛、赵阳升等发表了“冲击地压、煤与瓦斯突出的统一理论”一文。文中采用著名的普遍适用的狄里希锐（Dirichlet）失稳准则作为冲击地压和突出发生的统一准则，建立了统一失稳理论的框架，并对其在冲击地压和突出中的应用分别进行了论述。

上述得到的一系列有关煤和瓦斯突出失稳理论的研究成果，都是按照近代煤岩变形和破坏机理得出的。煤和瓦斯突出是与压杆类似的失稳破坏，跳出了传统的煤岩体破坏的强度理论，使得矿井开采中的许多现象如煤体应力超过峰值强度在矿井中到处可见，而且难以避免，却只有极少数情况下才发生突出，以及扰动因素作用等问题得到解释，并建立了定量化分析煤和瓦斯突出等失稳破坏问题的较完整的框架，为煤和瓦斯突出发生问题的定量化的研究开辟了可行的途径。

从突出的单项因素主导作用说的提出到突出的失稳理论的产生整整经历了近一个世纪，这不仅是科学技术本身的进步，使得对突出的发生机理和发生过程了解得更多，更确切，而且也是科学研究方法的转变。著名的未来学家托夫勒在为著名的科学家、诺贝尔奖金获得者普里高津所著的当代自然科学、哲学问题的著作《从混沌到有序》一书所写的前言“科学与文化”中所说的：“在科学中，我们不仅习惯于把问题划分成许多的细部分，而且还常常用一种有用的技巧把这些细部分中的每一个从其周围的环境中孤立出来，这种技巧就是我们常说的‘拆零’（Ceteris Paribus），即设其他情况都相同。这样我们就可以把问题中的各细部分与其他部分之间的复杂的相互作用忽略，而不去过问”。托夫勒称这种技巧为“拆零”，即尽可能地把问题分解成尽可能小的一些部分，分别孤立地去研究。突出的单项因素主导作用说就是应用这种“拆零”方法分别对各个因素在煤与瓦斯突出的作用进行研究的，这种方法也就是牛顿的经典科学方法。普里高津从耗散结构理论的研究开始，不再满足仅仅把所研究的事情拆开，而且还试图把这些拆开的各个细部分重新装在一起，从

各个细部分之间的相互作用中来研究问题，即在“拆零”之后又进行“拼整”的方法。突出的失稳理论就是通过这样的“拆零”和“拼整”的科学研究方法而得出的。通过“拆零”认识到突出与应力、瓦斯、煤质三个因素有关，而且将这些因素重新装在一起后考虑应力、瓦斯和煤质三者之间的复杂的相互作用而建立了煤和瓦斯突出的失稳理论。由此可见，从单项因素主导作用说到突出的失稳理论在科学方法上是由牛顿的经典科学方法向普里高津现代的系统科学方法转变所获得的结果。

第二章 含瓦斯煤的物理力学特性

第一节 概 述

大量突出发生的实例表明：煤和瓦斯突出是在地应力、包含在煤体中的瓦斯以及煤的物理力学性质等因素综合作用下，煤体发生突然失稳破坏而产生的动力现象。没有煤体破坏和破碎，就没有突出的发生。一般来说煤的强度愈高，煤体中的裂隙愈小，煤体破坏所需的外力愈大。因此在地应力和瓦斯压力一定时，煤质强度低、脆性小时，容易发生突出。如果煤质较软，裂隙发育，但当其裂隙的连通性较差时，煤体的透气性就差，从而容易引起较大的瓦斯压力梯度，促进突出的发生。因此，研究含瓦斯煤的物理力学性质及变形破坏特性对于搞清煤与瓦斯突出发生的理论尤为重要，是其物理基础。

含瓦斯煤的物理力学特性主要包含有煤的孔隙和裂隙结构、煤的吸附和解吸能力、煤的渗透性能及煤的强度、力学变形和破坏特性等。

第二节 煤体的空隙结构

煤的空隙包括孔隙（或孔洞）、裂隙等。

一、煤的孔隙性

煤最初是植物各化学组分的转化物，经过聚合、缩合后形成水溶胶，后来随原始煤层下沉，温度和压力的升高，溶胶老化脱水，变成凝胶，最后凝胶不断脱水，便在胶粒之间形成无数微小孔洞。一般可把这种孔洞分成5种尺寸：

- (1) 微孔 孔径小于 10^{-5} mm，构成瓦斯与气体的吸附容积；
- (2) 小孔 孔径在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mm 之间，构成毛细管凝结作用和瓦斯扩散的区间；
- (3) 中孔 孔径在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ mm 之间，构成缓慢的层流渗透区域；
- (4) 大孔 孔径在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ mm 之间，构成剧烈的层流渗透区域，并决定了具有强烈破坏结构煤的破坏面；
- (5) 可见孔 孔径大于 10^{-1} mm，形成混合渗透一层流及紊流区域，并决定了中硬或硬煤的破坏面；

由微孔构成吸附容积，由煤体中其余的孔隙构成复杂的渗透系统。在渗透系统中，几乎全部瓦斯都处于游离状态。

二、煤的裂隙性

煤体中存在着大量的裂隙，裂隙系统是由煤的层理、节理和裂隙组成的。从形成原因上分三种。

- (1) 内生裂隙

由于煤体受内部作用如在炭化过程中受到温度、压力的作用和体积收缩等因素的影响而产生的裂隙。

(2) 外生裂隙

由于煤体受外部作用而产生的裂隙，如地质构造应力作用等。

(3) 次生裂隙

由于采掘活动而产生的新裂隙。

煤体表面裂隙大的可以用肉眼观测到，微小的可以通过显微镜观测。煤层中裂隙宽度一般在 10^{-7}m 左右。需要强调的是，所谓孔隙、裂隙和分子结构相比（分子距离约为 10^{-10}m 的量级），是个宏观概念。目前用显微镜能看到的岩石内部孔隙范围约在 $10^{-4}\sim 1\text{mm}$ 之间。比起岩石来，孔隙又是一个微观概念。目前对煤岩内部孔隙了解得还十分不够，远远不能具体勾划出孔隙、裂隙存在的具体结构。

煤岩体的空隙是瓦斯、水等流体在煤岩体中赋存和运动的先决条件，空隙的大小、多少、连通程度及其分布规律直接影响着煤岩体中流体的流动。

一般采用孔隙率 n 表示煤体孔隙的多少。

$$n = \frac{V_i}{V} = \frac{d - \gamma}{d} \quad (\%) \quad (2.1)$$

式中， V_i ——煤体的空隙体积， cm^3 ；

V ——煤的整体体积， cm^3 ；

d ——煤的真比重， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

γ ——煤的视比重（容重）， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

孔隙率是决定煤的吸附解吸性能、渗透特性及强度的重要因素。通过孔隙率和瓦斯压力的测定，可以计算出煤层中的游离瓦斯含量。

第三节 煤体的吸附和解吸性能

煤中大量的微孔内表面具有表面能，当气体与内表面接触时，分子的作用力使瓦斯和其它多种气体分子在表面上发生浓集，称分吸附。气体分子浓集的数量渐趋增多，为吸附过程；分子复返回自由状态的气相中，表面上的气体分子数量渐趋减少，为解吸过程。表面上气体分子维持一定数量，吸附速率和解吸速率相等时，为吸附平衡。在煤和瓦斯突出的发生过程中，瓦斯的运动力在很大程度上决定与含瓦斯的煤在破坏时的吸附和扩散的能力。煤对瓦斯解吸的速度取决于煤的瓦斯含量、煤的破坏程度、破坏时所组成的煤粒尺寸等。

煤对瓦斯的吸附为物理吸附。当吸附质（瓦斯等气体）和吸附剂（煤）固定时，吸附量主要与瓦斯压力 p 和温度 T 有关。当温度恒定时，吸附量与瓦斯压力的关系为等温吸附，一般符合著名的 Langmuir（郎格缪尔）方程，即

$$W = \frac{abp}{(1 + bp)} \quad (2.2)$$

式中： W ——煤的吸附瓦斯含量， cm^3/g ；

p ——瓦斯压力， MPa ；

a ——在测量温度下, 煤的极限吸附量, cm^3/g ;

b ——吸附常数, $1/\text{MPa}$ 。

a 、 b 的值由试验室实验测得。一般情况下, b 值很小。所以在瓦斯压力不大时, 吸附瓦斯量与瓦斯压力几乎成正比关系, 如图 2.1 所示。

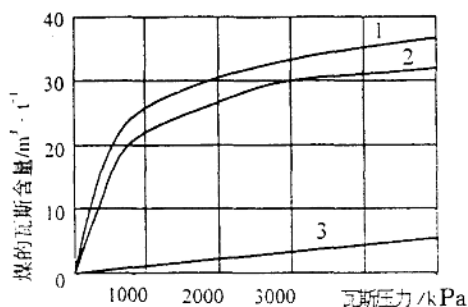


图 2.1 煤的瓦斯含量与瓦斯压力关系 (某温度下)

1—总瓦斯含量; 2—吸附瓦斯含量; 3—游离瓦斯含量

第四节 煤体的渗透性能

煤是一种多孔隙的介质, 在一定的压力梯度作用下, 气体或液体可以在其内部流动, 此种流动称为渗流。煤体的渗透性能用渗透系数 K 或渗透率 k 描述。渗透系数一方面取决于煤的孔隙和裂隙结构如孔隙大小、排列、孔隙率等; 另一方面还和其中流体的性质如密度、粘性等有关。为了把煤和其中孔隙中的瓦斯等气体对渗透系数的影响区别开来通常用渗透率 k 来描述煤的渗透性能, k 只与煤的结构有关, 而与流过的流体性质无关。渗透系数与渗透率的关系式为:

$$K = k \frac{\rho}{\mu} \quad (2.3)$$

式中 k ——煤的渗透率, 量纲为 $[\text{L}]^2$, 通常采用 cm^2 , 在工程上常用达西 (D) 或毫达西 (mD) 作为单位。

K ——渗透系数, m/d 或 cm/s ;

ρ ——瓦斯的密度, g/cm^3 ;

μ ——瓦斯的粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

瓦斯在煤中的流动状态取决于孔隙结构。直径在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的中孔构成了瓦斯缓慢流动的层流渗透区, 直径 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 的大孔构成速度较快的层流渗透区, 直径 $100 \mu\text{m}$ 以至更大的、肉眼可见的孔隙和裂隙构成层流及紊流的混合渗透区。这部分孔隙构成了渗透容积, 它们在总孔隙中的比重愈大, 其渗透性能愈好。

研究表明, 瓦斯沿煤体的流动一般服从达西定律, 即瓦斯的流速和压力梯度成正比, 与煤的渗透率成正比, 有

$$q = - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.4)$$

式中： q ——瓦斯流速，cm/s；

k ——煤层的渗透率，达西 (m^2 ，或 cm^2)；

 μ ——瓦斯的粘度系数，厘泊 (Pa·s); $\frac{\partial p}{\partial x}$ ——压力梯度, MPa/cm。

实验室测量表明,具有突出危险的煤层其渗透率平均比非突出危险煤层渗透率高出 1.5 倍左右,有的矿区甚至高出 4~6 倍。

如果在整个煤体介质流动区域上任意一点的渗透率是相同的, 则称为均质, 否则为非均质。如果某一点的渗透率和渗流方向无关, 则介质是各向同性的, 否则为各向异性。实测表明, 瓦斯沿煤样层理面流动的速度比垂直层理面的速度大得多, 因此沿着层理面其渗透率最大, 垂直层理面的方向其渗透率最小, 这两个方向的渗透率可能相差几个数量级, 因而大多数煤层是各向异性的。

此外，渗透率还与煤体所受的应力及瓦斯压力梯度有关。煤体在破坏之前，所受的应力越大，其渗透率越小。由于瓦斯压力对煤体的孔隙和裂隙有促进其扩展的作用，因而瓦斯压力梯度越大，渗透率也越大。有关地应力及瓦斯压力梯度对煤体渗透率的影响，将在第三章中讨论。

第五节 煤的变形及强度特性

一、煤的力学变形特性

图 2.2 为煤体的全程应力-应变曲线,最大纵坐标值定义为煤的峰值强度,表明煤体受外力作用时,抵抗破坏的能力。如果围压为零,即为单轴抗压强度。如在柔性普通实验机上进行试验,在达到峰值强度或刚度超过此点时,煤即发生突然破坏,试验就不能继续进行。在刚性实验机上进行测试时,就可以得到包括峰值强度后部分变形在内的全程应力-应变曲线。全程应力-应变曲线的顶点即峰值强度点将此曲线分为两大部分。峰值强度前的曲线表明煤抵抗载荷的能力随变形的增加而增加,此时煤介质变形是稳定的。在峰值强度后

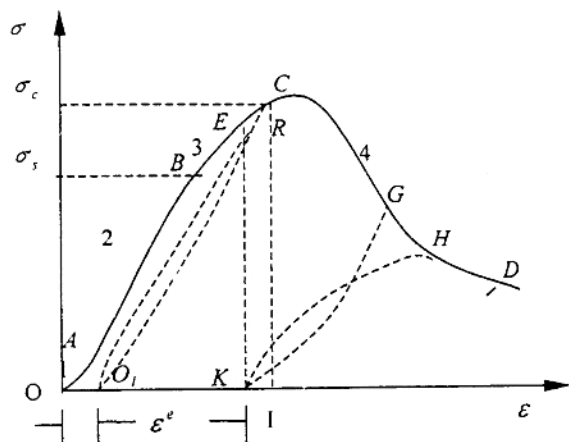


图 2.2 煤体的全程应力-应变曲线

时, 曲线的斜率为负值, 表明此时煤抵抗载荷的能力随变形的增加而降低, 煤介质的变形为非稳定的。在变形开始时, 煤样处于初始压密阶段, 煤样的变形呈现非线形的弹性变形。以后由于新裂纹开始产生原有裂纹继续压密, 它们的几率相近, 因而此时煤的变形呈现线弹性变形。随着新生裂纹的增加, 煤体抵抗载荷的能力随变形增加而增加的趋势 (即峰值强度前应力-应变曲线的斜率) 降低, 当应力大约为峰值强度的 1/2 或 2/3 时开始进入塑性变形阶段, 产生永久变形, 但煤抵抗载荷的能力仍随变形增加而增加, 此时煤样处于延性状态, 变形是延性的。随着新生裂纹的密集、合并, 产生宏观裂缝, 煤体抵抗载荷的能力不再随变形的增加而增加, 即达到了峰值强度。以后随着宏观裂缝的发生、发展, 煤体抵抗载荷的能力随变形增加而降低, 煤样处于脆性状态, 变形特性是脆性的, 此时煤介质成为非稳定材料。随着变形的增加, 煤样承载能力继续降低直至进入残余变形阶段为止。此变形区段上曲线最大斜率的绝对值被称为材料的脆性度, 它表示了煤样抵抗载荷能力随变形增加而减小的程度。煤的峰值强度标志着介质变形由延性向脆性的过渡。煤样破坏是一个过程, 这一过程是在超过峰值强度后发生的, 因而峰值强度也被认为是破坏过程的开始点。此破坏过程可能是渐进的, 也可能是突发式的, 后者称为失稳破坏。

二、煤的强度性质

煤的强度包括煤的抗剪强度、抗压强度、抗拉强度以及粘结力和内摩擦角。它们不仅决定了破坏煤体所需的功, 而且在很大程度上决定了煤的承载能力。煤体的强度可通过实验室试验确定。现场实际中, 煤的受力状态千变万化, 各点的应力状态都不相同, 况且煤体的结构又很复杂, 其强度随着外部环境、围压条件的不同而发生变化。因而在复杂的应力状态下煤的强度一般是利用简单的应力试验结果, 根据强度理论或破坏准则确定。目前常用的破坏准则有最大拉应力破坏准则、库仑-纳维准则 (Coulomb-Navier)、莫尔破坏准则、格里菲斯强度理论等。煤的强度准则一般采用莫尔破坏准则, 即认为, 煤的破坏为剪切破坏。当某一截面上的剪应力 τ 增加到某一极限值 τ_0 时, 将开始发生剪切破坏。 τ_0 取决于该截面上的正应力 σ_n , 即 $\tau_0 = F(\sigma_n)$, 这一函数关系式主要通过实验确定。在三轴压缩实验时, 可以得出煤体破坏时的一组极限应力圆, 这一极限应力圆的包络线即为煤的破坏曲线。

包络线的渐进线可表示为

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + C \quad (2.5)$$

式中: τ ——剪应力, MPa;

σ_n ——正应力, MPa;

φ ——内摩擦角;

C ——粘结力, MPa。

根据煤质和煤的强度可将煤分为五种破坏类型, 不同破坏程度的煤层的煤强性质有很大的差别, 其测定结果如图 2.3 所示。

煤的强度受其中瓦斯气体的影响很大。煤体吸附瓦斯后体积膨胀强度降低, 而煤体排放瓦斯后变硬强度增加。有关这方面的详细讨论将在第三章中进行。

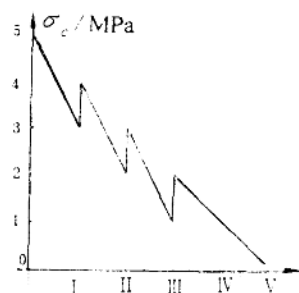


图 2.3 不同破坏程度的煤层的煤强度示意图