

煤岩强度特征及煤矿采场覆岩 破坏微地震监测

杨永杰 逢焕东 著

煤炭工业出版社

国家自然科学基金重点项目资助 (50534080)

国家自然科学基金项目资助 (50474029)

教育部重点实验室《矿山灾害预防控制实验室》开放基金课题资助

煤岩强度特征及煤矿采场 覆岩破坏微地震监测

杨永杰 逢焕东 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤岩强度特征及煤矿采场覆岩破坏微地震监测/杨永杰, 逢焕东著. —北京: 煤炭工业出版社, 2006

ISBN 7-5020-2939-7

I. 煤… II. ①杨…②逢… III. ①煤岩-岩体强度-特征②煤岩-岩体破坏形态-岩体地震测井
IV. ①P618.11②P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字 (2006) 第087806号

煤炭工业出版社 出版发行
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷

*

开本 850mm×1168mm^{1/32} 印张 6^{1/2}
字数 165 千字 印数 1—1,000
2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷
社内编号 5738 定价 20.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换



作者简介

杨永杰,男,1964年7月生,工学博士,高级工程师,现任山东科技大学资源与环境工程学院实验中心主任。1987年毕业于山东矿业学院采矿工程专业,获学士学位,1990年获硕士学位,2006年获博士学位。主要从事采矿工程、岩层控制、岩石力学等方面的科研和教学工作。先后参加完成包括国家自然科学基金在内的科研课题40余项,获山东科技进步三等奖1项,省部级科技进步三等奖4项,参加撰写著作和教材2部,在国内外期刊发表学术论文40余篇。



作者简介

逢焕东,男,1969年生,采矿工程博士,山东科技大学土木建筑学院副教授,胜利油田博士后。主要从事岩体动力学方面的教学和研究工作,研究岩体微震信号的特点、传播规律和微地震发生点定位与灾害发生的相互关系。作为主要研究人员之一,参加了以下科研项目:(1)煤矿覆岩破裂灾变的机理、监测与控制研究(50320120001);(2)采动覆岩空间结构及其与应力场动态关系研究(50074021)。发表相关学术论文10余篇。

内 容 提 要

本书采用试验手段进行不同应力状态下煤岩强度、变形及压缩破坏的微地震特征试验研究,运用损伤力学及岩石力学等分析了煤岩在不同应力状态下的强度及变形特征;另外,采用山东科技大学自主研制的井下微震监测仪对华丰煤矿采场覆岩破坏失稳进行了微地震监测,分析了覆岩破坏与微地震间的关系,提出了岩体破坏失稳预报的微地震监测指标以及综合预报方法。

本书可供从事采矿工程、岩土工程及矿山安全生产监测等研究方面的科技工作者、研究生和本科生及现场工程技术人员参考使用。

前 言

煤是远古地表腐植物沉积演化的一种岩类矿物,由于受古气候及沉积环境的影响,构成了煤系地层煤岩在微观上的差异。煤岩力学性质的实验室研究,也像一般岩石的室内实验研究一样,所不同的是,一般较硬岩石试件的获得比较简单容易,并且比较可靠,而获得煤样、加工煤岩标准试件,要比一般岩石困难得多,可靠性也较低。以前国内外所做的大量富有成果的岩石力学实验大都是针对像大理岩、花岗岩、石灰岩等坚硬及较硬岩石,但煤岩力学性质的实验研究成果较少,特别是考虑强度离散性可靠、系统、全面地反映煤岩在不同应力状态下强度及变形特征的实验研究成果更少。在进行相关煤岩力学行为方面的数值计算及理论研究时,大都采用非煤岩石的实验资料及本构模型,缺乏煤岩实验资料的验证和支持,制约了井下煤岩体断裂破坏和矿山压力研究的科学性和合理性。

煤岩体的宏观力学行为与其内部的微观组构密切相关,因此研究煤岩体的微观结构和组分有利于理解其强度及变形特征的微观力学机制。研究煤岩力学参数离散性的声波测试方法,尽可能降低因强度离散性而带来的盲目试验,对于指导煤岩强度等对比性试验具有重要意义。采用先进的岩石伺服试验系统对煤岩进行单轴压缩试验、常规三轴压缩试验、循环载荷试验、全应力应变过程中的渗透性试验以及煤岩压缩破坏过程的声发射试验,分析煤岩在不同应力状态下的强度及变形特征,从而丰富煤岩力学性质实验资料,为进行有关煤岩体稳定性计算分析、重复采动条件下的合理煤柱尺寸留设以及研究煤矿采动条件下煤岩体固液耦合分析提供理论及实验基础。另外,煤矿井下矿山灾害的发生与煤岩体的失稳破坏密切相关,而微地震是煤岩体破裂的前兆信息,因此煤岩压缩破坏失稳的微震预报方法和判据对于合理采用微震监测技术预测煤岩体

失稳、预防矿山灾害发生具有重要作用。

全书共分9章,第1章介绍了煤岩力学性质实验研究现状及煤岩压缩破坏的声发射及微地震研究现状,提出了煤岩强度特征及煤矿覆岩破坏的微地震研究内容及方法。第2章针对煤岩内部结构特征分析了煤岩强度特征的微观力学机理。第3章通过大量的力学性质试验和超声波速度测试,分析了煤岩强度离散性的超声波速度测试方法。第4章通过对两种煤岩进行单轴、常规三轴压缩试验,分析了煤岩在单轴压缩和三轴压缩条件下的强度、变形和破坏特征。第5章通过试验对煤岩受循环荷载作用下的强度及变形特征进行了分析,采用损伤力学分析了煤岩在循环荷载作用下的损伤破坏过程。第6章在岩石伺服试验机上进行了煤岩全应力应变过程中的渗透性试验,分析了渗透率与煤岩受压过程中裂隙演化间的关系。第7章在煤和岩石单轴压缩声发射试验基础上,采用非线性动力学分析采用声发射参数描述煤、岩压缩变形破裂演化系统的混沌性,采用小波分析对煤和岩石的压缩破裂进行预报。第8章进行了微地震定位方法和误差的理论分析,提出了关于微地震病态定位方程组的正则化处理方法。第9章采用井下微地震监测仪对华丰煤矿工作面覆岩破坏进行了微地震监测,分析了微震与采场覆岩破坏间的关系,研究了覆岩破坏合理的微地震及综合预报方法。

本书的编写,参阅了大量国内外有关岩石力学实验及微地震监测方面的专业文献,谨向文献的作者表示感谢。在本书的写作过程中,得到了山东科技大学宋扬教授、郭惟嘉教授、尤春安教授、于师建教授、张兴民研究员、陈绍杰博士,北京科技大学姜福兴教授,中国矿业大学高延法教授等的热情指导和帮助,作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2006年6月于青岛

目 录

1 绪论	1
1.1 煤岩强度特征及微地震监测研究的意义	1
1.2 煤岩力学性质实验研究概述	2
1.3 煤、岩压缩声发射及微地震研究现状.....	12
1.4 研究内容及研究方法.....	18
2 煤岩强度特征的微细观力学机理研究.....	20
2.1 MTS815.03 电液伺服岩石试验系统及 煤样制备.....	21
2.2 煤岩体的微细观结构特征.....	25
2.3 煤岩体的原生损伤变量及对强度的影响.....	27
2.4 煤岩体各向异性特征及对强度的影响.....	32
2.5 煤岩体非均质性及对强度的影响.....	37
3 煤样力学参数离散性的超声波测试方法.....	40
3.1 岩石声波速度与其力学参数关系的理论分析.....	41
3.2 煤样超声波速度测试方法及结果分析.....	46
3.3 煤样力学参数实测结果分析.....	54
3.4 煤样超声波速度与其力学参数间的关系分析.....	54
4 常规三轴压缩条件下煤岩强度及变形特征试验研究.....	61
4.1 单轴压缩条件下煤岩强度及变形特征.....	61
4.2 常规三轴压缩条件下煤岩的变形特征.....	68
4.3 常规三轴压缩条件下煤岩的强度特征及	

强度准则	78
4.4 常规三轴压缩条件下煤岩本构关系的 拟合分析	83
4.5 三轴压缩条件下煤岩破坏形式	88
5 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究	91
5.1 试验方法及煤样条件	92
5.2 循环荷载作用下煤岩强度特征	94
5.3 循环荷载作用下煤岩变形特征	98
5.4 循环荷载作用下煤岩疲劳损伤演化 过程分析	106
6 煤岩固液耦合渗透性试验研究	110
6.1 煤岩压缩变形过程的损伤分析	111
6.2 煤岩体固液耦合条件下的渗流场	115
6.3 煤岩全应力—应变过程的渗透性试验 及分析	116
7 煤、岩压缩破坏的声发射试验及分析	130
7.1 单轴压缩条件下煤、岩破坏过程的 声发射试验	131
7.2 煤、岩压缩破裂过程的混沌性判别	134
7.3 声发射信息对煤、岩压缩破裂过程的 预报分析	140
8 微地震定位方法和误差的理论分析	148
8.1 微地震波传播的规律	148
8.2 微地震信号的传播数值模拟	151
8.3 微地震点的线性方程定位	152
8.4 微地震定位病态方程的处理	160

9 煤矿采场覆岩破坏的微地震监测	165
9.1 微地震在矿山现场监测方面的应用	166
9.2 微地震在岩体不同尺度上的变化	170
9.3 微震事件定位及与采场覆岩破坏失稳 间的关系	171
9.4 采场覆岩破坏失稳的微地震预报分析	176
9.5 微地震监测的综合预报	182
9.6 提高微地震定位精度的方法	186
参考文献.....	188

1 绪 论

1.1 煤岩强度特征及微地震监测研究的意义

岩石力学研究的基础是岩石力学实验。岩石力学实验一直是人们认识岩石在不同应力状态下力学性质的主要手段,也是建立岩石强度理论及本构关系的主要依据。因此,岩石力学实验具有特别重要的意义。受科学技术的发展水平和实验手段的限制,对岩石力学性质富有成果的研究也不过仅半个世纪左右的时间。20世纪50年代末和60年代初,电子计算机的问世和刚性试验机的诞生,大大促进了岩石力学的研究和发展。特别是岩石伺服实验机的问世,给岩石力学实验方法、实验手段和实验技术带来了根本性的变革。通过岩石试件的单轴压缩实验,可以获得岩石的全应力应变曲线,使人们认识到岩石试件在破坏前有弹性段和塑性段,同时,岩石具有尺寸效应和形状效应;通过三轴压缩实验,使人们搞清了岩石的围压效应,从而认识了围压对岩石变形和破坏的影响,而且建立了摩尔—库仑强度理论等;通过真三轴压力实验,使人们认识了中间主应力效应,并且建立了许多更符合实际的强度理论。岩石力学实验技术和实验手段的提高大大地促进了岩石力学的发展。

煤是远古地表腐植物沉积演化的一种岩类矿物。属于沉积岩的煤(本书中的煤岩均指这种煤),由于受古气候及沉积环境的影响,构成了煤系地层中的煤岩微观上的差异。大量的微细观研究表明,煤成岩后具有不均匀性,由形状不同、大小不同的块状颗粒叠压而成,存在许多微空洞、微裂隙以及颗粒胶结物,加上节理、层理等软弱结构面的影响,煤无疑是一类含有大量原始损伤的微观非均质体。同其他岩石相比,煤的岩微结构及微组分更复杂多样,受煤岩微组分和微结构的影响,煤岩的物理力学性

质更为复杂,强度较低,离散性更大。

煤岩性质的实验室研究,也像一般岩石的室内实验研究一样,所不同的是,一般较硬岩石试件的获得比较简单容易,并且比较可靠,而获得煤样、加工煤岩标准试件,要比一般岩石困难得多,可靠性也较低。以前国内外所做的大量富有成果的岩石力学实验大都是针对像大理岩、花岗岩、石灰岩等坚硬及较硬岩石,但煤岩力学性质的实验研究成果较少,各种文献、书籍上的资料数据或出自同一出处,或相去甚远。在进行相关煤岩力学行为方面的数值计算及理论研究时,大都采用非煤岩石的实验资料及本构模型,缺乏煤岩实验资料的验证和支持,制约了井下煤岩体断裂破坏和矿山压力研究的科学性和合理性。

煤岩体的宏观力学行为与其内部的微观组构密切相关,因此研究煤岩体的微观结构和组分有利于理解其强度及变形特征的微观力学机制。研究煤岩力学参数离散性的声波测试方法,尽可能降低因强度离散性而带来的盲目试验,对于指导煤岩强度等对比性试验具有重要意义。采用先进的岩石伺服试验系统对煤岩进行单轴压缩试验、常规三轴压缩试验、循环载荷试验、全应力应变过程中的渗透性试验以及煤岩压缩破坏过程的声发射试验,分析煤岩在不同应力状态下的强度及变形特征,从而丰富煤岩力学性质实验资料,为进行有关煤岩体稳定性计算分析、重复采动条件下的合理煤柱尺寸留设以及研究煤矿采动条件下煤岩体固液耦合分析提供理论及实验基础。另外,煤矿井下矿山灾害的发生与煤岩体的失稳破坏密切相关,而微地震是煤岩体破裂的前兆信息,因此煤岩压缩破坏失稳的微震预报方法和判据对于合理采用微震监测技术预测煤岩体失稳、预防矿山灾害发生具有重要意义作用。

1.2 煤岩力学性质实验研究概述

1.2.1 非煤岩石强度和变形特征的实验研究综述

岩石力学实验是确定岩石基本物理性质和材料特性的唯一手段,岩石力学实验可分为实验室实验和现场调查测试两类。实验

室实验得到的岩石特性是受实验室条件影响的，必须使用统一的实验方法和标准。美国材料力学实验协会（ASTM）的方法较全，国际岩石力学协会（ISRM）也制定了一系列的建议方法。我国岩石力学实验标准是在国际标准的基础上制定出来的。

在岩石力学实验中，最基本和做得最多的就是岩石的单轴压缩和三轴压缩实验。

1.2.1.1 岩石单轴压缩实验

岩石单轴压缩实验是最简单的岩石力学实验，通常岩石试件做成圆柱体，要求圆柱体高径比 $2\sim 3$ ，试件端面光洁平整，两端面平行且垂直于轴线，岩石单轴压缩强度和弹性模量等力学参数取决于岩石的组成结构、矿物颗粒性质以及微观裂隙等。虽然单轴压缩是最简单的强度试验，但岩石试件内的应力分布、破坏方式和强度值受许多因素影响。这些因素包括：

- (1) 压力试验机的刚性。
- (2) 承压板与试件端面的摩擦。
- (3) 试件的几何形态（形状、高径比和尺寸）。
- (4) 加载速度。
- (5) 环境因素，如试件的含水性、湿度等。

岩石试件从开始受压到完全丧失其强度的整个应力应变曲线称为岩石的全应力应变曲线。大量岩石单轴压缩实验表明，岩石在破坏以前的应力应变曲线的形状大体上是类似的，一般可分为压密、弹性变形和向塑性过渡直到破坏3个阶段。根据岩石开始破坏后的不同形式，可分为稳定破裂型和非稳定破裂型。稳定破裂型破坏的特点在于即使当外力超过了岩石的最大承载力以后，仍保持一定的强度；非稳定破裂型的特点是当外力一旦超过了岩石的最大承载力后，岩石的变形就能够进一步导致岩石的破裂直到破坏，并迅速失去其承载能力，一定程度上可以认为非稳定破坏表现了更大的脆性。

岩石的尺寸效应，很多学者进行了实验室研究，早在20世纪60年代Mogi在大理岩试件中做过研究，随后Kostak等在砂岩中，

Abou 等在石英闪长岩中也均做过类似的研究。Hock 和 Brown 求得的经验公式可适用于各类岩石, 该公式为

$$\sigma_1/\sigma_2 = (D_1/D_2)^\alpha \quad (1-1)$$

式中 σ_1 、 σ_2 ——不同尺寸的试件所得的强度, MPa;

D_1 、 D_2 ——不同的试件尺寸, mm;

α ——试验参数。

岩石试件单轴受压时, 由于受到多种因素的影响, 真实的破坏形式不太明确, 常常观察到的是剪切破坏、锥形破坏和劈裂破坏。对试件破坏形态影响最大的是端面摩擦约束效应, 对于比较坚硬的脆性岩石, 当采用减小端面摩擦约束的措施时, 出现纵向劈裂破坏。

1.2.1.2 岩石三轴压缩实验

自从1911年Von. Karman 首创三轴压力实验以来, 岩石的常规三轴压缩实验得到了长足的发展, 研究十分深入。多年来, 常规三轴压缩实验一直是人们认识岩石在复杂应力状态下力学性质的主要手段, 也是建立强度理论的主要实验依据。像摩尔—库仑强度理论的强度包络线就是由常规三轴实验成果绘出的。实际岩体工程中, 特别是地下岩体工程中, 岩石一般处于三向应力状态, 另外, 岩石与金属在力学性质上的一个重要区别就在于岩石对静水压力的敏感性, 所以, 三轴压缩岩石力学实验具有特别重要的意义。

常规三轴压缩实验, 就是岩石试件受三向压应力 (σ_1 、 σ_2 、 σ_3) 作用, 而且 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, 即2个较小的主应力相等。与单轴压缩实验相比, 常规三轴实验增加了围压 σ_2 、 σ_3 的作用。在 σ_2 、 σ_3 作用下, 岩石的强度显著提高, 所以进行岩石常规三轴实验, 需要三轴室和大吨位的压力试验机。国内常见的岩石三轴压力机有两种, 一是国产TYX-500型岩石三轴压力机, 可施加轴压最大5MN, 围压最大150MPa; 二是美国MTS公司的岩石伺服试验机, 可施加轴压4.6MN, 围压最大160MPa。

在岩石常规三轴压缩实验方面, 国内外学者均做了大量富有

成果的研究,最典型的有 Von. Karman 做的大理岩三轴实验。根据已有岩石三轴压缩实验结果,围压效应可总结如下:

(1) 岩石随围压的增加,延性变形逐渐增大,对于一定的岩石,当围压达到一定值后,岩石由弹性材料转变为弹塑性材料。

(2) 岩性越坚硬,脆性—延性转变所需的围压值越高。

(3) 随围压增加,岩石强度增大。

(4) 岩石试件的破坏形态,由围压为零时的劈裂破坏,随围压的增加而逐渐转变为以剪切面形式的剪切破坏,以至演变为延性破坏。

(5) 微观观测以及声发射和弹性波速等测试表明,在脆性—延性转变前后,岩石都有微破裂产生。

1.2.2 煤岩强度及变形特征的实验研究现状

1.2.2.1 煤岩单轴压缩实验研究

煤岩单轴抗压强度是早期岩石力学者首先探讨的问题之一。早在1907年Daniel和Moor就指出:小立方体的屈服强度高于大立方体,而且当底面积保持常数时,随着试块高度的增加,其屈服强度降低。1911年Bunting进而指出,没有充分的煤柱支护而进行开采,将或迟或早引起煤柱屈服、顶板冒落和底板鼓起。通过测试不同尺寸和形状的无烟煤试块,Bunting及其同事们清楚地得出两个结论:尺寸效应和形状效应,并建立了实验室样本强度与现场实际强度之间的关系。

美国的A. M. Hirt和A. Shakoor对不同煤层和不同煤矿同一煤层取样进行了单轴抗压强度试验,试验结果表明,不同煤层和不同煤矿同煤层的平均抗压强度差别较大,同时在同一地点所取煤样的抗压强度值离散性较大。Unrug等认为同一层煤抗压强度差别较大的原因取决于煤分层的情况,这些煤分层在较近的距离内其厚度、强度特征及节理裂隙情况变化较大。Unrug等1986年在Kentucky东部不同煤层性质的研究中发现,同一煤层中不同分层的强度值可以相差到5倍,所以,他们建议采用考虑煤分层厚度及强度的加权平均强度值来代表整层煤的强度。

澳大利亚的 T. P. Medhurst 和 E. T. Brown 对大煤样进行了较全面的单轴压缩试验, 试验采用 4 种尺寸煤样: $\phi 61\text{mm}$ 的煤样 40 个, $\phi 101\text{mm}$ 的煤样 4 个, $\phi 146\text{mm}$ 的煤样 11 个, $\phi 300\text{mm}$ 的煤样 5 个, 煤样全部取自昆士兰州 Moura 矿的三层煤 Du、D 和 BL。结果表明, 暗淡型煤样峰值强度大于相同尺寸的光亮型煤样; 在同一类煤样中, 煤样峰值强度随煤样尺寸增加而降低。煤样峰值强度与煤的裂隙发育情况和煤样直径有关。试验结果还表明, 煤样弹性模量随煤样尺寸增加呈非线性降低, 并最终有趋近于 $1.5 \sim 2.0\text{MPa}$ 的趋势, 与现场实测煤的弹性模量相一致; 泊松比随煤样尺寸没有明显的变化, 这也与现场实测结果相一致。

国内受实验条件等各方面的影响, 煤岩单轴抗压强度实验进行得相对较少, 刘宝琛等研究了岩石 (包括煤) 抗压强度的尺寸效应, 在调研了国外 14 组实验数据的基础上, 回归分析得出了煤样抗压强度的尺寸效应公式:

$$\sigma_c = 4.679 + 34.263e^{-0.075D}$$

式中 D ——立方体煤样边长。

该经验公式与实验结果吻合较好。

靳钟铭等采用 MSS-300 型真三轴压力机进行了大煤样压裂试验研究, 煤样尺寸 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。试验结果表明, 煤样强度与试件尺寸有关, 随着试件尺寸的增大呈非线性降低, 并通过回归分析得出 2 条煤样强度与煤样受载面积的关系曲线:

$$\sigma_c = 7.9/A^{0.285}$$

$$\sigma_c = 10e^{0.00703/A}$$

平均值为

$$\bar{\sigma}_c = 3.95/A^{0.285} + 5e^{0.00703/A}$$

式中 σ_c ——煤体单轴抗压强度, MPa ;

A ——煤样受载面积, m^2 。

煤样受压经历了较完整的 5 个变形阶段: 原有裂隙压密段, 弹性变形段, 新裂隙产生、扩展贯通段, 应变强化段和塑性软化段。煤体的这种变形特征与其内部裂隙的加密、扩展演化过程密切相