



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

深部煤岩组合体破坏力学与模型

左建平 陈 岩 王 超 著



科学出版社



博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

深部煤岩组合体破坏力学与模型

左建平 陈 岩 王 超 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了作者近年来在煤岩单体和组合体力学特性及本构模型方面的学术研究成果。利用高刚性伺服试验机、断层扫描技术和声发射检测系统等综合手段对完整岩石试样、煤岩组合体试样进行单轴压缩试验、常规三轴压缩试验、分级加卸载压缩试验和声发射试验等,研究了不同应力状态下煤岩体的破坏行为和力学特性,并发展了相应的非线性理论模型用于描述深部煤岩组合体变形破坏行为。

本书可供矿山岩体力学、工程力学、采矿工程和岩土工程等研究领域的科研和工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部煤岩组合体破坏力学与模型/左建平,陈岩,王超著.—北京:科学出版社,2017.4

ISBN 978-7-03-053576-4

I. ①深… II. ①左…②陈…③王… III. ①煤岩-组合体-岩体破坏形态-研究②煤岩-组合体-模型 IV. ①TD31

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第132036号

责任编辑:李 雪/责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

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>

北京科印技术咨询服务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年4月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年4月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:330 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰	付小兵	郭坤宇	胡 滨	贾国柱
刘 伟	卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪
万国华	王光谦	吴硕贤	杨宝峰	印遇龙
喻树迅	张文栋	赵 路	赵晓哲	钟登华
周宪梁				

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

我国煤炭资源丰富，利用煤炭已有几千年的历史，是世界上发现和利用煤炭最早的国家之一。煤炭是我国的主体能源。近年来，一些新能源的迅速发展，使得煤炭在我国能源构成中的比例逐渐降低，但据预测，到 2050 年，该比例仍将达到 40% 以上。可见，近期煤炭在我国经济发展中的主体地位不会动摇。我国 90% 以上的煤炭产量均属于井工开采，埋深 1000 m 以下的煤炭资源约占已探明的煤炭资源的 53%。但是，随着浅部煤炭资源的日益枯竭，许多煤矿面临着深部开采状态。我国中东部主要矿井开采深度已达 800~1000 m。深部开采面临着诸多灾害，如冲击地压、煤与瓦斯突出等。

随着开采深度的逐渐加深，煤层与岩层之间的相互作用越来越强。因此，煤岩体的破坏不但取决于煤岩材料自身特性，而且受到煤岩组合结构的影响。在煤炭开采中，顶板、煤层、底板共同组成一个力学平衡体系。受采动应力的影响，煤岩体在采掘过程中会发生变形，会出现片帮、底鼓和顶板冒落。若变形剧烈，则会发生冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害。因此，对煤岩组合体的破坏力学特性及理论模型进行研究是有必要的。

本书主要针对深部煤炭开采中煤岩体的变形、破坏展开研究，具有广泛的工程应用背景。目前，大多数的煤岩体破坏问题多集中于单体岩石或煤。这无法真实地描述深部环境下，煤和岩石相互作用而产生的变形、破坏问题。针对上述问题，以深部煤岩体的工程稳定与安全为研究目标，本书通过选取典型深部煤和岩石为研究对象，利用先进的岩石力学试验系统（高刚性电液伺服试验机、计算机断层扫描技术），采用试验、理论分析和数值模拟相结合的研究方法，从煤岩体之间的相互作用出发，对煤岩单体、煤岩组合体进行常规单轴压缩试验、分级循环加卸载试验、声发射试验、计算机断层扫描试验和常规三轴压缩试验，研究煤岩单体与煤岩组合体的变形、强度、破坏、冲击倾向性、能量、裂纹演化、声发射及煤岩组合体理论模型。

本书共分 8 章。第 1 章详细阐述了煤岩组合体研究的背景和意义、岩石力学特性研究现状；第 2 章研究了单体岩石和煤岩组合体在单轴压缩下的变形和强度特性，分析了泡水、高径比对岩石力学特性影响，并开展了不同倾角下煤岩组合体的破坏力学特性研究，最后对煤岩体之间的相互作用进行了讨论；第 3 章研究了单体岩石和煤岩组合体在三轴压缩下的变形和强度特性，探讨了不同围压下煤岩组合体的破坏特征；第 4 章研究了单体岩石和煤岩组合体的冲击倾向性，分析

了单体岩石冲击倾向性的影响因素,讨论了煤岩组合体的冲击倾向性与单体煤之间的差异;第5章研究了分级加卸载条件下,煤岩组合体的破坏机制、残余变形、加卸载弹性模量、泊松比的变化特征,最后讨论了循环加卸载作用下煤岩组合体的能量演化特征;第6章讨论了煤岩组合体的热力学过程,研究了单轴压缩下煤岩组合体的能量演化规律,能量比例与应力关系,提出了脆性岩石破坏的能量跌落系数;第7章研究了煤岩组合体内部的轴向裂纹演化规律,并通过声发射对加载过程中裂纹的萌生进行了定位,提出了煤岩组合体破裂过程中时空演化机制;第8章建立了煤岩组合体位移-荷载理论模型、煤岩组合体应力-应变理论模型,并利用试验数据进行了验证。

本书的研究课题得到国家自然科学基金优秀青年基金(51622404)、国家自然科学基金面上项目(51374215 和 11572343)、国家“万人计划”青年拔尖人才、霍英东教育基金会第十四届高等院校青年教师基金应用课题(142018)、中国博士后科学基金会(20070410577)、“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0801404)、高等学校学科创新引智计划(简称 111 计划)(B14006)、北京市科委重大科技成果转化落地培育项目(Z151100002815004)、高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201030)、科技部 973 项目(2010CB732002)的资助,特此表示感谢。本书第一作者的研究生做了很多绘图及校对工作,一并表示感谢。

本书写作过程中,尽量引用了本领域的一些重要参考文献,但由于作者的学识和精力有限,难免会挂一漏万,谨表歉意。另外,本书主要参考了作者近年来在煤岩组合体的破坏行为及模型方面所发表的论文,但为了使内容更为系统,把很多没有来得及发表的实验结果及分析讨论也一并纳入。很多成果也只是基于我们现有的观点而得出的认识,难免存在不足,敬请各位同行批评指正。

特别感谢谢和平院士、彭苏萍院士、钱鸣高院士、周宏伟教授和鞠杨教授等长期以来给予的指导和帮助;感谢四川大学刘建锋副教授和河南理工大学郭保华副教授在实验方面给予的帮助和指导;还要特别感谢《博士后文库》出版基金及科学出版社。

左建平

2016 年 12 月于北京

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 单体岩石压缩破坏研究现状	2
1.1.1 单体岩石单轴压缩破坏	2
1.1.2 单体岩石三轴压缩破坏	3
1.2 煤岩组合体破坏力学与冲击倾向性研究现状	6
1.2.1 煤岩组合体破坏力学特性	6
1.2.2 煤岩组合体的冲击倾向性	7
1.2.3 压缩过程中能量演化特征	14
1.2.4 加载过程中裂纹演化及声发射	15
1.2.5 岩石的应力-应变本构关系	16
参考文献	17
第 2 章 单轴压缩下煤岩组合体破坏力学特性	22
2.1 单体岩石单轴压缩破坏试验	23
2.1.1 岩石单轴压缩试验概况	23
2.1.2 自然岩样单轴压缩试验结果	28
2.1.3 泡水岩样单轴压缩试验结果	29
2.1.4 标准岩样单轴压缩破坏形态	33
2.1.5 不同高径比岩样单轴压缩试验结果	35
2.1.6 高径比对岩样力学参数的影响	37
2.2 深部煤岩组合体单轴压缩破坏试验	43
2.2.1 试验概况	43
2.2.2 完整岩样和煤样力学特性分析	45
2.2.3 深部煤岩组合体破坏力学特性	48
2.3 单轴压缩不同倾角深部煤岩组合体破坏力学特性	54
2.3.1 不同倾角煤岩组合体单轴压缩试验概况	54
2.3.2 不同倾角煤岩组合体单轴压缩破坏试验结果	54
2.3.3 不同倾角深部煤岩组合体破坏的扩展有限元分析	58
2.4 深部煤岩组合体相互作用分析	61
参考文献	64

第 3 章 不同围压下深部煤岩组合体破坏力学特性	67
3.1 单体岩石三轴压缩破坏	68
3.1.1 试验方案	68
3.1.2 试验结果	70
3.1.3 变形特征	70
3.1.4 强度特征	73
3.2 深部煤岩组合体三轴压缩破坏试验	80
3.3 深部煤-岩组合体三轴压缩破坏力学特性	81
3.3.1 试验结果	81
3.3.2 变形特征	81
3.3.3 破坏模式	83
3.3.4 强度特征	86
3.4 深部岩-煤组合体三轴压缩破坏力学特性	91
3.4.1 试验结果	91
3.4.2 变形特征	92
3.4.3 破坏模式	95
3.4.4 强度特征	95
3.5 深部岩-煤-岩组合体三轴压缩破坏力学特性	98
3.5.1 试验结果	98
3.5.2 5 MPa 围压下 RMR 组试样压缩试验	100
3.5.3 10 MPa 围压下 RMR 组试样压缩试验	101
3.5.4 15 MPa 围压下 RMR 组试样压缩试验	101
3.5.5 20 MPa 围压下试样压缩试验	103
3.6 三种煤岩组合体强度比较	106
参考文献	107
第 4 章 煤岩体破坏冲击倾向性研究	110
4.1 冲击倾向性指标	112
4.1.1 冲击能量指数 K_E	112
4.1.2 动态破坏时间 D_t	112
4.1.3 脆性指标修正值 (BIM)	113
4.2 单体岩石试验结果分析	114
4.2.1 单体岩石单轴压缩试验结果	114
4.2.2 单体岩石冲击倾向性分析	118
4.3 泡水对岩石冲击倾向性的影响	120
4.3.1 泡水岩石的冲击倾向性	120
4.3.2 岩石冲击倾向性分类	122

4.4 不同高径比对冲击倾向性的影响	123
4.4.1 不同高径比岩石冲击倾向性	123
4.4.2 岩石高径比与 BIM 的关系	125
4.4.3 高径比与峰前积蓄能量、冲击能量指数的关系	126
4.5 围压对冲击倾向性的影响	128
4.5.1 不同围压下岩石的冲击倾向性	128
4.5.2 围压对脆性指标修正值及冲击能量指数的影响	129
4.6 煤岩组合体峰后破坏脆性特征	130
4.7 煤岩组合体破坏冲击倾向性特征	133
4.7.1 煤岩组合体的峰前积蓄能量与峰后耗散能量	133
4.7.2 煤岩组合体冲击倾向性	136
参考文献	139
第 5 章 深部煤岩组合体分级加卸载破坏力学特性试验研究	141
5.1 深部煤岩组合体循环加卸载试验概况	142
5.2 深部煤岩组合体循环加卸载破坏力学特性分析	144
5.2.1 试验结果	144
5.2.2 不同循环阶段动应力-应变曲线	145
5.2.3 不同循环阶段煤岩组合体的泊松比	153
5.2.4 煤岩组合体加卸载响应比研究	155
5.2.5 煤岩组合体循环加卸载损伤参数分析	157
5.3 深部煤岩组合体加卸载破坏过程能量演化特征	158
5.3.1 能量演化基本理论	158
5.3.2 煤岩组合体循环加卸载能量演化特征	159
5.3.3 煤岩组合体能量演化的理论验证	165
参考文献	168
第 6 章 单轴压缩下深部煤岩组合体破坏过程能量演化特征	170
6.1 单轴加载过程中能量分析	172
6.2 煤岩组合体热力学过程	173
6.2.1 煤岩组合体的非平衡热力学	173
6.2.2 基于能量理论的煤岩组合体整体失稳条件	175
6.3 输入能量演化特征	178
6.4 单轴压缩能量演化特征	180
6.4.1 煤岩组合体能量演化规律	180
6.4.2 煤岩组合体能量比例与应力的关系	184
6.5 脆性岩石破坏的能量跌落系数研究	185
6.5.1 岩石变形破坏过程中能量的再认识	185

6.5.2	应力跌落过程的能量分析	187
6.5.3	应力跌落过程的能量表示	188
6.5.4	能量跌落系数的分析计算及对比	190
	参考文献	195
第7章	煤岩组合体破坏过程裂纹演化及声发射研究	198
7.1	煤岩组合体裂纹演化规律	199
7.1.1	单轴加载裂纹演化特征	199
7.1.2	煤岩组合体闭合应力和闭合应变	204
7.1.3	循环加卸载裂纹演化特征	205
7.2	煤岩组合体声发射特性分析	206
7.2.1	岩石断裂破坏的声发射机理初探	206
7.2.2	声发射定位机理	211
7.3	煤岩组合体声发射试验研究	213
7.3.1	煤岩体声发射试验结果及分析	213
7.3.2	煤岩组合体声发射分析与讨论	215
	参考文献	218
第8章	深部煤岩组合体破坏非线性理论模型研究	221
8.1	基本假设	222
8.2	深部煤岩组合体整体破坏理论模型	223
8.2.1	深部煤岩组合体整体破坏理论模型建立	223
8.2.2	深部煤岩组合体整体破坏理论模型验证	225
8.3	深部岩-煤-岩组合体整体破坏理论模型	227
8.3.1	深部岩-煤-岩组合体整体破坏理论模型建立	227
8.3.2	深部岩-煤-岩组合体整体破坏理论模型验证	230
8.3.3	理论与试验结果误差分析及讨论	233
8.4	基于裂纹演化的峰前应力-应变理论模型	235
8.4.1	基于裂纹演化的峰前应力-应变模型的建立	235
8.4.2	裂纹闭合和扩展模型验证	237
8.4.3	煤岩组合体峰前应力-应变关系模型	239
8.4.4	循环加卸载试验验证	240
8.5	深部煤岩组合体峰后应力-应变关系模型	243
8.5.1	煤岩组合体峰后软化应力-应变关系	243
8.5.2	实例验证	246
8.5.3	煤岩组合体参数敏感性分析	247
	参考文献	249
	编后记	253

第1章 绪 论

确保深部能源和矿产资源的安全及充分开发是我国能源战略安全所关注的重要问题之一，也是我国国民经济不断发展的保障。由于目前国内外对能源的需求日益增加，且开采强度不断增强，浅部资源日益减少，造成许多矿山均处于深部开采的状态，灾害也日趋增多，例如冲击地压、煤与瓦斯突出等，对深部资源进行高效开采造成重重困难。因而，深部资源开采过程中所产生的岩石力学问题已成为国内外专家研究的重点^[1]。中国煤炭工业经过 60 年的开发建设，特别是改革开放 30 多年来的发展，扭转了长达 30 余年的煤炭供不应求的局面，为发展能源工业、保障国民经济发展做出了巨大贡献^[2]。为了在深部条件下进行安全采矿，就必须开展对深部岩石力学的研究。事实上有关深部的概念，在工程角度和地球物理科学角度是完全不同的概念。从工程角度，深部只是几千米，油气工程中我国能达到 5000 m，国外油气工程能达到 10000 m。而从地球物理科学角度，深部为几十甚至上百千米。因此，有关深部的定义，要看从什么角度来看问题。事实上，人类从事的工程活动的“深部”，也就是通常所说的“深部资源开采”、“深埋隧道”、“深埋地下厂房”、“深部油气储库”等。通常我们认为当岩石的力学行为展现出延性或塑性的特点时，就说其处于深部了。但针对不同的工程，现场给出的深部概念就是指多少米，例如，我们煤炭行业中有些企业认为开采深度达到 500~600 m 以下就算深部。本书也主要是从工程的角度，并且更多的是从煤炭行业的工程角度来讨论。但不同煤矿也有不同观点，大多认为当开采水平达到一个新的深度时，而这个深度出现了大变形、巷道围岩变形剧烈、底鼓严重等变形特征，认为这个就是深部了^[1,3~8]。由于研究的岩样取自开滦钱家营矿地下埋深 850 m，并且处于该水平的巷道出现了剧烈变形、严重底鼓，所以作者只是套用了深部的概念，认为其处于深部。

岩石是一种经过亿万年地质构造作用下的产物，是组成地壳和地幔的主要物质。大部分岩石是由几种矿物按照一定的方式组合而成，是人类生存发展的立足之地。从古至今，人类的一些活动离不开岩石，如在石器时代，人类打造石器作为人类的劳动工具；修建万里长城和金字塔也离不开岩石。迄今，人类与岩石仍然紧密联系在一起，如地下煤炭开采、隧道工程、水利水电工程、核废料地质处理工程等。人类对岩石的利用从起初的浅部岩石，逐渐延伸到深部岩石。但是在认识的过程中，人类付出的代价也很沉重。据统计，1985 年我国冲击地压煤矿有 32 座，而 2011 年年底，发生冲击地压的矿井多达 142 座^[9]。冲击地压的发生给国

家和人民的生命财产造成了无法估量的损失。因此,还需要对岩石力学和岩石工程的施工设计进行深入研究。对这些工程的设计和施工都要求系统地研究岩石的变形态状、破坏机制以及建立力学模型,以便为工程设计中预测岩石工程的可靠性和稳定性提供依据,并使工程具有尽可能高的经济性。而这些工程建设问题不断给岩石力学的研究者提出了新的挑战,也大大促进了岩石力学的发展^[10]。煤炭开采中,巷道的变形破坏、顶板冒落、底鼓等均涉及到煤岩体的破坏问题,因此开展对煤岩体的变形破坏分析是有必要的。

影响煤炭矿井开采的地质因素很多,如煤层顶底板岩层的组合和空间变化、煤层厚度及其变化、煤田地质构造、矿井水文地质及瓦斯情况等^[11]。煤层的开采会引起回采空间周围岩层应力的重新分布,这不仅在回采空间周围的煤柱上造成应力集中,而且该应力会向底板深部传递,由此导致回采工作面煤体和岩体产生移动、变形甚至破坏,直至煤岩体内部重新形成一个新的应力平衡状态为止。很多研究表明^[12],煤与瓦斯突出、冲击地压、山体滑坡等地质灾害的发生往往是若干地质体组成的力学系统非稳定失稳的结果。对于煤矿中很多地质灾害而言,其实就是“煤体-岩体”组合体系统在开采扰动过程中,发生整体破坏失稳的一种表现,而不是单个岩体或煤体的破坏。因此研究煤岩组合体的整体变形破坏规律对于工程地质具有十分重要的意义。

总而言之,在过去的 50 余年里,国内外很多学者从理论、实验到数值模拟方面都对煤岩的变形破坏做了研究,但大多停留在单个方面的研究,或者由于实验条件的限制,没能真实地观察到岩石内部裂隙的演化过程。但采矿工程中经常涉及由煤和岩体组合的整体结构的强度和变形破坏问题,现有的文献对此研究不多。因此,本书将对此问题展开深入研究,旨在通过现有的实验设备进行大量系统的实验,弄清楚复杂应力条件下煤岩组合体的强度特性和致灾机理,从而更好地为采矿工程提供理论和实践指导。

1.1 单体岩石压缩破坏研究现状

1.1.1 单体岩石单轴压缩破坏

岩石的单轴压缩试验是获取岩石基本力学参数的主要方法之一。在完整岩石单轴压缩试验研究中,我国学者取得了较多的研究成果。王来贵等^[13]对花岗岩试样进行单轴压缩试验,研究了其侧向变形及脆性破坏机制,表明花岗岩试样在压密阶段产生负的侧向变形,在线弹性阶段初期转为正的,且当侧向变形与轴向变形之比接近 0.5 时试样破坏。姜永东等^[14]研究了砂岩在饱和、自然和风干三种状态下的单轴、三轴压缩特性,得到三种状态下的应力-应变曲线形状相似,验证了峰前区划分为压密、弹性变形、塑性变形三个阶段,且得到屈服应力约为抗压强

度的 2/3，体应变在屈服点处达到最大。周家文等^[15]进行了砂岩单轴循环加卸载室内试验，测得砂岩的循环加卸载强度要比单轴压缩强度小得多，并且进行了细观力学分析。许江等^[16]研究了细粒砂岩在循环加卸载条件下的变形演化规律。席道瑛等^[17]研究了岩石在单轴循环载荷下的弹性与黏塑性响应有所不同。王学滨^[18]根据梯度塑性理论，得到了单轴压缩岩样由剪切局部化引起的轴向及侧向塑性变形所耗散能量的解析解。闫立宏和吴基文^[19]系统地研究了煤岩在单轴压缩条件下的变形、强度和破坏特征，分析了影响煤岩变形和强度差异性的因素。杨永杰等^[20]研究了煤岩在单轴循环载荷作用下的变形、强度及疲劳损伤特性，将煤岩的轴向变形分为了初始变形、等速变形和加速变形三个阶段，而将横向变形分为了稳定变形和加速变形两个阶段。

1.1.2 单体岩石三轴压缩破坏

地下采矿工程中，受到巷道的开挖作用，导致巷道煤岩体的应力重新分布，由原始的三向应力状态向二向应力状态转变，进而使煤岩体发生变形甚至破坏。单轴压缩条件下，脆性较强的岩石通常呈脆性破坏，其破坏形式以劈裂为主；延性较强的岩石通常会出现剪切面。随着围压的升高，岩石的三轴压缩强度会有所增加，并且破坏形式以剪切破坏为主^[21]。Paterson 和 Wong^[22]对 Wombegan 大理岩进行室温状态下的三轴压缩试验，认为随着围压的增大，大理岩的脆性逐渐转为延性(图 1.1)。当围压超过 20 MPa 时，大理岩发生破坏之前的应变具有明显的增加，Paterson 把这种应变率只有百分之几时就发生宏观破裂到能承受更大应变能力的转变称为脆性-延性转变。Mogi^[23,24]对 Yamaguchi 大理岩的实验得出了类似结果，如图 1.2 所示。

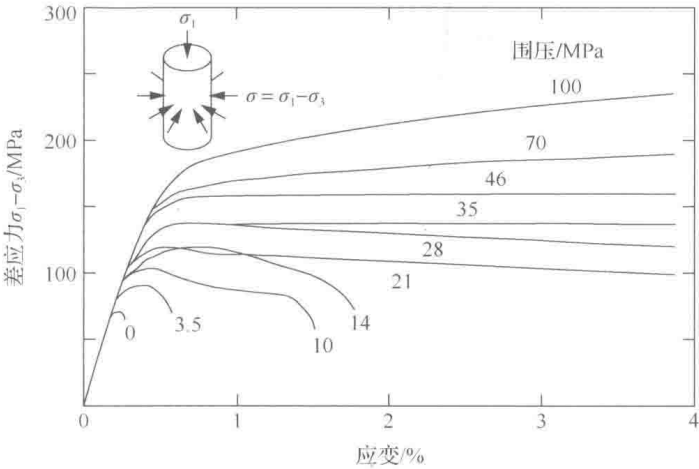


图 1.1 Wombegan 大理岩三轴试验的应力-应变曲线^[22]

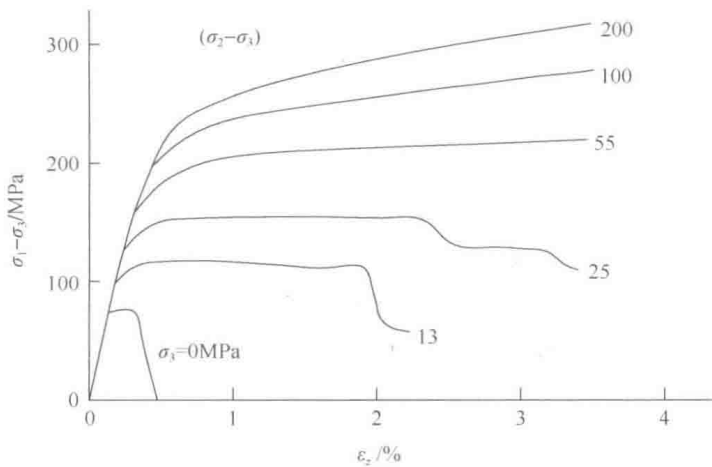


图 1.2 Yamaguchi 大理岩三轴试验的应力-应变曲线^[23,24]

Gowd 和 Rummel^[25]研究了不同围压下 Bunt 孔隙砂岩的变形破坏特性，如图 1.3 所示。当轴向应力 σ_1 小于屈服强度 σ_y 时，砂岩的变形基本是线弹性的，屈服强度 σ_y 取决于围压的大小。在围压小于 90MPa 时，应力达到峰值应力后随着应变的增加，应力会有所下降。当应力降低到一个残余强度后保持稳定时，随着变形的增加，应力却保持稳定。当围压超过 100MPa 时，砂岩表现出硬化性能。可见，在较高的围压下，岩石破坏前的应力水平会有所增高，而且围压的增高会使得岩石破裂后的应力-应变曲线趋于平缓，峰值应力出现在更大的应变处。这表明，当围压增大到某个临界围压时，岩石将发生脆延转变。因此可以认为，脆性岩石在破坏前基本上是弹性的，但岩石在破坏前，内部就有大量的微破裂出现，也就是

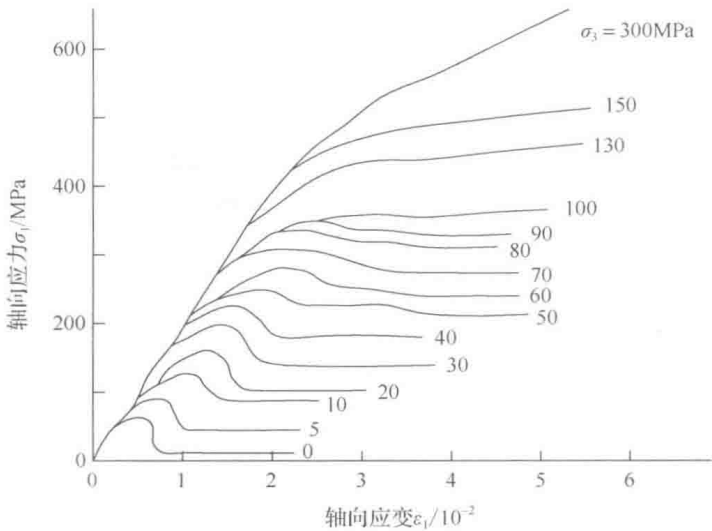


图 1.3 不同围压下 Bunt 砂岩应力-应变曲线^[25]

说岩石在达到破裂强度之前,微破裂就已发生。而围压对微破裂有抑制作用,当围压达到一个临界围压值时,微破裂不再出现,此时岩石就出现硬化现象,即随着应变的增加,强度会升高。Kwasniewski^[26]根据大量砂岩的实验数据,对岩石的脆性-延性转化规律进行了深入的研究,系统研究了脆性-延性转化点临界应力的关系,并分析了岩石应力-应变全程曲线中的第三种状态,即脆性和延性的中间转化态,这个状态既具有脆性破坏的特征,又具有延性变形的性质,提出了存在一个“脆性-延性转化临界围压”,对应到工程中实际上就是临界深度,如图 1.4 所示。

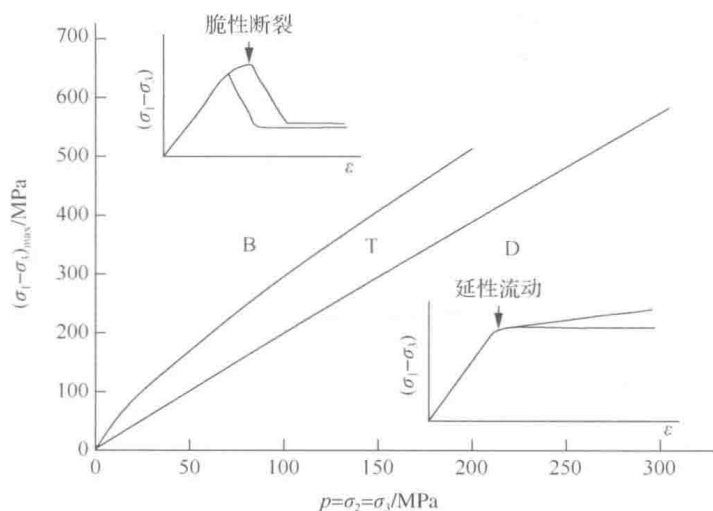


图 1.4 砂岩脆性-延性转化中的过渡区^[26]

在围压较大的深部环境中,岩石具有很强的时间效应,表现为明显的流变或蠕变特性。Blacic^[27]和 Pusch^[28]在研究核废料处置时,涉及核废料储存库围岩的长期稳定性和时间效应问题。一般认为,优质硬岩不会产生较大的蠕变变形,但南非工程实践表明,深部环境下即便优质的硬岩也会产生明显的流变效应^[29,30],这是深部条件下岩石力学行为的一大特征。

在国内研究方面,刘泉声等^[31]利用 MTS815.04 电液伺服试验系统进行高应力下原煤的常规三轴压缩试验,研究了煤岩的变形、强度、参数及破坏特征。肖桃李等^[32]利用常规三轴压缩试验,研究了单裂隙试样的破坏特性。于德海和彭建兵^[33]利用 RMT-150C 岩石力学试验机对干燥和饱水状态的绿泥石片岩进行常规三轴压缩试验,分析了三轴压缩状态下岩石的破坏类型及机制。在深部煤炭开采中,地下煤岩体均处于三向应力状态,随着巷道掘进或受采动应力的影响,煤岩体的受力状态发生变化,因此开展三向应力状态下煤岩组合体的破坏力学行为研究是有必要的。

1.2 煤岩组合体破坏力学与冲击倾向性研究现状

1.2.1 煤岩组合体破坏力学特性

煤炭作为我国的主体能源,在我国国民经济发展中占有重要地位。预计在今后相当长的时期内煤炭仍将是我国的主要消费能源^[34]。随着我国煤炭需求量的大幅增加,浅部资源逐渐减少,煤矿开采正逐渐向深部转移,但伴随而来的是诸多矿山灾害问题^[1,5,6,8]。作为煤矿四大矿井灾害(煤与瓦斯突出、冲击地压、顶板冒落及突水)之一的冲击地压灾害也就不可避免地成为煤炭深部开采领域亟待解决的问题。冲击地压通常表现为煤岩体中所积聚的弹性能突然、剧烈地释放,其发生的突然性和剧烈的破坏特征对矿山安全构成很大威胁。并且冲击地压灾害发生的频率和强度随着矿井开采深度的增加和开采范围的扩大而显著增加。由于冲击地压的巨大危害性,其研究的意义是不言而喻的。

大量事故调查表明,这些事故发生的原因大多是若干工程地质体组成的力学系统整体灾变失稳的结果^[35,36]。在浅部环境下,煤岩体的破坏主要受其自身裂隙结构面的控制;而在深部环境下,煤岩体的破坏不仅受自身裂隙结构面的影响,更重要的是受煤岩组合体整体结构的影响,再加上深部高应力环境,很多冲击地压灾害实质上就是工程地质强烈扰动下“煤体-岩体”组合体系统发生整体破坏失稳的结果。因此,研究煤岩组合体的宏细观变形破损机制及力学特性对于预测和防治冲击地压具有重要意义。

郭东明等^[37]采用工业 CT 检测系统和专用加载设备,对煤岩组合体单轴压缩载荷下进行实时 CT 扫描,从细观尺度研究了煤岩组合体的破坏演化机理,同时利用莫尔强度理论对煤岩组合体的应力、应变及煤岩组合强度进行了计算分析,建立起煤岩组合体从细观到宏观变形破坏的关系及演化机理。研究表明:煤岩组合体破坏演化机理为煤岩组合体内的微裂纹在单轴压缩下不断萌生、扩展,形成了许多长裂纹,并且随加载的进行从下到上贯通后汇集成一个剪切破裂带,从而煤岩组合体演化为宏观剪切破坏;煤岩组合在单轴压缩应力状态下,在交界层面处岩石的强度降低而煤的强度提高了。

张泽天等^[38]为探讨组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征的影响,利用 MTS815 岩石力学试验系统,分别对岩-煤-岩(YMY)、岩-煤(YM)及煤-岩(MY)三种组合方式试件进行了单轴压缩和三轴压缩试验研究。试验结果表明,组合体试件破坏主要集中在其煤体部分,而与组合和加载接触方式无关;煤体部分损伤发展和破坏程度的加剧,在一定程度上会诱导岩体出现损伤和发生破坏。单轴加