

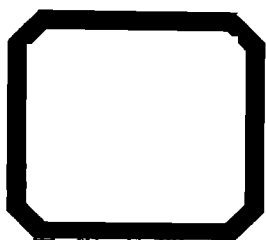
郭惟嘉 陈绍杰 常西坤 朱学军 著

山东科技大学学术著作出版基金资助
教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT0843) 资助
国家重点基础研究发展计划 (2011CB11900) 资助
国家自然科学基金重点项目 (51034003) 资助
国家自然科学基金 (51104094) 资助

深部开采 覆岩体形变演化 规律研究

SHENBU KAICAI
FUYANTI XINGBIAN YANHUA
GUILÜ YANJIU

煤炭工业出版社



学学术著作出版基金资助
和创新团队发展计划(IRT0843)资助
研究发展计划(2011CB11900)资助
国家自然科学基金重点项目(51034003)资助
国家自然科学基金(51104094)资助

深部开采覆岩体形变演化规律研究

郭惟嘉 陈绍杰 常西坤 朱学军 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

深部开采覆岩体形变演化规律研究/郭惟嘉等著. --北京:
煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978-7-5020-3995-0

I. ①深… II. ①郭… III. ①深层开采-岩石变形-研究
IV. ①TD313

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 010103 号

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 24³/₄

字数 589 千字

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 6818 定价 98.00 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

内 容 提 要

本书系统地介绍了作者多年来在深部开采覆岩体运动理论与实践方面的成果。内容主要包括深部开采覆岩体层状特征及岩体力学性质、复合层状覆岩体采动结构形变解析特征及数值计算方法、深部开采岩石及覆岩体变形试验系统、深部开采岩体变形与灾变监测系统、深部煤岩蠕变特征试验研究、深部条带煤柱长期稳定性基础试验研究、深部开采覆岩体形变演化规律试验与实测、深部采动覆岩体形变动态演化规律、条带煤柱充填开采覆岩体运动规律与时空结构模型、覆岩体及地表移动与冲击地压可预报性研究、深部采动底板变形破坏规律。

本书可作为采矿、地下工程、冶金、交通、土木工程等科技人员、现场工程人员和高等院校师生的参考用书。

前 言

煤炭是我国的主要能源,分别占一次能源生产和消费总量的76%和69%,在未来相当长的时期内,我国仍将是煤为主的能源结构。随着煤炭工业经济增长方式的转变、煤炭用途的扩展,煤炭的战略地位仍然十分重要。我国已探明的煤炭资源量占世界总量的11.1%,其中有约 2.95×10^{12} t煤炭资源埋深在地面1000 m以下,占煤炭资源总量的53%。随着煤炭资源的持续开采,浅、中部范围的煤炭资源越来越少,煤炭生产不得不逐步向深部转移。据统计煤矿开采深度平均每年以8~12 m的速度递增,特别是东部矿井正以每10年100~250 m的速度发展。随着矿井向深部发展的步伐不断加快,煤炭的深部开采问题已日趋显现。由于深部地质条件的复杂性及特殊性,浅部煤层开采所积累的成功经验已大多不再有效,煤炭深部开采相关问题迫切需要研究解决。安全高效开采深部煤炭资源关系到国计民生,关系到我国煤炭能源的健康、可持续发展,有关深部安全开采的科学理论和技术的研究具有重要意义。

深部岩体的地质力学特点决定了深部煤层开采与浅部开采的主要区别在于深部岩石所处的特殊环境,即“三高一扰动”(高地应力、高地温、高岩溶水压,强烈的采矿扰动)的复杂力学环境,深部煤层开采所产生的冲击地压、岩爆、瓦斯突出、岩体流变、底板突水等动力灾害现象归根结底是由于深部岩体所处的地球物理环境的特殊性和应力场的复杂性所致。深部开采覆岩体内部移动变形规律及其动力灾害的关系,由于条件的复杂性和困难性,以往的研究成果与浅部开采相比较少。钱鸣高院士等提出了关键层理论,将在整个采动覆岩体中起主要控制作用的岩层作为覆岩体运动的主体,认为研究掌握关键层的复合运动特性,是预测深井覆岩体运动的主要理论基础。宋振骥院士等基于内外应力场的理论,提出了“以覆岩运动为中心”的深井覆岩体结构演化模型,通过研究覆岩体运动规律,掌握围岩支承压力显现分布,实现对动力灾害的科学预测和有效防治。书中提出了“采动覆岩空间大结构演化”的概念,认为深部煤层开采覆岩体结构形变演化是岩体流变、冲击地压、地表沉陷、底板突水等应力型灾害现象和变形型灾害现象的重要表征。

本书是深部开采条件下覆岩体运动规律及其岩体运动监测、试验技术方

面的研究成果,从采动覆岩体空间大结构演化的角度,采用现场岩体内部测试分析、室内大型模拟实验等技术,研究深部开采岩体层状复合力学效应。本书共分为十一章:第一章为深部开采覆岩体层状特征及岩体力学性质,重点介绍了深部岩体基本力学特征及覆岩体的结构特征;第二章为复合层状覆岩体采动结构形变解析特征及数值计算方法,重点介绍了覆岩体形变数值计算方法和解析特征;第三章为深部开采岩石及覆岩体变形实验系统,重点介绍深部岩石蠕变、渗流耦合等试验系统;第四章为深部开采岩体变形与灾变监测系统,重点介绍深部开采中的检测、监测系统;第五章为深部煤岩蠕变特征试验研究,重点对深部煤岩体长时蠕变和短时蠕变进行了分析;第六章为深部条带煤柱长期稳定性基础实验研究,重点对深部条带煤柱的长期稳定性进行了基础试验研究;第七章为深部开采覆岩体形变演化规律试验与实测,重点对深部覆岩体形变演化规律进行了基础试验研究和实际观测;第八章为深部采动覆岩体形变动态演化规律,重点对深部覆岩体采动后的形变动态演化规律进行了分析研究;第九章为条带煤柱充填开采覆岩运动规律与时空结构模型,重点介绍充填开采条件下的覆岩运动情况;第十章为覆岩体及地表移动与冲击地压可预报性研究,重点介绍巨厚砾岩情况下的覆岩运动与冲击地压的关系;第十一章为深部采动底板变形破坏规律,重点研究深部采动后底板破坏规律。

本书引用了众多专家、学者的研究成果,在此深表感谢。由于作者水平有限,同时也由于深部开采覆岩体运动的复杂性,许多成果只是初步的,也许还有不少错误和不妥,敬请读者给予批评指正。

著 者

2011年10月

目 次

1 深部开采覆岩体层状特征及岩体力学性质	1
1.1 深部开采工程的特征	1
1.2 深部岩体地质力学特征	2
1.3 岩石物理力学参数确定	15
1.4 覆岩体复合层状结构及力学特征	17
1.5 深部开采岩体灾变机理	20
参考文献	22
2 复合层状覆岩体采动结构形变解析特征及数值计算方法	24
2.1 覆岩体采动结构形变演化的解析特征	24
2.2 复合层状岩体形变的数值计算方法	27
参考文献	31
3 深部开采岩石及覆岩体变形试验系统	33
3.1 深部开采岩石力学试验系统	33
3.2 大比例三维物理模拟试验系统	37
3.3 深部开采机械模拟试验系统	40
3.4 深部开采应力—渗流耦合真三轴试验系统	44
参考文献	48
4 深部开采岩体变形与灾变监测系统	51
4.1 深部开采大量程位移监测系统	51
4.2 煤岩柱竖向变形量精密测量系统	53
4.3 采动覆岩体导水裂隙分布探测仪	54
4.4 深部岩体灾变微地震监测系统	56
4.5 深部开采在线综合监测系统	59
4.6 深部开采岩体灾变地音监测系统	63
4.7 水灾监测系统	65
参考文献	69
5 深部煤岩蠕变特性试验研究	71
5.1 煤岩强度尺寸形状效应试验	71

5.2	煤岩蠕变模型与破坏特征初探	74
5.3	煤岩短时蠕变试验及分析	78
5.4	煤岩长时蠕变试验及分析	96
5.5	煤岩蠕变特性影响因素分析	101
	参考文献	101
6	深部条带煤柱长期稳定性基础试验研究	104
6.1	条带煤柱长期稳定性的基本理论和模型	104
6.2	深部条带煤柱长期稳定性的数值试验	118
6.3	条带煤柱长期稳定性监测与演化规律	130
	参考文献	152
7	深部开采覆岩体形变演化规律试验与实测	156
7.1	采场结构力学模型组成及其结构特征	156
7.2	采动覆岩体离层演化相似材料模拟实验	173
7.3	深部开采覆岩体变形三维相似材料模拟试验研究	174
7.4	深部开采覆岩体变形机械模拟试验研究	187
7.5	深部开采覆岩体内部变形实际观测	203
7.6	采动区域深部岩层移动连续监测	222
	参考文献	230
8	深部采动覆岩体形变动态演化规律	233
8.1	采场结构力学模型形成发展的动态规律	233
8.2	采场支承压力发展演化机理	234
8.3	采场支承压力分布范围理论分析	237
8.4	采场力学结构稳定状态预测	242
8.5	岩体内移动变形的分区性与分带性	251
8.6	采动覆岩体离层动态演化规律	257
8.7	大采深条件下地表移动规律和特征	261
8.8	深部开采覆岩体与地表移动控制技术	283
	参考文献	284
9	条带煤柱充填开采覆岩体运动规律与时空结构模型	287
9.1	条带煤柱膏体充填工作面地质采矿条件	288
9.2	条带煤柱膏体充填工作面充填采煤工艺	290
9.3	条带煤柱膏体充填开采覆岩体运动规律	297
9.4	条带煤柱膏体充填工作面覆岩体时空结构模型	308
	参考文献	311

10 覆岩体及地表移动与冲击地压可预报性研究	313
10.1 巨厚覆岩体地表斑裂危害及产生原因.....	314
10.2 巨厚砾岩层下开采地表斑裂机理研究.....	315
10.3 深井覆岩体结构与冲击地压的关系.....	321
10.4 覆岩体运动特征.....	325
10.5 砾岩层运动周期与冲击地压的相关性.....	328
10.6 砾岩运动阶段内发生冲击地压的规律性.....	330
10.7 冲击地压能量释放与工作面推进距离的关系.....	331
10.8 地表移动与冲击地压的关系.....	331
10.9 地表反弹与冲击地压的相关性分析.....	334
10.10 地表下沉速度与矿震相关性分析	336
参考文献.....	337
11 深部采动底板变形破坏规律	339
11.1 采场底板应力分布及破坏理论.....	339
11.2 深部采场底板采动变形破坏规律数值模拟研究.....	342
11.3 断层影响深部采场高承压水上底板破坏流固耦合研究.....	357
11.4 深部煤层开采底板突水机理及其突变判据.....	370
11.5 深部开采底板断裂活化滞后突水机理.....	380
参考文献.....	386

1 深部开采覆岩体层状特征及岩体力学性质

煤矿采动引起覆岩体垮落、断裂、离层、挠曲使地表形成稳定的沉陷盆地,这种由下而上的移动与变形,是复杂的物理力学现象,参与这一运动发展过程及影响其结果的因素十分复杂,许多因素的影响及其作用尚难以弄清。但可以肯定,覆岩体的结构组合及其力学性质(变形参数和强度参数)是其中的主控因素,即煤层上覆岩层的结构、产状、厚度、硬度等因素是表征受采动影响岩层移动变形发展过程及其表现形态的主要参量。

1.1 深部开采工程的特征

关于深部的界定有专家提出,以岩爆发生频率是否明显增加来界定,也有专家认为应以围岩是否达到岩石强度来界定,但由于不同的产煤国家在煤层赋存的自然条件、技术装备水平和开采技术上的差异,以及在深部开采中出现问题的程度不同,国际上尚无统一和公认的标准,如日本的标准为大于等于 600 m、英国与波兰的标准为大于等于 750 m、德国与俄罗斯的标准为大于等于 800 m。2001 年,钱鸣高、古德生、谢和平等多位院士及众多采矿、岩土界学者参加的以“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山科学会议第 175 次学术讨论会上,与会者一致认为中国深部资源开采的深度可按煤矿 800 ~ 1500 m、金矿与有色金属矿 1000 ~ 2000 m 的标准界定。由于开采方式的不同,煤矿与金属矿对深部的概念有明显的差异,煤矿开采的最大深度在德国为 1713 m,而南非金矿的最大开采深度已达 4117 m,世界主要采矿国家矿井最大开采深度如图 1-1 所示。

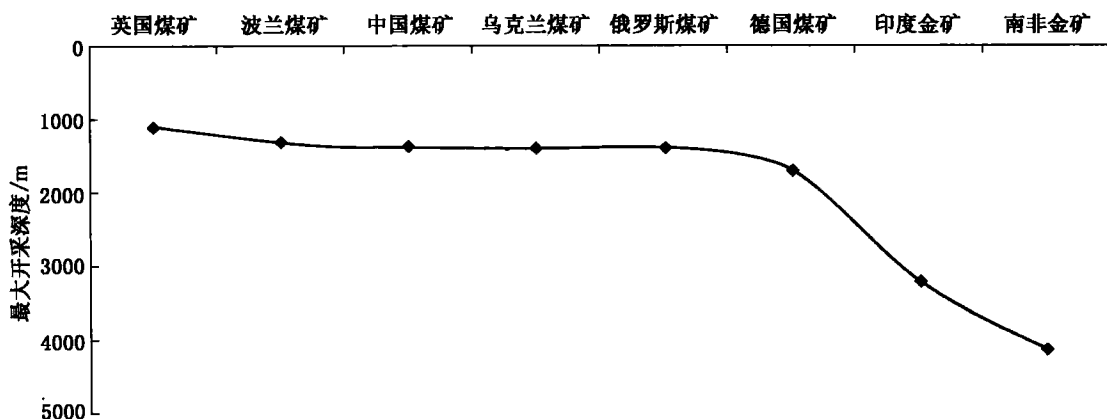


图 1-1 世界主要采矿国家矿井最大开采深度

深部资源开采是未来资源开采的发展趋势,也是近年国内外采矿工程界一个十分关注的研究课题。早在 20 世纪 80 年代初,国外已经开始关注深井问题,1983 年苏联提出对超过 1600 m 的深(煤)矿井开采进行专题研究,当时的联邦德国还建立了特大型模拟试

验台,专门对深井的三维矿压问题进行模拟试验研究。南非从1998年开始启动了一个Deep Mine的研究计划,旨在解决深部金矿安全、经济开采的一些关键问题。其他一些有矿山深井开采的国家,如德国、美国、加拿大、澳大利亚、波兰等,政府、工业部门和研究机构密切配合,集中人力和财力对深部开采相关技术的基础问题进行了研究:加拿大联邦和省政府及采矿工业部门合作开展了为期10年的两个深井研究计划;美国爱达华大学、密西根工业大学及西南研究院对深井开采进行了研究;德国以埃森研究院为主,在巷道矿压显现规律、巷道支护与底板控制及新技术的发展等方面对深部开采的岩层控制技术进行了深入研究。

深井开采是一项涉及多学科的复杂工程,也是关系到未来10~30年采矿业能否可持续发展的社会工程。我国于20世纪80年代末开始了这方面的研究工作。20多年来,国内学者在隧道涌水量预测、软岩大变形机制、软岩防治措施(加强稳定工作面、加强基脚及防止断面挤入、防止开裂的锚一喷一支一分断面开挖等)、岩爆预测及防治措施(改善围岩的物理力学性质、应力解除、及时进行锚喷支护施工、合理的施工方法等)等方面进行了深入的研究,取得了重大的成果,特别是2001年的香山科学会议将我国深部开采的一系列科学问题概括为如下五个方面:①深部岩体高应力场和地质构造精细探测的理论基础与方法,包括深部地质构造与岩体结构,深部原岩应力与采动高应力场;②深部的岩体力学特性和工程响应,包括深部岩体力学特性与时效特征,高应力下的岩爆机理,预测及控制,破断与裂隙岩体非线性、大变形力学行为,高应力岩石破碎诱导机理;③深部采动与开挖控制及环境效应,包括深部采动矿压显现及上覆岩层移动规律与控制,深部开采对环境的影响与保护,高应力下巷道围岩失稳机理及控制;④深部多相介质、多场耦合作用及其灾害发生机理与防治,包括高温、高压下矿岩固—液—气相互耦合作用,高应力与高渗透压下的矿山突水机理与防治,低渗透性、高空隙压瓦斯运移规律及煤与瓦斯突出机理和预测;⑤深部资源开采及地下工程开挖新技术探索。中国矿业大学、山东科技大学、青岛理工大学、安徽理工大学等院校也组织召开了国内外深部开采的相关学术研讨会,进一步推动了深部开采相关问题的研究。

1.2 深部岩体地质力学特征

与浅部岩体相比,深部岩体是具有漫长地质历史背景、充满建造和改造历史遗留痕迹,并具有现代地质环境特点的复杂地质力学构造,如图1-2所示。深部工程岩体开挖所产生的冲击地压、岩爆、瓦斯突出、流变、底板突水等非线性力学现象归根结底是由于

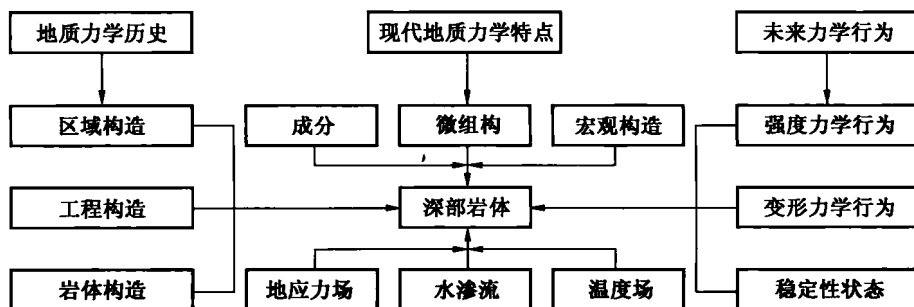


图1-2 深部岩体地质力学特点

深部岩体所处的地球物理环境的特殊性和应力场的复杂性所致。因此,深部岩体的受力及其作用过程所属的力学系统不再是浅部工程围岩所属的线性力学系统(地质条件的复杂性也含有非线性力学问题),而是非线性力学系统,其稳定性控制的难点和复杂性在于不再含有线性问题(表1-1)。

表1-1 深部煤岩与浅部煤岩受力特点对比

材 料	受力特点	力学特点	能量场特点	加载过程	叠加原理	工程设计方法
地面建筑材料(砖)	自重	线性	保守	无关	遵循	参数设计
浅部岩体	自重+低地应力	线性	保守	无关	遵循	
深部岩体	自重+高地应力	非线性	耗散场	密切相关	不遵循	非线性力学设计

1.2.1 “三高一扰动”的恶劣环境

深部岩体的地质力学特点决定了深部开采与浅部开采的主要区别在于深部岩石所处的特殊环境,即“三高一扰动”的复杂力学环境。“三高”主要是指高地应力、高地温、高岩溶水压,“一扰动”是指强烈的采矿扰动。

1. 高地应力

进入深部开采以后,仅重力引起的垂直原岩应力通常就超过工程岩体的抗压强度(大于20 MPa),而由于工程开挖所引起的应力集中水平则更是远大于工程岩体的强度(大于40 MPa)。同时,据已有的地应力资料显示,深部岩体形成历史久远,留有远古构造运动的痕迹,其中存有构造应力场或残余构造应力场。二者叠合累积为高应力,在深部岩体中形成异常的地应力场。据南非地应力测定,在3500~5000 m深度,地应力水平为95~135 MPa。

2. 高地温

根据测量,地温随着深度的增加逐渐升高,地温梯度一般为30~50 °C/km,常规情况下的地温梯度为30 °C/km。有些地区如断层附近或导热率高的局部异常地区,地温梯度有时高达200 °C/km。岩体在超出常规温度的环境下,表现出的力学、变形性质与普通环境条件下有很大差别。地温可以使岩体热胀冷缩破碎,而且岩体内温度变化1 °C可产生0.4~0.5 MPa的地应力变化。岩体温度升高产生的地应力变化会对工程岩体的力学特性产生显著影响。

3. 高岩溶水压

进入深部以后,随着地应力及地温的升高,同时将会伴随着岩溶水压的升高,在采深大于1000 m的深部,其岩溶水压将高达1 MPa,甚至更高。岩溶水压的升高,使得矿井突水灾害更为严重。

4. 采矿扰动

采矿扰动主要是指强烈的开采扰动。进入深部开采后,在承受高地应力的同时,大多数巷道要经受硕大的回采空间所引起的强烈支承压力作用,使受采动影响的巷道围岩压力数倍,甚至近十倍于原岩应力,从而造成在浅部表现为普通坚硬的岩石,在深部却可能表现出软岩大变形、大地压、难支护的特征;浅部的原岩体大多处于弹性应力状态,而进入

深部以后则可能处于塑性状态, 即有各向不等压的原岩应力引起的压、剪应力超过岩石的强度, 造成岩石的破坏。

1.2.2 力学特性转化特点

进入深部以后, 受“三高一扰动”作用, 深部工程围岩的地质力学环境较浅部发生了明显的变化, 从而使深部巷道围岩表现出其特有的力学特征现象, 主要包括以下几方面。

1. 围岩应力场的复杂性

浅部巷道围岩状态通常可分为松动区、塑性区和弹性区三个区域, 其本构关系可以采用弹塑性力学理论进行推导求解。研究表明, 深部巷道围岩产生膨胀带和压缩带 (或称为破裂区和未破坏区), 两带交替出现且其宽度按等比数列递增, 这一现象被称为区域破裂现象。现场实测研究也证明了深部巷道围岩变形力学的拉压域复合特征。因此, 深部巷道围岩的应力场更为复杂。

2. 围岩的大变形和强流变性特性

研究表明, 进入深部后岩体变形具有两种完全不同的趋势。一种是岩体表现为持续的强流变特性, 即不仅变形量大, 而且具有明显的“时间效应”, 如煤矿中有的巷道 20 余年底鼓不止, 累计底鼓量达数十米。通过对南非金矿深部围岩流变性的系统研究, 发现深部围岩的流变性十分明显, 巷道围岩最大移近速度达 500 mm/月。另一种是岩体并没有发生明显变形, 但十分破碎, 处于破裂状态, 按传统的岩体破坏、失稳的概念, 这种岩体已不再具有承载特性, 但事实上, 仍然具有承载和再次稳定的能力, 借助这一特性, 有些巷道还特地将其布置在破碎岩 (煤) 体中, 如沿空掘巷。

3. 动力响应的突变性

浅部岩体破坏通常表现为一个渐进过程, 具有明显的破坏前兆如变形加剧, 而深部岩体的动力响应过程往往是突发的、无前兆的突变过程, 具有强烈的冲击破坏特性, 宏观表现为巷道顶板或周边围岩的大范围的突然失稳、坍塌。

4. 深部岩体的脆—延转化

试验研究表明, 岩石在不同围压条件下表现出不同的峰后特性, 因此最终破坏时应变值也不相同。在浅部 (低围压) 开采中, 岩石破坏以脆性为主, 通常没有或仅有少量的永久变形或塑性变形; 而进入深部开采以后, 在“三高一扰动”作用下, 岩石表现出的实际就是其峰后强度特性, 在高围压作用下岩石可能转化为延性, 破坏时其永久变形量通常较大。因此, 随着开采深度的增加, 岩石已由浅部的脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应。

5. 深部岩体开挖岩溶突水的瞬时性

浅部资源开采中, 矿井水的主要来源是第四系含水层或地表水通过采动裂隙网络进入采场和巷道, 水压小, 渗水通道范围大, 基本服从岩体等效连续介质渗流模型, 涌水量也可根据岩体的渗透率张量进行定量估算, 因此, 突水预测预报尚具可行性。而深部的状况却十分特殊, 首先, 随着采深加大, 承压水位高, 水头压力大; 其次, 由于采掘扰动造成断层或裂隙活化使渗流通道相对集中, 矿井涌水通道范围窄, 使奥陶系岩溶水对巷道围岩和顶底板形成严重的突水灾害。另外, 突水往往发生在采掘活动结束后的一段时间内, 具有明显的瞬时突发性和不可预测性。

1.2.3 深部岩体应力场特征

地应力是赋存于岩体内部的一种内应力,是岩体存在的一种力学状态,是在地质历史中由多种地壳应力的联合作用产生的,其主要由自重应力、构造应力及残余应力等组成,是岩体中各个位置及各个方向所存在应力的空间分布状态。地应力是确定工程岩体力学属性、进行岩体稳定性分析及实现岩土工程开挖设计和决策科学化的前提。因此,查明深部煤层底板岩体地应力的大小和方向是保证今后煤矿安全生产的基础。

1879 年瑞士地质学家 Haim 提出了地应力各向等压假说,他认为地壳岩体内任一点的各向应力均等于上覆岩层的自重,即

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma h \quad (1-1)$$

现有资料表明,这一假说仅适用于某些具体条件,并不具有普遍意义。

1925 年苏联学者金尼克认为水平地应力的大小应取决于当前岩层的泊松比,而水平地应力与垂直地应力之比 k 为

$$k = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (1-2)$$

式中 μ ——岩层泊松比。

在深部条件下 μ 近似为 0.5,此时 k 为 1,水平地应力与垂直地应力近似相等,与 Haim 假说相符。

20 世纪 20 年代我国著名地质学家李四光教授指出应力场是以水平应力为主导,它是以水平运动为主的地壳运动的结果。已有的大量实测资料也表明,世界上大多数地区地壳岩体内的天然应力状态以水平应力为主。

Hoek 等 1980 年通过对南非地应力测量成果的分析整理提出,实测所得的垂直应力与用一定高度的覆盖岩层重力计算值十分吻合。图 1-3 所示为垂直应力与埋藏深度的关系的实测结果,可以看出在埋深较浅时测得的垂直应力值非常离散。

图 1-4 所示为平均水平应力与垂直应力之比 k 与测点埋藏深度的关系曲线, k 的变化范围为

$$\frac{100}{z} + 0.3 < k < \frac{1500}{z} + 0.5 \quad (1-3)$$

图 1-4 中的曲线表明,在深度小于 500 m 时,平均水平应力比垂直应力要大;在深度超过 1000 m 时,平均水平应力与垂直应力趋于相等。例如, $H = 1500$ m 时, $0.37 \leq k \leq 1.5$; $H = 3000$ m 时, $0.33 \leq k \leq 1$ 。

Sheorey 用一个考虑了地壳曲率和岩层的弹性常数、密度和热膨胀系数变化的静弹性热应力模型来估算地应力大小,并提出了一个估算水平应力与垂直应力之比 k 的计算公式:

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right) \quad (1-4)$$

式中 z ——埋深, m;

E_h ——上覆岩层水平方向的平均变形模量, GPa。

图 1-5 所示为不同 E_h 与 k 随深度变化的一组曲线。

Stacey 和 Wesscloo 对南非由地表到 3000 m 之间的地应力测量结果进行总结时发现:

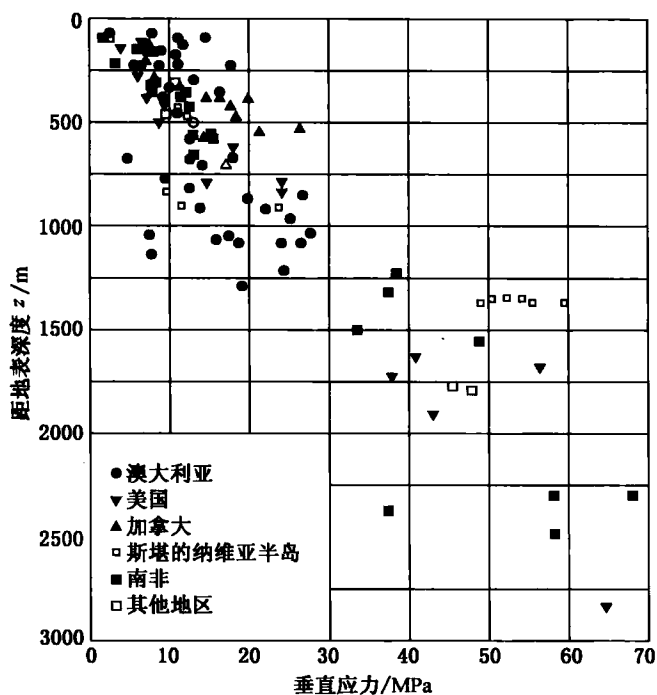


图 1-3 垂直应力与埋藏深度的关系的实测结果

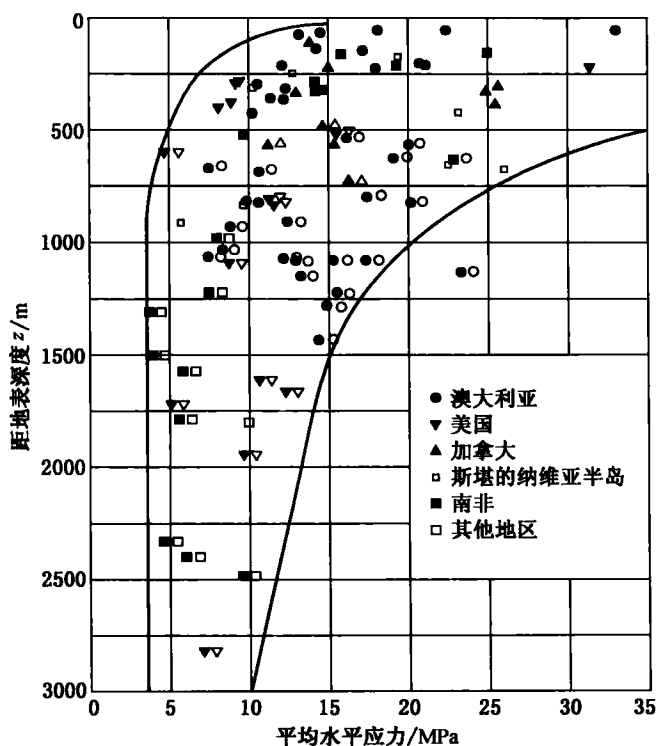


图 1-4 平均水平应力与埋藏深度的关系的实测结果

南非的最大和最小水平地应力之比高达4,如图1-6所示。朱焕春等对世界范围内地应力沿埋深的分布规律进行统计研究发现:浅部水平应力普遍大于由岩体自重引起的垂直应力,总体上垂直应力、最大和最小水平主应力沿埋深呈线性增大的关系变化。总体看来,地壳中垂直应力随深度增加呈线性增大的分布规律,而水平应力与埋深的变化规律比较复杂,根据世界范围内116个现场资料的统计,埋深在1000 m范围内时,水平应力为垂直应力的1.5~5.0倍,埋深超过1000 m时,水平应力为垂直应力的0.5~2.0倍,我国地应力测量也具有类似的结果,见表1-2。

世界上绝大多数地区均有两个主应力位于水平或接近水平方向,两个主应力与水平面的夹角一般不大于 30° ,而且最大水平主应力与最小水平主应力之值一般相差较大,显示出很强的方向性,世界部分地区两个水平应力的比值见表1-3。垂直应力在多数情况下为最小主应力,在少数情况下为中间主应力,只在个别情况下为最大主应力。

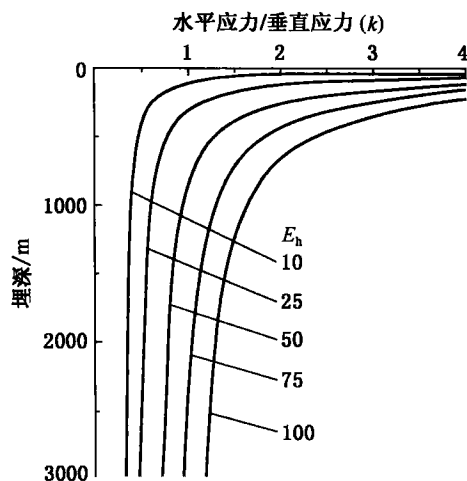
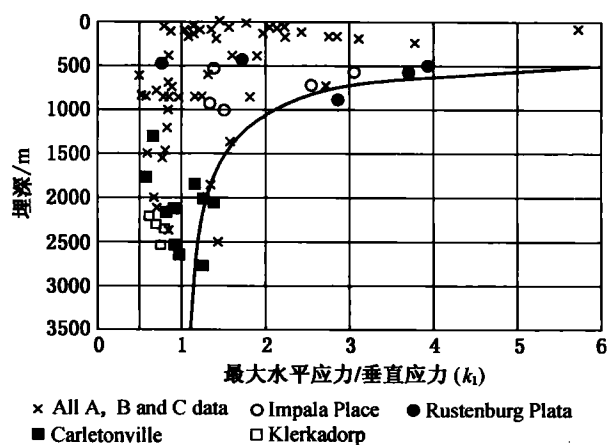


图1-5 根据 Sheorey 模型估算的
水平应力与垂直应力之比

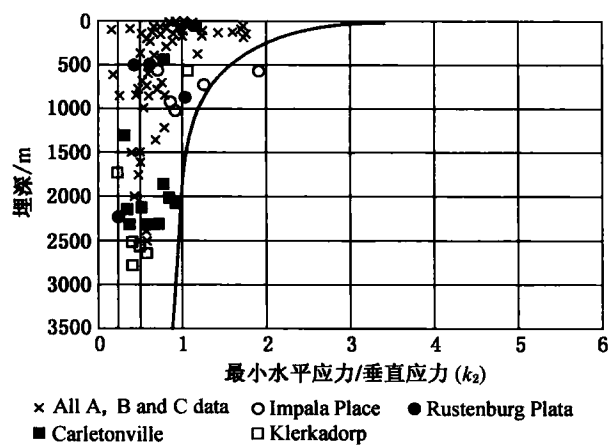
表1-2 世界各国平均水平主应力与垂直应力的关系

国家和地区	所占比例/%			$\sigma_{h, max}/\sigma_v$
	$\sigma_{h, av}/\sigma_v < 0.8$	$\sigma_{h, av}/\sigma_v$ 为 0.8 ~ 1.2	$\sigma_{h, av}/\sigma_v > 1.2$	
中国	32	40	28	2.09
澳大利亚	0	22	78	2.95
加拿大	0	0	100	2.56
美国	18	41	41	3.29
挪威	17	17	66	3.56
瑞典	0	0	100	4.99
南非	41	24	35	2.50
苏联	51	29	20	4.30
其他地区	37.5	37.5	25	1.96

谢富仁、李方全等人从不同角度对整个中国及邻近地区的地壳应力状态作过比较系统的研究,提出我国现今地壳应力状态随深度而变化,且与断层活动方式有密切的关系,多数地区水平应力大于垂直应力。



(a) 最大水平应力与垂直应力之比



(b) 最小水平应力与垂直应力之比

图 1-6 南非 3000 m 以上地应力分布规律

表 1-3 世界部分地区两个水平应力的比值

实测地点	统计数目	所占比例/%				合计
		$\sigma_{h, \min}/\sigma_{h, \max}$ 为 1.0 ~ 0.75	$\sigma_{h, \min}/\sigma_{h, \max}$ 为 0.75 ~ 0.50	$\sigma_{h, \min}/\sigma_{h, \max}$ 为 0.50 ~ 0.25	$\sigma_{h, \min}/\sigma_{h, \max}$ 为 0.25 ~ 0	
斯堪的纳维亚等地	51	14	67	13	6	100
北美	222	22	46	23	9	100
中国	25	12	56	24	8	100
中国华北地区	18	6	61	22	11	100

1.2.4 原岩应力测试方法

原岩应力的各种假说和理论对认识地壳受力规律尽管有一定参考作用，但原位测量才