

国家自然科学基金重大项目资助

深部岩体力学基础

The Basis of Deep Rock Mechanics

何满潮 钱七虎 等著



科学出版社

www.sciencep.com

国家自然科学基金重大项目资助

深部岩体力学基础

The Basis of Deep Rock Mechanics

何满潮 钱七虎等 著

科学出版社

北京

前 言

我国是一个富煤、少气、缺油的国家，长期以来，煤炭在我国一次性能源结构中占70%左右，是我国的主体能源。随着国民经济的快速发展，煤炭需求不断增加，煤炭作为我国能源结构中的主体地位在今后几十年内不会改变。同时，我国对其他矿产资源的需求量也不断增长，矿石需求缺口越来越大。

随着浅部资源的逐渐减少和枯竭，地下开采的深度越来越大，目前我国已有大批矿井进入千米以下开采深度。开采深度增加，地质环境趋于复杂，高地应力、高地温、高瓦斯、高水压等引起的突发性工程灾害和重大恶性事故增加、作业环境恶化和生产成本急剧增加等一系列问题，对深部资源开采提出了严峻挑战。为此，在有关院士、专家的倡导下，国家自然科学基金委员会组织召开了多次研讨会，经反复调研和论证，于2004年3月24日正式设立了重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”(No. 50490270)，针对深部开采等引起的岩石力学问题，展开基础性、前瞻性和战略性研究。本着有限支持、重点突破的原则，将“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”、“深部岩体力学特性及其工程响应”、“深部采动覆岩移动规律及巷道稳定性控制研究”、“深部多相多场耦合作用及其成灾机理与防治”、“深部采场瓦斯渗流及相关的非线性动力学基础研究”列为其中的五个重要研究课题，旨在针对深部“三高一扰动”(高地应力、高地温、高岩溶水压和强烈的开采扰动)复杂地质力学环境下，从深部开采中的岩石力学基础理论、深部开采诱发的重大工程灾害的机理、预测和控制以及深部资源开采的方法与关键技术三个方面来探讨深部开采中的科学问题，建立起深部岩体力学理论与技术框架，为我国深部资源安全开采提供科学基础。

该重大项目由中国矿业大学(北京)负责，联合中国人民解放军理工大学、北京科技大学、中国矿业大学、中南大学、辽宁工程技术大学、中国科学院地质与地球物理研究所、东北大学、四川大学和煤炭科学研究总院等单位的三十余位岩石力学领域的知名专家教授合作研究。项目于2004年6月6日正式启动，经过四年的努力，于2008年12月15日在北京通过了由国家自然科学基金委员会组织的结题验收与评议。

四年间，项目组全体研究骨干以国家自然科学基金重大项目的研究作为科研工作的主要任务，齐心协力、聚精会神，围绕“深部构造及地应力场分布特征与变异规律”、“深部岩体力学特性与时效特征”、“深部开采围岩变形破坏机制”、“深部多相多场耦合作用机制”、“深部采场瓦斯渗流及相关的非线性动力学机制”等五大科学问题开展了系统、深入的研究工作，强调科学性创新和技术性创新，注重新理论、新原理、新发现，实现了理论上有所创新、技术上有突破、实验装备有特色、工程上有验证的深部岩体力学理论和技术初步框架。主要创新性成果包括：

(1) 系统研究了矿山开采的深部岩体力学问题，初步形成了以深部地质构造精细探测理论与方法、深部岩体力学特性和工程响应特征、深部采动覆岩移动规律及巷道稳定性控制理论、深部多相多场耦合作用及其灾害发生机理、深部工程围岩分区破裂化理论为主体的深部岩体力学理论框架。

(2) 系统研究了深部开采工程稳定性及灾害防治技术，包括深部煤岩精细构造探测技术、深部地应力测试技术、深部采场覆岩隔水关键层防水技术、深部开采围岩控制技术、深部采空区探测与灾害防治技术、深部煤和瓦斯突出预测技术等。

(3) 研发了适用于深部矿山开采的原创性试验平台及软件系统，包括硬岩岩爆过程试验系统、破

碎岩体渗透性及软岩水理作用测试系统、巷道工程破坏过程及新型真三轴巷道模型试验系统、动静组合加载与卸载试验系统、煤与瓦斯突出测试仪器、岩体区域化交替破裂模型试验装置及深部软岩工程大变形力学分析设计软件等。

项目执行期间,获国家科技奖励 13 项,其中:自然科学奖二等奖 1 项、技术发明奖二等奖 1 项、科技进步奖二等奖 10 项、教学成果奖二等奖 1 项;发表论文 472 篇,其中:SCI 收录论文 40 篇及 EI、ISTP 收录论文 303 篇;出版专著 9 部;获国家发明专利授权 7 项;培养博士生 85 名、硕士生 118 名;取得了一批原创性研究成果。

该项目的实施解决了我国典型深部矿井的技术难题,推进了中青年学术带头人的成长,培养了一支具有国际先进水平的深部岩体力学研究队伍,建立了若干有深部特色的试验基地,形成了良好的深部岩体力学研究环境。这将有力地推动我国深部岩体力学理论与资源安全开采技术的发展,同时为研究更深层次的深部科学问题奠定了坚实的基础。

本书为项目研究工作的系统总结,全书围绕深部岩体力学基础科学问题研究的主线,由 12 章组成。

第 1 章介绍了国内外深部工程及深部岩体力学研究现状,指出了深部岩体力学研究的主要内容及拟解决的关键科学问题。

第 2 章介绍了深部岩体力学的有关概念体系,主要包括进入深部后出现的科学现象及其成因、深部的分区及其特征、深部的科学定义及其评价,以及进入深部后所面临的挑战。

第 3 章介绍了深部岩体地质构造精细探测,主要包括 P-SV 转换波转换点的精确解、三参数 AVO 反演技术和瓦斯突出危险区域预测,以及煤、岩石物性的地球物理响应、预测构造煤分布的地球物理反演方法。

第 4 章介绍了深部岩体应力场测试,主要包括深部地应力场点-面分析测试方法、深部地应力水压致裂测试、深部地应力超声测量法、深部开采引起的采动应力变化与矿层灾变失稳机制。

第 5 章介绍了深部岩体力学特性及其工程响应,主要包括深部开采岩体力学行为、深部开采工程岩体动力学特性及成灾机理、高应力条件下矿岩动力学特性。

第 6 章介绍了深部采场覆岩移动规律及控制,主要包括采场覆岩关键层破断与冒落规律、采动覆岩中关键层的复合效应及其判别、深部采场突水机理与防治、深部厚煤层综放开采可放性及覆岩移动规律。

第 7 章介绍了深部静压巷道围岩稳定性及其控制,主要包括深部静压巷道围岩稳定性控制原理、深部静压巷道工程设计方法、深部巷道工程稳定控制方法。

第 8 章介绍了深部动压巷道围岩稳定性及其控制,主要包括深部巷道围岩力学性质及其工程稳定特点、深部动压巷道围岩控制原理、深部动压巷道工程稳定控制方法、深井开采冲击矿压试验研究及控制技术。

第 9 章介绍了深部多相多场耦合作用及其灾害发生机理,主要包括多相多场耦合作用条件下深部岩石破裂特性、深部开采岩体岩爆机理与矿岩诱导致裂、深部采空区诱发灾害机理与控制。

第 10 章介绍了深部采场多相介质多场耦合作用瓦斯渗流规律,主要包括煤层气和煤的 NMRI 机理研究、高孔隙压低渗透煤层瓦斯运移规律、煤和瓦斯突出发生机理及预测。

第 11 章介绍了深部岩体分区破裂化及非线性动力学特性,主要包括岩体块系结构的成因及其特性、深部岩体峰后行为及其承载能力、区域破裂化现象,以及超低摩擦效应产生的机理、条件和规律、一维矿柱剪切失稳与断层剪切稳定性问题、爆炸冲击波作用下的等效静力模型、岩石局部剪切变形的弹塑性模型与数值分析方法。

第 12 章介绍了深部岩石力学试验系统与分析软件,主要包括深部岩爆过程试验系统、深部工程破坏过程模型试验系统、深部岩石水理作用测试系统、新型真三轴巷道模型试验台、深部煤与瓦斯突出测试仪器、深部岩体区域化交替破裂现象模型试验系统、深部软岩工程大变形力学分析设计系统。

本书主要撰写责任人为何满潮教授和钱七虎院士，编委为彭苏萍院士、姜耀东教授、贺永年教授、李夕兵教授、潘一山教授、王明洋教授。全书由何满潮、钱七虎统筹策划与安排，课题组负责人与相关研究人员参与了相应章节的编写。

衷心感谢国家自然科学基金重大项目领导小组朱旺喜研究员、鲜学福院士、杨立中教授、高德利教授，以及王思敬院士、谢和平院士、钱鸣高院士、古德生院士在本项目研究工作中给予的关怀与指导，感谢国家自然科学基金委员会、教育部等有关部门给予的指导与支持，感谢项目参与单位及徐州矿务集团公司、鹤岗矿业集团有限责任公司、鹤壁煤电股份有限公司、大屯煤电（集团）有限责任公司、兖州煤业股份有限公司、淮南矿业（集团）有限责任公司等单位给予的大力支持，感谢项目全体研究人员在项目研究过程中所付出的艰苦努力，感谢为本项目顺利完成和本书出版提供支持的专家与朋友。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，衷心希望读者批评指正。

何满潮 钱七虎

国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”首席科学家

2009年12月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	1
1.1 深部资源开发是人类的必然选择	1
1.2 深部岩体力学研究现状	4
1.3 深部岩体力学研究的内容	6
1.4 拟解决的关键科学问题	9
参考文献	10
第 2 章 深部岩体力学的概念体系	13
2.1 深部的科学现象	13
2.2 深部工程灾害的成因	16
2.3 深部的分区及其特征	20
2.4 深部的科学定义	22
2.5 深部工程提出的挑战	27
参考文献	30
第 3 章 深部岩体地质构造精细探测	32
3.1 国内外研究现状	32
3.2 P-SV 转换波转换点的精确解	34
3.3 三参数 AVO 反演技术和瓦斯突出危险区域预测	44
3.4 预测构造煤分布的地球物理反演方法	54
参考文献	61
第 4 章 深部岩体应力场测试	63
4.1 国内外研究现状	63
4.2 深部地应力场点-面分析测试方法	65
4.3 深部地应力水压致裂测试	79
4.4 深部地应力超声测量法	100
4.5 深部开采引起的采动应力变化与矿层灾变失稳机制	108
参考文献	119
第 5 章 深部岩体力学特性及其工程响应	121
5.1 国内外研究现状	121
5.2 深部开采岩体力学行为	126
5.3 深部开采工程岩体动力学特性及成灾机理	147
5.4 高应力条件下矿岩动力学特性	157
参考文献	175

第 6 章 深部采场覆岩移动规律及控制	179
6.1 国内外研究现状	179
6.2 采场覆岩关键层破断与冒落规律	181
6.3 采动覆岩中关键层的复合效应及其判别	188
6.4 深部采场突水机理与防治	200
6.5 深部厚煤层综放开采可放性及覆岩移动规律	210
参考文献	216
第 7 章 深部静压巷道围岩稳定性及其控制	219
7.1 国内外研究现状	219
7.2 深部静压巷道围岩稳定性控制原理	220
7.3 深部静压巷道工程设计方法	221
7.4 深部巷道工程稳定控制方法	223
参考文献	273
第 8 章 深部动压巷道围岩稳定性及其控制	276
8.1 国内外研究现状	276
8.2 深部巷道围岩力学性质及其工程稳定特点	278
8.3 深部动压巷道围岩控制原理	288
8.4 深部动压巷道工程稳定控制方法	293
8.5 深井开采冲击矿压试验研究及控制技术	297
参考文献	347
第 9 章 深部多相多场耦合作用及其灾害发生机理	350
9.1 国内外研究现状	350
9.2 多相多场耦合作用条件下深部岩石破裂特性	354
9.3 深部开采岩体岩爆机理与矿岩诱导致裂	392
9.4 深部采空区诱发灾害机理与控制	408
参考文献	438
第 10 章 深部采场多相介质多场耦合作用瓦斯渗流规律	444
10.1 国内外研究现状	444
10.2 煤层气和煤的 NMRI 机理研究	446
10.3 高孔隙压低渗透煤层瓦斯运移规律	457
10.4 煤和瓦斯突出发生机理及预测	476
参考文献	509
第 11 章 深部岩体分区破裂化及非线性动力学特性	511
11.1 国内外研究现状	511
11.2 岩体块系结构的成因及其特性	520
11.3 深部岩体峰后行为及其承载能力	526
11.4 区域破裂化现象	540
11.5 超低摩擦效应产生的机理、条件和规律	547
11.6 一维矿柱剪切失稳与断层剪切稳定性问题	570
11.7 爆炸冲击波作用下的等效静力模型	582
11.8 岩石局部剪切变形的弹塑性模型与数值分析方法	597
参考文献	647

第 12 章 深部岩石力学试验系统与分析软件	652
12.1 深部岩爆过程试验系统	652
12.2 深部工程破坏过程模型试验系统	656
12.3 深部岩石水力作用测试系统	658
12.4 新型真三轴巷道模型试验台	660
12.5 深部煤与瓦斯突出测试仪器	663
12.6 深部岩体区域化交替破裂现象模型试验系统	692
12.7 深部软岩工程大变形力学分析设计系统	703
参考文献	705

第 1 章 绪 论

深部能源与矿产资源的安全、有效开发是关系到我国国民经济持续发展和国家能源战略安全的重大问题，而深部岩体力学就是重点研究与深部资源开发相关的岩石力学基础问题及其工程应用。

我国是发展中国家，国民经济发展在相当长的一段时间内仍将依赖于能源与矿产资源的开发和利用。随着我国进入世界贸易组织，能源与矿产资源的有效和稳定开发与利用成为我国国民经济持续发展和国家经济安全战略实施的迫切需要。

随着对能源需求量的增加和开采强度的不断加大，浅部资源日益减少，国内外矿山都相继进入深部资源开采状态。随着开采深度的不断增加，工程灾害日趋增多，如矿井冲击地压、瓦斯爆炸、矿压显现加剧、巷道围岩大变形、流变、地温升高等，对深部资源的安全高效开采造成了巨大威胁。因此，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研究的焦点^[1~11]。

1.1 深部资源开发是人类的必然选择

我国是一个富煤、少气、缺油的国家，长期以来，煤炭一直是我国的主要能源。据 2006 年国家发展和改革委员会能源所统计，煤炭在我国一次性能源结构中占 70% 左右（见图 1-1）。资源条件决定了今后相当长的时间内，煤炭在我国一次性能源结构中占据不可替代的重要地位。

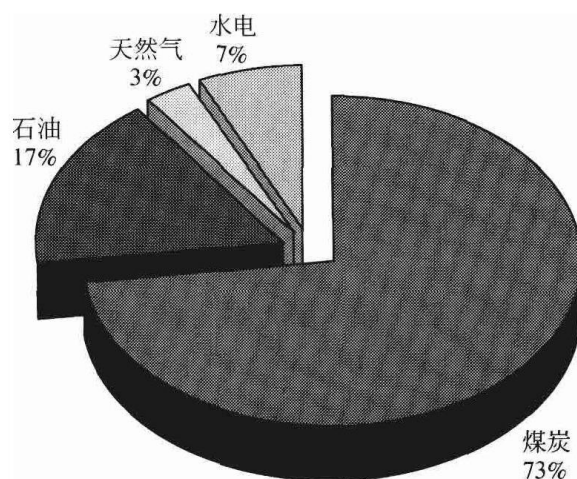


图 1-1 我国一次性能源结构

自 1989 年以来，我国煤炭的产量和消费量一直居于世界首位，2005 年煤炭产量达 21.9 亿 t，2006 年煤炭产量已达 23.8 亿 t。随着国民经济快速增长，煤炭需求量将会进一步增大。据预测，2010 年和 2020 年我国煤炭消费需求将分别达 23 亿 t 和 30 亿 t 左右。据中国煤炭工业协会预计，煤炭作为我国主体能源的地位在今后 50 年内不会有改变（见图 1-2、图 1-3）。

本章作者：何满潮，钱七虎。

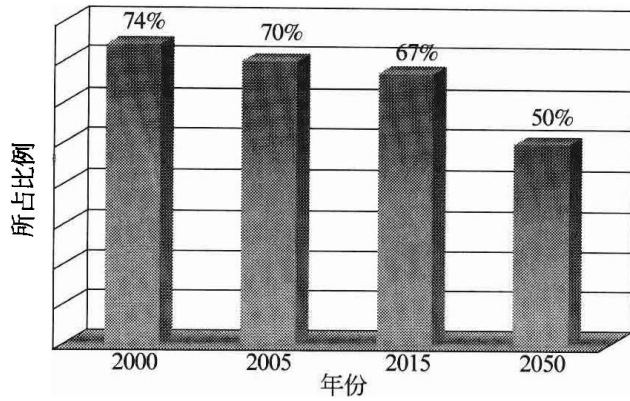


图 1-2 煤炭在一次性能源结构所占比例及趋势

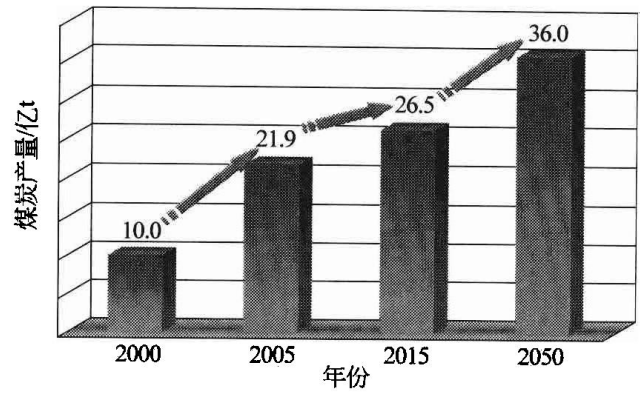


图 1-3 煤炭产量及预测

随着开采强度和范围的增大，浅部资源越来越少，深部煤炭资源将是我国未来主体能源的后备保障。中国煤炭地质总局 1997 年第三次全国煤炭资源预测和评价表明，全国煤炭资源总量为 5.57 万亿 t，其中，1000m 以上的煤炭资源总量为 2.86 万亿 t，已采储量约为 70% 左右。今后我国的主体能源后备储量将主要是埋深在 1000 ~ 2000m 之间的深部煤炭资源（见图 1-4）。

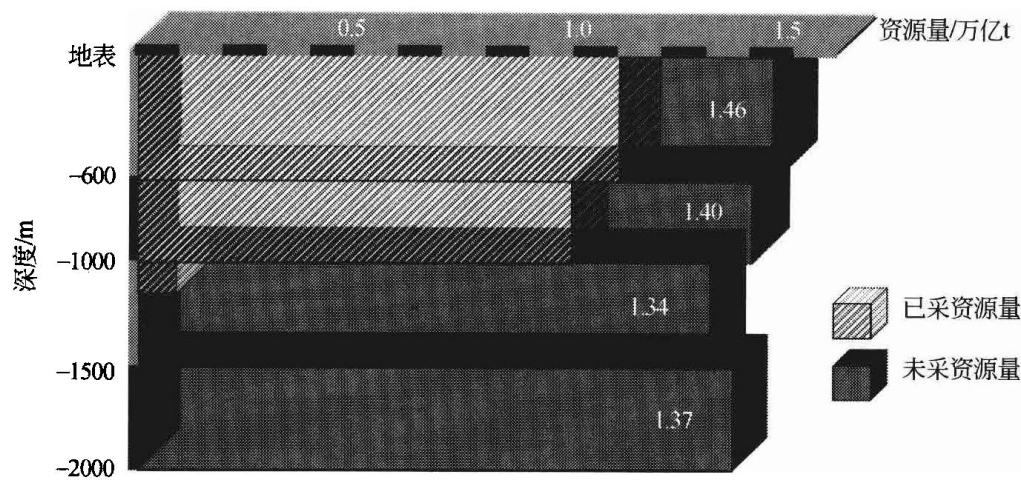


图 1-4 我国煤炭资源采出量按深度分布情况

另外，我国对其他矿产资源的需求量也不断增长，矿石需求缺口越来越大，仅铜矿的缺口，“九五”期间就达到了 8000 万 t/a。在我国已探明的 45 种主要矿产中，到 2010 年可满足需求的只有 21 种，到 2020 年将下降为 6 种，2020 年预计我国铁矿石需求量为 3.71 亿 t，其保证度只有 62%，铜的需求量 220 万 t，保证度只有 57%。

根据我国国民经济发展 15 年规划，要保证国民经济高速率的持续发展，必然需要足够的能源和矿产资源的持续供应，而我国的国力又不允许使用大量外汇从国外进口，因此，21 世纪我国最经济、最有效的能源和矿产资源保障措施是进行深部资源的开发和利用。

1.1.1 国外深部工程现状

据不完全统计^[12~16]，国外开采超千米深的金属矿山有 80 多座，其中最多的为南非。南非绝大多数金矿的开采深度大都在 1000m 以下，其中，Anglogold 有限公司的西部深井金矿，采矿深度达 3700m，West Driefovten 金矿矿体赋存于地下 600m，并一直延伸至 6000m 以下。印度的 Kolar 金矿区，已有 3 座金矿采深超过 2400m，其中，钱皮恩里夫金矿共开拓 112 个阶段，总深 3260m。俄罗斯的克里沃格罗格铁矿区，已有捷尔任斯基、基洛夫、共产国际等 8 座矿山采准深度达 910m，开拓深度到 1570m，将来要达到 2000 ~ 2500m。另外，加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山采深亦超过

1000m。国外一些主要产煤国家从20世纪60年代就开始进入深井开采。1960年西德平均开采深度已达650m,1987年已将近达900m;苏联在20世纪80年代末就有一半以上产量来自600m以下深部。国外深部工程开采现状如图1-5所示。

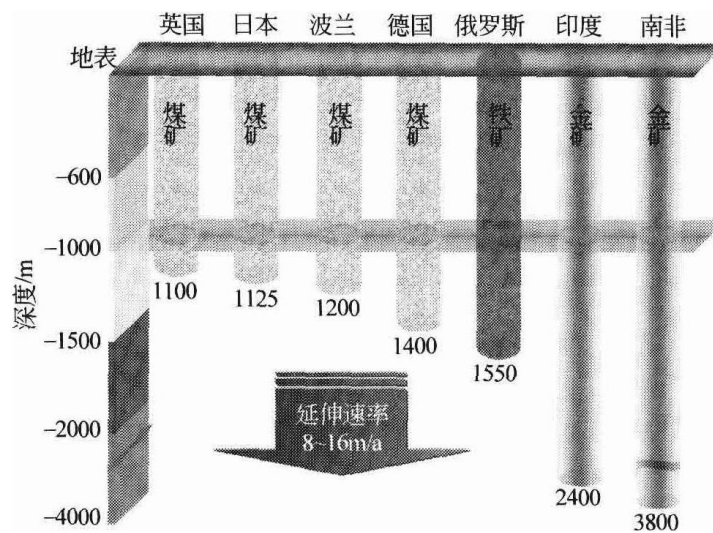


图 1-5 国外深部工程开采现状

1.1.2 国内深部工程现状

根据目前资源开采状况,我国煤矿开采深度以每年8~12m的速率增加,东部矿井正以每10年100~250m的速率发展^[11,17]。近年已有一批矿山进入深部开采,其中,在煤炭开采方面,沈阳采屯矿开采深度为1197m、开滦赵各庄矿开采深度为1159m、徐州张小楼矿开采深度为1100m、北票冠山矿开采深度为1059m、新汶孙村矿开采深度为1055m、北京门头沟矿开采深度为1008m、长广矿开采深度为1000m。在金属矿开采方面,红透山铜矿目前开采已进入900~1100m深度,冬瓜山铜矿现已建成2条超1000m竖井来进行深部开采,弓长岭铁矿设计开拓水平750m,距地表达1000m,夹皮沟金矿二道沟坑口矿体延深至1050m,湘西金矿开拓38个中段,垂深超过850m。此外,还有寿王坟铜矿、凡口铅铋矿、金川镍矿、乳山金矿等许多矿山都将进行深部开采。可以预计,在未来20年我国很多煤矿将进入到1000~1500m的深度。同时,在今后10~20年内,我国金属和有色金属矿山将进入1000~2000m深度开采。我国国有重点煤矿平均采深变化趋势如图1-6所示。

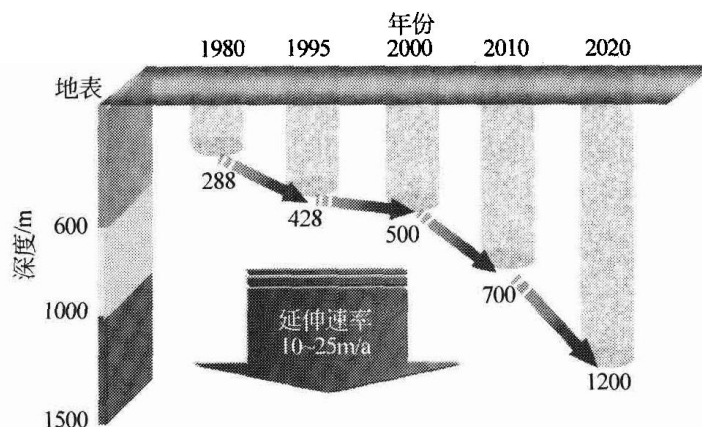


图 1-6 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势

1.2 深部岩体力学研究现状

早在 20 世纪 80 年代初, 国外已经开始注意对深井问题的研究。1983 年, 苏联的权威学者就提出对超过 1600m 的深(煤)矿井开采进行专题研究。当时的西德还建立了特大型模拟试验台, 专门对 1600m 深矿井的三维矿压问题进行了模拟试验研究。1989 年国际岩石力学学会曾在法国专门召开“深部岩石力学”问题国际会议并出版了相关的专著。近 20 年来, 国内外学者在岩爆预测、软岩大变形机制、隧道涌水量预测及岩爆防治措施(改善围岩的物理力学性质、应力解除、及时施作锚喷支护、合理的施工方法等)、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、喷、支, 分断面开挖等)等各方面进行了深入的研究, 取得了很大的成绩。一些有深井开采矿山的国家, 如美国、加拿大、澳大利亚、南非、波兰等政府、工业部门和研究机构密切配合, 集中人力和财力紧密结合深部开采相关技术开展基础问题的研究。南非政府、大学与工业部门密切配合, 从 1998 年 7 月开始启动了一个“Deep Mine”的研究计划, 耗资约 1.38 亿美元, 旨在解决深部的金矿安全、经济开采所需解决的一些关键问题。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, 在微震与岩爆的统计预报方面的计算机模型研究, 以及针对岩爆潜在区的支护体系和岩爆危险评估等进行了卓有成效的探讨。美国爱达荷大学、密西根工业大学及西南研究院就此展开了深井开采研究, 并与美国国防部合作, 就岩爆引发的地震信号和天然地震或化爆与核爆信号的差异与辨别进行了研究。西澳大利亚大学在深井开采方面也进行了大量工作。

近些年来, 随着我国国民经济和科学技术的发展, 复杂地质条件下一些长深铁路、公路隧道的修建, 深部开采事故的预防应用等方面发展了许多先进的科学技术和理论, 在软岩支护、岩爆防治、超前探测、信息化施工等方面, 隧道工程部门、中国矿业大学、中南大学、东北大学、重庆大学、同济大学、西南交通大学等进行了大量的研究和实践, 积累了丰富的实践经验, 具有开展相关研究的基础与条件。例如“九五”期间, 中国矿业大学在深部煤矿开发中灾害预测和防治研究、中国科学院武汉岩土力学研究所所在峒室优化及稳定性研究、中南大学在千米深井岩爆发生机理与控制技术研究、北京科技大学在抚顺老虎台矿开采引发矿震的研究都做了许多有益工作, 取得了重要成果。

目前该领域的研究进展主要有以下几个方面。

1.2.1 深部岩石的变形性质

1. 深部岩体的脆-延转化

岩石在不同围压下表现出不同的峰后特性, 在较低围压下表现为脆性的岩石可以在高围压下转化为延性。自 von Karman 1911 年首先用大理岩进行不同围压条件下的力学试验以来, 人们针对围压对岩石力学性质的影响进行了大量实验研究。文献 [18] 在室温下对大理岩进行了实验, 证明了随着压力增大岩石变形行为由脆性向延性转变的特性。文献 [19]、[20] 发表过类似的实验结果, 并指出脆-延转化通常与岩石强度有关。文献 [21] 也曾获得过类似的结论, 但对于诸如花岗岩和大理岩这类岩石, 在室温下即使围压达到 1000MPa 甚至以上时, 它们仍表现为脆性。而有的现场观测资料表明, 像花岗闪长岩这种极坚硬的岩石在长期地质力作用下也会发生很大延性变形。

岩石破坏时, 在不同的围压水平上表现出不同的应变值; 当岩石发生脆性破坏时, 通常不伴有或仅伴有少量的永久变形或塑性变形; 当岩石呈延性破坏时, 其永久应变通常较大。因此, 文献 [22]、[23] 用岩石破坏时的应变值作为脆-延转化判别标准。

文献 [24] 根据亚洲、欧洲、美洲和非洲的 101 个砂岩试件的实验数据, 对岩石的脆-延转化规律

进行了深入研究,系统分析了脆-延转化临界条件,并研究了脆-延转化过程中的过渡态性质;文献[25]认为过渡态中,通常具有脆性破坏的特征,也具有延性变形的性质。

岩石脆-延转化临界条件的诸多成果还来自于地壳岩石圈动力学中,普遍认为,随着深度的增加,当岩层中压力和温度达到一定条件时,岩石即发生脆-延转化,所以存在转化深度的概念,当然该深度还与岩石性质有关。文献[26]、[27]认为,当摩擦强度与蠕变强度相等时岩石即进入延性变形状态。文献[28]给出了地球岩石圈各种强度的推测曲线,文献[29]、[30]还发现在脆性向延性转换深度上存在着很高的应力释放。

总之,脆-延转化是岩石在高温和高压作用下表现出的一种特殊的变形性质,如果说浅部低围压下岩石破坏仅伴有少量甚至完全没有永久变形的话,则深部高围压条件下岩石的破坏往往伴随有较大的塑性变形。目前的研究大多集中在脆-延转化的判断标准上,而对于脆-延转化的机理却研究较少,目前还没有比较成熟的成果。

2. 深部岩石的流变特性

在深部高应力环境中,岩石具有强时间效应,表现为明显的流变或蠕变。文献[31]、[32]在研究核废料处置时,研究了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流变,但南非深部开采实践表明,深部环境下硬岩同样会产生明显的时间效应^[33,34]。对于软岩巷道,文献[35]提出了一个非常简单的参数——岩体的承载因子(即岩体强度和地应力的比值)来衡量巷道围岩的流变性。文献[36]讨论了该参数的适用范围,文献[37]通过对大量日本的软岩巷道调查后发现,发生明显流变的巷道围岩承载因子都小于2。该结论是针对典型软岩如泥岩、凝灰岩、页岩和粉砂岩等得出的,且埋深都小于400m,该准则是否适用于深部硬岩目前尚无定论。文献[33]、[34]、[38]、[39]系统研究了南非金矿深部硬岩的流变性,发现高应力导致围岩流变性十分明显,支护极其困难,巷道最大收缩率曾达到了50cm/月的水平^[39]。

岩石在高应力和其他不利因素的共同作用下,其蠕变更显著,这种情况在核废料处置中十分普遍。例如,即使质地非常坚硬的花岗岩,在长时微破裂效应和地下水力诱致应力腐蚀(water induced stress corrosion)的双重不利因素作用下,同样会对存储库近场区域的岩石强度产生很大的削弱作用^[40]。蠕变的发生还与岩体中微破裂导致的岩石剥离有关,根据瑞典Forsmark核废料候选场址的观测记录以及长时蠕变准则的推测,预计该库围岩经历1000a后,岩石剥落波及的深度将达到3m^[41]。

3. 深部岩石的扩容性质

文献[42]首次在单轴压缩试验中观测到岩石破裂前出现体积增大现象,文献[43]在围压下同样也观测到了扩容现象,不过,随着围压的增大,扩容的数值会降低。文献[24]的试验进一步表明,在低围压下,岩石往往会在低于峰值强度时由于内部微裂纹张开而产生扩容现象,但在高围压下,岩石的这种扩容现象不明显甚至完全消失。

1.2.2 深部岩石的强度和破坏特征

研究表明^[44,45],总体上岩石的强度随深度的增加而有所提高。例如有的矿区从深度小于600m变化到800~1000m时,强度为21~40MPa的岩石所占的比例从30%减少到24%,而强度为81~100MPa岩石的比例则从5.5%增加到24.5%,并且岩石更脆,更容易发生岩爆。

文献[23]根据大量实验数据,总结了在非常高的侧向应力(高达700MPa)下的岩石强度准则,提出了一个非线性的岩石强度准则。文献[46]根据实验发现,在200~280℃和不同围压的条件下,

花岗岩具有较低的强度值，据此，他们提出了地壳强度结构的“圣诞树”模型，合理解释了大陆地壳多震层的成因。

随着开采深度的增加，岩石破坏机理也随之转化，由浅部的脆性能或断裂韧度控制的破坏转化为深部开采条件下由侧向应力控制的断裂生长破坏。更进一步，实际上就是由浅部的动态破坏转化为深部的准静态破坏，以及由浅部的脆性力学响应转化为深部的潜在的延性行为力学响应^[47]。

与此观点相反，有些人则认为深部岩体的破坏更多地表现为动态的突然破坏，即岩爆或矿震^[48]。

深部开采中，不仅岩爆的发生与岩层的运动速率存在十分明显的关系，且岩爆的强度与震级也与岩层的运动速率有关^[49]。因此，目前预报岩爆的重要参数就是岩层的位移和运动速率。另外，深部开采引起的开采沉陷极有可能成为岩爆的诱因，同时地质结构面（弱面）的活化也可能导致岩爆，地质构造面附近的应力重新分布甚至有可能导致一系列的前震（foreshocks）。因此，深部矿井岩爆的空间分布和时间分布都十分复杂，且岩爆事件组成的时间序列很有可能不符合正态分布^[50]。

1.2.3 深部岩石的破碎诱导机理

在深井开采中，坚硬矿岩出现的“好凿好爆”现象给人们重要启示，这种现象应该是高应力所致。因此，在深部开采中，如何有效地预防和抑制由高应力诱发的岩爆等灾害性事故发生的同时，又充分利用高应力与应力波应力场叠加组合高效率的破裂矿岩，应成为深部开采中一大迫切需要研究的课题。

近十几年来，国内外对岩石分别在高应力状态和动荷载作用下的特性与响应做了一系列细致而深入的研究。以三轴试验仪为主要实验设备，对岩石在高应力状态下的物理特性与破坏进行了实验研究，利用细观力学、断裂力学及损伤力学等现代理论，对岩石的本构特征、断裂破坏机理进行了理论与数值分析，从而对冲击地压、岩爆等物理现象有了本质的认识^[51~53]；另外，以霍布金逊压杆与轻气炮为主要冲击试验设备，对岩石在动荷载作用下高应变率段的动力参量与动力性质进行了实验研究，并从应力波理论的角度利用各种现代方法对岩石的动态本构特征、应力波在岩石中的传播与能量耗散以及界面边界效应等方面进行了理论分析推导与数值模拟，从而得到了一系列岩石动态破坏规律^[54~58]。纵观国内外的研究，我们发现，至今为止人们还没有重视对在高应力状态下的岩石的动态特性与碎裂机理的研究^[59,60]，有限的研究也主要限制在脆性材料在高应力与应力脉冲组合下的理论分析上^[61]。

1.3 深部岩体力学研究的内容

深入开展深部资源开发和地下工程中的关键科学问题的研究，是确保未来有效地开发深部资源和地下空间及其对其稳定性进行综合评估的一个非常重要的前提。深部与浅部的区别在于“三高一扰动”，即高地应力、高地温和高岩溶水压及强烈的开采扰动。针对这几个特点，从深部开采中的岩石力学基础理论、深部开采诱发的重大工程灾害的机理及其预测和控制，以及深部资源开采的方法与关键技术三个方面来探讨深部开采中的科学问题。

1.3.1 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

本部分研究内容由中国矿业大学（北京）彭苏萍院士带领的课题组完成。主要包括：

（1）深部地质构造与岩体结构的探测的理论基础与方法。

研究深部资源开发和地下工程施工阶段灾害探测预测的新技术、新方法（以高分辨地震勘探等为主），指导深部资源开发和地下工程灾害预测与整治。并针对深部煤及围岩复杂构造探测困难、资料掌

握程度比浅部少的客观事实,深入研究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、深部岩体的地球物理响应特征,实现对深部矿井构造的精细解释、检测裂隙的走向和密度、圈定煤层瓦斯富集范围和确定煤(矿)层顶底板岩性目的,以达到对深部资源开发中的灾害源进行超前探测的技术水平。

(2) 原岩应力、采动高应力场的理论基础与方法。

在有限工程勘探、地质调查资料条件下,利用现代数学-力学方法,合理推演深部地下节理裂隙和地应力三维分布规律。研究深部资源开发及地下工程原位和采动应力场的测量技术与方法。

1.3.2 深部岩体力学特性和工程响应

本部分研究内容由中国矿业大学(北京)姜耀东教授带领的课题组完成。主要包括:

(1) 深部开采岩体的基本力学行为。

研究深部岩体在“三高”环境和强烈开采扰动作用下的变形性质、本构模型、强度特征、破坏准则和时间效应,重点研究深部开采岩体峰后和破坏后力学行为。

(2) 深部开采工程岩体动力学特性及成灾机理。

以深部开采岩体力学行为为基础,重点研究掘进、回采等工程活动诱致岩爆、突水、煤与瓦斯突出等工程灾害的演化过程和成灾机理,为深部工程灾害预测预报与防治提供必要的理论基础。这部分研究将以灾变理论、演化诱致突变理论等非线性科学为基础,突出以能量理论为基础的危害发生判据与准则。

(3) 深部开采岩体破碎机理。

研究“三高”环境下矿岩诱导破碎机制、动态特征、能量耗散过程及其控制,重点研究高应力条件下矿岩采动的应力转移与诱导破碎工程的耦合,为实施深部矿岩诱导破碎的深井采矿技术创新提供理论与科学依据。

1.3.3 深部采动覆岩移动规律及巷道稳定性控制

本部分研究内容由中国矿业大学贺永年教授及中国矿业大学(北京)何满潮教授带领的课题组完成。主要包括:

(1) 深部采场上覆岩层移动规律、环境损伤演化机理。

深入研究深部矿层采出后,深部采动岩体变形、破断、移动规律,以岩层控制的关键层理论为基础,建立描述深部采动覆岩变形—破断—移动全过程的结构运动动力学模型。运用非线性动力学理论,分析深部采动覆岩结构运动全过程对采场矿压、巷道矿压、岩层内部裂隙分布、岩层移动与地表沉陷的动态影响,掌握采动覆岩结构运动与采场、巷道围岩动力灾害的关系,形成以关键层为核心的采动覆岩变形—破坏—移动全过程理论。分析深部采动覆岩结构运动与岩层移动和地表环境损伤之间的动态关系,发展相关控制技术。

(2) 深部巷道围岩峰后破裂演化及失稳对策。

以远离平衡态非线性理论为指导,以岩石破裂演化和强度衰减规律为基础,以围岩加卸、载真实受力状态为背景,考虑岩石巷道和受采动影响巷道的历史,研究两种巷道失稳与冲击地压三种围岩行为规律与对策,建立电磁辐射预报量化手段。

(3) 深部采动围岩二次稳定控制理论。

深入进行深部采动围岩矿压显现规律的研究,提出深部采动围岩应力时空分布模型。以此为基础,结合深部岩体强度及变形破坏过程现场探测技术的开发与应用,研究深部采动围岩变形破坏后与支护相互作用达到二次稳定的作用机理及其作用规律,结合非线性大变形力学理论,建立深部采动围岩二

次稳定性控制理论及其非线性力学设计理论,并开发相应控制技术。

(4) 深部厚煤层综放开采相关基础理论研究。

通过对深部开采条件下,厚煤层综放开采煤层可放性的研究,分析综放开采过程中不同煤层条件顶煤岩体结构的变化规律,从而提出深部厚煤层综放开采煤层可放性理论。进而对深部厚煤层综放开采围岩应力分布时空规律及顶煤岩体运动时空规律及破煤机理进行深入研究,掌握深部厚煤层综放开采复合应力作用放煤机理,建立深部厚煤层综放开采动态双峰应力模型及动态岩体结构模型。

1.3.4 深部多相介质、多场耦合作用及其灾害发生机理与防治

本部分研究内容由中南大学李夕兵教授带领的课题组完成。主要包括:

(1) 多相介质、多场耦合条件下岩石损伤力学理论研究。

重点研究深部岩体在破裂条件下的应力、渗流、温度与损伤耦合的力学模型,岩石破裂与失稳过程。

(2) 深部开采岩体岩爆机理及其防治方法研究。

系统研究加、卸载应力-应变过程中深部开采岩体能量耗散特征、细观结构变化特征和损伤演化之间的关系,岩石能量耗散与应力条件、岩性和结构之间的关系,岩爆无害化诱导与控制技术,发展和评估抗岩爆支护理论与方法。

(3) 深部采动裂隙岩体(含散体)中的渗流规律。

研究高渗透压下流体在裂隙岩体(散体)中的渗流过程与质交换机制,裂隙岩体和毛细表面与流体的能质传输数理模型,建立含水裂隙岩体(散体)流场分布规律。

(4) 特定环境突水、突浆机理与防治。

分析大型采空区和溶洞水受爆破震动、大面积冒顶等突发因素作用下诱发突水的机理。研究深井充填泥浆泄漏机理与防治措施及其与爆破震动、冲击之间的关系。

(5) 三维岩爆数值分析系统及其大规模科学计算软件的研究与开发。

研究开发三维条件下的岩石破裂过程分析及其岩爆分析 RFP3D 系统,开展三维条件下岩石破裂过程的数值模拟、岩石破裂过程分析大规模并行科学计算。

1.3.5 深部采场围岩破坏、瓦斯渗流及灾害研究

本部分研究内容由辽宁工程技术大学潘一山教授带领的课题组完成。主要包括:

(1) 深部多重介质多场耦合作用下低渗透性高孔隙压瓦斯运移规律。

研制与核磁共振成像仪相配套的高压、高孔隙压、温度可调的聚碳酸酯三轴渗透仪;在核磁共振成像仪上直接观测高压、高孔隙压、不同温度下,低渗透煤层瓦斯吸附、解吸、扩散及渗流的运移过程和相互转换的规律,以及水相饱和度变化对瓦斯运移规律的影响;研究高孔隙压下,瓦斯黏度随孔隙压变化的规律、瓦斯对煤变形性质影响的规律、高地层压力低渗透率下瓦斯渗流的滑脱效应、水瓦斯液气两相不同饱和度下相对渗透率、毛细力的变化规律;建立瓦斯在高压高孔隙压非等温多相多场耦合作用下,在低渗透多重介质煤层吸附、解吸、扩散、渗流、变形耦合作用的运移理论及数学模型,建立水瓦斯两相渗流理论及数学模型,为煤层气开采、瓦斯抽放技术及瓦斯灾害控制提供定量化指导。

(2) 深部多重介质多场耦合作用下煤和瓦斯突出发生机理及预测。

主要研究高压高孔隙压渗流作用下煤层变形局部化、分区碎裂化形成的机制;瓦斯向变形局部化碎裂区域集聚流动规律;碎裂区贯通扩大突出启动时,煤岩层变形势能向流体压力势能转化,形成高能固、气两相流喷出的物理过程,从而建立深部煤和瓦斯突出力学数学模型,为瓦斯突出预防技术提供定量化指导;深化完善瓦斯突出与冲击地压统一理论,以便为研究预防瓦斯突出与冲击地压的技术

措施提供指导。深入研究在深部高孔隙压下,煤变形过程中电荷感应等物理量的变化规律,以及电荷感应等方法预测煤和瓦斯突出的原理、技术及危险指标的确定。

(3) 深部开采条件下采场围岩控制理论及应用的研究。

深入研究深部煤系地层中的断层、裂隙、层理、节理发育,岩层逐渐变碎,同一层位的岩层分层厚度逐渐变薄的机理;通过现场观测和实验室模拟实验,研究在开采全过程中直接顶变形破坏及整个上覆岩层运动的规律;建立深部采场矿山压力整体结构力学模型,采用该模型研究上覆岩层运动对采场矿山压力分布的影响;确定上覆岩层压力传递给支架的压力变化规律及计算方法,以确保采场所需支架阻力;研究上覆岩体变形下沉、破断及其对地面沉陷、地表变形影响以及形成离层和压实区判别方法,研究减小地表变形、地表沉降的保护措施的技术基础;根据深部岩体力学特点建立深部巷道围岩变形破坏、稳定性的计算模型及求解方法。

1.3.6 深部非线性岩体力学理论基础研究

本部分研究内容由解放军理工大学钱七虎院士、王明洋教授带领的课题组完成。主要包括:

(1) 深部岩体的非线性静力变形、破坏特征及其定量分析,分区破裂化现象的物理力学机理及其规律研究。

研究深部巷道周围介质在高地应力情况下,非线性岩体静力学的分区破裂化现象及其形成的物理力学机理;研究分析深部巷道围岩在考虑分区破碎化现象和破碎区残余强度情况下围岩的变形、破坏和稳定性;研究分区破碎化现象下的深部巷道开挖、支护原理及其优化设计方法;研究在分区破裂化现象形成过程中岩爆发生的临界条件和机理。

(2) 深部岩体的非线性动力变形、运动特征及其定量分析;超低摩擦效应、摆型波和准共振现象及其与岩爆、工程性地震的关系研究;深部岩体的摆型波及准共振现象研究。

研究岩体中岩块系的振动频率特性及准共振现象;研究岩块系中的超低摩擦效应及摆型波(慢速变位波)产生的机理、条件和规律;研究根据岩体中摆型波的特点从岩体中的实测振动波型分离摆型波的方法;研究按照摆型波的特征参数确定岩体中优势岩块的尺寸和结构面上的摩擦特性;研究并揭示在爆破和机械开挖的震动诱导下岩压冲击发生的动力机理,并提出根据摆型波参数监测和预报冲击矿压(岩爆、煤的突出、微地震、工程性地震等动力事件)危险的方法。

1.4 拟解决的关键科学问题

针对深部资源开发的工程背景和深部岩体赋存环境的特殊性与复杂性,通过地学、力学、工程科学的交叉综合分析,系统研究深部资源开采引发的基础岩石力学问题,形成深部开采岩体应力场探测理论与方法、深部地质构造的精细探测理论与探测方法,提出深部开采过程中井下灾害的判据、预测预报方法及防治措施(包括采矿工艺和支护策略),提出深部采场矿压显现特征和上覆岩层移动规律及对地表稳定的影响与保护技术。这些基础科学问题的核心主题是,系统地研究深部岩体长期处于“三高”环境下,由于采矿扰动所表现出的特殊力学行为。根据这一主题,提出拟解决的关键科学问题包括:

(1) 深部资源开采中的地应力场分布特征与变异规律。

重点研究深部开采地质条件下,开采煤(矿)层围岩体精细结构与开采活动、应力环境之间的时空互动关系及能量积聚与演化规律。

(2) 深部岩体力学特性与时效特征。

根据深部资源开采中工程灾害的发生与岩体力学行为密切相关这一特点,从岩体在“三高一扰