

深部开采基础理论与工程实践

谢和平 彭苏萍 何满潮 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合我国煤矿深部开采基础理论与工程难题,系统总结了国家自然科学基金委员会创新群体近几年来在深部资源开采方面的研究成果,包括深部岩体力学性质、深部开采地质保障系统、深部工程灾害机理与防治、深部资源开采方法等方面,收录了专题评述和研究论文 30 篇。

本文集可供采矿、地质、土木、水利及核废料地质处置等专业的师生和工程技术人员参考或使用。

图书在版编目(CIP)数据

深部开采基础理论与工程实践/谢和平,彭苏萍,何满潮编著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-016386-9

I. 深… II. ①谢… ②彭… ③何… III. 深部采矿法-文集 IV. TD8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 123674 号

责任编辑:林 鹏 田士勇 卜 新/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—1 500 字数:394 000

定价: 51.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

深部资源开采是国内外采矿工程界一个十分重要的研究课题。随着开采深度的增加,地质环境更加复杂,导致突发性工程灾害和重大恶性事故增加、作业环境恶化、生产成本急剧加大,对深部资源开采提出了严峻的挑战。深部与浅部的明显区别在于深部岩石所处的特殊环境,即深部岩石的“三高”环境:高地应力、高地温、高岩溶水压。正是由于“三高”环境,使深部岩体的组织结构、基本行为特征和工程响应均发生根本性变化,这也是导致深部开采中灾害事故出现多发性和突发性的根本原因所在。

深部资源开采所面临的核心问题是深部岩体长期处于“三高”环境下,由于采掘扰动所表现出的特殊力学行为,与浅部岩石力学行为有很大区别。深部岩体力学性质的特殊性主要表现为以下5个方面。

(1) **深部岩体动力响应的突变性。**如果说浅部岩体破坏一般是渐进的,且在临近破坏时往往表现出变形加剧现象,破坏前兆明显,那么在深部条件下,岩体破坏具有强烈的冲击破坏性质,其动力响应的破坏过程往往是突发的、无前兆的突变过程。在巷道中这种过程表现为大范围巷道的突然坍塌和失稳,在工作面中这种过程表现为顶板的突然大面积冲击来压,导致的工程灾害十分严重。

(2) **深部岩体应力场的复杂性。**众所周知,浅部巷道围岩状态往往可分为破裂区、塑性极限平衡区、弹性区和原岩应力区,可使用现有的弹塑性力学理论进行分析。而深部巷道围岩的应力状态就十分复杂,深部巷道围岩状态有时发生剪胀带和压缩带交替出现的情形,且其几何尺寸按等比数列递增,这一现象被称为区域破裂现象,因此深部围岩应力场具有多样性和复杂性。

(3) **深部岩体变形机理的脆-延转化特性。**实验室研究表明,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,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,通常没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。这就说明如果浅部低围压下岩石破坏仅有少量永久变形的话,则深部高围压条件下岩石的破坏往往伴随有较大的、明显的永久变形。

(4) **深部岩体开挖岩溶突水的瞬时性。**浅部资源开采中,矿井水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，而形成渗流通道相对集中，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。

(5) 深部岩体的大变形和强流变性。进入深部后，岩体变形具有大变形和强流变性。例如，煤矿中有的巷道 20 余年底脚不止，累计底脚量达数十米。由于采动影响，围岩破坏不可避免。有的巷道还不得不在破碎岩（煤）体中掘进（如沿空掘巷），按传统的关于破坏和失稳的概念，这种已破坏的岩体就不再具有承载能力，而实际上深部破碎岩体却具有再次稳定的能力，因此已破坏巷道围岩和支护相互作用达到二次稳定的问题将是深部岩体力学有别于浅部岩体力学的重要特征之一。

综上所述，由于深部岩石力学行为具有明显区别于浅部岩石力学的这些重要特征，再加上赋存环境的复杂性，致使深部资源开采中以岩爆、突水、顶板大面积来压和采空区失稳为代表的一系列灾害性事故与浅部工程灾害相比较在程度上加剧，频度上提高，成灾机理更加复杂。如果我们仍然习惯于以浅部开采条件下的地质作用特征和矿山压力显现规律来推断和分析深部开采的安全事故及相关现象，显然远远不够。

为此，国家自然科学基金委员会于 2002 年决定资助“深部开采条件下工程岩体的力学行为及灾害的探测、防治与对策”创新群体研究项目（批准号：50021402），为期 3 年。3 年来，创新群体针对深部开采的相关基础理论与技术难题，以创新群体长期科学研究与合作中自然形成的“矿山岩体力学的基础理论与应用研究”、“矿山岩体精细结构探测方法研究”和“矿山岩体工程支护理论与技术研究”三个紧密联系又各具特色的研究方向为依托，系统开展了高温高压下岩体力学行为研究，并以此为基础，进一步开展了深部开采地质保障系统、深部开采工程灾害机理与防治、深部开采关键技术等方面的课题研究。其间，创新群体还与淮南矿业集团、平顶山矿业集团、鹤壁煤业集团、靖远矿业集团、南山集团柳海矿、兖州煤业公司、峰峰煤业集团等生产单位联合，系统开展了旨在解决现场生产技术难题的成果应用研究，取得了一系列有价值的研究成果。

本书系统总结了创新群体在深部资源开采基础理论与应用、深部地质构造探测、软岩工程岩体力学理论与支护技术等方面的最新成果，收录了专题评述和研究论文 30 篇。希望本书对我国深部开采起到抛砖引玉的作用。由于很多研究最近几年才开始，有的成果还不成熟，缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

谢和平

2005 年 7 月 28 日

目 录

前言

第一部分 总 论

深部资源开采诱发的工程灾害与基础科学问题.....	3
深部开采岩体力学及工程灾害控制研究	15
深部煤炭开发地质保障系统研究开发新进展	33

第二部分 深部岩体力学性质

温度压力耦合作用下深部岩石流变模型的本构研究	57
岩石断裂破坏的声发射机理初探	66
深部岩体非线性力学试验系统研制	74
煤系岩石渗透性变化的控制因素探讨	95
深部岩石脆性-延性转化机理研究	102
基于线弹性断裂力学节理岩体的破坏研究.....	112
煤岩损伤过程的实验方法研究.....	121
扫描电镜下的断口三维重建及表面分形维数的测量.....	135

第三部分 深部开采地质保障系统

地质测井法划分煤体结构并预测瓦斯突出研究.....	145
煤田反演的声波测井曲线重构.....	152
高效采集地质雷达的研制及应用.....	160
地震 AVO 反演及煤与瓦斯突出区预测	167
地震反演与三维可视化技术在煤田三维地震勘探中的应用初探.....	177
新型分布式多波地震仪的设计方案.....	184

第四部分 深部开采灾害防治

深部软岩巷道耦合支护非线性设计方法研究.....	197
以复合型能量转化为中心的冲击地压控制理论.....	205
深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究.....	215
基于 Hoek-Brown 强度理论的煤层突出模型研究	222
矿山灾害的主宰性认知与应对决策技术探讨.....	228

基于岩石损伤力学的深部开采岩爆机理研究·····	235
深部硐室受断层带及采煤动压的影响分析及数值计算·····	247

第五部分 深部开采方法与工程实践

开滦钱家营矿深部开采关键技术研究·····	257
综放开采煤层可放性及其分类方法研究·····	274
厚煤层综放开采双峰应力分布模型研究·····	287
承压水体上对拉工作面开采合理错距的确定·····	299
管棚注浆技术应用于深部硐室过断层施工的可行性分析·····	307
石人沟铁矿南区露天转地下采场稳定性数值模拟·····	315

第一部分 总 论

深部资源开采诱发的工程灾害与基础科学问题^{*}

谢和平^{1,2}

(1 四川大学, 成都 610065; 2 中国矿业大学(北京)

岩石力学与分形研究所, 北京 100083)

摘要 本文介绍了深部资源开采现状,总结了深部开采导致的工程灾害,包括岩爆、煤与瓦斯突出、巷道失稳、地温、突水、井筒破裂等。在此基础上,提出了有关岩石力学的科学问题,即高温、高应力、高孔隙压环境下岩石变形、压强、破坏等方面的基本特征,并进一步提出了深部开采灾害机理与防治、深部开采理论与技术研究的基础科学问题。

关键词 深部开采; 灾害事故; 岩石力学

1 深部开采现状

人类对矿产资源的获取大多是通过地下开采方式获得的。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。以煤矿为例,我国煤矿开采深度以8~12m/a的速度增加,预计在未来20年我国很多煤矿将进入1000~1500m的深度。我国已探明的煤炭储量中,埋深在1000m以下的为2.95万亿t,占煤炭资源总量的53%^[1]。因此,煤炭的深部开采问题已逐渐摆在我们面前。金属矿方面,据不完全统计,国外开采超过1000m的金属矿山有80余座,其中以南非最具代表性。目前南非绝大多数金矿的开采水平在1000m以下,其中Anglogold公司的西部深水平金矿达到了3700m。West Driefovten金矿的矿体存在于600m以下,并一直延伸到6000m以下。印度的Kolar金矿区中,已有三个矿体超过2400m,其中一个矿体深度已达3260m。俄罗斯克里沃罗格铁矿区中已有8个矿山采准深度达910m,开拓深度达1570m。另外,加拿大、美国、澳大利亚的一些金属矿采深已超过1000m。近年来,我国一些金属矿相继进入深部开采,如铜陵狮子山铜矿采深已达1100m,山东玲珑金矿采深已达800m,抚顺红透山铜矿已进入900~1100m深度,冬瓜山矿深度达1000m,湘西金矿采深超过850m^[2,3]。深部资源开采一直是国内外采矿工程界一个十分重要的研究课题,国外从20世纪80年代初期开始深部开采问题的研究。以南非为代表,其他国家如

^{*} 国家自然科学基金项目(50221402, 50490272)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-04-0491)共同资助。

美国、加拿大、澳大利亚、波兰、俄罗斯等政府、工业部门和研究机构密切配合，集中人力和财力紧密结合，进行深部资源开采相关的基础课题研究。南非政府、大学与工业部门密切合作，于1998年开始启动“Deep Mine”研究计划，耗资约1300万美元，旨在解决3000~5000m深度的开采安全等一系列问题。加拿大从20世纪80年代至今开展了为期10年的两个深井研究计划。美国爱达荷大学、密歇根大学、西南研究院和美国国防部合作，就岩爆引发的地震信号进行了研究。西澳大利亚大学在深部开采方面也进行了大量工作。我国20世纪80年代末也开始了这方面的研究，一些高校和研究所对深部资源开采的理论和技術进行了一些研究，取得了大量有价值的研究成果。

随着开采深度的增加，地质条件恶化、破碎岩体增多、地应力增大、涌水量加大、地温升高，导致提升难度加大、作业环境恶化、通风降温和生产成本急剧增加等一系列问题，为深部资源开采提出了严重的挑战。例如，在深部开采条件下，地温的升高是工作条件恶化的重要原因，持续的高温将对人员的健康和工作能力造成极大的伤害，使劳动生产率大大下降。另外，人们发现深部开采灾害事故（如岩爆）的表现形式与频度都与浅部开采存在十分明显的区别，并且深部开采巷道和采场的维护及其机理、出发点也与浅部开采有十分明显的区别，人们认识到这种区别的根源在于岩石所处的应力环境的区别以及由此导致的岩体力学性质的区别。煤矿开采实践说明，在浅部十分普通的岩石，在深部可能表现出软岩的特征——变形容易、蠕变性强，但是否遇水膨胀却仍取决于岩石的成分。另外，浅部的原岩大多处于弹性应力状态，而深部的原岩处于“潜塑性”状态，即由各向不等压的原岩应力引起的压、剪应力超过岩石压强，造成岩石的潜在破坏状态。

总地来看，我国在深部开采方面的经验还十分欠缺，尤其是对井下支护、通风降温、一些重大井下事故如顶板来压、岩爆、煤和瓦斯突出、工作面突水等方面的机理、预测与防治还缺乏必要的基础研究。为了保证我国国民经济的持续发展，尤其是保证我国东部矿区能源资源的高产、稳产，十分有必要开展这方面的研究工作。

本文总结了深部开采的主要技术难题，包括岩爆、支护、顶板事故与通风降温等。在此基础上，进一步综述了有关岩石力学的基本问题，即高应力环境下岩石变形、压强、破坏等方面的基本特征。

2 深部开采诱发的工程灾害

2.1 巷道变形增大

与浅部一样，深部巷道支护的目的仍是尽量保持围岩的完整性以及避免破碎岩体进一步产生位移。深部开采一方面自重应力逐渐增加，同时由于深部岩层的

构造一般比较发育,其构造应力十分突出,致使巷道围岩压力大,巷道支护成本增加。据煤炭行业的有关资料,近10年巷道支护成本增加了1.4倍,巷道翻修量占整个巷道掘进量的40%。深部巷道支护难的原因来自两个方面,一是深部巷道的底臃十分严重,煤矿中有的巷道20余年底臃不止,累计底臃量达数十米;二是岩爆危险性增大,如南非某金矿1995年9月在深度为2500m的巷道中发生了一次岩爆,据当地地震台网测定,其震级为3.6级,巷道遭受了严重的破坏,所幸无人员伤亡。Durrheim等^[4]研究了其发生的原因,认为主要是由于高地应力、发育的地质构造和岩层中含有易碎的页岩等几方面因素的综合影响结果。因此深部巷道所处的地质环境以突出高地应力和岩爆危险性为主。

深部高地应力硬岩环境下的巷道支护,根据南非的经验^[5],认为岩石压溃性质和岩体破坏过程是巷道支护设计极其重要的两个方面,同样重要的是巷道所处的应力环境。如果说浅部中、低应力条件下的巷道支护更多地取决于业已存在的地质构造等不连续面的话^[6],深部高应力中巷道支护设计的最重要因素则是巷道围岩因掘进造成的断裂破坏带的影响,因此支护设计必须考虑新生断裂结构的影响。总的来看,高应力硬岩环境下的巷道支护应强调破断岩体残余压强的利用,尽量减小岩体的峰后(post-failure)变形,并尽量使巷道围岩处于三向受力状态,因此应选用早承载的高压强支架。另外,同样是根据南非的经验,在有岩爆危险性的区域,巷道支护应采用喷射混凝土进行加固^[4,7]。

岩爆危险区的理想支护方式应具有以下特征^[8]:①支护体应具有较高的初始刚度;②大变形条件下支护系统同样具有较好的承载性能;③支护系统具有良好的柔性(ductility)等。

由于巷道设计过程中存在诸多不确定因素,如支架载荷、破坏机理等,因此所谓的严格意义上的工程设计方法在巷道支护设计中没有多大意义,深部巷道支护设计也是如此,经典的工程设计方法并不适用于巷道支护设计,但从设计思想上,深部有岩爆危险区域的巷道支护仍具有与浅部支护十分不同的特点^[9],如:

- (1) 不能简单地通过提高支护压强的方法来防止岩爆造成的危害;
- (2) 为了防治岩爆对支护体构件造成的破坏,应尽量将支护构件设计成具有让压(yielding)特性的支护系统;
- (3) 深部巷道支护设计应更多地建立在能量分析的基础上,而不是简单地以应力和压强作为设计准则;
- (4) 岩爆造成的岩块弹射速度是判断巷道损害烈度的有效参数,故应加强地震工程和岩石力学方面的研究,以建立岩层移动参数与岩块弹射速度间的关系。

深部巷道支护设计的关键是如何定量评价岩爆造成的损害,以下一些经验是值得借鉴的^[9]:

- (1) 中度震级的岩爆将导致岩块弹射速度达到甚至超过10m/s,这样的弹射速度足以毁坏常规的加强支护系统;

(2) 采用能量理论设计的支护系统（即让压支护系统）将完全有可能承受岩爆带来的冲击；

(3) 深部巷道让压支护系统的效能可通过巷道中实施控制爆破实验来检验。

需要强调指出的是，深部有岩爆危险的区域中，巷道支护设计理念与浅部有很大的不同，浅部支架突出“支”方面的作用，而深部巷道却更多地应体现其“让压”的功能，即合理的支护设计应允许支架有充分的变形能力，确保支架在发生岩爆时不被折断^[10, 11]。

2.2 采场矿压显现强烈

随着采深的增加，岩爆危险性也随之上升，常规的顶板管理方法再也不能有效地维护开采空间，因此顶板管理方法必须进行相应的调整。如美国 Lucky Friday 金属矿，20 世纪 60 年代以来随着矿柱岩爆次数的增加，常规的锚杆配合木支架的支护方法再也不能有效地维护开采空间的安全，因此从开采方法和支护方法上都进行了一些调整，主要措施是将仰斜式充填法（overhand cut-and-fill method）改为俯斜式充填开采（underhand cut-and-fill method）；支护方式上，采用树脂锚杆加钢带再配合离壁支架的联合支护方法，在有的区域再加上喷射钢纤维混凝土，从而有效地维护了开采空间的安全^[12]。

目前深部开采采场顶板控制方面的经验还不多，除了上面提及的合理布置采区和改进支护方法外，从局部措施上，还可在高应力区采用卸压的方法来减小岩爆的发生概率^[13]。另外，与深部岩爆危险区巷道支护设计一样，采场支护设计也应从能量的观点出发^[14~16]。最近几十年发展起来的数值计算方法在确定合理的深部开采采区布置方面是十分有效的研究方法^[17]。

2.3 岩爆频次和压强加大

岩爆（rockburst）是指采掘导致岩层的突然破坏，往往伴随着开采空间的大应变、大位移以及岩层碎块从母岩中的高速脱离，向开采空间抛出，抛出的岩体质量从数吨到数千吨不等。广义上，采掘导致的动力现象通常称为矿震（seismicity），只有那些对开采空间造成损害的矿震才习惯地称之为岩爆^[18, 19]。

矿井中的岩爆大致可分为三类^[14]，即：①发生在局部范围内的岩爆，只导致局部区域的损害和破坏；②岩爆在大范围内产生影响，但并未造成局部区域损害；③岩爆发生在离采场和掘进工作面一定距离之外，但也会在局部范围内产生严重损害。第一种类型显然与采掘活动有十分密切的关系，第二种类型是由于大范围矿震引起的，第三种与断层活动有关。

根据相关的统计资料，岩爆多发生在压强高、厚度大的坚硬岩（煤）层中，对含煤地层而言，岩爆发生的典型条件是顶底板含有较厚的砂岩，如表 1 所示。

表 1 产生岩爆的顶底板条件统计^[18]

岩(煤)层	顶底板岩性	岩层厚度/m	岩层抗压压强/MPa	岩层弹模/MPa
美国	砂岩	>10	约 100	25 000
俄罗斯		>8	>70	
印度	砂岩	>8	50~75	
中国	砂岩	10~40	130	
法国(普罗旺斯煤田)	石灰岩	>10	200	
德国(鲁尔煤田)	砂岩	5~6		
波兰(上西里西亚煤田)	砂岩	15	90~130	

一般认为岩爆的主要影响因素包括煤层顶底板条件、原岩应力、埋深、煤层物理力学特性、厚度及倾角等。至于岩爆与采深的关系,尽管在极浅的硬煤层中(深度小于 100m,有的甚至在 30~50m)也有发生岩爆的记载,但目前的统计资料仍显示随着开采深度的增加,岩爆的发生次数及压强也会随之上升,如图 1 所示。南非金矿的统计数据甚至表明,岩爆次数与采深之间存在十分明显的线性关系^[20]。

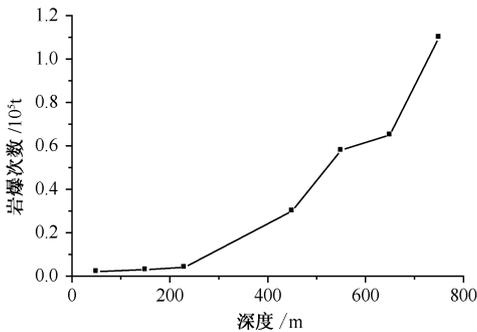


图 1 岩爆次数与深度的关系^[18]

南非金矿过去几十年的开采实践表明^[20],深部开采过程中岩爆的产生是有一定规律的,总结起来,主要有 3 点规律:①岩爆的产生与岩层的剪切破坏有关,尤其是岩层沿预先存在的不连续面产生滑移占主导地位;②岩爆多发生在采掘活动频繁的区域,统计表明,深部开采大部分岩爆都发生在工作面附近 100~200m;③深部开采岩爆的发生具有一定的随机性(stochastic nature),因此岩爆的预测预报只能建立在统计观点基础上,而准确预报岩爆发生的时间与地点几乎是不可能的。但有一点是可以肯定的,即当一些不利因素如开采空间大、支撑压力(abutment pressure)高、断层发育等同时出现时,产生岩爆的概率将大大增加。因此,在此基础上发展的岩石力学模型对于预测岩爆的发生是十分有帮助

的^[20]。

采深增加引起岩爆危险性增大的机理十分复杂,从开采环境看,采深的增加将导致煤层顶底板压力的增大,尤其是开采空间附近顶底板移近量的急剧增大,对煤层的夹持作用更加明显,十分有利于煤岩中弹性能的聚集;并且煤层自身的物理力学性能也将发生明显的改变,将由浅部的脆性状态转化为深部的类黏性(quasi-viscous)材料,十分容易由煤岩体的流变过程(rheological process)演化为岩爆^[21]。例如,南非金矿的深部开采中,即使是非常坚硬的岩石因受到采掘影响而向新的平衡态的转移过程也不是瞬间完成的,而是一个随时间演化的过程。近几年一些研究人员已开始关注这一现象^[22]。他们发现在深部开采中,坚硬岩层也具有十分明显的时间效应(time-dependent)现象,而一旦将这种岩石样本在实验室进行实验,却几乎观测不到时间效应现象或流变速率十分低,实验室的实验结果与现场观测结果之间的差异十分明显,无法解释现场观测到的十分明显的时效现象。

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,且岩爆的压强与震级也与岩层的运动速率有关^[10]。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(foreshock),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^[23]。

总之,岩爆发生的频率、压强、规模都会随采深的增加而增大。

2.4 瓦斯高度聚积、诱发严重的安全事故

淮南矿务局潘一矿在勘探阶段定为低沼瓦斯矿,当井筒送下去后,发现为高沼突出矿井,造成对原有生产矿井设施进行重新设计、改造的被动局面,追加资金近亿元。由于瓦斯易于聚积,原有通风设备难于满足安全生产的需要。近年来,由于瓦斯突出和爆炸引起的死亡10人以上的煤矿事故,70%出现在中国东部矿区。

2.5 地温升高、作业条件恶化

常温带以下,岩层的温度将以 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的梯度上升,最高可达 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,深部开采条件下,岩层温度将达到几十摄氏度的高温。例如,俄罗斯煤矿井深度1000m时,平均地温为 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$,个别达 52°C ,印度某金矿3000m深时地温达 70°C 。地温升高造成井下工人注意力分散、劳动率减低,甚至无法工作。因此深部开采工作面的降温技术是安全生产的重要前提。

此外,深部突出事故、井筒破裂、煤自燃发火等工程载荷都有加剧的趋势。

3 深部开采的科学问题

深部岩石所处的环境可概括为“三高”，即高围压、高温度和高岩溶水压，这样的环境下，岩石的力学性质与浅部岩石的力学性质有很大的不同。

3.1 深部开采的岩石力学基础科学问题

3.1.1 地应力

查明地壳中地应力大小和方向是采矿工程的基础。总的来看，地壳中垂直地应力的分布规律比较简单，即垂直应力随深度增加呈线性增大。而水平应力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 1000m 范围内时，水平应力为垂直应力的 1.5~5.0 倍，埋深超过 1000m 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^[24]。近年有的研究者还注意到了水平主应力在不同方向上的差异，Stacey 和 Wesseloo 总结了南非由地表到地下 3000m 之间的地应力测量结果，发现最大与最小水平地应力之比高达 4 倍^[25]。

3.1.2 岩石压强特征

有资料表明，总体上岩石的压强随深度的增加而有所提高，如表 2 所示。可见，矿区从深度小于 600m 变化到 800~1000m 时，压强为 20~40MPa 的岩石所占的比重从 30.2% 减少到 23.6%，而压强为 80~100MPa 的岩石的比重则从 5.5% 增加到 24.5%^[26]。

表 2 某矿区岩体压强随深度的变化（单位：%）

深度/m	小于 20MPa	20~40MPa	40~60MPa	60~80MPa	80~100MPa	大于 100MPa
小于 600	9.4	30.2	24.6	29.2	5.5	1.1
600~800	2.8	35.7	39.3	13.4	8.1	0.4
800~1000	1.8	23.6	24.5	21.5	24.5	4.1
1000~1200	1.8	24.3	29.5	24.7	16.0	3.7
1200~1400	3.3	8.3	31.0	30.0	25.0	2.4
大于 1400	1.6	5.6	29.0	41.0	21.0	1.8

Singh 根据大量实验数据^[27]，总结了在非常高的侧向应力下（高达 700MPa）的岩石压强准则，提出了一个非线性的岩石压强准则，并进一步提出了岩石脆性-延性转化的条件，即满足： $\sigma_1/\sigma_3=3\sim 5.5$ 和 $\sigma_c/\sigma_3=0.5\sim 1.25$ 。

3.1.3 岩石变形特征

(1) 岩石的脆性-延性转化性质。岩石在浅部表现为脆性，在深部则很可能转化为延性 (ductile)。在实验中岩石的这种性质是随着围压的升高而发生的，往往存在一个“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。Kwasniewski 根据亚洲、欧洲、北美洲和非洲的 101 个砂岩试件的实验数据^[28]，对岩石的脆性-延性转化规律进行了深入的研究，研究了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 (transitional state)。这些研究对认识深部开采条件下岩石的变形性质、确定岩石的峰值压强以及巷道和硐室的支护设计都是十分有用的。

(2) 岩石的剪胀或扩容 (dilatancy) 现象不明显。实验研究表明^[28]，在低围压下 (相当于浅部开采)，岩石往往会在低于峰值压强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。

3.1.4 岩石破坏特征

众所周知，随着开采深度的增加，岩石的力学特性将发生明显变化，这种变化的特征之一是岩石破坏机理的转化，即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 (quasi-static) 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 (potential for ductile behavior) 力学响应^[29]。

3.1.5 岩石的热-水-力耦合性质

深部开采条件下，地温和地下水对岩石力学行为的影响十分明显。研究表明^[30]，含水量是影响岩石力学行为的重要因素，在侧压 10~20MPa 的条件下 (相当于埋深 400~800m)，随着含水量的增加，岩石压强和泊松比都有所降低。三轴压缩条件下，温度对岩石的短期力学行为没有明显的影响，但对其长期力学行为的影响还是比较明显的。实验表明^[30]，在相同条件下，随着温度的升高，岩石的黏塑性变形明显增大。

3.2 深部开采诱发的重大灾害机理与预测的科学问题

以岩爆、突水、顶板大面积来压为代表的深部开采诱发的灾害事故更具突发性，表现出明显的动态特征，因此如果说浅部开采的灾害事故以煤岩的静态破坏为研究基础的话，深部开采却以煤岩的动态破坏为研究基础，应注重煤岩的动态破坏过程，尤其是煤岩中裂纹的萌生、扩展、贯通的动态过程研究；灾害事故的研究应更注重能量的观点，建立基于能量观点的煤岩破坏准则与压强理论。

3.2.1 岩爆

深部高应力环境更加容易诱发岩爆灾害的发生，因此应成为重点研究内容。应主要研究：

(1) 深部岩爆发生的时空规律。由于深部矿井岩爆的空间分布规律与时间分布规律都十分复杂，试图准确预报岩爆发生的时间与地点显然是不可能的，因此查明某一区域岩爆发生的分布规律就十分必要，而且借助现代科学的研究手段还是十分可能的。

(2) 深部岩爆的防治措施。应强调深部岩爆危险区支护功能的转化，岩爆对支护系统提出了更高的要求，因此需要新型的性能更高的支护系统，同时应与区域和局部的防治措施结合起来。

3.2.2 煤与瓦斯突出

深部矿井机理的研究包括：

(1) 研究高应力、低透气性煤层瓦斯储运及突出过程中的表面物理化学原理及场效应规律，以获得不同条件下煤吸附解吸瓦斯对宏观力学性能和瓦斯渗流特性的作用规律。

(2) 对含瓦斯煤施加不同物理场和化学作用，以得出强化煤层瓦斯流动的新原理。

深部重大瓦斯灾害防治技术，主要研究：

(1) 综合应用现代科学技术与手段研究煤与瓦斯突出区域预测和工作面突出危险动态预测技术。

(2) 通过对矿井灾变时巷道管网内灾变气体的复杂流动规律研究，建立起非稳定可压缩巷道管网内灾变气体复杂流动理论模型，为有效控制和阻隔灾害发展提供理论和技术。

3.2.3 巷道失稳、顶板破坏与岩层移动

岩体为天然裂隙体，深部开采条件下通常将产生很大的变形，常规方法难以准确描述和计算。考虑裂隙岩体能量耗散和大变形的损伤因子，建立煤岩损伤断裂全过程的损伤演化方程和本构模型、煤岩损伤蠕变非线性大变形损伤理论及有限元数值方法，可用于预测采动岩体的损伤大变形以及蠕变过程，进一步可建立相应的岩层控制理论和技术。

3.3 深部开采的理论与技术问题

(1) 深部开采的工作面布置、采掘技术、运输与提升、通风与降温，包括：深井巷道布置和开采部署；高速掘进，集中生产；简化生产系统，减少巷道掘进

量；深井通风技术（提供新鲜风流、降温）。

(2) 深部开采的地质保障系统理论与技术。

4 结语

我国目前 95% 的能源和 80% 以上的工业原料来自于矿产资源，预计今后 30 年，将是中国历史上最大、最集中需求矿产品的时期。为满足社会与经济发展日益增长的需求，资源开采不断向深部发展。如果我们仍习惯于浅部开采条件下的地质作用特征和矿山压力显现规律来推断和分析深部开采的安全事故及相关现象，显然远远不够。进入深部开采后，我们将面临一个全新的课题，不仅要开展必要的基础研究如高应力下煤岩体的变形性质、压强性质等，而且还需以此为 basis，进一步研究重大工程灾害如煤与瓦斯突出、岩爆、顶板跨落、瓦斯爆炸、煤尘爆炸等的发生条件、发生规律以及预测预报方法、防止措施等，还需提出相应的安全生产保障措施如支护手段、通风方法等。因此必须从灾害发生机理和防治技术基础等方面对深部资源开发中的科学问题和技术难题展开系统和深入的研究，发展针对深部资源开发的新理论和新方法已是势在必行，只有在理论上取得重大突破和创新，才能保证深部开采的技术发展和生产安全。

参 考 文 献

- 1 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望. 见：香山科学会议编. 科学前沿与未来. 北京：中国环境科学出版社，2002. 179~191
- 2 古德生. 金属矿床深部开采中的科学问题. 见：香山科学会议编. 科学前沿与未来. 北京：中国环境科学出版社，2002. 192~201
- 3 冯夏庭. 深部大型地下工程开采与利用中的几个关键岩石力学问题. 见：香山科学会议编. 科学前沿与未来. 北京：中国环境科学出版社，2002. 202~211
- 4 Durrheim R J, Handley M F, Haile A et al. Rockburst damage to tunnels in a deep South African gold mine caused by a $M=3.6$ seismic event. *In*: Gibowicz, Lasocki, eds. Rockburst and Seismicity in Mines, Rotterdam; A A Balkema, 1997. 223~226
- 5 Wagner H. Design and support underground excavation in highly stressed rock. *In*: Herget G, Vongpaisal S, eds. Proc of the 6th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam; A A Balkema, 1987. 1443~1456
- 6 Kawamoto T, Aydan O. A review of numerical analysis of tunnels in discontinuous rock masses. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 1999, 23; 1377~1391
- 7 Boniface A, McKelvey J G, Nthako S et al. Tunnelling project in Southern Africa. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, 13 (1); 3~13
- 8 Kaiser P K. Support of tunnels in burst-prone ground—toward a rational design methodology. *In*: Yang ed. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1993. 13~27
- 9 Ortlepp W D. The design of support for the containment of rockburst damage in tunnel—a

- engineering approach. *In*: Kaiser, McCreath, eds. Rock Supports in Mining and Underground Construction. Rotterdam; A A Balkema, 1992. 593~609
- 10 Ortlepp W D. High ground displacement velocities associated with rockburst damage. *In*: Yang, ed. Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1993. 101~106
- 11 Fairhurst C. Deformation, yield, rupture and stability of excavations at great depth. *In*: Maury, Fourmaintraux, eds. Rock at Great Depth. Rotterdam; A A Balkema, 1989. 1103~1114
- 12 Blake W, Cuvelier D J. Rock support requirements in a rockburst prone environment; Hecla Mining Company's Lucky Friday Mine. *In*: Kaiser, McCreath, eds. Rock Support in Mining and Underground Construction. Rotterdam; A. A. Balkema, 1992. 665~674
- 13 Grodner M. Fracturing around a preconditioned deep level gold mine stope. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1999, 17: 291~304
- 14 Wagner H. Support requirements for rockburst conditions. *In*: Gay N C, Wainwright E H, eds. Proc 1st Int Cong on Rockbursts and Seismicity. Johannesburg; SAIMM, 1984. 209~218
- 15 Kidybinski. Strata Control in Deep Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1990
- 16 Acheampong E, Reddy N, Daehnke A. Methods to address stope face area support in South African gold mines. *In*: Girard, Liebman, Breeds et al., eds. Pacific rocks 2000. Rotterdam; A A Balkema, 2000. 319~326
- 17 Brady B H G. Rock stress, structure and mine design. *In*: Fairhurst, ed. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1990. 311~321
- 18 Brauner G. Rockbursts in coal mines and their prevention. Rotterdam; A A Balkema, 1994. 144
- 19 Gibowicz S J, Kijko A. An Introduction to Mining Seismology. San Diego; Academic Press, 1994. 399
- 20 Salamon M D G. Some applications of geomechanical modelling in rockburst and related research. *In*: Yang, ed. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1993. 297~309
- 21 Hasegawa H S, Wetmiller R J, Gendzwill D J. Induced seismicity in mines in Canada—an overview. *In*: Gibowicz S J ed. Seismicity in Mines. Basel; Birkhäuser Verlag, 1989. 423~453
- 22 Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stoping operations. *In*: Gibowicz, Lasocki, eds. Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1997. 173~177
- 23 Marcak H. The structure of seismic events sequences obtained from polish deep mines. *In*: Gibowicz, Lasocki, eds. Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam; A A Balkema, 1997. 107~109
- 24 周维垣. 高等岩石力学. 北京: 水利水电出版社, 1990. 87~90
- 25 Stacey T R, Wesseloo J. The in situ stress regime in Southern Africa. *In*: Vouille G, Berest P,

- eds. Proc. 9th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam; A A Balkema, 1999. 1189~1192
- 26 李世平等. 岩石力学简明教程. 北京: 煤炭工业出版社, 1996
- 27 Singh J et al. Strength of rocks at depth. *In*: Maury, Fourmaintraux, eds. Rock at Great Depth, 1989. Rotterdam; A A Balkema. 37~44
- 28 Kwasniewski M. Laws of brittle failure and of B-D transition in sandstone. *In*: Maury, Fourmaintraux, eds. Rock at Great Depth. Rotterdam; A A Balkema, 1989. 45~58
- 29 Cleary M. Effects of depth on rock fracture. *In*: Maury, Fourmaintraux, eds. Rock at Great Depth. Rotterdam; A A Balkema, 1989. 1153~1163
- 30 Hoteit N, Ozanam O, Su K et al. Thermo-hydro-mechanical behavior of deep argillaceous rocks. *In*: Girard, Liebman, Breeds et al., eds. Pacific Rocks 2000. Rotterdam; A A Balkema, 2000. 1073~1078

深部开采岩体力学及工程灾害控制研究^{*}

何满潮^{1,2} 谢和平^{1,3} 彭苏萍¹ 姜耀东¹

(1 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3 四川大学, 成都 610065)

摘 要 深部开采工程中产生的岩石力学问题是日前国内外采矿及岩石力学界研究的焦点, 国内外学者通过理论研究、室内及现场实验研究取得了大量的成果。结合作者的研究工作, 总结分析了深部开采与浅部开采岩体工程力学特性的主要区别, 主要表现在“三高一扰动”的恶劣环境、五个力学特性转化特点、四个方面的矿井转型、六大灾害表现形式。针对深部工程所处的特殊地质力学环境, 通过对深部工程岩体非线性力学特点的深入研究, 指出进入深部的工程岩体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, 而是非线性力学系统, 传统理论、方法与技术已经部分或相当大部分失效, 深入进行深部工程岩体的基础理论研究已势在必行。

关键词 岩石力学; 深部开采; 三高一扰动; 工程特性; 灾害控制

1 引言

地下能源与矿产资源的有效、稳定开发和利用是保持国民经济持续发展和国家经济安全战略实施的重要保障。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。

在煤炭资源开采方面, 我国目前已探明的煤炭资源量占世界总量的 11.1%, 石油和天然气仅占总量的 2.4% 和 1.2%。而我国的煤炭资源埋深在 1000m 以下的为 2.95 万亿 t, 占煤炭资源总量的 53%^[1]。根据目前资源开采状况, 我国煤矿开采深度以 8~12m/a 的速度增加, 东部矿井正以每 10 年 100~250m 的速度发展^[2,3]。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、北京门头沟开采深度为 1008m、长广矿开采深度为 1000m。可以预计在未来 20 年我国很多煤矿将进入到 1000~1500m 的深度。我国国有重点煤矿平均采深变化趋

^{*} 国家自然科学基金重大项目(50490270)、国家自然科学基金委员会创新群体基金(50221402)、教育部科学技术研究重大项目(10405)共同资助。

势如图 1 所示。

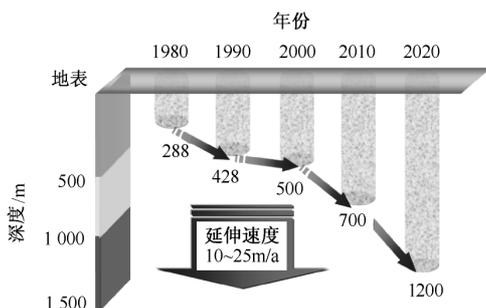


图 1 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势

在其他矿产资源开采方面，随着需求量的不断增长，年需矿石的缺口越来越大，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%^[4]。目前，大批金属与有色金属矿山已转入深部开采，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。预计将有 2/5 的地下矿山在 3~5 年后转入深部开采，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。

而国外地下矿产资源的开采已经进入深部开采阶段。据不完全统计^[5~9]，国外开采超千米深的金属矿山有 80 多座，其中最多为南非。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，已有三座金矿采深超 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 年前，德国平均开采深度已经达 650m，1987 年已将近达 900m。20 世纪 80 年代末，苏联就有一半以上产量来自 600 m 以下深部。国外深部工程开采现状如图 2 所示。

随着开采深度的不断增加，地质环境更加复杂，地应力增大、涌水量加大、

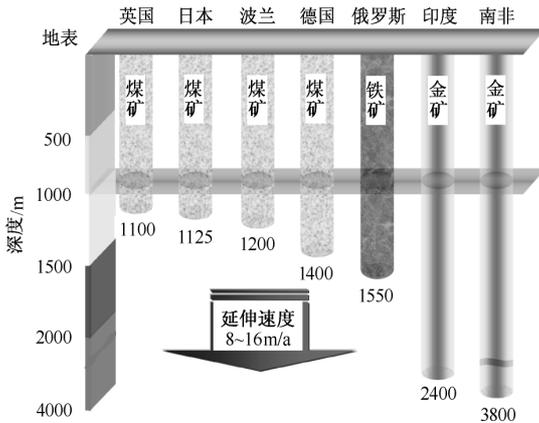


图2 国外深部工程开采现状

地温升高，导致突发性工程灾害和重大恶性事故增加。例如，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。

2 国内外研究现状

深部开采工程岩石力学主要是指在进行深部资源开采过程中而引发的与巷道工程及采场工程有关的岩石力学问题。而目前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^[1,2,4,10~17]。

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（加强稳定掌子面，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，例如，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理论和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，耗资约合 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、密歇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和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。“九五”期间，专业院校做了许多有益工作，取得了重要成果，如中国矿业大学“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“硐室优化及稳定性研究”、中南大学“千米深井岩爆发生机理与控制技术研究”、北京科技大学“抚顺老虎台矿开采引发矿震的研究”。

目前该领域的研究进展主要有以下几个方面。

2.1 深部岩石的变形性质

2.1.1 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 1911 年 von Karman 首先用大理岩进行不同围压条件下的力学实验以来，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，还没有比较成熟的成果。

2.1.2 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，根据瑞典福什马克核废料候选场址的观测记录以及长时蠕变准则的推测，预计该嗣库围岩经历 1000a 后，岩石剥落波及的深度将达到 3m^[41]。

2.1.3 深部岩石的扩容性质

文献 [42] 首次在单轴压缩实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] 的实验进一步表明, 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。

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。如有的矿区从深度小于 600m 变化到 800~1000m 时, 强度为 21~40MPa 的岩石所占的比重从 30% 减少到 24%, 而强度为 81~100MPa 岩石的比重则从 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 (foreshock), 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]。

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。以三轴实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、断裂力学以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];另一方面,以霍布金逊压杆与轻气炮为主要冲击实验设备,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]。综观国内外的研究发现,至今为止人们还没有重视对于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]。

3 深部开采与浅部的区别

深部开采与浅部开采的明显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。

3.1 “三高”

“三高”主要是指高地应力、高地温、高岩溶水压。

(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 ($>20\text{MPa}$),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 ($>40\text{MPa}$)。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。二者的叠合累积为高应力,在深部岩体中形成了异常的地应力场。据南非地应力测定,在 $3500\sim 5000\text{m}$,地应力水平为 $95\sim 135\text{MPa}$ 。如此高的应力状态下进行工程开挖,确实面临严峻挑战。

(2) 高地温。根据量测,越往地下深处,地温越高。地温梯度一般为 $30\sim 50^\circ\text{C}/\text{km}$,常规情况下的地温梯度为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 。有些地区如断层附近或导热率高的异常局部地区,地温梯度有时高达 $200^\circ\text{C}/\text{km}$ 。岩体在超出常规温度环境下,表现出的力学、变形性质与普通环境条件下具有很大差别。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 $0.4\sim 0.5\text{MPa}$ 的地应力变化。岩体温度升高产生的地应力变化对工程岩体的力学特性会产生显著的影响。

(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 1000m 的深部,其岩溶水压将高达 7MPa ,甚至更高。岩溶水压的升高,使得矿井突水灾害更为严重。

3.2 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引起强烈的支承压力作用,使受采动影响的巷道围岩压力数倍、甚至近 10 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。

4 深部开采工程岩体力学特性

4.1 深部工程岩体的地质力学特性

与浅部岩体相比,深部岩体更突显出漫长地质历史背景,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材料,如图 3 所示。

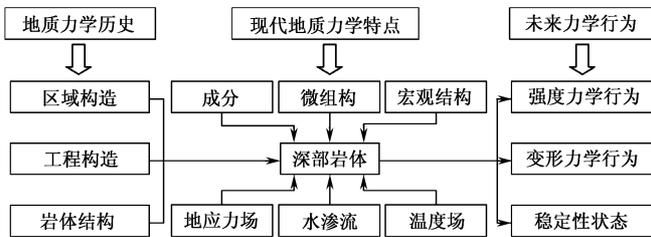


图 3 深部岩体地质力学特点

深部工程岩体产生冲击地压、岩爆、瓦斯突出、流变、底板突水等非线性力学现象的原因,归根结底是由于深部岩体因其所处的地球物理环境的特殊性和应力场的复杂性所致。受其影响,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(虽然由于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,如表 1 所示。

表 1 深部岩体与浅部岩体的受力特点对比

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	自重和地应力	线性	保守	无关	遵循	参数设计
深部岩体	自重和高地应力	非线性	耗散场	密切相关	不遵循	非线性力学设计

4.2 深部工程岩体的工程力学特性

进入深部以后,受“三高—扰动”作用,深部工程围岩的地质力学环境较浅

部发生了很大变化,从而使深部工程围岩表现出其特有的力学特征现象,主要包括以下五个力学特性转化特点。

(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^[62]。然而,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,交替出现的情形,且其宽度按等比数列递增,这一现象被称为区域破裂现象(据 E. I. Shemyakin)。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^[63]。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”^[64,65]。例如,煤矿中有的巷道 20 余年底数不止,累计底臃量达数十米。文献 [33]、[34]、[39] 对南非金矿深部围岩的流变性进行了系统研究,发现其围岩流变性十分明显,巷道围岩最大移近速度达 500mm/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,它仍然具有承载和再次稳定的能力^[65~67],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(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^[48, 68, 69]。

(4) 深部岩体的脆性-延性转化

实验研究表明^[18, 21, 23, 24],岩石在不同围压条件下表现出不同的峰后特性,由此,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,因在“三高一扰动”作用下,岩石表现出的实际就是它的峰后强度特性,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行为^[47]。

(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,而形成渗流通道相对集中,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。

5 深部开采工程灾害表现形式

由于深部岩石力学行为具有明显区别于浅部岩石力学的重要特征，再加上赋存环境的复杂性，致使进入深部开采后以岩爆、突水、顶板大面积来压和采空区失稳为代表的一系列灾害性事故与浅部工程灾害相比较，程度上加剧，频度上提高，成灾机理更加复杂。深部工程灾害主要表现为以下六大灾害形式。

(1) 岩爆频率和强度均明显增加。有关统计资料表明，岩爆多发生在强度高、厚度大的坚硬岩（煤）层中，主要影响因素包括煤层顶底板条件、原岩应力、埋深、煤层物理力学特性、厚度及倾角等。目前的统计资料显示，尽管在极浅的硬煤层中（深度小于 100m，有的甚至在 30~50m）也有发生岩爆的记载，但总的来看，岩爆与采深有密切关系，即随着开采深度的增加，岩爆的发生次数、强度和规模也会随之上升。

(2) 采场矿压显现剧烈。随着采深的增加引起的覆岩自重压力的增大和构造应力的增强，表现为围岩发生剧烈变形、巷道和采场失稳、并易发生破坏性的冲击地压，给顶板管理带来许多困难。

(3) 突水事故趋于严重。自 1984 年 6 月 2 日开滦矿务局范各庄矿发生井下岩溶陷落柱特大突水灾害以来，先后在淮北杨庄矿、义马新安矿、峰峰梧桐矿、皖北任楼矿、徐州张集矿又相继发生特大型奥灰岩岩溶突水淹井事故，初步估计，经济损失超过 27 亿元，同时产生了若干地质环境负效应。

(4) 巷道围岩变形量大、破坏具有区域性。与浅部一样，深部巷道支护的目的仍是尽量保持围岩的完整性以及避免破碎岩体进一步产生位移。深部开采一方面自重应力逐渐增加，同时由于深部岩层的构造一般比较发育，其构造应力十分突出，致使巷道围岩压力大，巷道支护成本增加。据煤炭行业的有关资料，近 10 年巷道支护成本增加了 1.4 倍，巷道翻修量占整个巷道掘进量的 40%。

另外，浅部围岩在临近破坏时往往出现加速变形的现象，工程技术人员常常根据这一现象进行破坏之前的预测预报，且浅部围岩的破坏一般发生在比较局部的范围内。而深部围岩在破坏之前近乎处于不变形状态，破坏前兆非常不明显，使破坏预测预报十分困难，从而造成深部围岩的破坏往往是大面积的发生，具有区域性，如巷道大面积的冒顶垮落等。

(5) 地温升高、作业环境恶化。深部开采条件下，岩层温度将达到摄氏几十度的高温，如俄罗斯千米平均地温为 30~40℃，个别达 52℃，南非某金矿 3000m 时地温达 70℃。地温升高造成井下工人注意力分散、劳动率减低，甚至无法工作。

(6) 瓦斯涌出量增大。随着煤矿采深的增加，瓦斯含量迅速增加，并造成瓦斯灾害事故的频繁发生。近年来，由于瓦斯突出和爆炸引起的死亡 10 人以上的

煤矿事故 70% 出现在中国采深 600 m 以下的矿区。在另一方面，深部煤层处于较高的温度环境下，更易引起煤层的自燃发火、触发矿井火灾、瓦斯爆炸事故的发生。

6 深部开采四个矿井转型

浅部开采时所确定的矿井类型，由于进入深部开采之后地质力学环境的改变和力学性质的转化，矿井的类型也发生转变。在矿井转型期间，人们的思想尚未认知，特别容易发生事故。因此，转型期将（已）是事故多发期。矿井转型主要表现在以下四个方面。

（1）硬岩矿井向软岩矿井的转化。浅部原岩体多数处于弹性应力状态，但进入深部以后，在高地应力以及采掘扰动力等的作用下，浅部表现为普通坚硬的岩石，在深部可能表现出大变形、难支护的软岩特征，即矿井由浅部的硬岩矿井转化为软岩矿井。

（2）低瓦斯矿井向高瓦斯矿井的转变。浅部开采条件下，由于煤层中瓦斯气体运移通道较通畅，通过上部岩体裂隙和煤层露头可以进行散发，进行井下煤炭开采时，矿井内部积聚的瓦斯较少，为低瓦斯矿井。在深部开采的条件下，由于瓦斯运移通道不畅通，大量的瓦斯气体非均匀地分布在煤岩体的裂隙和空隙之间，在井下施工过程中，释放到巷道或工作面内，从而造成瓦斯气体含量急剧增大，使矿井在深部转变为高瓦斯矿井。

（3）非突矿井向突出矿井的转变。在深部高应力作用下，煤层内瓦斯气体压缩达到极限，煤岩体中积聚了大量的气体能量，由于工程扰动的作用，造成压缩气体的突然、急剧、猛烈释放，导致工作面或巷道的煤岩层结构瞬时破坏而产生煤与瓦斯突出，从而使浅部不存在煤与瓦斯突出倾向的非突矿井，进入深部以后转变为煤与瓦斯突出灾害频发的突出矿井。另外，在高承压水的作用下，煤岩层内部积聚了大量的液体能量，当能量聚集到一定程度，在开挖扰动作用或工作面回采过程中巷道的顶底板向采掘临空区发生突然倾出，就会造成突水事故的发生，从而使浅部不产生突水灾害的非突矿井，进入深部后转变为水害频发的突出矿井。

（4）非冲矿井向冲击矿井的转变。在浅部开采条件下，由于工程围岩所承受的应力荷载主要为自重应力，一般不会产生冲击地压。进入深部以后，地质构造变得复杂、自重应力增大，煤岩体积聚了大量的固体能量，在深部地应力、构造应力以及工程扰动的作用下，使得积聚的能量大于矿体失稳和破坏所需要的能量，造成整个煤岩系统失去结构稳定性，发生冲击地压。从而使得浅部没有冲击倾向性的非冲矿井，进入深部后转变为冲击地压频发的冲击矿井。