

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
www.sciencep.com

深部开采

基础理论与工程实践

陈国才 王德顺 孙德胜 主编

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

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, 2006

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>

新 华 印 刷 厂 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:BS(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:50.00 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 余年底瞰不止,累计底瞰量达数十米。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几个基础科学问题。

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]。

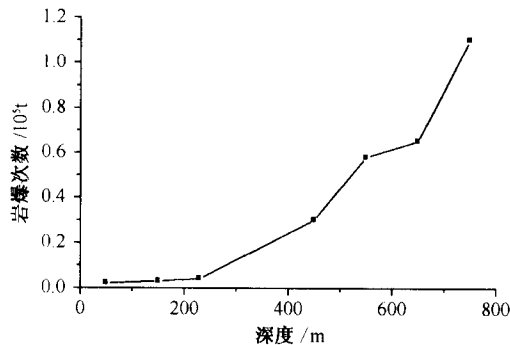


图 1 岩爆次数与深度的关系^[18]

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 $\sigma_c/\sigma_3=0.5\sim 1.25$ 。