

理论研究

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 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]

摘 要 深部开采工程中产生的岩石力学问题是目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。本文结合笔者的研究工作, 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%。而我国埋深在 1000 m 以下的煤炭资源为 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每年 8~12 m 的速度增加, 东部矿井正以每 10 年 100~250 m 的速度发展^[2-3]。近年来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 1197 m、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。

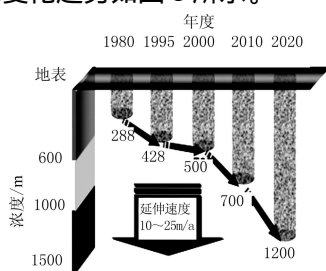


图1 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势

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/年, 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],国外开采深度超千米的金属矿山有 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,西德平均开采深度已经达 650m,1987 年已将近达 900m;原苏联在 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 2 所示。

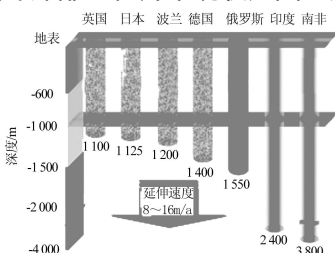


图 2 国外深部工程开采现状

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、地温升高,导致突发性工程灾害和重大恶性事故增加,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,原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召开“深部岩石力学”问题国际会议,并出版了相关的专著。近二十年来,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、及时进行锚喷支护施工、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,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 Idaho 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,中国矿业大学在深部煤矿开发中灾害预测和防治研究、武汉岩土所在峒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》等都做了许多有益工作,取得了重要成果。

目前该领域的研究主要进展有以下几个方面。

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) 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^[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^[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^[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 1000 MPa 甚至以上时仍表现为脆性。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^[22-23]用岩石破坏时的应变值作为脆 - 延转化判别标准。

文^[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^[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^[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^[28]给出了地球岩石圈各种强度的推测曲线,文^[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) 深部岩石的流变特性

在深部高应力环境中,岩石具有强时效效应,表现为明显的流变或蠕变。文^[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^[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^[36]讨论了该参数的适用范围, 文^[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^[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 500mm/月的水平^[39]。

岩石在高应力和其他不利因素的共同作用下, 其蠕变更为显著, 这种情况在核废料处置中十分普遍。例如, 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, 同样会对存贮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, 预计该硐库围岩经历 1000 年后, 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^[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^[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^[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^[23]根据大量实验数据, 总结了在非常高的侧向应力(高达 700 MPa)下的岩石强度准则, 提出了一个非线性的岩石强度准则。文^[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]。

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,应成为深部开采中需要迫切研究的课题。

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]。纵观国内外的研究,我们发现,至今为止还没有重视在高应力状态下的岩石动态特性与碎裂机理的研究^[59-60]。有限的研究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 深部开采与浅部开采的区别

深部开采与浅部开采的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水平应力集中则远大于工程岩体的强度($>40\text{ MPa}$)。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 $3500\sim 5000\text{ m}$ 之间,水平地应力为 $95\sim 135\text{ MPa}$ 。

(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 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 不等,常规情况下的地温梯度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。断层附近或导热率高的异常局部地区,地温梯度有时高达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。岩体在超常规温度环境下,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 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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,随着地应力及地温升高,同时会伴随岩溶水压的升高,在采深大于 1000 m 时,其岩溶水压将高达 7 MPa ,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。

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，深部岩体更凸现出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。

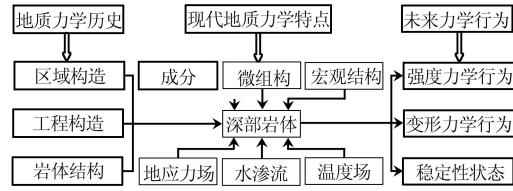


图 3 深部岩体地质力学特点

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	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

4. 2 深部工程岩体的工程力学特性

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很大变化，从而使深部工程围岩表现出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，一是岩体表现为持续的强流变特性，不仅变形量大，而且具有明显的“时间效应”^[64-65]，如煤矿中有的巷道 20 余年底脑不止，累计底脑量达数 10m。文^[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 500 mm/月。二是

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

试验研究表明^[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系列灾害性事故与浅部工程灾害相比较, 程度加剧, 频度提高, 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 100 m, 有的甚至在 30~50 m)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表明, 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局部范围内。而深部围岩在破坏之前几乎处于不变形状态, 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 600m 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,进入深部开采后,由于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,可通过上部岩体裂隙和煤层露头进行散发,进行煤炭开采时,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) 非冲击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。

7 深部开采十大理论问题

由于深部工程所处的复杂地质力学环境及其工程岩体力学特性的特殊性,深部岩体力学研究重点为以下十大理论问题。

(1) 深部工程岩体的力学特性

深部“三高一扰动”的复杂环境,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,也是导致深部开采中灾变事故出现多发性和突发性的根本原因所在。因此,深部岩体长期处于“三高”环境下,由于采掘扰动所及多场的耦合作用下表现出的特殊力学行为是深部资源开采所面临的核心科学问题。

(2) 深部工程岩体的连续性问题

基于浅部开采条件下建立起来的变形体力学理论(连续体理论)都遵循一个基本假设,即物体是连续的,也就是假设整个物体的体积都被组成这个物体的物质微元连续分布占据。在此前提下,物体运动的一些物理量,如应力、形变、位移等才可能是连续变化的,才能用坐标的连续函数来表示它们的变化规律。但是,在深部工程中,上述定义的极限情况实际上是不存在的。因为岩石到晶粒尺寸范围,已出现不连续性,而趋于比晶粒或分子间距小的某一值。理论上的应力是某点的应力,物质世界的应力都是某一微元的平均应力,且岩体本身包含有许多微裂隙、空穴、节理,材料组织具有非均匀非连

续性。这就表明,在深部岩体力学领域,不能原封不动地借用经典理论力学的连续性假设和定义,用连续介质力学理论来分析高度非连续介质的深部岩体力学问题,必须考虑假设的合理使用范围和各物理量的适用定义。

(3) 深部工程岩体的本构关系及参数确定方法

浅部开采条件下岩石本构关系研究方法可概括为三类:经典唯象学方法、反分析经典力学方法和正演分析经典力学方法。实践证明,局限于原始的经典唯象学研究方法和经典力学研究方法都不能从根本上解决深部工程岩体的本构关系问题。因为深部工程的研究对象是大尺度范围下的工程岩体,在漫长的地质历史过程中,经历了多次地质构造应力场的作用和改造,节理裂隙渐趋发育,岩体损伤程度愈趋加强,在“三高一扰动”的复杂环境下,深部工程岩体的本构关系既不是岩块的本构关系,也不是岩体结构面的本构关系。结构面和岩块在空间是一定组合状态,又在地下水等复杂因素影响之下,所表现出来的应力应变之间的关系,其规律非常复杂。针对这样一个工程模型,简单的借用经典力学的理论方法去理解和研究是不合适的,必须从深部开采工程的角度去研究,重新建立工程岩体的本构关系,解决岩体参数确定问题。

(4) 深部工程岩体的强度确定方法

在浅部开采条件下,由于所处的地应力水平比较低,其工程岩体强度一般采用岩块的强度即可,即在实验室对岩块进行加载直至破坏所确定的强度。而在深部开采条件下,由于地应力水平比较高,工程开挖后,工程岩体在高围压作用下,一个或两个方向上应力状态的改变所表现出的强度变化,并不是简单的表现在受拉或受压,而是复杂的拉压复合状态,即径向产生卸载,而切向产生加载,因此,其工程岩体强度就不能简单的用岩块强度来确定,必须建立符合深部开采特点的工程岩体拉压复合强度确定理论。

(5) 深部工程岩体的强度破坏准则

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(ductile),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。因此,传统的浅部岩体强度破坏准则已无法适用于深部工程岩体,必须建立适合深部“三高一扰动”复杂环境下的深部工程岩体的强度破坏准则。

(6) 深部岩体结构的唯一性问题

一般说来,岩体力学理论将岩体结构分为整体结构、块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构。划分的依据是建立在对结构面、结构体形成过程和所具备特性研究的基础上,根据结构面发育程度和特性、结构体组合排列和接触状态,深入探讨他们的工程地质特性和在工程作用下不同岩体的不同反映。但是,在深部开采工程中,由于工程规模或尺寸的变化,岩体结构也是相对的,因此,必须针对深部工程岩体所表现出的工程地质力学特性建立岩体结构类型划分参考系,从而合理确定深部工程岩体结构。

(7) 深部工程岩体的大变形问题

从深部工程岩体所表现的变形力学特性来看,其工程岩体力学问题是大变形问题,如巷道的底臃、收帮等,它们有的为几十厘米,有的达到几米。目前沿用的弹塑性理论虽然考虑了材料的物理非线性问题,但严格地从几何理论角度看,仍然是小变形近似理论。因此,用小变形假设为前提的弹塑性理论来解决深部工程岩体大变形问题是不合适的。

(8) 深部工程岩体的非线性力学设计方法

在浅部开采条件下,由于工程围岩所处的力学环境比较简单,因此,在进行稳定性控制设计时,采用传统的线性设计理论即可满足。而在深部“三高一扰动”的特殊地质

力学环境下,深部工程岩体表现出明显的非线性力学特性,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,这就使得在进行稳定性控制设计时,就不能简单的采用一次线性设计,而必须考虑采用先进行变形设计,在进行强度设计的二次以至更复杂的多次非线性大变形力学稳定性控制设计理论。

(9) 深部巷道工程岩体的荷载计算方法

浅部工程围岩所属的线性力学系统决定了其巷道工程岩体的荷载计算采用参数计算方法即可。而深部工程岩体所属非线性力学系统决定深部巷道工程施工过程中会表现出明显的过程相关性,即不同的卸(加)载顺序将会产生不同的围岩损伤、变形结果,因此,必须从深部工程岩体的非线性力学特性出发,以确定合理的工程卸(加)载顺序为基础,建立起深部巷道工程岩体的荷载计算模型,并推导出相应的计算公式,从而确定合理的、安全的、经济的支护强度,保证深部巷道工程岩体的稳定性。

(10) 深部工程岩体的稳定性及灾害控制对策

在浅部开采条件下,由于所处的地应力水平比较低,工程开挖后,围岩一般不会产生破坏,因此,采用一次支护即可实现工程的稳定性。而深部开采条件下,工程开挖后,在高于工程围岩强度的围压作用下,工程围岩就会产生破坏,此时采用简单的一次支护就不能满足工程稳定性要求,必须采用二次支护或多次支护才能实现工程的稳定性。因此,由浅部建立起来的稳定性控制理论已不再适合,必须建立适合深部开采工程的二次(支护)稳定性控制理论。

深部条件下,工程岩体在高地应力、地下水、瓦斯、温度等多场作用下稳定与非稳定变形,破坏状态及转化机理、条件和规律,掌握深部多相介质、多场耦合作用下工程灾害的频度、强度等特征,揭示深部工程灾害诱发机理和成灾过程,并提出相应的预测方法及控制对策,对于解决随着开采深度

的增加,以岩爆、突水、煤与瓦斯突出、顶板大面积来压和采空区失稳为代表的工程灾害防治问题具有重要意义。

8 结 语

深部煤炭资源是 21 世纪我国主体能源的后备储量,进行深部开采工程岩石力学基础理论研究势在必行。“三高一扰动”的复杂环境,使深部开采遇到了岩爆、突水、瓦斯爆炸等地质灾害,其成灾机理及控制技术是采矿工程领域面临的挑战性、高难度课题。与一般地表工程不允许进入塑性破坏状态不同,深部开采力学问题是研究开采围岩破坏后与支护系统相互作用达到二次稳定的复杂力学问题,而这种力学问题直接与采场工作人员的生命息息相关。虽然目前对于深部开采工程研究已取得了部分成果,但对侧重技术、注重个案,深层次的基础研究重视不够,特别是由于“三高一扰动”的特殊地质力学环境,深部工程岩体表现出明显的非线性力学特性,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全部失效。因此,大力开展深部开采工程岩石力学基础理论研究,不仅能为深部资源开发提供可靠的理论基础,而且能为我国经济可持续发展和国家安全战略的实施提供能源和资源保证。

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 [A]. 科学前沿与未来(第六集) [C]. 香山科学会议主编, 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 179-191.
- [2] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望 [A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 中国岩石力学与工程学会主编, 北京: 科学出版社, 2004. 88-94.
- [3] 晏玉书. 我国煤矿软岩巷道围岩控制

- 技术现状及发展趋势 [A]. 何满潮主编: 中国煤矿软岩巷道支理论与实践 [C]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996. 1-17.
- [4] 古德生. 金属矿床深部开采中的科学问题 [A]. 科学前沿与未来 (第六集) [C]. 香山科学会议主编, 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 192-201.
- [5] Diering D H, Ultra-Deep Level Mining. Future Requirements [J]. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997, 97 (6): 249-255.
- [6] Gurtunca R G, Keynote Lecture, Mining Below 3000 m and Challenges for the South African Gold Mining Industry [A]. Proceedings of Mechanics of Jointed and Fractured Rock [C]. Balkema, 1998, 3-10.
- [7] Diering D H. Tunnels under pressure in an ultra-deep wifwatersrand gold mine [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 319-324.
- [8] Vogel M, Andrast H P. Alp transit-safety in construction as a challenge, health and safety aspects in very deep tunnel construction [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15 (4): 481-484.
- [9] Johnson R A, Schweitzer, Mining at ultra-depth, evaluation of alternatives [A]. In: Proceedings of 2nd North America Rock Mechanics Symposium [C]. NARMS ? 96, Montreal, 1996. 359-366.
- [10] Sellers E J, Klerck P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels [J]. Tunneling And Underground Space Technology, 2000, 15 (4): 463-469.
- [11] Kidybinski. Strata control in deep mines [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [12] Fairhurst C. Deformation, yield, rupture and stability of excavations at great depth [A]. Rock at Great Depth [C]. Maury and Fourmaintraux eds. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989, 1 103-1 114.
- [13] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations [A]. Rockburst and Seismicity in Mines [C]. Gibowicz and Lasocki eds, Rotterdam: A. A. Balkema, 1997, 173-177.
- [14] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题 [A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 中国岩石力学与工程学会主编, 北京: 科学出版社, 2004. 10-17.
- [15] 钱七虎. 深部地下工空间开发中的关键科学问题 [R]. 第 230 次香山科学会议《深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题》, 2004.
- [16] 钱鸣高. 20 年来采场围岩控制理论和实践的回顾 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 19 (1): 1-4.
- [17] Jun Sun, Sijing Wang. Rock mechanics and rock engineering in china: developments and current state-of-the-art [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, (37): 447-465.
- [18] Paterson M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. Bull. Geol. Soc. Am., 1958, 69: 465-467.

- [19] Mogi K. Deformation and fracture of rocks under confining pressure: elasticity and plasticity of some rocks. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 1965, 43: 349-379.
- [20] Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 1966, 44: 215-232.
- [21] Paterson M S. *Experimental Rock Deformation-the Brittle Field*. Berlin: Springer, 1978.
- [22] Heard H C. Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1960, 79: 193-226.
- [23] Singh J et al. Strength of rocks at depth [A]. In: Maury & Fourmaintraux eds. *Rock at great depth*, 1989. Rotterdam: A. A. Balkema. 37-44.
- [24] Kwasniewski M A. Laws of brittle failure and of B-D transition in sandstone. In: Maury and Fourmaintraux eds. *Rock at Great Depth*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1989, 45-58.
- [25] 陈颙, 黄庭芳. 岩石物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001. 17-38.
- [26] Meissner R., Kuszniir N. J.. Crustal viscosity and the reflectivity of the lower crust. *Ann. Geophys.*, 1987, 5B: 365-373.
- [27] Ranalli G, Murphy D C. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 1987, 132: 281-295.
- [28] Shimada M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures. *Tectonophysics*, 1993, 217: 55-64.
- [29] Sibson R H. Fault rock sand fault mechanism. *J. Geol. Soc. London*, 1977, 133: 191-213.
- [30] Sibson R H. Power dissipation and stress levels on faults in the upper crust. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 6239-6247.
- [31] Blacic J. D. Importance of creep failure of hard rock joints in the near field of a nuclear waste repository [A]. In: *Proc. Workshop on Nearfield Phenomenon in Geologic Repositories for Radioactive Waste.*, 1981, 121-132.
- [32] Pusch R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock. In: Hudson J A ed., *Comprehensive rock engineering*, Pergamon Press, Oxford, 1993, 227-241.
- [33] Malan D F. Time-dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1999, 32: 123-155.
- [34] Malan D F. Simulation of the time-dependent behavior of excavations in hard rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35 (4): 225-254.
- [35] Muirwood A M. Tunnels for roads and motorways. *Quart. J. Eng. Geol.*, 1972, 5: 119-120.
- [36] Barla G. Squeezing rocks in tunnels. *ISRM New J.* 1995, 2: 44-49.
- [37] Aydan O, Akagi T, Kavamoto T. The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1996, 29: 125-143.
- [38] Malan D F, Basson F R P. Ultra

- Deep Mining: the increase potential for squeezing conditions. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1998, 353-363.
- [39] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stoping operations. In: Gbrowicz and Lasocki eds, Rockburst and seismicity in mines, Rotterdam: Balkema, 1997. 173-177.
- [40] Kwon S, Park B Y, Kang C H. Structural stability analysis for a high-level underground nuclear waste repository in granite. In: Girard J., Liedman M., Brees C., Doe T. eds., Pacific Rocks 2000-Proc. 4th North American Rock Mech. Symp., 2000. 1 279-1 285.
- [41] Pusch R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock. In: Hudson J. A. ed., Comprehensive rock engineering, Pergamon Press, Oxford. 1993. 227-241.
- [42] Bridgman P W. Volume changes in the plastic stages simple compression. J. Appl. Phys., 1949, 20: 1 241-1 251.
- [43] Matsushima S. On the flow and fracture of igneous rocks and on the deformation and fracture of granite under high confining pressure. Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., 1960, 36: 20.
- [44] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1990. 87-90.
- [45] 李世平, 吴振业, 贺永年等. 岩石力学简明教程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [46] Shimada M, Liu J T. Temperature dependence of granite strength under high confining pressures and the brittle-ductile hypothesis for seismogenic zones in the crust [A]. In: Proc. Int. Conf. on "Deformation Mechanism, Rheology and Microstructures", 1999, 46.
- [47] Cleary M. Effects of depth on rock fracture [A]. In: Maury and Fourmaintraux eds. Rock at Great Depth [C]. Rotterdam: A. A. Balkema. 1989. 1 153-1 163.
- [48] Gbrowicz S J, Kijko A. An introduction to mining seismology. San Diego: Academic Press, 1994. 399.
- [49] Ortlepp W D. High ground displacement velocities associated with rockburst damage. In: Yang ed, Rockburst and seismicity in mines, Rotterdam: Balkema, 1993. 101-106.
- [50] Marcak H. The structure of seismic events sequences obtained from Polish deep mines. In: Gbrowicz and Lasocki eds., Rockburst and seismicity in mines, Rotterdam: Balkema, 1997. 107-109.
- [51] Tang C A, Tham L G, Lee P K K, et al. Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, 37, 555-569.
- [52] 冯夏庭, 王泳嘉. 深部开采诱发的岩爆及其防治策略的研究进展 [J]. 中国矿业, 1998, 7 (5): 42-45.
- [53] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [54] Kirzhner F, Rosenhouse G. Numerical analysis of tunnel dynamic response to earth motions. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15 (3): 249-258.
- [55] Chen S G, Cai J G, Zhao J, et al. Discrete element modeling of an un-

- derground explosion in a jointed rock mass [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2000, 18 (2): 59-78.
- [56] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [57] Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, 37 (7): 1 055-1 060.
- [58] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G. Lindqvist, P. -A. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, 37 (5): 745-762.
- [59] 古德生. 金属矿床深部开采中的科学问题 [A]. 见: 香山科学会议主编. 科学前沿与未来 (第六集) [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 192-201.
- [60] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与碎裂诱变 [A]. 见: 香山科学会议主编. 科学前沿与未来 (第六集) [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 101-108.
- [61] Dyskin A. V. On the role of stress fluctuations in brittle fracture [J]. *Int. J. Fracture*, 1999, 100: 29-35.
- [62] 付国彬. 巷道围岩破裂范围与位移的新研究. *煤炭学报*, 1995, 20 (3): 304-310.
- [63] 方祖烈. 软岩巷道维护原理与控制措施 [A]. 何满朝主编. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践 [C]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [64] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23 (7): 2 396-2 401.
- [65] 翟新献, 李化敏. 深井软岩巷道围岩变形特性的研究 [J]. *煤*, 1995, 4 (5): 24-26.
- [66] 付国彬, 姜志方. 深井巷道矿山压力控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [67] 靖洪文. 深部巷道破裂围岩位移分析及应用 [博士学位论文] [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- [68] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布类型机理及防治研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22 (11): 1 844-1 851.
- [69] Wagner H. Support requirements for rockburst conditions [A]. In: Gay N C, Wainwright E H ed. *Proc 1st Int Cong on Rockbursts and Seismicity* [C]. Johannesburg, SA IMM, 1984. 209-218.

第一作者简介 何满潮 男, 1956 年出生, 博士。现任中国矿业大学 (北京校区) 力学建筑学院院长、教授、博士生导师。中国岩石力学与工程学会常务理事, 中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会主任、中日地层环境力学学校际研究中心常务主任、国际岩石力学学会会员、国际工程地质协会会员。主持完成了国家重大基金项目、国家杰出青年科学基金、国家教委跨世纪人才基金等国家级、省部级重点及其他科研项目 30 余项。在国内外发表论文 100 余篇, 出版专著 6 部, 主编论文集 3 部。获国家发明专利 1 项, 实用新型专利 10 项。获国家科技进步二等奖 2 项、省部级一等奖 3 项、二等奖 1 项、三等奖 4 项。先后获国家级和省部级荣誉奖 8 次。

(收稿日期: 2006-08-20; 责任编辑: 王方荣)