

深部开采岩体力学研究

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(北京校区), 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 四川大学, 四川 成都 610065)

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、室内及现场试验研究取得了大量的成果。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、5个力学特性转化特点、4个方面的矿井转型、6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

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)16 - 2803 - 11

STUDY ON ROCK MECHANICS IN DEEP MINING ENGINEERING

HE Man-chao^{1, 2}, XIE He-ping^{1, 3}, PENG Su-ping¹, JIANG Yao-dong¹

(1. *China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3. *Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract: The rock mechanics problems caused by the deep mining engineering are the focuses in the fields of mining engineering and rock mechanics. A lot of achievements were obtained by scholars through theoretical study, laboratory test, and in-site test. Based on the previous studies of authors, the main differences in engineering mechanics for the characters of rock mass between shallow mining and deep mining are summarized. They are complicated as follows: (1) mining environments with three “high” and one “disturbance”—high ground stress, high earth temperature, high karst water pressure, and mining disturbance; (2) five transform features of mechanical characters; (3) four changes of coal mine types; and (4) six representing types of engineering hazards. By the detailed research on the nonlinear mechanical characters of engineering rock mass in deep mining under complicated geology mechanical environments; it is pointed out that the mechanical system, which is subordinated to engineering rockmass at depth, is the nonlinear mechanical system, but not the linear mechanics system subordinated to engineering rock mass at shallow. The classic theory, methods, and technology are partly or most entirely invalid. So, it is very important to study the basic theory of rock mechanics in deep engineering.

Key words: rock mechanics; deep mining; three “high” and one “disturbance”; engineering characters

1 引言

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。

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

收稿日期: 2005 - 03 - 05; 修回日期: 2005 - 04 - 20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490270); 国家基金委创新群体基金资助项目(50221402); 教育部科学技术研究重大项目(10405)

作者简介: 何满潮(1956 -), 男, 博士, 1985年毕业于长春地质学院水文工程地质系工程地质专业, 现任教授、博士生导师、国家自然科学基金重大项目(50490270)首席科学家, 主要从事岩石力学理论及工程方面的教学与研究工作。E-mail: hemanchao@263.net.

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]。

2 国内外深部工程现状

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,其中最多为南非。南非绝大多数金矿的开采深度大都在 1 000 m 以下。其中,Anglogold 有限公司的西部深井金矿,采矿深度达 3 700 m,West Driefovten 金矿矿体赋存于地下 600 m,并一直延伸至 6 000 m 以下。印度的 Kolar 金矿区,已有三座金矿采深超 2 400 m,其中钱皮恩里夫金矿共开拓 112 个阶段,总深 3 260 m。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 910 m,开拓深度到 1 570 m,预计将来达到 2 000~2 500 m。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 1 000 m。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达 650 m,1987 年已将近达 900 m;原苏联在 20 世纪 80 年代末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 1 所示。

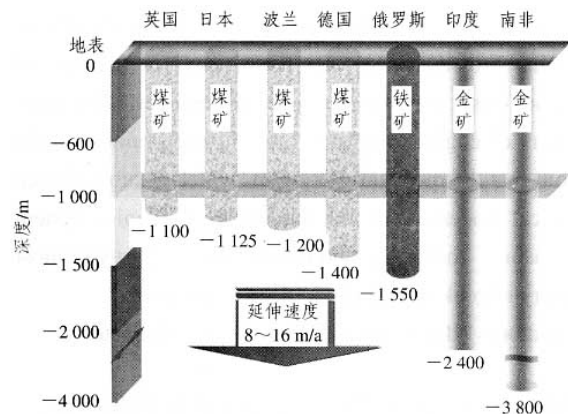


图1 国外深部工程开采现状

Fig.1 Present situation of deep mining engineering abroad

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 100~250 m/(10 a) 的速度发展^[11, 17, 18]。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 1 197 m、开滦赵各庄矿开采深度为 1 159 m、徐州张小楼矿开采深度为 1 100 m、北票冠山矿开采深度为 1 059 m、新汶孙村矿开采深度为 1 055 m、北京门头沟开采深度为 1 008 m、长广矿开采深度为 1 000 m。在金属矿开采方面,红透山铜矿目前开采已进入 900~1 100 m 深度,冬瓜山铜矿现已建成 2 条超 1 000 m 竖井来进行深部开采,弓长岭铁矿设计开拓水平 750 m,距地表达 1 000 m,夹皮沟金矿二道沟坑口矿体延深至 1 050 m,湘西金矿开拓 38 个中段,垂深超过 850 m。此外,还有寿王坟铜矿、凡口铅锌矿、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 1 000~1 500 m 的深度。同时,在今后 10~20 a 内,我国金属和有色金属矿山将进入 1 000~2 000 m 深度开采。我国国有重点煤矿平均采深变化趋势如图 2 所示。

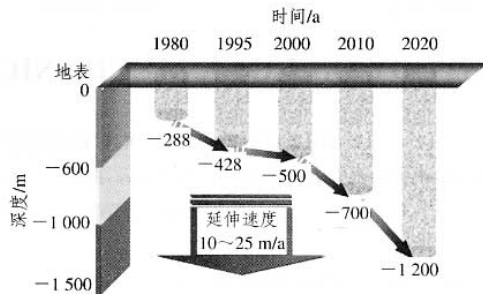


图2 我国国有重点煤矿平均采深变化趋势

Fig.2 Development trends of average mining depth of key coal mines in China

3 国内外深部研究现状

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,原苏联的权威学者就提出对超过 1 600 m 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 1 600 m 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 a 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,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10a的2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,对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,且具有开展相关研究的基础与条件。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、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》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。

3.1 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试验研究。文[18]在室温下对大理岩进行了试验,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]发表过类似的试验结果,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1 000 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个砂岩试件的试验数据,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,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[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400 m,该准则是否适用于深部硬岩目前尚无定论。

文[33, 34, 38, 39]系统地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500 mm/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,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 1 000 a 后,岩石剥落波及的深度将达到 3 m^[41]。

(3) 深部岩石的扩容性质

文[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[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。

3.2 深部岩石强度和破坏特征

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 600 m 变化到 800~1 000 m 时,强度为 21~40 MPa 的岩石所占的比重从 30%减少到 24%,而强度为 81~100 MPa 岩石的比重则从 5.5%增加到 24.5%,且岩石更脆,更容易发生岩爆。

文[23]根据大量试验数据,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]根据试验发现,在 200 °C~280 °C 和不同围压的条件下,花岗岩具有较低的强度值,据此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]。

3.3 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试验设备,对岩石在高应力状态下的物理特性与破坏进行了试验研究,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试验研究,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,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]。

4 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(见图3)。

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,归结结

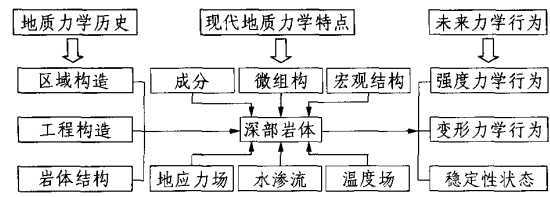


图3 深部岩体地质力学特点

Fig.3 Characters of geological mechanics of rock mass at depth

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(见表1)。

5 深部开采岩体的工程力学特点

5.1 “三高一扰动”的恶劣环境

深部岩体地质力学特点决定了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。

5.1.1 “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 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 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3 500~5 000 m深度，地应力水平为95~135 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30~50 ℃/km不等，常规情况下的地温梯度为30 ℃/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 ℃/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 ℃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，随着地应立即低温的升高，同时将会伴随着岩溶水压的升高，在采深大于1 000 m的深部，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。

5.1.2 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。

5.2 5个力学特性转化特点

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很大变化，从而使深部巷道围岩表现出其特有的力学特征现象^[11]，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3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

表1 深部岩体与浅部岩体的受力特点对比

Table 1 Mechanical characteristics of rock mass in deep mines compared with those of shallow mines

| 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 |

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Shemyakin E I)。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],如煤矿中有的巷道 20 余年底臃不止,累计底臃量达数十米。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。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^[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-延转化

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。

5.3 四类矿井转型

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 4 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。

5.4 6 大灾害表现形式

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,程度上加剧,频度上提高,成灾机理更加复杂,具体表现如下:

(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,近10 a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3000 m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。

5.5 十大理论问题

由于深部工程所处的复杂地质力学环境,深部岩体力学研究浅部相比主要存在十大理论问题,具体表现在:(1)深部工程岩体的力学特性;(2)深部工程岩体的连续性问题;(3)深部工程岩体的本构关系及参数确定方法;(4)深部工程岩体的强度确定方法;(5)深部工程岩体的强向破坏准则;(6)深部岩体结构的唯一性问题;(7)深部工程岩体的大变形问题;(8)深部工程岩体的非线性力学设计方法;(9)深部巷道工程岩体的荷载计算方法;(10)深部工程岩体的稳定性控制对策及技术。

6 深部开采工程今后的研究重点

虽然目前对于深部开采工程研究已取得了一部分成果,总的来看,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,根据我国煤炭资源开采情况,要保证我国主体后备能源供给,深入开展1000~1500 m深井开采基础理论研究迫在眉睫。

6.1 深部开采工程中的岩石力学问题

由于处于“三高一扰动”的复杂力学环境,使得深部岩石力学行为以及深部灾害特征与浅部明显不同,基于浅部开采建立起来的传统理论已不再适合于深部开采,主要表现在:

(1) 强度确定理论

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。

(2) 稳定性控制理论

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。

(3) 设计理论

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奏效。而深部开采环境下,由于工程围岩所表现出的非线性力学特性,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,而必须考虑采用二次甚至更复杂的多次非线性大变形力学稳定性控制设计理论。

6.2 今后研究重点

针对深部开采工程中存在的岩石力学问题,今后主要研究方向集中在深部岩石力学基本特性、深部开采工程稳定性控制、深部开采地表环境损伤控制以及深部厚煤层综放开采基础理论研究等方面。

6.2.1 深部的概念及其分类体系

虽然目前国内外对深部工程中所引发的岩石力学问题的研究非常重视,但是在“深部”、“深部工

程”等一系列概念上差异较大,至今也没有明确的概念或划分标准,在一定程度上影响了该领域理论与技术研究的发展及交流。因此,针对深部工程岩体所处“三高一扰动”的特殊地质力学环境,对深部的概念、分类体系及其评价指标进行科学定义,是推动深部岩体力学基础理论研究的当务之急。

6.2.2 深部岩石力学基本特性研究

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害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。其中,深部高应力场成因及多个应力场的耦合作用状态研究、深部复杂应力状态下岩体拉压复合强度确定方法及其灾变机理将是今后研究的重点。

6.2.3 深部开采工程稳定性研究

与一般地表工程不允许进入塑性破坏状态不同,深部开采工程稳定性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,包括深部矿层采动引起顶板破断后,采场局部顶板结构与支架相互作用,达到二次稳定的作用机理以及与采场相配套的巷道围岩产生塑性大变形后与支护体系相互作用达到二次稳定的作用机理。同时,由于深部采动条件下工作面回采所形成的采动应力场与巷道掘进形成的开挖应力场相互耦合叠加,形成了复杂的三维应力场,其采动应力分布及其与回采空间多维、动态的时空规律以及支承压力区范围及峰值应力等也将产生很大变化。因此,应在深入分析深部采场及巷道围岩采动应力时空分布规律的基础上,结合深部岩体非线性力学特性的研究,探讨深部开采采场及巷道一体化稳定性非线性力学控制对策。

6.2.4 深部工程灾害发生机理及其控制对策研究

深部条件下,由于“三高一扰动”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害事故出现多发性和突发性的根本原因所在。因此,深入研究岩体在高地应力、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。

6.2.5 深部厚煤层综放开采基础理论研究

厚煤层综放开采是我国具有知识产权的、具有国际领先水平的技术。在深部“三高一扰动”复杂环境下,工程岩体基本力学特性研究的基础上,如何确定深部厚煤层的可放性,是采用综放开采技术的关键。同时,在深部厚煤层综放开采采场及巷道应力分布时空规律以及深部开采条件下的复合应力作用放煤机理研究的基础上,如何建立适合厚煤层综放开采模型、确定最佳工程参数,将是综放开采技术应用于深部资源开采的基础。

7 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。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(References):

- [1] 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.
- [2] Kidybinski A, Dubinski J. *Strata Control in Deep Mines*[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [3] Fairhurst C. Deformation, yield, rupture and stability of excavations at great depth[A]. In: Fairhurst C ed. *Rockburst and Seismicity in Mines*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990. 1 103 - 1 114.
- [4] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations[A]. In: *Rockburst and Seismicity in Mines*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. 173 - 177.
- [5] 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]. 见: 中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2004. 10 - 17.(Qian

Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics: the mechanics problems of deep rock mass[A]. In: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering ed. *Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference*[C]. Beijing: Science Press, 2004. 10 - 17.(in Chinese))

- [6] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[A]. 见: 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[C]. [s. l.]: [s. n.], 2004.(Qian Qihu. The key problems of deep underground space development[A]. In: *The Key Technical Problems of Base Research in Deep Underground Space Development—the 230th Xiangshan Science Conference*[C]. [s. l.]: [s. n.], 2004.(in Chinese))
- [7] 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.(Qian Minggao. Review of the theory and practice of strata control around longwall face in recent 20 years[J]. *Journal of Chinese University of Mining and Technology*, 2000, 19(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [8] Sun J, Wang S J. 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.
- [9] 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.(Gu Desheng. The science problems in deep mining of metal deposit[A]. In: *Xiangshan Science Conference ed. Science Foreland and Future(Volume VI)*[C]. Beijing: China Environment Science Press, 2002. 192 - 201.(in Chinese))
- [10] 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]. 见: 香山科学会议编. *科学前沿与未来(第六集)*[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 179 - 191.(Xie Heping. Resources development under high ground stress: present state, base science problems and perspective[A]. In: *Xiangshan Science Conference ed. Science Foreland and Future (Volume VI)*[C]. Beijing: China Environment Science Press, 2002. 179 - 191.(in Chinese))
- [11] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2004. 88 - 94.(He Manchao. Present state and perspective of rock mechanics in deep mining engineering[A]. In: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering ed. *Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference*[C]. Beijing: Science Press, 2004. 88 - 94.(in Chinese))
- [12] 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.
- [13] Gurtunca R G, Keynote L. Mining below 3 000 m and challenges for the South African gold mining industry[A]. In: *Proceedings of Mechanics of Jointed and Fractured Rock*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 3 - 10.
- [14] Diering D H. Tunnels under pressure in an ultra-deep Wifwatersrand gold mine[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and*

- gold mine[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 100: 319 - 324.
- [15] 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.
- [16] Johnson R A S. Mining at ultra-depth, evaluation of alternatives[A]. In: Proceedings of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium[C]. Montreal: NARMS'96, 1996. 359 - 366.
- [17] 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]. 见: 何满潮编. 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. 1 - 17.(Yan Yushu. Current condition on the control technique of surroundings in soft rock and its developing trend in the coal industry in China[A]. In: He Manchao ed. The Theory and Practices of Soft Rock Roadway Support in China[C]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1996. 1 - 17.(in Chinese))
- [18] Paterson M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble[J]. 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[J]. 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[J]. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 1966, 44: 215 - 232.
- [21] Paterson M S. Experimental Rock Deformation—the Brittle Field[M]. 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[J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1960, 79: 193 - 226.
- [23] Singh J. Strength of rocks at depth[A]. In: Rock at Great Depth[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 37 - 44.
- [24] Kwasniewski M A. Laws of brittle failure and of B-D transition in sandstone[A]. In: Rock at Great Depth[C]. 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.(Chen Yong, Huang Tingfang. Rock Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2001. 17 - 38.(in Chinese))
- [26] Meissner R, Kusznir N J. Crustal viscosity and the reflectivity of the lower crust[J]. Ann. Geophys., 1987, (5B): 365 - 373.
- [27] Ranalli G, Murphy D C. Rheological stratification of the lithosphere[J]. Tectonophysics, 1987, 132: 281 - 295.
- [28] Shimada M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures[J]. Tectonophysics, 1993, 217: 55 - 64.
- [29] Sibson R H. Fault rock and sand fault mechanism[J]. J. Geol. Soc. London, 1977, 133: 191 - 213.
- [30] Sibson R H. Power dissipation and stress levels on faults in the upper crust[J]. J. Geophys. Res., 1980, 85: 6 239 - 6 247.
- [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[C]. [s. l.]: [s. n.], 1981. 121 - 132.
- [32] Pusch R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock[A]. In: Hudson J A ed. Comprehensive Rock Engineering[C]. Oxford: Pergamon Press, 1993. 227 - 241.
- [33] Malan D F. Time-dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock[J]. 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[J]. Quart. J. Eng. Geol., 1972, 5: 119 - 120.
- [36] Barla G. Squeezing rocks in tunnels[J]. 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]. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1998, 98: 353 - 363.
- [39] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations[A]. In: Rockburst and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. 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[A]. In: Pacific Rocks 2000-Proc. the 4th North American Rock Mech. Symp.[C]. [s. l.]: [s. n.], 2000. 1 279 - 1 285.
- [41] Pusch R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock[A]. In: Hudson J A ed. Comprehensive Rock Engineering[C]. Oxford: Pergamon Press, 1993. 227 - 241.
- [42] Bridgman P W. Volume changes in the plastic stages simple compression[J]. 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[J]. Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., 1960, 36: 20 - 26.
- [44] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990. 87 - 90. (Zhou Weiyuan. Advanced Rock Mechanics[M]. Beijing: Water Power Press, 1990. 87 - 90.(in Chinese))
- [45] 李世平. 岩石力学简明教程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.(Li Shiping. Concise Tutorial of Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.(in Chinese))
- [46] Shimada M, Liu J T. Temperature dependence of granite strength

- seismogenic zones in the crust[A]. In: Proc. Int. Conf. on "Deformation Mechanism, Rheology and Microstructures" [C]. [s. l.]: [s. n.], 1999. 46 - 54.
- [47] Cleary M. Effects of depth on rock fracture[A]. In: Rock at Great Depth[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 1 153 - 1 163.
- [48] Glibowicz S J, Kijko A. An Introduction to Mining Seismology[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [49] Ortlepp W D. High ground displacement velocities associated with rockburst damage[A]. In: Rockburst and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 101 - 106.
- [50] Marcak H. The structure of seismic events sequences obtained from Polish deep mines[A]. In: Rockburst and Seismicity in Mines[C]. Rotterdam: A. A. 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[J]. 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.(Feng Xiating, Wang Yongjia. New development in researching rockburst induced by mining at great depth and its control strategies[J]. Journal of China Coal Industry, 1998, 7(5): 42 - 45.(in Chinese))
- [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.(Xie Heping. Damage Mechanics of Rock and Concrete[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [54] Kirzhner F, Rosenhouse G. Numerical analysis of tunnel dynamic response to earth motions[J]. Tunnelling 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 underground 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.(Li Xibing, Gu Desheng. Rock Impact Dynamical Mechanics[M]. Changsha: Central South Industry University Press, 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[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, 37(7): 1 055 - 1 060.
- [58] Zhang Z X, Kou S Q, Jiang L G, et al. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning[J]. 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.(Gu Desheng. The science problems of metal bed mining at depth[A]. In: Xiangshan Science Congress ed. Science Foreland and Future(Volume VI)[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 192 - 201.(in Chinese))
- [60] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬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.(Li Xibing, Gu Desheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[A]. In: Xiangshan Science Congress ed. Science Foreland and Future(Volume 6)[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 101 - 108.(in Chinese))
- [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[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 304 - 310.(Fu Guobin. New research on surrounding rock breakage range and displacement of roadway[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3): 304 - 310.(in Chinese))
- [63] 方祖烈. 软岩巷道维护原理与控制措施[A]. 见: 何满潮编. 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.(Fang Zulie. Support principles for roadway in soft rock and its controlling measures[A]. In: He Manchao ed. Soft Rock Tunnel Support in China's Mines: Theory and Practice[C]. Beijing: China University of Mining and Technology, 1996.(in Chinese))
- [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.(Jiang Yaodong, Zhao Yixin, Liu Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 2 396 - 2 401.(in Chinese))
- [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.(Zhai Xinxian, Li Huamin. Research on surrounding rock deformation characters of soft rock roadway at depth[J]. Coal, 1995, 4(5): 24 - 26.(in Chinese))
- [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.(Fu Guobin, Jiang Zhifang. Mining Stress Control of Roadway in Deep Mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996.(in Chinese))
- [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.(Jing Hongwen. Analysis and application of surrounding rock breakage displacement of roadway at depth[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.(in Chinese))
- [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.(Pan Yishan, Li Zhonghua, Zhang Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 844 - 1 851.(in Chinese))
- [69] Wagner H. Support requirements for rockburst conditions[A]. In: Gay N C, Wainwright E H ed. Proc. the 1st Int. Cong. on Rockbursts and Seismicity[C]. Johannesburg: SAIMM, 1984. 209 - 218.

作者：[何满潮](#)，[谢和平](#)，[彭苏萍](#)，[姜耀东](#)，[HE Man-chao](#)，[XIE He-ping](#)，[PENG Su-ping](#)，[JIANG Yao-dong](#)

作者单位：[何满潮](#),[HE Man-chao](#)([中国矿业大学\(北京校区\)](#), 北京, 100083;[中国地质大学\(北京\)](#), 北京, 100083)，[谢和平](#),[XIE He-ping](#)([中国矿业大学\(北京校区\)](#), 北京, 100083;[四川大学](#), [四川](#), [成都](#), 610065)，[彭苏萍](#),[姜耀东](#),[PENG Su-ping](#),[JIANG Yao-dong](#)([中国矿业大学\(北京校区\)](#), 北京, 100083)

刊名：[岩石力学与工程学报](#)[ISTIC](#)[EI](#)[PKU](#)

英文刊名：[CHINESE JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND ENGINEERING](#)

年，卷(期)：2005，24(16)

引用次数：103次

参考文献(68条)

- [Sellers E J, Klerck P Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels](#) 2000(4)
- [Kidybinski A, Dubinski J Strata Control in Deep Mines](#) 1990
- [Fairhurst C Deformation, yield, rupture and stability of excavations at great depth](#) 1990
- [Malan D F, Spottiswoode S M Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations](#) 1997
- 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](#) 2004
- 钱七虎 [深部地下工空间开发中的关键科学问题](#) 2004
- 钱鸣高 [20年来采场围岩控制理论与实践的回顾\[期刊论文\]-中国矿业大学学报\(自然科学版\)](#) 2000(1)
- [Sun J, Wang S J Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-the-art](#) 2000(37)
- 古德生 [金属矿床深部开采中的科学问题](#) 2002
- 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](#) 2002
- 何满潮 [深部开采工程岩石力学的现状及其展望](#) 2004
- [Diering D H Ultra-deep level mining: future requirements](#) 1997(6)
- [Gurtunca R G, Keynote L Mining below 3 000 m and challenges for the South African gold mining industry](#) 1998
- [Vogel M, Andrast H P Alp transit-safety in construction as a challenge, health and safety aspects in very deep tunnel construction](#) 2000(4)
- [Johnson R A S Mining at ultra-depth, evaluation of alternatives](#) 1996
- 晏玉书 [我国煤矿软岩巷道围岩控制技术现状及发展趋势](#) 1996
- [Paterson M S Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble](#) 1958
- [Mogi K Deformation and fracture of rocks under confining pressure: elasticity and plasticity of some rocks](#) 1965
- [Mogi K Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow](#) 1966
- [Paterson M S Experimental Rock Deformation-the Brittle Field](#) 1978
- [Heard H C Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function](#)

- [of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure](#) 1960
22. [Singh J](#) [Strength of rocks at depth](#) 1989
 23. [Kwasniewski M](#) [A Laws of brittle failure and of B-D transition in sandstone](#) 1989
 24. [陈颢. 黄庭芳](#) [岩石物理学](#) 2001
 25. [Meissner R.](#) [Kusznir N J](#) [Crustal viscosity and the reflectivity of the lower crust](#) 1987 (5B)
 26. [Ranalli G.](#) [Murphy D C](#) [Rheological stratification of the lithosphere](#) 1987
 27. [Shimada M](#) [Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures](#) 1993
 28. [Sibson R H](#) [Fault rock and sand fault mechanism](#) 1977
 29. [Sibson R H](#) [Power dissipation and stress levels on faults in the upper crust](#) 1980
 30. [Blacic J D](#) [Importance of creep failure of hard rock joints in the near field of a nuclear waste repository](#) 1981
 31. [Pusch R](#) [Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock](#) 1993
 32. [Malan D F](#) [Time-dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock](#) 1999
 33. [Malan D F](#) [Simulation of the time-dependent behavior of excavations in hard rock](#) 2002(4)
 34. [Muirwood A M](#) [Tunnels for roads and motorways](#) 1972
 35. [Barla G](#) [Squeezing rocks in tunnels](#) 1995
 36. [Aydan O.](#) [Akagi T.](#) [Kavamoto T](#) [The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan](#) 1996
 37. [Malan D F.](#) [Basson F R P](#) [Ultra-deep mining: the increase potential for squeezing conditions](#) 1998
 38. [Malan D F.](#) [Spottiswoode S M](#) [Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations](#) 1997
 39. [Kwon S.](#) [Park B Y.](#) [Kang C H](#) [Structural stability analysis for a high-level underground nuclear waste repository in granite](#) 2000
 40. [Pusch R](#) [Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock](#) 1993
 41. [Bridgman P W](#) [Volume changes in the plastic stages simple compression](#) 1949
 42. [Matsushima S](#) [On the flow and fracture of igneous rocks and on the deformation and fracture of granite under high confining pressure](#) 1960
 43. [周维垣](#) [高等岩石力学](#) 1990
 44. [李世平](#) [岩石力学简明教程](#) 1996
 45. [Shimada M.](#) [Liu J T](#) [Temperature dependence of granite strength seismogenic zones in the crust](#) 1999
 46. [Cleary M](#) [Effects of depth on rock fracture](#) 1989
 47. [Gibowicz S J.](#) [Kijko A](#) [An Introduction to Mining Seismology](#) 1994
 48. [Ortlepp W D](#) [High ground displacement velocities associated with rockburst damage](#) 1993
 49. [Marcak H](#) [The structure of seismic events sequences obtained from Polish deep mines](#) 1997
 50. [Tang C A.](#) [Tham L G.](#) [Lee P K K](#) [Numerical tests on micro-macro relationship of rock failure under uniaxial compression](#) 2000
 51. [冯夏庭](#) [深部开采诱发的岩爆及其防治策略的研究进展](#) [期刊论文] - [中国矿业](#) 1998 (5)

52. [谢和平](#) [岩石混凝土损伤力学](#) 1990
53. [Kirzhner F.](#)[Rosenhouse G](#) [Numerical analysis of tunnel dynamic response to earth motions](#) 2000(3)
54. [Chen S G.](#)[Cai J G.](#)[Zhao J](#) [Discrete element modeling of an underground explosion in a jointed rock mass](#) 2000(2)
55. [李夕兵.](#)[古德生](#) [岩石冲击动力学](#) 1994
56. [Li X B.](#)[Lok T S.](#)[Zhao J](#) [Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks](#) 2000(7)
57. [Zhang Z X.](#)[Kou S Q.](#)[Jiang L G](#) [Effects of loading rate on rock fracture:fracture characteristics and energy partitioning](#) 2000(5)
58. [古德生](#) [金属矿床深部开采中的科学问题](#) 2002
59. [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](#) 2002
60. [Dyskin A V](#) [On the role of stress fluctuations in brittle fracture](#) 1999
61. [付国彬](#) [巷道围岩破裂范围与位移的新研究](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 1995(3)
62. [方祖烈](#) [软岩巷道维护原理与控制措施](#) 1996
63. [姜耀东.](#)[赵毅鑫.](#)[刘文岗.](#)[李琦](#) [深部开采中巷道底鼓问题的研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(14)
64. [翟新献.](#)[李化敏](#) [深井软岩巷道围岩变形特性的研究](#) 1995(5)
65. [付国彬.](#)[姜志方](#) [深井巷道矿山压力控制](#) 1996
66. [靖洪文](#) [深部巷道破裂围岩位移分析及应用](#)[学位论文] 2001
67. [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](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2003(11)
68. [Wagner H](#) [Support requirements for rockburst conditions](#) 1984

相似文献(9条)

1. 会议论文 [何满潮](#) [深部开采工程岩石力学现状及展望](#)

随着浅部资源的日益减少,进入深部开采已成为国内外矿产资源开采的必然趋势.深部“三高一扰动”的复杂力学环境,使得深部岩体力学特性及其工程响应有着明显的不同,同时也在造成了岩爆、突水、顶板大面积来压和采空区失稳等灾害性事故在程度上加剧,频度上提高,成灾机理更加复杂.因此,正确认识深部开采工程岩石力学与浅部开采岩石力学的区别,深入研究深部开采条件下的岩体力学特性、工程稳定性控制理论及其设计方法,对于避免深部资源开采中的重大事故发生,降低深部开采的成本,提高经济效益,保证21世纪我国主体能源的后备储量,具有重要的理论指导意义和现实意义.

2. 会议论文 [何满潮.](#)[谢和平.](#)[彭苏萍.](#)[姜耀东](#) [深部开采岩体力学研究](#) 2005

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、室内及现场试验研究取得了大量的成果.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、5个力学特性转化特点、4个方面的矿井转型、6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.

3. 期刊论文 [姜耀东.](#)[刘文岗.](#)[赵毅鑫.](#)[殷作如.](#)[李建民.](#)[邓智毅.](#)[洪溢清.](#)[JIANG Yao-dong.](#)[LIU Wen-gang.](#)[ZHAO Yi-xin.](#)

[YIN Zuo-ru.](#)[LI Jian-min.](#)[DENG Zhi-yi.](#)[HONG Yi-qing](#) [开滦矿区深部开采中巷道围岩稳定性研究](#) -[岩石力学与工程学报](#)2005, 24(11)

在对开滦矿区赵各庄矿、唐山矿深部开采过程中巷道围岩变形、破坏特征和矿井动力显现观测的基础上,结合数值模拟研究发现:(1) 开滦矿区在千米深开采时水平构造应力远大于自重应力,原岩应力值远大于巷道围岩强度值,巷道将不可避免地要遭受破坏并表现为大变形强流变和严重底鼓;(2) 随着开采深度增大,软弱煤层发生冲击地压的危险性随之增大,通常以煤层整体突出为特征,其发生机理和高应力状态下硬岩(煤)中的岩爆有区别;(3) 原岩应力状态对巷道围岩的变形破坏有着重要影响,而巷道形状对巷道围岩的破坏形式影响不大.

4. 期刊论文 [李利萍.](#)[潘一山.](#)[马胜利.](#)[刘力强.](#)[LI Li-ping.](#)[PAN Yi-shan.](#)[MA Sheng-li.](#)[LIU Li-qiang](#) [深部开采岩体](#)

[超低摩擦效应实验研究](#) -[采矿与安全工程学报](#)2008, 25(2)

对岩体超低摩擦现象的国内外研究现状进行了综述,介绍了岩体中存在的超低摩擦效应,指出在深部开采条件下,岩体工程中的超低摩擦现象与冲击地压、矿震、地震等扰动密切相关.利用卧式双向伺服加载实验机进行了岩石试件超低摩擦效应的实验研究.结果表明:水平向微小扰动比垂直向扰动对岩石试样接触面应力降的影响更为明显,说明水平向扰动是引起岩体超低摩擦效应的主要因素.

5. 期刊论文 [李文秀.](#)[侯晓兵.](#)[戴兰芳.](#)[闻磊.](#)[LI Wen-xiu.](#)[HOU Xiao-bing.](#)[DAI Lan-fang.](#)[WEN Lei](#) [深部开采岩体变形](#)

[分析的双曲函数法](#) -[化工矿物与加工](#)2008, 37(1)

在软岩地层深部厚矿体开采条件下,给出了用于预测分析地下开采岩体移动变形的双曲正切函数模型,采用该模型对国内某地下矿山深部开采岩体移

动变形进行了具体的计算分析,并与概率积分法理论分析结果和实测数据进行了对比,结果令人满意.分析结果表明,本文所提出的理论方法适用于预测分析深部矿体开采引起的岩体移动变形问题.

6. 期刊论文 [左建平](#), [谢和平](#), [周宏伟](#), [ZUO Jian-ping](#), [XIE He-ping](#), [ZHOU Hong-wei](#) [温度压力耦合作用下的岩石屈服破坏研究 -岩石力学与工程学报](#)2005, 24(16)

以深部开采为背景,讨论了温度和压力对深部岩石变形和破坏规律的影响.将岩石的屈服破坏过程视为能量释放和能量耗散的过程,根据最小耗散原理导出了温度和压力耦合作用下的深部岩石屈服破坏准则.该准则具有明确的物理意义,即当岩石的塑性耗散能及温度梯度引起热传导的耗散能累积耗散到一定程度时,岩石就会发生破坏失稳.

7. 期刊论文 [李文秀](#), [郭玉贵](#), [侯晓兵](#), [赵胜涛](#), [杨少冲](#), [戴兰芳](#), [LI Wen-xiu](#), [GUO Yu-gui](#), [HOU Xiao-bing](#), [ZHAO Sheng-tao](#), [YANG Shao-chong](#), [DAI Lan-fang](#) [软岩地层深部开采地表下沉分析 -地下空间与工程学报](#)2006, 2(6)

针对软岩地层深部地下大面积开采岩体移动变形预测问题,利用弹塑性力学理论建立了相应的预测分析理论模型.用所建立的弹性理论模型对某铁矿地表移动变形进行了计算分析,并将理论预测结果和实测资料进行了对比.文中用弹塑性有限元法分析了不同弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角等物理力学参数对地表下沉的影响;对软岩地层深部开采地表移动进行了计算分析.结果表明,弹性模量对地表下沉影响较大,而其他参数影响较小.结果表明,弹塑性力学方法适用于分析软岩地层大面积开挖岩体移动预测问题.

8. 期刊论文 [郭立](#), [吴爱祥](#), [胡家国](#), [李青松](#) [深部硬岩开采的岩石力学问题及其分析方法 -金属矿山](#)2003(3)

岩石力学问题的研究直接关系到矿山安全生产和经济效益,也是深部矿山开采工艺选取与变革的基础.综述了深部硬岩开采涉及的几个关键岩石力学问题的研究现状,分析并指出了其研究方法存在的局限性和今后的发展趋势.

9. 期刊论文 [蔡美峰](#), [王金安](#), [王双红](#), [玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测 -岩石力学与工程学报](#) 2001, 20(1)

玲珑金矿是石英脉型金矿床,目前开采深度已超过500m,未来开采深度将超过1000m.对此类矿床赋存条件的地下矿山,深部开采时可能遇到的一个突出问题就是岩爆.根据系统的工程地质调查、地应力场现场实测、岩石力学试验、三维有限元数值模拟的结果,采用多种岩爆判断准则,分析了玲珑金矿深部开采时围岩中的能量分布规律和发生岩爆的可能性,提出了防治岩爆的建议措施.

引证文献(99条)

1. [SUN Xiao-ming](#), [CAI Feng](#), [YANG Jun](#), [CAO Wu-fu](#) [Numerical simulation of the effect of coupling support of bolt-mesh-anchor in deep tunnel](#)[期刊论文]-[矿业科学技术\(英文版\)](#) 2009(3)

2. [HE Man-chao](#) [Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control](#)[期刊论文]-[矿业科学技术\(英文版\)](#) 2009(3)

3. [李利萍](#), [潘一山](#), [章梦涛](#) [基于简支梁模型的岩体超低摩擦效应理论分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2009(z1)

4. [何满潮](#), [张国锋](#), [王桂莲](#), [许运良](#), [吴创周](#), [唐强达](#) [深部煤巷底臆控制机制及应用研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2009(z1)

5. [孙晓明](#), [张国锋](#), [蔡峰](#), [于世波](#) [深部倾斜岩层巷道非对称变形机制及控制对策](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2009(6)

6. [周家文](#), [徐卫亚](#), [李明卫](#), [周先齐](#), [石崇](#) [岩石应变软化模型在深埋隧洞数值分析中的应用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2009(6)

7. [张国伟](#), [孙亚军](#), [刘颖](#) [超高压承压底板含水层探放水技术](#)[期刊论文]-[煤矿安全](#) 2009(6)

8. [韩林](#), [刘向君](#), [孟英峰](#), [刘洪](#), [李皋](#) [高压油气藏对砂岩力学特性影响的试验研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2009(5)

9. [张延伟](#), [王益品](#), [张延航](#), [章磊](#), [姜光](#) [柳海矿软岩巷道支护技术](#)[期刊论文]-[煤矿安全](#) 2009(5)

10. [WANG En-yuan](#), [LIU Xiao-fei](#), [ZHAO En-lai](#), [LIU Zhen-tang](#) [Prediction and control of rock burst of coal seam contacting gas in deep mining](#)[期刊论文]-[煤炭学报\(英文版\)](#) 2009(2)

11. [杨冬成](#) [煤矿深部顺槽破坏原因及支护对策分析](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2009(5)

12. [王磊](#) [深部煤巷支护技术分析](#)[期刊论文]-[煤矿开采](#) 2009(2)

13. [高富强](#), [杨军](#), [甯尤军](#) [围压对脆性材料力学性能影响的研究现状](#)[期刊论文]-[有色金属\(矿山部分\)](#) 2009(2)

14. [GUO Zhi-biao](#), [GUO Ping-ye](#), [HUANG Mao-hong](#), [LIU Yin-gen](#) [Stability control of gate groups in deep wells](#)[期刊论文]-[矿业科学技术\(英文版\)](#) 2009(2)

15. 郭志飏, 李国峰 [兴安煤矿深部软岩巷道底臌破坏机理及支护对策研究](#)[期刊论文]-[煤炭工程](#) 2009(2)
16. 郭志飏, 任爱武, 王炯, 蔡峰 [深部软岩泵房硐室群集约化设计技术](#)[期刊论文]-[采矿与安全工程学报](#) 2009(1)
17. 王方汉, 曹维勤, 张文如, 张伯虎, 徐小敏 [南京栖霞山矿巷道围岩稳定性数值分析](#)[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#) 2009(1)
18. 张立新, 李长洪, 赵宇 [矿井突水预测研究现状及发展趋势](#)[期刊论文]-[中国矿业](#) 2009(1)
19. 孟鑫, 肖福坤, 段立群 [深部巷道围岩耦合变形机理研究](#)[期刊论文]-[煤炭技术](#) 2009(2)
20. 韩立军, 贺永年, 蒋斌松, 张后全 [环向有效约束条件下破裂岩体承载变形特性分析](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2009(1)
21. 黄维新, 贾明涛, 李王管, 潘长良 [深井巷道变形破坏形式与安全支护技术研究的探讨](#)[期刊论文]-[中国铝业](#) 2008(6)
22. 何杰, 方新秋, 许伟, 洪木银 [深井高应力破碎区巷道破坏机理及控制研究](#)[期刊论文]-[采矿与安全工程学报](#) 2008(4)
23. 汪明武, 李丽, 金菊良 [岩爆预测的改进集对分析模型](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2008(z1)
24. 祁和刚, 郭夕祥, 于士芹, 辛中选, 于剑英 [破碎大巷变形机理与注锚加固技术](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2008(11)
25. 郭万龙, 李文社 [千秋矿深部大断面底板煤巷失稳原因治理对策](#)[期刊论文]-[能源技术与管理](#) 2008(5)
26. 江权, 冯夏庭, 陈国庆, 苏国韶 [高地应力条件下大型地下洞室群稳定性综合研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(z2)
27. 韩立军, 贺永年, 蒋斌松, 张后全 [环向有效约束条件下破裂岩体再破坏特性分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(z2)
28. 朱万成, 魏晨慧, 唐春安, 杨天鸿, 李连崇 [岩体开挖损伤区的表征及热-流-力耦合模型: 研究现状及展望](#)[期刊论文]-[自然科学进展](#) 2008(9)
29. 李剑光, 王永岩, 王皓 [深部岩体多孔介质流变模型的研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2008(9)
30. 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 张党育, 关永强 [高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(9)
31. 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 李树忱, 范庆忠, 袁亮, 薛俊华, 张庆松 [深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(8)
32. 何满潮, 徐敏 [HEMS深井降温系统研发及热害控制对策](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(7)
33. 李清, 刘文江, 杨仁树, 郝继威, 苏鹏 [深部岩巷二次锚喷耦合支护技术](#)[期刊论文]-[采矿与安全工程学报](#) 2008(3)
34. 吴淑涛 [降低巷道掘进率方法](#)[期刊论文]-[辽宁工程技术大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(z1)
35. 周科平, 陈庆发, 胡建华 [地下铝土矿采矿环境再造连续采矿理念](#)[期刊论文]-[广西大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(02)
36. 潘斌, 龙涛 [金属矿山地压控制技术研究现状与发展趋势](#)[期刊论文]-[铜业工程](#) 2008(01)
37. 许琼萍, 王德荣, 陆渝生 [测定某种花岗岩静摩擦系数的试验](#)[期刊论文]-[解放军理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(03)
38. 何满潮 [HEMS深井降温系统研发及热害控制对策](#)[期刊论文]-[中国基础科学](#) 2008(02)
39. 柏建彪, 王襄禹, 贾明魁, 侯朝炯 [深部软岩巷道支护原理及应用](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2008(05)
40. 王襄禹, 柏建彪 [复杂软弱岩层大巷的稳定性与支护方式研究](#)[期刊论文]-[煤矿安全](#) 2008(04)
41. 何满潮, 王晓义, 刘文涛, 杨生彬 [孔庄矿深部软岩巷道非对称变形数值模拟与控制对策研究](#)[期刊论文]-[岩石力学](#)

42. 龙涛, 潘斌, 余斌 国内外金属矿山地压控制技术研究发展评述[期刊论文]-采矿技术 2008(03)
43. 葛文杰, 李夕兵 数值模拟在锚杆支护技术中的应用[期刊论文]-凿岩机械气动工具 2008(01)
44. 涂心彦, 柏建彪, 王襄禹 超前采动支承压应力分布规律及影响因素[期刊论文]-能源技术与管理 2008(02)
45. 郑玉友, 郭启彬 星村煤矿深部冲击矿压防治技术[期刊论文]-煤矿开采 2008(02)
46. 江权, 冯夏庭, 周辉 锦屏二级水电站深埋引水隧洞群允许最小间距研究[期刊论文]-岩土力学 2008(03)
47. 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 徐景茂, 陈伟 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2008(03)
48. 彭苏萍 深部煤炭资源赋存规律与开发地质评价研究现状及今后发展趋势[期刊论文]-煤 2008(02)
49. 王襄禹, 柏建彪, 李伟 高应力软岩巷道全断面松动卸压技术研究[期刊论文]-采矿与安全工程学报 2008(01)
50. 江权, 冯夏庭, 陈国庆 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2008(01)
51. 周小平, 钱七虎, 杨海清 深部岩体强度准则[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2008(01)
52. FAN Ke-gong, ZHANG Xue-bin, XIAO Bao-li Study on rock burst of fully mechanized sublevel caving mining in deep mine[期刊论文]-煤炭学报(英文版) 2007(04)
53. 宋明军, 王李管, 贾明涛 深井开采致灾环境及其数字化研究[期刊论文]-矿业研究与开发 2007(06)
54. 张艳博, 康志强, 姜国虎, 徐东强 基于岩石损伤破坏和声发射理论的岩爆发生机理[期刊论文]-金属矿山 2007(12)
55. 徐营, 张子新, 蒋金泉 深井围岩破坏机理与稳定性分析[期刊论文]-地下空间与工程学报 2007(z1)
56. 葛文杰, 李夕兵 数值模拟在锚杆支护技术中的应用[期刊论文]-江西有色金属 2007(04)
57. 朱刘娟, 邹友峰, 郭增长, 陈俊杰 深部开采地表沉陷预测与控制存在的问题及对策探讨[期刊论文]-中国矿业 2007(12)
58. 于保华, 朱卫兵, 许家林 深部开采地表沉陷特征的数值模拟[期刊论文]-采矿与安全工程学报 2007(04)
59. 谢本贤, 陈沅江, 史秀志 深部岩体工程围岩质量评价的IRMR法研究[期刊论文]-中南大学学报(自然科学版) 2007(05)
60. 康勇, 李晓红, 杨春和 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(z1)
61. 王李管, 宋明军, 贾明涛, 尚晓明, 龚元翔 深部矿床开采致灾环境监控技术研究[期刊论文]-金属矿山 2007(09)
62. 赖小彬, 徐小敏, 张伯虎, 卢萍 某矿山巷道交岔口的三维有限元模拟分析[期刊论文]-地下空间与工程学报 2007(04)
63. 刘义新, 郭文兵, 孟伟峰, 王建峰 深部条带开采的开采深度探讨[期刊论文]-矿业快报 2007(08)
64. 尹胜波, 宋维宾 厚煤层软底板炮采工作面采煤方法实践[期刊论文]-西部探矿工程 2007(09)
65. 宫凤强, 李夕兵 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(05)
66. 孙可明, 潘一山, 梁冰 流固耦合作用下深部煤层气井群开采数值模拟[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(05)
67. 何满潮, 齐干, 程骋, 张国锋, 孙晓明 深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(05)
68. 蒋斌松, 张强, 贺永年, 韩立军 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(05)
69. 李夕兵, 李地元, 郭雷, 叶洲元 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2007(05)
70. 孙晓明, 杨军, 曹伍富 深部回采巷道锚网索耦合支护时空作用规律研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报

2007 (05)

71. [周小平](#), [钱七虎](#) [深埋巷道分区破裂化机制](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2007 (05)

72. [杨天鸿](#), [唐春安](#), [谭志宏](#), [朱万成](#), [冯启言](#) [岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2007 (02)

73. [杨军](#), [何满潮](#), [赵菲菲](#), [胡永光](#) [柳海矿第三系深部软岩巷道耦合支护研究](#)[期刊论文]-[青岛理工大学学报](#) 2007 (01)

74. [许家林](#), [连国明](#), [朱卫兵](#), [钱鸣高](#) [深部开采覆岩关键层对地表沉降的影响](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2007 (07)

75. [韩嵩](#), [蔡美峰](#) [深部地应力场下砂岩力学性质的变化](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2007 (06)

76. [王汉军](#), [杨仁树](#), [李清](#) [深部岩巷爆破机理分析和爆破参数设计](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2007 (04)

77. [何满潮](#) [深部煤矿灾害机理及监测研究进展](#)[期刊论文]-[煤炭科技](#) 2007 (01)

78. [朱刘娟](#), [栗红喜](#), [陈俊杰](#) [煤矿深部开采存在的问题及对策探讨](#)[期刊论文]-[煤炭技术](#) 2007 (06)

79. [何满潮](#), [齐干](#), [许云良](#), [白雪松](#) [深部软岩巷道锚网索耦合支护设计及施工技术](#)[期刊论文]-[煤炭工程](#) 2007 (03)

80. [何满潮](#), [杨军](#), [齐干](#), [王树仁](#) [深部软岩巷道耦合支护优化设计及应用](#)[期刊论文]-[辽宁工程技术大学学报 \(自然科学版\)](#) 2007 (01)

81. [韩嵩](#) [深部地应力环境对砂岩力学性质的影响](#)[期刊论文]-[矿业研究与开发](#) 2007 (02)

82. [杨承祥](#), [罗周全](#) [有岩爆倾向深井矿山采矿巷道的失稳模式分析及其控制技术](#)[期刊论文]-[矿冶工程](#) 2007 (02)

83. [何满潮](#), [李国峰](#), [刘哲](#), [蔡健](#) [兴安矿深部软岩巷道交叉点支护技术](#)[期刊论文]-[采矿与安全工程学报](#) 2007 (02)

84. [周莉](#), [李德建](#), [王春光](#) [温度对深部砂岩波速的影响](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2007 (03)

85. [陈江江](#), [吴超](#), [傅衣铭](#), [胡全舟](#) [基于修正RMR法的深部岩体工程围岩质量评价研究](#)[期刊论文]-[防灾减灾工程学报](#) 2007 (02)

86. [韩嵩](#) [基于声弹性理论的超声地应力测量方法试验研究](#)[学位论文]博士 2007

87. [韩立军](#), [贺永年](#), [蒋斌松](#), [张后全](#) [环向约束条件下破裂岩体力学特性试验研究](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2006 (05)

88. [柏建彪](#), [侯朝炯](#) [深部巷道围岩控制原理与应用研究](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2006 (02)

89. [周小平](#), [徐小敏](#), [卢萍](#), [陈山林](#) [深埋巷道的选型分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2006 (z1)

90. [胡江春](#), [王红芳](#), [孙晓明](#), [何满潮](#) [岩石的交流阻抗初步研究](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2006 (09)

91. [张国平](#), [阮怀宁](#) [深层开采诱发的岩爆分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2006 (05)

92. [齐干](#), [何满潮](#), [刘文涛](#), [郭志飏](#), [张国锋](#) [深部顺槽巷道差异性变形破坏特征及原因研究](#)[期刊论文]-[煤炭工程](#) 2006 (11)

93. [熊祖强](#), [贺怀建](#) [冲击地压应力状态及卸压治理数值模拟](#)[期刊论文]-[采矿与安全工程学报](#) 2006 (04)

94. [熊祖强](#), [贺怀建](#) [深井矿山硬岩巷道岩爆治理方案研究](#)[期刊论文]-[化工矿物与加工](#) 2006 (09)

95. [邱道宏](#), [陈剑平](#), [张秉鹤](#), [肖云华](#) [深埋长大公路隧道岩爆预测及防治研究](#)[期刊论文]-[地下空间与工程学报](#) 2006 (06)

96. [杨承祥](#), [罗周全](#), [胡国斌](#), [唐礼忠](#), [贾明涛](#) [深井金属矿床安全高效开采技术研究](#)[期刊论文]-[采矿技术](#) 2006 (03)

97. [胡全舟](#) [深部岩体损伤破坏评价方法研究](#)[学位论文]硕士 2006

98. [魏佳](#) [孔隙压力对深部岩体蠕变影响的理论研究](#)[学位论文]硕士 2006

99. [束加庆](#) [深埋隧洞工程区初始地应力场研究及围岩稳定分析](#)[学位论文]硕士 2006

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yslxygxcb200516001.aspx

下载时间: 2009年10月19日