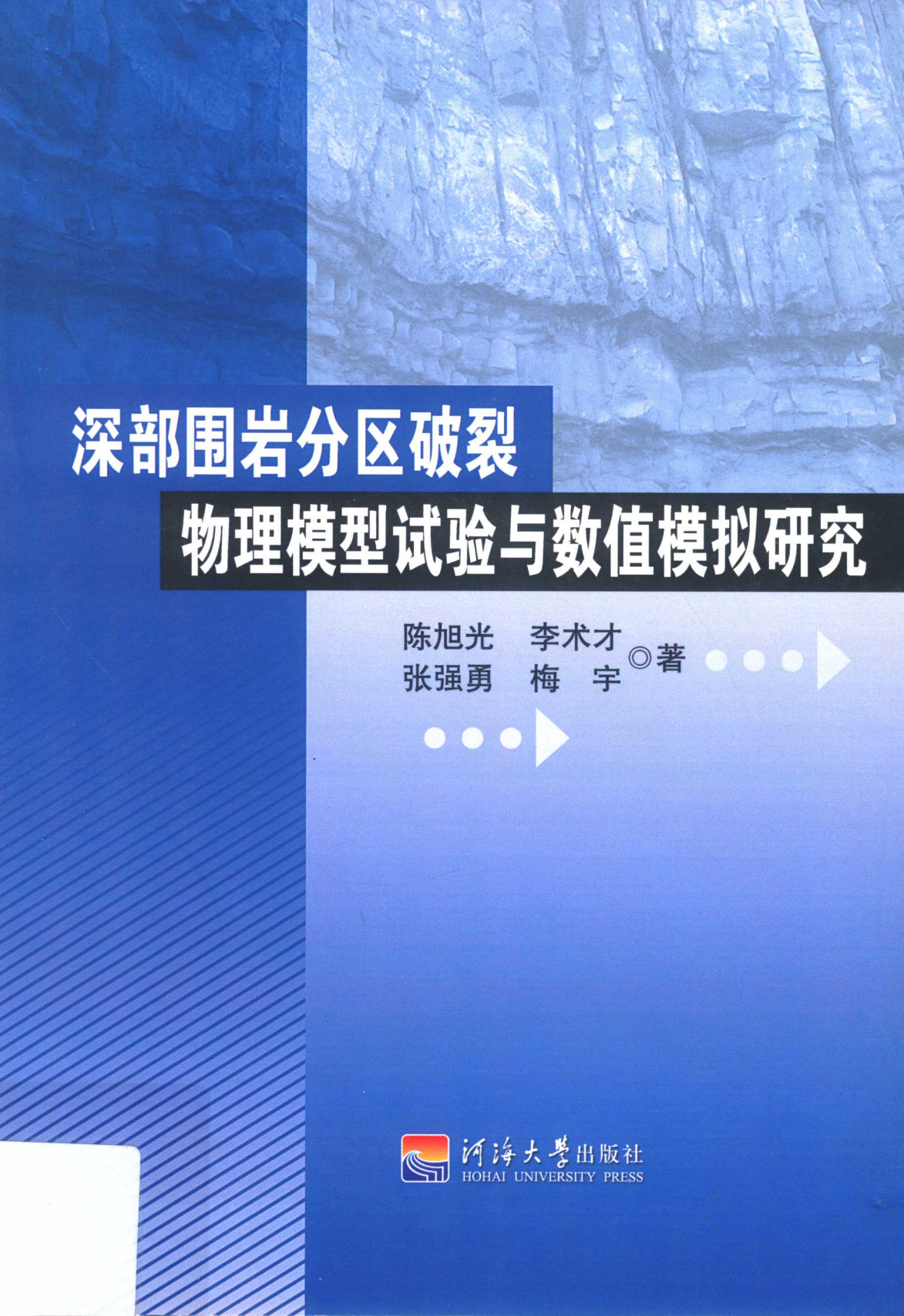




深部围岩分区破裂

物理模型试验与数值模拟研究

陈旭光 李术才
张强勇 梅 宇

◎ 著

 河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

深部围岩分区破裂

物理模型试验与数值模拟研究

陈旭光 李术才
张强勇 梅 宇 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

深部围岩分区破裂物理模型试验与数值模拟研究 / 陈旭光等著. —南京: 河海大学出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5630-3523-6

I. ①深… II. ①陈… III. ①岩石破裂—物理模型—实验②岩石破裂—数值模拟—研究 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 262382 号

书 名 深部围岩分区破裂物理模型试验与数值模拟研究
书 号 ISBN 978-7-5630-3523-6/TU · 100
责任编辑 成 微
装帧设计 黄 煜
出 版 河海大学出版社
网 址 <http://www.hhup.com>
地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话 (025)83737852(综合部) (025)83722833(营销部)
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
排 版 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 南京新洲印刷有限公司
开 本 787 毫米×960 毫米 1/16
印 张 8
字 数 109 千字
版 次 2013 年 11 月第 1 版
印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 20.00 元

目 录

第一章 绪 论	001
1.1 国内外研究现状综述	002
1.1.1 深部巷道围岩分区破裂研究现状	002
1.1.2 深部岩体支护研究现状	013
1.1.3 扩展有限元法(XFEM)研究现状	013
1.2 主要研究内容	015
第二章 预留洞室轴向压缩破坏模型试验	017
2.1 试验模型的制作	018
2.2 模型加载	019
2.3 试验结果及讨论	020
第三章 深部巷道围岩分区破裂三维地质力学模型试验研究	023
3.1 观测手段和观测仪器	025
3.1.1 巷道围岩变形的多点位移计观测	026
3.1.2 巷道围岩破坏情况的钻孔电视观测	027
3.2 观测结果及讨论	030
3.2.1 巷道围岩变形观测结果	030
3.2.2 巷道围岩破坏观测结果	033
3.3 巷道模型相似材料的配比	038
3.3.1 原型力学参数	038

3.3.2	测试试件的制作	039
3.3.3	相似材料物理力学参数的测试	040
3.3.4	各成分比对相似材料力学性质的影响	042
3.4	高压加载结构模型试验系统	044
3.4.1	模型试验系统的构成	048
3.4.2	模型试验系统的创新及技术优势	049
3.4.3	高精度模型测量系统的应用	051
3.5	深部巷道模型的加工制作	057
3.5.1	模型模拟范围	057
3.5.2	模型相似材料的配比	058
3.5.3	模型制作的工艺流程	058
3.5.4	测量元件的布置和埋设	061
3.5.5	巷道模型的开挖与测试	066
3.6	模型试验结果及分析	068
3.6.1	洞周围岩位移分布规律	068
3.6.2	洞周围岩应变变化规律	070
3.6.3	模型试验再现的分区破裂现象及其特征	072
3.6.4	模型试验与现场观测结果的对比	075
3.7	分区破裂地质力学模型试验结论	078
第四章	分区破裂机理的理论分析研究	079
4.1	分区破裂形成机制的围岩应力场分析	079
4.2	分区破裂形成机制的围岩应变场分析	081
4.3	分区破裂形成机制的能量分析	084
4.4	深部巷道模型试验分区破裂现象的理论解释	087
第五章	分区破裂现象的数值模拟	091

5.1 基于扩展有限元的数值模拟方法	092
5.1.1 不连续位移场的描述	092
5.1.2 含裂纹单元的平衡方程	094
5.2 基于扩展有限元的分区破裂数值模拟	096
5.2.1 围岩裂纹受压条件下的扩展轨迹	096
5.2.2 XFEM用于含裂隙试件数值试验验证	099
5.2.3 分区破裂的数值模拟方法	102
5.2.4 深部巷道开挖围岩分区破裂模型试验的数值模拟	104
5.3 数值模拟结果与试验结果的对比	108
参考文献	109
致谢	119

第一章 绪 论

随着我国国民经济的持续稳定增长,国家对能源的需求日益增加,从而加大了对地下洞室的开发利用,各行业地下工程的规模与深度也在持续增长。在水利工程中,锦屏二级水电站引水隧洞埋深达 2 600 m,金沙江溪洛渡水电站地下厂房设计最大埋深为 700 m。在能源工程中,江苏金坛天然气地下储备库埋深超 1 000 m。对于煤炭行业来说,随着浅部资源的逐渐减少,深部开采是在我国浅层煤炭资源消耗殆尽情况下的总体趋势与必然选择。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。除此之外,为满足需求,大批金属与有色金属矿山已转入深部开采,如金川矿区的 1 号矿体已开采到 1 250 m 以下,铜陵狮子山铜矿采深已达 1 100 m,抚顺红透山铜矿采深已进入 900~1 100 m 深度。预计在今后 10~20 a 内,我国许多金属和有色金属矿山将进入 1 000~2 000 m 深度开采。

近年来,国外主要产煤国均已进入深部开采。据不完全统计,国外开采超千米深的金属矿山有 80 余座,其中最多的为南非,南非绝大多数金矿的开采深度在 1 000 m 以下,其中 AngloGold 有限公司的西部深井金矿,采矿深度达到了 3 700 m。印度的 Kolar 金矿区,已有 3 座金矿采深超过 2 400 m。另外,俄罗斯、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。

随着地下工程开挖深度的不断增加,深部地下洞室围岩的地质赋存环境将变得越来越复杂,在高地应力、高渗透压、高低温及开挖扰动条件下(简称“三高一扰动”),洞室围岩将出现显著的非线性变形破坏。如分区破裂现象就是深部岩体工程开挖时所发生的特有的破坏现象之一,该现象的表现特征就是在深部岩体中开挖洞室或者巷道时,在其两侧和工作面前的围岩

中,会产生交替的破裂区和非破裂区,这种现象被称为分区破裂现象^[1-3]。

因此,当前能源、水电开发、战略石油储备、核废料与 CO₂ 地下处置等一系列国家战略性深部工程的建设使得“三高一扰动”作用下大型深部地下工程稳定性分析成为亟待解决的关键技术。

1.1 国内外研究现状综述

1.1.1 深部巷道围岩分区破裂研究现状

(一) 深部的概念

1. 深部范围的界定

在矿业开采中,“深部”的范围并没有一个明确的定义。由于煤矿赋存的工程地质条件、煤矿开采技术、生产管理水平等存在着明显差异,因而国际上各个国家关于深部的概念并不相同,甚至连用以表征“深部”的指标也差距较大。例如,较早开展矿业开采的国家一般将超过 600 m 的开采就称为深井开采,如日本、俄罗斯等国家;而采矿较为发达的德国、南非、加拿大等国家,则将深井开采范围界定在 800~1 000 m。根据目前矿业开采的实际情况以及未来的发展趋势,一般地,我国深部资源开发的深度界定是:煤矿为 800~1 500 m,金属矿山则为 1 000~2 000 m^[4]。

由于上述对深部的定义过于宽泛,因此,许多学者在深入研究的基础上相继给出了较为精确的“深部”概念,但由于这些定义是基于各自研究的侧重点,因而用以表征深部概念的参数、指标等都不尽相同:

V. N. Nikolaevshij^[5] 等认为高地应力是深部岩体的主要特征,并据此界定了“深部”的范围;李化敏^[6] 等提出了“深井”的基本概念,并提出了相应的判别准则。

李海燕^[7]关注于经济效益,重点研究了深井开采的合理经济深度;与之相对应,崔希民^[8]等着眼于煤矿的安全性,分析了安全开采深度与开采厚度、建筑物的临界变形之间的关系。

梁政国^[9]等重点以四个参量为指标对煤矿深部开采界线问题进行了深入研究。这四个参量分别为:一次性支护适用程度、采场生产中动力异常程度、煤岩自重应力接近煤层弹性强度极限程度和地温梯度显现程度等。

何满潮^[10, 11]教授则认为,以工程深度为指标进行深部的定义在工程应用中具有局限性。因此,他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,建立了深部工程的概念体系,提出“深部”是指随着开采深度增加,工程岩体开始出现非线性力学现象的深度及其以下的深度区间。在此概念的基础上,确定了临界深度的表达式为:

$$H_{cr1} = \frac{2c}{[1 - (1 + \alpha)\tan \phi]\gamma} \quad (1.1)$$

式中: H_{cr1} —— 上临界深度;

c —— 岩石的平均黏聚力, kN/m^2 ;

γ —— 上覆岩层容重, kN/m^3 ;

α —— 巷道开挖后围岩应力集中系数, 取为 0.5;

ϕ —— 巷道围岩内摩擦角。

钱七虎院士^[2]则根据对深部洞室分区破裂等特殊工程响应特征的研究,界定了深部岩体的范围,认为开始出现分区破裂现象等非线性力学特性的深度,即可称为“深部”。

2. 深部特有的工程环境

“三高一扰动”是深部地下工程明显区别于浅埋工程的特殊环境因素。深部工程的垂直地应力往往超过岩体的抗压强度,而构造应力则趋于复杂,因巷道开挖而造成的应力集中更远高于围岩体强度;地温以 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的梯度升高,岩体在高温环境下表现出的变形破坏性质完全不同于处于普通环境条件下时;而水头压力的升高,使得矿井突水灾害更为严重。

在恶劣的工程地质条件下,深部围岩出现了大变形、难支护的特征。据统计,俄罗斯因井深增加使支护压力增加了 $0.8 \sim 2$ MPa,尽管支护的承载能力提高了 100%,但巷道修复量仍高于 40%。与其相比,我国深井巷道翻修率高达 200%^[12],甚至有些巷道因维护过于困难而被迫遗弃^[13]。近 10 年来,随着开挖深度的不断增加,用于巷道围岩支护的成本也大幅提高,增加了 1.4 倍,巷道翻修率达 40%^[14]。冲击矿压、岩爆等煤矿灾害的强度、频率和规模与巷道深度几乎成正比;而 800 m 以上深部巷道有高达 60% 存在底鼓的倾向,姜耀东等^[15]对此进行了大量现场研究,探讨了深部巷道底鼓的基本特征。深部巷道岩石工程问题不仅极大地造成了经济上的损失,也导致产生了大量的安全事故,巷道围岩安全事故占到矿山建设事故的 40% 以上。赵继银、张传信^[16]研究了构造应力场对深井巷道围岩稳定的影响。

(二) 深部岩石力学特点

鉴于深部对国民经济的重要作用及相应深部工程稳定性问题亟待解决的紧迫性,国际上对深部岩石力学的特性进行了大量研究。随着开采深度的增加,岩石破坏机理也随之转化^[17],浅部巷道岩石破坏以脆性为主,通常没有或仅有少量的塑性变形;而进入深部以后,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,因此,随着开采深度的增加,岩石由浅部的脆性力学响应逐渐转化为深部的延性力学响应行为。深部岩体力学行为的变化使工程响应发生了根本性变化,出现了特殊的非线性力学行为及新的特征科学现象。如脆—延转化,强流变大变形,分区破裂现象等。

1. 脆—延转化

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。试验室研究表明,岩石在不同围压状态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在高围压下可能转化为延性,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塑性变形,而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,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,Singh^[18]用岩石破坏时的应变值作为深部岩石脆—延转化判别标准;Kwasniewski^[19]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;陈颢^[20]等认为过渡态中,岩石通常具有脆性破坏的特征,也具有延性变性的性质;韩立军、贺永年等^[21]对岩石延性变形的试验与研究,表明岩石裂隙发育所提供的自由度是岩石延性变形的条件,并据此提出软弱岩石开始具有延性转化性质的一般范围;周宏伟、谢和平等^[22]认为,温度和压力在脆性—延性转变过程中起着外因的作用,而岩石内部的微结构的变化起着内部机制的作用。

2. 高地应力作用下岩石流变特性

在深部高应力环境中,岩石具有与时间相关的明显的流变特性。如Malan^[23]系统研究了南非金矿深部硬岩的流变性,深部环境下硬岩同样会发生明显的时间效应,且巷道支护极其困难,最大收缩率曾达 50 cm/月。孙钧^[24]在理论分析的基础上总结和归纳了岩石流变学研究的内容和意义;张玉祥^[25]等研究了深井软岩巷道围岩控制机理;康红普^[26]就软岩巷道的底鼓机制作了理论分析;范秋雁^[27]建立了软岩流变地压的控制理论;姜耀东^[15]等对深井巷道软岩围岩变形的流变特性进行了研究;何满潮等^[28]系统地总结了软岩巷道变形的八种力学机制,对煤矿软岩的工程力学研究现状作了较为全面的总结。

3. 深部巷道围岩的卸荷破坏

对深部岩石工程来说,开挖引起的卸压作用不仅造成更多裂隙的萌生和岩石力学性质的弱化,而且成为加载以外的另外一种破坏作用。姚孝新^[29]、尤明庆^[30, 31]等的卸压试验表明,当初始压力比较小时,卸压过程中存在线性变形段;而当初始轴向应力过高或超过岩石峰值强度时,一旦卸压,岩石的承载能力将急剧跌落。

(三) 深部巷道围岩分区破裂现象

综上所述,深部岩体所处的特殊工程地质环境导致其力学特性发生了显著改变。而深部岩体工程的破坏方式也与浅埋洞室有很大不同。在高地应力下,深部巷道围岩出现了分区破裂等特殊的破坏方式。

钱七虎院士^[1]将分区破裂现象定义为:随着开采深度的不断增加,当在深部岩体中开挖洞室或者巷道时,在其两侧和工作面前的围岩中,会产生交替的破裂区和非破裂区,这种现象被称为分区破裂现象。图 1.1 所示为分区破裂现象示意图。



图 1.1 深部巷道围岩分区破裂现象示意图

与分区破裂这种特殊的破坏方式相关的一些围岩变形规律较早已经为某些专家所发现。而在当时,由于这些观测现象难以用常规岩体力学来解释,因此给工程师和专家造成了一些困惑。如:

李世平^[32]在徐州权台矿的巷道中通过对上万根锚杆进行测量,发现除受拉作用外,部分锚杆受压应力作用;钟世航^[33]也发现了类似现象。

贺永年^[34]在淮北朱仙庄煤矿巷道通过超声测量围岩时获得超声波速呈现波峰一波谷交替分布状态的结果。

分区破裂现象在国内外许多深部洞室工程开挖中,通过多种物理探测手段得到证实。如 20 世纪 80 年代,E. I. Shemyakin 等^[35-38]在深部矿山 Taimyrskii 开采现场采用电阻率仪发现了分区破裂现象(如图 1.2、图 1.3 所示)。

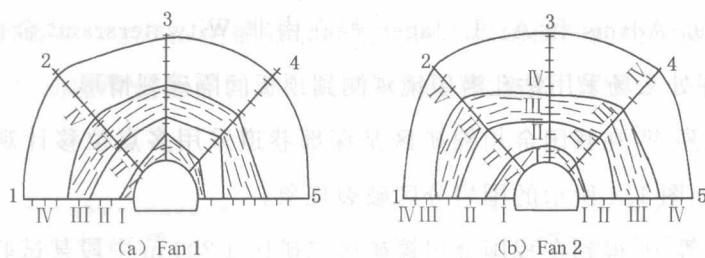


图 1.2 俄罗斯 Oktyabr'skii 矿分区破裂现象

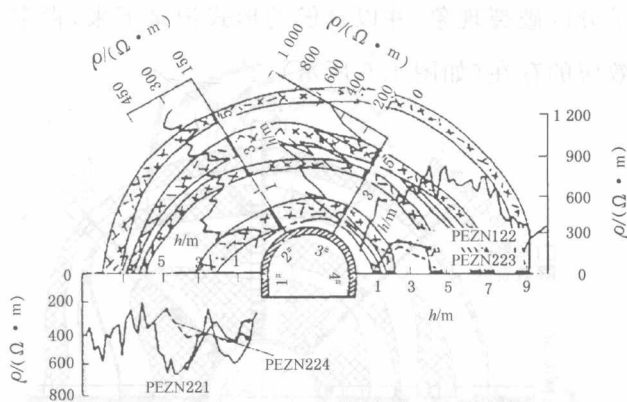
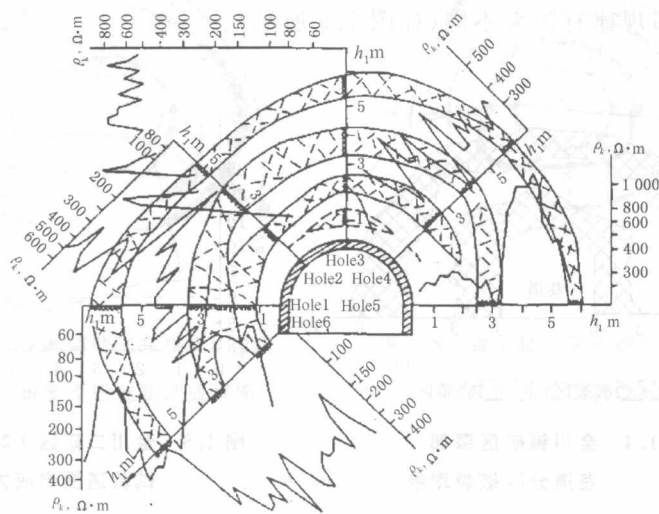


图 1.3 Taimyrskii 矿山分区破裂现象

G. D. Adams 和 A. J. Jager^[39] 在南非 Witwatersrand 金矿 2 000 ~ 3 000 m 深处采场采用钻孔潜望镜观测到顶板间隔破裂情形。

方祖烈^[40] 在我国金川镍矿区某深部巷道采用多点位移计观测围岩变形, 得到如图 1.4 所示的围岩分区破裂现象。

刘高等^[41] 得到在我国金川镍矿区二矿区 1 200 m 中段某试验道中垂直于巷道侧墙的钻孔沿径向方向的围岩应力实测结果, 该结果与浅部隧道围岩应力分布规律有很大不同(如图 1.5 所示)。

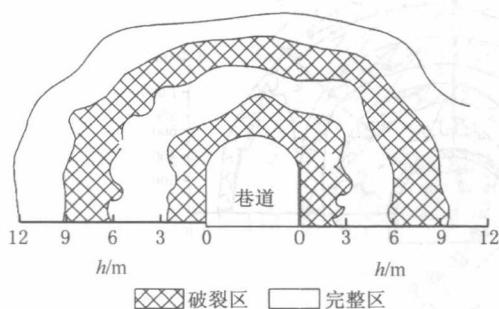


图 1.4 金川镍矿区深部巷道分区破裂现象

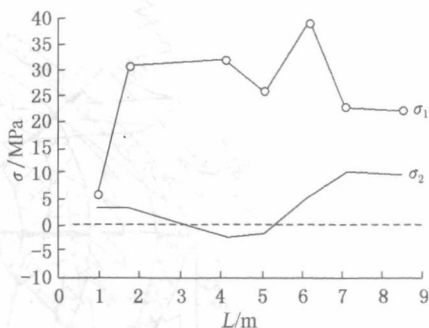


图 1.5 金川二矿区 1 200 m 中段某试验道围岩应力实测结果

李术才等^[42] 在淮南矿区丁集煤矿深部巷道围岩中通过钻孔窥测仪探测并观察到了分区破裂现象, 并以录像的形式记录下来, 肯定了深部巷道围岩分区破裂效应的存在(如图 1.6 所示)。

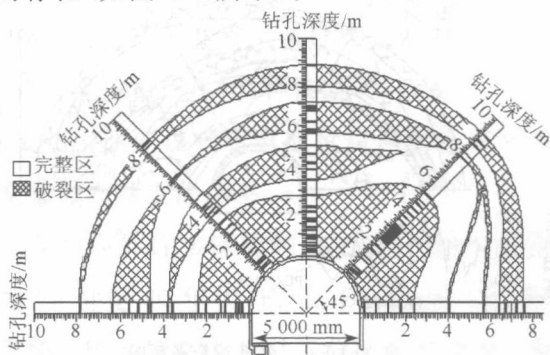


图 1.6 淮南矿区丁集煤矿巷道分区破裂现象

最大埋深达 2 375 m 的锦屏水电站二期工程辅助洞的松动圈观测数据表明,围岩松动圈中包含了若干个破裂区和非破裂区(如图 1.7、图 1.8、图 1.9 所示)。



图 1.7 锦屏辅助洞东端 5#横通
洞断面松弛测试成果图



图 1.8 锦屏辅助洞东端 6-1#横通
洞断面松弛测试成果图

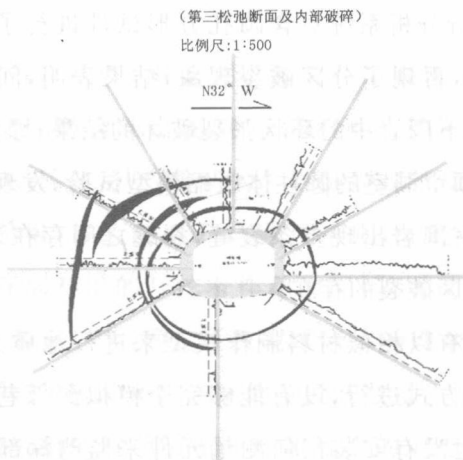


图 1.9 锦屏 A 辅助洞 AK13+595 断面松弛测试成果图

深部巷道围岩的分区破裂现象与浅埋地下峒室开挖时在其洞周出现破裂区、塑性区和未扰动弹性区依次排列的现象有很大不同,这引起了国际上岩石力学工程领域专家学者的极大关注,成为近几年该领域研究的热点。在形成分区破裂现象的理论探索方面,王明洋等^[43]研究了深部巷道围岩地质力学能的“量子化”效应,指出深埋隧洞围岩间隔破裂的出现,对于隧洞的支护形式、掘进方法、支护范围都需要重新考虑;周小平和钱七虎^[44]把深部巷道的开挖看作动力问题,运动方程采用位移势函数,运用弹性力学和断裂力学,确定了破裂区岩体的残余强度和产生破裂区的时间,进而确定了破裂区和非破裂区的宽度和数量。在分区破裂现象的试验研究方面,E. I. Shemyakin 等^[35-38]把在深部矿山 Taimyrskii 开采现场发现的分区破裂现象在实验室进行了验证,根据模型观察,发现围岩分区破裂时,其承受荷载变化相当缓慢,可以当作静态看待,从而认为间隔破裂现象是在外部条件不变或缓慢变化时形成的,而且延续时间较长;E. J. Sellers 和 P. Klerck^[45]通过试验研究了深埋隧洞围岩不连续面对间隔破裂的影响作用,发现在满足一定要求的情况下,不连续面可能成为隧洞围岩间隔破裂的起源之一;唐春安等^[46]用 RFPA 并行分析系统对含圆孔方形试件进行了三维加载条件下的破裂过程数值模拟,再现了分区破裂现象,结果表明,间隔破裂现象是沿巷道方向主应力作用下围岩中的环状张裂破坏的结果;顾金才等^[47]以水泥砂浆为材料,进行了预留洞室的圆柱体压缩模型试验,发现在平行洞室轴向的高应力作用下,洞室围岩出现多条裂缝,裂缝之间存在未破坏区域,用模型试验方式证明了分区破裂的存在。

上述试验并没有以相似材料制作模型来进行地质力学模型试验,均按照先开挖后加载的方式进行,没有能够完全模拟深部巷道开挖扰动的整个过程。除此之外,也没有安装任何测量元件来监测深部巷道围岩分区破裂形成过程中的围岩变形规律和特征,无法进一步研究分区破裂的形成机理。

目前对深部岩体分区破裂的形成机制尚不清楚,因此亟需通过相似材料地质力学模型试验研究分区破裂的衍生、发展和形成过程。正如钱七虎

院士 2008 年 7 月在第十届全国岩石力学与工程学术大会上指出:“我国在模拟材料模型上成功地进行深部围岩分区破裂效应的系统试验尚属空白,应在实验室模拟材料模型上系统进行分区破裂效应试验,进一步总结分区破裂效应的发生发展规律”。

在形成分区破裂现象的理论探索方面, M. V. Kurlenya 和 V. N. Oparin^[48, 49]在对试验资料分析和理论研究的基础上,给出了各破裂区的半径和厚度表达公式,但该公式仅适用于特定矿区,并非适用于所有巷道。Reva V N^[50]利用能量准则分析了分区破裂围岩的稳定性问题,但对其发生机制和产生条件未作解释。Guzev M. A 和 Paroshin A. A^[51]利用非欧几里德几何模型得到了应力随巷道围岩深处离巷道表面距离呈波浪形周期性变化的规律,并运用与分区破裂有关的应力状态和围岩强度两个关键因素建立了分区断裂产生条件的经验公式,但公式中含有多个必须基于第一断裂区域物理力学性质才能拟合得到的参数,所以公式适用价值不高。乌克兰国家科学院的 Metolov L. S^[52]等以洞室开挖后围岩因卸荷导致物理力学参数变化为出发点,研究了分区破裂形成机理及其形成过程中的围岩应力应变非单调变化原因。

钱七虎、王明洋等^[43, 53-55]等研究了深部巷道围岩地质力学能的“量子化”效应,指出围岩间隔破裂的出现,对于隧洞的支护形式、掘进方法、支护范围都需要重新考虑;陈建功^[56]等认为分区破裂现象是拉伸破坏与脆性张裂破坏不断重复的结果,并结合 griffith 强度准则,确定了破裂区的范围;周小平、钱七虎^[44]把深部巷道的开挖看作动力问题,运动方程采用位移势函数,运用弹性力学和断裂力学,确定了破裂区岩体的残余强度和产生破裂区的时间,进而确定了破裂区和非破裂区的宽度和数量。

潘一山^[57-59]等分别从对径压缩公式和蠕变的观点推导出岩石分区碎裂化发生的条件公式;李树忱^[60]利用 Hamilton 时域变分原理对分区破裂的形态进行了分析;李春睿^[61]等探讨了分区破裂与冲击地压的关系,认为分区破裂的形成与动力效应有关;贺永年,韩立军等^[21, 62]认为分区破裂是