



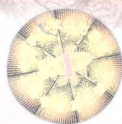
中国科协学会学术部 编

新

观点新学说学术沙龙文集

21

深部岩石工程 围岩分区破裂化效应



中国科学技术出版社

新观点新学说学术沙龙文集②①

岩体(CIP)目录编查并图

深部岩石工程围岩分区

破裂化效应

中国科协学会学术部 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

深部岩石工程围岩分区破裂化效应/中国科协学会学术部编.

—北京:中国科学技术出版社,2008.11

(新观点新学说学术沙龙文集:21)

ISBN 978-7-5046-4924-9

I. 深… II. 中… III. 岩石破裂-研究 IV. TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174653 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103177 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京迪鑫印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:9 字数:200 千字

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:18.00 元

新观点新学说学术沙龙文集①

深部岩石工程围岩分区

破裂化效应

倡导自由探究
鼓励学术争鸣
活跃学术氛围
促进原始创新

中国矿业大学出版社

序

随着经济建设与国防建设的不断发展,深部岩体工程越来越多,如逾千米乃至数千米的矿山(如金川镍矿和南非金矿等)、锦屏二级引水隧洞及辅助洞、核废料的深层地下存储、深部地下防护工程等。深部岩体工程在开挖洞室或巷道时,围岩变形和破坏等出现了一系列新的科学现象。除了岩爆和围岩挤压大变形以外,围岩的分区破裂化现象也吸引了很多岩石力学工作者的关注。

在深部岩体工程开挖洞室或坑道时,在其洞室围岩中会产生交替的破裂区和非破裂区的现象,这种现象在相关文献中称之为分区破裂化现象(Zonal disintegration)。

这种现象于20世纪70年代在南非2073米深的金矿中采用岩石潜望镜首次被观察到的,20世纪80年代开始,俄罗斯科学院西伯利亚分院对分区破裂化连续地进行了深部矿井现场观测和实验室模拟试验研究,并进行了理论分析的探索,多次指出:分区破裂化实质在于洞室围岩破裂区和非破裂区的交替,这与浅层的地下巷道围岩变形和破坏已知理论概念在原则上是不同的。国内在20世纪70年代末和80年代初,有部分学者曾在深部矿井现场实测中也测到了巷道围岩变形的力学形态——拉应变和压应变交替产生的现象。近几年来,中国学者开始关注并开展了分区破裂化现象系统研究:指出深部围岩分区破裂现象是一个与空间、时间效应密切相关的科学现象;并归纳出了分区破裂化现象主要特征参数;定性分析了分区破裂化现象产生的机理和产生的条件;提出了这一领域的研究方向。2006年以后,中国学者在一些学报上相继发表了这方面的研究成果。

围岩分区破裂化是深部岩石工程中出现的新现象,所谓“新”在于浅部岩体工程中从未发现过这种现象,并且这种现象用传统的连续介质弹塑性力学不能解释清楚。解释这些新现象发生的机理,定性以及定量的分析这些现象及其规律,数值仿真出这些科学现象正孕育形成新的岩石力学分支学科,一些学者

将其称为深部非线性岩石力学。

但应指出:目前关于这方面的研究仍处于探索阶段。既然是新现象就应该像其他新事物一样“仁者见仁,智者见智”,让我们探索吧!争辩吧!这正是学术沙龙所极力提倡的。

在这次有26位专家学者出席的21期沙龙上,大家不拘一格,在深部岩石工程围岩分区破裂化效应这个课题上发表了一些很有见地、很有启发的观点、看法,我们原汁原味地汇集在这个小册子里,供大家分享。希望能对所有读者产生启发、启迪作用,形成“一石激起千层浪”的效果,把围岩分区破裂化效应的研究推向一个新的阶段。

牛生虎

2008年8月

目 录

分区破裂化研究现状和一些思考	钱七虎(3)
深部开挖洞周围岩分区破裂化机理分析与试验验证	顾金才(7)
分区破裂化是要研究峰后的曲线	王明洋(12)
岩石厚壁圆筒卸压试验与围岩区域性断裂问题研究	贺永年(15)
用钻孔电视观测围岩分区破裂化	李术才(19)
用传统破坏理论对分区破裂化现象的解释	宋义敏 潘一山 王学滨(26)
分区破裂化正确认识与准确定位对金属矿山深部开采的	李夕兵(32)
深部围岩力学形态——拉压域特征	方祖烈(35)
分区裂隙化的有关实验和讨论	何满潮(39)
分区破裂化现象的存在性与普遍性	伍法权(44)
关于深部岩石工程围岩分区破裂化效应的思考	姜耀东(47)
几个问题思考与请教	冯夏庭(51)
积极推进“新理论”研究	袁 亮(53)

探讨利用数值流形元计算材料裂缝产生和发展的可行性	 邬爱清(55)
用物理语言分析围岩分区破裂化	 戚承志(58)
通过深埋隧道围岩变形演化过程探讨围岩分区破裂问题	 刘新荣(67)
拉伸裂缝先于剪切破裂出现时,可能形成分区破裂化	 陈伟(74)
高地应力地区大型水电工程中的岩体分区破裂问题及思考	 张春生(76)
分区破裂化现象的现场观测分析与数值模拟	 李树忱(82)
从弹塑脆性模型解的不唯一性,探讨岩石破裂可能出现的	 蒋斌松(89)
新现象	 周小平(93)
锦屏二级水电站引水隧道的数值模拟	 吴昊(94)
分区破裂化的实验研究	 Dr. 安瓦尔·恰夫晒夫(95)
深部围岩的塑性变形及分区破裂化现象	 Dr. 亚历山大·达浦西耶夫(109)
深部围岩分区破裂化现象的现场及试验观测及其工程应用	 钱七虎(114)
总结	 (115)
专家简介	



会议时间

2008年6月23~24日

会议地点

北京蟹岛度假村

主持人

钱七虎

中国科协关于“深部岩石工程围岩分区破裂化效应”为主题的新观点、新学说学术沙龙活动现在开始。首先,我对来自俄罗斯两位学者的参会表示热烈欢迎,感谢你们的到来;同时热烈欢迎各位专家及《科学时报》、《大众科技报》的媒体记者的参会。

首先介绍一下为什么要举办此次沙龙活动?大家知道,地下空间(包括矿山、水利工程、铁路、公路的隧道)的开发越来越趋向深度,就中国来说,锦屏二级水电站引水渠道两千多米深,铁路乌鞘岭隧道已超过两千米,矿山很多已达到一千多米,这样的深度产生了很多新的科学现象,其中洞室围岩中的分区破裂化就是一个重要的现象。到目前为止,还没有完全研究清楚这个现象,也就是说,我们对它的发生、发展的规律还没有完全掌握,还不能完全从数字模拟仿真出其现象的发生和发展规律。

另外还有其他一些新的科学现象,如岩爆、挤压大变形等,高地应力和分区破裂化之间有什么关系还没有完全研究清楚。因此,在这个基础上,我们申办了相关主题的新观点、新学说学术沙龙并得到中国科协领导和机关的大力支持,在此表示感谢!



根据规定,每人发言时间不能超过 10 分钟,希望大家遵守,发言简明扼要,讲清观点,以便让更多的同志有机会发言。另外,因为是新观点的沙龙,是具有探索性的,所以允许不同观点和意见的交锋,但要讲清道理,我们鼓励有不同的观点,这样才能够把讨论引向深入,能够造成观点的碰撞,产生新的观点。本次沙龙活动仅是一个开始,以后在这个领域能够有更多的讨论并产生完整的、新一些的学术观点。

主持人

黄子刚

尊敬的各位领导、各位专家、各位同仁,大家好!今天非常荣幸能在这里与大家共同探讨深部岩石工程围岩分区破裂化效应这一重要课题。本次沙龙活动旨在搭建一个学术交流的平台,希望大家能够畅所欲言,分享各自的观点和研究成果。本次沙龙活动仅是一个开始,以后在这个领域能够有更多的讨论并产生完整的、新一些的学术观点。

本次沙龙活动由黄子刚主持,邀请了多位专家、学者和工程技术人员参加。在发言过程中,大家围绕深部岩石工程围岩分区破裂化效应的机理、影响因素、工程应用等方面进行了深入的交流和讨论。大家一致认为,深部岩石工程围岩分区破裂化效应是一个复杂的工程地质问题,需要进一步的研究和探索。同时,大家也提出了一些有价值的建议和意见,为今后的研究工作提供了有益的参考。

本次沙龙活动取得了圆满成功,达到了预期的目的。感谢各位领导和专家的积极参与和支持,感谢各位同仁的辛勤工作和无私奉献。我们将继续秉承“学术交流、共同进步”的宗旨,为深部岩石工程围岩分区破裂化效应的研究事业做出更大的贡献。



分区破裂化研究现状和一些思考

◎ 钱七虎

本次沙龙活动没有权威,没有领导,作为牵头的科技人员,我先发言,提供以下一些观点供大家讨论。我在研究分区破裂化现象的过程中,与南京解放军理工大学、山东大学等单位的人员共同做了一些具体工作。

第一,通过南非和俄罗斯矿山的实测数据以及我们自己在中国实测的淮南煤矿深部巷道(700 多米)、锦屏水电站二级辅助洞巷道现场的实测数据显示:在深部的巷道、围岩里确实存在分区破裂化的现象。

锦屏水电站辅助洞,原来实测的目标是“松动圈”,经过数据整理后,发现“松动圈”只是个笼统的概念,“松动圈”的整体中发现里面是分离的破裂区,中间隔有非破裂区,这些问题稍后可由山东大学的同志介绍。

第二,什么叫分区破裂化?我们与俄罗斯和南非的研究人员对分区破裂化的理解是一致的,就是围岩里面破裂区和非破裂区交替发生的现象(破裂区—非破裂区—破裂区—非破裂区)。破裂区是破裂区裂缝相对密集的区域,非破裂区也可以称为亚破裂区,不是说里面没有一点裂纹,而是裂纹相对稀疏的区域。

第三,分区破裂化、围岩松动圈和滑移线的分区破裂化是什么概念?哪些相同、哪些不同?相同的如刚才所讲,锦屏辅助洞原来的概念叫松动圈,可能几米范围内有一个松动圈,实际上发现中间是由若干个破裂区和非破裂区交替发生所组成的。有可能分区破裂化这个区域和传统的松动圈指的是一回事,但如果传统的松动圈指的是一个破裂区的话就不一样了,围岩的剪切引起滑移线;如果这个分布区是若干个滑移线分布区,中间有非破裂区,像割开的状况就是一样的;如果仅是滑移线分布就不一样。这是我理解的异同点。



第四,在分区破裂化的形成机理里必须重视围岩中引起张拉变形的三个作用。分区破裂化是深部高地应力区发生的现象,在垂直高地应力的作用下,假如圆形巷道径向方向为 X 方向,巷道的轴向为 Y 方向,则 Z 方向的高地应力必然要引起 X 侧向膨胀,要考虑这个方向的张拉变形作用;同时要考虑轴线方向(Y 方向)的水平地应力所引起的 X 方向径向的张拉作用。第三个径向张拉怎样引起的呢?是由于开挖面和围岩深部高的应力差,引起的径向向巷道方向的动力变形、动力位移,引起的一个方向的张拉变形,三个变形都作出了贡献,要特别重视第三个动力作用,这是区别浅部和深部的重要原因。浅部应力低,所以这个应力驱动很小,它的动力作用可忽略不计,岩石深部的地应力高,应力梯度大,产生的径向加速度就大,径向的位移就大,这个动力作用就不能忽略。俄罗斯专家多年前曾指出:Y 方向即水平轴线方向的应力有重要的作用。国内一些实验也证明了这点。但不能得出来 Y 方向一定要最大,在我们的计算里面,地应力在不同地区这两个比值是不一样的,有的是垂直地应力大,有的是水平地应力大。水平地应力和垂直地应力的关系在大部分情况下是 0.8 ~ 1.2,也就是 1 上下。不能说地应力永远水平大,在一些有关地应力方面的著作里面可以看到有 4 ~ 5 的比值情况。

第五,如果做分区破裂化模拟实验,必须先加载后开洞,以前俄罗斯研究院出版的有关深部岩石模拟著作里面也讲了必须“先加应力后开洞”。俄罗斯有两种开洞方法,一种是钻头,一种是加一个装置后再加载,然后卸掉装置。只有先加载后开洞,才能形成高地应力,产生动力过程,如果先挖洞后加载,不断地逐步加载和变形,加速度就不会产生,不能形成高地应力卸载。就得不到分区破裂化这个现象。

第六,分区破裂化研究有三个阶段:第一,最早的一些的论文叫定性研究,但不系统、不全面,就是画一个点,由这个点来分析怎么变形。但是这个定性很重要,对我们仍然有启发意义。第二是在某些假设条件下的定量研究。我们国内加了一些假设,定量研究出来几个圈破裂了。目前已经进入第三个阶段,就是数值仿真和模拟阶段。通过给定参数来进行分区破裂化的仿真,模拟现场条



件高地应力下破裂怎么随时间逐次发生?怎么形成破裂区、非破裂区?第三个阶段最重要,如果目前再研究第一个阶段、第二个阶段就落后了,重点要放在第三个阶段上。

第七,数值模拟仿真的初步研究结果表明:

(1)分区破裂化主要的条件中最关键的因素是高地应力,根据我们计算的结果,地应力大于单轴抗压强度时才产生,反之不产生,或者只产生一个塑性区,不产生多个区。

(2)地应力大小是决定破裂区数量的主要因素。

(3)水平地应力和垂直地应力大小不同,经过计算破裂区的形状跟水平和垂直两个地应力相互大小有关,根据锦屏测出的数据发现,如果垂直的地应力小,算出来破裂区有可能不是完整的,四个角上有破裂区。我们把水平地应力加大以后,形成了水平方向的破裂区,像以前南非、俄罗斯计算出来的形状。所以这两个大小是确定这个破裂区形状的重要因素。

(4)围岩里面是否有原生裂纹?原生裂纹就是没有挖洞以前形成的裂纹。原生裂纹是分区破裂化产生分布的重要因素。如果有原生裂纹,相对来说,小一点的地应力就可以产生了,它的形状、分布对于这个分区破裂化分布也是重要因素。

第八,分区破裂化是发生在峰值强度以后的应力下降段的岩石破裂。我们研究分区破裂化是峰值强度以后的破裂。所以,分区破裂化数值仿真必须研究岩石应力达到峰值下降后的关系,而且宏观、微观必须一致,也就是微观本构关系一定要跟宏观的应力应变曲线一致,能够反过来以微观推到宏观里出现;否则这个仿真就值得推敲,是不是真实的。比如损伤变量的本构关系应推得下降段的宏观变形模量是负的,损伤变量的关系不是定值,是应变的函数通过损伤反过来再求是不是一致。

第九,这个观点还没有完成,我们还在继续研究,高地应力深部围岩的三个现象:挤压大变形、岩爆、分区破裂化,深部围岩里面三个问题是一个科学问题的三个现象,应当用统一的理论来解释,用统一的理论来模拟,关键是参数初始



状态包括岩性不一样。

这是我简单地归纳了我们研究的初步的观点和结果,供各位讨论。

什么叫动力过程? 什么叫静力过程? 什么叫动力加载? 什么叫静力加载? 在结构动力学的教学中,动载荷就是在结构或介质里面其作用引起的惯性力不能忽略不计;动力加载、静力加载区别的关键是加载速率。在实验机上加载非常慢就是静力加载,加载很快就是动力加载。加载速率有两个因素,一个是峰值大小,一个是从0增加到峰值的时间。为什么浅部的是静力,深部的是动力? 因为深浅地应力可差100倍,同样的卸载时间,就相差100倍了。所以深部的卸载就可能是动载,浅部的就是静力加载,区别是加载速率,加载的峰值和加载的时间或者卸载的时间,是加载和卸载速率的两个因素。

应力波起的作用是确定介质或结构里面,参加到动力反映的这个区域。假如说桥上一个飞机掉下来,撞在中间,在研究撞击过程的时候不能按桥跨两千米全梁长来算。因为这个边界没参加反映,这个问题要用到应力波的时间。加载速率、动力过程、静力过程、应力波跟结构和介质的频率有关系。频率对快和慢起很重要的作用。因为结构反映时间和介质反映时间都有频率、有周期,如果是刚性结构的话时间更要严格;如果是柔性结构,它的周期很长,这个反映就小。所以深部由于地应力高,同样卸载时间,可能是动力加载。浅部就不考虑。

另外,我担心的问题是“仿真”不“真”,我有几个学生在做这方面的实验和计算,没有出现这种现象。我们一定要考虑破坏准则,不能光考虑剪切破坏,要考虑新的强度准则,可以考虑张拉强度准则。光剪切滑移线,不能开,应力就不能释放卸载,还要考虑动力过程。

更大的问题,希望大家研究一下微分方程的类型。我们研究分区破裂化,是研究岩石的破坏,一定在峰值后下降段。下降段有什么特点? 变形模量是负的,所以数值分析中它的微分方程里是椭圆形的,而在应力—应变曲线的上升段模量是正的,微分方程是双曲线型的。可以用损伤变量,但细观和宏观的一致性很重要。

国外也在研究这个问题,在很多数值分析的文献都能看到。



深部开挖洞周围岩分区破裂化机理分析与试验验证

◎ 顾金才

关于深部开挖分区破裂化问题,向大家汇报一下我的观点和看法。

深部开挖岩体力学问题中最不好理解的是有关洞室围岩分区破裂化问题。分区破裂化就是洞室围岩产生一圈一圈的破坏。怎么会产生这种破坏呢?对于这个问题,一开始百思不得其解,经过一段时间思考后,我认为在一定条件下还是有可能的,并按自己的想法做了一个试验,证明我的想法基本符合实际。下面我分两个方面进行介绍。

一、对分区破裂化现象的基本观点和看法

首先,同意钱院士的观点,在深部开挖中洞周围岩是可以产生分区破裂化的,但是我认为不是在任何情况下深部开挖都可以产生分区破裂化,它必须在满足一定条件下才能发生。这些条件主要是深部地层的特殊环境。

深部地层的特殊环境主要有四点:一是地应力数值较大;二是水平地应力较大,因为在深部岩体中构造地应力占主导地位,而构造地应力一般是水平方向较大;三是在深部岩体内部,由于地壳的长期构造运动积蓄了大量的变形能;四是岩体本身力学特征是抗压强度高,抗拉强度低。上述四个特征决定了深部开挖中洞周围岩有可能产生分区破裂化现象。

我认为在下述两种条件下,深部开挖洞周围岩将有可能产生分区破裂化现象:

第一,洞室围岩在较大的轴向压力作用下。因为洞室在较大的轴向压力作用下,洞周材料将产生侧向膨胀,引起洞壁产生较大的径向位移;同时,在洞壁



背后的材料内也将产生较大的径向拉应变。当洞周材料内的径向拉应变值超过材料的抗拉极限时材料便发生断裂。如果洞室的轴向压应力很大时,洞壁背后材料发生一次断裂之后还要发生第二次、第三次断裂。

深部开挖中洞室轴向压应力有可能很大。这除了上面谈的深部岩体本身水平地应力较大外,洞室开挖后洞室轴向应力也有集中效应。

第二,深部岩体内储存的大量变形能获得突然释放。因为在岩体内储存的大量变形能获得突然释放时,将在洞壁围岩内产生卸载波。卸载波由洞壁向介质内传播,在传播的过程中在介质内产生拉应力。当由卸载波在介质内产生的拉应力超过介质内某点材料的抗拉极限时,那里的材料便被拉断。同样,如果卸载波强度很高,在介质内产生第一次拉断后,还会产生第二次、第三次拉断。这是静力问题引起的动力效应。如果洞室采用全断面爆破开挖法施工,围岩能量获得突然释放是可能的。若能量不是突然释放,而是一点一点地被释放掉,在围岩中储存的能量即使很高,也不会产生分区破裂化现象。

鉴于上述认识,我认为深部开挖围岩产生分区破裂化现象是有条件的,不是在任何情况下都会发生的,它不是一种普适现象。

我国岩土工程界对深部开挖围岩分区破裂化现象非常关注,有多位学者从不同角度开展了相关研究,并取得了很多成果。我认为,在对这一问题的研究方法、途径上,应从深部岩体的特殊环境上多考虑,而不应把深部岩体中的洞室受力状态看成与通常的洞室受力状态一样,只是压应力数值较大;不是采用现有的理论进行分析计算,而是通过建立新的理论把深部开挖中的分区破裂化现象计算出来,这恐怕是不合适的。因为经典理论,如摩尔库仑理论等,经过长期的工程应用,并被实践证明是正确的,是不能否定的。

二、对分区破裂化现象的试验验证

关于洞室在最大轴向压应力作用下将产生分区破裂化现象,我们做了一组试验,证明了我的观点是基本正确的。试验方法是采用一个圆柱体试件,试件的顶面受轴向压力作用,其周围有钢环约束,钢环壁厚 5mm,如图 1 所示。

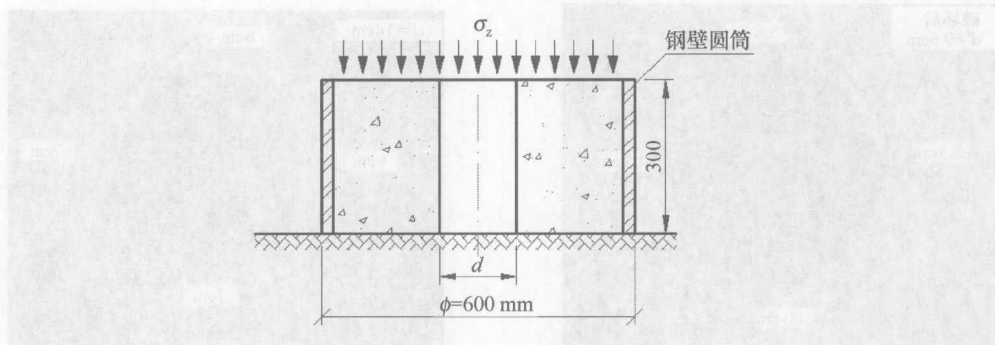


图1 分区破裂化现象模型试验方案

圆柱体材料为水泥砂浆,其抗压强度 0.76MPa,抗拉强度 0.07MPa,近似模拟某种岩体。

圆柱体试件直径 $\phi = 600\text{mm}$ 、高 $H = 300\text{mm}$ 。模拟洞室布置在圆柱体的中心,共有两种形式,一是圆形洞室,二是直墙拱顶洞室。圆形洞室分两种,直径分别为 $d_1 = 110\text{mm}$ 和 $d_2 = 160\text{mm}$;直墙拱顶洞室跨度 $B = 100\text{mm}$,高度 $H = 200\text{mm}$ 。

试验是按“先开洞,后加载”的方法进行的,即先把洞室挖好后再加载。这样做与实际工程中洞室开挖与受力顺序是不同的。若按实际工程,应该采用“先加载,后开洞”的方法进行试验。但后者试验方法比前者复杂,故本次试验采用的是前者方法。根据我们的经验,在通常情况下,上述两种试验方法给出的洞室破坏部位、破坏形态是基本相同的。但在高应力条件下,按“先加载,后开洞”的方法试验,模型是否会产生一圈一圈的破坏,目前尚无把握。我们拟在今后立项专门开展这方面的试验研究,按“先加载,后开洞”的方法,模拟实际工程中的受力情况,研究不同地应力方向、不同地应力水平情况下的洞室破坏情况,探讨在不同条件下洞室围岩产生分区破裂化现象的可能性。

本次试验结果见图2、图3、图4。