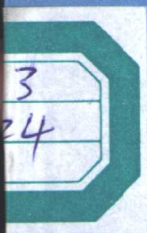


●冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书

有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术

郭然 潘长良 于润沧 著

冶金工业出版社



冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书

有岩爆倾向硬岩矿床 采矿理论与技术

郭 然 潘长良 于润沧 著

北 京
冶金工业出版社

内 容 简 介

著者从防治矿山岩爆角度出发,给出了新的岩爆定义。在系统研究 200 余幅世界硬岩矿山岩爆现场照片,现场考察南非和印度金矿的基础上,建立了以岩爆定义、岩爆的震源机理、岩爆的破坏机理、岩爆强度(岩爆破坏性指标)、影响岩爆因素、岩爆危险性判别、岩爆前兆和岩爆发生的时间规律等为内容的硬岩矿山岩爆基础理论体系。

本书可供从事硬岩矿床采矿工作的现场技术人员、高等学校采矿专业本科生和研究生、从事硬岩岩爆矿床采矿技术研究工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术/郭然等著. —北京:
冶金工业出版社, 2003. 1

(冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书)

ISBN 7-5024-3124-1

I. 有… II. 郭… III. 坚硬岩石—岩爆—研究
IV. TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 079547 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 朱华英 美术编辑 李 心 责任校对 卿文春 责任印制 李玉山
北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2003 年 1 月第 1 版, 2003 年 1 月第 1 次印刷

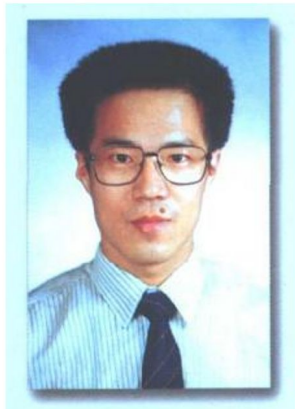
850mm×1168mm 1/32; 4.875 印张; 126 千字; 142 页; 1—2000 册

18.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



作者简介

郭然，男，1963年出生，2000年毕业于中南大学，获工学博士学位，教授级高级工程师。现任中国有色工程设计研究总院副总工程师。主持并参加过安庆铜矿、冬瓜山铜矿、赞比亚谦比西铜矿、会泽铅锌矿等20余座不同规模矿山的设计和科研工作。获国家科技进步二等奖1项、部级科技进步一等奖1项、中国工程咨询优秀成果一等奖1项。发表过《安庆铜矿采矿方法设计与实践》、《Development of Rockburst Research for Metal Mines in China》、《冬瓜山铜矿岩爆倾向性分析》、《Mathew 法在采矿方法设计中的应用》、《有岩爆危险巷道的支护设计》和《新建有岩爆倾向硬岩矿床采矿技术研究工作程序》等论文10余篇。

出版者的话

为了贯彻落实江泽民总书记提出的“要造就一批进入世界科技前沿的跨世纪的学术和技术带头人”的战略方针,推动冶金学科发展和冶金工业科技进步,我们组织策划了《冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书》。这套丛书的组稿对象是冶金系统(黑色、有色)内年龄在 45 周岁以下、具有正高职称的省部级以上的学科和技术带头人。每位作者可以根据自己正在从事或已经从事过的科学研究或技术开发成果,独立或合作撰写一本专著。如果是理论著作,要求在基础研究和基础理论上较大的创新和突破;如果是工程技术著作,要求其技术处于国内或国际先进水平,或指导实践取得了重大经济效益。丛书总数暂不定,根据作者的实际情况、成书的条件和稿件的质量,计划到 2010 年,每年安排出版几种。

我们编辑出版这套丛书的目的,是希望优秀的跨世纪青年人才脱颖而出,激励他们经过不断的创新与总结,在科技领域确立自己的学术地位和技术地位,促进冶金科学技术的传播和向生产力的转化,推动冶金学术建设的繁荣和健康发展,为国家“百千万人才工程”培养、选拔和输送杰出人才。

欢迎优秀的跨世纪青年专家参加本丛书的著述。

前 言

岩爆是岩体破坏的一种形式。它是处于高应力或极限平衡状态的岩体或地质结构体,在开挖活动的扰动下,其内部储存的应变能瞬间释放,造成开挖空间周围部分岩石从母岩体中急剧、猛烈地突出或弹射出来的一种动态力学现象。岩爆的发生常伴随着岩体震动。世界上最早记录并报道岩爆的历史可以追溯到 18 世纪 30 年代,那次岩爆发生在英国南史塔福煤田的莱比锡煤矿。从此以后,世界各地的金属矿山、煤矿、交通运输隧道和引水隧道等先后发生各种规模的岩爆。特别是金属矿山和煤矿的地下开采,随着开采深度的不断增加,原岩应力随之增大,导致岩爆发生频率逐步提高,岩爆的破坏性也急剧加大。

我国发生岩爆的历史较短,除煤矿岩爆发生的频率相对较高外,金属矿山和各种隧道的岩爆频率一般较低。直到目前为止,我国的岩爆研究工作主要是围绕着坚硬脆性岩石的失稳破坏机理和建立在统计学基础上的岩爆的预测预报而展开的,对有岩爆危险巷道的支护机理和技术、有岩爆危害矿山的采矿理论和技术等的研究很少。

处于活动期的区域大断裂,通常是自然地震的震源,经常会发生强烈地震,并且造成严重的破坏。采矿活动的持续,引起矿区范围的岩体和地质构造所承受的应力状态经常变化,生产过程中既可能产生新的采矿断层,也可能导致原有断层的重新活动,其结果如同自然地震一样,会导致矿山岩爆的发生,这种类型的岩爆强度和破坏性都比较大。我国目前关于矿山岩爆的研究却很少提到这种岩爆。

世界上大多数受岩爆危害的矿山,都是生产过程中发生岩爆并日趋强烈后才开展研究工作的。以前从未发生过岩爆,或在生产和基建过程中发生过破坏性较小的应变型岩爆,矿床的岩爆

研究工作如何开展,到目前为止还没有一套完整的程序可循。

近年来,作者结合国家“九五”重点科技攻关课题“千米深井300万t级矿山强化开采综合技术研究”,以安徽铜都铜业股份有限公司冬瓜山铜矿为工程实例,开展了系统的有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术的研究工作,针对上述提到的问题都做了比较系统的研究,本书就是作者在这些方面的主要研究成果的初步总结。作者希望书中介绍的理论和方法,能对从事有岩爆危害的硬岩矿床采矿生产和研究工作的同行们有所裨益。限于作者水平,不当之处,恳请广大读者不吝赐教。

本书能够得以完成和出版,作者要感谢中国有色工程设计研究总院各位领导的大力支持和帮助,感谢中南大学古德生院士给予的关心和指导。在本书撰写过程中还得到中国有色工程设计研究总院张文荣教授,中南大学吴爱祥教授、李夕兵教授、王文星教授和曹平教授的帮助,在此一并致谢。

作 者

2002年初冬于北京

067914

地质学及矿业工程图书简介

书 名	作 者	定价(元)
矿物资源与西部大开发	朱旺喜	38.00
成矿区带地球化学异常评价方法	吕国安	9.80
胶东招莱地区花岗岩和金矿床	罗镇宽等	28.00
脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用	郭光裕等	38.00
散体动力学理论及其应用	吴爱祥等	42.00
碎矿与磨矿	李启衡	28.00
磁电选矿	王常任	35.00
选矿厂设计	冯守本	36.00
当代胶结充填技术	孙恒虎等	45.00
地下装载机—结构、设计与使用	高梦熊	55.00
地下铲运机	张栋林等	68.00
工艺矿物学(第2版)	周乐光	32.00
矿石学基础(第2版)	周乐光	32.00
矿山生态复垦与露天地下联合开采	杨福海等	20.00
岩石爆破理论与技术新进展	熊代余等	35.00
矿床无废开采的规划与评价	彭怀生等	14.50
矿业经济学	李祥仪等	15.00
充填采矿技术与应用	刘同有等	55.00
中国矿产资源主要矿种开发利用水平与政策建议	国土资源部矿产开发管理司编	90.00
冶金矿山地质技术管理手册	中国冶金矿山企业协会	58.00

目 录

1 硬岩岩爆研究现状	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 世界范围内岩爆发生概况	(3)
1.2.1 国内外煤矿发生岩爆的情况	(3)
1.2.2 国内外非煤矿山岩爆发生情况	(4)
1.2.3 隧道岩爆概况	(5)
1.3 硬岩矿山岩爆研究现状	(6)
1.3.1 岩爆机理研究现状	(7)
1.3.2 已有的岩爆预测预报研究成果	(16)
1.3.3 硬岩矿山岩爆控制技术研究现状	(20)
1.3.4 已有岩爆研究成果的综合评述	(22)
1.4 本书研究的目的和内容	(24)
1.4.1 目前岩爆研究存在的几个主要问题	(24)
1.4.2 目的、内容和方法	(24)
2 硬岩岩爆矿床开采理论基础	(26)
2.1 引言	(26)
2.2 岩爆的定义	(26)
2.3 岩爆发生机理	(28)
2.3.1 岩爆的震源机理	(28)
2.3.2 岩爆的破坏机理	(34)
2.4 岩爆的强度	(36)
2.5 硬岩矿床岩爆分类	(45)
2.5.1 根据岩爆震源机理进行岩爆分类	(46)
2.5.2 根据震源参数之间的关系进行岩爆分类	(47)

2.5.3	根据地震波初动符号进行岩爆分类	(49)
2.5.4	各种岩爆分类的相互关系和岩爆防治措施	(51)
2.6	岩爆因素分析和岩爆危险性判据	(53)
2.6.1	影响岩爆因素	(53)
2.6.2	岩爆发生条件和危险性判别指标	(55)
2.7	岩爆前兆及发生的时间规律	(61)
2.7.1	岩爆发生前岩体的状态特征	(61)
2.7.2	岩爆发生的时间规律	(63)
2.8	小结	(65)
3	有岩爆倾向硬岩矿床采矿技术	(68)
3.1	引言	(68)
3.2	冬瓜山矿床开采技术条件	(68)
3.2.1	冬瓜山矿床的赋存特点	(68)
3.2.2	冬瓜山典型矿岩常规岩石力学实验	(70)
3.2.3	狮子山矿区原岩应力场	(71)
3.2.4	岩体结构特征和岩体稳定性分级	(81)
3.2.5	冬瓜山矿床开采的岩爆倾向性	(83)
3.3	有岩爆倾向冬瓜山矿床采矿方法选择	(88)
3.3.1	引言	(88)
3.3.2	充填控制岩爆机理	(89)
3.3.3	冬瓜山矿床采矿方法的初步确定	(92)
3.3.4	岩爆对采矿工艺的特殊要求	(94)
3.3.5	强化开采对采矿工艺的要求及 采矿方法的确定	(96)
3.4	采场布置形式及结构参数优化	(98)
3.4.1	采场布置形式	(98)
3.4.2	采场结构参数优化	(99)
3.5	回采顺序优化	(104)
3.5.1	首采地段的确定	(104)

3.5.2 采场崩矿方式优化·····	(105)
3.6 采准工程支护·····	(108)
3.6.1 有岩爆危险巷道支护设计原理·····	(108)
3.6.2 岩爆对支护系统的特殊要求·····	(109)
3.6.3 目前硬岩矿山常用支护系统评述·····	(109)
3.6.4 采准巷道可能发生岩爆类型和 强度预测·····	(111)
3.6.5 采准巷道支护形式·····	(112)
3.7 实时监测在防治岩爆中的重要性·····	(114)
3.7.1 实时监测与岩爆预报的关系·····	(114)
3.7.2 量化地震学的发展及其在岩爆 矿山的应用·····	(115)
3.7.3 冬瓜山矿床采矿的岩爆监测系统·····	(118)
3.8 小结·····	(120)
4 有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论·····	(122)
4.1 引言·····	(122)
4.2 岩爆发生可能性的初步判别·····	(124)
4.2.1 饼状岩心·····	(124)
4.2.2 矿床埋藏深度大·····	(124)
4.2.3 坑探或基建井巷工程发生岩爆现象·····	(125)
4.3 有代表性岩样岩爆倾向性指标测定·····	(125)
4.4 原岩应力测量·····	(127)
4.5 岩爆危险性判别·····	(128)
4.6 有岩爆倾向矿床的采矿工艺·····	(129)
4.7 有岩爆深埋硬岩矿床的安全高效采矿·····	(131)
4.8 小结·····	(133)
参考文献·····	(134)

1 硬岩岩爆研究现状

1.1 引言

随着人类社会的发展和进步,对矿产品的需求与日俱增。虽然现代科学技术促进了矿产品代用品(特别是塑料制品)的发明和广泛应用,但直至今日,人们的生产和生活仍在相当大程度上依赖于矿产品,如:各种贵金属、贱金属、稀有金属等。而要获得这些人类当今生产和生活必需的产品,几乎无一例外地离不开采矿业。正如 2000 年在美国召开的第 18 届世界采矿大会确定的主题所言“一切都从采矿开始(Everything Begins With Mining)”。

采矿业发展到今天,世界上许多国家的浅表矿床资源都已经或正在逐渐枯竭。在现代科学技术水平尚未达到这样的高度,也就是还没使人们大规模开发海底矿床资源成为现实之前,开发陆地深埋矿床资源仍将是采矿业最现实的选择。这主要是因为人们在长期从事陆地浅表矿床开采实践中,逐渐积累了丰富的地下矿床开采技术知识。对许多地下矿山而言,开采首先是从浅部开始(有相当多的矿山初期采用露天开采)。随着开采深度的增加,采矿工作者面临的技术挑战和要解决的难题逐渐出现,其严重程度有一个从弱到强的逐步发展过程。这就为人们逐步认识和解决这些难题提供了时间。采矿实践表明,陆地深埋矿床开采向采矿工作者提出的挑战主要有:随着采矿深度的增加,地下工作面及其周围岩体的原岩应力呈线性增加,结果导致岩体失稳现象迅速增多,特别是以岩体突然猛烈破坏为特征的岩爆日趋严重,极大地威胁和危害着井下人员和设备的安全;地热增温率的存在,使得地下深部采矿工作面附近的原岩温度升高,有时甚至超过人类的生理极限,不采取井下通风和降温措施,井下工作人员的劳动生产率将大大降低,严重时甚至给人身安全造成极大伤害;与浅井矿山相比,

深井开采时的提升和排水费用急剧增加,这对提升和排水设备提出了更高的特殊技术要求,常规浅井的提升和排水设备在技术上无法满足深井采矿需要,促使人们利用新技术开发新型设备。

针对上述深井矿床开采面临的技术挑战,采矿工作者经过长期不懈地努力,较好解决了深井通风降温和提升排水等难题,而对岩爆这一复杂难题的认识却相对滞后。目前解决深井工作面高温问题的主要方法有两种:一是通过加大井下工作面的风量,进而改善井下工作面的气候条件,从而达到调节人体热循环系统的目的;二是采用人工方法降低井下工作面空气的温度。降低井下工作面空气温度有两个途径:途径之一就是降低全部进入井下工作面空气的温度,用大型风机将冷却后的空气压入井下;另一途径是在制冷站(可设在地表,也可设在井下硐室内)先制冷水(或冰水混合液)再将其用隔热管输送到工作面附近,通过热交换器进行局部井下空气和冷水的热交换,从而达到降低有关人员工作地方局部空气温度的目的。另外,井下凿岩和喷雾降尘均采用制冷后的冷水。制冷站设在地表时,用于井下空气降温而输入到井下的冷水大幅度提高了深井矿山的排水费用。为了部分补偿由此而增加的能量消耗,许多矿山都在井下安装透平机发电以充分利用冷水的势能。在超深井(采矿工作面距地表近 4km 的南非西部深水平金矿)将冷媒由冷水改为冰,充分利用同体积冰的冷含量比冷水的冷含量高的特点,从而达到减少井下排水量、降低井下排水费用的目的。虽然目前采矿最深的矿井深度已接近 4km,但是第一段(自地表向下)单段提升的高度却只有约 2km 左右。一般采深超过 2km 的矿山均采用接力提升,其中第一段提升的高度约 2km,第二段提升高度一般不超过 1.5km。对于采深超过 3km 的矿山,一般采用 3 段接力提升。深井矿山一般采用刚性罐道。

就上述深埋矿床开采三大技术难题之一的岩爆而言,它出现的时间最早,人们对其研究的历史也最长。但人们对岩爆的认识,特别是对岩爆发生机理(也称震源机理)的认识还很不深刻,因此岩爆的及时准确预报仍是一个有待进一步研究解决的难题。矿山

开发伊始就受到岩爆威胁的矿山在世界上还不多见,因此对新建深井矿山采矿技术的研究更是一个包含岩爆在内的复杂的系统工程。

1.2 世界范围内岩爆发生概况^[1,2]

岩石的猛烈破坏会给隧道掘进和地下采矿(有时甚至对露天采矿)造成极大的威胁和严重危害。虽然自世界上首次记录并报道岩爆至今已有长达两个半世纪的历史,但是时至今日还没有一个统一公认的岩爆定义。这足见岩爆问题本身的复杂性。尽管如此,岩爆最突出的特点,即:一定体积的岩体从其母岩中以猛烈的方式突然向地下人造空间弹射出、膨胀突出或崩塌这一点却是大家所熟知的。人们报道岩爆的发生也就是基于此。

1.2.1 国内外煤矿发生岩爆的情况^[3,4,5]

据有关资料介绍,世界上最早记录并报道的岩爆(煤爆)于1738年发生在英国南史塔福煤田的莱比锡煤矿。但直到19世纪80年代,西欧许多国家的煤矿才开始发生越来越多的岩爆和煤爆。苏联的基泽洛夫矿区于1947年发生了该矿区历史上有记录的第一次煤爆,随后又有库兹涅茨、滨海、中亚细亚、特克布尔、伯绍拉和波里等煤矿先后发生煤爆。德国的鲁尔矿区是该国发生煤爆最早和最多的产煤区,仅1910~1978年就记载了危害性岩爆283次。波兰的上西里西亚矿区,是该国煤爆发生最多也最严重的矿区,1958年在该矿区的卡托维茨矿首次记录了煤爆。我国最早记录的煤爆发生于1933年在抚顺胜利煤矿,当时开采深度仅200m。自那以后,随着开采深度的增加和开采范围的不断扩大,北京矿务局的门头沟、城子、大台、房山、千军台和长沟峪等矿井,抚顺矿务局的龙凤和老虎台矿,枣庄局的陶庄矿,开滦局的唐山矿等煤矿先后发生煤爆。据不完全统计:1949~1997年,我国的33个煤矿发生了2000多起煤爆事件。煤爆的强度为里氏0.5~3.8级,大于3.0级以上的煤爆事件至少5次以上,最大的震级达4.2级。造成严重的危害,累计伤亡几百人,停产1300多天。到目前

为止,发生在我国坑内矿山的岩爆主要集中在煤矿。

1.2.2 国内外非煤矿山岩爆发生情况^[6~16]

金属矿山出现岩爆的历史要比煤矿晚。根据作者对有关资料分析,金属矿山首次发生岩爆或者说是明显注意到岩爆的时间可能是 19 世纪末至 20 世纪初。在美国,金属矿山首次发生岩爆被认为是 1904 年发生在密歇根州铜矿区的亚特兰大矿,该矿于 1906 年因为岩爆的严重破坏而关闭。美国目前受到岩爆危害最严重的是位于爱达荷州北部克达伦的几座铅锌银矿。克达伦矿区的首次岩爆报道是在 20 世纪 30 年代,1941 年首次因岩爆造成 1 人死亡。1978~1983 年间,岩爆共导致 22 人负伤,1 人死亡。该矿区发生的岩爆强度一般 $M_L < 3.0$,但幸运星期五矿在 1969 年记录的最大一次岩爆强度达 $M_L = 3.5$ 。自 50 年代起,特别是 80 年代初以来,加拿大萨德伯里地区许多铜镍矿都发生了岩爆。其中鹰桥镍矿有限公司的鹰桥地下镍矿于 1984 年 6 月 20 日发生一次 $M_N = 3.5$ 级严重岩爆,随后又于 7 月 5 日发生了一次 $M_N = 2.5$ 级岩爆,该矿山因此而关闭。另外位于安大略省柯克兰德湖区的马卡萨金矿是受严重危害的典型脉状金矿的代表。除美国和加拿大之外,南非金矿是目前世界上硬岩矿床受岩爆危害最多的地区。早在 1908 年南非国家指定的岩爆调查委员会就指出,在约翰内斯堡地区所观测到的地震可能与当地的采矿活动有关。岩爆事故从 1908 年的 7 起上升到 1918 年的 233 起之多。仅 1975 年,在南非的 31 个金矿就发生岩爆 680 起,造成 73 人丧生和 4800 个工班的损失。目前南非金矿的开采深度一般均大于 1500m,最深的西部深水平金矿的采深近 4km(这是目前人类深入地壳内作业达到的最大深度)。如今,南非的金矿几乎无一例外地受到岩爆的危害。其中最强烈的一次岩爆的震级达到 $M_L = 5.1$,这就是 1976 年 12 月发生在南非自由州 Welkom 城的称之为 Welkom 地震的那次岩爆,导致地表一栋六层楼房倒塌。印度卡纳塔克邦 KGF 金矿区的 Nundydroog 金矿、Champion reef 金矿和 Mysore 金矿在 20 世纪初曾经是当时世界采深最大的地下矿山(最深达 3.2km),也

是与南非金矿一起并列的两个岩爆灾害最多的硬岩矿区之一。1955 年 J. S. Jones 计算的一次强烈岩爆释放的能量达 150GJ, 里氏震级达 $M_L = 4.9$ 。塔什塔戈尔铁矿是前苏联最具岩爆危险的矿床之一, 该矿铁矿石的弹性模量高达 90GPa, 围岩弹性模量也高达 80GPa, 矿区最大主应力和中间主应力方向均接近水平, 与水平面夹角为 $20^\circ \sim 30^\circ$, 最大主应力 $\sigma_1 = 50 \sim 60\text{MPa}$, 是最小主应力(垂直应力)的 2.5 倍, 采矿方法是阶段强制崩落法, 岩爆发生的部位有巷道顶板和两帮、巷道底板、巷道掌子面迎头, 岩爆最大释放能量高达 $10^2 \sim 10^3\text{MJ}$ 。其他在前苏联硬岩矿山中发生岩爆的还有苏拉勃、苏留克金、克泽尔-凯伊、特尔内阿乌兹和沙里卡姆等矿山。卢宾铜矿是到目前为止岩爆活动最频繁的波兰硬岩矿山。智利的埃尔特尼恩特铜矿采用矿块崩落法采矿, 该矿的第 6 采区自 1989~1992 年先后 4 次因强烈岩爆造成的破坏而停产, 其中最强烈的 1992 年 3 月发生的岩爆造成上百米巷道垮落, 停产时间长达 22 个月, 该矿是南美洲受岩爆危害最严重的矿山。其他岩爆硬岩矿山还有奥地利的东阿尔坝铅锌矿、德国维尔钾盐公司的台尔曼矿等。

近年来在我国东北辽宁省的红透山铜矿发生了两次较大规模的岩爆。其中第一次发生于 1999 年 5 月 18 日早晨 7 时左右交接班时, 第二次发生于 1999 年 6 月 20 日。这两次岩爆的地点均在 -467m 9 号采场附近, 岩爆后采场斜坡道和二、三平巷有几十米遭到了破坏, 巷道边墙呈薄片状弹射出来, 最大片落厚度达 1m。交接班工人在 +253m 主平硐口听到巨大响声。根据经验判断其响声相当于 500~600 kg 炸药爆破的声音。据作者所知, 红透山这两次岩爆可能是我国金属矿山近年来少有发生的有破坏性的硬岩矿山岩爆。

1.2.3 隧道岩爆概况

20 世纪 50 年代在美国纽约市的引水隧道施工时发生的岩石弹射现象可能是隧道发生岩爆的最早记录。60 年代掘进的挪威赫古拉公路隧道和瑞典的维斯塔引水隧洞是发生隧道岩爆最典型

的代表:岩爆以小块岩石弹射为主,大多数弹射岩块很小;岩爆发生时测得的隧道周边切向应力远小于岩石单轴抗压强度,开始弹射时的周边应力为岩石单轴抗压强度的 0.37 倍;发生岩爆的隧洞轴线与测量的原岩最大主应力方向垂直或成大角度相交;岩爆发生部位相对于隧洞中心轴对称,连线与原岩最大主应力作用方向垂直;岩爆前可听到脆性岩石的破裂声,最强烈岩爆发出的声音如 200kg 隧洞掘进爆破,弱声如打字机击键。我国的成昆铁路线上的关村坝隧道、二滩电站、天生桥引水隧洞和鱼子溪引水隧洞等也都发生过强烈程度不同的岩爆。隧洞岩爆一般在永久支护后很少重新发生。与矿山岩爆相比,虽然隧洞岩爆的强度较低,但是因为它一般发生在爆破完出渣或临时支护时,对人员和设备的威胁还是很大的。

1.3 硬岩矿山岩爆研究现状

岩爆,或者说岩石的猛烈破坏,始终是地下采矿(和隧道工程中)的一种人工地质灾害,严重地威胁着地下结构、人员和设备的安全。自 1738 年世界采矿业首次报道发生岩爆起,采矿工作者(和其他与隧道岩爆有关的工作者们一起)进行岩爆研究的工作就一直未停止过。迄今为止,人们对岩爆的研究基本遵循这样一条研究路线,就是:从观察、记录和分析岩爆发生的现象、规模和显现特征入手,遵循着从实践到理论,反过来用理论指导实践,并在新的实践的基础上进一步发展和完善理论这一辩证唯物主义认识论的基本规律。对岩爆的认识逐渐由现象到本质,归纳总结了一些带有一定普遍性的规律和特征。就岩爆的研究内容而言主要包括 3 个方面:一是岩爆发生机理和岩爆破坏机理的研究;二是岩爆的预测预报研究;三是岩爆的预防和控制研究。这 3 个问题的研究互相关联、互相促进,其最主要的应该是有关岩爆发生机理和破坏机理的研究。它是研究其他两个问题的理论基础。当然,人们研究岩爆的最终目的是防治岩爆,开展岩爆机理及岩爆预报的研究是为研究防治岩爆服务的。1977 年,国际岩石力学局成立了专门