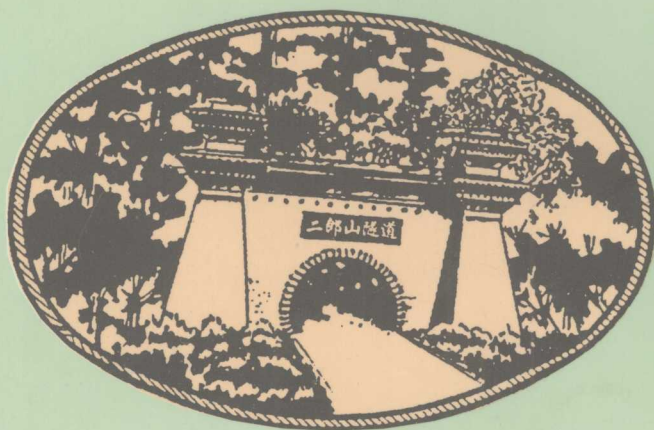


川藏公路二郎山隧道 高地应力与岩爆问题研究

STUDY ON THE PROBLEMS OF HIGH GEOSTRESS AND
ROCKBURST IN ERLANG MOUNTAIN HIGHWAY TUNNEL

徐林生 王兰生 著



西南交通大学出版社

赠阅图书

重庆交院图书馆藏



U459.2
X442

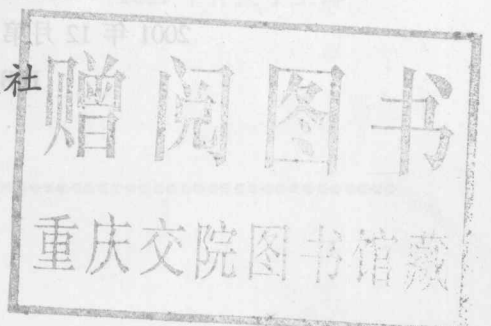
川藏公路二郎山隧道 高地应力与岩爆问题研究

徐林生 王兰生 著

西南交通大学出版社
·成都·



0701894-95



图书在版编目(CIP)数据

川藏公路二郎山隧道高地应力与岩爆问题研究/徐林生, 王兰生著. —成都: 西南交通大学出版社, 2001.12

ISBN 7-81057-612-7

I. 川... II. ①徐...②王... III. ①公路隧道—地应力—研究—西南地区②公路隧道—岩爆—研究—西南地区 IV. U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 073552 号

川藏公路二郎山隧道 高地应力与岩爆问题研究

徐林生 王兰生 著

*

出版人 宋绍南

责任编辑 卢奇勋

封面设计 卢奇勋

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center 2.swjtu.edu.cn

西南冶金地质印刷厂印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 6.875

字数: 159 千字 印数: 1~200 册

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-612-7/U·047

定价: 20.00 元

言 前

序

众所周知,我国辽阔绵延山区的崇峰峻岭中,特别在赋存有高地应力条件下的硬/脆弹性岩体内,都积蓄着极为可观的巨大能量。一旦在其深部作施工开挖,这些蕴含的弹性应变能将急剧地突发性释放而形成各种类型的岩爆现象。许多年来,由于国家基本建设事业的发展,水电、交通隧道等地下工程大量修建,在上述地区,岩爆的发生与表现都十分强烈和严重,它危及施工人员和生产设备的安全并影响工程进度,是一种常见的施工地质灾害现象。由于岩爆形成机理上的复杂多变性,对它的理论研讨、险情预报和施工监控及其有效防治已成为人们迫切关注的一项当务之急。

岩爆现象虽常见于国内外专业性刊物报导,但对其作系统性论述的专著则尚不多见。这次,我有机会预先喜读了由徐林生博士和王兰生教授合作撰写的专著《川藏公路二郎山隧道高地应力与岩爆问题研究》,书中以理论密切联系工程实际的观点,结合近年来修建、由徐博士等人长年蹲点研究的二郎山隧道工地所发生的岩爆现象,深入全面地探讨了其高地应力与岩爆形成机理上的特点。全书在评述了国内外有关高地应力与岩爆问题研究现状与存在问题的基础上,以富涵创意的研究思路与方法,充分论证了岩爆形成的工程地质环境条件和岩爆力学机制,完成了机理性岩爆实验与地应力测试,进而阐明了岩爆类型及其工程烈度分级,着重并详细论述了隧道围岩抗岩爆条件下的稳定性问题,建立了一套有效的高地应力区公路隧道施工围岩稳定性监测与预报系统以及提出了岩爆的防治与处理措施等等。研究成果是丰硕的,经应用于二郎山隧道的施工实践,取得了良好的社会效益,实在可喜可贺!

值兹本书付梓问世之际,应徐博士的邀约,我乐于写了上面的一点文字,并谨此以为序。

同济大学教授、中国科学院院士
中国岩石力学与工程学会名誉理事长

孙 钧

2001年仲夏于上海

前 言

岩爆(Rockburst)是高地应力(High geostress)条件下隧道等地下工程洞室开挖过程中,因开挖卸荷而引起周边围岩产生径向应力 σ_r 降低、切向应力 σ_θ 增高的应力分异作用,储存于硬脆性围岩中的弹性应变能突然释放且产生爆裂松脱、剥离、弹射甚至抛掷性等破坏现象的一类动力失稳施工地质灾害。它直接威胁施工人员、设备的安全,影响工程进度,已成为世界性的地下工程难题之一。

本书以九·五期间国家重点建设工程——川藏公路二郎山深埋特长隧道为典型实例,在广泛收集了国内外有关大量文献资料的基础上,紧密结合该大型公路隧道工程的施工实践,以其高地应力与岩爆问题研究为主线,对该隧道工程山体地应力场、岩爆类型与岩爆烈度分级、岩爆形成机理、隧道围岩稳定性分析与监测预报、岩爆防治措施和评价预测系统等专题进行了深入系统的研究。书中内容具有较强的理论性和实用性,其研究思路、技术方法体系和许多重要研究成果与结论,对其他类似高地应力区隧道等地下工程的岩爆问题研究亦具有参考意义。

全书共九章,其中前三章侧重论述高地应力与岩爆问题的国内外研究现状和本书研究思路与技术路线、研究区工程地质环境条件、研究区地应力测试与分析研究等内容;后四章则侧重其岩爆有关重大问题的系统性专题研究;最后以二郎山公路隧道为典型实例,通过系统综合、归纳,初步建立了一套高地应力区公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统(TMFS),并在该隧道工程实践中取得了良好的实际应用效果。其主要研究内容和相关成果已在公路交通系统等有关学术年会和国内外公开发行的多种重要科技期刊上发表、交流过,还多次获奖并受到同行专家们的好评。

本书的主体内容以第一作者的博士学位论文为基础修改而成,但字里行间凝结着导师王兰生教授的教益、辛劳和课题组同志们的集体智慧!本书在编写过程中,还得到了孙宗远高级工程师、李天斌教授、李永林高级工程师、靳晓光博士、徐进副研究员、傅小敏副研究员、卫宏副教授、赵其华副教授、王小群硕士等人的大力支持、帮助,二郎山隧道工程总监办、监理组、协调办和施工单位铁十六局五处、武警交通一总队隧道指挥所和铁道部隧道工程局有关领导、专家们也曾给予了作者在现场工作上的便利条件和无私的大力支持、帮助,中国科学院院士孙钧教授在百忙中审阅了全文并为本书作了序,谨此向他(她)们一并表示衷心的感谢!

作者谨识

2001年仲夏

内 容 简 介

川藏公路二郎山隧道是目前在建的我国埋深最大和最长的公路隧道,地质条件较为复杂,高地应力及其岩爆问题是该隧道的主要工程地质问题。本书紧密结合该大型工程实践,以其高地应力与岩爆问题研究为主线,对这一世界性的地下工程难题作了较为全面、系统的实例研究,取得了许多重要成果。主要包括:

- (1)详细阐述了国内外高地应力与岩爆问题的研究现状;
- (2)全面论述了研究区的工程地质环境条件;
- (3)通过多种先进测试方法和技术手段,查明了工程区岩体的空间应力状态;
- (4)通过有限元数值模拟研究,获得了整个隧道工程岩体内地应力场的空间发育分布规律的系统认识;
- (5)阐述了工程岩体内高地应力的成因;
- (6)归纳制定出了一个新的较为全面、系统的岩爆类型划分方案;
- (7)通过 X 射线粉晶衍射成分分析,查明了研究区部分砂质泥岩发生岩爆的内在原因;
- (8)通过研究区岩爆地质原型调研与岩爆破坏断口电镜扫描微观分析,结合岩爆岩石力学试验和隧道洞壁二次应力场测试成果等,对岩爆形成力学机制问题作了有益的分析研究;
- (9)阐述了二郎山公路隧道岩爆发生的基本规律,并且主要采用“地质超前预报法”、“ σ_{θ}/R_b 判据现场测定法”这二种较为实用、有效的方法,对其岩爆预报问题作了有益的探讨;
- (10)提出了与 RMS 岩爆烈度分级方案相对应的各级岩爆防治措施,并取得了良好的试用效果;
- (11)以二郎山公路隧道为实例,我们初步建立了一套高地应力区公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统,并在该工程实践中取得了良好的实际效果,具有推广应用价值。

STUDY ON THE PROBLEMS OF HIGH GEOSTRESS AND ROCKBURST IN ERLANG MOUNTAIN HIGHWAY TUNNEL

XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng

Abstract

The famous Erlang mountain highway tunnel which is being constructed is one of the most deep-lying and longest tunnel in our country. Its geological conditions are more complex, the high geostress and rockburst are its main problems of engineering geology. In this paper, the problems are elaborated and many important outcomes have been obtained through this typical deep-lying highway tunnel research. The contents are discussed as follows: (1) From the high geostress implication, rockburst and its types, rockburst intensity, classification, mechanism, forecasting, prevention and cure methods, this paper elaborates the present research situations at home and abroad. (2) The environmental conditions of engineering geology are also discussed in detail. (3) Making use of many advanced measure methods and technological means, the geostress status in the engineering rockmass have been ascertained. (4) Through the research of FEM for numerical analysis, the author has obtained the systematic recognition of the geostress field in the tunnel engineering rockmass. (5) The form reasons of high geostress in the engineering rockmass are also explained in this paper. (6) A new and systematic classification of rockburst type is presented and discussed. (7) Through the x-ray diffraction analysis, the rockburst interior reason of some sandy mudstone has been ascertained. (8) Through the rockburst original type investigation, scanning electron microscope analysis, rock mechanics experiment and the second stress field test of this tunnel, the mechanism research of rockburst is also discussed in detail. (9) In this paper, the basic laws of occurring rockburst are summarized with the rockbursts more than 200 incidents recording during tunnelling. Two effective measures of forecasting rockburst are also discussed. There are: geological supertime forecasting method and σ_0/R_b judging method on the spot test. (10) In contrast with RMS, the prevention and cure measures of various rockburst are also summarized and have obtained better application effects. (11) As a typical example, a set of methods about geological monitoring-forecasting system in the surrounding rock stability problem of highway tunnel in high geostress area are established and have obtained better reality application effects in this tunnel. Therefore, they can find wide applications in other highway tunnels.

作者识

2001年仲夏

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 二郎山公路隧道工程概况	(1)
1.2 选题的理论意义和应用价值	(1)
1.3 国内外高地应力与岩爆问题研究现状	(2)
1.3.1 高地应力的含义	(2)
1.3.2 国内外岩爆问题研究现状综述	(3)
1.4 研究思路和技术路线	(9)
2 研究区工程地质环境条件	(11)
2.1 区域地质背景与区域稳定性	(11)
2.2 地形地貌条件	(14)
2.3 地层岩性及工程地质岩组	(14)
2.4 地质构造及其应力场演化特征	(16)
2.5 水文地质条件	(18)
3 研究区地应力测试、分析研究	(21)
3.1 钻孔水压致裂法地应力测量成果及其分析	(21)
3.1.1 地应力测量成果	(22)
3.1.2 地应力测量成果分析	(23)
3.2 钻孔应力解除法地应力测量及其成果分析	(25)
3.2.1 测试原理、方法	(25)
3.2.2 现场测试过程	(27)
3.2.3 地应力测试成果及其分析	(31)
3.3 地应力 Kaiser 效应测试及其成果分析	(32)
3.3.1 岩石声发射 Kaiser 效应测试原理简介	(32)
3.3.2 测试方法及成果整理	(33)
3.3.3 测试条件	(35)
3.3.4 测试成果与分析	(36)
3.4 地应力测试成果综合对比分析	(38)
3.5 研究区岩体应力场的数值模拟研究	(39)
3.5.1 模拟计算模型	(39)
3.5.2 岩体应力场模拟成果分析	(40)
3.6 研究区高地应力成因分析	(44)
4 岩爆类型及岩爆烈度分级研究	(46)

4.1	岩爆类型划分研究	(46)
4.2	岩爆烈度分级研究	(48)
4.2.1	概述	(48)
4.2.2	RMS 方案岩爆烈度分级原则、依据	(49)
4.2.3	二郎山公路隧道岩爆烈度分级方案(RMS)	(49)
4.2.4	RMS 方案的研究意义	(50)
5	岩爆形成机理研究	(51)
5.1	研究区岩爆实录	(51)
5.2	研究区岩爆岩石 X 射线粉晶衍射成分分析	(51)
5.3	岩爆岩石断口电镜扫描分析	(55)
5.4	岩爆岩石力学试验研究	(57)
5.4.1	单轴压缩下岩石破坏后区破坏型式的试验研究	(57)
5.4.2	研究区岩石岩爆倾向性指数(W_{et})测试研究	(57)
5.4.3	卸荷状态下变形破裂机制的实验岩石力学研究	(59)
5.5	岩爆形成力学机制分析研究	(64)
6	研究区隧道围岩稳定性分析与监测预报研究	(67)
6.1	隧道围岩分类及其块体稳定性分析	(67)
6.1.1	隧道围岩分类	(67)
6.1.2	隧道围岩的块体稳定性分析	(70)
6.2	隧道围岩大变形监测预报研究	(78)
6.2.1	常规量测及其成果分析研究	(79)
6.2.2	隧道围岩变形跟踪监测预报系统(TMS)研究	(79)
6.3	隧道岩爆发生规律与岩爆预报研究	(82)
6.3.1	隧道岩爆发生的基本规律	(84)
6.3.2	隧道岩爆预报研究	(85)
7	研究区岩爆防治措施研究	(89)
7.1	设计单位提出的岩爆综合防治措施及评述	(89)
7.2	RMS 方案各级岩爆的防治措施及其试用效果	(90)
8	公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统及其推广应用价值	(94)
8.1	公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统(TMFS)构成	(94)
8.2	TMFS 系统的特色	(95)
8.3	TMFS 系统的意义及其推广应用价值	(95)
9	结论	(97)
	主要参考文献	(101)

1 绪 论

1.1 二郎山公路隧道工程概况

二郎山是川藏公路西进青藏高原的第一座大山隘卡,地势险峻,气候恶劣,自然灾害非常严重。从东坡龙胆溪至西坡别托村 34km 路段,二郎山翻山公路不仅坡陡、路窄、弯急,最宽处仅有 7m、最窄处不足 4m,而且有滑坡、崩塌、泥石流等各类地质灾害 34 处,并有难以彻底整治的干海子等大型滑坡多处;此外,还有大风、暴雨、浓雾、积雪、滑冰、寒冻等六大自然灾害的常年侵袭和危害。因此,通车四十多年来,二郎山公路段行车难、交通事故频繁;尤其是在冬季,能顺利通行的时间极为有限。过往司乘人员形象地称:“翻越二郎山,如闯鬼门关;万幸不翻车,也得冻三天。”二郎山已成为千里川藏线上的一个“瓶颈”,严重地制约了康藏地区的对外开放、经济建设和国防建设。为此,九·五期间国家决定对二郎山段的公路进行整治,经过各种方案的比较论证,认为采用越岭隧道方案为最佳。

二郎山公路越岭隧道是我国目前埋深最大和最长的公路隧道之一。该工程东坡起于四川省雅安地区天全县两路乡原川藏公路 K256 + 560 处,两跨龙胆溪沟后于 K259 + 036 处进洞(洞口海拔高程 2 187.77m),穿越二郎山分水岭,隧道西进轴线方向为 $255^{\circ}8'41''$;西坡于四川省甘孜藏族自治州泸定县冷碛镇别托村和平沟左岸 K263 + 202 处出洞(洞口海拔高程为 2 188.82m),至 K265 + 216 处再与原川藏公路相接。整个工程线路全长为 8 657m(其中主隧道 4 161m、别托隧道 94m、引道 4 402m),隧道最大埋深达 760 余米。工程按山岭重丘三级公路标准建设,设计行车速度 30km/h;主隧道横断面建筑限界为:最大高度 7.0m,底宽 9.0m,单洞双车道;平面线型为直线,隧道纵断面为人字坡,采用平导通风。平导横断面规格为:底宽 6m,最大高度为 5m。主洞与平导两洞轴线间距为 42.5m。隧道采用钻爆法施工,先期施工平导,目前已完成掘进任务。

二郎山公路隧道工程是九·五期间交通系统在四川省的惟一国家级重点工程,总投资四亿多人民币,总工期为 36 个月,按计划于 1999 年 10 月份建成通车。

二郎山公路隧道建成后,不仅可使原公路里程缩短 25km,而且更重要的是能够避开冰雪险道常年通车,这将大大提高汽车通过能力,确保全天候行车安全,从而推动康藏地区与内地的经济交流,这对加快藏区的经济发展步伐和促进民族团结、巩固国防等都有非常重要的意义。

1.2 选题的理论意义和应用价值

(C) 二郎山隧道穿越浅海相碳酸盐岩-碎屑岩建造的志留系、泥盆系单斜地层和 11 条断

层,处于深埋高地应力环境,地质条件较为复杂。为此,国家在九·五期间专门设立了“川藏公路二郎山隧道高地应力测试、监测及围岩稳定性分析与工程措施”这一重点建设工程科研项目。通过查阅文献,搜集国内外资料,本书作者选择了其中的“川藏公路二郎山隧道高地应力与岩爆问题研究”作为主攻的课题。

高地应力与岩爆问题是目前世界性的地下工程难题之一,也是二郎山隧道建设必然面临的重大工程地质问题。高地应力是岩爆产生的能量来源;岩体结构及其性能、断裂构造条件等诸因素则决定了岩爆产生的能量积蓄和释放能力;开挖方法等也是岩爆发生的另一个难以预料的复杂因素。课题紧密结合该大型工程实践,抓住高地应力与岩爆问题作深入探讨,这有利于查明岩爆这一动力失稳地质灾害的形成条件、发生规律和力学机制等问题,进而可有效地预测、预报和防治岩爆,这对丰富岩石力学内容和高地应力区隧道等地下工程的安全、顺利施工及优化工程设计等均具有重要的理论意义和实际应用价值。

1.3 国内外高地应力与岩爆问题研究现状

1.3.1 高地应力的含义

近年来,随着世界经济的发展,交通隧道、水电站地下厂房、井巷坑道等地下工程因各行业的需要而迅速发展,其“长、大、深、群”的特点日趋明显,而它们所处的地质条件等则往往易于形成高地应力区,并经常引发岩爆、大变形等相关地质灾害。所以,高地应力及其对地下工程围岩稳定性的影响问题已引起世界岩石力学和工程地质学界的广泛重视^[1]。但是,由于岩体的复杂性和各种地质环境条件的影响,高地应力问题研究尚欠全面深入,高地应力的含义迄今还无统一认识。例如,工程实践中往往将大于 20~30MPa 的硬质岩体内的初始应力称为高地应力。法国隧协、日本应用地质协会和前苏联顿巴斯矿区等则采用岩石单轴抗压强度(Rb)和最大主应力 σ_1 的比值 Rb/σ_1 (即岩石强度应力比)来划分地应力级别(表 1-1),这样划分和评价的实质是反应岩体承受压应力的相对能力。我国陶振宇教授(1983)对高地应力给出了一个定性的规定^[2]:所谓高地应力是指其初始应力状态,特别是它们的水平初始应力分量,大大地超过其上覆岩层的岩体重量。这一定性规定强调了水平地应力的作用。天津大学薛玺成等(1987)建议用下式来划分地应力量级^[3]:

$$n = I_1/I_1^0 \quad (1-1)$$

式中, I_1 为实测地应力的主应力之和; I_1^0 为相应测点的自重应力主应力之和; n 为比值。

显然,薛玺成等人的地应力分级方案(表 1-2)在物理概念上与陶振宇教授的高地应力定性规定并无本质区别。

姚宝魁、张承娟(1985)认为^[4],陶振宇、薛玺成等人的分级、评价方法没有考虑到岩体的变形和稳定条件,因而在工程实践中没有实际应用价值;他们认为,应从工程岩体的变形破坏特性出发,考虑地应力对不同岩体的影响程度,建议以下式作为判断高地应力的标准:

$$\sigma_1 \geq (0.15 \sim 0.20)Rb \quad (1-2)$$

表 1-2 地应力分级方案

(薛玺成等, 1987)

地应力级别	一般地应力	较高地应力	高地应力
$n = I_1/I_1^0$	1~1.5	1.5~2	>2
说明	$n = 1$ 时为纯自重应力场	在应力场中有 30% ~ 50% 是构造应力产生的, 其余为重力场应力	50% 以上的地应力值是由构造应力产生的

实际上,式(1-2)继承了 Barton 等人(1974)Q 系统分类指标的物理概念。中华人民共和国技术监督局、中华人民共和国建设部 1994 年联合发布的《岩土工程勘察规范》(GB50021-94)附录二中也采用岩石强度应力比(R_b/σ_1)来划分高地应力级别,规定: $R_b/\sigma_1 = 4 \sim 7$ 为高地应力, $R_b/\sigma_1 < 4$ 为极高地应力。可见,这一规定中高地应力的含义与姚宝魁、张承娟(1985)的建议标准相近,而与表 1-1 部分国家地应力分级方案有很大的出入,这反映出不同国家对高地应力的定义是很悬殊的。

实际上,高地应力是一个相对的概念,并且与岩体所经受的应力历史和岩体强度、岩石弹性模量等诸多因素有关。孙广忠教授(1993)就曾指出^[5]:强烈构造作用地区,地应力水平与岩体强度有关;轻缓构造作用地区,岩体内储存的地应力大小与岩石弹性模量直接有关,即弹性模量大的岩体内地应力高、弹性模量小的岩体内地应力低。孙广忠教授还提出了高地应力地区的六大地质标志(表 1-3),该表中同时列出了低地应力地区的一些地质标志,以便对比。

表 1-3 高、低地应力地区的地质标志

(孙广忠, 1993)

高地应力地区地质标志	低地应力地区地质标志
1. 围岩产生岩爆、剥离 2. 收敛变形大 3. 软弱夹层挤出 4. 饼状岩芯 5. 水下开挖无渗水 6. 开挖过程有瓦斯突出	1. 围岩松动、塌方、掉块 2. 围岩渗水 3. 节理面内有夹泥 4. 岩脉内岩块松动,强风化 5. 断层或节理面内有次生矿物 晶簇、孔洞等

1.3.2 国内外岩爆问题研究现状综述

1. 关于岩爆的定义

岩爆是岩体具有高地应力的一种重要地质标志。但迄今为止,学术界对岩爆的定义还未形成统一的认识。概括起来,对岩爆的定义有二种观点:一种认为,只要岩体破坏时有声响,产生片帮、爆裂剥落甚至弹射等现象,有新鲜破裂面即可称为岩爆(以挪威岩爆专家 Russenes B.F. 为代表);另一种观点则认为,只有产生弹射、抛掷性破坏者才能称为岩爆,而将无动力弹射现象的破裂归属于静态下的脆性破坏(如谭以安等^[6])。

王兰生教授等认为^[7],硐室开挖中的岩爆现象和室内岩石变形破裂试验均显示,岩爆就

其破裂机制而言,是一种开挖卸荷条件下岩石自身弹性应变能突然释放所造成的脆性破裂或爆裂。爆裂造成的岩块(片),则可以爆裂松脱、爆裂剥离、爆裂弹射或抛掷等不同方式脱离母体,其脱离方式、初速度和规模大小等与爆裂时的破裂机制及释放弹性应变能的多少和波及深度等诸多因素有关。因而对这种动力失稳地质灾害现象就其力学机制而言可定义为:地下硐室内处在高地应力条件下的围岩,在开挖过程中,因开挖卸荷引起周边围岩产生应力分异作用,造成岩石内部破裂和弹性应变能突然释放引起的爆裂松脱、剥离、弹射乃至抛掷性破坏现象,统称为岩爆。本书作者即持这种观点。

2. 岩爆分类与岩爆烈度分级研究现状

岩爆分类与岩爆烈度分级是岩爆预测和防治的基本依据之一。

(1) 岩爆分类研究现状

目前,学术界对岩爆分类尚未达成一致意见。汪泽斌(1988)根据国内外34个地下工程岩爆特征,将岩爆划分为破裂松脱型、爆裂弹射型、爆炸抛突型、冲击地压型、远围岩地震型和断裂地震型六大类^[8];武警水电指挥部天生桥二级水电站岩爆课题组(1991)对岩爆分类有二种标准^[9]:一是按破裂程度将岩爆分为破裂松弛型和爆脱型二大类,二是按规模将岩爆划分为零星岩爆(长0.5~10m)、成片岩爆(长10~20m)和连续岩爆(长>20m)三大类型;张倬元、王士天教授等(1994)按岩爆发生部位及所释放的能量大小,将岩爆分为三大类型,即洞室围岩表面岩石突然破裂引起的岩爆、矿柱或大范围围岩突然破坏引起的岩爆、断层错动引起的岩爆^[10];王兰生教授等(1998)将岩爆类型划分为爆裂松脱型、爆裂剥落型、爆裂弹射型和抛掷型四大类;郭志(1996)也根据岩爆岩体破坏方式,将岩爆划分为爆裂弹射型、片状剥落型和洞壁垮塌型三大类^[11]。上述划分方案主要是依据岩爆特征进行的。谭以安(1988)^[6]和左文智、张齐桂(1995)^[12]则从形成岩爆的应力作用方式出发,将岩爆类型划分为水平应力型、垂直应力型、混合应力型三大类和若干亚类。

(2) 岩爆烈度分级研究现状

迄今为止,国内外对岩爆烈度分级问题仍有不同的见解。1981年,德国学者G.布霍依诺根据岩爆发生时对工程的危害程度,将岩爆烈度划分为轻微损害、中等损害、严重损害三级;挪威岩爆专家拉森斯(Russenes B. F.)的岩爆烈度分级方案在国际上很有影响,他在1974年研究挪威陡山坡隧道时,就根据岩爆发生时的声响特征、围岩爆裂破坏特征等将岩爆烈度划分为0~3四级。1988年,我国岩爆专家谭以安博士率先依据岩爆发生时的力学和声学特征、破坏方式及其危害程度将岩爆烈度划分为弱、中等、强烈、极强四级^[13];1996年,铁道部第二勘测设计院在《二郎山隧道高地应力技术咨询报告》中提出,按判据 σ_θ/R_b (σ_θ 为洞壁切向应力)将岩爆烈度划分为微弱、中等、剧烈三级;1996年,交通部第一公路勘测设计院在二郎山隧道设计报告中则依据岩爆发生的声响、岩体变形破裂状况、 σ_θ/R_b 比值及最大水平主应力 σ_{Hmax} 和 σ_{Hmax}/σ_v (σ_v 为垂直主应力),将岩爆烈度划分为微弱、中等、剧烈三级^[14](具体分级依据详见4.2.1节表4-2)。

上述岩爆烈度分级方案的对应关系如表1-4所列。

3. 岩爆形成机理研究现状

E. Hoek等认为,岩爆是高地应力区硐室围岩剪切破坏作用的产物^[15]。Zoback教授在

解释钻孔崩落现象成因时,也认为类似“岩爆”的孔壁崩落破坏属剪切破坏。然而, Mastin (1984) 和 Haimson (1972, 1985) 则通过打有圆孔的砂岩岩板进行的单向压缩物理模拟试验,在实验室真实地再现了孔壁崩落现象;他们得出这一现象是由于孔壁应力集中部位的局部破坏所引起的,系张性破裂的产物。

我国杨淑清教授等通过天生桥二级水电站引水隧洞相似材料岩爆机制物理模拟试验^[16],总结出岩爆造成围岩劈裂破坏和剪切破坏的二种机制,并且认为它们是二种应力水平的产物,即劈裂破坏属脆性断裂,而剪切破坏是岩石应力达到峰值强度状态时的破坏;前者形成的破裂面与洞口边界平行,而后者则与洞口边界斜交,呈对数螺旋形状。谭以安博士则认为,岩爆系一渐进破坏过程,其形成过程可分为“劈裂成板→剪断成块→块片弹射”三个阶段,岩爆属张、剪脆性破坏^[17]。

综上所述,由于岩爆是一种复杂的动力失稳现象,迄今人们对其形成机理还没有统一的认识。

表 1-4 国内外岩爆烈度分级方案对比表

方案提出者	岩 爆 烈 度 分 级 及 主 要 依 据				
C. 布雷依诺 (德国, 1981)		轻微损害 不造成生产中断	中等损害 支架部分损坏, 一般要中断生产	严重损害 工程被摧毁	
拉森斯(Russ- enes B. F, 挪 威, 1974)	0级:无岩爆 1级:轻微岩爆 岩石有松脱、破裂现 象,声响微弱	2级:中等岩爆 岩石有不容忽视的 片落、松脱,有随时 间发展趋势,有发自 岩石内部的强烈炸 裂声	3级:严重岩爆 爆破之后,顶板、两帮岩石即严重崩落,底 板隆起,周边大量超挖和变形,可以听到 发射子弹、炮弹的强烈声响		
谭以安(中国 国际工程咨 询公司, 1988)		弱岩爆(I) 劈裂成板,剪断脱离 母体,产生射落,洞 壁表面局部轻微破 坏,不损坏机械设 备;可听到噼拍声响	中等岩爆(II) “劈裂-剪断-弹 射”重复交替发生, 向洞壁内部发展,形 成V形三角坑,洞壁 有较大范围破坏;对 生产威胁不大,个别 情况下损坏设备;有 似子弹射击声	强烈岩爆(III) “劈裂-剪断-弹 射”急速发生,并急 剧向洞壁深处扩展; 几乎全断面破坏,生 产中断;有似炮声巨 响	极强岩爆 (IV) 方式同左,持 续时间长,震 动强烈,有似 闷雷强烈声 响;人财损失 严重,生产停 顿
铁道部第二 勘测设计院 (1996)		弱岩爆		中等岩爆	强烈岩爆
交通部第一 公路勘测设 计院(1996) (二郎山隧道 原采用方案)		微弱岩爆(一级)		中等岩爆(二级)	剧烈岩爆 (三级)
RMS 方案 (二郎山隧 道高地应 力与围岩 稳定性课 题组, 1998)		轻微岩爆(I)	中等岩爆(II)	强烈岩爆(III)	剧烈岩爆 (IV)

4. 岩爆预测、预报研究现状

岩爆预测、预报问题极为复杂,目前国内外还没有一整套成熟的理论和方法。这里将现有的几种方法综述如下:

(1) 利用某些特殊的地质现象来宏观预测岩爆

这些特殊的地质现象诸如:钻孔岩芯饼裂现象;现场大剪试验或表面应力解除时,岩体四周被解除后,底部会自动断裂,甚至会被弹起,并伴有断裂声等^[18];应力-应变全过程曲线异常等^[19]。这些现象多预示着该区岩体具有较高的地应力,可以帮助判断岩爆是否会发生。例如,日本 Kan-Etsu 公路隧道在施工过程中,超前钻孔勘察发现的岩芯饼裂区就与开挖后的岩爆区完全一致,这为正确预报岩爆、保证该隧道安全施工提供了重要依据^[20]。日本京都大学斋藤教授等人也曾在一个隧道导洞中分别从岩爆发生与不发生地段取样,在单轴压缩、环向应变控制试验条件下进行的应力-应变全过程实验结果表明,发生岩爆地段的岩石峰值后变形阶段往往出现非稳定破裂传播型破坏(Ⅱ型破坏),不发生岩爆地段的岩石峰值后变形阶段则往往出现稳定破裂传播型破坏(Ⅰ型破坏);据此他们认为,岩石的破坏类型可以为岩爆预测提供依据^[21,22]。

(2) σ_θ/R_b 判据法

国内外学者多将有限元计算的断面洞壁切向应力 σ_θ 和岩石单轴抗压强度 R_b 之比值作为岩爆判据^[23]。1974 年,拉森斯就应用有限元计算和 Kirsch 方程: $\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$, 计算洞壁最大切向应力 $\sigma_{\theta\max}$, 利用 $\sigma_{\theta\max}$ 及其岩样点荷载强度 I_s 值,他绘制出岩爆烈度与隧道洞壁 $\sigma_{\theta\max}$ 和 I_s 的关系图(图 1-1),用于预测岩爆和判定岩爆等级^[24]。拉森斯法在挪威曾获得良好的应用,其优点是可以利用电算成果来确定 $\sigma_{\theta\max}$, 而点荷载强度试验在实践中是很容易现场进行的。

(3) 岩石储能测试分析法

采用的方法主要有以下两种:

① 岩爆倾向性指数 (W_{et}) 判据法:

岩石中积聚弹性应变能的能力是岩爆发生的内部主导因素。为此,波兰学者 Kidybinski 提出,单轴抗压强度试验时,将岩石试件加载到 $(0.7 \sim 0.8)R_b$, 然后再卸载到 $0.05R_b$, 卸载所释放的弹性应变能 (ϕ_{sp}) 和耗损的弹性应变能 (ϕ_{st}) 之比值,定义为岩爆倾向性指数 (W_{et}),用于判断和预测岩爆:

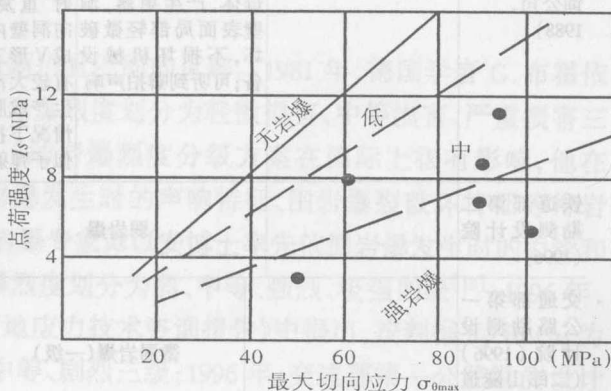


图 1-1 岩爆烈度与洞壁岩石 $\sigma_{\theta\max}$ — I_s 关系图

(拉森斯, 1974)

$$W_{et} = \phi_{sp} / \phi_{st}$$

根据波兰国家标准: $W_{et} \geq 5.0$, 将出现严重岩爆; $W_{et} = 2.0 \sim 4.9$, 出现中、低烈度岩爆;

$W_{et} < 2.0$, 则不产生岩爆。

② 岩爆能量冲击性指标(A_{cf})判据法

国内外学者根据岩石在刚性压力机上得到的应力-应变全过程曲线, 来求取 A_{cf} ^[25]:

$$A_{cf} = A_1/A_2 \quad (1-3)$$

式中, A_1 为应力-应变峰值前的曲线所包围的面积; A_2 为应力-应变峰值后的曲线所包围的面积。

上述两种岩石储能测试分析法, 由于判据完全依赖于岩石本身的物理力学特性和能量大小, 故判据是单一的; 但作为一种预测方法, 还须与其他方法相结合才能取得良好的效果。

(4) 岩爆临界深度法

这一方法为侯发亮教授在 1989 年首先提出^[26]。他认为, 岩爆虽然多发生在水平构造应力较大的地区, 但如果洞室埋深较大, 即使没有构造应力, 由于上覆岩体效应, 洞室也可能发生岩爆。根据弹性力学求解, 侯发亮教授推导出仅考虑上覆岩体自重情况下岩爆发生最小埋深 H_{cr} (即岩爆临界深度) 的计算公式:

$$H_{cr} = \frac{0.318Rb(1-\mu)}{(3-4\mu)\gamma} \quad (1-4)$$

式中, μ 为岩石泊松比; γ 为岩石容重。

(5) 声发射现场监测预报法

根据李强(1994)^[27]和 Langstaff(1977)资料, 无论是室内试验, 还是现场初步监测成果, 结果都表明: 声发射信号急剧增加都超前岩体(石)的变形破坏, 根据这一特点, 可以将岩体声发射技术推广应用到岩爆监测预报中去。目前, 该方法尚处于试验阶段。

(6) 煤(岩)体电磁辐射监测预报法

这一方法是依据完整煤(岩石)压缩变形破坏过程中, 弹性范围内不产生电磁辐射, 峰值强度附近的电磁辐射最强烈, 软化后又无电磁辐射的原理, 采用特制的仪器, 现场监测煤(岩)体变形破裂过程中发出的电磁辐射“脉冲”信号, 通过数据处理和分析研究, 来预报煤(岩)爆。这一方法首先由俄罗斯学者提出, 我国王来贵博士后等人(1999)也在开展具体应用研究工作, 目前该方法主要应用在煤爆监测预报领域。

(7) 模糊数学综合评判法

谭以安(1988)^[28]、王元汉等(1998)^[29]认为, 岩爆是受多种因素制约的模糊问题, 其内在联系很难用一个精确的数学公式加以表达; 因此, 可以采用模糊数学综合评判方法, 选取影响岩爆的一些因素(诸如地应力大小、岩石抗压和抗拉强度、岩石弹性能量指数、岩体结构与水文地质特征等), 对岩爆的发生与否及其烈度级别进行预测。

5. 岩爆防治措施研究现状

从岩爆防治理论上讲, 工程选址时首先应尽量避开易发生岩爆的高地应力区; 实难避开时, 也应尽量使洞轴线与最大主应力方向平行布置, 以减小应力集中系数, 防止岩爆或降低岩爆烈度级别。

目前, 国内外地下工程具体施工过程中的岩爆防治措施主要有以下三大类:

(1) 改善围岩物理力学性能

如在掌子面和洞壁经常喷撒冷水,一定程度上可以降低表层围岩的强度(煤炭科学研究院,1985)。采用超前钻孔向煤等非坚硬岩体高压均匀注水,据王贤能博士研究(1998),该方法可以通过以下三个方面的作用来防治岩爆:一是可以释放弹性应变能并将最大切向应力向围岩深部转移;二是高压注水的楔劈作用可以软化、降低岩体的强度;三是高压注水产生了新的张裂隙并使原有裂隙继续扩展,从而降低了岩体储存弹性应变能的能力。

(2) 改善围岩应力条件

根据挪威赫古拉公路隧道和我国岷江太平驿水电站引水隧洞等地下工程施工实践经验^[30],岩爆地段尽量采用钻爆法施工,短进尺掘进;减小药量,控制光爆效果,以减少围岩表层应力集中现象。采取超前钻孔应力解除等方法,使岩体应力降低,能量在开挖前释放。

(3) 加固围岩

国内外对不同烈度的岩爆一般采取不同的喷锚加固处理措施。例如,挪威斯堪的纳维亚的隧道岩爆段,大多采用喷砼(或喷钢纤维砼)及锚杆(长 $2.5\text{m} \pm$)联合支护措施(表 1-5);

表 1-5 隧道高地应力与岩爆段围岩加固措施

(挪威 Palmstrom, 1995)

问题	特征	加固措施
高地应力	可能引起少量碎块松动	局部素喷,偶尔采用局部锚杆
轻微岩爆	薄片状岩石爆裂、脱落	素喷加锚杆, @1.5~3m
剧烈岩爆	通常是碎块(片)突然弹出、爆出	素喷加锚杆(@0.5~2m)或喷 5~10cm 厚钢纤维砼

喷钢纤维砼虽然比较简便、快速,但却使喷砼的价格提高 $50\% \pm$ 。挪威赫古拉公路隧道岩爆区正常掘进和初期支护程序为:①钻眼;②装炸药和爆破;③从一个液压操纵的框架上撬渣(即排危石),同时定位锚杆眼;④出渣;⑤安装锚杆;⑥给最后一个掘进循环喷射第一层砼;⑦给最后二个掘进循环喷射第二层砼。这一初期支护程序如图 1-2 所示。

我国岷江上游太平驿水电站的岩爆问题较为典型,其针对不同岩爆烈度的加固围岩处理措施为^[31]:弱岩爆

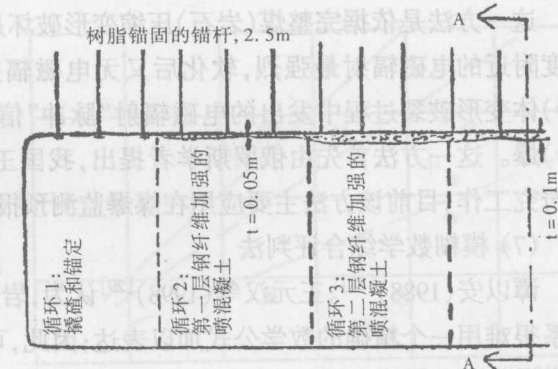


图 1-2 挪威赫古拉公路隧道岩爆区初期支护程序^[24]

(图中 t 为喷层厚度)

段,在开挖清撬后,向洞壁喷 5~10cm 厚的 C_{20} 砼(经试验未采用钢纤维砼,下同)。中等岩爆段,进行浅孔密锚挂网喷砼:锚杆 $\phi 22\text{mm}$, $L = 2 \sim 2.5\text{m}$ 、@100~200cm,梅花形布置;网 $\phi 6\text{mm}$, @20×20cm;喷 C_{20} 素砼 5~10cm;必要时加斜向超前锚杆($\phi 22\text{mm}$, $L = 2.5 \sim 3.5\text{m}$ 、@0.9~