

# 锦屏二级水电站 深埋引水隧洞群 岩爆综合防治技术 研究与实践

王继敏 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 锦屏二级水电站 深埋引水隧洞群 岩爆综合防治技术 研究与实践

王继敏 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

本书分析了锦屏二级水电站深埋引水隧洞的基本工程地质条件,对锦屏大理岩岩爆类型进行了系统全面的划分,总结了不同类型岩爆的特征及其特殊性,研究了岩爆的破坏模式和形成机理。在此基础上,介绍了岩爆微震监测预测方法,提出了应力解除爆破技术,并分别总结了爆破法开挖岩爆综合防治技术和 TBM 掘进岩爆综合防治技术以及这些方法和技术在锦屏二级水电站深埋引水隧洞的应用。

本书内容丰富、资料翔实、实用性强,介绍的成果可为从事水利水电、交通、采矿等相关行业的科研、设计、施工等工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业师生的学习用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

锦屏二级水电站深埋引水隧洞群岩爆综合防治技术研究与实践 / 王继敏著. — 北京:中国水利水电出版社, 2019.5  
ISBN 978-7-5170-7103-7

I. ①锦… II. ①王… III. ①二级水电站—引水隧洞—岩爆—防治 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第249514号

书 名	锦屏二级水电站深埋引水隧洞群岩爆综合防治技术研究与实践 JINPING ERJI SHUIDIANZHAN SHENMAI YINSHUI SUIDONG QUN YANBAO ZONGHE FANGZHI JISHU YANJIU YU SHIJIAN
作 者	王继敏 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.25印张 368千字
版 次	2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

随着我国西部多项水利水电、铁路、公路等国家重点工程建设，以及地下矿山向深部开采，深部地下工程中的岩爆问题越来越严重。近年来相继出现多次严重的岩爆灾害，已成为我国岩石工程和岩石力学领域亟待解决的关键问题。

锦屏二级水电站引水隧洞横穿锦屏山，4条大直径引水隧洞，单洞长达16.7km，最大埋深2525m，最大实测地应力超过70MPa，围岩地下水压10MPa以上，属极端复杂环境下的地下工程。隧洞施工期高应力诱发围岩失稳频发，岩爆灾害问题突出，严重制约了工程的建设进程。

工程施工方案采用奇数洞用TBM法和钻爆法、偶数洞用钻爆法，两两组合，实现优势互补。

以作者为代表的工程建设各方，以锦屏二级水电站引水隧洞群建设为依托，对高埋深大断面隧洞岩爆防治相关技术进行了系统攻关，对深埋隧洞的岩爆机理、监测预测手段、岩爆综合防治手段等进行了深入研究，取得了多项重要成果。本书为上述成果的总结，内容包括以下方面：

(1) 对锦屏二级水电站引水隧洞区的环境地质背景进行了系统研究分析，重点研究了隧洞区内软弱、破碎岩石的分布和特性，主要控制性断层和节理、裂隙发育特征，以及构造应力场的优势方向、应力状态类型。建立了锦屏深埋隧洞围岩分类体系和基于TBM掘进参数的围岩分类体系，并应用于锦屏引水隧洞群。

(2) 以引水隧洞施工过程中岩爆灾害的现场综合表现、发育和分布规律以及直接关联的地质、力学和工程等控制条件为基础，总结和吸取国内外岩爆研究的重要成果、认识和经验，揭示了深埋隧洞工程岩爆灾害的主要类型，深入分析了各类岩爆孕育过程中的关键控制因素和发生条件，系统阐述了各种类型岩爆的发生机理和诱发机制。

(3) 从微震基本概念入手，系统阐述了微震监测基本原理、微震定位精度影响因素以及微震监测设计，提出了钻爆法开挖和TBM掘进开挖下的微震监测方案，研究了锦屏岩爆风险微震解译判断的工作方法。

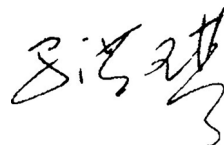
(4) 系统研究了岩爆防治的应力解除爆破技术，并应用于锦屏工程。结合理论分析、数值模拟及现场试验，对比不同应力解除爆破方案下的应用效果，提出了相应的适用范围。

(5) 基于引水隧洞钻爆法施工过程中岩爆灾害防治试验成果及现场经验，分析了不同岩爆主动防治措施的优劣，系统比较了岩爆条件下各种支护措施，提出了适用于锦屏二级水电站引水隧洞开挖的岩爆防治支护系统。

(6) 以引水隧洞 TBM 掘进开挖的工程实践为基础，对深埋长隧洞开挖的 TBM 选型、TBM 掘进条件下的岩爆防治思路及方案进行了详细的叙述，并对极强岩爆风险下的 TBM 掘进的导洞开挖方案进行了优化。

锦屏二级水电站引水隧洞群施工历时 8 年，作为锦屏工程特咨团专家组组长，我与专家们一起，对锦屏二级水电站引水隧洞岩洞岩爆、涌水等技术难题进行了多次咨询，也深知锦屏二级水电站引水隧洞建设的艰辛。正因为如此，作为锦屏工程建设现场组织者，能够将岩爆综合防治问题进行深入思考研究并进行总结，尤为难得。我相信，该成果的出版对高埋深大断面隧洞岩体爆破开挖的设计、施工及岩爆防治具有重要的理论价值与工程指导意义。

中国工程院院士：



2018 年 12 月

技术创新是人类开发利用自然资源，改善人们生活，推动社会进步的不竭动力。绵延 1500km 的雅砻江流域，水能资源丰富，干流天然落差 4420m，年径流量 607 亿  $m^3$ ，技术可开发装机容量约 30000MW，占四川省水电技术开发总量的 25%，在全国规划的十三大水电基地中排名第三。开发雅砻江，贡献清洁能源，服务国家发展，是我国几代水电人的初心和梦想。

雅砻江干流共规划 22 级水电站，开发规模浩大、技术难度空前。为实现科学有序开发，雅砻江公司提出四阶段开发战略，第一阶段开发建设二滩水电站，于 20 世纪末建成投产；第二阶段就是开发建设以锦屏一级、二级为代表的雅砻江下游剩余 4 座梯级水电站。锦屏一级、二级水电站的成功建设，不仅是雅砻江流域第二阶段开发战略实施的关键，也是雅砻江公司实践“一个主体开发一条江”的关键，只许成功，不能失败。但这两座超级电站的建设难度世所公认，锦屏一级要克服复杂地质条件建设世界最高混凝土双曲拱坝，锦屏二级要挑战全球最大埋深建设世界最大规模引水隧洞群，都面临着世界级的工程技术难题。

已故水电泰斗潘家铮院士曾亲自参加锦屏工程前期勘测设计工作，针对锦屏二级水电站岩体埋深超过 2500m、横穿锦屏山 16.7km 的隧洞群施工，他指出要高度关注强岩爆、大涌水、高地温、有毒有害气体四大问题。在施工过程中，由于特定的水文地质条件和岩石矿物成分，高地温和有毒有害气体问题不突出，但强岩爆和高压大流量涌水问题严重制约工程建设。高压大流量涌水问题通过调整治水思路、加强预报并采取针对性措施后得到解决，但强岩爆问题，无论钻爆法开挖还是 TBM 掘进，自始至终都是贯穿锦屏二级 7 条总长 120km 的引水隧洞群施工的重大安全风险，是雅砻江公司时刻重点关注的重大技术与管理难题。

善学者究其理，善行者究其难。为攻克包括强岩爆在内的锦屏工程世界级技术难题，雅砻江公司组织建立了强大的科技攻关体系，包括成立博士后科研工作站、企业技术中心、虚拟研究中心，与国家自然科学基金委合作设

立雅砻江水电开发联合研究基金，与国际国内知名咨询机构、科研院所建立战略合作伙伴关系，聘请业内顶级专家和院士组成锦屏工程特别咨询团等，针对锦屏二级水电站建设技术难题自主设立科研课题 50 余项，投入资金近 2 亿元，为工程的顺利建设提供了强有力的技术支撑。

锦屏二级水电站引水隧洞群于 2007 年开工，在雅砻江公司的精心组织下，设计、科研、施工、监理紧密协作，共同攻克了深埋长大隧洞群施工中的极强岩爆、高压大流量突涌水、洞室群多工作面高强度快速施工组织等一个又一个技术和管理难题，历时 4 年，于 2011 年实现隧洞全面贯通，2012 年实现首批两台机组投产发电，2014 年 8 台 600MW 机组全部建成投产。锦屏二级水电站引水隧洞群的成功建设，不仅让中国水电人追逐了半个世纪的锦屏梦终于成真，更因其大埋深、低辐射优势建设了闻名全球的中国锦屏地下实验室，使得我国在暗物质探测、深地岩石力学等基础前沿科学领域的研究位于世界前列。

本书在众多科研、设计、施工技术成果的基础上，总结岩爆的机理，重点介绍了锦屏二级水电站深埋引水隧洞群岩爆特征和综合防治技术，并给出了大量的岩爆实例。希望同行业的工程师们、高等院校接受工程教育的大学学生们，能够从中汲取有益的经验教训，不断探索创新，推动我国深埋地下工程安全高效建设。

雅砻江流域水电开发有限公司董事长：



2018 年 12 月

# 前言

锦屏二级水电站位于凉山彝族自治州的锦屏大河湾上，利用 150km 长大河湾的天然落差，通过开挖隧洞，截弯取直，引水发电。获得水头约 310m，电站总装机容量 4800MW，多年平均发电量 242.3 亿 kW·h。工程布置 7 条穿越锦屏山的隧洞群，总长约 120km，其中四条引水隧洞单洞均长 16.67km，开挖洞径 13m，隧洞沿线一般埋深 1500~2000m，最大埋深 2525m，具有埋深大、洞线长、洞径大、地应力水平高、岩溶水文地质条件复杂、施工布置困难等特点，工程设计、施工和建设管理极具挑战性，是目前国内乃至世界上已建或在建总体规模最大、综合难度最大的地下洞室群工程，其技术水平处于世界前列。电站于 2006 年 12 月通过国家核准，2007 年 1 月 30 日正式开工，2008 年 11 月 30 日大江截流，2012 年 12 月首批 2 台机组投产发电，2014 年 11 月全部机组投产。

锦屏二级水电站设计和施工过程中主要面临高地应力及岩爆（最大地应力超过 100MPa，岩爆洞段约占整个开挖洞段的 15%）、超高压大流量岩溶地下水（最大水压力约为 11MPa，最大突水流量为 5~7m<sup>3</sup>/s）等地质问题，以及由此带来的引水隧洞快速、安全施工技术问题。特别是由于锦屏二级水电站隧洞埋深大，自重应力大，再加上复杂地质构造条件的作用，形成了该工程赋存的极端复杂和恶劣的外在应力环境，导致隧洞施工期内高应力诱发围岩失稳频发，岩爆灾害问题突出，严重制约了工程的顺利建设。该工程环境在国内外尚不多见，缺乏可供借鉴的先例和工程经验。

针对深埋长大隧洞群建设过程中遇到的极高地应力强岩爆难题，雅砻江流域水电开发有限公司以工程建设中遇到的技术难题为导向，组织多家单位经过多年的技术攻关，进行了创新性研究与实践。华东勘测设计研究院有限公司对制约高埋深长隧洞地质条件、高应力条件下引水隧洞工程设计进行了历时 50 余年的研究，依泰斯卡咨询有限公司和中国科学院武汉岩土力学研究所对“引水隧洞岩爆产生的机理、规律及其防治控制措施”做了大量研究工作，大连力软科技有限公司和中国科学院武汉岩土力学研究所开展了“引

水隧洞和排水洞岩爆段微震监测技术服务”，长江水利委员会长江科学院开展了“引水隧洞爆破震动特性及地应力快速释放效应控制应用研究”和“锦屏地下实验室深部岩体爆破开挖安全与质量控制技术研究”，南京水利科学研究院开展了“高应力条件下地下洞室支护用新材料的应用研究”，北京工业大学开展了“引水隧洞强岩爆段 TBM 开挖方案优化分析”，成都理工大学开展了“引水隧洞不同施工方法围岩分类对比研究”，长江水利委员会长江科学院和四川大学开展了“引水隧洞高地应力条件下的岩体力学参数研究”，北京振冲股份有限公司开展了“引水隧洞高地应力下岩爆灾害及其工程对策研究”，中铁二局集团有限公司开展了“引水隧洞高地应力软岩大变形洞段施工技术研究”。

雅砻江流域水电开发有限公司组织了岩爆研究工作，在现场建立了岩爆防治组织机构，定期组织参建各方召开岩爆防治专题会议，邀请国内外相关科研院校、知名专家进行专题研究和现场试验，针对不同等级的岩爆采取了不同的支护措施，提出了岩爆洞段具体施工技术要求。在开挖过程中采用了超前应力解除爆破、TBM 通过强岩爆洞段导洞开挖法、水胀式锚杆、涨壳式预应力锚杆、喷射添加纳米级材料外加剂等新材料、新工艺、新方法，有力地保证了施工进度和人员设备的安全。首次将微震监测技术用于排水洞和引水隧洞工程，通过专用数据采集设备及处理软件，构建了随 TBM 和钻爆法掘进而移动监测的微震监测系统，对施工掌子面前后的岩体微震活动进行实时连续监测和分析预报，有效地预报了岩爆的发生。

经过产学研结合，锦屏工程建设者攻克了深埋长大水工隧洞极高地应力岩爆综合防治技术难题。提出了深埋隧洞群工程区地应力场研究方法，揭示了深埋大理岩岩爆孕育机理与发生机制，建立了极高地应力强岩爆灾害风险信息获取及预测预报体系，提出了钻爆法和 TBM 施工的强岩爆综合防治技术。

通过各参建单位的艰辛努力，锦屏二级水电站实现了复杂地质条件洞室群的快速施工，2011 年全年开挖引水隧洞长度 23km，先后创造了单月单洞开挖 1300m，单月单洞衬砌 1500m，单月单洞灌浆 80000m 等世界记录。其中两条辅助洞 2003 年 11 月开工，2008 年 8 月 8 日双洞全线开挖贯通。排水洞 2007 年 4 月开工，2011 年 8 月 28 日全线开挖贯通。1~4 号引水隧洞均于 2007 年 8 月 8 日正式开工，分别于 2011 年 6 月 6 日、2011 年 8 月 16 日、2011 年 11 月 20 日、2011 年 12 月 8 日开挖贯通。2012 年 12 月底实现了锦屏二级水电站“一洞两机”的发电目标，创造了水电建设史上的“人间奇迹”。

锦屏二级水电站深埋长大隧洞群建设的复杂性和挑战性，受到国内外专家的关注和关心。在工程建设中，钱七虎院士、马洪琪院士、王思敬院士、谭靖夷院士、何满潮院士、钟登华院士、Nick Barton (TBM-Q 系统建立者)、John A Hudson (前国际岩石力学会主席) 等国内外专家和学者的多次现场咨询指导，借此机会，向长期以来支持关心锦屏工程建设的专家学者表示衷心的感谢。本书编写过程中，参阅引用了有关单位的研究成果，主要研究人员有张春生、陈祥荣、冯厦庭、曾雄辉、曾新华、单治钢、朱焕春、唐春安、邬爱清、吴新霞、龚秋明、尹健民等。长江水利委员会长江科学院汪洋博士参加了本书第 3 章与第 4 章部分内容、李鹏博士参加了第 5 章与第 6 章部分内容的编写，邬爱清教授、尹健民教授对书稿提出了很多建设性的修改意见，雅砻江流域水电开发公司揭秉辉为本书收集了大量资料并参与本书修改工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，成稿时间仓促，书中定有不妥之处，敬请读者指正。

作者

2018 年 12 月



# C O N T E N T S

序一

序二

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 问题的提出 .....	1
1.2 国内外岩爆研究现状 .....	2
1.2.1 岩爆的概念.....	2
1.2.2 岩爆的形成机制.....	3
1.2.3 岩爆的分类.....	5
1.2.4 岩爆的判据及预测方法.....	8
1.2.5 岩爆的监测 .....	16
1.2.6 岩爆的防治技术 .....	17
1.2.7 岩爆防治工程实例 .....	21
1.2.8 存在的问题 .....	25
1.3 需解决的关键技术难题.....	26
1.4 主要研究内容.....	27
<b>第 2 章 引水隧洞工程地质条件</b> .....	29
2.1 工程概况.....	29
2.2 隧址区地质环境背景.....	30
2.2.1 地形地貌 .....	30
2.2.2 地层岩性 .....	30
2.2.3 地质构造 .....	32
2.2.4 岩石物理力学性质 .....	33
2.2.5 岩溶水文地质条件 .....	33
2.2.6 工程区地应力场 .....	38
2.3 引水隧洞围岩基本地质条件.....	43

2.3.1	岩性特征 .....	43
2.3.2	岩溶水文地质特征 .....	45
2.3.3	岩体结构特征 .....	46
2.4	深埋隧洞围岩分级体系 .....	50
2.4.1	JPF 围岩分级体系 .....	51
2.4.2	深埋隧洞的围岩分级 .....	55
<b>第 3 章</b>	<b>深埋大理岩岩爆特征与机理 .....</b>	<b>58</b>
3.1	大理岩岩爆类型 .....	58
3.1.1	应变型岩爆 .....	58
3.1.2	断裂型岩爆 .....	60
3.1.3	岩柱型岩爆 .....	61
3.2	大理岩隧洞岩爆发生机理和诱发机制 .....	63
3.2.1	岩爆发生机理的试验研究 .....	63
3.2.2	应变型岩爆机理 .....	73
3.2.3	断裂型岩爆机理 .....	78
3.2.4	岩柱型岩爆机理 .....	83
3.3	大理岩岩爆影响因素 .....	85
3.3.1	地应力场特征的影响 .....	85
3.3.2	岩体力学特征的影响 .....	88
3.3.3	工程因素的影响 .....	91
3.3.4	其他因素的影响 .....	98
3.4	大理岩岩爆发生条件 .....	102
3.4.1	应变型岩爆的发生条件 .....	102
3.4.2	断裂型岩爆的发生条件 .....	104
3.4.3	岩柱型岩爆的发生条件 .....	105
<b>第 4 章</b>	<b>岩爆微震监测预测方法 .....</b>	<b>107</b>
4.1	微震基本概念 .....	107
4.1.1	微震和岩爆 .....	107
4.1.2	微震监测指标 .....	108
4.2	微震监测原理 .....	110
4.3	微震定位精度影响因素 .....	111
4.3.1	传感器对事件定位的影响 .....	112
4.3.2	算法误差 .....	112
4.3.3	信号干扰因素影响 .....	113
4.3.4	传感器坐标误差 .....	114
4.4	微震监测设计 .....	114
4.4.1	微震监测设计的影响因素 .....	114

4.4.2	微震监测设计流程和内容	115
4.5	锦屏微震监测系统设计实例	116
4.5.1	深埋隧洞钻爆法施工微震实时监测及传感器移动式布置方案	117
4.5.2	深埋隧洞 TBM 施工微震实时监测及传感器移动式布置方案	118
4.6	锦屏微震监测解译	121
4.6.1	岩爆风险的微震解译判断	121
4.6.2	典型岩爆监测与风险规避岩爆案例	123
<b>第 5 章</b>	<b>应力解除爆破技术</b>	<b>135</b>
5.1	应力解除爆破技术发展历程及工程经验	135
5.2	应力解除爆破法的基本原理	136
5.2.1	掌子面直孔应力解除爆破法	136
5.2.2	掌子面斜孔应力解除爆破法	137
5.2.3	轮廓线斜孔应力解除爆破法	137
5.2.4	围岩内斜孔应力解除爆破法	138
5.3	基于数值模拟的应力解除爆破法防治效果评价	139
5.3.1	FLAC3D 模拟方法	139
5.3.2	计算条件和材料参数	139
5.3.3	计算方案	140
5.3.4	不同岩爆防治方案开挖后的数值模拟成果	140
5.3.5	岩爆防治效果对比评价	146
5.4	岩爆灾害工程防治的应力解除爆破试验	148
5.4.1	应力解除爆破试验方案及参数	148
5.4.2	试验结果及分析	152
5.4.3	不同应力解除爆破方案的应用效果比较	157
<b>第 6 章</b>	<b>钻爆法开挖岩爆防治技术</b>	<b>158</b>
6.1	岩爆防治与控制思路	158
6.2	岩爆防治的设计方法	159
6.3	岩爆防治的主动性措施	160
6.3.1	岩爆主动防治方法	160
6.3.2	防治方法比较	163
6.4	岩爆防治的被动性措施	163
6.4.1	围岩支护抗岩爆机理	164
6.4.2	深埋长隧洞开挖支护设计要求	167
6.4.3	岩爆条件下支护措施	168
6.5	钻爆法开挖岩爆综合防治技术	174
6.5.1	优化开挖程序	175
6.5.2	改善围岩特性	176

6.5.3	应力解除爆破技术	176
6.5.4	合理的支护方案	176
6.5.5	加强地质预报和岩爆微震监测	177
6.5.6	其他安全措施	178
<b>第7章</b>	<b>TBM掘进岩爆防治技术</b>	<b>179</b>
7.1	深埋长隧洞TBM的选型	179
7.1.1	TBM的制造及应用现状	179
7.1.2	TBM选型分析	181
7.1.3	TBM主机类型确定	184
7.1.4	锦屏二级水电站TBM构造和主要参数	185
7.2	TBM掘进岩爆防治与控制思路	185
7.2.1	TBM掘进条件下的岩爆特点	185
7.2.2	TBM掘进的岩爆防治思路	186
7.3	一般岩爆风险下TBM掘进岩爆控制方案	187
7.3.1	TBM技术措施	187
7.3.2	优化支护措施	189
7.4	极强岩爆风险下TBM掘进的导洞开挖方案	190
7.4.1	导洞方案设计	191
7.4.2	导洞方案岩爆风险分析	194
7.4.3	导洞方案风险控制	194
7.4.4	导洞开挖方案实例分析	196
附录	锦屏二级水电站隧洞群中等以上岩爆破坏汇总表	202
参考文献		221

# 绪 论

## 1.1 问题的提出

我国是世界上水能资源最丰富的国家之一，水能资源理论蕴藏量 6.94 亿 kW，技术可开发量约 5.42 亿 kW。大力开发水电和其他可再生能源，已成为我国能源发展的重要战略。我国已建和在建水电装机规模均居世界第一位，截至 2018 年底，我国水电装机容量达到 3.5 亿 kW，一大批特大型水电工程在我国西南地区的崇山峻岭间开工建设。由于我国西南地区地质条件十分复杂，有些水电工程需要在大理深、极高地应力环境下开挖水工隧洞群 [根据 (GB 50287—2006)《水力发电工程地质勘察规范》，最大主应力量级大于 40MPa，且围岩强度应力比小于 2 的情况属于极高地应力]，如锦屏二级水电站引水隧洞平均埋深 1500~2000m，最大埋深 2525m，实测最大地应力值超过 100MPa；雅鲁藏布江墨脱水电站引水隧洞，最大埋深可达 4000m，仅自重应力就可达到 100MPa 左右。

深埋隧洞岩体开挖主要有两种方式：一种是爆破开挖；另一种是机械 (TBM) 开挖。在大理深、高地应力环境中，岩体的开挖将导致围岩应力状态变化、转移和重新分布。伴随围岩应力状态变化过程，岩体能量赋存的环境发生改变、物理力学性质发生劣化，并最终导致围岩开挖损伤区的形成，同时还有可能诱发岩爆等地质灾害。岩爆灾害一直是深部岩体工程建设各方所关心的重大问题，其不仅损伤工程设备影响施工进度，同时还严重威胁施工人员人身安全，严重时甚至造成整个工程的失败。近年来，每年由于深部岩体工程开挖诱发岩爆灾害导致的工程事故多达数千起，伤亡人数近千人，诸多工程工期延误半年甚至 1 年以上，经济损失巨大。虽然关于岩爆的理论研究较多，但所提出的各种理论及预测方法，在工程实际应用中尚存在多种困难。由于地下工程环境不同，如初始地应力大小及主应力方向、围岩强度、岩石脆性变形特征、洞室形状及相对位置、施工工艺等因素的不同，造成已有岩爆预测及判断方法在使用上具有各自的局限性和不足，生产实践中又常要求一些具体、切实可行的岩爆预测预报方法、指标和防治对策，故而针对特定工程进行专

门研究分析仍是岩土工程师和设计人员的普遍选择，且针对具体工程进行分析研究具有更为重要的现实意义。

锦屏二级水电站位于四川省凉山州境内雅砻江锦屏大河湾处雅砻江干流上，系雅砻江梯级开发的骨干电站。整个工程区位于高地应力区，工程隧洞上覆岩体最大埋深达 2525m。弱卸荷区围岩表面实测地应力为 60~80MPa，最大实测地应力达到 113.9MPa，且明显表现出量值随埋深增加而增大趋势。工程隧洞主要由 7 条平行布置的隧洞（4 条引水隧洞、2 条辅助洞、1 条排水洞）组成，平均洞线长度约 17km，隧洞穿越大理岩、灰岩、砂岩等硬质岩层。排水洞、1 号和 3 号引水隧洞东段开挖均采用 TBM 施工技术，其他洞室采用钻爆法施工。施工过程中，发生大小不同等级岩爆数百次，并引起隧洞内较大范围塌方及支护结构毁坏。岩爆造成的危害给隧洞工程建设带来巨大的安全控制风险和进度控制风险，成为锦屏工程建设面临的重大技术难题。钱七虎院士在中国科协第 51 期新观点新学说学术沙龙上指出：“我国现阶段岩石工程规模大、难度高。无论是矿山工程、水电工程还是交通工程，很多都需要开发进入深部地下空间，不少工程都遇到了岩爆现象。岩爆机理及其预测、预报和预警研究，已成为我国岩石力学界必须致力解决的关键科学问题和技术难题”。因此，有必要针对锦屏深埋隧洞工程的岩爆问题进行科学研究和新技术研发应用。

该书以锦屏二级水电站隧洞工程建设为依托，对高埋深大断面隧洞岩爆防治相关的技术研究成果及工程经验进行了全面总结，对深埋隧洞的岩爆机理、监测预测手段、岩爆综合防治技术等进行了详细的介绍。该书的成果对深部岩体破坏规律的研究具有一定的理论和实际意义，而且对高埋深大断面隧洞岩体工程的设计施工及岩爆防治具有较大的应用价值。

## 1.2 国内外岩爆研究现状

### 1.2.1 岩爆的概念

岩爆是高地应力地区地下岩石工程中特有的一种地质灾害现象。自 1738 年英国锡矿首次报道发生岩爆以来，国内外学者从多角度对岩爆问题进行了大量研究，但到目前为止对岩爆的定义仍未达成统一的认识。概括起来，岩爆定义目前存在两种观点：一种以挪威专家拉森斯为代表，认为只要岩石有声响，产生片帮、爆裂、剥落甚至弹射等现象，有新鲜破裂面产生即称为岩爆；另一种以中国学者谭以安为代表，认为只有产生弹射、抛掷性破坏才能称为岩爆，而将无动力弹射现象和室内变形破裂归属于静态下的脆性破坏。

王兰生基于洞室开挖所引起岩爆的宏观表征现象和室内变形破裂试验结果，将岩爆定义为：地下空间开挖过程中，高地应力条件下的洞室围岩因开挖卸荷而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能突然释放而引起的爆裂松脱、剥离、弹射乃至抛掷性破坏现象。

郭然、于润沧认为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。

南非对于岩爆的定义为：岩爆是一种导致了人员伤亡、工作面或设备发生破坏的微震，其基本特性是突然和剧烈。《加拿大岩爆支护手册》一书中对岩爆进行如下定义：岩爆是一种伴随有微震现象的突然、猛烈的围岩破坏行为。

从以上关于岩爆的定义可知，国内主要是根据围岩破坏表征现象结合地质力学分析对岩爆进行定义，而国外则多基于岩爆发生前后洞边墙围岩存在微震这一现象来定义岩爆灾害，并基于这一认识形成了岩爆微震监测技术。

### 1.2.2 岩爆的形成机制

岩爆是一种极为复杂的物理现象，关于其形成、破坏机理不同学者看法不一。关于岩爆的形成机理，国内谭以安的研究解释得到较为广泛的认可。谭以安认为由于岩爆的本质是洞室围岩突然释放高应力集中区内储聚的大量弹性应变能的一种剧烈的脆性破坏，因而其形成是一渐进破坏过程。对岩爆形成的渐进破坏划分以下几个阶段，具体过程示意如图 1.2-1 所示。

(1) 劈裂成板。洞室开挖过程中或开挖后，初始地应力发生扰动并重新分布，这样造成局部应力的集中和能量积聚，在切向应力梯度较大的部位，或在洞边墙平行于最大初始应力部位，洞边墙因压致拉裂而形成板状劈裂。其板面平直，与洞边墙大体平行，无明显擦痕。此阶段为岩爆的初级破坏阶段。

(2) 剪切成块。切向应力在平行劈裂板面方向继续作用，将使岩板屈曲失稳，随后产生剪切变形。当剪应力达到抗剪强度时，则产生剪切破坏。在板的周边，剪切微裂隙进一步贯通，形成宏观 V 形剪切面，使洞边墙处于岩爆破坏的临界状态。该阶段为岩爆弹射酝酿阶段。

(3) 块（片）弹射。前两个阶段克服了岩体黏聚力和内摩擦力，并产生声响和震动而耗散了大量的弹性应变能。岩块剪切滑移时，获得剩余能量，处于“跃跃欲弹”的状态。一旦被剪断，则发展到块、片弹射阶段，应变能转化为动能，使岩块（片）以一定的速度和散射角，骤然向洞内临空方向猛烈弹射，形成岩爆。

徐林生等通过对二郎山公路隧洞岩爆现场跟踪调研、岩爆断口扫描电镜分析以及室内外岩石力学试验研究后认为，岩爆发生的力学机制可归纳为压致拉裂型、压致剪切拉裂型、弯曲鼓折（溃屈）型三种基本形式，也可以以多种组合形式出现。通过大理岩三轴压缩动态卸围压试验表明岩爆的产生是岩石内部张拉和剪切破坏的综合作用结果，而剪切作用使岩石局部产生破裂，有利于张拉破坏的形成，张拉破坏是岩爆产生的根本内因。

唐绍辉等根据会泽铅锌矿麒麟厂矿区岩爆表征现象的综合分析，认为矿体中上盘岩

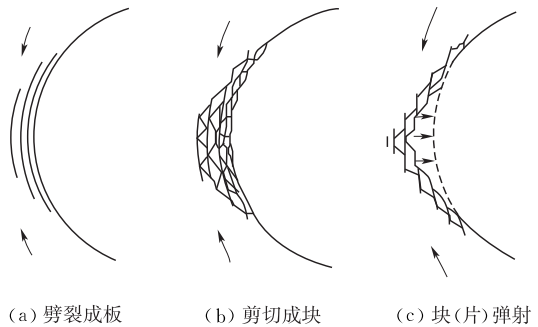


图 1.2-1 岩爆破坏过程