

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Mechanism, Warning and Dynamic Control of
Rockburst Development Processes

岩爆孕育过程的机制、 预警与动态调控

冯夏庭 陈炳瑞 张传庆 李邵军 吴世勇 等 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

岩爆孕育过程的机制、预警 与动态调控

**Mechanism, Warning and Dynamic Control
of Rockburst Development Processes**

冯夏庭 陈炳瑞 张传庆 李邵军 吴世勇 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书被列为“十二五”国家重点图书出版规划项目中国科学技术研究领域高端学术成果出版工程,是岩爆孕育过程研究的首部专著,强调了岩爆孕育过程的研究方法和不同类型岩爆孕育过程的机制、规律和特征研究,系统介绍了岩爆孕育过程的微震实时监测方法、小波-神经网络滤波方法和震源定位的分层-PSO方法,不同类型(即时型、时滞型)岩爆孕育过程中微震信息演化特征和规律及其差异性,TBM与钻爆法诱发隧道岩爆的规律和差异性,岩爆孕育过程机制分析的矩张量方法和P波发育度方法,不同类型(即时应变型、即时应变-结构面滑移型、时滞型等)岩爆孕育过程的机制及其差异性,即时型岩爆孕育过程中微震活动性时间、空间和能量分形计算方法及其特征和规律,基于宏观特征和微震能量的两种岩爆等级划分方法,岩爆爆坑深度估计的RVI新指标、岩爆断面位置及其危险性估计的基于局部能量释放率的数值方法、基于实例学习的岩爆等级和爆坑深度估计神经网络方法、基于微震信息演化的岩爆等级及其概率预警方法和基于微震信息演化的岩爆等级与爆坑深度预警神经网络方法,岩爆孕育过程的动态调控方法:减少开挖引起的能量聚集水平-预释放或转移能量-吸能的“三步”策略与优化设计方法、支护系统的设计方法、岩爆开挖与支护设计指南等,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。

书中关于岩体破坏-灾害孕育-发生-动态调控过程研究的学术思想可为岩石力学与工程安全研究提供启示和借鉴,书中介绍的成果可为从事水利水电、土木、交通、采矿、国防等高应力和深埋工程研究的科研人员、工程技术人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控=Mechanism, Warning and Dynamic Control of Rockburst Development Processes/冯夏庭等著. —北京:科学出版社,2013

(“十二五”国家重点图书出版规划项目)

ISBN 978-7-03-036465-4

I. ①岩… II. ①冯… III. ①岩爆-研究 IV. ①P642

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第009516号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:37 3/4 彩插:24

字数:745 000

定价:150.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

岩爆研究一直是岩石力学的研究热点和难点,我们试图通过多种途径,例如召开中国科协“新观点、新学说”学术沙龙等,旨在加强和鼓励这方面的研究。我很高兴地看到,在国家 973 项目等的资助下,作者就岩爆孕育过程的特征、规律、机制、预警与动态调控理论和技术,开展了系统深入的研究,取得了一些创新性成果。

(1) 提出了深埋隧道微震实时监测原则、小波-神经网络滤波方法和震源定位的分层-PSO 方法,提高了微震实时监测的可靠性,提出了深埋隧洞开挖诱发岩体裂化过程的现场原位综合观测方法,为岩爆孕育过程规律和机制的研究提供了重要手段。

(2) 研究从岩爆的孕育过程入手,通过现场原位多手段、系统的综合观测试验,提出了岩石破裂类型识别的改进型矩张量和 P 波发育度判别方法,初步揭示了不同类型(即时应变型、即时应变-结构面滑移型、时滞型等)岩爆孕育过程的特征、规律和机制及其差异性,以及地质、开挖方法、速率、支护等的作用和影响。

(3) 针对 TBM 和钻爆法开挖诱发的隧洞即时型岩爆,提出了其微震活动性的时间、空间和能量分形方法,一定程度上揭示了其孕育过程的时间、空间和能量分形特征和自相似规律;基于此自相似规律,建立了基于微震活动性的岩爆区域、等级及其概率和爆坑深度的动态预警方法。

(4) 提出了综合考虑应力控制、岩石物性、岩体刚度和地质构造因素的岩爆风险估计 RVI 指标、基于工程实例类比的岩爆风险估计神经网络模型和以局部能量释放率为指标的数值评估方法。这些岩爆风险估计与预警方法在一定程度上能给出岩爆区域、等级、爆坑深度与断面位置,并能根据地质、岩体性态和施工信息的动态更新进行岩爆风险的动态评估和动态预警,也为前兆信息不明显时或微震活动性规律不明显时的岩爆预警提供了有效方法。

(5) 针对不同类型岩爆孕育过程,提出了减少开挖引起的减少能量聚集水平 $\rightarrow$ 预释放、转移能量 $\rightarrow$ 吸能的动态调控“三步”策略和“裂化-抑制”法、基于 RVI 和破坏接近度的锚杆长度设计方法以及开挖与支护设计策略。

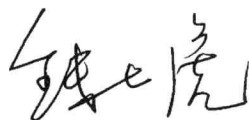
(6) 从声响特征、围岩破坏特征、岩体破坏程度、支护破坏程度、微震能量等方面,给出岩爆发生的等级判别方法,避免了部分信息缺失时难以合理确定岩爆等级的问题。

(7) 在大量工程实践的基础上,总结出了岩爆孕育过程的动态监测预警预报与动态调控设计指南。

上述理论方法和技术成果在锦屏二级水电站引水隧洞的成功实践,冲击了岩石力学学术界和工程界的部分专家认为岩爆不可监测预报的固有观点,为世界范围内水电乃至其他岩土工程行业今后开展类似工程的岩爆监测、分析和预警提供了良好的范例。

该书能被列为“十二五”国家重点图书出版规划项目中国科学技术研究领域高端学术成果出版工程,也说明了所介绍成果的创新性。该书的出版必将为岩爆和深部工程安全性研究者提供极大的助益,为深部工程安全设计与施工提供重要的科学依据,为岩石力学学科的发展以及岩石力学理论与岩石工程实践紧密结合做出重要贡献。

中国工程院院士



2012年10月8日

前 言

水利水电、交通、深部金属矿山开采、核废物地质处置、深部物理地下实验室等工程建设过程中经常发生岩爆,造成了大量的经济损失、人员伤亡、工期延误等。其关键问题是不同类型岩爆的孕育过程中的特征、机制与规律如何?用何有效的理论进行岩爆灾害等级、发生位置等的预测预警?如何及时有效地对岩爆灾害的孕育过程进行动态调控,改变岩体破坏时空演化规律和特征,以避免灾害的发生?

就上述关键科学问题,在 1996 年,本书第一作者与南非金山大学(University of Witwatersrand)采矿系和南非科学工业研究院采矿所(CSIR Miningtek)合作开发了南非深部金矿 VCR 采场、碳化采场和隧道的岩爆风险估计专家系统和神经网络模型。随后,本书第一作者又开发了深埋交通和水电隧道岩爆风险估计神经网络模型,并提出了数据挖掘的方法,丰富了岩爆专家系统知识库。最近,本书第一作者主持了国家 973 项目“深部重大工程灾害的孕育演化机制与动态调控理论”(2010CB732000)、国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目“深埋长大引水隧洞和洞室群的安全与预测研究”(50539090)、“十一五”国家科技支撑计划课题“深埋长隧洞 TBM 施工的安全性评价”(2006BAB04A06)、中国科学院-国家外专局创新团队国际合作伙伴计划“深部岩体力学与工程安全研究”、中国科学院重点部署项目课题“深部工程成灾机制与防控”以及锦屏二级水电站工程科研专项等项目研究。在这些科研项目的资助下,开展了不同类型岩爆孕育过程的特征、规律、机制、预测预警方法与动态调控方法的研究,并结合锦屏二级水电站引水隧洞施工期的岩爆与微震监测等工程科研项目,进行了引水隧洞和排水洞的岩爆预测预警与动态调控实践。本著作就是系统总结近年来关于岩爆孕育过程与调控研究成果写出的。

参与本著作相关研究与撰写的还有:邱士利(4.2.1 节、4.3 节)、肖亚勋(2.3.3 节、2.4 节、3.4 节)、丰光亮(4.6 节)、赵周能(3.2 节)、陈东方(2.4.2 节的神经网络、4.4 节、4.7 节)、于洋(3.6.3~3.6.5 节)。他们还参加了第 1 章相关内容的撰写。

国家科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院、二滩水电开发有限责任公司、中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院、中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室对相关成果的研究提供了资助和支持。钱七虎院士、郑颖人院士、葛修润院士、王梦恕院士、白以龙院士、吴中如院士、梁文灏院士、叶朝辉院士、林宗坚教授等对上述研究给予了指导,周辉研究员参与了与本成

果相关的科研项目研讨和管理工作,李元辉教授和杨成祥教授对本著作的相关项目研究给予了大力支持,江权副研究员、潘鹏志副研究员、晏飞副研究员以及 973 项目组其他成员等参加了本著作相关科研工作的研讨,张春生教授级高工、王继敏教授级高工、曾雄辉总工、侯靖教授级高工、陈祥荣教授级高工、揭秉辉主任等参与了锦屏二级水电站相关研究工作并对现场科研工作给予了大力支持,锦屏二级水电站微震监测与岩爆预测预警研究还得到了二滩国际、中铁十三局、中铁十八局、北京振冲、中铁二局等相关单位的大力支持与协助。研究生李占海、吴文平、刘建坡、李清鹏等参与了部分研究工作。现场工作与施工人员提供了部分工程照片和岩爆实例。科学出版社刘宝莉编辑、鲁燕儿博士等为本书的编辑出版付出了辛勤劳动。在此对上述做出贡献的专家表示衷心的感谢!

本书的主要内容曾在亚洲岩石力学大会等 10 多个国际国内学术会议上作为特邀报告进行介绍。

本书的成果主要是以深埋隧道为依托而获得的,其他类型的工程由于开挖开采而诱发的岩爆孕育过程还有待进一步研究和验证。由于岩爆问题是世界性难题,上述研究工作带有探索和尝试的特点,加上作者学术水平的限制,书中难免存在不足之处。作者恳切希望读者批评指正,愿共同探讨。

作 者

2012 年 8 月 18 日于武汉

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 锦屏二级水电站深埋引水隧洞和排水洞	4
1.2.1 工程总体布置	4
1.2.2 地质条件	5
1.2.3 施工情况	10
1.2.4 主要工程问题	10
1.2.5 需要研究解决的问题	11
1.3 岩爆研究主要进展	12
1.3.1 微震实时监测与数据分析方法	12
1.3.2 岩爆孕育过程的特征、规律与机制研究	15
1.3.3 岩爆等级划分与判别方法	19
1.3.4 岩爆风险估计方法研究	22
1.3.5 岩爆防治方法研究	32
1.4 主要研究内容和思路	34
2 微震实时监测与数据快速分析方法	37
2.1 引言	37
2.2 微震监测基本理论与概念	40
2.2.1 微震监测原理	40
2.2.2 基本概念	41
2.3 整体协同、全局最优的微震实时监测系统与方法	42
2.3.1 微震监测方案设计基本原则	42
2.3.2 微震传感器整体协同、全局最优的布置方法	43
2.3.3 微震传感器整体协同全局最优布置的典型案例分析	45
2.4 微震信息快速分析方法	55
2.4.1 微震监测数据快速分析内容和流程	55
2.4.2 微震有效信号小波-神经网络识别与提取方法	55
2.5 微震源传感器阵列内外 PSO 定位算法	91

2.6	锦屏二级水电站引水隧洞和排水洞微震实时监测与分析	102
2.7	小结	106
3	岩爆孕育过程的特征、规律与机制	108
3.1	引言	108
3.2	隧洞岩爆孕育过程微震信息演化特征与规律研究	109
3.2.1	隧洞岩爆孕育过程微震信息时空演化规律	109
3.2.2	钻爆法施工深埋隧洞微震事件及岩爆分布特征	141
3.2.3	TBM 施工隧洞微震监测洞段微震事件及岩爆分布特征	148
3.2.4	不同施工条件下深埋隧洞微震监测洞段微震信息及岩爆分布对比分析	151
3.2.5	隧洞支护对微震活动及岩爆的影响	152
3.2.6	工程地质因素对岩爆的影响及其防控措施启示	157
3.2.7	岩爆孕育过程中微震时间序列特征	168
3.3	岩爆孕育机制的矩张量分析方法	175
3.3.1	岩爆孕育机制矩张量分析总体思路	175
3.3.2	基于微震监测数据岩石破裂矩张量分析方法	177
3.3.3	典型岩爆孕育过程中岩体破裂事件产生机制分析	196
3.4	岩爆孕育过程中岩石破裂类型判别的 P 波发育度方法	216
3.4.1	基于能量比及矩张量方法的岩石破裂类型判别对比分析	216
3.4.2	基于 P 波发育度方法的岩石破裂类型判别	225
3.4.3	深埋隧洞岩石破裂类型综合判别方法	231
3.5	岩爆孕育过程中岩体变形破裂演化过程的原位综合观测	236
3.5.1	岩爆孕育机制的原位综合观测方法	236
3.5.2	试验洞工程地质条件和位置	237
3.5.3	试验洞布置与施工开挖	237
3.5.4	岩爆孕育过程中岩体变形破裂过程的原位试验方案	239
3.5.5	现场岩爆发生情况	244
3.5.6	测试结果分析	244
3.5.7	岩爆孕育过程的变形破裂机制分析	250
3.6	即时型岩爆孕育过程的特征、规律与机制	251
3.6.1	即时型岩爆描述及其特征	251
3.6.2	即时型岩爆孕育过程中微震信息演化规律	255
3.6.3	即时型岩爆孕育过程中微震信息演化的时间分形特征	260
3.6.4	钻爆法开挖诱发即时型岩爆的空间分形特征	270
3.6.5	TBM 开挖诱发即时型岩爆的能量分形特征	279

3.6.6 即时型岩爆孕育过程的机制	285
3.7 时滞型岩爆孕育过程的特征、规律与机制	291
3.7.1 时滞型岩爆描述及其特征	291
3.7.2 时滞型岩爆孕育过程中微震信息演化规律	294
3.7.3 深埋隧洞时滞型岩爆孕育过程的机制	297
3.8 小结与讨论	300
4 岩爆孕育过程风险估计与预警方法	305
4.1 引言	305
4.2 岩爆等级划分方法	308
4.2.1 基于宏观特征的岩爆等级定量划分方法	311
4.2.2 基于现场实时监测的微震能量的岩爆等级划分方法	324
4.3 基于 RVI 指标的岩爆爆坑深度经验评估方法	332
4.3.1 岩爆倾向性指标 RVI 研究方法	333
4.3.2 岩爆实例数据库构建及基本组成	335
4.3.3 岩爆控制因子及其控制机理和量化方法	337
4.3.4 岩爆爆坑深度评估经验关系式	347
4.3.5 工程应用及工程案例分析	348
4.4 基于工程实例神经网络类比的岩爆爆坑深度和等级估计方法	356
4.4.1 进化神经网络基本原理	356
4.4.2 基于进化-神经网络算法的岩爆风险估计方法	362
4.4.3 实例分析与工程应用	376
4.5 基于数值模拟的岩爆风险评估方法	380
4.5.1 深埋硬岩隧洞施工过程数值模拟方法	381
4.5.2 局部能量释放率、能量释放率和超剪应力的基本理论	382
4.5.3 基于数值模拟的岩爆风险评估方法的建立	387
4.6 基于微震信息演化规律的深埋隧洞岩爆预警方法	394
4.6.1 预警方法的建立	394
4.6.2 工程应用	413
4.6.3 预警结果的讨论	421
4.7 基于微震信息演化的岩爆等级与爆坑深度神经网络预警方法	427
4.7.1 概述	427
4.7.2 神经网络样本的构建	427
4.7.3 隐含层节点数及初始权值的优化	431
4.7.4 神经网络模型的优化训练	432
4.7.5 神经网络模型学习效果的检验	433

4.7.6 实例分析与工程应用	434
4.8 锦屏二级水电站引水隧洞和排水洞微震监测洞段岩爆风险综合估计 与预警	437
4.8.1 锦屏二级水电站 T _{2b} 白山组洞段引水隧洞钻爆法施工前岩爆风险估计	437
4.8.2 锦屏二级水电站引水隧洞和排水洞微震监测洞段施工过程中岩爆的 动态综合风险估计与预警	439
4.8.3 锦屏二级水电站微震监测洞段引水隧洞落底开挖岩爆风险评估	441
4.9 小结	446
5 岩爆孕育过程的动态调控方法	449
5.1 引言	449
5.2 岩爆孕育过程动态调控基本思想	449
5.2.1 岩爆孕育过程动态调控的基本思想	449
5.2.2 岩爆孕育过程的开挖和支护方案智能全局优化	454
5.3 减小能量集中的方法	460
5.3.1 断面形状与尺寸优化	460
5.3.2 掘进速率优化	462
5.3.3 相向掘进隧洞贯通前掘进方式优化	466
5.4 能量预释放、转移法	467
5.4.1 应力释放孔优化	468
5.4.2 导洞位置、尺寸和形状优化	470
5.5 能量吸收法——岩爆支护设计方法	486
5.5.1 岩爆防治支护设计要求和支护选型	487
5.5.2 岩爆倾向洞段的支护参数优化设计	490
5.5.3 钻爆法施工岩爆洞段支护时机优化	491
5.5.4 TBM 施工岩爆洞段的支护措施	494
5.6 岩爆孕育过程的动态调控方法	495
5.6.1 施工过程动态调整的必要性	495
5.6.2 施工过程动态调整方法	495
5.7 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆孕育过程的动态调控	497
5.7.1 岩爆动态防控总体情况	497
5.7.2 深埋隧洞强烈至极强岩爆洞段钻爆法上导洞和 TBM 主洞联合掘进 方法应用	500
5.7.3 深埋隧洞岩爆动态调控典型案例	512
5.7.4 两工作面相向掘进时贯通前岩爆孕育过程预警与动态调控	516

5.8 小结与讨论	522
6 岩爆孕育过程实时监测、动态预警与调控设计指南	523
1 总则	523
2 专业术语	523
2.1 岩爆相关专业术语	524
2.2 微震监测相关专业术语	524
2.3 岩爆风险估计相关专业术语	526
2.4 岩爆风险规避措施相关专业术语	528
3 岩爆孕育过程的微震实时监测与数据快速分析	528
3.1 微震监测设备及通信方案的选择	529
3.2 微震监测方案的设计	530
3.3 岩石破裂有效信号的识别与提取	535
3.4 岩石破裂源定位	538
3.5 岩爆孕育过程中微震信息及掘进速率演化规律	540
3.6 基于微震信息的岩石破裂类型识别	545
4 岩爆风险的动态评估与预警	546
4.1 岩爆风险评估的目的及任务	546
4.2 岩爆风险评估方法分类及选用原则	548
4.3 工程选址、选线阶段岩爆风险评估	549
4.4 可行性研究和初设阶段岩爆风险评估	550
4.5 设计施工阶段岩爆风险的动态评估与预警	553
5 岩爆风险规避措施优化设计	563
5.1 高岩爆风险条件下地下工程选线原则	563
5.2 工程间距的优化	563
5.3 地下工程开挖前的岩爆风险规避措施优化设计	564
5.4 地下工程开挖过程中岩爆孕育过程的动态调控优化设计	568
6 岩爆实例数据库	572
参考文献	576
彩图	

1 绪 论

1.1 研究意义

岩爆是深部工程开挖或开采过程中常见的一种地质灾害,直接威胁施工人员和设备的安全,影响工程进度,甚至摧毁整个工程和诱发地震,造成地表建筑物损坏。随着埋深的增加或应力水平的增高,我国地下工程的岩爆呈频发趋势。

自 1738 年英国锡矿岩爆被首次报道以来,世界范围内已有联邦德国、南非、中国、前苏联、波兰、捷克斯洛伐克、匈牙利、保加利亚、奥地利、意大利、瑞典、挪威、新西兰、美国、法国、加拿大、日本、印度、比利时、安哥拉、瑞士等众多国家和地区记录有岩爆问题。最初,岩爆主要见于深埋的采矿巷道或竖井内,如埋深在几千米以下的南非金矿和印度的 Kolar 金矿等。后来,在埋深较浅的交通隧道、排污管道、引水隧洞甚至是输油管道等的施工中也频繁出现岩爆,如挪威 Heggura 公路隧道、挪威某排污管道、瑞典 Vietas 水电站引水隧洞等。

南非的金矿开采深度达 2000~4500m,是目前世界上开采深度最大的地下工程,而岩爆风险随着深度的增加也越来越高,其危害性很大。据有关资料显示,1987~1995 年,因岩爆和岩崩引起的受伤率和死亡率分别占南非采矿工业的 1/4 和 1/2 以上;印度的 Kolar 金矿发生岩爆,在距岩爆震中 2~3km 处的地面建筑物被毁,有的岩爆事件所释放的能量达到里氏 4.5~5.0 级。据 1993 年不完全统计,单从煤炭部门来说,我国已有 65 个矿井发生过冲击地压(岩爆),其中 35 个矿井累积发生过 2000 余次具有破坏性的诱发地震,造成数以百计的人员伤亡(郭然等, 2003)。

我国金属矿山,如红透山铜矿、冬瓜山铜矿、玲珑金矿、杨家杖子稀有金属矿区、青城子金属矿区、大厂锡矿区等均纷纷出现岩爆灾害。例如,抚顺红透山铜矿采深超过 1250m,1995~2004 年,累计发生岩爆 49 次,其中发生两次规模较大的岩爆,第一次发生在 1999 年 5 月 18 日早晨 7:00 左右交接班时,第二次发生在 1999 年 6 月 20 日。这两次岩爆地点均在一 467m 9 号采场附近,岩爆后采场斜坡道和二、三平巷的几十米长洞段遭到了破坏,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 +253 主平硐口听到巨大响声。根据经验判断其响声相当于 500~600kg 炸药爆破的声音。我国年产量超过 1.5 万 t 的冬瓜山铜矿采深超过 1000m,自 1996 年 12 月 5 日第一次发生岩爆以来,已经记录到岩爆

现象超过 10 余次,岩爆多次影响到开采进度。河南省灵宝崆鑫金矿自埋深超过 360m 后,井壁出现不同程度的岩爆,随着深度的增加,岩爆烈度不断增大,该矿 2004 年 11 月 15 日至 2005 年 1 月 16 日,采深在 1200m 左右的 2# 竖井连续发生 6 起岩爆事件。

我国深埋隧洞,如成昆铁路关村坝隧道、二滩水电站、天生桥、渔子溪和锦屏二级水电站引水隧洞等都发生了不同等级的岩爆事件。表 1.1 总结了我国已建的部分深部隧洞(道)工程岩爆灾害情况,分析了不同等级岩爆的比例关系。据有关资料记载,1966 年竣工的成昆铁路关村坝隧道全长 6187m,最大埋深 1650m,昆明段开挖时曾发生岩爆,岩爆具有明显弹射现象,射距 2~3m。1993 年开挖完工的二滩水电站左岸导流洞,最大埋深 200m,8.1% 的洞段发生轻微岩爆。同年竣工的太平驿引水隧洞全长 10.5km,发生岩爆 400 余次,4 次砸断台车钻臂,2 次砸坏卡车,重伤 3 人,轻伤 4 人,累计停工 32 天。1996 年贯通的南盘江天生桥二级水电站三条引水洞平均埋深 400~500m,最大埋深 800m,平均长度 9.5km,在石灰岩、白云岩洞段发生烈度不同规模不一的岩爆 30 次,其中掘进机开挖洞段 24 次,而钻爆法洞段仅有 6 次,轻微岩爆占 70%,中等岩爆占 29.5%,强烈岩爆占 0.5%。1998 年 3 月竣工的秦岭铁路隧道在开挖的过程中,最大埋深 1600m,有 43 段(累计长度约 1894m)发生了岩爆,其中轻微岩爆 28 段(总长为 1124m),占岩爆段总长度的 59.3%;中等岩爆 11 段(总长为 650m),占岩爆段总长度的 34.3%;强烈以上岩爆 4 段(总长为 120m),占岩爆段总长度的 6.4%。2001 年竣工的川藏公路二郎山隧道全长 4176m,最大埋深 760m,施工中先后共发生 200 多次岩爆,连续发生岩爆的洞段共有 8 段,每段长 60~355m 不等,岩爆洞段长度占总长度的 1/3,多为轻微岩爆,少量中等岩爆。2002 年竣工的重庆通渝隧道最大埋深 1015m,岩爆总长度 655m,其中轻微岩爆占 91%,中等岩爆占 7.8%,而强烈以上岩爆占 1.2%。2004 年贯通的重庆陆家岭隧道,全长 6.4km,最大埋深 600m,有近 93m 洞段发生不同等级岩爆,其中,轻微岩爆占 55.8%,中等岩爆占 39.7%,强烈以上岩爆占 4.5%。2007 年建成通车的秦岭终南山特长公路隧道在施工区段内有 2664m 产生不同程度的岩爆,其中轻微岩爆 6 段,占总岩爆长度的 61.7%;中等岩爆 7 段,占总岩爆长度的 25.6%;强烈岩爆 7 段,占总岩爆长度的 12.7%。据不完全统计,截至 2012 年 2 月锦屏二级水电站引水隧洞发生岩爆 750 多次,其中轻微岩爆占 44.9%,中等岩爆占 46.3%,强烈~极强岩爆占 8.8%,其中 2009 年 11 月 28 日排水洞的一次极强岩爆导致一台 TBM 机械报废,造成严重经济损失。江边水电站引水隧洞工程共发生岩爆 300 余次,其中轻微岩爆占 46.4%,中等岩爆占 50.4%,强烈岩爆占 3.2%。

表 1.1 我国发生岩爆的隧洞(道)工程不完全统计

工程名称	竣工年份	最大埋深/m	岩爆等级及比例/%			岩爆次数/次	岩爆段长度/m	备 注
			轻微	中等	强烈及极强			
成昆铁路关村坝隧道	1966	1650	为主	少量	无	—	—	零星岩爆
二滩水电站左岸导流洞	1993	200	为主	少量	无	—	315	工程区位于深切河谷卸荷集中区域,最大主应力为 26MPa,方位角 N34°E,倾角 23°,因而以水平应力为主
岷江太平驿水电站引水隧洞	1993	600	为主	少量	少量	>400	—	
天生桥二级水电站引水隧洞	1996	800	70	29.5	0.5	30	—	比例依据岩爆次数统计
秦岭铁路隧道	1998	1615	59.3	34.3	6.4	—	1894	比例依据岩爆段长度统计
川藏公路二郎山隧道	2001	760	为主	少量	无	>200	1252	
重庆通渝隧道	2002	1050	91	7.8	1.2	—	655	比例依据岩爆段长度统计
重庆陆家岭隧道	2004	600	55.8	39.7	4.5	93	—	比例依据岩爆次数统计
瀑布沟水电站进厂交通洞	2005	420	—	—	—	183	—	工程区位于深切河谷卸荷高应力集中区内,地应力方向沿着河谷边坡向与隧洞呈大角度相交
秦岭终南山特长公路隧道	2007	1600	61.7	25.6	12.7	—	2664	比例依据岩爆段长度统计
锦屏二级水电站引水隧洞、辅助洞和排水洞	2011	2525	44.9	46.3	8.8	>750	—	比例依据岩爆次数统计出现数次极强岩爆
江边电站引水隧洞	2012	1678	46.4	50.4	3.2	>300	—	比例依据岩爆次数统计

因此,开展岩爆的孕育演化机制与动态调控理论研究,有效遏制高强度岩爆灾害的发生,避免因岩爆灾害造成的人员伤亡、设备损失、工期延误和矿石不能正常回采,已成为我国水利水电、交通、国防、深部基础物理实验等工程安全建设与金属矿山安全高效开采亟待解决的重大课题。

1.2 锦屏二级水电站深埋引水隧洞和排水洞

1.2.1 工程总体布置^①

锦屏二级水电站位于中国四川省境内,上距锦屏一级坝址 7.5km,电站装机容量为 4800MW,单机容量 600MW,多年平均发电量 242.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,保证出力 1972MW,年利用小时 5048h。该电站利用雅砻江锦屏 150km 长大河湾的 310m 天然落差,截弯取直,引水发电,额定水头 288m,为雅砻江上水头最高、装机规模最大的水电站,属于雅砻江流域梯级开发电站中的重点电站。工程枢纽主要由首部低闸、引水系统、尾部地下厂房三大部分组成,为一低闸、长隧洞、大容量引水式电站。

取水口集中布置在闸址上游的景峰桥右岸,地下发电厂房位于雅砻江锦屏大河湾东端的大水沟。引水洞线自景峰桥至大水沟,采用“4 洞 8 机”布置,引水隧洞共四条,洞线平均长度约 16.67km,开挖洞径 13m,衬砌后洞径 11.8m,上覆岩体一般埋深 1500~2000m,最大埋深约为 2525m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点,为超深埋长隧洞特大型地下水电工程。隧洞洞群位置如图 1.1 所示。

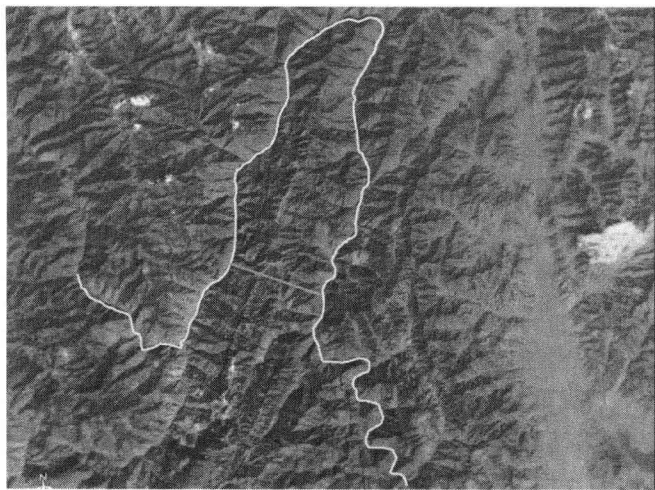


图 1.1 锦屏二级水电站整体布置图(中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院,2005)

辅助洞 A 和 B、排水洞与引水隧洞的整体布置方案如图 1.2 所示,其中,1# 和 3# 引水隧洞 TBM 开挖洞段为圆形断面,开挖直径 12.4m,1# 和 3# 引水隧洞钻

^① 1.2.1 节主要摘自中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院,2005。

爆法开挖洞段以及 2# 和 4# 引水隧洞为四心马蹄形断面,开挖直径 13m,四条引水隧洞之间的中心线间距为 60m。沿线除了四条引水隧洞外,还开挖了两条辅助洞 A 和 B 用于交通和勘探,辅助洞和引水隧洞之间为一条施工排水洞,用于排出四条引水隧洞开挖过程中揭露出的突涌水。辅助洞与施工排水洞中心线间距 35m,施工排水洞与 4# 引水隧洞的中心线间距 45m。

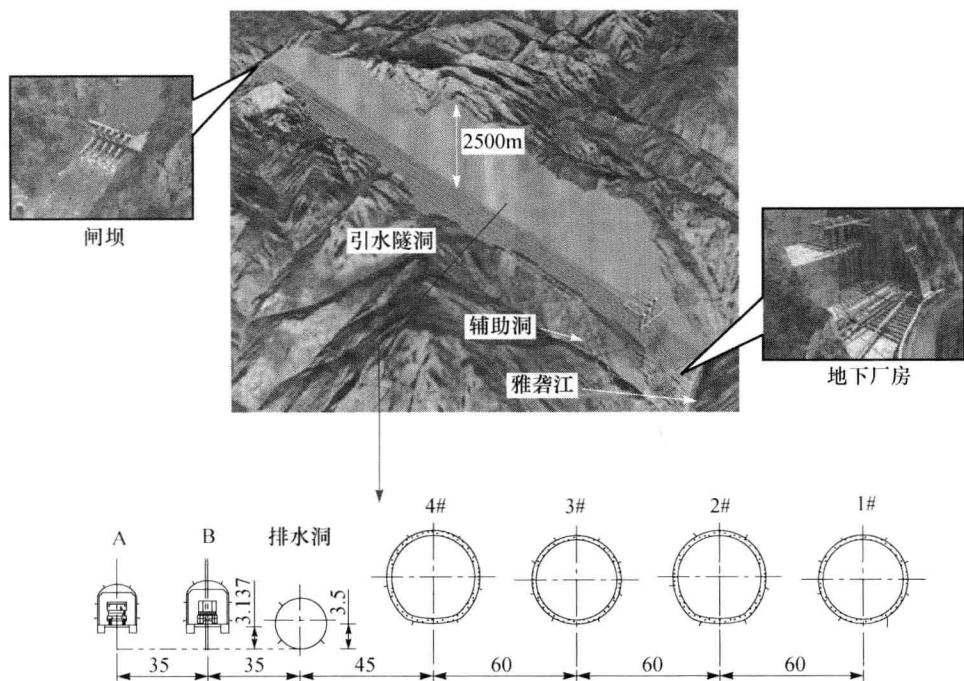


图 1.2 锦屏二级水电站深埋隧洞布置图(单位:m)
(中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院,2005)

1.2.2 地质条件^①

1. 地形地貌

除东、西雅砻江两岸及局部沟谷外,整个隧洞沿线地形起伏,高程均在 3000m 以上,最高山峰达 4113m,由白山组大理岩组成地形主分水岭。进水口侧岸坡坡度为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,局部陡峻,达 75° 以上;出水口侧岸坡坡度 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,局部达 60° 以上,如图 1.3 所示。

^① 1.2.2 节主要摘自中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院,2005。