

# 深埋长隧洞 岩爆机理研究及防治实践

高玉生 张宏 赵国斌 程向民 陈书文 著

SHENMAI  
CHANGSUIDONG  
YANBAO JILI YANJIU  
JI FANGZHI SHIJIAN



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 深埋长隧洞 岩爆机理研究及防治实践

高玉生 张宏 赵国斌 程向民 陈书文 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书分析了齐热哈塔尔水电站深埋长引水隧洞的基本工程地质条件,总结了岩爆特征及其特殊性,研究了岩爆的破坏模式和形成机理,提出了“岩爆爆裂体”的概念,总结了岩爆发生的主控因素,提出了岩爆综合预测法。在研究岩爆洞段围岩稳定性的基础上提出了岩爆洞段的围岩分类方法,总结了岩爆洞段的防护措施及其失效原因。书中翔实的岩爆编录资料、科学的机理研究对岩爆的研究与防治具有非常重要的指导意义。

本书可供岩土工程及相关专业从业者参考,也可作为相关专业学生的学习用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

深埋长隧洞岩爆机理研究及防治实践 / 高玉生等著

— 北京:中国水利水电出版社,2014.2

ISBN 978-7-5170-1504-8

I. ①深… II. ①高… III. ①引水隧洞—岩爆—研究  
IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第302974号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 深埋长隧洞岩爆机理研究及防治实践                                                                                                              |
| 作 者  | 高玉生 张宏 赵国斌 程向民 陈书文 著                                                                                                          |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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                                                                                                               |
| 印 刷  | 三河市鑫金马印装有限公司                                                                                                                  |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 16印张 380千字                                                                                                   |
| 版 次  | 2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷                                                                                                       |
| 印 数  | 0001—1000册                                                                                                                    |
| 定 价  | 88.00元                                                                                                                        |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

长久以来,在处于高地应力条件下硬脆性岩体中开挖地下工程,岩爆问题一直是困扰工程地质界的主要工程地质和岩石力学问题。随着我国工程建设重点向西部转移,各类地下工程中岩爆问题更为突出,新疆齐热哈塔尔水电站引水隧洞的岩爆问题就是水利水电工程深埋长隧洞岩爆问题的突出代表之一。

齐热哈塔尔水电站引水隧洞位于喀喇昆仑山区,属于帕米尔构造结部位,构造上处于新构造活跃板块,存在较高的水平地应力和高地热问题,地质条件极其复杂。引水隧洞穿越地层以加里东中晚期侵入岩( $\gamma_3^{2-3}$ )为主,岩性以似斑状片麻状花岗岩或花岗片麻岩为主,岩石强度高、脆性特征明显;岩体宏观成整体块状结构,因变质作用而发育大量片麻理;岩石以鳞片柱粒状变晶结构为主,见有变余半自形粒状结构和变余花岗结构。这种特定的地质环境和岩性条件,决定了该引水隧洞中岩爆现象的特殊性。

岩爆问题的研究,一般包括现场实录、机理分析、预测预报以及预防治理四个方面的内容。该书作者遵循同样的思路,系统地描述了齐热哈塔尔水电站引水隧洞的岩爆现象,从其强度特征、空间特征和时间特征三个方面归纳了该工程岩爆的特点;分析了埋深、地应力、断裂构造、岩体和岩性特征、地形特征、地下水条件、应力重分布特征以及断面形状等因素对该工程岩爆形成的影响,进而对该工程岩爆的成因进行了分析,并以对工程施工的影响以及持续时间为主要因素,对岩爆进行了分级。这些丰富的实际观察成果及相关因素的联系分析,对其他类似工程建设中的岩爆研究具有较高的参考价值。

作者对该工程岩爆研究的一个显著特色是,通过多手段、多方法联合运用对岩爆形成条件、影响因素和破坏机理进行深入分析,这些方法和成果包括:现场测试地应力成果及反演分析所取得的地应力场资料;通过岩石力学性质试验取得的不同加载方向和片麻理倾角组合得到的岩样破坏特征、破坏岩样的断口电镜扫描(SEM)得到的室内压缩岩样的破坏特征,总结出该工程岩爆岩体破坏模式为由剪切滑动引起的脆性断裂为主;以应力—应变曲线为基础,分析得出的应力脆性跌落系数(RI)和能量冲击性指标( $A_{cf}$ );利

用赤平投影法，分析了地应力场、临空面以及岩体内微观结构面三者组合关系与典型洞段岩爆的破坏特征等，通过上述试验、观察、研究，与现场实际岩爆破坏现象分析对比，并依循谷德振先生“岩体结构控制论”的理论，提出了岩爆爆裂体的概念，认为“岩爆爆裂体”为形成于隧洞开挖之后、岩爆发生之前的处于临界破坏状态的岩爆结构体；结合能量转移的观点，解释了岩爆的形成机理，岩爆爆裂体的观点认为：岩爆的破坏规模和发生时是否存在弹射现象，取决于爆裂结构体形成过程中能量耗散的多少和爆裂结构块体的大小。

在岩爆的预测与预报方面，作者对 Russense 判据、Barton 判据以及 Hoek 判据进行了适当的修正，使之更适合于该工程，也对其他工程的应用起到较好的借鉴意义。书中提出了岩爆综合预测方法，以岩体强度与最大初始地应力的比值为基础，考虑地应力条件、地下水特征、开挖方法、构造发育情况、埋深情况以及断面形状六个因素的影响，对强度应力比加以修正，从而能够较好地预测岩爆的发生情况和烈度等级。通过数值模拟计算的方法，对岩爆发生位置的预报也是一种可喜的尝试。

该书还系统介绍了齐热哈塔尔水电站引水隧洞施工过程中对岩爆防治措施的应用，并对其失效原因进行了分析。这对于类似工程具有很好的参考价值。

岩爆问题的研究经历了几个世纪，取得了丰硕的成果，但因产生岩爆的影响因素众多且复杂多变，各种因素所起的作用也因地而异，岩爆发生过程又极其复杂，导致岩爆研究成果在具体工程应用时仍有很多亟待解决的问题。该书从工程实例出发所作的研究，积累了丰富的资料，得出了一些重要的认识和结论。该书虽然还存在若干有待补充和完善之处，但仍不失为一部很有价值的学术研究和科技成果著作。

中国工程勘察大师



## 序 二

岩爆问题是工程地质与岩石力学界一直致力解决的工程地质问题之一，其危害极大，严重时常常造成机毁人亡的灾难性后果。随着地下工程建设的深度越来越大，岩爆问题也越来越突出。岩爆以其突发性、滞后性等特点，使得岩爆的预测与防治成为地下工程设计与施工中的技术难题。

新疆齐热哈塔尔水电站引水隧洞最大埋深 1720m，长 15.639km，为超埋深、超长距离的有压引水隧洞。工程地处构造活跃区，水平构造应力大；隧洞沿线地层岩性以加里东中晚期侵入岩体 ( $\gamma_3^{2-3}$ ) 片麻状花岗岩为主，岩石坚硬，岩体完整；多数洞段干燥无水等地质条件有利于岩爆的发生。该书总结了现有典型地下工程的岩爆工程实例，系统地描述了齐热哈塔尔水电站引水隧洞施工过程中发生的岩爆现象，为地下工程岩爆问题研究提供了翔实的研究素材。

采用室内试验、数值模拟和现场实测的手段，研究了该工程岩爆的破坏模式和形成机理，认为岩体的片麻理构造特征和鳞片柱状变晶结构是岩爆发生的主控因素；提出的岩爆爆裂体的概念具有显著的代表性和先进性，认为在隧洞开挖后、岩爆发生之前要形成岩爆爆裂体，其结构形式受控于地应力产状、临空面产状以及岩体内的微观结构特征三者的共同作用；岩爆爆裂体的形成、破坏过程决定了岩爆发生时岩体内的能量释放特征和表现形式；基于能量理论推导的考虑侧压系数和岩体强度的岩爆临界埋深计算公式在该工程中得到验证，而基于工程实例总结，并经过该工程实践的岩爆综合预测方法也具有明显的实用性。

总之，该书是在新疆齐热哈塔尔水电站引水隧洞施工过程中岩爆专题研究的基础上完成的，为岩石力学和工程地质领域岩爆问题的深入研究提供了素材，也对地下工程的设计提供了可参考的实际资料。

中国勘察设计大师

王宏斌

## 前言

齐热哈塔尔水电站位于我国新疆西南喀什地区塔什库尔干县，为塔什库尔干河流域开发的第二级电站。电站由拦河坝、引水隧洞和发电系统三部分组成。引水隧洞全长 15.639km，最大埋深 1720m，超过 1000m 埋深洞段长度超过 3km，是迄今为止在喀喇昆仑山区建设的难度最大的地下开挖工程。引水隧洞工程勘察设计工作起始于 2006 年，2010 年正式开工建设。

岩爆现象是齐热哈塔尔水电站引水隧洞工程的关键工程地质问题之一。前期勘察期间勘察人员就开始了岩爆的专题研究工作。开工建设以来，地质人员对岩爆的现象、发生时间和特征进行了大量的调查与实测工作；并委托中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院工程地质力学重点实验室、中国地质科学院地质力学所等国内工程地质领域权威研究机构开展了现场测量、室内试验和数值模拟等工作。经过 3 年的现场观察、测量和研究，对齐热哈塔尔水电站引水隧洞的岩爆现象进行了系统的总结、研究和分析，取得了丰硕的成果。在研究岩爆破坏模式和形成机理的基础上，提出了岩爆爆裂体的概念、考虑侧压系数和岩体强度的岩爆临界埋深判据、基于强度应力比并加以影响因素修正的岩爆综合预测方法，在本工程中得到了验证，证明其具有实用性。

本书系统地描述了齐热哈塔尔水电站引水隧洞的岩爆实例，分析总结了本工程岩爆的形成机理，对于类似工程岩爆问题的研究、防治有较高的参考价值。

本书第 1 章在文献研究基础上总结了部分地下工程的岩爆实例及其特征，总结了这些地下工程与岩爆相关的地质特征，分析了影响因素和岩爆机理等方面的研究成果；第 2 章介绍了齐热哈塔尔水电站引水隧洞的工程地质条件，通过地应力测试、宏微观构造的分析方法研究了区域内的地应力场特征，通过室内试验和数值分析研究了岩体的力学特征，并在此基础上对岩体的围岩特征进行了分析总结；第 3 章介绍了齐热哈塔尔水电站引水隧洞施工过程中的岩爆现象，对岩爆的特征进行了总结分析；第 4 章研究了本工程岩爆的形成机理和能量机理，提出了岩爆爆裂体的概念，认为岩爆爆裂体的形成受地应力状态、片麻理特征和开挖临空面产状的控制，从而形成板裂结构和切割结构

两种结构形式的岩爆爆裂体，岩爆爆裂体进一步破坏形成岩爆，研究结论还认为本工程岩爆的力学机理是压剪作用下的脆性断裂；第5章对本工程岩爆进行了分类和预测；第6章对岩爆洞段的围岩长期稳定性进行了评价，并对岩爆洞段的围岩分类和岩爆的防治措施进行了分析和描述。

在本专题研究过程中，得到了中国工程院院士王思敬先生等专家的指导。年逾古稀的王思敬院士在百忙之中对本课题的主要研究内容进行了悉心指导；中国工程勘察大师陈德基先生、中国勘察设计大师王宏斌先生和吉林省勘察大师王行本先生，对齐热哈塔尔水电站引水隧洞的岩爆问题十分关心，在该专题研究过程中曾多次提出指导意见。在本书付梓之际对各位尊敬的老先生表示衷心的感谢，并致以崇高的敬意！

水利部原总工程师何文垣先生、综合事业局总工程师郭潇先生、新华叶尔羌河流域管理局程聚辰副总经理、李彦坡副总经理等专家和领导，中水北方勘测设计有限责任公司的各位领导和相关勘察设计人员，以及工程的各参建方在专题研究中也提供了很多帮助和指导，在此一并表示感谢！

本课题研究过程中受到国家自然科学基金（编号：41272351、50979015），国家重点基础研究发展计划（973计划，编号：2009CB724605、2010CB731501）、中国科学院工程地质力学重点实验室2011年开放基金项目（编号：KLEG201109）的资助。

岩爆问题是国内外工程地质和岩石力学界致力解决的工程地质问题，仅希望本书中的研究成果能起到抛砖引玉的效果。

作者水平所限，书中不当之处在所难免，敬请同仁们不吝赐教！

**编 者**

2013年11月26日



## 主要符号术语

- $\sigma_c$ ——岩石饱和单轴压缩强度, MPa;  
 $\sigma_t$ ——岩石抗拉强度, MPa;  
 $E_0$ ——岩石的弹性模量, GPa;  
 $\sigma_{cm}$ ——岩体抗压强度, MPa;  
 $\sigma_{tm}$ ——岩体抗拉强度, MPa;  
 $E_{0m}$ ——岩体的弹性模量, GPa;  
 $\sigma_1$ ——最大地应力, MPa;  
 $\sigma_2$ ——中间地应力, MPa;  
 $\sigma_3$ ——最小地应力, MPa;  
 $\sigma_H$ ——最大水平地应力, MPa;  
 $\sigma_h$ ——最小水平地应力, MPa;  
 $\sigma_v$ ——垂直应力, MPa;  
 $\sigma_\theta$ ——洞壁切向应力, MPa;  
 $\tau_{r\theta}$ ——洞壁剪切应力, MPa;  
 $\sigma_l$ ——洞壁轴向应力, MPa;  
 $\sigma_r$ ——洞壁径向应力, MPa;  
 $\lambda$ ——侧压系数,  $\lambda = \sigma_H / \sigma_v$ ;  
 $\sigma_{cc}$ ——初始裂纹闭合应力, MPa;  
 $\sigma_{ci}$ ——新生裂纹起始应力, MPa;  
 $\sigma_{cd}$ ——新生裂纹破坏应力或屈服强度, MPa;  
 $\sigma_{rd}$ ——残余强度, MPa;  
 $RI$ ——应力脆性跌落系数;  
 $A_{CF}$ ——能量冲击性指标;  
 $H$ ——上覆岩体厚度, m;  
 $K_v$ ——岩体完整性指数;  
 $V_p$ ——声波速度, m/s;  
 $V_{pm}$ ——岩体的声波速度, m/s;  
 $V_{pr}$ ——岩块的声波速度, m/s;  
 $J_v$ ——单位体积节理数, 条/m<sup>3</sup>;  
 $T$ ——综合预测法应力强度比;  
 $T'$ ——综合预测法修正后应力强度比;  
 $GSI$ ——地质力学指标;  
 $m_i$ ——Hoek-Brown 破坏准则 (2002) 材料常数;  
 $m_b$ ——Hoek-Brown 破坏准则 (2002) 材料常数;

$s$ ——Hoek-Brown 破坏准则 (2002) 材料常数;  
 $a$ ——Hoek-Brown 破坏准则 (2002) 材料常数;  
 $D$ ——Hoek-Brown 破坏准则 (2002) 扰动因子;  
 $U^d$ ——岩体内耗散能,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;  
 $U^e$ ——岩体内可释放应变能,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;  
 $U^0$ ——岩体单元表面能,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;  
 $d$ ——岩样的直径,  $\text{cm}$ ;  
 $l$ ——岩样的长度,  $\text{cm}$ ;  
 $K$ ——单位体积岩样破坏所消耗的能量,  $\text{MJ}/\text{m}^3$ ;  
 $W$ ——岩样破坏所耗散的能量,  $\text{J}/\text{m}^3$ ;  
 $\epsilon$ ——轴向应变;  
 $\epsilon_p$ ——塑性应变;  
 $\epsilon_e$ ——弹性应变;  
 $\sigma$ ——轴向应力,  $\text{MPa}$ ;  
 $u_p$ ——塑性变形量,  $\text{m}$ ;  
 $\Gamma$ ——裂纹表面能,  $\text{J}$ ;  
 $G$ ——能量释放率,  $\text{J}$ ;  
 $G_c$ ——临界能量释放率,  $\text{J}$ ;  
 $R$ ——裂纹扩展单位面积时所需要的能量,  $\text{J}$ ;  
 $\Delta S_c$ ——裂纹扩展面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $\Delta \Gamma$ ——裂纹扩展所需能量,  $\text{J}$ ;  
 $\Gamma_p$ ——材料的非弹性效应 (如塑性变形等) 消耗能,  $\text{J}$ ;  
 $\Pi$ ——整个系统的能量 (即势能),  $\text{J}$ ;  
 $-\Delta_{\Pi}$ ——下降系统势能,  $\text{J}$ ;  
 $B$ ——板的厚度,  $\text{m}$ ;  
 $a$ ——裂纹长,  $\text{m}$ ;  
 $X_i$ ——面力,  $\text{kN}$ ;  
 $u_i^*$ ——体内各点的位移场;  
 $G_{\text{I}}$ ——I 型裂纹的能量释放率,  $\text{J}$ ;  
 $G_{\text{II}}$ ——II 型裂纹的能量释放率,  $\text{J}$ ;  
 $G_{\text{III}}$ ——III 型裂纹的能量释放率,  $\text{J}$ ;  
 $K_{\text{I}}$ ——I 型裂纹的应力强度因子;  
 $K_{\text{II}}$ ——II 型裂纹的应力强度因子;  
 $K_{\text{III}}$ ——III 型裂纹的应力强度因子;  
 $K_{\text{Ic}}$ ——I 型裂纹的断裂韧性 ( $i = \text{I}、\text{II}、\text{III}$ );  
 $K_{\text{IIc}}$ ——II 型裂纹的断裂韧性 ( $i = \text{I}、\text{II}、\text{III}$ );  
 $K_{\text{IIIc}}$ ——III 型裂纹的断裂韧性 ( $i = \text{I}、\text{II}、\text{III}$ );  
 $E'$ ——等效弹性模量,  $\text{MPa}$ ;

$\mu$ ——岩石泊松比；  
 $U^*$ ——含裂纹板中所储存的弹性应变能，J；  
 $U_0$ ——不含裂纹的板中的应变能，J；  
 $U_c$ ——裂纹应变能，J；  
 $\sigma_0$ ——裂纹表面压应力，MPa；  
 $\tau_0$ ——裂纹表面剪应力，MPa；  
 $\sigma_i$ ——破坏方向应力，MPa；  
 $G_i$ ——破坏方向的能量释放率，J；  
 $W_0$ ——岩体中积聚的弹性应变能，J；  
 $W_{n1}$ ——破坏岩体克服片麻理间的表面能，J；  
 $W_{n2}$ ——破裂面破坏时耗掉的能量，J；  
 $W_r$ ——破坏过程的声能和热能，J。



序一

序二

前言

主要符号术语

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第1章 深埋长隧洞岩爆工程实例及岩爆机理研究现状</b> | 1   |
| 1.1 深埋长隧洞与岩爆的定义                 | 1   |
| 1.2 深埋长隧洞建设历史与规模                | 2   |
| 1.3 岩爆工程实例                      | 2   |
| 1.4 岩爆工程实例总结                    | 26  |
| 1.5 岩爆机理研究综述                    | 40  |
| 参考文献                            | 48  |
| <b>第2章 齐热哈塔尔水电站引水隧洞工程地质条件</b>   | 51  |
| 2.1 工程概况                        | 51  |
| 2.2 基本工程地质条件                    | 51  |
| 2.3 地应力场测试与研究                   | 60  |
| 2.4 岩石力学性质                      | 76  |
| 2.5 地下水条件                       | 85  |
| 2.6 围岩类别                        | 85  |
| 参考文献                            | 85  |
| <b>第3章 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆现象与特征</b>  | 87  |
| 3.1 勘察期岩爆分析与预测                  | 87  |
| 3.2 施工支洞岩爆现象                    | 89  |
| 3.3 引水隧洞岩爆发生情况                  | 109 |
| 参考文献                            | 141 |
| <b>第4章 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆机理研究</b>   | 142 |
| 4.1 岩爆形成机理研究                    | 142 |
| 4.2 岩爆能量机理分析                    | 177 |
| 参考文献                            | 185 |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| <b>第 5 章 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆类型与预测 .....</b>       | <b>188</b> |
| 5.1 岩爆的类型 .....                              | 188        |
| 5.2 岩爆判据研究及烈度等级预测 .....                      | 193        |
| 5.3 岩爆发生位置预测 .....                           | 216        |
| 参考文献 .....                                   | 217        |
| <b>第 6 章 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆洞段围岩分类与岩爆防治 .....</b> | <b>219</b> |
| 6.1 岩爆洞段围岩长期稳定性与围岩分类 .....                   | 219        |
| 6.2 岩爆洞段施工防护与支护实例 .....                      | 227        |
| 6.3 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆区施工与防护技术 .....             | 236        |
| 参考文献 .....                                   | 242        |

# 第 1 章 深埋长隧洞岩爆工程实例及 岩爆机理研究现状

## 1.1 深埋长隧洞与岩爆的定义

就深埋长隧洞而言,国际隧道协会把长度为 3~5km 的隧道定为长隧道<sup>[1]</sup>;我国水利水电系统将埋深大于 600m 的隧洞定义为深埋隧洞,钻爆法施工长度大于 3km、TBM 法施工长度大于 10km 的隧洞定义为长隧洞<sup>[2]</sup>。

岩爆,也被称为冲击地压,采矿系统称之为矿山冲击。这一问题是在高地应力区、硬脆性岩体中进行地下工程开挖时常发生的一种工程地质现象,具有突发性、滞后性、破坏性大等特点。张镜剑在《水电建设中的一些岩石力学问题》一文中提到:“在坚硬完整岩体内,地壳构造运动可能使岩体中的应变能产生大量的聚集,形成很高的初始应力,开挖过程中可能出现岩爆现象。岩体初始应力超过岩体弹性限度,聚集在岩体中的应变能突然释放,伴有巨大响声,多有岩片飞出,成透镜状……岩爆机制十分复杂,是一个有待深入研究的课题”。邓绶林等则将岩爆解释为:“岩石中蕴藏的应力能量在掘进巷道后,被突然猛烈地释放出来所造成的一种物理地质现象。岩爆一般都伴随有响声并有大量岩块被弹出而造成各种危害。有的岩爆仅在几十米内才能听到,有的在千米以外的地面上就可听到隆隆响……”。

谭以安在对天生桥水电站引水隧洞施工过程中的岩爆进行系统研究后从理论上描述了岩爆发生所应具备的条件、诱发因素、发生过程等内容<sup>[3]</sup>,认为:岩爆是具有大量弹性应变能储备的硬脆性岩体,在开挖过程中引起地应力分异、围岩应力跃升及能量进一步集中,在围岩应力作用下产生的张一剪脆性破坏,并伴随声响和震动,而消耗部分弹性应变能的同时,剩余能量转化为动能,使围岩由静态平衡向动态失稳发展,造成岩片(块)脱离母体,获得有效弹射能量,猛烈向临空方向抛(弹、散)射为特征,是经历“劈裂成板一剪切成块一块片弹射”渐进过程的动力破坏现象。

赵国斌通过对齐热哈塔尔水电站引水隧洞片麻状花岗岩洞段的岩爆破坏模式、形成机理等方面进行了研究后提出了如下岩爆定义:

在完整坚硬的脆性岩体中开挖地下工程,围岩岩体从三向受压状态转变为切向受压、径向受拉的状态;开挖瞬间使得洞壁切向应力突然增加达到并超过岩体强度时,围岩岩体处于超应力状态,其所能承受的应变不足以释放由于应力增加而积聚的弹性能,从而发生破坏;破坏时伴随有声响,破裂后的岩块以板状、片状或块状的形式剥落或弹射的方式脱离母岩,形成岩爆。



## 1.2 深埋长隧洞建设历史与规模

世界上最早的深埋特长铁路隧道工程是1871年法国与意大利边境长13.657km的仙尼斯峰(Mt. Cenis)铁路隧道。截止到20世纪末,全世界已建成长度超过10km的长隧道上百座,其中瑞士新圣哥达铁路隧道长达57km,最大埋深达2400m,该隧道于2010年贯通。我国在1890~1989年止的近100年期间,共修建铁路隧道4847座,其中长度5km以上的长隧道14座,10km以上的隧道1座。20世纪60年代修建的成昆铁路沙木拉达隧道长6.38km,最大埋深800m;80年代修建的京广复线大瑶山隧道长14.295km,最大埋深910m。1990~2012年22年间建成或在建的特长铁路隧道上百座,西(安)康铁路秦岭隧道长18.448km,最大埋深1600m;兰新铁路乌稍岭隧道长20.05km,最大埋深1100m;石太客运专线太行山隧道长27.84km,最大埋深445m;兰渝铁路西秦岭隧道长28.236km,最大埋深1400m;西(宁)格(尔木)铁路二线新关角隧道全长32.645km,是我国目前最长的铁路隧道。

根据中国公路学会隧道工程分会编制的《公路隧道学科发展研究报告(2011)》,截至2010年底,全国公路隧道为7384处、512.26万m,其中,特长隧道265处、113.80万m,长隧道1218处、202.08万m。其中,2007年建成通车的秦岭终南山公路隧道全长18.02km,位居世界规模第一、长度第二,是我国公路隧道建设的标志性工程。此外,在建的隧道有:位于甘肃省宝天高速公路上的大坪里隧道(全长12.29km)、位于陕西省西康高速公路上的包家山隧道(全长11.5km)、位于四川省雅西高速公路上的泥巴山隧道(全长10km)、位于湖北省沪蓉西高速公路上的龙潭隧道(全长8.7km)、位于陕西省安康至陕川界高速公路上的米溪梁隧道(全长7.92km)等。

随着我国西南、西北地区水利建设的发展,深埋长距离引水隧洞工程的修建将越来越多,其中南盘江天生桥二级水电站的3条引水隧洞,单洞长9.55km,最大埋深760m;已投产发电的雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞,长16~18km,最大埋深2500m;四川宝兴水电站引水隧洞,长18km,最大埋深700m;规划中的南水北调西线工程也有多条长50~130km的深埋引水隧洞<sup>[4]</sup>;进入初步设计阶段的西部某引水隧洞,长41.2km,最大埋深2250m;正在建设中的新疆齐热哈塔尔水电站,引水隧洞长15.639km,最大埋深1720m。由此看来,长距离引水工程的建设已经进入一个全新的时期,众多超埋深、超长距离的引水隧洞将会建成并投入使用。同时,建设过程中出现的高地应力、高地温等特殊且关键的工程地质问题也对勘察设计者们提出了极大的挑战。

本书通过收集资料和工程调研,对部分已建隧道(洞)工程岩爆发生实例、岩爆特征和成因进行了总结和分析。这些实例的总结对于岩爆问题的认识和研究都具有非常重要的意义。

## 1.3 岩爆工程实例

### 1.3.1 太平驿水电站引水隧洞<sup>[5]</sup>

#### 1.3.1.1 工程概况及地质情况

太平驿引水式电站位于四川省汶川县境内,引水隧洞沿岷江左岸布置,全长



10.5km, 成型洞径 9m。隧洞沿线山体雄厚, 地势陡峻, 河谷深切, 洞室埋深 200~600m。施工区地处龙门山断裂带中段, 茂汶断裂与映秀断裂围限的断块上。断块主体由晋宁—橙江期岩浆岩组成。地震基本烈度为Ⅶ度。有岩爆记录的隧洞围岩主要为花岗岩和花岗闪长岩, 岩体完整新鲜, 岩质坚硬。

实测资料表明该地区属高地应力区, 最大主应力 31.3MPa, 其方向基本上垂直于河流流向, 同时与洞向垂直, 倾角  $7^\circ$ ; 中间主应力 17.8MPa, 约平行于河流流向, 倾角  $64^\circ$ ; 最小主应力 10.4MPa。

### 1.3.1.2 岩爆发生情况

施工期间, 第一次发生岩爆是在 2 号支洞距洞口 326.2m 处, 时间为 1991 年 9 月 17 日, 岩爆部位为掌子面, 但其规模相对较小, 此处垂直埋深在 260m。自 1991 年 12 月 26 日进入正洞施工以来, 岩爆发生的频率显著提高, 岩爆规模也明显增大, 其危害性也明显较大。在施工过程中, 对每次岩爆现象都进行了详细观察与记录。根据记录到的 400 多例大小岩爆的资料, 总结出发生在该隧洞的岩爆具有如下特征。

(1) 岩爆仅发生在干燥无水的花岗岩岩带中, 而在洞线的闪长岩、石英富集的岩带中均不发生岩爆。发生岩爆的部位基本在图 1.3-1 所示的 A、B 两个部位。而 A 部位发生岩爆的频率高于 B 部位, 其规模也比 B 部位大。B 部位的破坏全为劈裂破坏, 而 A 部位既有小规模的劈裂破坏, 又有大规模的剪切破坏, 且在岩性变化的交界处的花岗岩中, 岩爆发生得更为频繁。

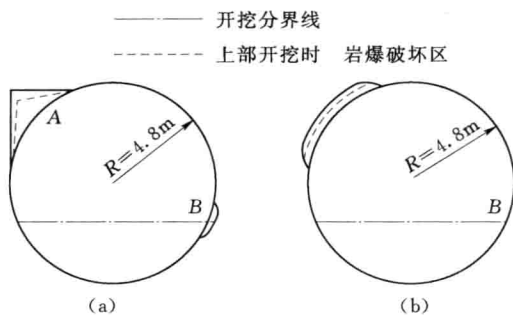


图 1.3-1 岩爆破坏部位特征

(a) 1+924 岩爆断面; (b) 1+805 岩爆断面

(2) 围岩内部发生爆裂声清脆, 且声响较大时, 岩爆主要表现为劈裂破坏, 其规模不大, 多呈片状或贝壳状, 从母岩中以劈裂的形式剥落下来, 且岩块剥落的时间几乎与爆裂声同步。当围岩内部发生的爆裂声沉闷, 声响较小时, 岩爆主要表现为剪切破坏, 其规模也大, 并伴随有烟状粉末弹射。此时由岩爆产生破坏的岩块一半都滞后于爆裂声 20min 到 1h 才会从母岩上掉落。

(3) 岩爆发生的频率随岩体开挖暴露后的时间增长而降低, 如图 1.3-2 所示。大部分岩爆发生在开挖后 16 天内, 占记录到的岩爆的 90%, 其中尤以 1 天内最高, 占 22%, 8 天内占 62%。同时, 也发现围岩即使暴露一个月甚至数月后, 仍会发生岩爆, 但为数不多。

(4) 图 1.3-3 表示岩爆发生次数与距掌子面的距离的关系曲线。由此图可知, 岩爆的发生具有两个高峰期, 第一个岩爆高峰期在距掌子面 2m 以内, 然后逐渐减小; 第二个高峰期在距掌子面 1.2~1.4 倍洞径范围内, 随后也逐渐减小, 但也有在距掌子面数百米处发生岩爆的情况。

(5) 太平驿电站引水隧洞岩爆引起的破坏规模大小不一, 一次岩爆破坏的面积为  $0.5\text{m}^2$  到几百平方米不等, 其破坏厚度也从数厘米到 2~4m 不等, 爆落的岩块体从零点





几立方米到数百立方米都有。一般而言,破坏厚度较小的岩爆大多数发生在完整的脆性花岗岩中,而破坏厚度较大的岩爆发生在有少量节理的脆性花岗岩中。

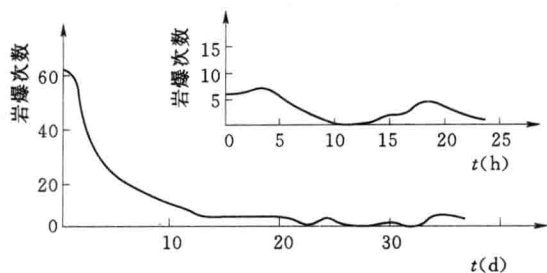


图 1.3-2 岩爆发生频率与时间

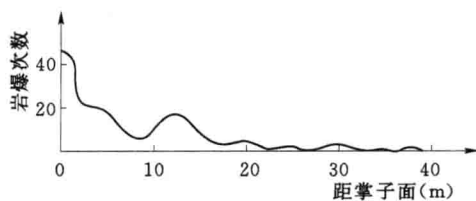


图 1.3-3 岩爆发生次数与距离

(6) 众所周知,埋深大的地方因地应力可能较大,容易发生岩爆。但在发生岩爆的区域内,岩爆发生次数和其剧烈程度是否也随埋深增大而增大?从该隧洞记录到的岩爆资料看,并不一定如此。如图 1.3-4 所示,岩爆区间的洞室覆盖层深度为 260~600m 左右,但岩爆发生次数及其剧烈程度与覆盖层深度不存在对应关系,似乎无规律可循,这说明岩爆发生次数和其剧烈程度不单纯受埋深影响,可能还与其他诸因素的综合影响有关。

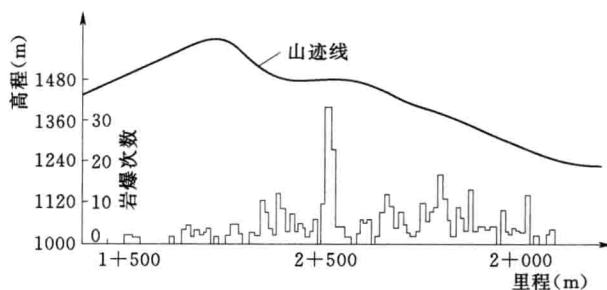


图 1.3-4 岩爆发生次数与埋深

### 1.3.2 锦屏二级水电站长探洞<sup>[6]</sup>

#### 1.3.2.1 工程规模及地质情况

锦屏二级水电站引水隧洞洞长 16~18km,开挖洞径 13m,最大埋深 2520m。在厂址区布置了 5km 长的探洞。

##### 1. 围岩特征

三叠系中统,浅海—滨海相碳酸盐岩地层,包括以下地层:

(1)  $T_2^4y$  主要为灰白、灰绿色条带状云母大理岩,局部夹厚 0.3~1.5m 的灰白色白云质大理岩组成。岩体完整性较好,纵波速度  $V_p$  一般为 5300~5900m/s,岩石弹性模量为 23.1~53.4GPa。

(2)  $T_2^5y$  主要为灰黑色—黑色中厚层状大理岩、白色—灰白色厚层状臭大理岩(含  $H_2S$  气体)夹黑色条带状大理岩、灰白色隐晶质条带大理岩、花斑状大理岩等组成。各种大理岩之间呈渐变的过渡接触,岩石新鲜(局部沿断层带呈弱风化状),岩石完整性好,