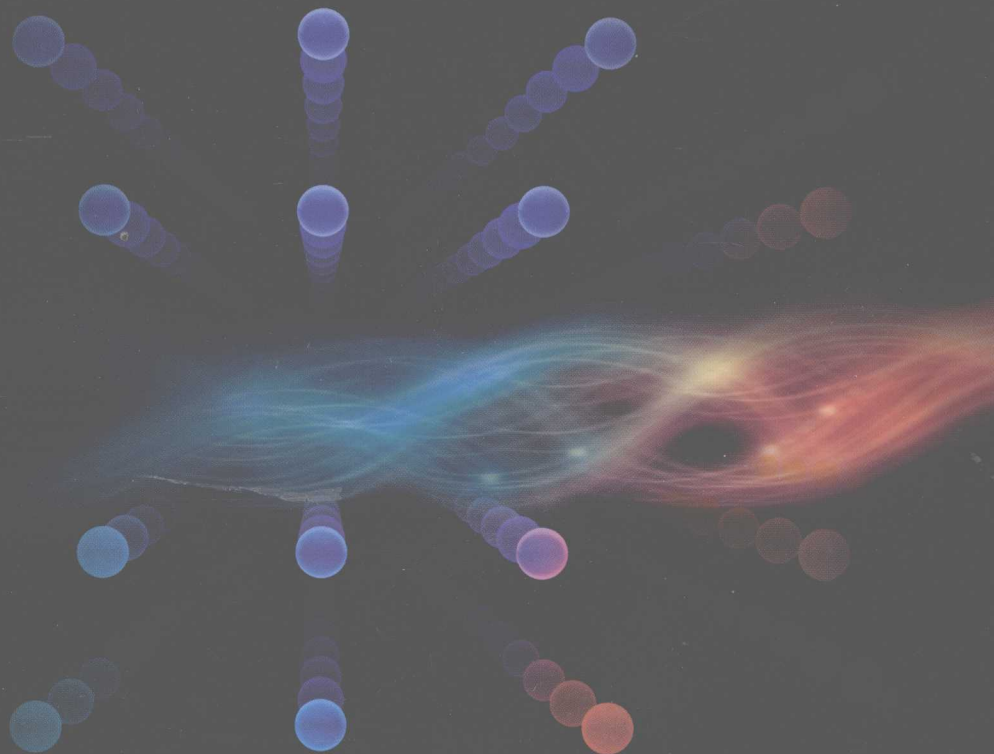


【现代工程爆破前沿技术丛书】

# 水利水电工程 精细爆破概论

张正宇 等 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

【现代工程爆破前沿技术丛书】

# 水利水电工程 精细爆破概论

张正宇 卢文波 刘美山 张文煊 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书总结了近年来我国水利水电行业最新的爆破技术成果,在诠释精细爆破概念的基础上,论述了水利水电行业精细爆破的内涵,并对水利水电工程中精细爆破的支撑条件进行了总结分析,阐述了水利水电工程精细爆破的量化设计与方法,结合工程实践对精细爆破施工与管理、爆破安全监测及反馈等进行了详细的论述。

本书可供水利水电工程爆破的科研、设计、施工、监理技术人员及管理人员使用,也可供其他工程爆破领域的专业人士及高等院校相关专业师生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程精细爆破概论 / 张正宇等著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

(现代工程爆破前沿技术丛书)

ISBN 978-7-5084-6497-8

I. 水… II. 张… III. ①水利工程-爆破 ②水力发电工程-爆破 IV. TV542

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第064546号

书 名	现代工程爆破前沿技术丛书 水利水电工程精细爆破概论
作 者	张正宇 等 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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184 mm × 260 mm 16开本 14.25印张 362千字 8插页
版 次	2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	58.00 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

# 前 言

通过近 40 年的努力，以长江水利委员会为代表的水利水电工程爆破工作者建立了以深孔台阶爆破为核心，由预裂爆破与光面爆破、缓冲孔爆破、孔间孔内毫秒延时顺序爆破、保护层一次爆破、塑料导爆管接力起爆系统、爆破安全控制理论与标准等组成的优质、安全、高效开挖爆破技术体系，并在整个水利水电系统得到广泛应用，使工程爆破技术水平得以显著提高，爆破开挖质量优良率不断增加。尤其是 21 世纪以来，三峡、小湾、溪洛渡与向家坝等一系列超大型水电站在坝基、高边坡、拱肩槽和地下工程（尤其是岩锚梁）等开挖中，采用该技术体系所获得的轮廓面开挖质量之优异令人赞叹。目前，该开挖爆破技术体系与大型机械化施工已经成为推动水利水电工程快速优质开挖综合技术进步的两大支柱。

越是在发展的高潮期，越应当更冷静明智地看待形势。为进一步促进水利水电系统乃至全国工程爆破技术水平的发展和先进爆破理论在工程建设中的应用，提高工程爆破设计的可预见性和可控性，加强爆破工作的科学管理和监控，建立以量化设计为中心，涵盖精心施工、实时监控和科学管理全方位控制爆破效果和质量的体系，即水利水电工程精细爆破尤有必要。

为阐述水利水电工程精细爆破的概念与内涵以及形成它们的支撑条件，我和我的同事们编写了本书。同时，本书纳入了水利水电工程现阶段用于设计、施工、监测及管理方面较先进的技术、方法及条例，也尽可能指出未来上述几方面的发展方向。这一目的能否达到，请读者斧正。

水利水电工程精细爆破是一新概念，许多内容尚需完善。编写本书的另一目的是抛砖引玉，希望引起爆破界同仁的关注与重视，通过引发讨论，最终促进工程爆破技术的发展。

最后，还应感谢冯叔瑜院士、汪旭光院士和我的领导及同事们对本书的指导、关心和帮助。

张正宇

2009 年 1 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述	1
1.1 现代水利水电工程爆破的特点	1
1.2 现代水利水电工程爆破开挖质量要求	1
1.2.1 岩体开挖偏差控制标准	2
1.2.2 水工建筑物基础岩体质量	2
1.2.3 保护层开挖的技术要求	3
1.2.4 爆破振动影响控制要求	4
1.3 我国水利水电工程爆破技术的发展历程	5
1.3.1 水电站主体工程开挖爆破技术	5
1.3.2 水利水电工程其他爆破技术	7
1.3.3 爆破监测技术	9
1.4 国内几个大型水利水电工程岩体爆破开挖特点简介	9
1.4.1 三峡水利枢纽工程	10
1.4.2 小湾水电站	10
1.4.3 锦屏一级水电站	11
1.4.4 溪洛渡水电站	11
1.4.5 龙滩水电站	12
1.5 水利水电精细爆破概念的形成和内涵	12
第 2 章 精细爆破的支撑条件	17
2.1 爆破理论	17
2.1.1 爆破理论发展阶段	17
2.1.2 爆破理论模型	19
2.1.3 爆破块度及抛掷堆积	20
2.1.4 临近轮廓面的爆破设计理论与方法	23
2.1.5 爆破技术	25
2.1.6 爆破振动与冲击波的传播与控制	27
2.2 爆破数值模拟及计算机辅助设计	29
2.2.1 爆破计算机仿真	29
2.2.2 工程爆破计算机辅助设计	33

2.2.3	工程爆破专家系统 .....	35
2.2.4	爆破数值模拟及计算机辅助设计在水利水电工程中的应用 .....	36
<b>2.3</b>	<b>高可靠性和安全性的爆破器材 .....</b>	<b>36</b>
2.3.1	工业炸药 .....	37
2.3.2	雷管及起爆系统 .....	42
2.3.3	其他爆破器材 .....	47
<b>2.4</b>	<b>爆破测试与检测技术 .....</b>	<b>48</b>
2.4.1	爆破块度测量 .....	49
2.4.2	爆破影响范围检测 .....	50
2.4.3	爆破振动测试 .....	51
2.4.4	开挖平整度检测 .....	52
2.4.5	爆破冲击波及噪声测试 .....	53
<b>2.5</b>	<b>现代信息和控制在钻爆施工中的应用 .....</b>	<b>55</b>
2.5.1	现代信息技术在钻爆施工中的应用 .....	55
2.5.2	高精度钻机应用 .....	57
2.5.3	自动化装药车 .....	59
<b>第3章</b>	<b>水利水电工程精细爆破的量化设计方法 .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>水利水电工程精细爆破量化设计关键问题 .....</b>	<b>61</b>
<b>3.2</b>	<b>临近开挖轮廓面的定量化爆破设计方法 .....</b>	<b>62</b>
3.2.1	爆破设计原理 .....	62
3.2.2	临近开挖轮廓面的爆破设计步骤 .....	67
3.2.3	预裂爆破与光面爆破新技术 .....	71
<b>3.3</b>	<b>水下爆破量化设计与方法 .....</b>	<b>79</b>
3.3.1	水中爆炸的物理现象 .....	79
3.3.2	水下岩石爆破的破坏机理 .....	80
3.3.3	水深对爆破效果的影响 .....	81
3.3.4	水下爆破块度预测模型 .....	85
3.3.5	水下台阶爆破炸药单耗 $q$ .....	86
3.3.6	围堰及岩坎爆破技术 .....	87
<b>3.4</b>	<b>面板堆石坝级配料开采量化设计与方法 .....</b>	<b>102</b>
3.4.1	面板堆石料开采技术现状 .....	102
3.4.2	爆破块度预测模型 .....	104
3.4.3	爆破块度影响因素研究 .....	111
3.4.4	堆石坝级配料开采深孔台阶爆破参数优化设计 .....	114
3.4.5	天生桥一级水电站堆石料开采爆破 .....	119
<b>3.5</b>	<b>计算机模拟技术在水利水电工程精细爆破量化设计中的应用 .....</b>	<b>123</b>
3.5.1	小湾水电站岩石高边坡开挖爆破振动控制标准研究 .....	124
3.5.2	红水河龙滩水电站地下厂房开挖爆破振动影响评价 .....	129

3.5.3	基于 DDA 的三峡工程三期 RCC 围堰倾倒爆破拆除过程模拟 .....	139
<b>第 4 章</b>	<b>水利水电工程精细爆破施工与管理</b> .....	154
<b>4.1</b>	<b>精细爆破施工</b> .....	154
4.1.1	测量放样与钻孔定位 .....	154
4.1.2	施工优化 .....	166
4.1.3	装药、堵塞、联网与起爆 .....	170
<b>4.2</b>	<b>精细爆破科学管理</b> .....	175
4.2.1	爆破工程分级管理方法 .....	175
4.2.2	方案审查与监理制度 .....	178
4.2.3	爆破技术人员分类管理 .....	180
4.2.4	爆破安全管理与奖惩制度 .....	181
4.2.5	大爆破或重要爆破的管理 .....	183
<b>第 5 章</b>	<b>爆破安全监测及信息反馈</b> .....	184
<b>5.1</b>	<b>概述</b> .....	184
<b>5.2</b>	<b>爆破安全监测体系</b> .....	185
5.2.1	安全监测目的与内容 .....	185
5.2.2	爆破安全监测设计 .....	186
<b>5.3</b>	<b>爆破安全允许标准</b> .....	188
<b>5.4</b>	<b>爆破监测手段与方法</b> .....	194
5.4.1	爆堆堆积状态的预报与量测 .....	194
5.4.2	爆破振动监测 .....	196
5.4.3	爆破动应变监测 .....	199
5.4.4	爆破孔隙动水压力监测 .....	199
5.4.5	爆破水击波、动水压力及涌浪监测 .....	200
5.4.6	爆破空气冲击波、噪声及有害气体监测 .....	201
5.4.7	爆破影响深度检测 .....	203
5.4.8	开挖平整度检测 .....	209
5.4.9	宏观调查及巡视检查 .....	211
5.4.10	爆破器材性能现场检测 .....	212
<b>5.5</b>	<b>爆破监测资料分析与信息反馈</b> .....	212
5.5.1	爆破振动 .....	212
5.5.2	爆破动应变、水击波、动水压力 .....	214
5.5.3	爆破影响深度检测 .....	215
5.5.4	宏观调查及巡视检查 .....	216
5.5.5	爆破安全监测信息反馈 .....	218
	<b>参考文献</b> .....	219
	<b>后记</b> .....	222

# 第 1 章 概 述

## 1.1

### 现代水利水电工程爆破的特点

现代水利水电工程中，大坝基础开挖、高陡边坡开挖、地下洞室群开挖、溢洪道及渠道开挖、水下岩石开挖、围堰等临时结构物拆除，以及各种石料的开采等均离不开爆破技术。

水利水电工程为百年大计，施工质量始终放在工程建设的首位。水电工程的岩体开挖，不仅需要完成岩体的“破碎与抛掷”，更重要的是要实现“成型和保护”，即通过控制爆破，按照设计要求形成开挖轮廓。同时，由于保留岩体需要作为各类水工建筑物的基础或各类地下洞室的承载围岩，爆破过程需要尽可能保护保留岩体的质量不受损伤或影响。因此水利水电行业对爆破要求具有如下特点：对爆破造成保留岩体不利影响的控制严；在施工中要求的各种爆破控制技术多，在爆破规模的控制上严格；对各种开挖轮廓进行“雕琢”多等。可见，水利水电行业是对爆破技术要求最为苛刻的行业之一。在水利水电建设中，工程爆破的成败是影响工程质量和进度的一个重要因素。

现阶段，我国中西部地区已经成为水电开发的主要基地，三峡、溪洛渡、向家坝、锦屏、小湾、白鹤滩、乌东德等一批大型、特大型水电站正在兴建或将要开工建设，这些工程均处中西部高山峡谷，无一例外地要涉及大规模、高强度、高陡边坡以及地下洞室群的精细爆破开挖。这些工程岩体开挖的规模越来越大，开挖总方量动辄数千万立方米，甚至超过亿立方米；开挖边坡坡高可达 500m 以上，有的甚至超过 1km，地下厂房的跨度已经超过 30m、高度超过 80m；开挖强度越来越高，月开挖强度可达几十甚至数百万立方米；开挖质量要求越来越高，以保证高坝基础、坝肩或者保证大跨度地下厂房围岩的强度及整体性；开挖成型的难度越来越大，需要形成平整的坝基、多面临空的船闸闸首、复杂的拱肩槽空间曲面和完整的岩锚吊车梁岩台。另外，伴随着爆破开挖规模的增大和开挖强度的提高，爆破振动等有害效应问题越发突出。

## 1.2

### 现代水利水电工程爆破开挖质量要求

事实上，水利水电行业通过改革开放 30 年来的爆破科研、实践和新技术应用推广，已经逐步形成了一套比较系统的爆破开挖质量评价与控制指标体系，为量化爆破设计和精细化爆破施工奠定了基础。





下面,就现有行业规程规范对岩体开挖偏差控制、水工建筑物基础岩体质量和爆破振动控制标准等共性问题的相关规定进行简要介绍,以对水利水电工程爆破开挖技术的要求有全面的了解。

### 1.2.1 岩体开挖偏差控制标准

针对基础面的开挖偏差,《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T 5389—2007)规定:水平建基面高程的开挖允许超挖20cm、欠挖10cm;设计边坡的整体平均坡度应符合设计要求;每一台阶的开挖允许偏差为其开挖高度的 $\pm 2\%$ ;对预裂爆破和光面爆破,相邻两炮孔间岩面的不平整度不应大于15cm。

而《水工建筑物地下开挖工程施工技术规范》(DL/T 5099—1999)则规定:地下建筑物开挖一般不应欠挖,尽量减少超挖;平均径向超挖值,平洞不大于20cm,斜井、竖井不大于25cm;地下厂房中岩壁、岩台吊车梁因需充分利用岩石的承载能力,岩壁的开挖要求成型好,超挖少,爆破对围岩破坏小;采用预裂或光面爆破时,爆后岩面不平整度应不大于15cm,壁面不得有明显的爆破裂隙。

《水电水利工程爆破施工技术规范》(DL/T 5135—2001)规定,钻孔质量宜符合下列要求:①孔位偏差,一般爆破孔为孔距、排距、抵抗线的5%,预裂、光爆孔距为5%;②倾角与方向偏差,一般爆破孔为 $\pm 2.5\%$ 孔深(+为超,-为欠),预裂、光爆孔为 $\pm 1.5\%$ 孔深;③终孔高程偏差,一般爆破孔0~20cm。预裂、光爆孔 $\pm 5\text{cm}$ ;④爆后边坡壁面、建基面超欠挖应控制在20cm以内。

### 1.2.2 水工建筑物基础岩体质量

《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T 5389—2007)规定:①针对预裂爆破和光面爆破,在开挖轮廓面上,残留炮孔痕迹应均匀分布;②残留炮孔痕迹保存率对节理裂隙不发育的岩体应达到80%以上,对节理裂隙较发育和发育的岩体应达到80%~50%,对节理裂隙极发育的岩体应达到50%~10%;③炮孔壁不应有明显的爆破裂隙;④紧邻水平建基面爆破效果,不应使水平建基面岩体产生大量爆破裂隙以及使节理裂隙面、层面等弱面明显恶化,并损害岩体的完整性;⑤用弹性波纵波波速观测方法判断爆破破坏或基础岩体质量时,同部位的爆后波速小于爆破前波速,其变化率不得超过10%。

《水电水利工程爆破施工技术规范》(DL/T 5135—2001)规定,采用预裂或光面爆破时,其效果应达到下述要求:①预裂缝应贯通,在地表呈现的缝宽,沉积岩不宜小于1.0cm,坚硬的火成岩、变质岩不应小于0.3cm;②边坡轮廓壁面孔痕应均匀分布,残留孔痕保存率,微风化岩体为80%以上,弱风化中、下限岩体为50%~80%;弱风化上、中限岩体为10%~50%。

地下工程施工中,光面爆破与预裂爆破的残留孔迹保留率为:光面爆破,弱风化岩体为30%~50%,微风化和新鲜岩体应不小于50%;预裂爆破,弱风化岩体为40%~80%,微风化和新鲜完整岩体应不小于80%。对孔壁的完整程度,光面爆破无明显爆破裂隙;预裂爆破肉眼不易发现爆破裂隙。

### 1.2.3 保护层开挖的技术要求

对水工建筑物而言，要求其必须建在坚硬、完整的基岩上，其建基面应具备足够的承载能力、良好的稳定性及防渗性能。因此，对于紧邻建基面石方爆破，世界各国都极为重视。我国及前苏联等都采用预留保护层法，并对保护层开挖采取严格控制措施，分3~5层逐层用手风钻爆除的方法。《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T 5389—2007)中紧邻水平建基面的爆破有下列规定。

(1) 紧邻水平建基面的爆破效果，除其开挖偏差应符合有关规定外，还应使水平建基面岩体不致产生大量爆破裂隙，以及不使节理裂隙面、层面等弱面明显恶化，并不损害岩体的完整性。

(2) 紧邻水平建基面的岩体保护层厚度，应由爆破试验确定，若无条件进行试验，保护层厚度宜为上一层台阶爆破药卷直径的25~40倍。

(3) 紧邻水平建基面的保护层宜选用下列一次爆破法予以挖除。

1) 沿建基面采取水平预裂爆破，上部采用水平孔台阶或浅孔台阶爆破法。

2) 沿建基面进行水平光面爆破，上部采用浅孔台阶爆破法。

3) 孔底无水时，可采用垂直(或倾斜)浅孔，孔底加柔性或复合材料垫层的台阶爆破法。

4) 以上任一种爆破方法均应经过试验证明可行后才可实施。

(4) 试验证明可行，水平建基面也可采用深孔台阶一次爆破法，该方法应采取以下措施：

1) 水平建基面，应采用水平预裂爆破方法。

2) 台阶爆破的爆破孔底与水平预裂面应有合适距离。

(5) 水平建基面的保护层也可采用分层爆破。对岩体保护层进行分层爆破，必须遵守下述规定。

第1层：炮孔不得穿入距水平建基面1.5m的范围；炮孔装药直径不应大于40mm；应采用台阶爆破方法。

第2层：对节理裂隙不发育、较发育、发育和坚硬的岩体，炮孔不得穿入距水平建基面0.5m的范围；对节理裂隙极发育和软弱的岩体，炮孔不得穿入距水平基面0.7m的范围。

炮孔与水平建基面的夹角不应大于 $60^\circ$ ，炮孔装药直径不应大于32mm。应采用单孔起爆方法。

第3层：对节理裂隙不发育、较发育、发育和坚硬、中等坚硬的岩体，炮孔不得穿过水平建基面；对节理裂隙极发育和软弱的岩体，炮孔不得穿入距水平建基面0.2m的范围，剩余0.2m厚的岩体应进行撬挖。

炮孔角度、装药直径和起爆方法，均同第2层的规定。

(6) 必须在通过试验证明可行并经主管部门批准后，才可在紧邻水平建基面采用有或无岩体保护层的一次爆破法。

保护层的一次爆破法应符合下述原则：应采用台阶爆破方法；炮孔不得穿过水平建基面；炮孔底应设置用柔性材料充填或由空气充任的垫层段。



无保护层的一次爆破法应符合下述原则：水平建基面开挖，应采用预裂爆破方法；基础岩石开挖，应采用台阶爆破方法；台阶炮孔孔底与水平预裂面应有一定距离。

### 1.2.4 爆破振动影响控制要求

《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T 5389—2007) 规定：如需在新浇筑大体积混凝土附近进行爆破，其新浇筑大体积混凝土基础面上的质点振动速度不得大于安全质点振动速度（见表 1.2-1）。

表 1.2-1 新浇筑大体积混凝土基础面上的安全质点振动速度标准

混凝土龄期 (d)	0~3	3~7	7~28
安全质点振动速度 (cm/s)	2.0~3.0	3.0~7.0	7.0~12.0

若装药量控制到爆破的最低需用量，新浇筑大体积混凝土基础面的质点振动速度仍大于安全值，应采取有效减震措施或暂停爆破作业。如需在新灌浆区、新预应力锚固区、新喷锚或喷浆支护区等部位附近进行爆破必须通过试验证明可行并经主管部门批准。

《水电水利工程爆破施工技术规范》(DL/T 5135—2001) 规定，在混凝土浇筑或基础灌浆过程中，若邻近的部位还在钻孔爆破，为确保爆破时混凝土、灌浆、预应力锚杆（索）质量及电站设备不受影响，必须采取控制爆破。控制标准见表 1.2-2。

表 1.2-2 允许爆破质点振动速度 单位：cm/s

项 目	龄 期 (d)			备 注
	3	3~7	7~28	
混 凝 土	1~2	2~5	6~10	
坝基灌浆	1	1.5	2~2.5	含坝体、接缝灌浆
预应力锚索	1	1.5	5~7	含锚杆
电站机电设备	0.9			含仪表、主变压器

表 1.2-1 和表 1.2-2 在新浇筑混凝土的标准允许质点振速值上有差异，因 DL/T 5389—2007 规范后出版，实践证明上述标准允许值可适当放宽。

对岩石高边坡和地下洞室的爆破振动安全判据，现有的规程规范没有作明确的规定，表 1.2-3 为国内部分水利水电工程边坡开挖爆破控制标准。

对未衬砌的水工隧洞和地下洞室围岩，允许的爆破质点振动速度大多采用 10cm/s；对已衬砌的水工隧洞和地下洞室围岩，允许的爆破质点振动速度一般为 15cm/s。

表 1.2-3 国内部分水利水电工程边坡开挖爆破控制标准 单位：cm/s

工程名称	部 位	岩 性	允许峰值质点振动速度
隔河岩	厂房进出口边坡	石灰岩	22
	坝肩及升船机边坡	石灰岩	28
	引航道边坡	石灰岩	35

续表

工程名称	部 位	岩 性	允许峰值质点振动速度
三峡	永久船 闸边坡	微风化花岗岩	15~20
		弱风化花岗岩	10~20
		强风化花岗岩	10
小湾	拱坝槽边坡	花岗岩	10~15
溪洛渡	拱坝槽边坡	柱状节理玄武岩	10

## 1.3

## 我国水利水电工程爆破技术的发展历程

## 1.3.1 水电站主体工程开挖爆破技术

所谓主体工程是指水电站边坡、坝基、地下工程的厂房洞群以及泄洪洞、导流洞等。水电站主体工程土石方开挖经历了手风钻爆破、深孔台阶爆破及开挖体系的建立与发展等阶段。

在解决了深孔爆破带来的有害影响之后，爆破技术在水利水电行业得以迅速发展，水平不断提高，从而为本行业精细爆破提供了支撑条件。

## 1.3.1.1 手风钻钻爆期

20世纪50~60年代，像佛子岭、响洪甸、古田、上犹江、大伙房、狮子滩等小型水电站，以及丹江口、新安江、拓溪、盐锅峡、龚嘴、三门峡、刘家峡、陈村、西津等大型、中型水电站，都是用手风钻作为主体工程开挖的主要钻孔工具。虽然，在三门峡和刘家峡水电站进行过一些深孔爆破，因其规模有限未能在水利水电行业推广。这一时期的爆破技术，尚不被较多的爆破技术人员掌握，主要取决于爆破人员（主要是爆破员）的个人技艺，谈不上爆破技术的理论与运用。

20世纪70年代开始，一批大型水电工程陆续上马，土石方开挖工程量都很大。例如，葛洲坝水电站土石方开挖量就达1.2亿 $m^3$ 。如此巨大的开挖量，再依靠手风钻钻爆作业，显然无法按期完成。沙溪口水电站一期工程的石方开挖，若用手风钻施工，最快也需18个月才能完成，而用大孔径深孔台阶法开挖，工期仅需4个月。事实证明，将大孔径钻孔设备引入水电工程开挖已势在必行。1970年葛洲坝水电站建设，引进YD-150型潜孔钻机钻孔后，大大提高了生产效率，配以4 $m^3$ 电铲和20t自卸汽车出渣，当时曾创造月产30万 $m^3$ 和日开挖3万 $m^3$ 的纪录。

## 1.3.1.2 深孔台阶爆破与优质、安全、高效爆破开挖体系的建立

将大孔径( $\phi 80\text{mm} \sim \phi 150\text{mm}$ )深孔台阶爆破法从矿山系统引入水电站主体工程开挖中，虽然加快了施工进度，但却带来一系列必须解决的问题。

(1) 矿山深孔台阶爆破追求爆破破碎效果和较均匀的块度，对未爆基岩的保护一般不予特别关注。故其多采取耦合装药，多孔齐发爆破。这一爆破法用于水电站坝基开挖显然



对保留基岩的保护极为不利,故必须寻求满足水电站坝基开挖要求的爆破方案、钻爆参数和起爆方法。

(2) 爆破振动有害效应影响巨大,加重了对保留基岩的破坏,若不对边界面加以保护,将造成严重的超欠挖,使边坡失稳;当发生主体工程混凝土浇筑施工与爆破开挖交叉作业时,将危及主体建筑物的安全,因此必须探求减少爆破振动有害效应并使开挖边界保持平整和控制超欠挖的措施和方法。

(3) 必须解决减少保护层厚度或取消保护层以加快坝基开挖速度这一令人棘手的难题。

总而言之,必须在充分研究爆破作用机理和水利水电工程建设特点的基础上,建立一套适用于水利水电工程爆破开挖的新理论、新方法和新体系。

1970~1990年,水利水电行业的爆破工作者,特别是长江水利委员会的爆破技术人员,在葛洲坝、东江、万安、沙溪口、西洱河、官厅和东风等水电站进行一系列研究和爆破试验。尤其通过“七五”国家科技攻关——坝基开挖爆破技术研究之后,在深入研究柱状不耦合装药爆破作用原理的基础上,逐步完善了多项既能加速施工进度,又能减小或控制爆破有害效应的方法与措施,将它们集成创新后,建立了一套具有多种用途的“优质、安全、高效”开挖爆破技术新体系。该开挖爆破技术体系具有如下特点。

(1) 预裂和光面爆破技术能保证坝基、边坡及地下工程开挖后保留岩体的完整性和稳定性。通过在葛洲坝水电站的软岩(砂岩、泥质砂岩)、东江水电站的硬岩(花岗岩)和东风水电站的中硬岩(石灰岩)中获取的成功爆破参数,在总结预裂和光面爆破机理后,提出了“长科院”预裂爆破装药量计算公式;建立了岩体轮廓面一次爆破成型的成套施工方法。

(2) 在主爆孔与预裂、光面爆破孔之间,设立缓冲孔,采取密孔小药量爆破,减小主爆孔对预裂和光爆面的损坏,对保护边坡质量起到了良好的作用。

(3) 取消保护层或保护层一次爆除技术,取代了传统的保护层分层开挖方法,能极大地加快施工进度。通过在葛洲坝、东江、万安和东风水电站不断地探索和试验,终于形成了沿建基面实施水平预裂爆破、上部深孔台阶爆破不留保护层的施工方法和保护层垂直炮孔孔底部加柔性垫层或保护层水平光面爆破的一次爆除法。

(4) 塑料导爆管接力起爆系统既可提高单次爆破规模,同时又能降低单段药量,达到控制爆破振动有害影响的目的。张正宇和张文煊在系统研究塑料导爆管传爆机理和导爆管雷管作用原理的基础上,率先研发了安全可靠的导爆管接力起爆系统;提出了大规模塑料导爆管接力起爆网路按工程需要的分段准则;建立了系统的起爆可靠度和延时特性计算理论与网路连接施工工法,包括网路中孔内装入高段位雷管,孔外接力使用低段位雷管等措施。这一起爆系统的成功开发,彻底改善了电雷管分段受限制的弊端,使我国工程爆破的起爆技术发生了重大变革。这一技术的应用,可减少坝基开挖一响起爆药量,对坝基保留岩体保护和控制爆破振动的危害起到了极其重要的作用。

(5) 不耦合装药和孔内、孔间毫秒延期顺序起爆理论的研究表明深孔、缓冲孔台阶爆破法,既可提高破岩效果,又能减轻开挖爆破对保留岩体的损坏。多处工程的实践表明,它是适合水电工程爆破开挖的好方法。孔间毫秒延期顺序爆破是指大区深孔台阶上的炮孔按排列顺序依次相差毫秒级时间起爆的技术,可以是单孔一段,也可是两孔或三孔一段,

还可一孔、两孔、三孔组合。孔内毫秒延时是指同一炮孔孔内再进行起爆分段。毫秒顺序爆破与多孔齐发爆破比较,在爆破破碎效果和减轻对非爆区的破坏方面具有明显的优越性。

(6) 建立爆破后保留岩体、爆区周围建筑物、机械电器设备、各种设施和新浇筑混凝土等,不受危害影响的安全允许标准,亦是爆破技术体系中必不可少的内容。

以上爆破开挖“优质、安全、高效”技术体系中的各种爆破技术和安全允许标准在许多水利水电工程建设中得到广泛应用并经受检验,对推动我国工程爆破学科的技术进步作出了重大贡献,也为我国水利水电行业实施精细爆破奠定了基础。

#### 1.3.1.3 近 20 年爆破开挖技术的新进展

20 世纪 90 年代,水利水电爆破开挖“优质、安全、高效”技术体系是三峡工程的永久船闸、临时船闸、钢管槽和保护层开挖的主要技术支撑之一。永久船闸的两平行五闸室(深 60m,中间隔墩宽 60m),左岸 1~6 号机钢管槽(深 43m,宽 16.6m,中隔墩宽 21.7m)的开挖最为艰难,其边坡均为直立且没有设置马道。坝基保护层采用水平光面爆破法一次挖除。

三峡工程爆破开挖实践证明,爆破开挖“优质、安全、高效”技术体系是适用的,体系中的各种技术也是卓有成效的,能够将世界最大水电站的爆破开挖任务顺利完成,并取得良好的质量,标志着我国水利水电工程爆破技术已达到世界一流水平。

21 世纪,我国水电建设进入大发展时期,许多大型和巨型水电站相继开工,如龙滩、小湾、锦屏、糯扎渡、溪洛渡、向家坝、拉西瓦、构皮滩和瀑布沟等。它们大都位于我国西部的深山峡谷之中,爆破开挖工程量浩大,任务极为艰巨。如,云南澜沧江上的小湾水电站,拱肩高度近 300m,两岸边坡最大开挖高度达 687m,在世界水电史上前所未有;开挖区地质条件复杂,开挖量巨大,且工期紧,因此在确保施工质量进度要求下,其两岸高边坡、拱肩槽及坝基开挖爆破具有相当大的技术难度。利用上述爆破开挖技术体系,并采用在施工中根据地质、地形和开挖部位条件的变化,及时采用控制起爆排数、优化爆破总药量的方法,解决爆破规模与边坡安全控制难题;对爆破参数进行合理调整,解决可控爆破参数与起爆时差选取的矛盾;建立爆破开挖实时监控体系,确保工程安全和质量等措施对该爆破开挖技术体系进一步加以完善的施工方法,在各方共同努力下,该工程的开挖工期提前近一年,且开挖质量优良,成为我国西部地区水电站建设中高边坡开挖的范例。

在小湾水电站开挖爆破的成功经验基础上,目前在建的溪洛渡和向家坝两座巨型水电站,以及三峡增容的地下厂房等工程的开挖爆破,其钻爆技术又取得进一步提高。例如通过搭设样架,改进了钻孔精度控制方法;针对各个不同开挖部位的特性,进行爆破试验,调整并优化其爆破参数,严格执行个性化钻爆设计,使得开挖质量及保留壁面质量均有大幅度提高。

#### 1.3.2 水利水电工程其他爆破技术

除建立开挖爆破技术体系外,近几十年来,我国水利水电工程界在定向爆破筑坝、岩塞爆破、开采面板堆石坝石料、围堰爆破拆除等方面,也取得了具有世界水平的成就。

(1) 面板堆石坝堆石料爆破开采技术的应用,取得了明显的社会和经济效益。面板堆



石坝因其造价低廉在我国得到广泛应用。堆石坝料主要由垫层料、过渡料和主堆石料等组成。目前垫层料尚需通过筛分系统获取；过渡料一般由最大粒径 30cm 以下的级配料组成；主堆石料一般由最大粒径为 60~80cm 以下的级配料组成，它可由深孔台阶爆破法开采获取，在地质条件允许下，也可采用条形洞室爆破法开采。过渡料因其细料含量高，过去一般由筛分系统获取，价格比较昂贵。天生桥一级水电站堆石料达 1860 万  $\text{m}^3$ ，过渡料也有 70 余万  $\text{m}^3$ 。张正宇首先提出了该工程的过渡料由深孔台阶爆破法直接开采的思路。他与长江科学院同仁在该工程建设中开展科研与实践，率先提出了满足水电工程要求的级配料爆破块度预报模型，开发了相应的爆破参数设计优化程序，并利用这些研究成果采用深孔台阶爆破法直接开采了 85 万  $\text{m}^3$  满足设计级配曲线要求的过渡料。通过实践验证的过渡料爆破直采技术及级配料爆破块度预报模型在以后的类似工程建设中得到了广泛应用。

天生桥一级水电站建设中，采用条形装药洞室爆破法开采面板堆石坝级配料获得成功，爆破石料主要是次堆料区填筑料。该项技术后来在多个电站建设中得到成功应用，其中以河南鹤壁盘石头水库的爆破规模为最大，一次用药量 516t，爆破岩石 70 余万  $\text{m}^3$ 。采用条形装药洞室爆破开采面板堆石坝堆石料需要具备合适的岩性和岩体结构发育条件。

(2) 水利水电工程建设中，水工围堰（岩坎）及二道坝等的拆除爆破技术也是“优质、安全、高效”水电工程爆破技术体系中的一项重要组成部分。待拆除体一般一侧挡水，在顶面及另一侧进行钻孔，炮孔内漏水现象往往不可避免。当采用水平炮孔布置形式时更是如此，这给装药联网工作带来很大困难。装药过程中，总有少量炮孔无法装药，或者装药不到位；爆破后的渣滓有的需要挖走，有的需要高速水流冲走；拆除爆破区附近通常有闸门或其他建筑物，爆破振动、冲击波及飞石等不能对它们造成破坏作用。张正宇根据爆破作用原理和上述拆除爆破项目的工程特点提出了“高单耗、低单响”的水下围堰体拆除爆破设计准则。“高单耗”须采用密集炮孔布置来实现，即在某些孔不能装药或装药不到位的情况下，与它相邻的炮孔装药爆破能保证其破碎而不留坎；同时高单耗的另一目的是确保待拆除块体充分破碎，便于冲、挖，并减轻爆渣对导流洞等洞体的磨损和提高挖除效率。而“低单响”则是尽量降低单响起爆药量，使爆破产生的有害效应对爆区周围的建（构）筑物的危害降至最低。“高单耗、低单响”的设计准则必然是采用多分段的起爆网络设计模式；在需要冲渣时，设计的起爆网络还应确保低缺口的形成，从而达到爆破后堰体立即过流泄渣的目的。长江科学院等单位采用该设计准则，近些年来在国内外实施了 50 余座水工围堰（岩坎）的爆破拆除，均获成功，特别是三峡工程三期碾压混凝土（RCC）围堰的成功爆破拆除，表明我国的此项爆破技术已处于世界领先地位。三峡工程三斯 RCC 围堰的拆除爆破具有如下特点：①建拆结合，即在围堰建设时，将爆破拆除方案大体确定下来，并将拆除时所需的药室预留于碾压混凝土中；②采用的大体积混凝土块体倾倒爆破拆除方案在世界围堰拆除史上尚属首例，通过 1:10、1:100 的物理模型试验、水下固体介质爆炸的理论计算研究以及计算机仿真模型倾倒实验等，解决了深水条件下固体介质爆破的装药量计算难题，确保了水下约 40m 的 3 排预置集中药室的爆破漏斗大缺口形成，从而使爆破拆除体得以顺利倾倒，完全达到工程要求；③在国内首次采用大规模的数码雷管起爆系统，单响起爆药量控制在允许值以内，使得在距三峡大坝仅 116m、总装药量 191.5t 的围堰拆除爆破没有对大坝、正在运行的机组及输变电设备等的安全造

成任何危害；④采用自行研制的高威力、高猛度、高抗水性炸药，成功解决了炸药在水下约 40m 深度的爆炸性能仍需达到设计要求的难题。

(3) 我国水利水电行业采用定向爆破筑坝已有 60 余座。建坝高度均在 100m 以内，坝的防渗措施以黏土斜墙为主。采用的爆破方法分为松动崩塌和抛掷爆破两大类。抛掷爆破是定向爆破使用最为广泛的一种方法，若河谷岸坡达到  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，就具备良好的抛掷爆破条件；松动崩塌爆破多用于河岸陡峭地段，其经济指标优越，每立方米堆积体炸药消耗量不超过 0.5kg，抛塌上坝率可达 80%~90%。不过自从 20 世纪 70 年代后期定向爆破形成第二次高潮后，由于施工机械化程度和爆破环保要求的提高，国内再没有进行过用定向爆破法修筑水坝。

(4) 采取岩塞爆破法打通水库放空洞与库内连接段的爆破工程已有 18 个。其中 1979 年丰满水电站岩塞爆破的规模最大，爆破岩塞的直径 9m，用药量 4.1t。我国岩塞爆破使用洞室和排孔两种爆破方式，直径较大时采用洞室爆破，例如丰满水电站、汾河水库等；排孔爆破法使用最多，例如密云水库、香山水库和横锦水库等。爆渣处理采用聚渣与泄渣两种方式，大部分为泄渣方式。1999 年安徽响洪甸抽水蓄能电站岩塞爆破使用了气垫技术。在聚渣坑内冲水，使岩塞爆破时在岩塞底部形成一个有压力的缓冲气垫，有效地将岩塞与下游水体隔开，减弱岩塞爆破时的冲击波，有利于爆渣堆积。

上述各项技术是水利水电行业工程爆破的重要组成部分，也从另一方面促成了水利水电精细爆破的建立。

### 1.3.3 爆破监测技术

爆破量测技术和爆破跟踪监测工作得到迅速发展。过去，我国爆破量测技术较为落后，拾震器与记录器之间需用长长的导线连接，光线示波器记录的数据无法用微机进行处理。

20 世纪 80 年代初期，长江科学院与武汉水利电力学院等单位相继研制出爆破自记录仪。自记录仪与拾震器可同放置于一个测点，也可将两者组装于一体。采用数字式记录并直接与计算机连接，及时进行爆破数据的采集与分析成果输出，从而大大缩短了我国与国际爆破量测技术上的差距。

三峡工程主体工程施工期间，建立了有效的爆破开挖施工监测体系，通过及时将监测信息反馈到设计、监理和施工部门，促进了爆破设计的优化和爆破效应量化控制技术的进步。目前，施工爆破跟踪监测与信息快速反馈制度在各大型、中型水利水电工程中得到全面推广。

## 1.4

## 国内几个大型水利水电工程岩体爆破开挖特点简介

下面结合我国正在建设的三峡、小湾、龙滩、溪洛渡和锦屏等一大批大型或特大型水利水电工程，就其爆破开挖规模、强度及技术要求等方面进行综合介绍。





### 1.4.1 三峡水利枢纽工程

三峡工程建设过程中,其岩体爆破开挖施工难度主要体现在永久船闸闸室及高边坡、左岸厂房钢管槽和坝基保护层开挖等方面。

三峡双线连续5级永久船闸主体段全长1621m,在三峡坝址左岸制高点坛子岭北侧花岗岩山体中深切开挖修建,永久船闸最大深度170m、下部67.8m直立闸墙的双向岩质高边坡,闸槽开挖宽度37m,两线闸槽间保留宽57m的直立岩石中隔墩。5级船闸各级闸首因输水隧洞阀门井及启闭设备布置需要,均设置一段凹向坡内平台;5级船闸纵横向均为台阶状,直角多,拐点多,槽、沟、坎、口、井形态不规则,且均为建基面。在中隔墩和两侧边墙岩体内各布置1条输水隧洞,每级闸首部位布置阀门井和检修门井共36个,距离闸室边墙仅11~17m,最近距离仅5m。直立闸槽边墙结构为厚度1.5~2.4m的混凝土薄衬砌墙,该混凝土墙通过高强锚杆与岩体连接共同组成结构。

永久船闸开挖总量近4000万 $m^3$ ,其中大部分为需进行爆破的坚硬岩石。三峡永久船闸高边坡和一般高边坡相比具有以下特点。

(1) 在山体中深切开挖形成高陡边坡,高度大、形态复杂、范围广、应力释放充分,开挖成型要求高、爆破施工难度极大。

(2) 保留边坡岩体的质量要求严。永久船闸高边坡不仅整体和局部稳定性必须保证,而且对边坡的长期变形必须严格控制在5mm以内,以满足船闸人字门的正常运行。因此在爆破开挖过程,需尽量降低爆破对保留边坡岩体的损伤与影响。

(3) 施工难度大、干扰多、工期紧。二期闸槽开挖工期仅42个月,地面开挖、锚固和混凝土施工与地下庞大的洞井工程立体交叉,干扰矛盾多,施工布置困难。

设计与施工人员采用中间拉槽、预留保护层、施工预裂(光爆)及保护层浅孔松动控制爆破等精细开挖技术与手段,实现了闸室开挖的精雕细琢。

三峡左岸厂房1~6号机钢管槽,需要在微新鲜花岗岩岩体中爆破成型,开挖难度极大。引水钢管槽共有6条,相互平行,槽宽16.60m,最大开挖深32.90m,开挖长度为57.56m;两侧边墙直立,最高达28.30m;钢管槽上游为一长29.6m、坡度1:0.72的缓坡。钢管槽之间用隔离墩隔开,隔墩宽为21.7m,并分别于高程81.7m、75.0m和65.0m处设有平台;而且隔墩形状互相不一致,平台前沿有1:0.72和1:0.2两种坡。钢管槽围岩岩性为前震旦纪闪云斜长花岗岩,裂隙发育,该发育有3组裂隙。A、B两组节理裂隙成X形分布,裂隙交错,岩石被切割成0.2~2m左右的块状;C组裂隙则倾向下游,且多数上下贯通,对隔墩岩体的稳定影响较大。该部位岩体爆破开挖的主要技术难点在开挖成型及确保施工过程中钢管槽隔墩直立墙岩体的爆破振动动力稳定性。

三峡工程规模巨大,建筑物基础开挖面积达60万 $m^2$ 以上,传统的坝基保护层分层开挖方式,影响施工进度。施工中采用了水平光爆、孔底设柔性垫层的浅孔微差接力顺序起爆等新型保护层开挖技术,实现了建基面开挖的安全、高速和经济施工。

### 1.4.2 小湾水电站

小湾水电站是澜沧江中下游河段梯级电站的龙头水库,装机容量4200MW。电站枢