

“十二”

全施
书工

水利水电工程施工技术全书

第二卷 土石方工程

BAOPO JISHU

第一册

爆破技术

梅锦煜 郑道明 郑桂斌 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电工程施工技术全书

第二卷 土石方工程

第一册

爆破技术

梅锦煜 郑道明 郑桂斌 等 编著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《水利水电工程施工技术全书》第二卷《土石方工程》中的第一分册。本书系统阐述了与水利水电工程相关的工程爆破技术,紧密结合水电工程施工特点,收集了有代表性的工程实例。主要包括:综述、爆破器材、起爆技术、钻孔爆破、水下爆破、拆除爆破、洞室爆破、特殊爆破、爆破安全和爆破测试等。

本书可作为水利水电工程施工领域的工程技术人员、工程管理人员和高级技术工人的工具书,也可供从事水利水电工程科研、设计、建设及运行管理和相关企事业单位的工程技术、工程管理人员使用,并可作为大专院校水利水电工程及其他建筑类专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

爆破技术 / 梅锦煜等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 7
(水利水电工程施工技术全书. 第二卷, 土石方工程; 第一册)
ISBN 978-7-5170-5932-5

I. ①爆… II. ①梅… III. ①水利工程—爆破—高等职业教育—教材 IV. ①TB41

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第245022号

书 名	水利水电工程施工技术全书 第二卷 土石方工程 第一册 爆破技术 BAOPO JISHU
作 者	梅锦煜 郑道明 郑桂斌 等 编著
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、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
印 刷	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 480千字
版 次	2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	86.00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

《水利水电工程施工技术全书》

编审委员会

顾问：潘家铮 中国科学院院士、中国工程院院士

谭靖夷 中国工程院院士

陆佑楣 中国工程院院士

郑守仁 中国工程院院士

马洪琪 中国工程院院士

张超然 中国工程院院士

钟登华 中国工程院院士

缪昌文 中国工程院院士

名誉主任：范集湘 丁焰章 岳曦

主任：孙洪水 周厚贵 马青春

副主任：宗敦峰 江小兵 付元初 梅锦煜

委员：(以姓氏笔画为序)

丁焰章 马如骐 马青春 马洪琪 王军 王永平

王亚文 王鹏禹 付元初 江小兵 刘永祥 刘灿学

吕芝林 孙来成 孙志禹 孙洪水 向建 朱明星

朱镜芳 何小雄 和孙文 陆佑楣 李友华 李志刚

李丽丽 李虎章 沈益源 汤用泉 吴光富 吴国如

吴高见 吴秀荣 肖恩尚 余英 陈茂 陈梁年

范集湘 林友汉 张晔 张为明 张利荣 张超然

周晖 周世明 周厚贵 宗敦峰 岳曦 杨涛

杨成文 郑守仁 郑桂斌 钟彦祥 钟登华 席浩

夏可风 涂怀健 郭光文 常焕生 常满祥 楚跃先

梅锦煜 曾文 焦家训 戴志清 缪昌文 谭靖夷

潘家铮 衡富安

主编：孙洪水 周厚贵 宗敦峰 梅锦煜 付元初 江小兵

审定：谭靖夷 郑守仁 马洪琪 张超然 梅锦煜 付元初

周厚贵 夏可风

策划：周世明 张晔

秘书长：宗敦峰(兼)

副秘书长：楚跃先 郭光文 郑桂斌 吴光富 康明华

《水利水电工程施工技术全书》

各卷主（组）编单位和主编（审）人员

卷序	卷名	组编单位	主编单位	主编人	主审人
第一卷	地基 与基础工程	中国电力建设集团 (股份)有限公司	中国电力建设集团(股份)有限公司 中国水电基础局有限公司 葛洲坝基础公司	宗敦峰 肖恩尚 焦家训	谭靖夷 夏可风
第二卷	土石方工程	中国人民武装警察 部队水电指挥部	中国人民武装警察部队水电指挥部 中国水利水电第十四工程局有限公司 中国水利水电第五工程局有限公司	梅锦煜 和孙文 吴高见	马洪琪 梅锦煜
第三卷	混凝土工程	中国电力建设集团 (股份)有限公司	中国水利水电第四工程局有限公司 中国葛洲坝集团有限公司 中国水利水电第八工程局有限公司	席 浩 戴志清 涂怀健	张超然 周厚贵
第四卷	金属结构制作 与机电安装 工程	中国能源建设集团 (股份)有限公司	中国葛洲坝集团有限公司 中国电力建设集团(股份)有限公司 中国葛洲坝建设有限公司	江小兵 付元初 张 晔	付元初
第五卷	施工导(截) 流与度汛 工程	中国能源建设集团 (股份)有限公司	中国能源建设集团(股份)有限公司 中国葛洲坝集团有限公司 中国水利水电第八工程局有限公司	周厚贵 郭光文 涂怀健	郑守仁

《水利水电工程施工技术全书》 第二卷《土石方工程》编委会

主 编：梅锦煜 和孙文 吴高见

主 审：马洪琪 梅锦煜

委 员：（以姓氏笔画为序）

王永平 王红军 李虎章 吴国如 陈 茂

陈太为 何小雄 沈溢源 张少华 张永春

张利荣 汤用泉 杨 涛 林友汉 郑道明

黄宗营 温建明

秘 书 长：郑桂斌 徐 萍

序 一

水利水电工程建设在我国作为一项基础建设事业，已经走过了近百年的历程，这是一条不平凡而又伟大的创业之路。

新中国成立 66 年来，党和国家领导一直高度重视水利水电工程建设，水电在我国已经成为了一种不可替代的清洁能源。我国已经成为世界上水电装机容量第一位的大国，水利水电工程建设不论是规模还是技术水平，都处于国防领先或先进水平，这是几代水利水电工程建设者长期艰苦奋斗所创造出来的。

改革开放以来，特别是进入 21 世纪以后，我国的水利水电工程建设又进入了一个前所未有的高速发展时期。到 2014 年，我国水电总装机容量突破 3 亿 kW，占全国电力装机容量的 23%。发电量也历史性地突破 31 万亿 kW·h。水电作为我国当前重要的可再生能源，为我国能源电力结构调整、温室气体减排和气候环境改善做出了重大贡献。

我国水利水电工程建设在新技术、新工艺、新材料、新设备等方面都取得了突破性的进展，无论是技术、工艺，还是在材料、设备等方面，都取得了令人瞩目的成就，它不仅推动了技术创新市场的活跃和发展，也推动了水利水电工程建设的前进步伐。

为了对当今水利水电工程施工技术进展进行科学的总结，及时形成我国水利水电工程施工技术的自主知识产权和满足水利水电建设事业的工作需要，全国水利水电施工技术信息网组织编撰了《水利水电工程施工技术全书》。该书编撰历时 5 年，在编撰过程中组织了一大批长期工作在工程建设一线的中青年技术负责人和技术骨干执笔，并得到了有关领导、知名专家的悉心指导和审定，遵循“简明、实用、求新”的编撰原则，立足于满足广大水利水电工程技术人员的实际工作需要，并注重参考和指导价值。该书内容涵盖了水利水电工程建设地基与基础工程、土石方工程、混凝土工程、金属结构制作

与机电安装工程、施工导（截）流与度汛工程等内容目标任务、原理方法及工程实例，既有理论阐述，又有实例介绍，重点突出，图文并茂，针对性及可操作性强，对今后的水利水电工程施工具有重要指导作用。

《水利水电工程施工技术全书》是对水利水电施工技术实践的总结和理论提炼，是一套具有权威性、实用性的大型工具书，为水利水电工程施工“四新”技术成果的推广、应用、继承、创新提供了一个有效载体。为大力推动水利水电技术进步和创新，推进中国水利水电事业又好又快地发展，具有十分重要的现实意义和深远的科技意义。

水利水电工程是人类文明进步的共同成果，是现代社会发展对保障水资源供给和可再生能源供应的基本需求，水利水电工程施工技术在近代水利水电工程建设中起到了重要的推动作用。人类应对全球气候变化的共识之一是低碳减排，尽可能多地利用绿色能源就成为重要选择，太阳能、风能及水能等成为首选，其中水能蕴藏丰富、可再生性、技术成熟、调度灵活等特点成为最优的绿色能源。随着水利水电工程建设与管理技术的不断发展，水利水电工程，特别是一些高坝大库能有效利用自然条件、降低开发运行成本、提高水库综合效能，高坝大库的（高度、库容）记录不断被刷新。特别是随着三峡、拉西瓦、小湾、溪洛渡、锦屏、向家坝等一批大型、特大型水利水电工程相继建成并投入运行，标志着我国水利水电工程技术已跨入世界领先行列。

近年来，我国水利水电工程施工企业积极实施走出去战略，海外市场开拓业绩突出。目前，我国水利水电工程施工企业在亚洲、非洲、南美洲多个国家承建了上百个水利水电工程项目，如尼罗河上的苏丹麦洛维水电站、号称“东南亚三峡工程”的马来西亚巴贡水电站、巨型碾压混凝土坝泰国科隆泰丹水利工程、位居非洲第一水利枢纽工程的埃塞俄比亚泰克泽水电站等，“中国水电”的品牌价值已被全球业内所认可。

《水利水电工程施工技术全书》对我国水利水电施工技术进行了全面阐述。特别是在众多国内外大型水利水电工程成功建设后，我国水利水电工程施工人员创造出一大批新技术、新工法、新经验，对这些内容及时总结并公开出版，与全体水利水电工作者分享，这不仅能促进我国水利水电行业的快

速发展，提高水利水电工程施工质量，保障施工安全，规范水利水电施工行业发展，而且有助于我国水利水电行业走进更多国际市场，展示我国水利水电行业的国际形象和实力，提高我国水利水电行业在国际上的影响力。

该全书的出版不仅能提高水利水电工程施工的技术水平，而且有助于提高我国水利水电行业在国内、国际上的影响力，我在此向广大水利水电工程建设者、工程技术人员、勘测设计人员和在校的水利水电专业师生推荐此书。

孙洪水

2015年4月8日

序 二

《水利水电工程施工技术全书》作为我国水利水电工程技术综合性大型工具书之一，与广大读者见面了！

这是一套非常好的工具书，它也是在《水利水电工程施工手册》基础上的传承、修订和创新。集中介绍了进入 21 世纪以来我国在水利水电施工领域从施工地基与基础工程、土石方工程、混凝土工程、金属结构制作与机电安装工程、施工导（截）流与度汛工程等方面采用的各类创新技术，如信息化技术的运用：在施工过程模拟仿真技术、混凝土温控防裂技术与工艺智能化等关键技术，应用了数字信息技术、施工仿真技术和云计算技术，实现工程施工全过程实时监控，使现代信息技术与传统筑坝施工技术相结合，提高了混凝土施工质量，简化了施工工艺，降低了施工成本，达到了混凝土坝快速施工的目的；再如碾压混凝土技术在国内大规模运用：节省了水泥，降低了能耗，简化了施工工艺，降低了工程造价和成本；还有，在科研、勘察设计和施工一体化方面，数字化设计研究面向设计施工一体化的三维施工总布置、水工结构、钢筋配置、金属结构设计技术，推广复杂结构三维技施设计技术和前期项目三维枢纽设计技术，形成建筑工程信息模型的协同设计能力，推进建筑工程三维数字化设计移交标准工程化应用，也有了长足的进步。因此，在当前形势下，编撰出一部新的水利水电施工技术大型工具书非常必要和及时。

随着水利水电工程施工技术的不断推进，必然会给水利水电施工带来新的发展机遇。同时，也会出现更多值得研究的新课题，相信这些都将对水利水电工程建设事业起到积极的促进作用。该全书是当今反映水利水电工程施工技术最全、最新的系列图书，体现了当前水利水电最先进的施工技术，其中多项工程实例都是曾经创造了水利水电工程的世界纪录。该全书总结的施工技术具有先进性、前瞻性，可读性强。该全书的编者都是参加过我国大

型水利水电工程的建设者，有着非常丰富的各专业施工经验。他们以高度的社会责任感和使命感、饱满的工作热情和扎实的工作作风，大力发展和创新水电科学技术，为推进我国水利水电事业又好又快地发展，做出了新的贡献！

近年来，我国水利水电工程建设快速发展，各类施工技术日臻成熟，相继建成了三峡、龙滩、水布垭等具有代表性的水电工程，又有拉西瓦、小湾、溪洛渡、锦屏、糯扎渡、向家坝等一批大型、特大型水电工程，在施工过程中总结和积累了大量新的施工技术，尤其是混凝土温控防裂的施工方法在三峡水利枢纽工程的成功应用，高寒地区高拱坝冬季施工综合技术在拉西瓦等多座水电站工程中的应用……，其中的多项施工技术获得过国家发明专利，达到了国际领先水平，为今后水利水电工程施工提供了参考与借鉴。

目前，我国水利水电工程施工技术已经走在了世界的前列，该全书的出版，是对我国水利水电工程建设领域的一大贡献，为后续在水利水电开发，例如金沙江上游、长江上游、通天河、黄河上游的水电开发、南水北调西线工程等建设提供借鉴。该全书可作为工具书，为广大工程建设者们提供一个完整的水利水电工程施工理论体系及工程实例，对今后水利水电工程建设具有指导、传承和促进发展的显著作用。

《水利水电工程施工技术全书》的编撰、出版是一项浩繁辛苦的工作，也是一项具有创造性的劳动过程，凝聚了几百位编、审人员近5年的辛勤劳动，克服各种困难。值此该全书出版之际，谨向所有为该全书的编撰给予关心、支持以及为此付出了辛勤劳动的领导、专家和同志们表示衷心的感谢！



2015年4月18日

前 言

由全国水利水电施工技术信息网组织编写的《水利水电工程施工技术全书》第二卷《土石方工程》共分十册,《爆破技术》为第一册,由中国人民武装警察部队水电指挥部与中国水利水电第十工程局有限公司编撰。

本书以针对水利水电工程爆破中的爆破器材、起爆技术、钻孔爆破、水下爆破、拆除爆破、洞室爆破、特殊爆破、爆破安全、爆破测试等方面为主线进行编撰,内容系统、全面、准确、实用,重点突出对水利水电工程爆破技术实际工作的指导性。在吸取相关爆破工程经验的基础上,以水利水电工程爆破技术为重点,突出实际施工技术和方法,收集引用了大量国内外最新爆破施工技术和成果,并编入了不少具有代表性的典型工程实例,是一部面向爆破工程施工的技术人员、工程管理人员和高级技术工人的专著。

本书在编撰过程中,紧密结合水电工程爆破施工实践,围绕水电工程爆破收集资料,重点突出。书中介绍了水电工程常用爆破器材和起爆技术;钻孔爆破中,以台阶爆破、预裂与光面爆破、基岩保护层爆破及沟槽爆破为重点;水下爆破介绍了岩塞爆破和软基处理爆破;拆除爆破则以围堰拆除爆破为主体;洞室爆破着重叙述洞室爆破开采堆石坝级配料和定向爆破筑坝技术;特殊爆破的主要内容为堰塞湖及分洪爆破、堤坝分洪爆破、冰体及冰冻土爆破、聚能爆破等;同时,还介绍了水利水电行业特色的爆破安全与爆破测试。

水利水电工程由挡水建筑物、泄洪建筑物、引水发电系统、厂房及通航建筑物等组成,水工建筑物承受巨大的水压力,需要建立封闭的地基基础防渗系统,必须严格控制爆破对开挖地基的影响。水利水电工程的地下厂房布置有纵横交错的洞室群,其规模及复杂程度是其他行业所罕见的。同时,水利水电工程的基岩保护层爆破、岩塞爆破、定向爆破筑坝、围堰拆除等特殊类型的爆破,更有其独特的爆破要求。针对水利水电工程爆破的特殊性,本书力求编写为具有水利水电工程特色的工程爆破技术书籍,同时对其他行业

的工程爆破也有较好的参考价值。

本书的编撰人员长期从事水利水电土石方工程爆破专业的施工、科研工作，既具有理论研究水平，又具有丰富的实际工作经验。本书第1章、第9章、第10章由梅锦煜编撰，第2章至第8章由郑道明编撰，郑桂斌参与了章节中部分内容的编写。本书由梅锦煜统稿。编写过程中，李超、陈行、周雪琼、陈建平参与协助整理资料，在此，借本书出版之际对这些同志致以深切的谢意。

本书在编撰过程中，得到了《水利水电工程施工技术全书》编审委员会和有关专家的大力支持，并吸收了他们的许多宝贵经验、意见和建议，还收集了一些单位的测试资料。在此，谨向他们表示衷心的感谢！

由于我们搜集、掌握的资料和专业技术水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥或错误。在此，恳请广大工程技术人员，尤其是工程爆破专业技术人员提出宝贵意见和建议。

作者

2017年6月

目 录

序一	
序二	
前言	
1 综述	1
1.1 水利水电工程爆破技术历程	1
1.2 水利水电工程爆破技术展望	6
2 爆破器材	10
2.1 炸药的爆炸性能	10
2.2 工业炸药	14
2.3 起爆器材	35
3 起爆技术	47
3.1 电力起爆法	47
3.2 导爆索起爆法	53
3.3 导爆管起爆法	55
3.4 数码电子雷管起爆法	57
3.5 电磁雷管起爆法	59
3.6 其他起爆方法	61
3.7 起爆网路	62
4 钻孔爆破	66
4.1 工程地质对爆破影响	66
4.2 台阶爆破	70
4.3 预裂与光面爆破	85
4.4 基岩保护层爆破	95
4.5 沟槽爆破	102
5 水下爆破	108
5.1 水下岩塞爆破	108
5.2 水下钻孔爆破	127
5.3 水下裸露爆破	133

5.4	软基处理水下爆破	136
6	拆除爆破	145
6.1	拆除爆破特点	145
6.2	围堰拆除爆破	146
6.3	单体结构钻孔拆除爆破	166
6.4	水下结构爆破拆除	174
7	洞室爆破	179
7.1	洞室爆破特点及基本要素	179
7.2	洞室爆破设计	182
7.3	洞室爆破开采堆石坝级配料	196
7.4	定向爆破筑坝	200
8	特殊爆破	211
8.1	堰塞湖及分洪爆破	211
8.2	堤坝分洪爆破	223
8.3	冰体及冰冻土爆破	226
8.4	聚能爆破	233
8.5	静态破碎	242
9	爆破安全	252
9.1	爆破有害效应及防护	252
9.2	爆破工程安全	285
10	爆破测试	294
10.1	爆破动态测试	294
10.2	爆破静态测试	301
	参考文献	306

1 综 述

1.1 水利水电工程爆破技术历程

中华人民共和国成立前,我国水利水电工程建设十分落后,国内第一座水电站为1912年在云南建成的石龙坝小型水电站,其后也陆续建成了一些规模较小的水电站,截至中华人民共和国成立时,全国水电装机容量仅360MW,其中规模最大的为日本掠夺我国资源在东北修建的丰满水电站。由于小型水电站基岩开挖工程量较小,当时的爆破技术水平较低,主要采用裸露药包、钢钎凿孔爆破和手风镐钻孔爆破等效率很低的爆破方法。

中华人民共和国成立后,国家十分重视水电开发,水电建设迅猛发展,工程规模不断扩大,20世纪50年代开始建设上硐、狮子滩、上犹江、古田溪、新安江、栖霞、新丰江、盐锅峡等水电站;60年代建设刘家峡、丹江口、三门峡等水电站;70年代建设葛洲坝、乌江渡、龚嘴、凤滩、东江、渔子溪一级等水电站。随着这些大中型水电站的建设规模越来越大、大坝坝高也越来越高,基岩开挖工程量越来越多,原来的小规模开挖方式和落后的爆破技术,显然无法满足工程需要,爆破技术也随之得到迅速的提高和发展。

爆破技术的发展离不开爆破器材,爆破器材是采用先进爆破技术的基础;水利水电工程的开挖爆破以钻孔爆破为主体,需要高效先进的钻孔设备;由于水利水电工程的特殊性,水工建筑物承受巨大的水压荷载,既要满足水工结构的强度、刚度及稳定的要求,同时要符合高水头下地基的防渗指标,开挖后的地基基础必须满足设计及规范的要求;为控制爆破的破坏及影响,需要建立一套全面的监测方法,制定合理的爆破安全标准。水利水电工程爆破技术的发展,伴随着引进使用先进的爆破器材、高效的钻孔设备、科学的爆破监测手段,爆破技术,通过精湛的施工工艺和严密的组织管理得以实现。

1.1.1 爆破器材

水利水电工程爆破中早期以黑火药为主,逐步引入使用硝酸铵类炸药和硝化甘油炸药,硝酸铵类炸药分为岩石硝酸铵炸药和露天硝酸铵炸药,相应不同编号的硝酸铵炸药,性能有所差异,改变炸药成分后,使其具有一定的抗水性,如2号岩石硝酸铵和2号抗水岩石硝酸铵炸药等。另有粉状铵油炸药和铵松蜡与铵沥青炸药,以提高其爆炸性能和抗水性能。

自20世纪60年代后期,我国开始生产浆状炸药,水利水电工程逐步开始使用具有抗水性能好、威力大、爆轰感度高的水胶炸药,20世纪80年代我国开始研制生产爆炸性能好、威力大、爆轰感度高而机械感度低、抗水性能好,成分中不含有毒物质,成本低、较为安全的乳化炸药,在水利水电工程中推广使用。另有一些专用炸药,如用于光面爆破,配制生产传爆性能优越的低爆速、低密度炸药,用于预裂爆破加工成一定形状的聚能炸

药，用于特殊拆除部位的静态破碎剂等。

安全性能好、成本较低、可现场调配炸药配比，先进高效的现场混装炸药车，自 20 世纪 90 年代开始用于三峡水利枢纽工程永久船闸爆破开挖，已在水利水电工程中逐步推广应用，可按需要配制铵油炸药、浆状炸药、重铵油炸药、乳化炸药等。

起爆器材的发展是提高爆破技术的关键材料之一，原始阶段的爆破，采用导火索和火雷管，随着新型起爆器材的使用，因安全及劳动保护要求，导火索、火雷管已不再生产使用。目前，水利水电行业主要使用电雷管、塑料导爆管雷管、导爆索，以及电磁雷管、数码电子雷管等，其中雷管为起爆器材，塑料导爆管为传爆材料，导爆索既为传爆材料也是起爆材料。

电雷管由开始的瞬发雷管、秒差延期雷管，进而研制生产了毫秒延期雷管，毫秒延期雷管的使用，可进行分段起爆，实现多孔一段，单孔一段及孔内分段控制单段药量，扩大一次起爆规模，使水利水电工程既可实现大型爆破，又能有效控制爆破影响，特别是高精度数码电子雷管，其精度可达 $\pm 1\text{ms}$ ，且可任意调整确定延期时差，为水利水电工程爆破技术的创新发展打下了基础，为规模巨大的围堰拆除、大型岩塞等有特殊技术要求的爆破提供了技术保障。

1.1.2 钻孔设备

人工凿孔效率低下，只能进行小规模的小孔爆破。水利水电工程的钻孔设备从手持式风动凿岩机开始，包括气腿式、向上式凿岩机，其钻孔孔径为 $38\sim 50\text{mm}$ ，钻孔深度常为 $3\sim 5\text{m}$ ，采用固定式中低压风压站，经管道输送至工作面，小型凿岩机还有电动式和内燃式，不使用供风系统。导轨式的风动凿岩机其钻孔直径最大可达 80mm ，钻孔深度超过 10m ，但总体效率不高，机动性差。20 世纪 50 年代末，三门峡水电站采用 100 型凿岩机进行直径较大的深孔爆破。

20 世纪 70 年代末，葛洲坝水利枢纽开始使用履带式潜孔钻，钻孔直径可达 $80\sim 150\text{mm}$ ，钻孔深度可达 $15\sim 20\text{m}$ ，其 YQ 系列产品为国产钻机，总体钻爆成本有所降低，得以广泛使用。孔径更大的回转式及牙轮式钻孔机，因其钻孔直径较大，水利水电工程较少使用。

20 世纪 80 年代开始逐步引进了先进的履带式液压钻机，凿岩钻孔直径一般为 $76\sim 120\text{mm}$ ，钻孔深度为 $10\sim 20\text{m}$ ，为水利水电工程深孔台阶爆破的实施提供了条件。这些进口的钻机质量总体良好，钻孔效率高，为加快施工进度提供了条件。进入 21 世纪，国产化的液压钻机在水利水电工程得以推广应用。

地下洞室开挖中引进了先进的全液压多臂钻机，具有自动化程度高、钻孔速度快的优势。门架式台车配置风动凿岩机的钻孔方式至今仍较普遍采用，相对成本较低，施工组织严密时，既能保证钻孔质量，也能保持较快的施工进度。

1.1.3 爆破监测

水利水电工程基础开挖中，总体上属于控制爆破，其爆破影响必须控制在允许范围内，爆破监测成为有效控制手段。水利水电工程爆破监测主要分两个方面：一是爆破时的动态参数测量；二是爆破破坏影响范围的确定。自 20 世纪 70 年代开始，在葛洲坝水利枢