

# 水下岩塞爆破及其在水电工程中的应用

丁隆灼

(中国水利水电第十工程局, 四川都江堰, 611830)

**摘要** 通过国内外一系列水下岩塞爆破的工程实例, 叙述了水下岩塞爆破及其特点以及水下岩塞爆破的发展和应用情况。

**关键词** 水下岩塞爆破 特点 工程实例 发展应用

水下岩塞爆破在当前已不是一项新技术, 国外应用较早, 近年来, 国内也较为广泛应用, 取得了显著成效。但是, 就其发展应用而言, 水下岩塞爆破也同其他科学技术一样, 仍有不少问题, 有待不断地积累资料, 进行分析和探索, 通过工程实践, 在普及的基础上提高。本文试图就此目的, 对水下岩塞爆破及其特点, 水下岩塞爆破发展应用情况, 作一简介。

## 1 水下岩塞爆破及其特点

为了取水、发电、灌溉、泄洪等目的, 需要在已建成的电站水库或天然湖泊中修建引水或泄洪洞, 这些隧洞的进水口, 常位于水面以下数十米深处, 若降低水位到进口以下, 势必影响发电或灌溉效益; 如不降低水位则需要在水库或湖泊中修筑围堰, 将进水口围起来, 把围堰内的水抽干才能进行进水口开挖及衬砌。如果水库或湖泊很深, 则围堰也要修得很高, 这样做既不经济, 施工也很困难。

随着爆破技术的发展, 已经找到了一个既不降低水位, 也不用修筑围堰的修建进水口的方法, 这就是水下岩塞爆破。国内外工程实践已经证明, 水下岩塞爆破是一个切实可行, 经济而迅速的施工方法。当采用岩塞爆破技术修建水下进水口时, 首先要按常规施工方法修建隧洞, 隧洞修建到库底或湖底时, 预

留一定厚度的岩石, 即岩塞, 见图1, 最后采用爆破方法, 一次炸除预留岩塞, 形成进水口。

水下岩塞爆破施工有如下特点: 不受库(湖)水位消涨的影响, 也不受季节条件的限制; 省去了围堰工程, 节约大量工程材料、设备和劳动力; 工期短, 工效高, 投资少; 水库的正常运行与施工互不干扰。

水下岩塞爆破形成的取水口处于深水运行状态, 一般情况下, 再没有条件对取水口进行其它加固措施。正因为如此, 在选择取水口时, 既要注意岩塞表面的地形条件、岩塞内部的地质构造, 满足岩塞体的稳定, 便利施工; 又要有符合运行要求的过水断面, 从而创造良好的水利条件。实施水下岩塞爆破时, 更要注意爆破方案的选择。

归纳以往的岩塞爆破工程实例, 采用的岩塞爆破方案一般有三种, 即: 洞室爆破、排孔爆破和洞室排孔结合爆破。

洞室爆破是在预留的岩塞中布置集中药包或延长药包, 把岩塞爆通成型。排孔爆破是在预留岩塞中, 采用类似于隧洞全断面钻孔开挖的方法, 把岩塞爆通成型。洞室排孔结合爆破, 就是在岩塞中, 用洞室集中药包和排孔装药相结合的爆破方法, 把预留岩塞爆通成型。

## 2 水下岩塞爆破在水电工程中的应用

国外采用水下岩塞爆破技术较早。1877年, 智利最早公布了在天然湖泊引水, 采用水下岩塞爆破的情况。进入20世纪以来, 法国、挪威、瑞士等国家在开发天然湖泊时, 比较多的采用了水下岩塞爆破施工方法, 但都是在小洞径的工程上应用。直到60年代, 加拿大的休德巴斯工程才在大直径的引水隧洞进水口, 采用了水下岩塞爆破施工。直到70年代, 国外有关水下岩塞爆破的技术总结文字还很少。在

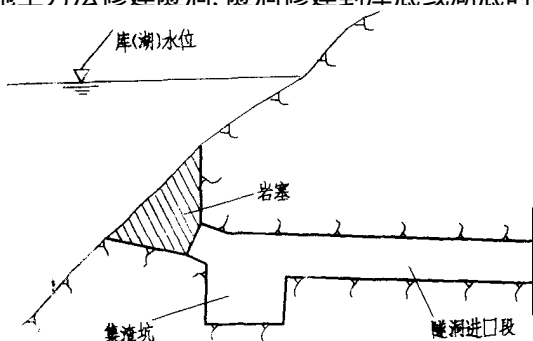


图1 水下岩塞爆破示意图

国外,挪威是采用水下岩塞爆破技术最多的国家,据不完全统计,挪威已先后完成了500个水下岩塞爆破工程。挪威的阿斯卡拉水电站,其发电洞进水口位于水下85 m,是水下最深的岩塞,1970年爆通。加拿大休德巴斯水电站的岩塞爆破,是迄今为止规模最大的水下岩塞爆破工程,其引水隧洞进水口岩塞直径18 m,厚21 m,位于水下15 m,总装药量为27 000 kg,爆破石方10 000 m<sup>3</sup>,1960年爆破成功。英国、秘鲁、意大利等国也采用过岩塞爆破技术修建水下进水口。

我国水下岩塞爆破技术从70年代开始,到现在已有12个工程成功地修建了水下进水口。辽宁省清河热电厂的供水隧洞进水口,是我国第一个水下岩塞爆破工程,于1971年7月18日爆破成功,设计过水流量8 m<sup>3</sup>/s,岩塞位于水库水下24 m深处,直径6 m,厚度7.5~8.5 m,爆破土石方800 m<sup>3</sup>,采用集碴坑容纳爆破下来的岩渣。丰满水库泄水洞,是国内规模最大的水下岩塞爆破工程,进水口位于库水面以下20 m深处,岩塞直径11 m,装药4 075.6 kg,爆破土石方4 419 m<sup>3</sup>,1979年5月28日爆破成功。山西省汾河水库岩塞爆破于1995年4月25日爆破成功,进水口位于水下24 m,淤泥厚18 m,是深厚淤积物覆盖下的岩塞爆破,岩塞直径(从岩塞下部~上部)为8~29.8 m,厚度9.05 m,总装药量2 908 641 kg,爆破石方量为1 743.5 m<sup>3</sup>。

我国已进行的水下岩塞爆破工程,在爆通成型、药室布置、爆破药量、岩渣处理、爆破对水工建筑物的影响分析以及施工和观测等方面,均积累了一定经验,取得了良好的经济效益和社会效益。

### 3 水下岩塞爆破技术的新发展

近几十年来,岩塞爆破技术发展较快,不仅爆破规模较大,而且在爆破设计等方面提出了一些新思想,取得了良好的技术效果和经济效益。现以以下几个工程为例加以介绍。

#### 3.1 汾河水库水下岩塞爆破的创新

##### 3.1.1 洞室排孔相结合的爆破方式

汾河水库是1958年建成的一座大型水利工程,为提高水库防洪标准,增大排沙能力,决定修建内径为8 m的泄洪冲沙隧洞。其进水口采用水下岩塞爆破施工。汾河水库岩塞形状为截头倒圆锥体,底部直径8 m,与隧洞衬砌后的直径相等,顶部直径29.8 m,厚9.05 m,岩塞厚度与底部直径比为1.13。岩塞中心线与水平线夹角30°,岩塞体倾角60°,上覆淤

泥厚18 m,水深24 m。汾河水库洞室加排孔的岩塞爆破设计,是在岩塞体中部用一个集中药包把岩塞前部淤泥爆通,在地表形成较规整的爆破漏斗,然后以排孔爆破把岩塞后部爆通,成型。由于该工程在岩塞顶部有厚达18 m的淤泥覆盖,水深24 m,且岩塞底部因施工超挖2 m,采用浆砌块石回填挤满,故中部药包位置的确定就不能根据过去的爆破经验选取 $W_{上}/W_{下}$ 的比值,而需要从符合阻抗平衡并取得爆破成型的良好效果来进行核算;还需根据排孔爆破孔位布置进行相应调整。根据上述情况,结合岩塞区地质条件,将中部药包布置在强风化岩层的下线附近,得到 $W_{上}/W_{下}=0.79$ 。最后成果见表1、图2。

表1 洞室排孔相结合爆破设计参数表

项 目	药室	岩塞孔排 (内、外扩大孔)	周边 预裂孔	进口渠 底孔	合计
钻孔直径 /mm		90	42	90	
药卷直径 /mm		70	21	70	
孔数/个	1	36	57	15	108
钻孔深度 /m		4~6	4	17(平均 孔深)	
钻孔总长 度/m		178.5	228	253.8	
单孔药重 /kg/孔			1.73		
总药量 /kg	1 291	1 071	50.17	1 522.4	3 934.6

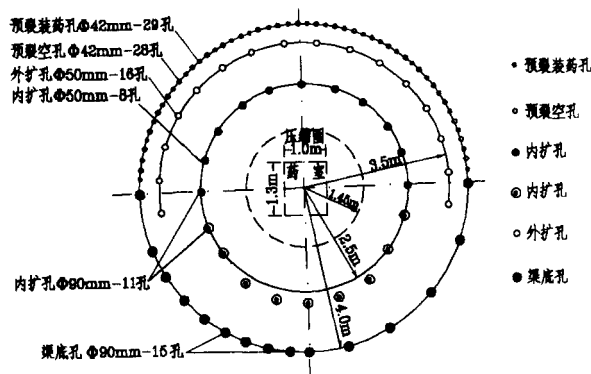


图2 炮孔布置示意图

##### 3.1.2 爆破网路

为串并毫秒微差复式电爆网路。有8条并联支路:1、2号支路为药室正副网路,3号支路为预裂孔网路,4、5、6号支路分别为外扩大孔、上部内扩大孔、下部内扩大孔网路,7、8号支路为渠底孔网路。

网路起爆顺序:1段预裂孔、2段集中药室、4段内外扩大孔、5段渠底孔。分4响起爆,时间分别为25 ms、50 ms、100 ms、125 ms。

##### 3.1.3 技术上的创新

汾河水库岩塞爆破在技术上有重要创新,不少

项目达到国内外较高水平,主要有:

(1)成功地解决了有深厚淤泥覆盖下的岩塞爆破技术问题,为多泥沙河流水库改建工程进行岩塞爆破积累了经验。(2)首次在岩塞爆破中推广使用了SHJ-K1型水胶炸药,该炸药具有防水、安全、毒性小等特点,成本低。(3)采用泄渣方案,不设缓冲坑。由于岩塞底部直径8m,下接弯段洞径及其下游洞径均保持8m不变,底坡从弯段末端开始 $i=1/100$ ,模型试验和工程实践均证明不需要设置缓冲坑,岩渣均能顺畅泄出。(4)成功地关闭了进口平板闸门。经计算,爆破后岩塞最大等容直径1.21m,其在洞内起动速度为5.18m/s,运动速度8.47m/s,而洞内流速为12.3m/s,所以,已经起动的岩渣不会运动到闸门槽内或弧形门底槛处沉降下来。(5)爆破方量少,洞内磨损轻微。爆破后因水流挟带库区淤泥泄至下游,最大泄量620m<sup>3</sup>/s,减轻了对洞壁的磨损。

### 3.2 印江岩口工程水下岩塞爆破的突破

1997年4月1日施爆的贵州印江岩口汇塞湖抢险洞工程,是目前世界上采用大孔径排孔爆破规模最大的水下岩塞排孔爆破工程,其爆破技术达到国际先进水平。

#### 3.2.1 水下岩塞排孔爆破方式

水下岩塞排孔爆破,就是利用钻孔在预留岩塞

表2 我国部分排孔爆破工程岩塞厚度选取及应力计算分析成果表

工程名称	岩塞直径 $D/m$	岩塞厚度 $H/m$		$H/D$		岩塞体稳定及应力分析成果			
		设计	实际	设计	实际	拉应力 $M Pa$	压应力 $M Pa$	剪应力 $M Pa$	整体滑动 安全系数
密云水库(1)	5.5	5.0	4.54	0.91	0.825	0.21	1.30	0.65	2.20
水槽子电站	4.5	4.6	3.40	1.02	0.76	0.84	1.12	0.50	4.60
岩口工程	6.0	6.5	6.20	1.08	1.03	0.20	1.03	0.43	4.41

(3)孔位布置。岩塞爆破时,向前向后有两个临空面同时爆破,加之大孔径造孔,其孔位布置原则不同于一般隧洞开挖的炮孔布置原则。印江岩口工程由于岩塞体岩石上薄下厚,覆盖层厚2~5m,无大孤石,不会对爆破成型不利。考虑到岩塞底部直径较大为6m,故确定布4圈孔,并相应增加内外圈底部中心角90°范围内的主炮孔数目,适当提高装药单耗。爆后效果甚好。

(4)造孔。造孔方位控制。排孔爆破施工主要是造孔问题,造孔的关键,在于孔位和方向的准确度。岩口汇塞湖岩塞排孔爆破的施工,采用TH-470型凿岩台车造孔,这在国内外尚属首次。首先用全站仪放出岩塞底部各孔位及岩塞爆破孔聚集点;再分别从各孔位到聚集点拉出方向线,指导多臂凿岩台车架钻臂角度。炮孔直径。我国水下岩塞排孔爆

破,多采用大孔径炮孔,中心空孔、掏槽孔、主炮孔均采用90~100mm直径,成效显著。而岩口汇塞湖岩塞爆破中心空孔,掏槽孔和主炮孔均采用102mm直径,药卷直径为90mm,为特制的2号二级岩石乳化炸药。

#### 3.2.2 岩塞尺寸确定

(1)岩塞底部直径 $D$ 。要满足隧洞泄水量要求,其过水断面按隧洞 $\omega(=\pi d^2/4)$ 和断面收缩比计算其面积,最后根据确定的 $\omega$ 核算其流速以不大于进口处的岩石(或混凝土)抗冲流速为准。由此确定印江岩口汇塞湖抢险洞岩塞体底部尺寸为6m。

(2)岩塞厚度 $H$ 的选定是确保设计合理的主要因素。为减轻爆破震动对围岩稳定的影响,减少预留岩塞体的工程量,应力求岩塞厚度较薄,同时还应考虑施工开挖使岩塞底部超挖时对岩塞厚度的影响。结合上述要求,其厚度 $H$ 与直径 $D$ 的比值以1.0~0.8为宜。岩口汇塞湖抢险洞岩塞区为玉龙山灰岩,开挖后地质环境较好。据钻孔揭露,岩塞体完整性差,以孔及蚀裂隙为主,透水性较大,为此,确定岩塞厚度与直径比以1:1控制。开挖后其岩塞体的实际厚度为6.2m。我国部分排孔爆破工程岩塞厚度选取及应力计算分析成果,见表2。

破,多采用大孔径炮孔,中心空孔、掏槽孔、主炮孔均采用90~100mm直径,成效显著。而岩口汇塞湖岩塞爆破中心空孔,掏槽孔和主炮孔均采用102mm直径,药卷直径为90mm,为特制的2号二级岩石乳化炸药。

### 3.3 响洪甸抽水蓄能电站水下岩塞爆破设计采用新技术

响洪甸抽水蓄能电站为水电十局承担施工的工程。其发电洞进口采用水下岩塞洞室排孔结合爆破施工。安徽院设计,东北院科研院所和北京水科院分别承担了岩塞爆破水工模型试验和爆破模型试验。

该电站引水隧洞进口闸门井底高程66.0m,在水库正常高水位以下59m。根据目前国内的水下作业水平,要在这样深的水下清渣是极其困难的,势必影响工程进度及水轮发电机组运行安全。因此必须



设法杜绝石渣进入隧洞及严重“井喷”现象的发生。同时,因蓄能电站有双向水头损失问题,故要求渣坑内堆渣曲线平缓,尽可能减小水头损失。

为了满足上述特殊要求,参考国外先进经验,经过大量选比和试验,拟采用开敞式的爆破型式:即在

闸门井高水位充水,在岩塞底部设置缓冲气垫,用斜坡集渣坑代替国内常用的矩形集渣坑。这种爆破型式在国内尚属首次,其规模也比挪威同类工程大得多。经计算分析和进水口岩塞爆破水工水力学模型试验验证后,认定上述方案是完全可行的,见图 3。

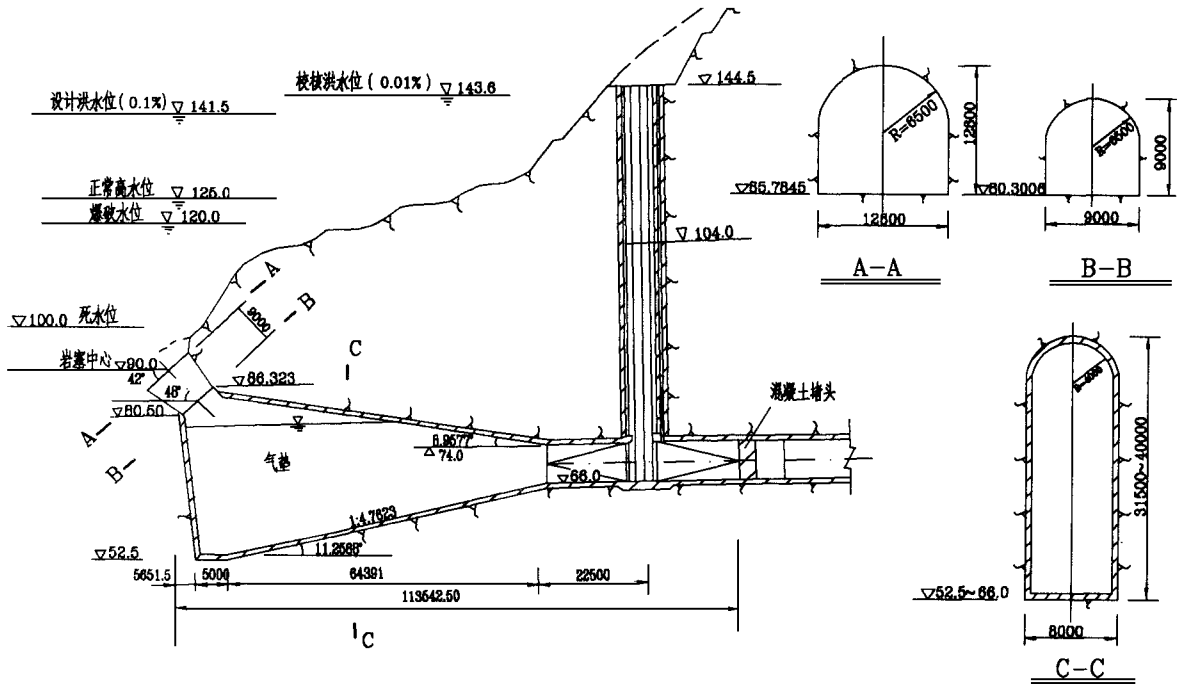


图 3 进水口纵剖面

气垫设置是在进水口段布置时,将连接岩塞底部的渣坑顶拱设计成高于闸门井上游洞顶的仰坡,使其在下游高水位充水时,在岩塞底部形成一个被压缩的气囊。气垫有效地将岩塞与下游水体隔开,可以起到一个弹性体的缓冲作用,有效地削减岩塞爆破后的剩余能量。挪威曾经应用过,但规模较小。

### 3.4 休德巴斯水下岩塞爆破

#### 3.4.1 水下岩塞洞室爆破方式的选定

加拿大的休德巴斯水下岩塞爆破,是目前最大规模的水下岩塞爆破工程。该电站地下厂房装机 74.6 万 kW,发电洞直径 10.6 m,长 10 km。于 1960 年爆破成功。

进口岩塞体距离大坝(混凝土重力坝,高 48 m,长 360 m)仅 200 m,由于采用 27 t 烈性炸药爆破,因此产生了爆破振动作用下坝体的安全问题。岩塞略呈圆柱状,直径 18 m,厚 21 m,体积 10 000 m<sup>3</sup>,集渣坑体积 17 000 m<sup>3</sup>。为了确定合理的岩塞爆破方法,进行了一系列爆破试验。

第一个试验项目是确定水中传播的震动对坝体闸门的影响。在闸门上埋设了 5 支巴尔德温 SR-4 型应变仪,沿坝面水中悬挂 4 支压力传感器。用 24

个重 2.3~11.3 kg 的含 60% 高速硝化甘油的炸药包,在距离坝体 90~200 m 处 20 m 深的水下进行了爆破试验。

第二个试验项目是测定隧洞进口段用 520 kg 炸药起爆时引起的坝体振动,以便推测岩塞爆破可能产生的影响。为此,在坝顶和坝体检查廊道里安装了 3 支地震仪和 3 支加速度计。

第三个试验项目是隧洞爆破试验。用 520 kg 炸药在隧洞进口处进行爆破,对坝体的影响反映在示波仪上,示波仪安放在大坝检查廊道中。现将测试成果列于表 3。

表 3 预想的及实测的地基振动参数表

振动参数	预想值	实测值	
		坝顶附近	坝基附近
振幅/cm	0.05~0.16	0.20	0.06
速度/cm·s <sup>-1</sup>	5.0~15.0	10.0~15.0	4.5
加速度/g	3.5~8.4	1.2	0.7
频率(周波·s <sup>-1</sup> )	17 或 17 以上	10~15	10~20

表 3 值均超过细微开裂速度值的范围,如此看来,岩塞爆破所引起的地震振动相当严重。故此,采用毫秒迟发雷管,不采用瞬时爆破,乃是减少振动,

消除破坏的一种可靠方法。但迟发爆破有可能出现拒爆或不完全爆破,造成施工困难,推迟工期。

综合考虑上述所有因素之后,最后选择了洞室爆破方式,但要承认有地震振动和超挖的危险。

### 3.4.2 水下岩塞洞室爆破设计

药室为两个垂直于岩塞轴心的同心马蹄型洞室。外侧药室断面  $1.2\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ ,用沙袋分隔成6段,各段为药量  $17.5\text{ kg}$ ,直径  $14\text{ cm}$ ,长  $16\text{ cm}$  圆柱体。为控制岩塞爆破的断面形状,尽量减少振动波的传播,顺岩塞周边布置了较密的周边孔,孔的中心距为  $46\text{ cm}$ ,  $76\text{ mm}$  和  $48\text{ mm}$  两种孔径交替布置,每两个  $76\text{ mm}$  钻孔间布置一个装药孔,总装药量  $3100\text{ kg}$ ,采用重  $0.45\text{ kg}$ 、直径  $5\text{ cm}$  的圆柱状药包。

岩塞爆破总计装药  $27700\text{ kg}$ ,单耗药量为  $2.7\text{ kg/m}^3$ 。

起爆系统由两套导爆网路组成。导爆线与洞室各段雷管连接,从进水口控制建筑物引到地面,在掩蔽部用雷管点火。做好对爆破效果的观测和记录。

### 3.4.3 水下岩塞洞室爆破效果

爆破在各方面都是成功的。据潜水员报告,洞口很完整,集渣坑堆渣未达到计划高程,这是因为有相当数量的碎石被抛出。对坝的影响,爆破后取得的岩心和水压试验成果表明,混凝土和岩石结合面没有破坏。各段坝体均未发生转动现象。测缝计读数表明,坝段间的纵向和垂向平均相对位移约  $0.04\text{ cm}$ ,横向位移约为  $0.1\text{ cm}$ ,上述效果只能解释为由于传入岩体的爆炸能量较小,洞室爆破的振动强度被削减。这是因为炸药在洞室内的体积只占洞室开挖体积的一小部分,在大型洞内爆破,会有大量的爆炸能量被削减在洞室中。众所周知的两条破坏标准:一是振幅  $0.1\text{ cm}$ 。一是加速度  $1.0\text{ g}$ 。而岩塞爆破超过了这两条标准,并没有引起任何破坏。爆破结果表明:现行标准对于象休德巴斯工程的情况是很不够的,破坏标准不能单单依据振幅或加速度来确定。

## 4 结 语

(1) 洞室爆破、排孔爆破和洞室排孔结合爆破三种水下岩塞爆破方式各具特色,采用何种方式,应结合工程情况进行设计,并采用水工模型及爆破等试验加以验证,以保证“爆通、成型、安全”。随着施工机具及工艺水平的不断提高,加之排孔爆破利于施工等优点,排孔爆破的发展应用呈上升趋势。

(2) 在一定条件下,利用水下岩塞爆破方法建成大型隧洞的进口是可行的。当爆破点靠近已成坝体时,应考虑地震振动影响。休德巴斯工程大型水下岩塞洞室爆破说明,由于爆破的规模和型式以及建筑物形状的特殊影响,根据小型试验或已有的经验公式预定的振动,可能是错误的。一般的振动破坏标准不运用于高混凝土坝,所以应按照量测地点以及破坏的种类加以修改。水下岩塞爆破引起的在水中传播的振动可以忽略。

(3) 国外水下岩塞爆破技术发展很快。近十几年我国的岩塞爆破技术亦取得长足的进步,在“爆通、成型、安全”等三方面都满足了既定的要求,体现了我国应用岩塞爆破技术的特点,而且在爆破规模、药包布置、岩渣处理等方面都有所发展,在技术上有重大创新,有不少项目达到较高水平。

### 参 考 文 献

- 1 黄绍约 郝志信,水下岩塞爆破技术 水利电力出版社,1993年7月
- 2 郭宗彦摘译,挪威水下岩塞爆破 水力发电,1986年11月
- 3 郑国和 曾树州 李文全等,汾河水库隧洞岩塞爆破工程 水力发电,1996年1月
- 4 赵宗棣,水下岩塞排孔爆破的设计与施工 水利水电施工,1997年9月

### 作者简介

丁隆灼 男 中国水利水电第十工程局第一副总工程师 教授级高级工程师

(收稿日期:1998-06-24)

## 省水电学会水能规划及动能经济专委会和成都市水利学会 环境专委会联合举行“1998年四川‘世界环境日’学术交流会”

1998年6月4日,在“世界环境日”到来的前一天,四川省水力发电工程学会水能规划及动能经济专委会和成都市水利学会环境专委会联合在成都举行了“1998年四川‘世界环境日’学术交流会”,庆祝“世界环境日”的到来。出席此次会议的有来自省、市有关部门的领导、专家、学者、工程技术人员80余人。

会议由两专委会挂靠单位——国家电力公司成勘院白云隆副总工程师主持,胡志洪副院长致欢迎辞。接着进行大会交流,由省环保局、四川联合大学、省水电厅、成勘院、成都

气象学院、省水利院、成都水电校、成都理工大学以及成都环科院的领导、专家和工程技术人员在会上宣讲了各自的论文,分别就21世纪的环境保护、保护水资源、改善水环境以及能源开发与生态环境保护相结合水利水电工程进行的环保工作为内容在会议上进行了交流,介绍了有关环保方面取得的最新进展和信息。使与会者受益匪浅,整个交流会学术气氛浓厚,会议收到交流文章近10篇,在完成了预定的议程后会议圆满结束。

国家电力公司成勘院 李燕辉