

# 三峡船闸综合控制爆破技术

戴会超<sup>1</sup>, 朱红兵<sup>1</sup>, 严 鹏<sup>2</sup>

(1. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 三峡永久船闸土石方开挖量占三峡工程土石方开挖总量的 40%。为确保深槽直立墙和高边坡岩体稳定并在既定的工期内优质完成船闸开挖任务, 通过现场试验对爆破器材、爆破方式、各种爆破参数的选择、岩石爆破震速、围岩的保护层厚度等进行探索。研究包括深孔爆破、缓冲爆破在内的各种爆破方法的综合运用。试验结果表明深孔梯段孔间微差爆破、两次缓冲爆破、两次光面爆破、最终形成直立边墙的施工技术及采用非电起爆网路等槽挖综合爆破技术, 较之采用预裂爆破一次开挖到位或其他方式, 更为稳定、可靠、安全; 试验成果满足工程质量和进度的要求, 较好解决“永久船闸直立墙高边坡开挖”这一世界级施工技术难题。

**关键词:** 爆破工程; 控制爆破; 永久船闸; 三峡工程

**中图分类号:** TD 23; TV 145.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4426 - 06

## COMPREHENSIVE CONTROLLED BLASTING TECHNIQUE FOR TGP SHIPLOCK

DAI Huichao<sup>1</sup>, ZHU Hongbing<sup>1</sup>, YAN Peng<sup>2</sup>

(1. *China Yangtze Three Gorges Project Corporation, Yichang, Hubei 443002, China*; 2. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*)

**Abstract:** The earth and rock excavation volumes of the permanent shiplock account for 40 percent of the total of the whole Three Gorges Project(TGP). The study of the excavation technique is quite systematic and comprehensive to guarantee the construction success. The study includes the blasting gears and materials, blasting mode, parameters of blasting, initiating connection, control index of the velocity of particle vibration of rock, thickness of lateral preserved protective layer during trench excavation, thickness of the protective layer of bed rock, control index of initiating charge for single interval, assortment of explosive, construction tools and equipment as well as construction technology. The excavation technique adopted for the vertical walls is more reliable and much safer compared with the excavation mode such as pre-split blasting to excavate at one time or other modes. This technology is able to satisfy the requirements of construction quality and construction progress, successfully facing the challenge of the excavation of the world-class high vertical slopes of the permanent navigation shiplock.

**Key words:** blasting engineering; control blasting; permanent shiplock; Three Gorges Project

## 1 引言

三峡永久船闸是三峡水利枢纽三大主体建筑物之一, 布置在大坝左岸坛子岭北侧的山体中(永久船

闸闸室典型断面见图 1), 其工程规模巨大。永久船闸边坡不同于一般的人工陡高边坡, 船闸直立墙是深挖路堑式双线双向垂直边坡, 因深挖形成 4 条受地应力大面积卸荷影响的长、陡、高边坡, 是一种国内外理论和实践均无先例的深开挖、大面积卸

**收稿日期:** 2007 - 09 - 05; **修回日期:** 2007 - 11 - 05

**作者简介:** 戴会超(1965 -), 男, 博士, 1985 年毕业于华北水利水电学院水利水电工程建筑专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事水利水电工程方面的教学与研究的工作。E-mail: dai\_huichao@ctgpc.com.cn

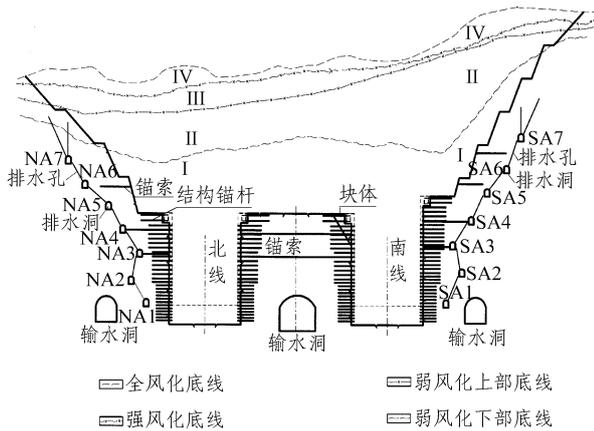


图 1 永久船闸闸室典型断面图

Fig.1 Layout of the permanent shiplock of TGP

荷特定情况下的人工岩石陡高边坡。

永久船闸主要施工特性和技术难题有以下几个方面<sup>[1]</sup>: 地质条件较复杂; 船闸结构复杂, 对地质条件反映比较敏感; 直立墙成型技术要求高, 边坡变形限制严; 锚固项目多、工程量大, 技术要求高, 施工条件差; 施工程序复杂, 分项工程立体交叉作业, 相互干扰大, 施工布置困难; 开挖工程量大, 工期紧; 施工安全问题突出。

自 20 世纪 50 年代以来, 微差爆破技术在各类爆破工程中已得到广泛应用。合理的延迟间隔时间可以使炸药的能量最大限度地用于破碎岩石, 并能减少震动、飞石、噪音和空气冲击波等爆破公害<sup>[2]</sup>。20 世纪 70 年代, 预裂爆破与光面爆破在我国葛洲坝水利枢纽工程和东江水电站的软、硬岩中获得成功之后便迅速推广开来。预裂爆破和光面爆破有效地控制了开挖面的超欠挖, 保证了边坡的稳定并大大减少边坡开挖量<sup>[1, 2]</sup>。面对永久船闸这样一个特殊的施工对象, 需要对现有的岩石爆破开挖技术进行进一步的整合与研究。

为了确保船闸深槽直立墙和高边坡岩体稳定并在既定的工期内优质完成船闸开挖任务, 在既定的深槽开挖爆破控制标准下<sup>[3]</sup>, 通过一系列的试验<sup>[4~12]</sup>, 提出了两次缓冲爆破、两次光面爆破加深孔梯段孔间微差爆破、最终形成直立边墙的槽挖综合爆破技术, 并将此技术成功应用于三峡永久船闸深槽开挖中。该技术较之采用预裂爆破一次开挖到位或其他方式, 更为稳定、可靠、安全; 试验成果满足工程质量和进度的要求, 解决了“永久船闸直立墙高边坡开挖”这一世界级施工技术难题。

## 2 永久船闸区域岩体物理力学参数

永久船闸区域沟谷发育, 基岩为闪云斜长花岗岩, 其内含有范围不大的捕虏体, 并有后期入侵的酸性岩脉, 花岗岩以中粗粒状为主, 石英含量约 20%, 属坚硬脆性岩石。捕虏体以角闪石英片为主, 呈带状分布于大岭东坡一带, 走向 250°~270°, 倾角 50°~80°, 分布范围长 1 250 m, 宽 35~50 m, 片理发育, 斜穿一闸室及三闸室岩脉的有辉绿岩和花岗岩两组, 与断层或裂隙相接触, 主要分布在一闸首及三、四闸室。闸室段有长度大于 40 m 的断层 120 余条, 其中 8 条横穿闸室, 断层长度 50~100 m, 永久船闸基岩岩体物理力学参数见表 1<sup>[3, 8]</sup>。

表 1 永久船闸基岩岩体物理力学参数表<sup>[3, 8]</sup>

Table 1 Physico-mechanical parameters of TGP permanent shiplock<sup>[3, 8]</sup>

岩石类型	风化程度	重度 (kN·m <sup>-3</sup> )	湿抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	岩体抗剪强度		岩体残余抗剪强度	
						f /MPa	c /MPa	f /MPa	c /MPa
闪云斜长花岗岩	微新	27.0	100.0	1.5	0.2	1.8	1.8	1.3	0.7
	弱风	26.8	50.0	1.0	0.2	1.3	1.0	1.1	0.4
	强风	26.5	20.0	0.5	0.3	1.0	0.5	0.9	0.2
	全风	25.0	1.0	1.0	0.4	0.7	0.1	0.7	0.1

## 3 综合控制爆破开挖方案的提出

永久船闸直立槽深达 68 m, 两线闸室之间保留 57 m 岩石中隔墩, 闸室开挖宽度 37 m, 需进行分层爆破。闸槽开挖卸荷后使岩体应力释放<sup>[13]</sup>, 导致边坡上部岩体松弛, 特别是中隔墩岩体处于三面临空状态, 类似于大型悬臂板结构<sup>[14]</sup>, 为使中隔墩岩体变形控制在设计允许范围内, 必须采取有效控制爆破措施, 减小爆破震动影响。如果 37 m 宽的槽一个梯段高度全断面一次爆破成型, 其边坡成型质量和岩体震动破坏程度难以控制, 建筑物基础满足不了结构要求。同时考虑到地下竖井及输水廊道距船闸边坡较近, 局部竖井井口与船闸边墙仅有 5 m, 闸室底板距地下输水廊道最大距离只有 25 m, 常规梯段爆破对竖井和边墙产生较大的震动破坏。因此, 本文研究了两次预裂(光面)、两次缓冲加深孔梯段孔间微差综合爆破技术。在槽内中部先进行掏槽深孔梯段微差、缓冲与施工预裂(光面)爆破, 其两侧

预留 3~5 m 宽保护层，再进行侧向保护层小梯段小孔径周边光面爆破。

显而易见，这种爆破技术对永久船闸高边坡岩体稳定是有利的，将 37 m 宽直立深槽分为 3~4 次爆破(在布置施工道路的一侧需进行扩槽爆破)。中部深孔梯段微差爆破两侧增加缓冲和预裂(光面)爆破，可以大大减弱爆破应力波和高温高压气体对保留体的冲击破坏，根据试验资料，一般深孔梯段爆破侧向影响范围达 6~8 m，采用施工预裂爆破加缓冲爆破，可将侧向影响减少到 3 m 以内。3~5 m 厚侧向保护层采用小孔径小梯段光面爆破技术，钻孔精度高，爆破药量小，边坡成型质量和岩体松弛变形易于控制。开挖强度与规模也能满足三峡工程预定工期要求，能充分发挥现有施工机械设备效率。

### 4 综合控制爆破开挖技术试验研究

为了检验上述方案的效果，并获得其具体的实施参数，中国长江三峡工程开发总公司建设部又针对该方案进行了一系列的生产性试验，集中研究了预裂爆破与光面爆破技术、缓冲孔起爆技术、深孔梯段孔间微差起爆技术以及保护层开挖技术等方案的实施重点与难点，取得了宝贵的第一手资料，为三峡工程永久船闸深槽开挖的顺利实施及控制爆破技术的发展积累了成功的经验。

#### 4.1 预裂爆破技术与光面爆破技术研究

预裂爆破的主要作用是形成边坡面和减震。对预裂缝宽度，国内外资料认为一般应在 1 cm 左右<sup>[2]</sup>。对于中等坚硬及其以下的岩石，易形成预定的预裂缝宽度，边坡面情况也较好。但在坚硬的花岗岩地区，形成 1 cm 宽的预裂缝较困难。

为了检验预裂爆破与光面爆破的效果，在永久船闸第二、三闸室北坡 160~170 m 进行了预裂爆破和光面爆破的对比试验，具体参数见表 2。

表 2 预裂爆破和光面爆破对比试验参数表

Table 2 Comparison of test parameters of pre-split and smooth blasting

类型	孔径 /mm	孔深 /m	抵抗线 /m	孔距 /m	药卷直径 /mm			堵塞长度 /m	线装药密度 / $(kg \cdot m^{-1})$			单耗 / $(kg \cdot m^{-3})$
					底	中	上		底	中	上	
预裂爆破	76			0.8	25				0.45			
光面爆破	89	11	1.2	0.7~0.8	32	25	25	0.8~1.0	1.6	0.4	0.18	0.55~0.60

其中预裂爆破的不耦合系数为 3.0，前沿台阶宽

8 m 左右，属于有临空面条件下的预裂爆破。预裂爆破后，测量完预裂缝的宽度，然后再实施设置了缓冲孔的梯段爆破，使预裂面出露。

试验结果：光爆面成型较好，壁面较平整、壁面的残留半孔率较高，残留炮孔内爆炸裂隙的数量和长度也较小且短；爆后基本无贴膏药(挂边)现象，光爆面清理工作量小；同时光爆时有临空面，且与缓冲爆破孔、主爆孔同时钻孔、起爆，起爆条件及延时较易控制。

光面爆破的效果如图 2 所示。



图 2 光面爆破效果图  
Fig.2 Result of smooth blasting

而预裂爆破形成的预裂缝宽度窄，且缝宽随深度加大而减小，不能充分起到预裂缝减震的作用；预裂爆破效果不理想，预裂面成型较差，壁面的平整度、壁面的残留半孔率不如光面爆破，残留炮孔内爆炸裂隙的数量和长度也较多且长；爆后大面积贴膏药(挂边)现象严重(预裂爆破效果见图 3)，增加了预裂面清理施工的难度；与光面爆破相比，对岩体的爆破震动作用及对保留壁面的爆破影响都比较大。



图 3 预裂爆破效果图  
Fig.3 Result of pre-split blast

因此，在永久船闸深槽开挖爆破中广泛推广应

用了光面爆破技术, 取得了较好的爆破效果。

### 4.2 缓冲爆破技术研究

为了保证预裂或光面爆破的质量, 研究了缓冲爆破技术的应用(见表 3(缓冲孔排数 1 排))。采用的方法有以下几个方面:

(1) 孔距适当加密, 缓冲孔孔距是主爆孔孔距的 0.5 倍。

(2) 适当减小抵抗线(缓冲孔的抵抗线即缓冲孔到主爆孔的距离, 要大于缓冲孔的孔距, 约为缓冲孔孔距的 1.3 倍)。

(3) 装药量较主爆孔少, 约为主爆孔装药量的 50%, 药量分布更均匀。

(4) 装药结构采用在炮孔下部用较大直径的药包连续装药、上部用较小直径的药包连续装药、在接近堵塞段时采用间隔装药的方式。

表 3 缓冲爆破孔参数表

Table 3 Parameters of buffer blasting hole

类型	孔径 /mm	抵抗线 /m	孔距 /m	药卷直径 /mm	堵塞长度 /m	单耗 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
梯段爆破	89	1.8	1.5	32(上)70(下)	1.5	0.55~0.60
侧向预留 (液压钻)	89	1.8	1.5	32(上)50(下)	1.5	0.55~0.60
保护层 (手风钻)	45	0.8~1.0	0.6~0.8	25(上部 3 m)~ 32(下部 1.1 m)	0.9	0.50~0.60

试验结果表明: 由于缓冲爆破孔的孔排距的相对加密, 单孔药量减小且相对均匀, 对减少爆区侧向及后冲向的拉裂及破坏起到较好的作用。

### 4.3 深孔梯段孔间微差起爆技术试验研究

深孔梯段爆破中选择孔间时差的选择对于爆破效果有重要影响, 也是本试验需要关注的重点之一。

根据经验, 主爆孔孔间时差一般大于 25 ms、小于 100 ms; 施工光爆孔滞后主爆孔 75~100 ms; 如采用施工预裂则超前相邻主爆孔 100 ms 以上; 且梯段两侧同时设置施工光爆孔(施工预裂孔)时, 两排施工光爆(预裂)孔至少相差 75 ms 以上。

试验爆区为 23.2 m×9.0 m(长×宽), 梯段高度为 10 m, 一次爆破方量约 2 100 m<sup>3</sup>, 起爆网路如图 4 所示。起爆网路的主要技术特点有:

(1) 主爆孔四排, 一孔一段(单孔药量约 35 kg); 两侧缓冲孔各一排, 二孔一段(单孔药量 17~18 kg); 施工光面爆孔 3~4 孔一段(单孔药量约 6.5 kg); 共分 39 段。

(2) 采用孔外延时网路, 孔内用高段别雷管延时, 孔外用低段别雷管接力。

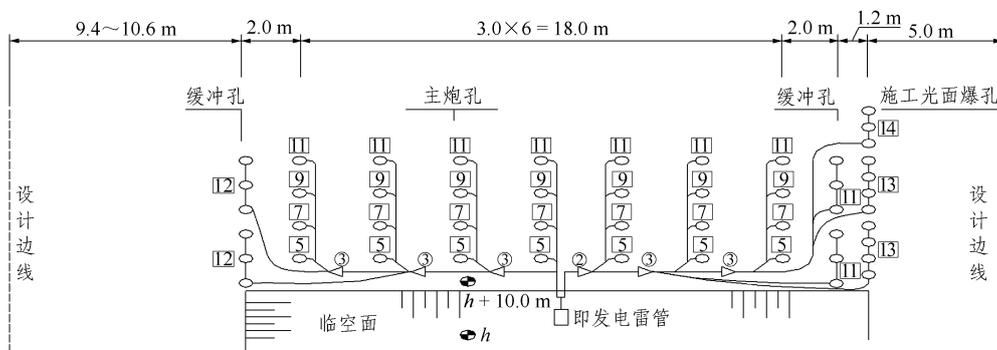
(3) 采用“V”型起爆方式, 达到宽孔距、小抵抗线, 改善爆破效果。

主爆孔的爆破参数: 梯段高度: 8~10 m; 主爆孔排数: 3~4 排; 钻孔孔径: 89 mm; 抵抗线 W: 不大于 2 m; 孔距: 2.5~3 m, 最后一排孔(称之为后排孔)2 m; 排距: 2.5 m, 后排孔 2 m; 钻孔超深: 1 m。

装药结构: 直径 70 mm 乳化炸药、连续装药, 后排孔与缓冲孔装药结构相同; 堵塞长度: 2 m; 单位耗药量: 0.55~0.60 kg/m<sup>3</sup>。

缓冲孔及施工光爆孔的爆破参数见前述。单响药量控制为: 主爆孔在 70 kg 内(一般为 45~50 kg), 缓冲孔在 35~40 kg 内, 施工光面爆在 30 kg 内(15~20 kg)。

试验结果表明: 深孔多段孔间微差起爆技术在永久船闸槽挖爆破中的应用, 有效的减轻了爆破对保留岩体的破坏。合理起爆网路的应用, 也可以大



注: □○内数字表示塑料导爆管段别。

图 4 典型起爆网路图

Fig.4 Typical buffer blasting of design

大改善了槽挖爆破的质量，减少对周边保留岩体的影响。15个段别的塑料导爆管，一般的起爆分段在30~50段的实施，使我国的开挖爆破水平上升到一个新高度。

#### 4.4 保护层控制爆破技术研究

根据深槽开挖施工程序，先进行槽挖深孔梯段微差爆破，并经施工光爆及周边光爆最终形成直立墙壁面。侧向保护层的开挖质量，是关系到直立边坡成型的关键。

预留侧向保护层的厚度由梯段爆破时对侧向保留岩体的影响程度和深度决定。采用声波测试爆后波速值的变化来确定其影响程度和深度。试验研究结果<sup>[15]</sup>表明，梯段爆破后影响形态为：第一层梯段爆破时侧向顶部无约束时：其影响深度呈上大下小的曲线形状，上部水平范围大(不良岩石地段3~5m，完整微新岩地段仅1.2m)，下部影响范围小(0.4~1.4m，多为0.8m)，因岩性不同而异。上部侧向影响范围较大的原因除本梯段爆破影响外，上一梯段爆破对底部的影响和上一台阶开挖后引起岩体的卸荷变形是主要因素。第一层以下各层梯段爆破有上部岩体压重作用时：其影响深度形状接近直线状，影响范围为0.4~1.4m。因此，可以认为预留侧向保护层厚度：第一层为5m，其以下各层一般为3m。

试验采用的开挖方法和主要爆破参数如表4所示。

表4 保护层开挖爆破参数表(以3m厚侧向保护层为例)  
Table 4 Parameters of blasting at protection layer(lateral protection layer with thickness 3 m as an example)

类型	孔径/mm	孔深/m	孔抵抗线/m	孔距/m	药卷直径/mm	堵塞长度/m	单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	
主爆孔	89	10	2.0	1.8~2.0	32	1.0~1.2	0.50~0.60	
液 压 钻	缓冲孔	89	10	1.8	1.5	32(上部)~50(下部)	1.5	0.55~0.60
	光爆孔	89	11	1.2	0.7~0.8	底部 32、中部 25 连续装药，上部 25 间隔装药	0.8~1.0	0.55~0.60
主爆孔	45	5	1.1	0.8~1.0	32	1.1	0.50~0.60	
手 风 钻	缓冲孔	45	5	0.9	0.6~0.8	25(上部 3m)~ 32(下部 1.1m)	0.9	0.50~0.60
	光爆孔	45	5	0.6	0.4~0.5	25(上部)~32(下部) 间隔装药	0.5	0.50~0.60

爆后效果：壁面以下爆破影响深度为40cm左右；壁面半孔率95%以上，壁面平整光滑，起伏差

一般为10~15cm；爆破裂隙少，仅在坡顶“松动区”分布少量爆破裂隙；爆破效果较好。

## 5 综合控制爆破技术的应用

在上述一系列试验的基础上，决定采用两次缓冲爆破、两次光面爆破加深孔梯段孔间微差爆破，最终形成直立边墙的槽挖综合爆破技术来进行永久船闸深槽的开挖施工。

三峡工程永久1995年4月17日开始土石方开挖，2001年1月11日开挖完成。经全过程监测结果表明，爆破开挖得到了较好的控制，在距爆区边界10m处，槽挖爆破岩石质点振动速度一般控制在10cm/s以内，符合永久船闸爆破开挖振动控制标准<sup>[6, 7, 11~15]</sup>。

开挖卸荷层主要在表层岩体，岩体松弛厚度为0.2~3.8m，一般在2m以下。岩壁面成型较好，保证了保留岩体的安全及边坡的稳定<sup>[6~8]</sup>。

## 6 结 论

(1) 试验研究后采用的深槽开挖施工程序、爆破器材、爆破方式、爆破参数、起爆网络、岩石质点振速控制指标、槽挖预留侧向保护层厚度、基岩保护层厚度及单段起爆药量控制指标、炸药品种、施工机具、施工工艺均适合船闸条件。

(2) 试验研究后采用两次缓冲爆破、两次光面爆破加深孔梯段孔间微差爆破、最终形成直立边墙的槽挖综合爆破技术，较之采用预裂爆破一次开挖到位或其他方式，更为稳定、可靠、安全；满足了工程质量和进度的要求，解决了“永久船闸直立墙高边坡开挖”这一世界级施工技术难题。

(3) 经全过程监测结果表明，爆破开挖得到了较好的控制，在距爆区边界10m处，槽挖爆破岩石质点振动速度一般控制在10cm/s以内，开挖卸荷层主要在表层岩体，岩体松弛厚度为0.2~3.8m，一般在2m以下。岩壁面成型较好，保证了保留岩体的安全及边坡的稳定。

### 参考文献(References):

[1] 张超然. 三峡永久船闸高边坡工程的实践及验证[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 22 - 27.(ZHANG Chaoran. Practice and experimental

- verification of TGP's permanent shiplock slope[J]. *Engineering Science*, 2001, 3(5): 22 - 27.(in Chinese)
- [2] 冯叔瑜, 张正宇, 刘美山. 爆破技术在水利水电工程中的应用和前景[J]. *工程爆破*, 2005, 11(4): 23 - 26.(FENG Shuyu, ZHANG Zhengyu, LIU Meishan. Application and prospect of blasting technique in hydraulic and water power engineering[J]. *Engineering Blasting*, 2005, 11(4): 23 - 26.(in Chinese))
- [3] 戴会超. 三峡永久船闸中隔墩岩石力学问题研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(5): 680 - 684.(DAI Huichao. Research on rock mechanics problems of division pier of the Three Gorges permanent shiplock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 680 - 684.(in Chinese))
- [4] 卢文波. 三峡工程临时船闸与升船机开挖中的爆破方案优化和爆破振动控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 497 - 502.(LU Wenbo. Optimization of blasting procedure and vibration control during excavation of temporary ship lock and ship lift in TGP[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [5] 钟作武, 徐春敏, 刘元坤. 三峡永久船闸开挖前后岩体应力测量研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增1): 1 831 - 1 834.(ZHONG Zuowu, XU Chunmin, LIU Yuankun. Study on the variation of geo-stresses before and after excavation of permanent shiplock of the TGP[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.1): 1 831 - 1 834.(in Chinese))
- [6] 陈和勇, 王建通. 三峡永久船闸深槽爆破开挖技术[J]. *人民长江*, 2003, 34(3): 8 - 10.(CHEN Heyong, WANG Jiantong. Blasting excavation technology for deep chamber trench of TGP's permanent shiplock[J]. *Yangtze River*, 2003, 34(3): 8 - 10.(in Chinese))
- [7] 王青屏. 长江三峡永久船闸开挖爆破施工技术[J]. *爆破*, 2000, 17(3): 66 - 70.(WANG Qingping. Excavation blasting implementation technique for permanent shiplock of TGP[J]. *Blasting*, 2000, 17(3): 66 - 70.(in Chinese))
- [8] 董学晟. 三峡永久船闸高边坡开挖中的岩石力学问题[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(5): 48 - 52.(DONG Xuesheng. Rock mechanics problems in excavation process of TGP Permanent Shiplock's high slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(5): 48 - 52.(in Chinese))
- [9] 石安池, 赵明华, 薛果夫. 三峡工程永久船闸高边坡岩体变形特征与机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(5): 638 - 642.(SHI Anchi, ZHAO Minghua, XUE Guofu. Characteristics and mechanism of deformation of rock slope of the Three Gorges Project shiplock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 638 - 642.(in Chinese))
- [10] 朱焕春. 某高边坡岩体声波测试与分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(4): 378 - 381.(ZHU Huanchun. Sonic wave measuring and analysis of high rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(4): 378 - 381.(in Chinese))
- [11] 付建刚, 王学东, 崔积红, 等. 高边坡控制爆破技术的应用[J]. *爆破*, 2000, 17(4): 36 - 38.(FU Jiangan, WANG Xuedong, CUI Jihong. Application of high slope controlled blasting technique[J]. *Blasting*, 2000, 17(4): 36 - 38.(in Chinese))
- [12] 姚战亭, 王国强. 光面爆破在三峡永久船闸开挖中的应用和发展[J]. *爆破*, 2000, 17(4): 28 - 31.(YAO Zhanting, WANG Guoqiang. Application and development of smooth blasting technique for permanent shiplock excavation in Three Gorges Project[J]. *Blasting*, 2000, 17(4): 28 - 31.(in Chinese))
- [13] 黄孝泉, 刘伟强. 三峡工程永久船闸中隔墩岩体稳定性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(1): 101 - 104.(HUANG Xiaquan, LIU Weiqiang. Stability Study on the separate mound rock of the permanent shiplock of the Three Gorges Project[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(1): 101 - 104.(in Chinese))
- [14] 吕爱钟, 莫晓明. 智能预测在三峡永久船闸中隔墩时效变形分析中的应用[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 1 066 - 1 068.(LU Aizhong, Mo Xiaoming. Application of intelligent prediction to time-effect deformation analysis for the partition frusta of the Three Gorges Permanent Shiplock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1 066 - 1 068.(in Chinese))
- [15] 熊诗湖, 周火明. 三峡永久船闸边坡岩体在复杂应力路径下的变形特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增2): 3 636 - 3 641.(XIONG Shihu, ZHOU Huoming. Deformation properties of rock mass of TGP Permanent Shiplock slopes under complex stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3 636 - 3 641.(in Chinese))