

水下岩坎爆破拆除技术分析

Analysis on Blasting and Demolishing Techniques of Underwater Rock Obstruction

夏旦 杨松林 钟平 石坤 张梦圆

Dan Xia Songlin Yang Ping Zhong Kun Shi Mengyuan Zhang

五凌电力有限公司 中国·湖南长沙 410000

Wuling Electric Power Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

摘要: 针对水电扩机工程进水口临时围堰水下爆破拆除的技术难点, 从数码电子雷管起爆系统、水下炸药选择、炸药单耗确定、起爆延期间隔、爆破块度控制、安全防护、水下清渣等几个方面进行了详细分析和论述, 以期对工程施工提供技术参考。

Abstract: Focusing on several technical difficulties in underwater blasting and demolishing construction of rock obstruction in front of water inlet in hydropower station, this paper make detailed analysis on electronic digital detanator, explosive selection, explosive use of rock unit blasting, blasting interval, blasting fragmentation control, prevention for negative effect, dredging of rock blocks, aiming to provide technical solutions for issues in underwater blasting and demolishing construction.

关键词: 水电站; 临时围堰; 水下爆破

Keywords: hudropower station; temporary embankment; underwater blasting

DOI: 10.12346/etr.v3i12.5072

1 引言

随着中国水电开发大潮接近尾声, 新开发水电工程逐渐减少, 各发电企业开始关注存量电厂的挖潜增效, 诸多扩机工程逐步实施。扩机工程在已有电站运行发电的条件下实施, 其施工条件与新建电站有所不同, 无法进行导流以创造干地施工条件, 导致其进水口工程的临时围堰拆除不可避免涉及到水下施工, 增加了施工难度, 体现在钻孔定位与施工、水下雷管与炸药选择、安全防护措施、水下清渣等很多方面, 都需要深入细致的论证分析, 方能保证施工进度、安全与造价^[1]。

2 水下爆破施工

2.1 数码电子雷管起爆系统

中国最早于 2006 年 6 月将澳大利亚 Orica 公司生产的数码电子雷管成功应用于长江三峡水利枢纽三期上游碾压混凝土围堰拆除, 随后国内很多企业开始了数码电子雷管的研发和生产, 如隆星 1 号数码电子雷管。数码电子雷管及其

起爆系统的推广应用使水下爆破逐步走向数字化、精细化。

数码电子雷管起爆系统主要包括数码电子雷管、编码器和起爆器三大部分。

①数码电子雷管是采用电子模块对起爆过程进行控制的电雷管, 其主要结构包括储能电容、点火头元件(引火头、起爆药、主药柱)、电子延期体(微型电子芯片)、双胶钢导线、密封塞、管壳。数码电子雷管的延期原理是雷管与起爆器之间双向通讯, 当数码电子雷管的主控芯片收到起爆指令后, 对芯片内部已知周期的脉冲进行计数, 当计数达到预定个数的脉冲后, 输出控制信号, 打开储能电容的能量释放开关, 从而引爆雷管。

②编码器是一种注册和识别联网数码电子雷管, 设定每个数码雷管起爆延期时间, 并能实现数码电子雷管及其网络在线检测的设备。每个编码器最多可为 200 发数码雷管进行编码及延期时间设置。

③起爆器是通过编码器与数码电子雷管通讯, 控制整个爆破网络的编程和起爆, 从编码器上读取整个起爆网络的雷

【作者简介】夏旦(1991-), 男, 中国湖南益阳人, 本科, 从事水工建筑物安全监测研究。

管数据,检查整个起爆网络工作性能。当数码电子雷管、编码器与起爆器组成的系统无任何错误时,起爆器发出信号起爆整个网络。

数码电子雷管(DED, digital electronic detonator)起爆系统的优点:

①安全性好。数码电子雷管芯片自带电容完成充电,芯片内有保护装置,能抗雷击、静电、射频、杂散电流、交直流、过载电压性能;数码电子雷管内置唯一身份编码,实现“雷管ID码、起爆密码、雷管壳体码”三码绑定,便于雷管信息化管理;必须使用专用起爆器且雷管、起爆器、起爆管理员三份密码一致时方可起爆。

②采用全并联网路,连接简单。

③准爆率高。可在线检测爆破网路,提示数码雷管和网路故障。

④延时精度高、范围广、延期时间可灵活设置。

⑤爆破效果好。能实现精准起爆,保证在光面爆破、预裂爆破等各孔起爆的同时性。能实现逐孔逐排精准微差爆破,爆堆均匀性和松散性较好,大块率相对较小。

⑥抗水抗压性能好。

⑦组网能力强大,提高爆破规模^[2]。

2.2 水下炸药类型

中国工业类抗水炸药的抗水标准一般为0.2MPa,只适用于小于20m水深的爆破工程。当水深大于20m时必须采用深水爆破专用炸药,主要为水胶炸药和乳化炸药。乳化炸药为“油包水”型结构,具有更好的抗水性能。为延长其水下浸泡时间,可采用塑料筒装的震源药柱。玻璃微球敏化的乳化炸药爆速大,猛度高,起爆感度好,更适合于深水爆破。在深水区进行爆破作业时需进行炸药试爆,以测试炸药在深水区的起爆性能,保证炸药在水中安全准时起爆。

爆速、猛度和爆力是炸药的关键性能指标。从爆破理论上说,炸药爆速最好与冲击波在岩体中的传播速度接近,这意味着坚硬岩石使用高爆速炸药,较软岩石使用低爆速炸药,这样才能充分发挥炸药的作用。

水深对爆破效果的影响:

①炸药性能指标降低。由于水压和水渗溶作用,炸药爆速、猛度、殉爆距离会降低。根据有关文献的实验数据,30m水深会使爆速降低26%,猛度降低33%。

②破裂半径减小。在其他条件不变的前提下,水深越大,爆破孔破裂半径越小。

③抛掷距离变短。水越深,水的阻碍越大,爆渣抛掷距离越短。

④增加炸药单耗。水下爆破的爆炸应力波传播到岩体与水的交界面时,只有一部分会反射回岩体中形成拉伸波,还有一部分会透射到水中形成压缩波,大幅降低反射拉伸波对岩体的破坏效应。因此,水压力作用会使水下破碎效果变差,水深越大影响越大。因此,水下爆破要达到与陆地爆破同样

的爆破效果,炸药单耗必须是陆地炸药单耗的2~4倍。

2.3 水下爆破炸药单耗

考虑水深和清渣设备能力的炸药单耗修正公式:

$$q_w = f(0.4 + 0.6n^3) \cdot (q/k_D^2 + 0.01H_w + 0.02H_c + 0.03H)$$

式中, $f(*)$ ——爆破作用指数 n 的函数, n 值根据水下清渣设备类型和大小选取,根据多个类似工程经验,铲斗挖泥船的 n 可取1左右,抓斗挖泥船的 n 值应在1~3;

q_w ——水下钻孔爆破的炸药单耗, kg/m^3 ;

q ——相同介质的陆地爆炸炸药单耗, kg/m^3 ;

k_D ——水下炸药爆速降低系数,即爆破介质所处水深条件下实测炸药爆速与陆地实测之比;

H_w ——覆盖层以上的水深, m ;

H_c ——覆盖层厚度, m ;

H ——梯段高度, m 。

为了减小大块率,增加爆堆松散度,给水下清渣创造条件,可采用“密集布孔、高炸药单耗、低单段药量”的爆破设计原则,炸药单耗可取值2.0~2.5 kg/m^3 ,从而将爆炸最大块径控制在30cm以内。

2.4 起爆延期间隔

对于硬度较高并且较脆的岩体,起爆延期间隔取小值,反之取大值。合理的起爆延期间隔可使得大块率降低20%。确定合理起爆延期间隔 t (ms) 的经验公式,一为根据抵抗线确定(瑞典兰格弗尔),即:

$$t = k \times w$$

式中, w ——抵抗线, m ;

k ——系数,单孔起爆为3~5,多孔起爆为8~12。或根据孔距计算,即:

$$t = a / (0.12 \times V_r)$$

式中, a ——孔距, m ;

V_r ——岩石的弹性波速, km/s 。

或根据下式:

$$t = 50d_c / q_w \sqrt{P_c r} \leq 1.1[a/d_c]$$

式中, d_c ——药包直径;

q_w ——炸药单耗;

P_c ——炸药密度;

a ——孔距;

r ——装药作用半径。

根据干扰降振的原理,当微差时间接近主振半周期时,

干扰降振效果最好。

微差爆破是一种延期爆破，延期时间从几毫秒到几十毫秒。微差爆破的作用原理：先起爆的炮孔形成单孔爆破漏斗，漏斗体内生成很多贯通裂纹，漏斗体外也产生很多细小裂纹，已形成的贯通和细小裂纹形成新的自由面；第二组微差起爆后，先起爆炮孔形成的自由面使后续炮孔的最小抵抗线和爆破作用方向发生变化，加强了入射波及反射拉伸波的破岩作用；已破碎岩块在抛掷过程中相互碰撞，产生补充破碎作用，使破碎粒径较为均匀。由于相邻炮孔先后以毫秒先后间隔起爆，改变了爆破震动在不同频带范围内的能量分布，所产生的地震波能量在时间和空间上较为分散，主震相位相互错开，减弱了爆破地震效应，微差爆破的地震效应比齐发爆破大约可降低 $1/3 \sim 2/3$ [3]。

2.5 爆破块度控制

炸药在水下岩体中爆炸时产生地震波，它包括介质内部传播的体波和沿地面传播的面波，体波在爆破近区（药包直径 $10 \sim 15$ 倍）传播，是岩石爆破破坏的主要原因；面波在爆破近区以外传播，是造成爆破震动破坏的主要原因。

爆破质量是水下爆破工程的关键，体现在两个方面：

① 爆破块度。比起陆地爆破，水下爆破的平均块度要小，大块率要低，因为大块无法清渣，水下二次解炮也非常困难。

② 爆堆松散度。爆堆松散度是衡量爆渣可挖性的重要参数，对水下爆破尤为重要。爆堆松散度一定要好，否则清渣效率会大幅降低，甚至无法清渣。可通过适当提高爆破单耗来增加爆堆松散度。

爆破块度是爆破效果最基本的评价指标，爆破块度的主要表征为均匀性、特征块度、大块率。决定爆破块度的主要因素为岩体特征（结构面特征、抗压强度、抗拉强度、波阻抗）、炸药类型、炸药单耗、装药结构、爆破参数、微差间隔。水下炸药类型是指乳化炸药和水胶炸药；炸药参数是指波阻抗和爆速；装药结构是指不耦合装药（药包直径）、连续装药和间隔装药、装药线密度和装药高度、炮孔堵塞长度；爆破参数是指孔径、超深、孔排距、炮孔布置形式、台阶高度、抵抗线、炸药单耗。

岩体特征是爆破块度的决定性因素。天然岩体在成岩过程中以及以后的地质历史时期遭受多次地质构造运动的破坏和损伤，在岩体内形成了裂隙、节理、层面、软弱夹层等各种地质结构面。这些地质结构面将岩体分割成大小不等、形态各异的天然岩块。地质结构面不仅控制着岩体的力学性质，而且控制着岩体的破坏形式。天然岩体的爆破实际是被地质结构面分割的天然岩块的再次破碎。炸药破碎岩石，一方面是使岩体产生内部破裂而形成新的断裂面，另一方面是使地质结构面扩展。靠近药包的岩体受到爆破冲击作用力较大，会形成一个或几个新的断裂面，岩体块度相对较小；离药包较远的岩体大部分沿节理裂隙等地质结构面张开，块度相对大些。

地质结构面与爆破孔的相对位置会影响岩体破碎效果。炮孔爆轰气体作用方向与地质结构面一致时，气体楔入结构面使其张开，或者沿结构面溢出，导致孔内压力急剧下降。爆破孔穿过的结构面条数越多，爆破质量也就越差。当爆生气体压力作用方向与地质结构面垂直时，有利于爆炸应力波传播和反射。

天然岩体特征无法改变，在爆破设计中可通过调整炸药单耗、装药结构、爆破参数和微差间隔来控制爆破块度。在诸多影响因素中，炸药单耗影响最大。随着炸药单耗的增加，平均破碎块度逐渐减小，但减小幅度变缓；炸药单耗增加到一定值后，破碎块度的改善效果就不明显了。因此，不同特征的岩体都有一个最佳炸药单耗，炮孔由矩形布置改为梅花形（前后排交错）布置，爆渣均匀度也会得到改善。减小抵抗线，在深孔之间插入适当数量的浅孔，也可有效降低大块率。

根据不同的理论和研究方法，岩体爆破块度预测模型可分为三类，即应力波模型、能量模型、分布函数模型。应用比较广泛的是 Kuz-Ram 块度分布函数模型，它是库兹涅佐夫（Kuznetsov）和罗森拉姆（Rosin-Rammler）模型的结合，前者研究爆破的平均块度，后者研究块度的分布特征。Kuz-Ram 块度分布函数模型建立了爆破参数和块度分布参数的定量关系，为爆破参数优化提供了一条可行的途径。

$$R = 1 - e^{-(x/x_0)^n}$$

$$n = (2.2 - 14w/d)(1 - e/w)[(a/w + 1)/2](L/H)$$

$$x_0 = x_{50} / (\ln 2)^{1/n}$$

$$x_{50} = 0.01Aq^{-0.8}Q^{1/6}(115/E)^{19/30}$$

式中， R ——小于某一粒径 x 的百分比；

x ——石料粒径，m；

x_0 ——特征粒径，即筛下累积率为 63.12% 时对应的块度尺寸，m；

n ——块度均匀性指标；

w ——最小抵抗线，m；

d ——炮孔直径，mm；

e ——钻孔精度偏差，m；

a ——孔距，m；

L ——底板标高以上的装药长度，m；

H ——梯段高度，m；

x_{50} ——筛下累积率为 50% 时对应的块度尺寸；

A ——岩石系数，与节理裂隙发育程度有关，中硬

岩取 7, 节理发育的坚硬岩取 10, 节理不发育的坚硬岩取 13、14;

q ——陆地爆炸炸药单耗, kg/m^3 ;

Q ——单孔装药量, kg ;

E ——炸药相对(重量)威力, 铵油炸药取 90~100, 2号硝铵炸药取 100~105, TNT 炸药取 115^[4]。

2.6 其他施工措施

为了尽可能减少水下岩坎拆除工程量, 以加快施工精度, 降低工程成本, 围堰拆除可采用揭顶、削薄、水下部分拆除的施工顺序, 即预先拆除堰顶的子围堰, 再对围堰内外两侧进行削薄, 最后拆除水下部分。

在两侧边坡面和拆除底板高程面上布置预裂孔, 其主要作用是能够在爆破区与建筑之间形成一道人为的裂缝, 从而使得爆破地震波的传播速度大幅减小, 以降低爆破震动危害。

由于水下围堰岩坎上窄下宽, 根据具体情况可采用堰顶钻垂直孔或小角度倾斜孔、围堰内侧全水平钻孔、或围堰内侧缓倾角水平孔与堰顶垂直孔相结合的设计方案。

水下钻孔浮式平台是利用水的浮力作为支撑反力来承受竖向施工荷载的刚性浮体水上作业平台, 浮体采用驳船或由浮箱拼装而成。平台浮体结构通过设置水下锚固点或地锚来承受水平荷载及因水平或竖向荷载引起的平台倾斜。可分为单体船平台、双体船平台和浮箱式平台。水下钻孔浮式平面位置定位采用 RTK 测量, 钻孔深度利用测深绳检查。为避免欠挖, 水下钻孔要超过底板一定深度。水下钻孔普遍采用 OD (Overburden Drilling) 法, 即双套管钻进法, 它通过水下深厚覆盖层, 实现水下岩层内钻孔。在技术条件和设备要求得到满足条件下, 大直径钻孔优于小直径钻孔。

为避免造孔完成后出现塌孔, 需要及时安装高强度 PVC 套管进行护孔。PVC 管采用外接, 确保整个管内壁光滑, 在接头处没有内坎, 便于后期装药。装药时, 用细绳将炸药与竹片或竹炮棍捆绑好, 再用胶布捆绑加固, 把雷管插入炸药中, 然后把加工后的炸药沿着套管放入炮孔中, 按孔深的 2/3~3/4 装填炸药。药柱长度小于 3m 时装 1 个起爆体, 装在炸药长度的下部 1/3 处; 药柱长度大于 3m 时, 装 2 个起爆体, 各装在药柱长度的 1/4 和 3/4 处, 中间可用砂筒隔开。爆破孔内间隔装药、孔内分段、下段先起爆的起爆方式可以降低爆破振动带来的危害, 又可以提高爆破效果。因为炮孔充满水, 为防止堵塞悬空, 可使用粒径不大于 15mm 的砂石或含砂碎石堵孔, 以防止炸药上浮。为降低表层块度, 水下炮孔堵塞长度应较陆地短。在水下爆破工程中, 堵塞长度大多取 10 倍炮孔直径。

V 型逐孔逐排起爆, 可增加两侧岩块的碰撞。起爆方向朝向河道, 避免因爆破飞石对临近闸门造成破坏, 以控制爆破有害效应。

预留岩坎水下爆破和水下清渣的质量检验和评价需要开

展水下地形测量和水下视频检查。水下地形测量包括平面定位测量和水深测量。平面定位测量包括前方交会和极坐标法、卫星定位法, 水深测量包括吊绳法、水下单波束法、水下多波束法。水下视频检查可采用水下机器人下潜拍摄。发现底板浅点时, 确定其定位, 重新钻孔爆破处理^[5]。

3 水下爆破安全防护

3.1 爆破震动控制

根据爆破震动传播的萨道夫斯基 (Sadaovsk) 经验公式, 最大单响药量 (kg):

$$Q = R^3(V/k)^{3/\alpha}$$

式中, R ——测点到爆心的距离, m ;

V ——质点允许振速, cm/s ;

k 、 α ——与爆破点地形、地质条件有关的系数和衰减系数, 根据《水电水利工程爆破施工技术规范》, k 取值范围为 50~350, α 取值范围为 1.5~2.0。

引入高差因子的最大单响药量 (kg) 为:

$$Q = (VR^\alpha H^\beta / k)^{3/(\alpha+\beta)}$$

式中, H ——爆破点至测点的相对高差, m ;

β ——高差修正系数^[6]。

GB6722—2003《爆破安全规程》规定水电站及发电厂中心控制室设备的爆破安全允许标准为 0.5cm/s。DL/T5135—2001《水电水利工程爆破施工技术规范》规定电站机电设备(包括仪器仪表、主变压器)的爆破安全允许标准为 0.9cm/s。

3.2 水击波控制

水击波峰值压力 (MPa) 可采用经典的库尔 (Cole) 公式:

$$P = k(Q^{1/3} / R)^\alpha$$

式中, k 、 α ——与水域条件、炸药性质、爆破方法有关的系数和衰减指数, α 取值一般为 0.95~1.65;

Q ——产生水击波的等效炸药量, 即长度等于 5 倍药卷直径的炸药量, kg ;

R ——爆源至测点的距离, m ^[7]。

削减水击波一般依靠气泡帷幕。气泡帷幕可削减水击波压力 35%~90%。爆破水击波的一部分能量在气泡帷幕表面形成杂乱无序的漫反射而散失, 一部分能量被压缩气泡吸收转化为热能, 消耗在气泡的膨胀过程中, 从而达到防护的目的。气泡帷幕能够有效消减水击波的高频部分, 通过气泡帷幕的只有低频部分, 且能量大幅削弱。气泡帷幕对水击波有害效应的削减主要受控于气泡与防护对象之间的距离、帷幕数量、气流量。随着气泡帷幕防护距离减小、气泡帷幕数量增加, 气泡帷幕的削减效果越好。增大供气压力和气流量,

延长气泡在水中的停留时间,对水击波的频率和幅值有明显的衰减作用。可根据工程需要设置2~3排钢管。当设置2排钢管时,每排钢管上钻两排喷气孔,两排喷气孔有一定的发生角度,使各排喷出的气泡相互碰撞,以搅动水流,增加帷幕厚度。

3.3 其他防护措施

为防止爆破飞石对混凝土结构表面的破坏,混凝土边墙等竖直面可采用悬挂竹跳板、废旧汽车轮胎等进行防护,混凝土底板覆盖沙袋或砂石料,闸门前堆放沙袋构筑防护墙、门槽填充泡沫等措施。根据《水运工程爆破技术规范》,当水深大于6m时可不考虑飞石的影响^[8]。

4 水下清渣

水下设备清渣能力对水下爆破工程也至关重要。

4.1 炸药单耗

水下清渣设备的能力强,则炸药单耗可相对小一些;否则,要求爆破的单耗足够大,以充分破碎岩体,提高爆渣的抛距离,使爆渣充分移动,提高水下挖渣设备的清渣效率。

4.2 松散度

水下清渣设备对爆堆的松散系数要求远比陆地清渣设备高,不同类型水下清渣设备的要求也有较大差异,如抓斗挖泥船对松散系数的要求比铲斗式挖泥船高。

对于具备通航条件的施工现场,可利用挖泥船进行清渣,不具备通航条件的需要自制拼装式钢浮箱平台。

抓斗挖泥船可通过更换抓斗的提升和启闭钢缆长度来满足施工中不同挖掘深度的需要。根据所挖对象,抓斗可分为普通斗、半齿斗、全齿斗。普通斗用于抓取较松软的泥土和粘土,半齿斗用于抓取较坚实的泥土和小石块,全齿斗用于抓取石渣和卵石。水下石渣清理采用重型六瓣全齿斗效率会更高。抓斗挖泥船的定位依靠锚泊系统,一般在船头和船尾布设双八字锚缆,在施工水域通航侧抛设锚缆,非通航侧布设岸缆。通过锚缆的收放控制船体的前后左右移动扩展工

作面。挖泥船定位一般采用卫星定位系统进行实时定位^[9]。

5 结语

对于水电扩机工程的进水口预留岩坎水下爆破,要选择数码电子雷管起爆系统,以实现数字化、精细化爆破施工,要选择玻璃微球敏化的塑料筒装乳化炸药,炸药单耗约是陆地的2~4倍,以将爆炸最大块径控制在30cm以内,增加爆堆松散度,给水下清渣创造条件。起爆选择V型网络,逐孔逐排起爆。爆破参数优化可依据Kuz-Ram块度分布函数模型。爆破振动控制依据萨道夫斯基(Sadaovsk)公式计算最大单响药量。水击波控制依据库尔(Cole)公式。削减水击波一般依靠气泡帷幕技术。对于水下清渣,具备通航条件的工程,可利用挖泥船,不具备通航条件的需要自制拼装式钢浮箱平台。

参考文献

- [1] 刘庆,陈文基.新型数码电子雷管及其起爆系统的开发与应用[J].爆破器材,2017,46(6):43-47.
- [2] 赵根,吴新霞.数码雷管起爆系统在三峡三期碾压混凝土围堰拆除爆破中的应用[J].工程爆破,2007,13(4):72-75.
- [3] 汪齐,胡坤伦.深水静压作用下含水炸药性能的研究[J].火工品,2017(3):41-44.
- [4] 吴兴霞,张文焯,刘美山.三峡三期RCC围堰拆除深水爆破药量计算研究[J].工程爆破,2006,12(4):1-3.
- [5] 赵根,黎卫超.水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1):1-12.
- [6] 王振雄,顾文彬,秦入平,等.水下深孔爆破间隔装药起爆时差影响的数值模拟研究[J].爆破器材,2012,41(3):8-15.
- [7] 岳志坤,李瑞泽,李福千,等.爆破方法对岩石爆破块度分布影响的试验研究[J].爆破,2019,36(3):9-15.
- [8] 武仁杰,李海波,于崇,等.基于统计分级判别的爆破块度预测模型[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):141-147.
- [9] 甘孝清,胡代清,王延洪.预留岩坎拆除爆破水下探查技术研究[J].水力发电,2012,38(7):45-48.