

发电洞竖井外壁围岩爆破对混凝土质量的影响

董安建¹, 邓铭江², 周小兵², 贺建国²

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011; 2. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:“635”水利枢纽已浇筑的发电洞竖井混凝土受到多种强腐蚀介质的侵蚀影响, 需在竖井外壁进行加强性工程防腐处理。根据竖井的结构特点, 为了确保竖井及其上部坝体的稳定, 采用保留原井壁混凝土, 并沿竖井外壁围岩开凿环形天井的施工方法。着重讨论竖井外壁围岩环形天井爆破开挖方案, 提出井壁混凝土爆破安全振速不得大于 7 cm/s, 新浇混凝土(7d 龄期)安全振速不得大于 3 cm/s 的各有关爆破控制参数和相应的减振措施, 并通过爆破前后混凝土井壁声波测试对比分析, 进一步验证爆破方案的可行性和安全性。

关键词:竖井; 围岩; 爆破开挖; 安全振速

中图分类号: TV542; TV738

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2001)01-0049-04

“635”水利枢纽位于新疆北部额尔齐斯河中游, 其发电洞竖井混凝土浇筑完成后, 在进行回填灌浆时, 发现混凝土井壁部分已遭侵蚀破坏。造成侵蚀破坏的主要的原因是竖井混凝土直接浇筑在黄钾铁矾蚀变矿脉上, 岩石裂隙水中 pH 为 3~4; SO_4^{2-} 含量 8645~12487 mg/L; Mg^{2+} 含量 2675 mg/L; Cl^- 含量 1056~1775 mg/L, 属于复合型严重侵蚀性介质。竖井混凝土同时受到 4 种侵蚀介质的腐蚀影响, 其腐蚀破坏的程度、侵蚀性介质的多样性以及破坏机理的复杂性都是以往水利工程建设中从未遇到过的。通过多案分析比较, 防腐处理采取保留原井壁混凝土, 沿竖井外壁围岩分三段开凿 1 m 宽的环形天井(见图 1), 并在岩石面涂抹 3~4 cm 厚的丙乳砂浆和 PU3 防腐涂料的方案, 环形天井选用高性能磨细矿渣混凝土重新回填。由于围岩的强度约为竖井混凝土强度的 2 倍, 在竖井外壁围岩爆破开挖时, 既要开凿较为规则的断面, 又要确保竖井混凝土的质量不受影响, 无形中增大了爆破开挖方案的实施难度。本文着重研究发电洞外壁围岩爆破对井壁混凝土以及分段开挖分段处理时对新浇混凝土质量的影响和爆破开挖的控制指标。毫无疑问, 质量影响评价和控制指标的严格界定是爆破开挖方案可行性和安全性的核心问题。

1 竖井外壁围岩爆破对混凝土质量的影响

1.1 对井壁混凝土的影响

爆破振动一般用质点振动速度来表示振动强

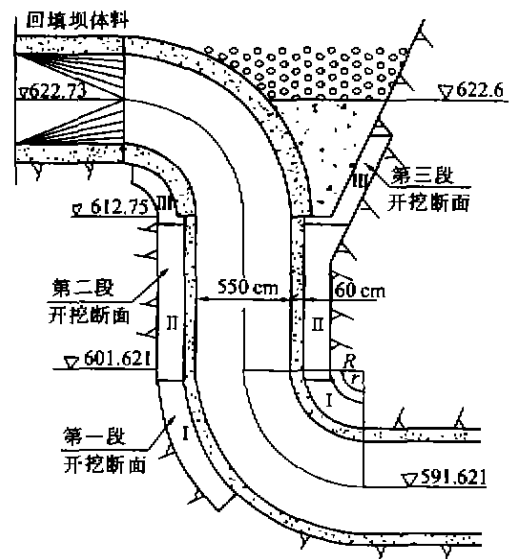


图1 发电洞竖井剖面

度, 质点振动速度与一次爆破的装药量大小、测点至爆源的距离、地质地形条件和爆破方法等因素有关。GB6722-86《爆破安全规程》^[1]规定水工隧洞允许的安全振动速度为 10 cm/s。SL47-94《水工建筑物岩石基础开挖施工技术规程》^[2]对混凝土爆破安全质点振动速度又作了进一步更为安全的规定, 要求混凝土 28 d 龄期安全质点振动速度不大于 7 cm/s。当爆破弹性应力波穿过破裂圈入射到岩石和混凝土井壁中, 在遇到自由面时(竖井内壁)反射成为反射纵波和反射横波。对井壁表面质点来说, 同时受到入射纵波应力和从自由面反射纵波应力以及反射横波应力

三者的合力作用,当其拉伸主应力大于混凝土的抗拉强度时,轻则将会造成混凝土产生裂隙,重则直接造成自由面的混凝土“片落”。一般来说,由于自由面的存在,入射波和反射波相互叠加,而离自由面愈近,拉伸主应力值的增长愈显著.这就意味着自由面附近的井壁混凝土是处于比较容易破坏的拉伸应力状态之下.因此,严格控制井内壁自由面混凝土质点振动速度,是确保爆破安全的关键^[3]。

1.2 新浇混凝土爆振影响机理分析

混凝土中的水泥石是由晶体、胶体、未完全水化的颗粒及游离水分与气孔等组成的不均质结构体,在其硬化过程的不同龄期,这些组分所占比例不同,直接影响着水泥石的强度,最终决定了混凝土的强度.随着龄期的增加,内部胶凝体的增多及密实度增加,水泥石具有越来越高的强度和胶结能力.试验表明,短龄期混凝土的强度一般较低,如正常养护条件下的普通硅酸盐水泥3d龄期的强度只有28d龄期的30%左右。

当开挖爆破振动荷载作用于短龄期的混凝土建筑物时,由于混凝土内部的胶体及晶体尚处在发展之中,其数量少,密度低,胶结能力差,极易形成随机分布的微裂隙,从而破坏了内部不断致密的结构.微裂隙不仅降低了水泥石胶结力,而且会妨碍胶结体强度的正常发展,这种结果导致混凝土最终难以达到设计应有的强度.只有将爆破的振动速度控制在允许范围内,振动荷载对混凝土结构的破坏性影响才可能避免。

2 新浇混凝土爆振控制指标

根据SL47-94的要求,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值.安全质点振动速度应由爆破试验确定,若难以获得试验成果,可参照SL47-94附录C的规定执行,即:3~7d龄期混凝土,

安全质点振动速度为2~5cm/s。

发电洞竖井段外壁围岩爆破试验实测点位布置见图2,震源设在3号点上方2.2m处,1号点距震源2.7m,2号点距震源5.8m.测试结果(见表1)表明,震源附近3号测点最大加速度为97.2cm/s²,最大震速1.98cm/s,爆破振动为瞬态特征(见图3),振动衰减很快,爆破振动持续最长时间只有0.85s。

表1 发电洞竖井外壁围岩爆破测试结果

点号	药量/g	距离/m	最大加速度/(cm·s ⁻²)	最大速度/(cm·s ⁻¹)	最大位移/mm	主频率/Hz	持续时间/s
1	125	5.8	<8				
2	125	2.7	<8				
3	80	2.2	94.07	1.98	3.047	6.67	0.7
3	80	2.2	97.20	0.93	1.157	10.0	0.45

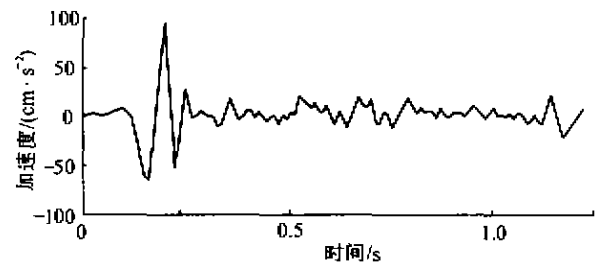


图3 3号测点加速度时程曲线

发电洞竖井在完成第一段外壁围岩环形开挖及防腐处理后,为了便于第二段开挖,预留了2~1.5m高的环形洞,也就是说围岩爆破点距新浇混凝土表面上部约1.5m,最大起爆药量为50g时,质点振速为2.97cm/s.混凝土采用掺磨细矿渣高性能配合比方案,混凝土浇筑7d后,围岩开始爆破,7d龄期混凝土的强度为31.7MPa,达到设计强度的61.7%(见表2)。

表2 环形天井回填混凝土不同龄期强度对比分析

龄期/d	强度/MPa		强度百分比/%	
	恒温养护	自然养护	恒温养护	自然养护
3	22.6	13.0	43.4	26.3
7	34.8	31.7	66.8	61.7
14	40.9	37.8	78.5	73.5
28	52.1	51.4	100	100

注:恒温养护为试验室20℃水中恒温养护;自然养护为发电洞内现场自然养护、平均温度10℃。

根据现场抗压强度试验资料并与试验室资料对比分析,高性能磨细矿渣混凝土粘聚性、保水性好,强度发展快,现场7d龄期的强度基本达到设计要求.考虑到竖井新浇混凝土对防腐抗渗的特殊重要作用以及爆破对丙乳砂浆防腐层的影响,爆破开挖必须慎之又慎,在依据相关规范和参照三峡工程施工经验^[4]的前提下,对发电洞竖井新浇混凝土安全质点振速还应再提高一个档次,作更严格的要求,即:新浇混凝土必须达到7d龄期,质点最大允许振速不能超过3.0cm/s.根据研究制定的竖井段外壁

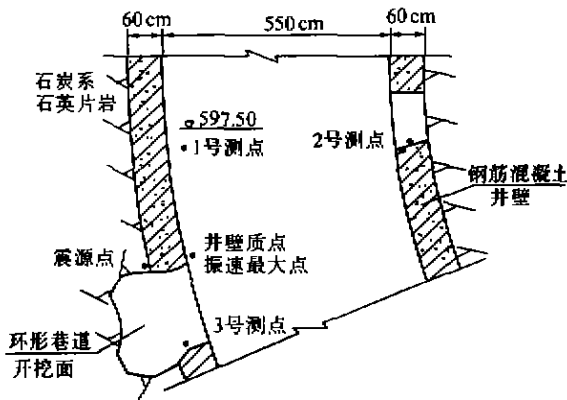


图2 发电洞竖井下弯段外壁围岩爆振测点位置示意图

围岩控制爆破的施工方案和爆破测试分析,保证上述控制指标不超限是可以做到的。

3 竖井井壁混凝土爆振控制方案

3.1 竖井外壁围岩控制爆破方案及主要控制指标

根据发电洞竖井上、下弯管段与垂直段布设伸缩缝的结构特点,并考虑到爆破开挖对整个混凝土井筒结构稳定的安全要求,采用开挖一段处理一段,自下而上分三段进行开挖、防腐处理并用高标号抗硫酸盐混凝土回填浇筑的施工方(见图1)。爆破开挖分两个主要步骤,即:底部环形巷道开挖和上部爆破崩落围岩开挖。依据井壁钢筋混凝土爆振测试成果,确定采用如下爆破参数。

a. 下部环形巷道开挖爆破参数。下部环形巷道是在竖井下弯段底部混凝土井壁外侧围岩中开掘,是整个开挖工程的关键,为了保证井壁安全,必须保证炮孔施工质量,严格控制装药量,打好减震孔和掏槽孔。炮孔布置见图4。主要爆破参数如下:①孔距。爆破孔 25~30 cm,减震孔 8~10 cm。②孔深。掏槽孔 70~80 cm,辅助、周边孔 60~70 cm,减震孔 80~90 cm。③单孔装药量。掏槽孔 50~75 g,辅助、周边孔 40~50 g。④起爆。为了控制一次起爆药量,最大限度地减少地震破坏,全断面分三次起爆,每次采用毫秒差起爆方式,其相邻时间间隔为 50~75 ms。先爆掏槽孔(6~8 个孔),一次起爆药量 350~400 g,最大段起爆药量 75 g。第二次起爆辅助孔(10 个孔),起爆药量 500 g,每段起爆药量 50 g,最后起爆周边孔(10 个孔)药量不超过 500 g,每段起爆药量不超过 50 g。

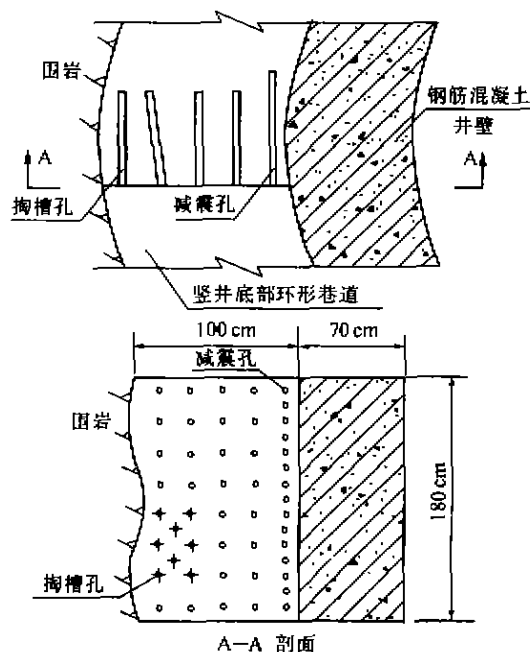


图4 竖井底部环形巷道开挖炮孔布置

b. 上部崩落围岩爆破参数。底部环形巷道开挖完成后,形成向下的临空面,在上部围岩向上方倾斜 20°左右打爆破孔和减震孔,形成阶梯形逐步向上攀升的螺旋式开挖断面(见图5)。其主要爆破参数如下:①最小抵抗线 20~30 cm;②孔距 30~35 cm;③孔深 70~80 cm;④单孔装药量 40~50 g;⑤堵塞长度不少于 40 cm;⑥减震孔孔距 8~10 cm,孔深 80~90 cm;⑦采用非电毫秒雷管起爆,最大段起爆药量不超过 50 g。

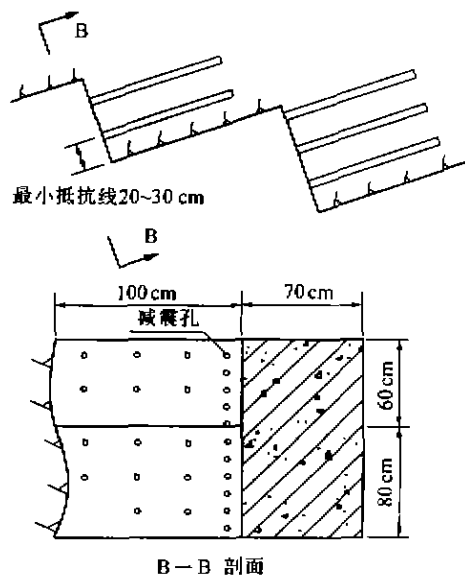


图5 竖井外壁上部围岩崩落炮孔布置

3.2 最大振动速度验算

SL49-94 推荐的质点振动速度传播规律的经验公式^[2]为

$$v = K \left(\frac{W^{1/3}}{D} \right) \quad (1)$$

式中: v 为质点振动速度, cm/s; W 为最大一段的起爆药量, kg; D 为爆破区药量分布的心形至观测点或建筑物、防护目标的距离, m; K, a 为与地质条件、岩体特征有关的参数,一般由爆破试验确定。

发电洞竖井围岩为中硬岩石, a 的取值范围为 1.5~1.8。根据围岸爆破实测资料,当最大起爆药量为 80 g,距离爆点 2.2 m 处混凝土井壁最大振速为 1.98 cm/s。按最不利情况 a 取 1.8 计算,求得 K 值为 37.25。将 K, a 值代入式(1)计算井壁质点振速最大点的振速(见图2)。掏槽孔距井壁 1.3 m,最大起爆药量为 75 g,井壁最大振速为 4.91 cm/s;辅助及周边孔距井壁最近距离为 1.0 m,最大起爆药量 50 g,井壁最大振动速度为 6.17 cm/s,均小于质点安全振动速度。

3.3 爆破前后混凝土井壁声波监测分析

通常采用同部位爆破前后的波速变化率 η 来判断对岩体或混凝土破坏影响的程度:

$$\eta = 1 - C_{p1}/C_{p2} \quad (2)$$

式中: C_{p1} 为同部位爆破前波速, cm/s; C_{p2} 为同部位爆破后波速, cm/s. 当 $\eta > 10\%$ 时判断为爆破破坏或混凝土质量较差^[2].

为了评价发电洞外壁围岩爆破对混凝土井壁的影响程度, 在第一段竖井下弯段开挖时, 分别在 594 ~ 597 m 高程段, 北、东、南壁各选取了一个抽样检测区, 每区由 5 个风钻孔组成, 孔深 0.8 m, 孔距 1.5 m 左右, 呈菱形分布, 在爆破开挖前后, 利用两钻孔进行跨孔声波测试 (见图 6, 其中 t_p, t_s 为纵横波在两孔间的传播时间). 共测得 32 组纵横波值. 从爆破前后的波速变化率分析, 爆后除北壁 3 组钻孔的波速由 4000 ~ 4200 cm/s 下降到 3500 ~ 3700 cm/s, 波速变化率为 12% 外, 其余各钻孔的波速变化率均小于 10%.

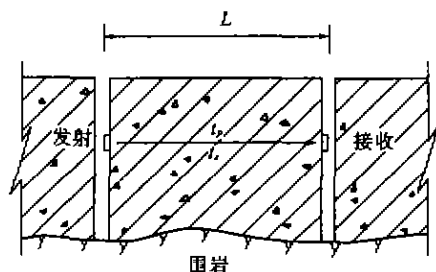


图6 竖壁钻孔声波测试示意图

北壁个别钻孔波速变化率大于 10% 的主要原因, 一是北壁测区直接布置在混凝土井壁外侧侵蚀较严重的地带; 二是爆前井壁内表面就有两条微细裂缝. 因此, 认为波速变化率较大主要是由于局部混凝土质量较差所致.

虽然抽样检测的面积只有 6.16 m², 仅占整个开挖区面积 (95 m²) 的 6.5%, 但由于井壁混凝土和围岩条件比较均一, 爆破方案和爆破参数一致性强, 且便于控制, 因此, 抽样测试的结果具有较强的代表性, 可以作为判定爆破影响大小的依据.

鉴于竖井段局部混凝土浇筑的质量较差, 加之侵蚀破坏等原因, 为了进一步减轻爆破对混凝土井壁的影响, 实际操作中还研究增设了一些其它减震措施, 如: ①合理选取微差起爆的间隔时间和起爆方案, 保证爆破后的岩石既能得到充分松动, 又能最大限度地减小振动波的强度. ②将岩石爆破的最小抵抗线控制在 20 cm 左右, 防止由于抵抗线过大, 起爆药量较小而造成岩石松动不落等影响爆破效果, 并不致于使大部分能量消耗在弹性波的传播振动上. ③将混凝土井壁的保留厚度由原爆破设计方案的 70 cm 增加到 80 ~ 100 cm (浇筑断面岩石的超挖量一般为 30 ~ 40 cm), 进一步降低竖井内壁质点振动速

度. ④在岩石和混凝土的接合部位钻凿密集的减震孔. 通过以上加强保护措施完全可以确保混凝土井壁的安全.

4 结 语

a. 通过爆破试验确定爆破参数, 严格控制质点振动速度, 并通过爆破前后井壁混凝土波速变化率的对比分析, 是评价爆破方案和爆破效果的科学手段.

b. 微差分段起爆、炮孔布置、最大起爆药量和各种加强性减震措施是爆破方案的实质性内容. 实践证明, 由于没有岩石爆破的临空面, 第一段竖井底部环形巷道的开挖是整个爆破开挖工程的难点. 环形巷道开凿完成后, 形成向下的临空面, 自下而上的围岩崩落控制爆破就相对容易多了. 这也是借鉴有色采矿中“溜矿”采矿施工技术的成功范例.

c. 爆破开挖施工组织设计方案合理可行, 爆破开挖的效果比较理想, 日开挖量 (3 个工日) 平均为 15 ~ 20 m³, 并且使竖井混凝土的质量得到了切实保障.

参考文献:

- [1] 张其中. 爆破安全法规标准选编[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [2] SL47-94, 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S].
- [3] 陶颂霖. 爆破工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [4] 舒大强. 爆破震动对新浇混凝土质量的影响及控制[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(4): 5 ~ 8.

(收稿日期: 1999-12-17 编辑: 熊水斌)

(上接第 48 页)

导流洞的工程质量, 经电站业主、原电力部西北管理局和黄河上游水电工程建设局严格检测认定: 李家峡水电站导流洞的开挖、锚固、喷混凝土、混凝土衬砌、固结灌浆、闸门金属结构制造安装等六个单项工程, 均被评为优良工程, 即李家峡导流洞工程被综合评为优质工程 (由中国水利水电第四工程局李家峡施工局完成的《(软地质) 导流隧洞快速掘进施工技术》, 已通过青海省科委的成果鉴定, 1999 年获青海省科技进步三等奖).

导流洞快速掘进为整体工程赢得了时间, 使河道及时而顺利地实现截流, 为枢纽工程基础开挖以及混凝土浇筑创造了良好的条件.

参考文献:

- [1] 方绍信. 大断面丰富地下水软地质水工隧洞的“新奥法”悬吊拱施工技术[J]. 青海水力发电, 1992(4): 1 ~ 11.

(收稿日期: 1999-09-03 编辑: 马敏峰)