

严寒条件下退役大坝拆除爆破参数优化研究

高贵华

中国水利水电第十六工程局有限公司 福建 福州 350000

摘要:为实现退役大坝在严寒条件下精细化爆破拆除,保护新建枢纽建筑物不受爆破危害影响,通过数值仿真的方法研究和验证冰冻混凝土的爆破参数,得出了混凝土结冰后抵抗线差异逐渐增大,炸药单耗显著增加的结论,并基于丰满水电站常温条件爆破施工参数,开展爆破损伤的数值仿真计算,采用对称边界条件模拟群孔的爆破效应给出了相同爆破参数在常温和严寒条件下混凝土爆破损伤分情况,提出了严寒地区大体积混凝土爆破的优化参数,安全、可控的完成了退役大坝爆破拆除。

关键词:严寒条件下; 退役混凝土大坝; 爆破拆除; 孔网参数; 优化选择

引言

被誉为“中国水电之母”的丰满水电站大坝,始建于日伪时期,特定的历史环境导致水电站的设计仓促、施工粗放、管理混乱、缺乏科学规划,冬季施工未采取保温措施,坝体浇筑过程中大量使用劣质混凝土,致使丰满老坝投入运行即发现坝面冻融溶蚀呈大面积蜂窝状,廊道内出现严重渗水、漏水现象,坝体产生较大变形,电站运行存在较大的安全风险。

为保证丰满老坝的安全和电站正常运行,建国后有关部门对该坝进行了多次加固,但均没有彻底消除隐患。2010年2月国家发改委本着“彻底解决、不留后患、技术可行、经济合理”的原则批准了对大坝进行重建,使“水电之母”获得了新的生命,新坝建成后,病坝于2019年正式退役并实施爆破拆除。

丰满水电站作为国内第一个混凝土重力坝拆除工程于2018年12月初动工,2019年5月完工,工期6个月,其中有4个月属于冬季爆破施工。丰满区冬季11月~3月平均气温为-3.2~-17.8℃,平均最低气温为-9.1~-24.5℃,多年极端最低气温为-42.5℃。丰满老坝共60个坝段,拆除部位为6号~43号坝段,缺口尺寸686.0m×27.8m,拆除混凝土26万余m³,拆除爆破工程属于大体积混凝土控制爆破。

为保证长期重复爆破荷载作用下老坝坝体的动力稳定性,施工采用现场试验、工程类比、理论分析等方法探讨丰满老坝优化老坝拆除爆破参数,为严寒条件下混凝土重力坝拆除的精细爆破技术提供了依据。

1 混凝土冰冻前后台阶爆破参数研究

丰满地区冬季岩体冰冻最大深度约1.0~1.5m,老坝混凝土长期存在冻融溶蚀现象,冻胀影响深度参考岩体冰冻深度不小于1.0m。冰冻状态混凝土中含水孔隙部位

结冰,混凝土整体性有所增强。冰的波阻抗介于混凝土和水之间。冰与混凝土组合体的整体波阻抗应当大于混凝土组合体,而已有的工程实践表明,完整性更好的混凝土波阻抗更大。已有的研究均表明,岩土体被冰冻后强度参数与本构关系均向完整性更好的方向发展。冰冻混凝土虽与冰冻岩体存在一定区别,但其本质相同,均将原来的水介质联系变为冰介质连接,因此混凝土的物理参数变化特征可以部分借鉴岩体^[1]。丰满水电站老坝爆破拆除采用台阶爆破的方式,因此首先基于经验或半经验公式,比较混凝土冰冻前后台阶爆破参数的变化。

1.1 单位体积消耗炸药量

已有的研究均表明炸药单位体积消耗量(简称单耗)与混凝土性质、炸药性能、自由面条件、起爆方式和破碎块度要求等有关,但严寒条件对炸药单耗的影响更多体现在混凝土本身的物理性质,因此丰满冬季爆破着重从混凝土性质改变的角度讨论炸药单耗的差异,选取合理的单位炸药消耗量,条件允许时需要通过试验或长期生产实践来验证,但通常也可以参照岩石坚固性系数与炸药单耗对应表格(如表1-1所示)选取单位炸药消耗量^[2]。

表1-1 岩体单耗与坚固性系数对应关系列表

岩石坚固性系数	0.8~2	3~4	5	6	8	10	12	14	16	20
单耗(kg·m ⁻³)	0.40	0.45	0.50	0.55	0.61	0.67	0.74	0.81	0.88	0.98

混凝土冰冻后,从宏观角度可等效为弹性模量更高的混凝土,因此严寒条件可能导致混凝土的坚固性系数发生变化。参照岩石的坚固性系数与岩体的单轴抗压强度关系,其表达式如下:

$$f = \frac{\sigma_c}{10} \quad (1-1)$$

根据Barton等对岩体参数的相关研究,可用下式来描述单轴抗压强度与弹性模量的对应关系。

$$\sigma_c = mE_c^n \quad (1-2)$$

针对丰满水电站老坝混凝土, m 和 n 分别取0.005和2.9。结合表2-1推算得严寒和常温条件下爆破单耗的变化关系,从而得到不同孔隙率的岩体在冰冻前后的单耗对比曲线(如图1-1)。

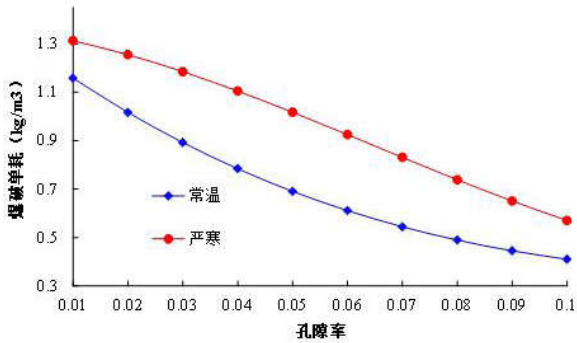


图1-1 不同含水率混凝土冰冻前后的爆破单耗对比

从图中可以看出,相比常温情况,考虑严寒条件下混凝土结冰后炸药单耗显著增加。

1.2 抵抗线与孔间距

抵抗线是台阶爆破的重要参数之一,孔距的取值一般与爆破的目的有关,前苏联爆破工作者建议孔距与抵抗线的比例(间距系数)取为0.8~1.2,我国大多数取1~1.5。由于普遍认为孔间距与抵抗线存在一定比例关系,因此主要选取其中的一个指标讨论。这里计算严寒条件下冰冻层岩体抵抗线的变化特征,根据广泛采用的前苏联巴隆公式计算抵抗线的数学表达式如下。

$$W = \sqrt{\frac{P}{qm}} \quad (1-3)$$

式中 W 为抵抗线长度, P 为炮孔集中装药度, m 为炮孔间距系数, q 为炸药单耗。

计算得到冰冻条件下混凝土爆破抵抗线变化特征,如图2-2所示。

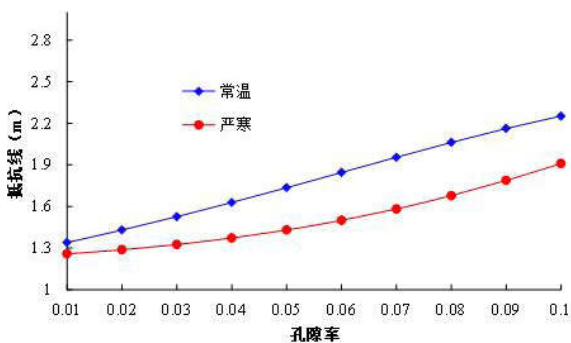


图1-2 不同含水率混凝土冰冻前后的爆破抵抗线对比

考虑混凝土结冰后爆破抵抗线变小。随着混凝土孔隙率的增加,冰冻导致的抵抗线差异逐渐增大。由于爆破拆除区附近存在大量的需保护对象,确定合理的抵抗线对控制爆破效果和降低爆破振动具有重要作用。

1.3 预裂孔线装药密度

老坝拆除过程中需要采用预裂爆破将拆除坝段和保留坝段分离并形成轮廓面。为了保证预裂爆破效果,需要选择合理的线装药密度。由于预裂孔的装药量小,相应的爆炸应力波强度比较小,更容易受到冰冻混凝土的影响。预裂爆破线装药密度的计算公式比较多,这里仅选择其中的一个公式进行严寒和常温条件的对比。

$$\delta = 0.36[\sigma_c]^{0.63} \cdot a^{0.67} \quad (1-4)$$

式中 δ 为线装药密度, a 为预裂孔间距。由此可以得到严寒和常温条件下的线装药密度随孔隙率的变化特征,如图所示。

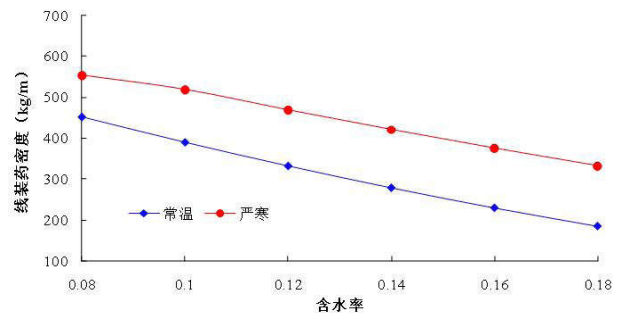


图1-3 不同含水率混凝土冰冻前后的预裂线装药密度对比

从图中可以看出,严寒条件下混凝土预裂爆破的线装药密度增加。对两条曲线进行拟合,可以得到不同含水率的混凝土在严寒条件冰冻混凝土的预裂爆破线装药密度增加量,如下式所示。

$$\Delta\delta = 166\eta + 54 \quad (1-5)$$

可以看出冰冻混凝土预裂爆破线装药密度的增加与混凝土含水率较为密切,如果在冬季爆破施工中不对预裂爆破参数进行调整,可能会影响轮廓面成型效果。

2 严寒条件混凝土爆破参数优化

2.1 严寒条件爆破对混凝土损伤研究

由于爆破过程本身的复杂性,无法得到精确的理论解。目前常常采用爆2. 园林栽培技术对园林树木抗逆性的影响研究

破动力数值仿真的方法对爆破过程进行精细和定量研究,我们采用爆破损伤数值仿真的方法研究和验证冰冻混凝土的爆破参数调整方法。基于丰满水电站常温条件爆破施工参数,开展爆破损伤的数值仿真计算,采用对称边界条件模拟群孔的爆破效应,爆破孔径90mm,药

径70mm，孔深6m，堵塞长度1.5m，图2-1给出了相同爆破参数在常温和严寒条件下混凝土爆破损伤分布图。

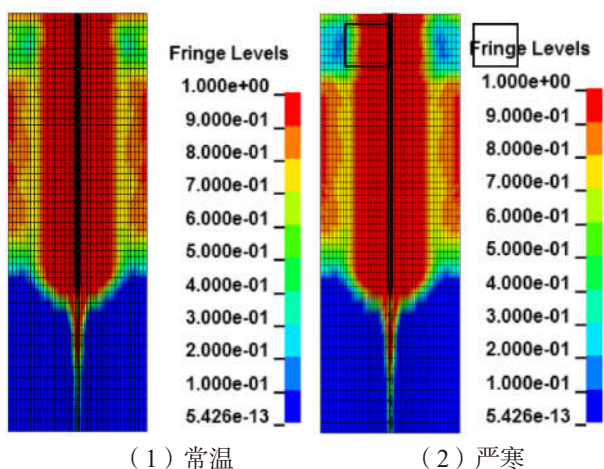


图2-1 常温与严寒条件下混凝土损伤分布图

可以看出，在混凝土表层冰冻后，爆破损伤差异主要体现在冰冻层，冰冻状态下混凝土爆破损伤的分布程度相比常规条件有明显降低。冰冻混凝土明显存在损伤区低于0.2的区域，这表明如果在冬季不进行爆破参数调整的前提下，表层混凝土的大块率将明显增多。

在冰冻状态下表层混凝土区域爆破损伤系数基本小于0.5，表明如不进行适当的参数调整，表层出现大块的几率大大增加，不利于后续清渣作业。根据计算得到的爆破损伤分布特征，可以看出严寒条件对混凝土台阶爆破的影响主要集中在表层，这部分混凝土冰冻后强度有所增加，可通过适当减小孔距来增强爆炸破碎效果。因此对严寒条件下混凝土台阶爆破的孔距进行调整，分别计算不同孔距爆破损伤分布。当孔间距较小时，混凝土破碎程度分布较为均匀；随着孔距的增大，炮孔上部大块增多；孔间距2.0m时孔口附近出现了明显大块。由此可见，孔距对冰冻层混凝土爆破效果的影响显著；但从实际工程角度，孔距过密不利于提高施工效率。因此老坝混凝土爆破拆除的主爆孔宜采用1.5m孔距。

2.2 优化后单耗

丰满水电站老坝拆除爆破为大体积钢筋混凝土的控制爆破。常态或碾压混凝土的强度和硬度相当于中硬岩石，水工围堰爆破拆除的炸药单耗一般取 $K = 0.50 \sim 0.70 \text{ kg/m}^3$ 。考虑到钢筋混凝土重力坝结构特性，故对不同部位炮孔采用不同的单耗：对于位于坝体垂直面外侧的竖直孔，采用一般单耗 $K = 0.70 \text{ kg/m}^3$ 无法保证破坏表层钢筋网，则存在内侧混凝土不充分破碎的风险，故计划加大炸药单耗 $K = 1.00 \text{ kg/m}^3$ ；为保证下游侧坡面的破碎效果，采用了炸药单耗 $K = 1.10 \text{ kg/m}^3$ 。

由于开挖完成后，缺口两侧及底板需要浇筑防护混凝土，因此在高程239.9m处钻设1排水平预裂孔。同时在5#坝段距离6#坝段1.0m和44#坝段距离43#坝段1m处各钻设1排垂直预裂孔或光爆孔，预裂孔线装药密度初步定为 600g/m 。

3 结论

3.1 通过对冰冻前后混凝土爆破单耗、抵抗线的研究，得出了混凝土结冰后炸药单耗显著增加，爆破抵抗线变小，随着混凝土孔隙率的增加，冰冻导致的抵抗线差异逐渐增大的结论，证明了调整混凝土爆破参数的必要性。

3.2 通过严寒条件爆破对混凝土损伤研究，结合爆破施工条件，调整了拆除爆破的孔距参数。

3.3 经过前期若干个坝段爆破拆除施工对控制标准、爆破设计、施工工艺和组织流程进行调整与验证，逐步实现了爆破施工技术精确数值化所需的孔网参数，基本实现了混凝土重力坝精细爆破拆除的各项技术要求。

参考文献

- [1]杨阳, 李祥龙, 杨仁树, 等. 低温岩石冲击破碎分形特征与断口形貌分析[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(6): 632-639.
- [2]高峰, 杨根, 熊信, 等. 低温条件下边坡岩石动态力学特性实验研究[J]. 工程科学学报, 2022.21(7): 104-108.