

# 液态二氧化碳相变致裂技术在建全抽水蓄能电站中的应用

王奕兵, 苏志勇, 黄晓华, 张跑胜

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 都江堰 611830)

**摘要:**随着碳达峰和碳中和目标的实施,抽水蓄能电站建设迎来了高速发展新机遇<sup>[1]</sup>。重庆云阳建全抽水蓄能电站在项目核准后无筹建期,三通一平等前期工程与主体工程同步实施。该工程的 15 号道路作为连接进场公路和下水库右坝顶唯一的一条交通要道急需快速打通,部分路段的石方边坡需要开挖以满足设计要求。以该工程为依托,阐述了在建全抽水蓄能电站道路工程未完成爆破审批且周边环境复杂条件下,采用二氧化碳相变致裂技术取得的工程进度可控,安全可靠,社会效益显著的过程。

**关键词:**建全抽水蓄能电站;液态二氧化碳;相变;致裂技术

中图分类号:TV7;TV52

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)增 2-0151-05

## Application of Liquid Carbon Dioxide Phase Change Fracturing Technology in the Construction of Jianquan Pumped Storage Project

WANG Yibing, SU Zhiyong, HUANG Xiaohua, ZHANG Paosheng

(Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Dujiangyan Sichuan 611830)

**Abstract:** With the implementation of carbon peak and carbon neutrality goals, the construction of pumped storage projects has ushered in new development opportunities<sup>[1]</sup>. Construction of the major project will begin immediately after the program is approved. There is no preparation period for the construction of Yunyang Jianquan Pumped Storage Project. Preliminary projects such as water, electricity, roads and site leveling were implemented simultaneously with the main project. Road No. 15 is the only traffic artery connecting the approach road and the right dam top of the lower reservoir and needs to be opened quickly. The stone slopes of some sections need to be excavated to meet the design requirements. Based on this project, the process of using carbon dioxide phase change fracturing technology to achieve controllable engineering progress, safety and reliability, and significant social benefits under the conditions of the construction of the pumped storage project road project without blasting approval and complex surrounding environment is described in this paper.

**Key words:** Jianquan Pumped Storage Project; Liquid carbon dioxide; Phase change; Fracturing technology

### 1 概述

近年来,随着我国经济社会的快速发展,风、光等新能源大规模发展<sup>[2]</sup>,电力系统对调节电源的需求更加迫切。抽水蓄能电站凭借其技术成熟、安全经济、能够促进可再生能源广泛利用等优势形成了投资、建设、运营的热潮,正步入高质量发展新阶段。

重庆云阳建全抽水蓄能电站是国家“十四五”规划开工和重庆市“十四五”规划重点实施项目,

总装机容量为 1 200 MW(4×300 MW),枢纽建筑物主要包括上水库、输水系统、发电系统和下水库四个部分,为一等大(1)型工程,承担着重庆市电力系统调峰、填谷、储能、调频、调相和紧急事故备用等功能任务。场内规划有 16 条道路作为上水库、下水库和输水发电系统的施工通道,且部分道路与当地省道、县道和村道连通,为当地村民出行提供方便。

鉴于电站进场道路和下水库右坝顶之间仅靠

收稿日期:2024-06-22

一条村道相连,其总长度为1 320 m,现状为泥结石路面,宽度为3 m,是下水库右岸村民出行的唯一交通通道。为满足工程需要并兼顾当地村民出行,设计单位将该村道设计扩建成7.5 m宽的混凝土道路,道路编号为15号,将其作为下水库大坝土石方开挖和填筑的运输主干道。15号道路K0+000~K0+180段的内侧山体陡峭,外侧临河。为不侵占河道并确保路基宽度,设计采用削坡、支护方案对路堑边坡进行处理,该边坡土方开挖高度约为25 m,开挖量约为21 000 m<sup>3</sup>,岩性以泥岩和砂岩为主。鉴于该道路沿线民房密集且以土坯结构居多,有5户房屋离土方开挖区最近点不足30 m,且因开挖区毗邻进厂交通洞、泄洪放空洞、排水料场、竖井式泄洪洞等主体建筑物,道路沿线埋设有天然气管道、通讯线路、高压线路、供水管路等附属设施,施工条件十分复杂且艰巨。据此,项目部对所采用的开挖方案进行了比选与分析并择优选择了施工方案。

(1)机械凿石开挖。对于风化及软弱岩石等开挖面少、工程量小的零星土方采用常规履带式破碎锤直接开挖。但其开挖效率低,对机械磨损大<sup>[3]</sup>,综合成本高。

(2)爆破开挖。对于岩石强度高、开挖深度和高差大、工程量大、部位集中的土方通常采用爆破开挖,其效率高,进度快,综合成本低。但在爆破作业前需进行安全评估、公安备案,其审批严格、程序复杂,周期相对较长,每次爆破均需进行爆破安全监理和爆破振动监测,且爆破时可能会产生一定的有毒有害气体污染环境<sup>[4]</sup>,爆破产生的振动亦对周边民房、主体建筑物、附属设施产生一定的影响,安全风险较大。而对于工程前期的零星部位、小方量土方开挖若实施爆破其综合成本高,适用性较差。

(3)液态二氧化碳相变致裂技术。通过机械钻孔,装填致裂管,将开挖面岩体胀裂形成块状,局部采用机械解小后装车运出场。该项施工技术组织简便,能够节省爆破需要的行政审批环节,不会产生爆破振动,对周边建筑物干扰小,极大地降低了安全风险,其岩体胀裂后破碎速度快,

较机械凿岩开挖效率高,综合成本低。对于作业面周边环境复杂、工期相对紧张、短期内无法快速组织爆破施工的项目宜采用。

鉴于15号道路K0+000~K0+180段地理位置特殊,且其封闭施工工期只有20 d,项目部根据现场实际情况并结合类似工程成功的经验,在该段石方边坡开挖方案进行技术、经济比较后最终选定采用液态二氧化碳相变致裂技术替代传统的爆破和机械凿石开挖方案,提前5 d完成了节点目标,节约了成本,经济效益明显,社会评价良好。

## 2 液态二氧化碳相变致裂技术

### 2.1 二氧化碳的物理性质

二氧化碳(化学式:CO<sub>2</sub>)通常以气体形态存在,无色无味,其密度较空气大,略溶于水<sup>[5]</sup>。在标准状态下,气体二氧化碳的密度为1.997 L/m<sup>3</sup>。温度低于31.26 °C或压力大于7.38 MPa时,二氧化碳可被压缩成液态;在释放压力后会迅速膨胀并气化。

### 2.2 技术原理

液态二氧化碳在封闭的致裂管中通电受热后迅速气化,其体积将膨胀至原体积的500~600倍,所产生的气体导致致裂管内的压力急剧上升、超过致裂管预设的安全极限时管内的气体瞬间释放,产生高速气流和压力波将岩石胀裂。这是一种利用二氧化碳物理性质的新兴岩石开挖技术。

### 2.3 所使用的设备及参数

液态二氧化碳相变致裂设备由储液罐、充装机、空压机、致裂管组成。这些设备的具体型号与参数为:

(1)储液罐:用于储存液态二氧化碳,其带有液晶显示盘,可显示详细的参数信息;其存储容量为499 L,重量为499 kg,尺寸为2 100 mm×750 mm×100 mm。

(2)充装机:在精确设定的压力条件下将存储罐中的液态二氧化碳充填进定制的致裂管中。采用进气阀控制液态二氧化碳的输入量,通过空压机将其压缩到设定的压力以确保致裂管安全。对于充装形成的多余气体通过出气阀及时释放,整

个充填过程稳定运行,严格控制液态二氧化碳充装的流量和压力以确保在现场充装时既安全,又高效。充装机的功率为 4 kW,尺寸为 1 250 mm×590 mm×1 150 mm。充装一根致裂管只需时 2 min,其功率小,速度快,效率高、运行安全、稳定。充填液态二氧化碳时需采用电子称和电子导通器进行检验。采用电子称实时称量致裂管中的二氧化碳质量;采用电子导通器检查致裂管内电路的连接是否正确。通过系列检查可以避免质量偏差或电路失灵影响致裂效果。

(3)致裂管:规格为  $\Phi 52\sim 109$  不等。该项目选用  $\Phi 100$  致裂管,其为二氧化碳相变致裂技术的核心,包括储液管、加热管、释放管和定压泄能片等部分。储液管由高强度合金制成,承受着极高的压力,旨在保证在高压环境下安全存储液态二氧化碳。加热管的功能为加热储液管中的二氧化碳,迅速将其从液态转变为气态,进而产生巨大的压力。当压力达到设定的阈值时,储液管中的定压泄能片将会破裂,通过释放管迅速释放高压气体进而产生强大的致裂效果。单管充气量最大为 8 kg,膨胀压力可达到 270 MPa,从通电致裂到结束仅需时 4 s。二氧化碳致裂管见图 1。



图 1 二氧化碳致裂管示意图

## 2.4 适用范围

根据施工技术特性和设备参数指标,结合工程实际和应用案例,液态二氧化碳相变致裂技术主要适用于:(1)露天石料的开采;(2)井下煤矿的

开采与掘进,特别适用于瓦斯煤矿的开采;(3)周边民房多、村庄密集,组织爆破施工受限区域;(4)工程前期爆破手续不全而导致无法爆破、工期紧张时可采用。

## 2.5 技术优势

(1)其热反应过程在密闭的管体内腔中进行,低温致裂,喷出的  $\text{CO}_2$  具有抑制爆炸和阻燃作用,不会引爆可燃气体;

(2)既可定向致裂,又可延时控制,特别是在特殊的环境下(如居民区、隧道、地铁、井下等环境复杂条件)实施过程中振动小,无破坏性振动和地震波,对周围环境无破坏性影响;

(3)振动和撞击均无法激发发热装置,因此其充装、运输、存放具有很高的安全性,实施过程中不会产生哑炮;

(4)管理相对简便,不需要建立火工产品库;其工艺操作亦简单、易学,操作人员少,对操作人员的专业化程度相比爆破低;

(5)致裂能力可控,可以根据使用环境、对象的不同设定能量等级;

(6)致裂时无粉尘、飞石,不产生有毒有害气体,躲炮距离近,可迅速返回工作面连续作业;

(7)石材开采时不破坏其纹理结构,成材率与效率较高。

## 3 施工方法及参数

项目部根据 15 号道路 K0+000~K0+180 段的地形条件与周边施工环境和工期等要求制定了专项施工方案,明确了施工参数,旨在为现场施工提供技术指导。

### 3.1 总体施工程序

总体施工程序为:施工准备→测量放线→致裂孔钻孔→液态二氧化碳充装→致裂管填塞→联网→安全警戒→通电致裂→安全检查→大块石解小→下一循环。

### 3.2 施工方法及参数

(1)施工准备。作业人员和设备进场后必须进行安全、技术交底,让一线作业人员熟知钻孔的间、排距、钻孔深度等技术参数,了解设备的操作规程和操作要点以及安全注意事项,确保施工安

全以达到预期的效果。

(2)测量放线。施工准备工作完成后,由测量员采用全站仪精确测量放线,核实石方的开挖高程、桩号,对每个孔位进行定位并编号进行标记。每开挖一层,测放一层。

(3)钻孔。为使钻机能够顺利进入现场作业并按设计要求钻孔,必须提前平整钻孔平台,使其具有足够的宽度以保证钻机作业安全,移动自如,并能够按照设计要求的方向钻孔;钻孔前必须清除其表面的浮渣。

该段道路开挖的总高度为25 m,计划分5层开挖到设计高程,每层的高度约为5 m。根据分层高度并结合致裂管管径,最终选用CM351履带式潜孔钻施钻,成孔直径为110 mm,钻孔间排距为1.5 m×1.5 m,钻孔深度为5~6 m。钻孔完成后及时做好孔口保护,防止泥土、碎石等杂物进入孔内影响致裂管的填塞。钻孔的间、排距可根据岩石强度、每次致裂的效果进行动态调整。

致裂需要具有较好的临空面,应将其最小抵抗线尽量控制在1.0~1.5 m之间以确保致裂时能量尽可能地临空面释放。随着开挖高度的下降,当岩石强度增大时,应适当减小最小抵抗线以使致裂效果更佳。

(4)液态二氧化碳的充装。液态二氧化碳充装前应对致裂管进行仔细地检查,查看其是否存在破损,阀门等是否处于关闭状态。提前安排专业人员充装二氧化碳,为致裂管填塞做好准备。液态二氧化碳充装时,安全员全程旁站监督,技术员现场指导,2~3名操作工人协助完成。每根致裂管充填完成后采用电子称和电工用万能表进行质量检验和通电测试以确保致裂管的充装精度,避免因电路系统失灵影响到致裂效果。

(5)致裂管的填塞。致裂管充装完成并经检查合格后,使用机械配合人工将其搬运至钻孔作业面逐孔安装,并对起爆线路做好保护。采用软绳挂自制简易挂钩从孔口顺着孔壁均匀、慢速将其下放至孔底,防止起爆线路撞击破坏;致裂管放至孔底后采用粉状泥土封孔,孔壁之间回填越密实其致裂效果愈佳。二氧化碳致裂管填塞情况见图2。



图2 二氧化碳致裂管填塞照片

(6)联网。致裂管安装完成后,将致裂管上的通电路全部串联,接头采用绝缘胶带缠紧并仔细检查。联网完成后,立即进行安全警戒,将开挖区内的人员和设备撤离至100 m以外,安全员发出通电信号后即可引爆预裂管。

(7)安全检查。待致裂管起爆10 min后方可进入作业面,由安全员检查是否存在危石、大裂缝等影响施工人员和设备的安全,如发现安全隐患,待对其处置完成后方可进入作业面施工。

(8)大块石解小。开挖面的岩石被膨胀致裂后若出现较大的块石导致无法直接装车时,采用140 液压破碎锤破碎解小后由2 m<sup>3</sup> 液压反铲装至25 t 自卸车运至指定位置堆存后再进行下一个循环的施工。

#### 4 实施效果及应用前景

建全抽水蓄能电站15号道路K0+000~K0+180段成功应用了液态二氧化碳相变致裂技术,该技术凭借其振动小、安全可靠、适用性强等优势已在电站其他道路工程中推广实施,并取得了良好效果,提前5 d完成了节点目标,节约了爆破安全评估、爆破监理、爆破振动监测等工程费用约10万元。该技术在施工过程中产生的振动和噪声微乎其微,对周边环境和居民的影响非常小,施工过程获得了周边村民的大力支持,从未发生过安全投诉、阻工等群众性事件,提高了施工效率,为后续类似项目的实施提供了宝贵的经验。液态二氧化碳相变致裂技术在抽水蓄能电站工程中展现出了巨大的应用潜力。可以相信:通过不断优化和改进这一技术,可以进一步提高其在复杂施工环境中的应用价值,为抽水蓄能电站等大型基础设施项目的建设提供强有力的技术保障。

