

基于Mohmand水电站闸室顶拱550KN锚索施工控制的研究与应用

黄贞翔 张 帆

中国葛洲坝集团第三工程有限公司 陕西 西安 710077

摘 要：本文围绕Mohmand水电站闸室顶拱550KN锚索施工控制展开研究与应用。工程总装机容量80万千瓦，闸室位于DT-2特定位置，垂直埋深约150米。550KN锚索由5束 $\Phi 15.24$ 钢绞线编制，编制时在进浆回浆管路等方面有特殊要求。钻孔采用CM351和MD50，按要求控制角度、偏差等。压水试验需满足压力、水损失等条件。锚索安装包括运输、固定等操作，封孔有技术要点。灌浆选择水灰比0.35的水泥净浆，控制外加剂掺量，按特定方法拌制和灌浆。锚垫板安装需找平并固定。锚索张拉在灌浆后7天且强度满足要求时进行，包括伸长值计算、适应性张拉和验收张拉试验，对各阶段的操作和检测标准有明确规定。该研究为同类工程提供了参考。

关键词：Mohmand水电站；闸室顶拱；550KN锚索；锚索张拉控制

1 工程概况

Mohmand水电站总装机容量80万千瓦，规划安装4台20万千瓦混流式水轮发电机组，对巴基斯坦北部电力供应意义重大。工程中DT-2闸室位于CH.0+705.253~CH.0+732.353，垂直埋深约150米，长27.5m、最大宽28.30m、高50.40m，开挖方量1.73万 m^3 。其顶部设有550KN预应力锚索，设计长15米、锚固长8m，安装角度 36.5° - 90° ，角度越大施工难度越高。该闸室预应力锚索系统设计，可为同类地下结构及巴基斯坦复杂地质工程建设提供参考。

2 锚索编制

550KN锚索由5束 $\Phi 15.24mm$ 的钢绞线编制而成。由于采用上仰安装方式，该锚索编制与其他类型存在差异，主要体现在进浆回浆管路设置上。其要求采用短管进浆，水泥浆液从孔口锚头封堵位置开始充填；长管兼具回浆与排气功能，从锚头延伸至导向帽上端并固定。具体编制控制要点如下：

下料、洗索和编索需严格依据技术条款执行^[1]，确保下料尺寸精准，锚固端剥离位置正确，彻底清洗钢绞线，使其表面无油脂残留。编索过程中，使用隔离架分隔钢绞线，保证各钢绞线间无交叉缠绕，避免在张拉时因应力剪切导致钢绞线断裂。止浆器和导向帽采用环氧砂浆进行锚固。

封闭止浆器预留波纹管外侧的进浆口，在波纹管内侧进浆口接驳 $\Phi 20mm$ 的HDPE管作为进浆管；同时，在波纹管四周每隔1m开设一组孔洞，以实现灌浆时波纹管内外连通，提升灌浆密实度与质量。

3 钻孔施工

测量人员依据设计图纸在闸室内部精确放样锚点，采用喷漆标记锚索孔位。钻孔选用CM351和MD50钻机，配备中压空气冲击器，成孔直径138mm，施工时工作压力控制在0.7-1.2MPa，空气消耗量不低于 $7-9m^3/min$ ^[2]。利用坡度尺控制钻杆角度，通过铅垂线校准钻孔方向，钻机安装于钻爆平台或脚手架。同时，采用自制雾化喷雾装置降尘。锚索孔钻进需保持直线，3米内孔位偏差不超10mm，最大偏差不超孔长1/30。钻孔后以压缩水清洗，检测孔倾角，验收合格后，随即开展压水试验与锚索安装。

4 压水试验

压水试验需采用干净清澈的水源，在锚固端施加不超过0.4MPa的压力，并保持10分钟^[2]。在此期间，单位长度的水损失量不得超过 $1L/(m \cdot min)$ 。净水压力为测试压力与钻孔内现有水压的差值。每个钻孔钻至设计深度后，需用水或压缩空气进行清洗，并开展压水试验，以检测固定长度周边是否存在水泥浆流失风险。试验时，使用钻孔封隔器对测试段进行密封，测试段长度不得小于固定锚定长度加1米。

对于渗透率不符合要求的钻孔，需采用水泥浆进行预灌浆处理。灌浆完成或初凝8小时后，需重新钻孔，并再次进行水压试验，直至满足设计要求。

5 锚索安装

制作完成的锚索需人工运输至作业面，运输及下索过程中，应避免损坏波纹管和外露钢绞线。下索前，可在每个锚索孔周边安装一组L筋并进行锚固；下索时，借助孔口附近的L筋和倒链葫芦辅助下索操作。锚索插入孔

内后,利用孔口附近的L筋和花篮螺栓固定锚头,防止其下滑或脱落。

组建专业封孔班组,实行专项施工负责制,确保每孔封孔质量达到现场视检合格标准。封孔技术要点如下:将水、环氧砂、水泥按比例调配成封孔水泥浆液,将浸透水泥浆液的棉纱沿止浆器四周环形楔入,并钉紧压实。封堵完成后,采用水泥砂浆进行封孔。封孔12小时后,进行耐压试水,试验压力为0.7MPa,持续10分钟无渗漏方可验收通过^[3]。

6 灌浆施工

6.1 配比选择

根据技术规范^[1],灌浆水灰比控制在0.35-0.7,特殊地质不超0.45,要求七天抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$,配合比经试验确定。本工程采用0.35水灰比的水泥净浆,含0.2%减水剂增强流动性,1%膨胀剂提升密实度,需严格控制膨胀剂用量,避免影响灌浆强度。6.2拌制方法

浆液应使用高速浆液搅拌机均匀混合,并且不得有块状物。混合浆液的程序如下:首先将大约三分之二的水泥加入水中,然后加入外加剂(如有),最后加入剩余的三分之一水泥。粘度和密度应通过施工张拉地锚的方法检查,在开始灌浆前进行检查^[1]。

6.2 灌浆方法

浆液经止浆器的进浆管注入,通过进浆管和波纹管预留孔位流向孔道顶部,并从导向帽的回浆管排出。浆液注入前,需通过1.2mm筛网进行过滤。为保证灌浆质量,浆液搅拌完成后应尽快使用。灌浆采用压力灌浆法,配备灌浆记录仪精确控制灌浆流量,同时在灌浆泵上安装压力表监测灌浆压力。

灌浆过程中,严格控制压力与流量变化,采用逐级升压方式。起始灌浆压力为0.35MPa,灌浆期间不得中途降压。当回浆管持续回浓浆2分钟后,进入屏浆阶段:屏浆过程中持续升压,观察流量变化,当流量降为零,且压力达到0.85-0.9MPa时,持续15分钟后结束灌浆。灌浆结束时,先关闭注浆管,再停止灌浆泵,且在停泵前需保持压力稳定,停泵后方可泄压,确保灌浆作业符合规范要求^[1]。

7 锚垫板安装

锚垫板是锚索锚固系统的关键部件,具备应力扩散、定位基准确立及千斤顶反力支撑等功能,可将550KN级锚索荷载均匀分散,防止混凝土局部受压破坏,保障工作锚具与锚索轴线垂直。其经镀锌处理,规格300×300×50mm,加工时铣出2mm深、略大于工具锚的工作锚具预置槽。施工前,用M35砂浆对混凝土面找

平,使其与锚索钢绞线成90°夹角,且确保砂浆与垫板无空腔。锚垫板四角设Φ16mm安装孔,待砂浆凝固后,以膨胀螺栓固定。

8 锚索张拉控制

锚索灌浆完成后7天内,应避免其受到周边施工活动影响。待灌浆及混凝土强度达到设计要求(水泥强度达到25MPa),且经实验室检测合格后,方可进行锚索张拉施工。灌浆7天后,实验室对孔内剩余灌浆水泥和M35砂浆强度进行检测,强度达标是开展张拉作业的必要前提。

搭建简易脚手架后,采用倒链辅助人工安装千斤顶。其中,YCW240QXB-200A型千斤顶用于单股钢绞线预紧,YCW150B型千斤顶用于整索张拉。

8.1 伸长值计算

锚索伸长值的计算公式为:

$$\Delta L_r = L_{fr} (T_p - T_a) \times 10^6 / A_t E_t$$

ΔL_r = 理论计算伸长值;

L_{fr} = 拉紧地锚自由长度,对于15m锚索,15-8+外露长度=7m+外露长度。

A_t = 六根钢绞线的横截面积,140*5(6)mm²;

E_t = 钢绞线弹性模量,198GPa。

8.2 适应性张拉试验

在正式开展验收张拉前,通过分析灌浆量数据,选取三组分布分散且灌浆量较大(灌浆量大通常表明该区域地质条件复杂)的锚索,进行适应性张拉试验。试验准备工作如下:

8.2.1 设备率定

工程开工前,将张拉设备送至专业力学试验室进行加压率定。具体流程为:首先对千斤顶进行排气操作,利用液压油泵将千斤顶伸缩缸完全伸出后再收回,重复2-3次;然后将千斤顶置于能显示压力的液压机下方,伸出伸缩缸,松开止回阀使压力表泄压至零;启动液压机液压系统,分别在压力表显示5MPa、10MPa、15MPa、20MPa、25MPa、30MPa、35MPa、40MPa、45MPa和50MPa时,读取液压机压力读数,每个压力值重复操作2-3次并取平均值;最后根据压力表值与液压机标准读数,绘制回归曲线并得出回归方程,完成张拉设备率定。

8.2.2 单束预紧

安装锚具后,使用YCW240QXB-200A型千斤顶对每束钢绞线进行预紧,以补偿锚索因徐变和松弛产生的应力损失。

8.2.3 排气

预紧完成后,更换油管至YCW150B型千斤顶,参照上述排气方法,利用液压油泵对千斤顶进行排气操作。

8.2.4 整索预张拉

排气结束后,人工安装千斤顶,并借助张拉葫芦辅助。由于闸室顶部锚索均为上仰角度安装,安装千斤顶时需克服锚具、撑靴、千斤顶自身重力,且需安装至混喷面钢垫板位置,作业空间受限,需8名工人协同作业,此环节施工难度极大。

因千斤顶可能无法一次安装到位,千斤顶、锚具、垫板和自由端之间可能存在空隙,故每次安装千斤顶后,先将整索预张拉至440kN(设计荷载的80%),持压2分钟,再放张至50kN-100kN,随后按设计要求启动张拉工序。

8.2.5 适应性张拉试验

适应性张拉是一种动态调整预应力的技术,通过实时监测结构受力状态,智能调节锚索或钢绞线的张拉力,以优化结构性能并适应长期荷载变化(如岩土蠕变、混凝土收缩徐变、外部荷载波动等)。

本工程使用的锚索单根钢绞线为直径15.2mm,强度1860级,其理论破断拉力(极限值 T_b)为:

$$T_b = f_{ptk} \times A_p = 1860 \text{MPa} \times 140 \text{mm}^2 = 260.4 \text{kN}$$

本工程5束钢绞线编制的锚索总极限值为1302kN,适应性张拉设计荷载取极限荷载90%(约1172kN)。张拉时采用分级加压与放张的严格流程:加压阶段,先以设计荷载15%持压5min,每分钟读取伸长值;再依次升压至32%、66%、83%,直至极限荷载80%,各阶段持压60min,前10分钟每分钟读数,后续按15min、20min、30min、45min和60min节点记录。随后放张至极限荷载30%持压5min读数;再次分级升压至80%极限荷载的30%、50%、70%、90%并读数,升压至极限荷载80%持压5min读数后,依次放张至67.5%、55%、42.5%并记录,最后放张至30%持压5min读数,最终升压至验收设计荷载550kN的120%,读取伸长值后锁定^[1]。

张拉锁定后,拆除设备并检测初次剩余荷载。合格者8h后复测,不合格则重新锁定。复测时,荷载损失

$\leq 4\%$ 判定合格;超过初次值或损失 $> 7\%$ 需重张;损失4%-7%时,48h后再次检测,损失 $\leq 6\%$ 仍判定合格;损失6%-7%则96h后复测,损失 $\leq 7\%$ 方可判定合格,否则需重新张拉^[1]。

9 验收张拉试验

验收张拉试验的准备工作与适应性张拉试验相同。张拉过程中,需将锚索依次加压至设计荷载550kN的15%、45%、75%、105%、135%和150%,每个压力等级持压5min,150%等级持压30min。持压结束后,读取最大伸长值,然后缓慢放张(放张时不断拨动工作夹片,防止夹片提前锁紧)至设计荷载的15%,读取最小伸长值,最大与最小伸长值之差即为实际伸长值。实际伸长值与理论伸长值 ΔL_r 的误差需控制在 $\pm 5\%$ 以内。张拉结束后的操作流程与适应性张拉一致。

10 总结

Mohmand水电站闸室顶拱550kN锚索施工控制涵盖多关键环节。工程介绍了闸室位置、规模及锚索结构参数。施工中,锚索编制注重进浆回浆管路设置;钻孔严控位置、角度偏差;压水试验不达标需预灌浆;锚索安装与封孔遵循特定工艺;灌浆对配合比、拌制及过程严格把控;锚垫板需找平固定;锚索张拉前有强度要求,通过计算伸长值、开展适应性与验收张拉试验,规范各阶段荷载、持压及检测标准。该技术为巴基斯坦复杂地质条件下的地下工程建设提供了重要参考,保障工程质量与安全。

参考文献

- [1]British Standards Institution.BS EN 1537:2013 Execution of special geotechnical works—Ground anchors[S]. London:BSI,2013.
- [2]中国冶金建设协会.GB 50086-2015岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[M].中国计划出版社,2015.
- [3]黄盛.地下工程预应力锚索施工技术及其质量控制要点[J].工程技术研究,2020,5(14):41-42.