

# 四川溪古水电站钢岔管振动时效处理及其效果评价

伍卫平<sup>1</sup>, 陈明辉<sup>2</sup>, 李东风<sup>1</sup>

(1. 水利部水工金属结构质量检验检测中心, 河南 郑州 450044; 2. 四川久隆水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对焊接残余应力对水电站高强钢岔管性能的影响,对四川溪古水电站钢岔管采用振动时效技术消减焊接残余应力以及采用X射线衍射法进行焊接残余应力测试,并对振动时效效果进行了定量评价。振动时效效果的评定结果表明:振动消应技术可以提高工作效率,改善水电站高强钢岔管的使用性能。

**关键词:**溪古水电站;钢岔管;残余应力;振动时效;X射线衍射法;效果评价

**中图分类号:**TV7;TV732.4;TV52

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2018)增2-0025-03

## 1 概述

溪古水电站位于四川省甘孜藏族自治州九龙县境内,是九龙河“一库五级”自上而下的第一个梯级电站,为龙头水库电站,电站总库容9 900万 $m^3$ ,最大水头433 m,工程等别为中型Ⅲ等工程。溪古水电站压力钢管采用“一管三机”地下埋藏的布置方式,主管直径4 100 mm。主管和支管之间通过2个钢岔管连接,大岔管主管内径为4 100 mm,母材材质为抗拉强度高达600 MPa级B610CF钢。

钢岔管是一个被加强的、具有复杂曲面的壳体,其结构与受力复杂,焊缝集中,加强构件刚度及尺寸较大,管壳焊接残余应力值较高。

钢岔管焊接时,由于不均匀加热及冷却造成焊件上温度分布不均匀,不可避免地导致焊件在焊后产生残余应力。残余应力的存在将降低构件的强度,影响其刚度,降低其抗脆断能力和抵抗应力腐蚀能力,直接影响到钢岔管的质量和使用安全性能。根据试验及在焊件上进行的实际残余应力测试结果看,其焊接残余应力最大值基本接近或达到材料的屈服极限。残余应力的存在对钢岔管的安全性能会产生不利影响。笔者介绍了所采用的钢岔管焊接残余应力的消应方法以及消应效果的评价方法。

### 1.1 钢岔管焊接残余应力的消应方法

为保证岔管正常安全工作,降低焊后残余应力,设计文件要求进行焊后消应处理。工程上常

用的消应方法有整体或局部高温回火、振动时效、整体水压试验等。由于该工程岔管体积较大,高温回火的方法难以实施;而整体水压试验是通过钢岔管焊后施加一定的水压静载荷,其通常为正常工作压力的1.25倍,使岔管工作应力与残余应力叠加,超过屈服强度的部分由于钢材的屈服而松弛,从而达到削减焊接残余应力峰值的目的。该工程由于最大管径达4 100 mm,试验水压力将达到4.85 MPa,制作球形封头的成本较高且水压试验工装准备时间较长,经综合比较后认为其不宜采用;振动时效是利用激振器的振动引起钢岔管共振,振动产生的动应力与残余应力相叠加超过某种位垒,使材料中发生大量的位错滑移后产生微区塑性变形,使较高的残余应力得以释放。采用振动时效处理不但可以消减峰值残余应力,还可以使残余应力分布均化,这种方法处理时间短,适用范围广,能源消耗少,工程成本较低,最终该水电站钢岔管采用振动时效的方法进行残余应力的消减。

### 1.2 消应效果的评价方法

振动时效效果评价可以采用振动时效参数曲线观测法进行定性判定。在实际工作中,为了定量判定,通常需要对构件进行焊接残余应力测试,即实施振动时效前进行焊接残余应力的测试,振动时效后进行复测对比,根据残余应力测试结果判定消应效果。

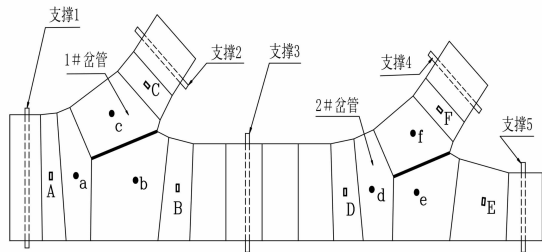
随着技术进步,现已研制出便携式X射线应力测定仪,其体积小、重量轻,操作简便,属于无损

测试,振动时效前后可以原位复测,便于对比。各个测区振动前后残余应力分布的对比曲线最能反映振动效果。由于其具有的这些优点,使X射线衍射法残余应力测试技术在工程现场中的应用越来越广泛。

## 2 溪古水电站钢岔管振动时效处理及残余应力测试

### 2.1 钢岔管振动时效实施方案

钢岔管振动时效实施方案见图1。



说明:①图中支撑1、2、3、4、5均为V形支架,分别支撑于岔管下方,每个支架有两个支撑点,分别位于管节横截面时钟位置的5点和7点附近,支撑点处放置弹性垫;②图中矩形黑框表示激振器位置(均处于岔管下部管壁内侧),并用大写字母A、B、C、D、E、F表示激振点顺序号;③图中实心黑点表示拾振点位置(均处于岔管下部管壁内侧),并用小写字母a、b、c、d、e、f表示与激振点相对应的拾振点顺序号,例如a表示与激振点A相对应的拾振点。

图1 岔管振动时效激振点、拾振点、支撑位置示意图

### 2.2 振动时效前后残余应力的测试

(1)钢岔管X射线衍射法残余应力测试的测区布置。

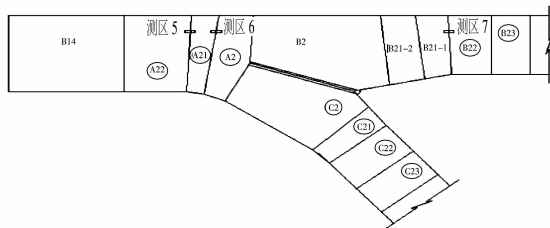
根据钢岔管焊缝分布情况,共设7个测区,编号为:1测区~7测区,测区的位置见图2。

(2)测区表面的处理。

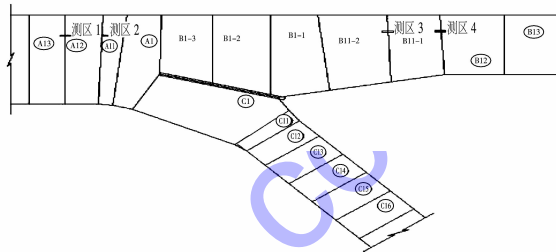
对各测区表面进行了表面处理:划定测量区域→用角向磨光机磨除待测区域焊缝余高→用抛光轮打磨待测区域→用饱和盐水作电解质进行电解抛光直至消除磨痕并清晰地分辨出焊缝、熔合线和热影响区。

(3)测区内测点的确定。

每个测区设5个测点,在测区表面用钢板尺、铅笔面对焊缝沿焊缝垂直方向划一条直线,确定焊缝中心和熔合线的位置。在该直线上:焊缝中心1个点、两侧熔合线各1个点、焊缝中心到两侧熔合线连线中点各1个点。 $\sigma_x$ 表示与焊缝平行方向(即环向、X向)的残余应力, $\sigma_y$ 表示与焊缝



(a)大岔管



(b)小岔管

图2 钢岔管测区位置示意图  
垂直方向(即轴向、Y向)的残余应力。

(4)测试条件。

测量仪器名称:X-350A型X射线应力测定仪

测量方法:侧倾固定 $\Psi$ 法

定峰方法:交相关法

辐射:Cr  $\alpha$

衍射晶面:(211)

$\Psi$ 角( $^\circ$ ): $0^\circ \sim 45^\circ$

应力常数: $-318 \text{ MPa}/\text{度}$

$2\theta$ 扫描起始角: $162^\circ/163^\circ 20'$

扫描终止角: $151^\circ$

$2\theta$ 扫描步距: $0.1^\circ$

计数时间: $0.5 \text{ s}$

准直管直径: $2 \text{ mm}$

X光管高压: $20 \text{ kV}$

### 2.3 振动时效效果评定

各测区Y方向(轴向)焊接残余应力统计数据见表1。为对钢岔管振动时效前后焊接残余应力的变化情况进行分析,先定义以下几个计算公式。

某测区残余应力平均值为:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{y,j}}{n} \quad (1)$$

式中  $\bar{\sigma}_y$ 表示该测区中  $n$  个点Y方向的残余应

力均值;  $n$  表示该测区中的测点数;  $\sigma_{y,j}$  表示该测区中第  $j$  个测点 Y 方向的残余应力值。

某测区峰值应力消除率  $\zeta$  为:

$$\zeta = \frac{(\sigma_{y前max} - \sigma_{y后max})}{\sigma_{y前max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $\sigma_{y前max}$  表示该测区中测点振动前 Y 方向残余应力值的最大值;  $\sigma_{y后max}$  表示该测区中测点振动后 Y 方向残余应力值的最大值。

表 1 各测区振动时效前后 Y 方向焊接残余应力统计表

测区编号	峰值应力(振动前) /MPa	峰值应力(振动后) /MPa	均值应力(振动前) /MPa	均值应力(振动后) /MPa	峰值应力消除率 /%	均值应力消除率 /%
1	656	389	650	327	40.7	49.69
2	648	494	634	451	23.77	28.86
3	720	501	662	451	30.42	31.87
4	661	393	660	335	40.54	49.24
5	620	428	578	405	30.97	29.93
6	669	499	662	451	25.41	31.87
7	593	496	560	380	16.36	32.14

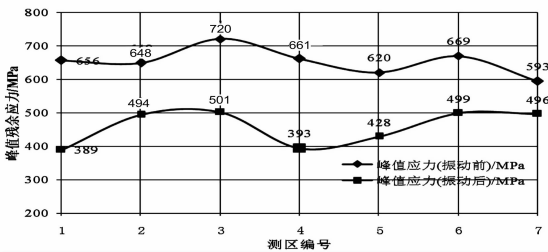


图 3 各测区峰值残余应力振动消应前后对比曲线图

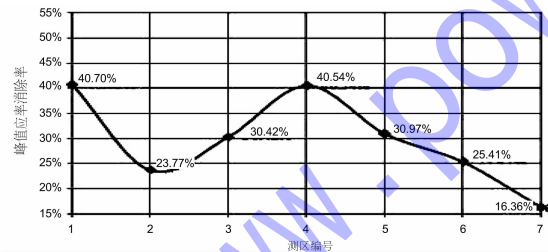


图 4 各测区峰值残余应力消除率曲线图

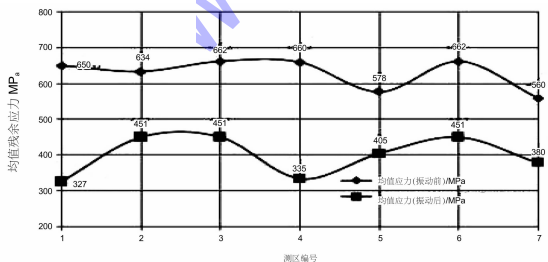


图 5 各测区均值残余应力振动消应前后对比曲线图

根据相关标准 GB50766 - 2012, 高强钢 B610CF 的抗拉强度为 610 ~ 730 MPa, 屈服强度大于、等于 490 MPa。

某测区均值应力消除率  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{(\sigma_{y前} - \sigma_{y后})}{\sigma_{y前}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $\sigma_{y前}$  表示该测区振动前 Y 方向的残余应力值;  $\sigma_{y后}$  表示该测区振动后 Y 方向的残余应力值。

各测区 Y 方向焊接残余应力振动时效前后的有关对比曲线及残余应力消除率依次见图 3 ~ 6。

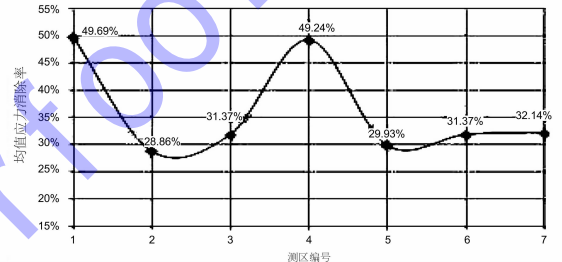


图 6 各测区均值残余应力消除率曲线图

分析图 3 和图 5, 7 个测区中多个测区无论峰值残余应力, 还是均值残余应力在振动消应前均接近或达到了其屈服强度。

振动时效处理后, 残余应力削峰明显, 根据图 4 和图 6, 峰值应力消除率和均值应力消除率最大分别达到 40.7% 和 49.69%。振前测区中测点残余应力对测区残余应力平均值的差值的最大值为 58 MPa, 振后测区中测点残余应力对测区残余应力平均值的差值的最大值为 48 MPa, 振后值小于振前值, 应力均化程度明显。

### 3 结 语

笔者通过对四川溪古水电站岔管振动效应进行分析, 并采用便携式 X 射线应力仪对该钢岔管振动时效前后的焊接残余应力进行了测试, 数据准确可信, 并得到以下结论:

- (1) 振动时效处理后, 残余应力削峰明显, 峰值应力消除率和均值应力消除率最大分别达到 40.7% 和 49.69%。

(下转第 31 页)

等问题。因此,需要强化工程预算取费审查工作,这项工作的本质,就是分析取费是否严格地按照造价管理的规定进行。对于所涉及到的安装工程,则需根据合同以及该工程的费用定额和对应的规定设计取费原则。通常,直接费用涵盖了措施和直接工程成本。对于涉及到脚手架、支撑、模板等专项措施费,可以根据图纸计算工程量并结合相应的定额计算费用。计算审查措施费、计划利润、税金等也要严格地按照相关规定执行。

#### 4.5 材料价差

综合单价中的一个重要构成是材料价格,其往往是总成本的 6 至 7 成。另外,还需要明确材料的耗用量,使材料的价格和预算基本保持一致。另外,还需要强化对材料用量的审核,紧密地结合预算定额、设置统一的取费价格;与此同时,还需要结合市场价完成材料差价的补充。所谓调差材料,通常是指施工环节中的材料,而非定额材料。比如一些借用的定额子目,当材料品种不同时,对应的价格就会存在差异。因此,调差材料数需结合定额提取而非根据实际耗用提取,这一点在审核时需要关注。对材料价格进行审核时,还需要根据每个地区的材料指导价以及合同价、发票、签证等信息进行审核。

#### 4.6 重复计价

在结算环节,很容易出现重复计价的现象,比如大型项目,所参与的施工方数量较多,他们的施工范围以及内容往往没有明确,导致同一个施工内容在不同的施工方图纸上都给予标出,如果施工方根据图纸计算,就会出现施工内容重复计算的问题。为此,可以对总包单位进行审核,根据项目整体编制进行结算,然后由总包方完成相关的

(上接第 27 页)

(2)振前测区中测点残余应力对测区残余应力平均值的差值的最大值为 58 MPa,振后测区中测点残余应力对测区残余应力平均值的差值的最大值为 48 MPa,振后值小于振前值,应力均化程度明显。

(3)水电站高强钢岔管采用振动时效,不但可以消减峰值残余应力,还可以使残余应力分布均化,从而降低其发生裂纹的风险,改善使用性能。该方法与其他时效处理方法相比,具有处理时间短、适用范围广、经济成本低和工作效率高等

分账工作。对于所涉及到的重复签证现象,关键是要让编号得到统一,面临类似的工作内容需要对签证进行严格的对比分析,从而规避重复计价。对于所涉及到的水、电以及配套的附属工程同样需要以编制、审核等流程规避重复计费问题。如果施工方将一些业主提供的材料使用到相应的施工项目中,就需要让业主或监理方出具相应的供料单,然后在结算时将这部分费用去除。

#### 4.7 设计变更

对于施工环节,变更签证不可避免。有的施工方利用签证进行冒算,如编制虚假签证等。所以,在结算环节,需要将变更签证所涉及到的内容和图纸进行对比研究,查看其是否存在显著的偏差,其增加的工程量是否科学,产生的费用是否严格按照定额以及取费标准进行了计算,是否存在重复计算问题。如果是重大的设计变更,就需要有原审核部门的批准,否则不予结算。设计变更必须有完整的手续,否则不予计算。若发现计算错误问题,还需要对工程量进行调整。

#### 5 结语

总之,工程造价投资管控具有动态性和长期性,作为造价管理工作,必须要有高度的责任心,遵循公平公正的原则,系统地进行资料的采集,借助于设计图纸、招投标和合同文件等,根据预算和相关文件标准,应用科学的算法对工程竣工结算进行快速分析,确保整体工程造价得到全面管控,进而让建设项目获取最大的社会和经济效益。

#### 作者简介:

代亚洲(1978-),男,重庆市人,总经济师,高级经济师,从事合同管理和工程造价管理工作。(责任编辑:李燕辉)

#### 优点。

#### 参考文献:

[1] 张定铨,何家文.材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M].西安:西安交通大学出版社,1999.

#### 作者简介:

伍卫平(1984-),男,湖北黄冈人,高级工程师,从事无损检测及信号分析技术工作;

李东风(1979-),男,河南郑州人,高级工程师,从事水工金属结构检测工作;

陈明辉(1963-),男,四川成都人,党委书记兼常务副总经理,工程师,从事水电工程建设技术与管理工。

(责任编辑:李燕辉)