溪洛渡水电站8 000 kN/160 kN双向门机门架制造工艺

曹峡荣，李友明
（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘 要：溪洛渡水电站坝顶8 000 kN/160 kN双向门机是目前国内制造的水电站最大启闭容量的门机。其门架结构具有外形尺寸大、自重大、制造工艺复杂等特点。在制造过程中，采用了合理的拼焊工艺及特定的预组拼方法，使该门架钢结构制造达到了各项技术要求，为大型门机的制造提供了技术参考。

关键词：溪洛渡水电站；特大型门机；拼焊；预组拼
中图分类号：TV7；TV547；TV53+2　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1001-2184(2016)06-0055-04

1 概 述

金沙江溪洛渡水电站坝顶8 000 kN/160 kN双向门机额定起重量为800 t，是目前国内水电站用最大启闭容量的门机，使用工况为斜拉受载；小车行走采用液压系统控制的两根油缸同步驱动，安装在溪洛渡水电站混凝土双曲拱坝顶621.6 m高程近300 m圆弧半径的弧形轨道上，总重量为860 t。大车轨道跨距为12.5 m，同轨台车跨距为13 m，主要用于溪洛渡水电站深孔弧门的吊装。该门机门架钢结构具有外形尺寸大、结构重、拼焊工艺复杂、预组拼安全风险高的特点。

2 门机门架结构特点、难点分析

溪洛渡水电站坝顶8 000 kN/160 kN双向门机的门架结构由上部结构、H形门腿、下横梁1、下横梁2、立柱及外伸梁、悬臂梁等组成，各梁体之间采用连接板高强螺栓连接，总重量为352 t，高度为25.5 m，主材为Q345C。门架结构制作依据在满足DL/T5019－94的同时，还须满足图纸技术要求与合同技术条款。门架结构及参数见表1。

门架的主要技术要求：

(1)主梁跨中上拱度为11.5～17.5 mm；

(2)两主梁同一截面水平高差≤5 mm；

(3)上部结构四个对角顶点的标高相对差≤5 mm；

(4)小车轨道中心相对主梁腹板中心相对偏差≤6 mm；

表1 门架结构组成表

序号	名称	外形尺寸/mm	数量	单件重量/t
1	上部结构	含主梁、端梁、悬臂梁约为114 t		
1.1	主梁	19 550×1 823.5×3 400	2	45.3
1.2	端梁1	7 400×1 900×2 300	1	10.5
1.3	端梁2	7 400×1 900×3 000	1	10.5
1.4	悬臂梁	2 820×1 200×1 000	1	2.3
2	H形门腿	含门腿、中横梁、外伸梁，最重一片约为80 t		
2.1	门腿1	16 980×3 200×1 850	2	32
2.2	门腿2	16 980×3 200×1 850	1	31
2.3	门腿3	16 980×3 200×1 850	1	31
2.4	中横梁	8 600×2 350×1 400	2	11.4
2.5	外伸梁	2 775×1 460×2 350	1	5.4
3	行走梁			
3.1	下横梁1	15 200×1 700×1 400	1	16.2
3.2	下横梁2	16 850×1 700×1 400	1	17.5

(5)H形门腿的上下开档尺寸为13 500±2 mm；

(6)门腿的高度为16 700±2 mm；

(7)所有加工结合面间隙≤0.3 mm。

溪洛渡水电站8 000 kN/160 kN门机的门架制作难点集中于上部结构中主梁、门腿的单件制作以及制作厂内的预组拼。

3 上部结构采用的制造工艺

3.1 主梁采用的制作工艺

上部结构中主梁为偏轨箱形梁。经有限元分析对腹板应力状态不同的地方采用了薄厚板对

收稿日期：2016-10-28

www.powerfoo.com

接,主梁整体为为变截面箱形结构,主腹板与上翼板采用的是T型钢与Q345钢板的对接形式。主梁外形尺寸(长×宽×高)为19 500 mm×1 800 mm×4 850 mm。单件腹板由5种不同厚度的钢板组成,零件板厚差异较大,一、二类全熔透焊缝多,焊接变形不易控制。主梁结构见图1。

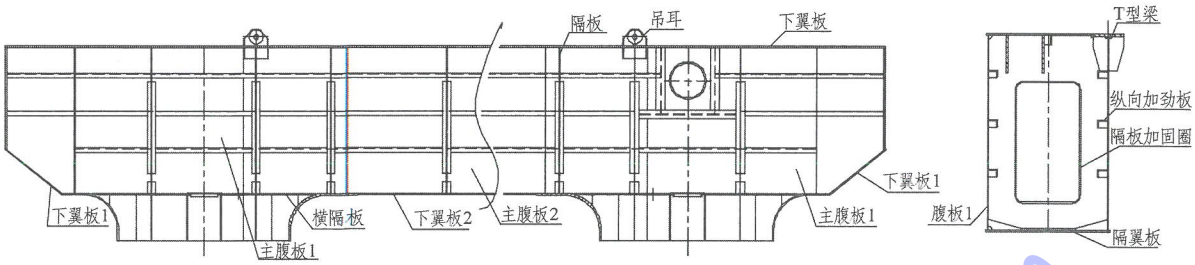

图1　主梁结构示意图

3.2　单件主梁上拱值的预留及焊接坡口设置

门机在吊装工作时会产生下挠,为保证门架结构的安全性,主梁制作完成后需有一定的起拱值。DL/T5019-94规范要求主梁制作完成后跨中上拱度范围为$F=(0.9\sim1.4)L/1\ 000$,式中F为起拱值;L为主梁跨度。单件主梁的跨度为12.5 m,故跨中上拱度应控制在11.5~17.5 mm范围内。制作时主梁跨中上拱值的确定除需考虑焊接变形外,还要考虑主梁自重及小车轨道压板焊接后的主梁产生的下挠,因此,在计算的最大上拱值基础上还需再加3~4 mm进行预起拱,并在主梁腹板下料时即放样出起拱的形状。

主梁腹板下料时采用整体预起拱,采用二次抛物线法计算。以跨距中心点为坐标原点,计算出跨度中任意点(一般取隔板处)的拱度,这些点为二次抛物线上的点,其方程式为:

$$y=F\times(1-4a^2/L^2) \tag{1}$$

式中　y为主梁跨度中任意点的上拱度;a为主梁跨中任意点坐标到跨中心坐标的水平距离。

由此得到主梁腹板下料时的上拱度抛物线。

由于主梁的焊缝多、等级高,对焊接变形控制要求高,因此,焊接坡口的设置尤为重要。主梁中T型梁采用的是对称剖开的HW414×405×18×28的H型钢,T形梁与主梁主腹板、主梁上翼板对接处、主腹板与下翼板的连接处均开制为K45°、2 mm钝边的焊接坡口,副腹板与上、下翼板的连接处开制为V45°/2 mm钝边坡口。

3.3　主梁的拼装流程

由于主梁较长,故翼板、腹板下料后需先对接成整板,再进行主梁梁体的拼焊。

(1)主梁翼板先对接后再与T型梁对接。对接时按主梁腹板的上拱坐标值进行支垫,误差≤2 mm,控制T型梁的翼板与主梁上翼板的同一截面的平面度≤1 mm。

(2)主梁腹板按照上拱度抛物线进行对接,焊接后距离腹板上拱的零点(端梁中线对应主梁的位置)做一条基准线。

(3)在放样后的主梁上翼板上拼装隔板、纵向加劲筋,吊装主梁的腹板,按腹板上的基准线所对应的坐标值控制拼装尺寸。

(4)主梁的主、副腹板拼装后,拼装其余的零件。检测、调整各项数据满足要求后,拼装下翼板成箱梁。交检转入焊接工序。

3.4　主梁的焊接流程

焊接方式、规范、顺序对控制主梁的焊接变形至关重要,单件主梁的焊接还需考虑梁体内通风等安全问题。因此,主梁内的焊接采用焊接线能量较小的二氧化碳气体保护焊,由4名焊工同时焊接,控制立焊焊接电流为160~180 A,电压为21~22 V,平焊焊接电流为240~260 A,电压为26~28 V。对于主梁外侧的焊缝,充分利用埋弧焊熔深大、效率高、焊缝成型美观的特点进行埋弧焊接。埋弧焊焊接参数如下:打底焊接电流采用500~550 A,电压33~35 V;层间及盖面采用650~670 A,电压38~39 V。在确定好焊接方式、人员、参数后,按以下焊接顺序焊接:

(1)焊接隔板与主梁腹板、T型梁、上翼板连接形成的L形焊缝,每条焊缝长度约为400 mm。

(2)焊接主腹板侧与T型梁连接的筋板焊缝。

(3)焊接隔板与腹板、翼板的连接焊缝。

(4)焊接主梁纵向加劲筋与翼板、腹板的连

www.powerfco.com

接焊缝。

(5)焊接腹板与翼板、T 型梁的对接焊缝。

(6)焊接主梁梁体内其余焊缝。

主梁梁体内侧焊缝焊接完后,采用埋弧焊首先焊接外侧主腹板与 T 型梁的对接焊缝,再焊接主腹板与下翼板的焊缝,然后翻身焊接梁体另一边腹板与翼板的焊缝,最后焊接主梁翼板与 T 型梁翼板的对接焊缝。

主梁焊接完经 UT 检查合格后,检查其各项几何尺寸,主梁 1 上拱值为 19 mm,主梁 2 上拱值为 18 mm,水平弯曲为 3.5 mm,其余各项几何尺寸均满足技术要求。由于主梁还需与端梁连接部位焊接并焊接小车轨道垫板,将会产生一定的焊接变形,因此,对主梁的上拱超标部位暂不做修校。

3.5　上部结构的组拼焊

(1) 将单件制作好的主梁与端梁按图纸要求组拼在一起,两主梁的中心距按理论尺寸预加 6 mm 的焊接收缩量进行拼装。

(2)焊接完成后对其上部结构焊前的临时连接部位打开释放焊接应力,重新组拼复检各项尺寸,待其符合技术要求后,开始拼焊小车轨道垫板。焊接小车轨道垫板时采取跳焊、从中间往两边对称施焊的方式,以尽量减小焊接变形。

(3)小车轨道垫板焊接后检测其上部结构的各项数据,主梁 1 的跨中上拱值为 17 mm,主梁 2 的跨中上拱值为 16 m,水平弯曲为 4 mm,上部结构四个对角顶点其标高相对差为 2 mm,各项几何尺寸均满足技术要求。再进行主梁与端梁连接处的高强螺栓孔和铰制孔的钻制,最后划出上部结构的各种中心线、对位线拼焊临时爬梯、栏杆后拆解上部结构待门架整体预组拼。

4　H 形门腿采用的制作工艺

4.1　门腿的单件拼焊

门架中 H 形门腿为斜八字形门腿。门腿单件图为投影图,腹板及翼板不能反映实长,需经换算、求得实长后再进行放样拼焊。在单件门腿制作时,门腿腹板上应预先放出隔板的位置线,以翼板做为底平面进行拼装。在翼板上放出斜头及隔板位置线,拼装隔板及腹板,隔板板厚方向对应的腹板处有垂球差,其垂球上下差值 δ 由式 2 求得。

$$\delta = \text{隔板长} \times \sin\alpha \times \sin\beta \qquad (2)$$

按式 2 计算出门腿两端隔板的垂球差值,依据所计算出的垂球差值将门腿箱梁内两端的隔板调整到位后,再以门腿两端隔板为基准布置钢丝线检测并调整中间隔板的拼装位置。控制门腿腹板的垂球值≤2 mm,腹板、翼板的直线度≤2 mm。待焊接完成后修校并转入 H 形门腿组拼焊工序。

4.2　H 形门腿的组拼焊

以两门腿腹板中心线水平放置状态组拼焊 H 形门腿,在组拼放样两门腿的开档尺寸时预留 5 mm 的焊接收缩量拼装中横梁。拼装完成后,用 20#工字钢连接两门腿之间的上下开口处,防止焊接变形。

焊接中横梁与门腿的连接焊缝,对称施焊,焊接时控制电流采用 220 ~ 260 A,电压 24 ~ 26 V。焊接完成并经 UT 检查合格后,将 H 形门腿上下开口处的临时连接打开以释放应力,检查门腿的尺寸、修校变形后再将其重新组拼再一起。复查各项数据符合技术要求后,配钻中横梁与门腿连接处的高强螺栓孔与绞制孔。

划出门腿中心线、预拼装对位线后拼焊预拼装所需的行走平台、栏杆、爬梯、吊装吊耳等并修割掉门腿多余的部位,最后拆解 H 形门腿待门机整体预拼装。

5　门架在工厂内的预组拼工艺

依据合同技术条款,该门机需在制作厂内预组装。由于参与门机预组拼结构的重量达到近 400 t,故预组拼前需对地面基础进行处理,在行走台车以及各支撑部位均需设置地锚,防止地基下沉。另外,受限于制作厂内的起吊能力(制作厂有 60 t、30 t 门座起重机各一台,25 t 汽车吊一台),且因门架上部结构重达 114 t,单片 H 形门腿重约 80 t,导致上部结构和 H 形门腿无法进行整体吊装,因此,只能采取单件分段吊装、在空中进行连接的施工方法。

5.1　预组拼作业所采用的吊具、索具

由于溪洛渡水电站 8 000 kN/160 kN 双向门机门架重量重,因此其对吊具、索具的要求极高。门架在组装前必须按照安全施工需要编写《门架组装安全技术方案》,除合理制定部件组装顺序外,对吊装使用的吊、索具及风绳的选取,必须通过标准及采用科学的计算方法进行选定。

起重钢丝绳的选择须充分考虑吊装过程中的不均匀受力,在其使用过程中,两绳之间的夹角不

www.powerfoo.com

得大于60°。根据GB8918－2006《重要用途钢丝绳》规定,选用6×37,φ26,公称抗拉强度1 770 N/mm^2,钢丝绳最小破断拉力为395 kN的纤维芯钢丝绳进行吊装。

门架拼装时需承受较大的风力。因此,缆风绳的选择需考虑门腿预拼装所受到的水平风力与防倾覆拉力。按照GB/T3811－2008《起重机设计规范规定》规定,在8级风中应继续使用的起重机的最大计算风压为500 N/m^2,因此,我们在计算水平风力时按上述极限值进行计算。每片H形门腿最大挡风面积约为65 m^2,每片H形门腿所受的水平风力F_1=500 N/m^2×65 m^2=32 500 N,每片H形门腿的重心高为16 m,H形门腿横向偏移最大安全距离为150 mm,重量约为83.5 t(包括平台、走台、栏杆、爬梯和加固用料,合计3.5 t)。缆风绳捆绑点高20.5 m,则单根缆风绳防倾覆最大水平拉力F_2=835 kN×0.15 m/20.5 m≈6.1 kN;防倾覆需要的水平拉力总$F=F_1+F_2$=32.5 kN+6.1 kN=38.6 kN。

该门架结构的组装共设计了8个缆风绳系结点,每片门腿4个。系结点焊接在门腿靠近门腿上端板位置,离水平基面21.5 m,离门腿上端面约1.5 m左右。钢丝绳向H形门腿两侧斜向拉牵,缆风绳系结点单件沿缆绳方向允许拉力不小于50 kN。

按照以上计算值及GB8918－2006《重要用途钢丝绳》规定,选用6×37,φ16,公称抗拉强度1 770 N/mm^2,钢丝破断拉力总和为153 kN的纤维绳芯钢丝绳,选取3.5倍安全系数进行强度校核。同向两根φ16缆风绳的允许拉力:153 kN×2/3.5=87.4 kN。以夹角60°计算水平拉力:87.4 kN×cos60°=43.7 kN,满足强度要求。每片H形门腿每侧选用2个5 t手动葫芦。拉力之和为F=50 kN×2=100 kN,满足要求。同时要求缆风绳地锚承载能力不小于220 kN/m^2,风绳锚点承载内力不小于50 kN/个点。

5.2 门架厂内预组拼流程

在预设的地锚上铺设轨道,吊装行走台车、下横梁安装到位后用钢性支撑加固。要求预先将门腿下端板用螺栓紧固于下横梁上。

门腿预组拼时采用分片组拼,采取由项目部现场30 t与60 t门座起重机分别吊装1件门腿、25 t汽车吊吊装中横梁的方式进行吊装。组拼第1片门腿到位后,检测门腿各项数据满足技术要求后张紧缆风绳后再进行门腿箱梁与门腿下端板连接处的焊接。依照上述吊装方式组拼另一片门腿。要求在调整第2片门腿时需检测两片门腿的中心跨距、对角线差值符合技术要求后用型钢连接两片门腿。在焊接门腿箱梁与门腿下端板连接处的焊缝后需采用铆枪锤击的方式释放应力以控制该连接处的间隙≤0.3 mm。为保证预拼装的安全性,要求两片门腿的预组拼必须在一个工作日内完成。

为了在空中能安全、快速地成功组拼上部结构并满足各项技术要求,需预先在主梁与端梁的连接处搭设临时爬梯并装上50%的连接板。正式吊装时,先利用60 t门座机吊装距该起重机远端的主梁。检查主梁各项数据满足技术要求后焊接主梁与门腿连接处的加固焊缝并保持吊车不松钩的状态直到加固焊缝焊接完成;再采用同样的方法吊装第2件主梁。检测调整两件主梁的各项数据与上部结构组拼焊时的数据一致;再利用30 t门座起重机吊装两件端梁,并用工装螺栓连接主梁与端梁,要求螺栓数量应达到35%～40%。最后组装梯子、平台、立柱、回转吊等部件后,整体复测各项数据交检待验收。

6 结 语

溪洛渡水电站8 000 kN/160 kN双向门机门架通过采用笔者以上所述的制造工艺,实现了安全、高效、优质的生产作业,于2014年8月29日成功完成了空载试验、静载试验(额定起重量的125%)和动载试验(额定起重量的70%、100%、110%),并持续通过了荷重试验以及静载斜拉起吊1 000 t工况试验,正常运行至今。

参考文献:

[1] 王先文,等.焊接结构[M].北京:化学工业出版社,2010.
[2] 李亚江,等.焊接原理及应用[M].北京:化学工业出版社,2009.

作者简介:
曹峡荣(1964-),男,四川宜宾人,金结分厂厂长,工程师,从事金属结构制造生产技术与管理工作;
李友明(1983-),男,四川中江人,助理工程师,学士,从事金属结构制造生产技术与管理工作.

(责任编辑:李燕辉)

www.powerico.com