

大型弧形闸门制造技术研究与应用

张灵波

(中国葛洲坝集团机械船舶有限公司 湖北 宜昌 443007)

摘要: 本文结合白鹤滩水电站导流底孔弧形工作闸门制造难点, 分别对工艺曲率半径、门叶组焊、整体退火、整体机加工等技术进行了研究, 确定了合理的制造工艺, 有效降低了弧形闸门的焊接变形, 提高了生产效率, 确保了制造质量, 为大型弧形闸门制造提供了宝贵经验。

关键词: 弧形闸门; 制造技术; 应用

1 概述

白鹤滩水电站是在建规模全球第一、单机容量世界第一、装机规模全球第二的大型水电站, 其水库总库容 206.27 亿 m^3 。电站装机容量 16000MW, 多年平均发电量 625.21 亿 $kW \cdot h$, 为西电东送骨干电源点之一。为解决后期导流、下闸封堵、蓄水和下游供水等问题, 水电站在坝体设置单层共 6 个导流底孔, 布置在坝体 630.00m 高程, 其中 6# 导流底孔在出口设置弧形闸门, 以满足初期蓄水期控泄生态流量的要求。

6# 导流底孔弧形工作门孔口尺寸为 $5m \times 7m$ (宽 \times 高), 设计挡水水位 662.36m, 设计挡水水头 120m, 操作水头 103m (动水起闭), 底槛高程为 630m, 支较高程为 640.5m, 总水压力为 50100kN, 面板曲率半径为 15m。闸门门叶结构纵向分为左右两块, 节间采用高强螺栓连接, 门叶与支臂、支臂与铰链间均设计采用高强螺栓连接。

弧门总重 264t, 单片门叶重 40t。闸门由箱型主纵梁、小纵梁、小横梁、边梁、面板组成门叶梁系结构, 门叶结构焊后整体退火消除应力处理。门叶面板、左右门叶连接面需进行机加工。

2 制造难点分析

2.1 弧形工作闸门设计的主要特点

弧形闸门门叶、支臂和铰链在厂内整体组装后, 需要对面板机加工, 粗糙度要求达到 $Ra12.5 \mu m$, 面板外缘半径允许偏差小于 2mm, 面板横向直线度允许偏差 1.5mm, 门叶吊耳孔组焊后整体进行镗孔。其技术要求和质量标准高, 焊接和矫正难度较大, 是该项目面临的重点和难点之一。

为解决工作门止水, 防振、抵抗变形等问题, 门楣上设双向防射水转角止水, 上端水封为橡胶止水头与面板接触, 可适应面板的不平度, 但下端止水板为工

程塑料合金材料的硬性止水, 对面板直线度要求很高, 提高了门叶制造质量标准。

2.2 工艺曲率半径确定技术

门叶结构形式为主纵梁分布, 门体曲率半径及扭曲是控制变形的重点, 若整体组焊成型后尺寸不合适, 将难以修复和调整。

弧门制作首先要确定门叶曲率半径及面板厚度加工余量, 必须根据门叶焊接收缩及面板加工余量来确定, 若曲率半径过小, 将会出现弧面大面积加工不到, 势必要进行堆焊, 质量难以保证; 若曲率半径过大则加工工作量大, 板厚会出现负偏差, 不能满足设计要求, 影响工期。如何确定曲率半径是制造的第一难点, 也是门叶制作的关键。

2.3 门叶组焊技术

门叶面板、节间端板需焊后整体加工, 门叶制造焊接量大, 且焊缝集中布置在面板内侧, 焊接过程中产生弯曲、扭曲、波浪变形、角变形等问题, 严重影响门叶制造相关尺寸控制 (如主纵梁中心距、门叶扭曲、面板的弧度和直线度等)。设计合理良好的组装与焊接工艺, 控制门叶结构的组装及焊接质量、满足加工要求至关重要。

2.4 整体退火技术

门叶焊后的整体消应力退火热处理, 单节门叶为细长弧形构件, 在高温下易产生扭曲变形, 如何控制门叶变形是关键。

2.5 弧门机加工技术

整扇弧门需机加工部位非常多, 门叶加工部位有面板、左右分半面、侧止水面、与支臂连接的法兰面; 支臂加工部位有与门叶、活动铰链连接的法兰面。采用常规的立式机加工工装设备不能满足工期要求, 同时为避免长期的高空作业, 研究设计一套卧式专用弧门面板铣削的工装也是我们要攻克的技术难关。左右门叶采用高强螺栓连接, 结合面有 $260-\phi 33$ 高强螺栓联接孔, 其

中有 30-φ 32H8 铰制销孔，其铰孔精度要求高，螺孔错位使左右门叶错位，直接影响门叶止水效果，如何采取措施保证群孔钻铰精度达到设计要求，是该项目技术难点。

3 制造方案

为了满足弧形门的制造质量要求，保证闸门的安全运行，针对该弧形门的结构特点及技术难点，在技术准备阶段，对弧门进行了技术研究及工艺论证，编制了详细的工艺文件，设计创新了成套的加工设备及工装。制定工艺方案时，按规模化生产进行考虑，设计简易可行的工装，以提高工作效率及制造质量。

3.1 弧门曲率半径缩放值的研究与应用

弧形闸门为曲面型结构，焊接后有收缩变形趋势，首先要确定门叶的工艺曲率半径，门叶焊接收缩变形量与梁系结构的布置、焊缝布置、门叶截面尺寸、装配工艺和焊接工艺有关，须综合考虑上述因素确定工艺曲率半径。

弧形闸门门叶为主纵梁结构，根据门叶上各小梁、两根主纵梁及各横梁的结构形式和拼装布置情况，两主纵梁腹板与面板的组合焊缝、横梁与主纵梁的组合焊缝、主纵梁组合焊缝及翼板对接焊接均为熔合焊缝，中厚板较多，焊接及清根量大，从门叶焊缝分布情况，门叶焊接后曲率半径呈缩小趋势，必须在工艺上预留合适的反变形量，才能保证焊后面板曲率半径在规范要求内。

部件工艺曲率半径确定：为减小焊接应力和焊接变形，主纵梁、小纵梁作为部件，组焊矫正后再与面板组焊成门体，主纵梁部件焊接时，主要是后翼板对接缝焊后收缩产生较大的向内分力，使曲率半径呈变小趋势。根据以下计算公式，确定主纵梁曲率半径放大 70mm，按确定的门叶工艺曲率半径及焊接收缩余量计算主纵梁、纵向小梁等零件

的工艺下料尺寸。

$$R' = \frac{[(R-a)\tan\alpha]^2 + a^2}{2a}$$

$$a = R(1 - \cos\alpha) - k$$

式中：R' - 增大半径值；

R - 设计半径值；

α - 弧门顶底端与圆心连线间的夹角；

k - 弧门顶底端加大值。

弧门门叶结构经组装焊接、退火热处理工序后检测验证，门叶曲率半径缩放值、焊接收缩余量的计算确定非常合适，机械加工后，检测面板厚度在 49.5 ~ 50.2mm，完全满足设计板厚 δ=50mm 的要求。

3.2 门叶卧拼焊接技术研究与应用

门叶组焊变形控制是弧门制作关键工序，门叶组焊尺寸控制直接影响到门叶检测重要指标项门叶直线度和弧度轮廓度，研究制定详细可行的组焊工艺和设计制造牢固的精度高的胎模是门叶卧拼时尺寸控制的有力保证措施。根据门叶曲率半径设计搭设两套专用门叶整体卧组焊胎模，卧式胎模曲率半径形位精度 ≤ 1mm，卧式组焊胎模既是组装基准又作为门叶检验基准。门叶卧式组装胎模如图 1 所示。

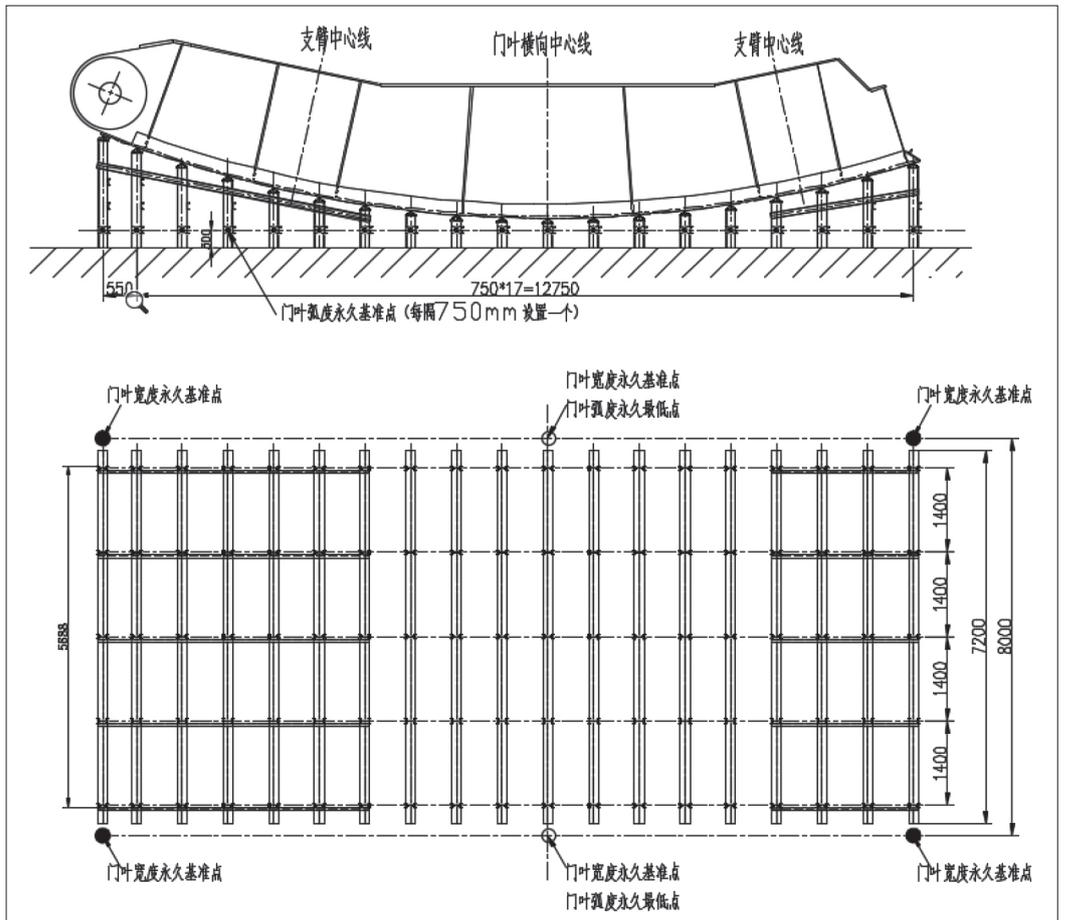


图 1 门叶卧式组装胎模示意图

门叶整体焊接，焊缝较多，为减少闸门因焊缝过分集中而引起的焊接变形，根据主纵梁式弧门结构特点将主纵梁、小纵梁、横梁作为部件单独组装焊接，矫正合格后与门叶装配焊接，可以减少门叶整体焊接量，从而减少焊接变形。

左右门叶采用整体组装焊接方法，左右门叶相互制约，使门叶相关尺寸变化趋势一致，有利于控制和保证门叶各相关尺寸要求，从而保证门体整体组装焊接后成型质量。在门叶整体组焊过程中，将门叶面板点焊固定在胎模上，控制面板与胎模面的间隙，可降低门叶焊接变形，同时便于门叶焊接过程中监测。

门叶整体焊接采用小焊接线能量的CO₂气体保护焊，焊接时将左右门叶分别划分成两个区域，采用偶数焊工施焊，由中心向两端分段对称施焊，同时在纵主梁腹板、纵小梁腹板与面板间的T型焊缝焊接过程中采用风铲震动消应力，以降低门叶焊接变形。

从焊接完成后的门叶尺寸检验结果看，该工艺措施是及其有效的，焊接变形得到了良好控制，面板横向直线度在机加工前均控制在4mm以内，节省了大量的焊后矫正工作，提高了生产效率。

3.3 门叶整体退火热处理变形控制研究与实施

门叶整体退火热处理主要目的消除焊接应力，白鹤滩6#底孔弧形门门叶结构尺寸大且重，若受热不均匀或装炉不挡，将造成门体变形尺寸超差，直接影响门叶机加工质量及生产进度。针对该门叶结构研究门叶变形趋势：单节门叶为非对称结构，刚性相对较差，在高温下会产生大波浪变形；单节门叶为细长弧形结构，门叶若采用卧拼（面板朝下）方法，如果支撑不当，在焊接高温影响下门叶结构会因自重发生下坠变形，造成门叶曲率变大。

为控制好门叶退火热处理变形，对分半连接面进行支撑加固增强刚性，门叶侧卧（连接面朝下）置于热处理炉的平板车上并保持约200mm距离，多点支撑保持水平，使门叶受热均匀。门叶材料为低合金高强钢，炉内加热温度控制在580~620℃，升温至300℃加热速度设计不超过 $220 \times 25 / \delta_{max} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{h}$ 且小于220℃，冷却速度设计不超过 $260 \times 25 / \delta_{max} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{h}$ ，且小于260℃，保温2h后在炉内空冷至300℃以下出炉。

该工艺使非对称结构的单节门叶在退火过程中均匀缩放，有效地解决了门叶热处理变形，保证了门叶热处

理后面板轮廓、曲率半径及连接端板在预计的控制指标，节省了门叶矫正工序，为门叶面板顺利机加工打下了良好基础。

3.4 门叶面板机加工方法与加工装置设计研究与应用

弧形面板侧卧式圆弧铣削装置示意图如图2所示。弧门面板曲率半径为R=15000mm，门叶宽度为5m，门叶弧长为9.2m。门叶面板、分半连接面和门叶连接的260-φ33安装孔是门叶加工的关键部位。仅弧形门面板的面积就有46m²，要求整个面均进行机加工，弧门门叶面板不仅机加工面积大且加工技术要求高、难度大。

一般大型水工弧门面板机加工最常用方法为：门叶在立式状态下切削装置绕过支铰中心转动，刀具沿工件移动进行切削加工，或购置数控落地镗铣床加工面板。这种方法工作量大且高空作业难度大，因弧门门叶分节结合面及面板均要进行机加工，仅采用数控落地镗铣床加工面板，在工期上远不能满足设备交货工期要求。

为满足该项目的工期要求，结合该弧门门叶的自身结构特点及面板机加工要求，通过创新优化，合理利用原有的铣床加工设备，设计了侧卧式面板机加工装置，以此设备来对弧形门面板机加工，解决机加工耗时长的问题。

(1) 设计原理：把4m平面铣床固定，弧形门叶侧卧摆放，通过绕支铰轴做定心圆运动，进行横向圆弧

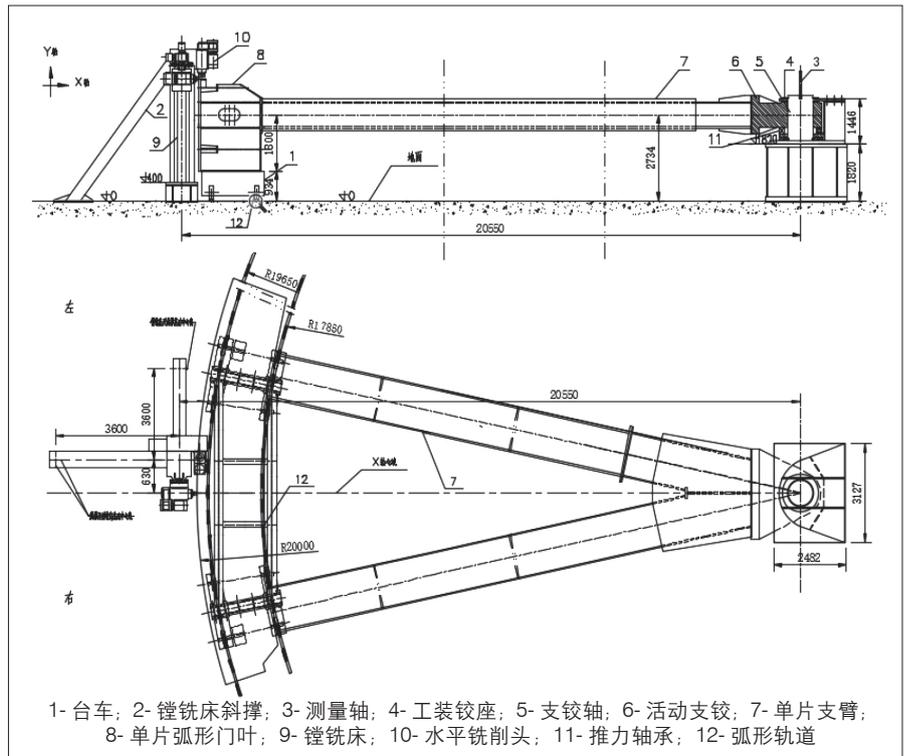


图2 弧形面板侧卧式圆弧铣削装置示意图

(下转第58页)

利用组态软件对立体仓进行运行监控测试之后,实现对可编程控制器及仓库运行状态的控制,双货叉在作业过程中的同步误差为 $\pm 1\text{mm}$ 。需要在设备组态窗口中选择串口通讯设备,添加可编程控制器,正确设置参数和属性,在组态软件中将数据变量设备通道正确连接,即可实现可编程控制器和组态软件的通讯。将可编程控制器串口驱动程序与组态软件结合,通过发出信号获得相应,在制作动画界面后,在界面上设置控件属性,促使控件根据真实情况实施动作,继而测试系统对立体仓运行状态的控制结果。

3 结语

在自动化生产发展中,必须通过高度自动化存储系统才能充分发挥出自动化生产的高能效。通过自动化立体仓控制系统的高水平控制程度,自动化仓库与货物出入库过程中相连接,形成柔性组合式存储系统。柔性组合式存储方案充分体现出物流仓储智能化存放的新高度,成为物流系统的生产核心,实现物流系统合理化生产。伴随可编程控制技术的不断发展,智能化要求逐步提升,柔性组合式存储方案将得到更大范围的应用,货物存取设计的多样化必将持续经受挑战,自动化立体仓的实用优势和安全优势将会逐渐得到重视。

参考文献:

- [1] 郭丽,吴双,杨腾飞,等.双工位Mini-Load堆垛机调度系统设计与应用[J].制造业自动化,2020,42(6):27-29+60.
- [2] 单梦蕊,周明珠,徐雪峰,等.基于仿真的穿梭式立体库方案设计及优化[J].物流技术,2021(08):108-111+125.
- [3] 吕俊燕,陈福德,马龙华.自动化立体库堆垛机结构设计[J].汽车实用技术,2021(12):68-70.
- [4] 甘升碧,何芳,王坤.双深度穿梭车存储系统单双指令运行时间模型研究[J].综合运输,2021(12):77-83.
- [5] 徐铨,何利力.智能物流下货到人模式的货位分配优化[J].软件导刊,2021(05):20-24.
- [6] 姜良重,雷航,李贞昊,等.采用自适应优化权重的出库货位优化方法研究[J].计算机工程与应用,2021(15):271-278.
- [7] 徐翔斌,马中强.RMFS订单拣选系统动态货位再指派研究[J].计算机集成制造系统,2021(04):1146-1154.

作者简介:詹少林(1982.10-),男,汉族,本科,工程师,研究方向:电气自动化。

(上接第54页)

形轨道铣削,完成弧门面板的曲面加工。

(2) 加工设备:将单节门叶侧卧,与支臂和活动支铰组装好,门叶则放置在台车上,利用原有的4m平面移动铣床垂直固定在一侧,刀盘与弧形面板相切。通过台车带动门叶绕支铰轴在弧形轨道上匀速行驶,从而实现铣床不动,而弧门自身移动的方式进行面板的切削加工。侧卧式面板机加工装置由铣床、台车、轨道等部分组成。

(3) 加工方法:在弧门面板采用横向圆弧铣削时,还需考虑支臂热胀冷缩,因此在机加工过程中,将面板分区进行加工,且每天在相同温度的时间进行机加工作业,使钢板的热缩率尽可能的减小,保证了弧门的曲率半径和弧门的横向直线满足规范要求,且机加刀盘选用 $\phi 200\text{mm}$ 的平铣刀盘,提高了每道机加工的面积,进一步提高了整个面板机加工的时效。

白鹤滩6#导流底孔弧门面板弧长为9200mm,横向圆弧切削一次需用145min。采取分片加工,每次铣削控制在25~35min以内,保证质量合格的基础上,大大提高了机加工效率。

4 结语

通过对白鹤滩水电站导流底孔弧形工作闸门工艺曲率半径、门叶组焊、整体退火、整体机加工等技术进行研究,确定了弧门半径缩放值、闸门整体消应力热处理变形控制、整体机加工划线、弧门面板机加工、弧门结合面钻孔等技术工艺,不仅解决了我厂大型结构产品加工的难题,又在集团公司弧门面板加工上进行了创新,保质保量地完成了产品加工任务,提高了企业的市场竞争力,而且也取得了较好的经济效益和社会效益,具有很好的推广价值。

参考文献:

- [1] 《水利水电工程施工实用手册》编委会.金属结构制造与安装(上/下册)[M].北京:水利水电出版社,2017.
- [2] NB/T 35045-2014,水电工程钢闸门制造安装及验收规范[S].

作者简介:张灵波(1981-),男,汉族,重庆丰都人,高级工程师,研究方向:金属结构制造安装。