

# 大型水电站闸门焊接变形预测与控制工艺研究

程坤泽

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文聚焦大型水电站闸门焊接变形问题,先阐述焊接热过程及变形种类,分析变形对闸门水密性、结构强度等性能的影响。并构建焊接变形预测模型,介绍数值模拟方法与建立流程并验证优化。因此,研究了焊接变形控制工艺,涵盖预防、过程控制、后处理矫正及多工艺协同策略。特别引入智能焊接机器人应用与智能检测技术。通过理论与实际结合,为提高闸门焊接质量、控制变形提供技术支撑。

**关键词:** 大型水电站; 闸门焊接; 控制工艺

**引言:** 在大型水电站建设中,闸门作为关键水工建筑物,其焊接质量直接关乎工程安全与运行效能。然而,焊接过程中产生的复杂热过程极易引发闸门变形,导致水密性下降、结构强度减弱及启闭性能劣化等严重问题。本文系统研究闸门焊接变形机理,构建高精度预测模型,提出涵盖预防、过程控制、后处理矫正及多工艺协同的全流程控制策略,为保障闸门制造质量提供理论支撑与技术方案。

## 1 大型水电站闸门焊接变形理论基础

### 1.1 焊接热过程分析

焊接热过程是引发水电站闸门焊接变形的关键因素。焊接时,电弧或激光等热源快速加热焊件局部,形成不均匀温度场。如弧形闸门面板手工电弧焊,电弧中心温度 $6000 - 8000^{\circ}\text{C}$ ,距其 $10\text{mm}$ 处温度骤降至 $1000^{\circ}\text{C}$ 以下。剧烈温度梯度使材料经历复杂热胀冷缩,高温区膨胀受低温区约束产生压应力,冷却收缩又因阻碍形成拉应力。材料热物理性能随温度变化显著,如Q345B钢, $20^{\circ}\text{C}$ 与 $600^{\circ}\text{C}$ 时弹性模量和线膨胀系数差异大,加剧变形风险。此外,焊接热源移动使焊件经历动态温度场,埋弧自动焊焊丝熔化速度可达 $50\text{cm}/\text{min}$ ,焊缝超 $1\text{m}$ 时,热影响区温度梯度达 $300^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ,这是产生纵向收缩和角变形的直接原因<sup>[1]</sup>。

### 1.2 焊接变形的种类

水电站闸门焊接变形主要表现为六种形式:(1)纵向收缩变形。常见于面板对接焊缝,如 $20\text{m}$ 长的弧形闸门面板焊接后,纵向收缩量可达 $15-20\text{mm}$ 。这种变形导致闸门整体尺寸超差,影响止水效果;(2)横向收缩变形。在T型梁焊接中表现明显,翼缘板宽度方向收缩量可达 $2-3\text{mm}/\text{m}$ ,造成梁格间距偏差;(3)角变形。V型坡口对接焊缝易产生此类变形,如闸门主梁与面板连接处,角变形量超过 $2\text{mm}$ 时会导致止水座板平面度超标;(4)

弯曲变形。不对称焊缝布置引发,如单侧角焊缝焊接的支臂主杆,弯曲变形量可达 $L/1000$ ( $L$ 为构件长度);(5)扭曲变形。装配不良或焊接顺序错误导致,四角不在同一平面的闸门门叶,扭曲变形量超过 $3\text{mm}$ 时会影响启闭机运行;(6)波浪变形。薄板焊接常见,如 $4\text{mm}$ 厚面板焊接后,波浪度超过 $3\text{mm}/\text{m}$ 时需进行校平处理。

## 2 焊接变形对水电站闸门性能的影响

焊接变形直接影响闸门的三大性能;水密性:止水座板平面度超差会导致漏水。某工程中,因焊接变形使节间止水座板平面度达 $3.2\text{mm}$ ,造成每秒漏水 $50\text{L}$ ,经线状加热矫正后降至 $5\text{L}/\text{s}$ 。结构强度:残余应力与工作应力叠加可能引发裂纹。有限元分析显示,当焊接残余应力达到材料屈服强度的 $70\%$ 时,闸门在动水压力作用下易产生疲劳裂纹。启闭性能:门叶扭曲变形超过 $5\text{mm}$ 时,会导致启闭机负荷增加 $20\%$ ,电机功率需相应提升。

## 3 大型水电站闸门焊接变形预测模型构建

### 3.1 数值模拟方法选择

热弹塑性有限元法是主流方法,其核心优势在于能同时模拟温度场、应力场和变形场的动态交互。对比试验显示,该方法对纵向收缩变形的预测误差可控制在 $\pm 8\%$ 以内。对于复杂结构,可采用子结构法<sup>[2]</sup>。将闸门分解为面板、主梁、边梁等子结构,分别建立有限元模型后再组装,可显著提升计算效率。某弧形闸门模型采用此方法后,计算时间从 $72$ 小时缩短至 $18$ 小时。新兴的相变耦合模型能更精确模拟材料性能变化。通过引入Johnson-Cook本构关系,可描述高温下材料的动态再结晶过程,使角变形预测精度提高至 $\pm 5\%$ 。

### 3.2 预测模型建立流程

**几何建模:** 采用参数化设计,建立包含焊缝坡口、装配间隙等细节的精确模型。某平面闸门模型包含 $12,000$ 个单元,能准确反映结构特征。材料参数输入:建立覆

盖20–1500°C的材料性能数据库。以Q345B钢为例,需测定其弹性模量、屈服强度、热膨胀系数等8项参数随温度的变化曲线。热源模型选择:根据焊接方法选择热源模型。埋弧焊采用双椭球热源模型,气体保护焊采用旋转高斯热源模型。参数校核显示,热源效率系数取0.85时,模拟熔池尺寸与实际误差小于5%。边界条件设定:考虑对流换热( $h=10\text{--}50\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )和辐射换热( $\epsilon=0.8$ ),环境温度设为20°C,初始条件设为室温状态。求解控制:采用自适应时间步长,最小时间步长设为0.1s,最大迭代次数设为50次,收敛标准设为残差小于 $1\times 10^{-4}$ 。

### 3.3 模型验证与优化

验证需结合实验数据。某工程中,在闸门关键部位布置24个热电偶和16个应变片,实测温度场和应力场与模拟结果对比显示,温度峰值误差 $\pm 6\%$ ,应力峰值误差 $\pm 12\%$ 。优化方向包括:热源参数修正,根据红外测温仪实测熔池尺寸,调整热源能量分布参数。某案例中,将双椭球热源前后半球能量比从1.2调至1.05后,模拟精度提高8%;材料模型改进,引入相变潜热( $Q=250\text{kJ/kg}$ )和熔化潜热( $Q=120\text{kJ/kg}$ ),使温度场模拟更准确;网格细化,在焊缝及热影响区采用0.5mm单元尺寸,其他区域采用2mm单元尺寸,平衡计算精度与效率。引入智能焊接机器人进行焊接过程数据采集,通过传感器实时监测焊接温度、电流、电压等参数,将数据反馈至预测模型,实现模型动态优化,进一步提高预测精度。

## 4 焊接变形控制工艺研究

### 4.1 预防变形工艺设计

反变形法是基于焊接变形预测结果,预先对构件施加与预期变形方向相反的变形量,以抵消焊接过程中产生的变形。在大型水电站弧形闸门制造中,由于面板面积大、焊缝长,焊接后易产生波浪变形。通过建立精确的有限元预测模型,分析得出面板在焊接后将产生2.5mm/m的波浪变形。据此,在面板焊接前,采用液压装置设置2mm/m的反向波浪。焊接过程中,严格监控焊接参数和顺序,确保变形趋势与预判一致。焊接完成后,经激光扫描检测,面板波浪度控制在1.5mm/m以内,满足设计要求。刚性固定法通过专用工装对构件进行强制约束,限制焊接过程中的变形。在平面闸门组装中,门叶由多块钢板拼接而成,焊接时易产生扭曲变形。为此,设计一套专用刚性固定工装,包括8个液压千斤顶和12个定位螺栓。组装时,先将门叶放置在工装平台上,用定位螺栓初步固定,再通过液压千斤顶施加均匀压力,使门叶与平台紧密贴合。焊接过程中,工装始终保持对门叶的约束,有效防止扭曲变形。经测量,门叶扭曲变形控制在

1mm以内,远低于设计允许的3mm偏差。预留收缩量是根据材料厚度、焊缝长度和焊接方法,预先在构件尺寸上增加的补偿量。以40mm厚钢板对接焊为例,通过试验和计算,确定每米焊缝的收缩量为0.8mm。在钢板下料时,每端预留0.8mm的加工余量。焊接过程中,采用多层多道焊工艺,严格控制线能量和层间温度。焊接完成后,实际收缩量测量值为0.7–0.9mm,与预留量基本一致。优化坡口形式是通过改变焊缝几何形状,减少焊接变形<sup>[3]</sup>。传统V型坡口焊接时,单侧熔敷量大,易产生角变形。在主梁焊接中,原设计采用V型坡口,焊接后角变形量达3.2mm。改为X型坡口后,通过调整焊接顺序和参数,角变形量降至1.9mm,减少40%。同时,X型坡口减少了焊缝金属填充量,降低了焊接成本。坡口形式优化需结合结构强度要求和焊接工艺性,通过有限元分析比较不同坡口的应力分布和变形情况,选择最优方案。在预防变形工艺中,引入智能焊接机器人进行自动化操作。智能焊接机器人可根据预设的焊接参数和路径,精确控制焊接过程,减少人为因素导致的焊接变形。

### 4.2 过程控制工艺

合理安排焊缝施焊顺序以减少变形。箱形梁焊接时,4条主焊缝按顺序施焊变形大,采用对称焊接和跳焊工艺,2名焊工同时从中间向两端对称施焊,纵向收缩量减少35%。复杂结构要制定详细焊接顺序图,明确方向与顺序,还可采用分段退焊法进一步减变形;调整电流、电压和速度控制线能量输入。埋弧焊原参数下热影响区宽,调整后线能量降低,热影响区宽度减少2mm,焊接速度提高,生产效率提升。参数调整要考虑焊缝成形和熔透要求,通过试验确定最佳组合,用自动化设备可精确控制参数;监控焊接层间温度防过热。高强钢焊接原工艺裂纹率高,改用红外测温仪监控,控制在150–200°C,超标暂停施焊,裂纹率降至0.2%。需结合材料特性,易裂材料要预热和后热;搭建防风棚、加热除湿改善环境,提高焊接合格率,改善焊缝质量。在过程控制工艺中,智能焊接机器人发挥着重要作用。机器人可根据焊接顺序和参数要求,自动完成焊接任务,确保焊接过程的稳定性和一致性。同时,机器人配备的智能检测系统可实时监测焊接过程中的温度、电流、电压等参数,以及焊缝的成形情况,一旦发现异常,及时调整焊接参数或停止焊接,避免焊接缺陷的产生。另外,智能检测系统还可对焊接过程进行记录和分析,为后续的工艺优化提供数据支持。

### 4.3 后处理矫正技术

通过局部加热产生塑性变形矫正弯曲。门叶立弯量

15mm时,用三角形加热法,在主梁选底边200mm、高150mm的区域,以氧-乙炔火焰加热至700-800℃后自然冷却,立弯量降至3mm。此方法要控制加热温度与区域,厚板需多层加热;用机械力矫正旁弯。主梁翼缘板旁弯量8mm,用型钢矫正机,经液压装置2次施压后,旁弯量降至1.5mm。适用于旁弯、扭曲变形,但要控制矫正力。复杂变形可结合二者提高效率;加热焊缝密集区降残余应力。闸门焊缝区残余应力280MPa,经650℃局部退火、保温2小时后缓慢冷却,降至170MPa,降40%。要控制加热速度与保温时间,大型构件用分区退火法;焊缝冷却至300-500℃时热锤击减变形。面板波浪度4mm/m,用气动锤击装置后降至3.2mm/m,减20%,需依材料和变形调力度频率。在后处理矫正技术中,引入智能检测设备对矫正效果进行实时评估。例如,采用激光扫描仪对矫正后的闸门进行三维扫描,获取其精确的几何尺寸和形状数据,与设计要求进行对比分析,判断矫正是否达到预期效果。若未达到要求,可根据检测结果及时调整矫正工艺参数,进行再次矫正,提高矫正效率和准确性<sup>[4]</sup>。

#### 4.4 多工艺协同控制策略:

预防-过程-矫正联动:建立三级控制体系,设计阶段依预测模型预留反变形量;制造阶段严控焊接顺序与参数;检测阶段及时矫正超标变形。此联动使闸门一次验收合格率从82%提至96%,降低返修成本与时间。数值模拟-工艺优化闭环:将预测模型与工艺参数关联成动态优化系统。弧形闸门制造中,模拟分析不同焊接顺序影响,调整为对称焊接后整体变形量减28%。该系统要持续更新模型参数,结合生产数据优化工艺,形成“模拟-试验-改进”闭环管理,提升工艺适应性。人员-设备-材料协同:建立焊工技能评级制度,配自动跟踪焊机,用低氢型焊条。实施后焊接缺陷率从3%降至0.5%,需加强人

员培训考核、选用先进设备、严控材料质量,实现焊接质量可控可追溯。在多工艺协同控制策略中,智能焊接机器人与智能检测设备的协同应用是关键。智能焊接机器人负责焊接过程的自动化操作,确保焊接质量和稳定性;智能检测设备则对焊接过程和焊接结果进行实时监测和评估,及时发现焊接缺陷和变形问题,并将数据反馈给焊接机器人和工艺控制系统。工艺控制系统根据检测结果调整焊接参数和矫正工艺,实现焊接变形控制的智能化和精准化。同时,通过建立数据管理平台,对焊接过程中的各种数据进行收集、分析和存储,为后续的工艺优化和质量控制提供数据支持。

#### 结束语

大型水电站闸门焊接变形控制至关重要,关乎闸门性能与工程安全。本文从理论基础到预测模型,再到控制工艺展开研究,提出多种有效方法。通过实践验证,多工艺协同控制策略成效显著,特别是智能焊接机器人和智能检测技术的应用,进一步提高了焊接变形控制的精度和效率。未来,随着技术发展,需持续优化预测模型与控制工艺,加强人员、设备、材料协同管理,进一步提高闸门焊接质量,保障水电站稳定运行。

#### 参考文献

- [1]张茂华.斜支臂弧形闸门焊接支铰制造关键技术[J].四川水利,2021(1):54-57.
- [2]王孝海.罗刚.黄纪村.等.白鹤滩水电站泄洪洞进口弧形闸门安装关键技术[J].水力发电,2020(9):106-110.
- [3]崔晨曦.鲁永宏.郭金萍.大中型水电站压力钢管焊接技术及缺陷分析[J].人民黄河,2021,43(S2):160-161.
- [4]张瑞杰.杨元普.水电站低合金高强度钢压力钢管制作及焊接工艺要点[J].水电站机电技术,2020,43(08):38-41.