

锅浪跷水电站水轮机蜗壳的安装与焊接技术

李万有¹, 杨小军², 杨宏²

(1. 大唐雅安电力开发有限公司, 四川 雅安 625500;
2. 四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611132)

摘要:结合锅浪跷水电站 3 号机组的蜗壳安装与焊接出现的焊接缺陷,从后续的处理措施、处理过程和结果来看,要保证蜗壳安装焊接质量,除加强焊接前的焊接工艺、焊接顺序及方案等技术准备外,焊接过程更要注意减少焊接残余应力,加强焊接环境控制及焊接过程中的预热、后热、层间打磨、焊条保温等精细化管理。所采取的质量管理及技术调整措施,可为其它电站在蜗壳焊接过程中预防焊接缺陷提供参考。

关键词:水电站;蜗壳;安装;焊接

中图分类号:[TM622];[TV734.1];TK36 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2023)04-0081-04

Installation and Welding of Spiral Case in Guolangqiao Hydropower Station

LI Wanyou¹, YANG Xiaojun², YANG Hong²

(1. Datang Ya'an Electric Power Development Co., Ltd., Ya'an Sichuan 625500;
2. Sichuan Ertan International Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611132)

Abstract: Combined with the welding defects in spiral case installation and welding of Unit #3 of Guolangqiao Hydropower Station, from the follow-up treatment measures, processing procedure and results, to ensure the welding quality of spiral case installation, in addition to strengthening the technical preparation of welding process, welding sequence and plan, more attention should be paid to reducing welding residual stress during welding, strengthening the control of welding environment and the fine management of preheating, post-heat-ing, interlayer grinding and electrode insulation in the welding process. The quality management and technical adjustment measures adopted can provide a reference for other power stations to prevent welding defects in the process of spiral case welding.

Keywords: Hydropower Station; Spiral Case; Installation; Welding

1 工程概况

锅浪跷水电站系青衣江一级支流天全河梯级开发中的龙头电站,位于四川省雅安市天全县紫石乡境内,电站主厂房机组设计为 3×70 MW 混流式机组。水轮机型号为 HLA920-LJ-245,额定水头 250 m,在任何工况下甩负荷时,蜗壳进口处最大压力不超过 3.8 MPa。

大机组共 3 台,由昆明电机厂有限公司制造,每台机组蜗壳共分为 24 节,一块舌板。其中小头(第 18~24 节)瓦块与座环焊接在一起,整体到货;其余蜗壳各节在昆明电机厂内预装,将第 2~5 节、第 6~9 节、第 10~13 节、第 14~17 节在厂内分别组装成大节(共 4 大节)加固后分节运至施

工现场进行挂装,现场厂家未设置凑合节和蝶形边。

蜗壳钢板材质均为 Q345R,钢板厚度 $\delta=28\sim36$ mm,其中第 1~6 节厚度为 36 mm,第 7~14 节厚度为 32 mm,第 15~21 节厚度为 28 mm;座环直径 3 298 mm,钢板厚度 $\delta=90$ mm,厂家到货座环材质为 Q345B;蝶形边焊缝直径 4 047 mm,焊缝长度为 9 536 mm,蝶形边为 v 型单面坡口,坡口在流道内侧。蜗壳瓦块与座环焊接采用厂家提供焊条(型号:CHE507, $\Phi 5.0$ mm、4.0 mm、3.2 mm)。

2 3 号机蜗壳安装焊接异常情况

3 号机蜗壳安装焊接完成后,在探伤时多次

收稿日期:2023-07-02

发现焊缝冷裂纹,监理工程师采取了焊材质量核查、更严格控制焊接工艺及焊接过程、旁站监督、组织召开专题会、征询厂家意见、暂停焊接等多种措施,也督促承包人对3号机蜗壳重新进行了焊接,但结果仍不理想。

2.1 第一次焊接及结果

3号机座环安装和蜗壳挂装完成并经监理验收后开始焊接,焊接方式严格按照厂家提供的焊接工艺作业指导书的要求进行,采用多段、多层、多道、退步焊接,焊条为主机厂家提供,焊条现场烘烤保温。

焊接完成24 h后对上、下蝶形边焊缝探伤检查,未发现裂纹,但在后续探伤复查时,发现下蝶形边出现开口性裂纹,其位置在蝶边与蜗壳母材融合线上,为连续性裂纹;上蝶形边裂纹出现在焊缝内部,其位置靠近蜗壳板材侧,也为连续性裂纹。

因裂纹在焊接过后未立即出现,而是相隔一段时间才出现,因而判断为焊接冷裂纹,也称之为“延迟裂纹”。经过承包人和监理单位多方咨询,并与厂家沟通后进一步完善其焊接工艺流程,增加了焊前预热(温度为120℃)、焊后后热(温度为250℃,4 h)工序,其余焊接方式和焊条均未调整,同时,要求承包人严格控制焊接电流、焊接速度、控制焊接层间温度、加强层间焊缝清理等精细化管理。

2.2 下蝶形边焊缝处理及结果

承包人按照厂家要求对3号蜗壳下蝶形边焊缝进行处理,处理完成后对焊缝进行超声波无损检测,发现裂纹仍然存在。监理工程师随即要求承包人暂停蜗壳焊接工作,并及时上报3号蜗壳焊接详细过程、缺陷出现的部位和形式。

鉴于3号蜗壳下蝶形边焊缝处理完成后仍然存在裂纹的情况,监理工程师要求承包人上报“3号机组蜗壳焊缝问题及其焊接方式的函”,经监理工程师审核后,立即转呈了业主并建议业主协调昆明电机厂对该问题出具书面处理意见。业主协调厂家提供了书面回复意见。监理工程师随即转发给承包人,并要求承包人严格按照厂家意见组织现场施工。

2.3 上蝶形边焊缝处理及结果

处理上蝶形边时,先将缺陷刨开后进行着色

探伤检查和渗碳层打磨,确定是否将缺陷部位清理干净,着色探伤合格后,再进行焊接,同时严格控制预热和后热温度。焊前预热(温度为120℃)、焊后后热(温度为250℃,4 h),采用多段、多层、多道和退步焊接方式,焊条为主机厂家提供。焊接完成48 h后,对焊缝进行了超声波无损检测,发现焊缝内部仍有线状缺陷。

监理工程师加大了现场检查旁站力度,在例行检查时发现设备制造厂家提供的焊接材料的出产日期和出产检验批次号与现场实物不符。依据前期焊接情况,虽然设备厂家提供的焊接材料是大西洋牌的CHE507焊条,仍无法确定焊条的质量是否满足要求。为保证后续的焊接质量控制,要求承包人自行采购一批由大西洋自贡总厂生产的CHE507焊条用于后续的焊接施工。

3号机上蝶形边处理完成后,经承包人进行了超声波无损检测,原厂家提供焊条所焊接的焊缝有4处存在裂纹和线状缺陷等质量问题。承包人再次对上蝶形边存在质量缺陷的焊缝,用自购焊条进行了处理,处理完成后进行了超声波无损检测,未发现质量缺陷,整体质量受控。

2.4 下蝶形边焊缝第二次处理及结果

承包人继续对下蝶形边原焊接焊缝有缺陷的部位进行处理,进行刨除、打磨、探伤、重新焊接,焊接完成后进行超声波无损检测,发现上蝶形边第14、15节暂未处理的焊缝缺陷进一步扩大,下蝶形边第4、5、6节又存在不同程度的裂纹、线状缺陷等质量问题。故蜗壳焊接工作再次暂停。

3 3号机蜗壳缺陷的原因

3号机蜗壳裂缝问题出现后,参建各方组织多次进行了技术讨论分析,业主也组织参建各方前往昆明电机厂,召开了锅浪跷水电站3号机组座环蜗壳现场焊接裂纹专题会,初步判定3号机组蜗壳裂纹可能由焊接工艺、结构工艺和环境等造成的应力集中无法释放而产生的。

根据《水轮机金属蜗壳安装焊接工艺导则》(DL/T 5070—2012)及《能源行业标准》(NB/T—35045—2014)等相关规范对现场施工焊缝返修和处理的相关规定:“…同一部位焊缝缺陷返修次数一般不应超过两次…”。由于3号机蜗壳上下蝶形边焊缝已返修两次(共焊接了三次),如果再一次进行返修,极可能导致热影响区冷裂纹和延迟

裂纹的隐患,且多次受热会造成母材晶相组织不均匀和力学性能下降,有可能对机组运行安全及使用寿命造成严重影响。故会议决定后续 3 号机蜗壳及座环返厂进行检测和处理,并重新研究机组蜗壳的焊接工艺、方式和顺序。

4 3 号机蜗壳后续处理措施及结果

针对蜗壳现状,监理工程师进一步加强了蜗壳组装和焊接的质量管理措施,从人员资质审核和安装及焊接过程等方面加强现场质量管理,确保过程全面受控。同时,监理工程师就 3 号机蜗壳裂缝问题,与参建各方多次进行原因分析、技术探讨和开会研究,也结合现场条件提出了很多改善措施,最后决定将减少焊接残余应力作为突破口,遂提出了技术调整措施。

4.1 蜗壳缺陷处理质量的管控措施

4.1.1 处理措施审批

督促承包人按照厂家提供的座环、蜗壳相关图纸及安装说明书、焊接工艺作业指导书和规范等相关要求,编制并上报了“座环及蜗壳质量处理专项施工措施”,监理工程师及时对该措施组织专题研究并进行了批复,对蜗壳的焊接前准备工作、焊接过程的安全措施、蜗壳水压试验、保压浇筑防变形措施,以及特殊作业人员相关资质申报等方面提出了要求。

督促承包人进行了蜗壳焊接工艺评定,并上报了“关于蜗壳焊接工艺评定的函”,监理工程师根据合同文件、规程规范和现场具体情况进行了审查,并正式批复,同时要求承包人根据该报告书及厂家提供的焊接工艺指导书编制焊接作业指导书。

督促承包人上报了“蜗壳焊接工艺作业指导书的函”,监理工程师根据合同文件、规程规范和现场具体情况进行了审核,并正式批复,同时对开焊检查、无损检测、焊条保管、蜗壳焊接的焊工、应力消除、安全技术交底等方面进行了强调要求。

4.1.2 人员资质审核

督促承包人上报了“上报特种作业人员的函”,经监理工程师核查,承包人提交的特种作业人员资质真实并且在有效期内,遂分别进行了批复,并组织焊工进行考试,合格人员方可上岗作业。同时在焊接过程中,多次抽查作业人员的持证情况,确保焊工资格及水平满足规范要求。

4.1.3 蜗壳安装质量控制

蜗壳因其形状而得名,是水流均匀分配流入转轮,减小因水力不平衡而引起水力振动,是形成水轮机环量的关键部件。为了确保蜗壳安装质量,监理工程师督促承包人严格按照工艺要求进行现场施工,同时对每道工序质量进行检验。

(1)检查蜗壳拼装场地应符合设计、制造厂、规范和合同规定的要求。

(2)检查安装单位资源投入,特别是特种作业人员的检查,例如,焊接技术工人和探伤人员,所投入资源能否满足施工要求。

(3)蜗壳拼装的允许偏差应符合设计和制造厂的要求。

(4)进行蜗壳进口直管段的调整及环缝焊接,完成蜗壳层的所有埋管及其它附件安装。

(5)按照设计和制造厂要求安装和焊接蜗壳内部的加固支撑,防止蜗壳变形和位移。

(6)蜗壳安装的允许偏差应符合设计和制造厂的要求。

4.1.4 蜗壳焊接质量控制

(1)所投入的焊工资质满足要求,且应经现场考试合格。

(2)点焊焊条应与焊接焊条相同,焊前应检查点焊质量,如有开裂、未焊透及气孔等缺陷,应彻底清除。

(3)各节间和蝶形边对接焊缝间隙一般为 2~4 mm,过流面错牙不应超过板厚的 10%,但纵缝最大错牙不应大于 2 mm。

(4)坡口局部间隙超过 5 mm,其长度不应超过焊缝长度的 10%,且一般应在坡口处作堆焊处理。

(5)凑合节的环境缝焊接,应有减少焊接应力和防止座环变形的措施。

(6)蜗壳焊缝应进行无损探伤检测或按设计要求进行检测。

所有的蜗壳纵向焊缝及蜗壳与座环的连接焊缝要进行 100%射线探伤检测,并达到《钢焊缝射线照相及底片等级分类法》规定的标准。个别不能用射线检测的部位,要进行 100%超声波探伤检测,达到《钢制压力容器对接焊缝超声波探伤》规定的标准。所有环境缝均应进行 100%超声波探伤检查,对有怀疑的地方,用射线探伤进行复查。

对所有焊缝应打磨平整并进行染色渗透或磁粉探伤检测。

(7)埋设件过流表面焊接应平滑过渡,吸出管里衬上部的焊缝应磨平,混凝土与埋设件过流表面应平滑过渡。

4.1.5 蜗壳水压试验

蜗壳水压试验目的在于检查蜗壳在设计、制造、安装、焊接等全过程的质量,同时消除焊接产生的残余应力。

电站蜗壳试验压力为 5.6 MPa,保压 30 min。蜗壳水压试验分为升压、保压和降压过程,试验中严格按照厂家技术要求执行,升压、降压速度 ≤ 0.10 MPa/min。蜗壳加固、监测仪器安装、试验设备及管路安装等试验准备工作完成后,逐级加压至 0.5 MPa、1.45 MPa、2.7 MPa、3.8 MPa,并在每级压力保压 20 min,再升压至 5.6 MPa 保压 30 min。升压试验无异常且保压时间达到后,开始进行降压,逐级降压至 3.8 MPa、2.7 MPa、1.45 MPa、0.5 MPa,并在每级压力保持 20 min,无异常后降到常压。

蜗壳水压试验时,督促承包人精心组织,重点注意试压闷头焊接质量及探伤结果、蜗壳加固质量,同时试验过程中做好座环位移、蜗壳变形、渗漏情况等检查,并记录各监测百分表读数。

4.1.6 蜗壳混凝土浇筑

(1)蜗壳打压完毕后应检查所有的紧固件是否牢固,复测座环的水平及圆度,合格后充水至保压浇筑压力 1.45 MPa。

(2)浇筑蜗壳混凝土时,严格审核蜗壳层混凝土分层方案(分为三层,蜗壳底部、蜗壳腰线、水轮机层),混凝土浇筑上升速度不应超过 300 mm/h,每层浇高不大于 2 m。且要求混凝土连续均匀入仓,减少对蜗壳的浮托力、侧压力。督促承包人注意加强监测座环和蜗壳的位移及变形情况,并及时根据监测数据调整混凝土的浇筑速度、下料顺序及振捣方式。

(3)混凝土养护期后泄压并拆除打压试验设备,复测座环和蜗壳尺寸,与设计要求进行对比。

(4)对蜗壳过流面进行检查、防腐处理。

4.2 蜗壳安装焊接技术调整措施

针对 3 号机蜗壳焊缝裂缝问题,参建各方多次进行原因分析、技术探讨、开会研究,最后决定

将减少残余应力作为突破口,遂采取了调整蜗壳焊接方式、焊接顺序、加强焊接工艺及细节控制、改善现场环境等技术调整措施。

(1)焊接作业方式由手工电弧焊调整为二氧化碳混合气体(78%CO₂+22%Ar)保护焊。

(2)将第 4 节、第 5 节之间,第 12 节、第 13 节之间的环缝割开,以进一步释放应力。

(3)在蜗壳节上增加履带式加热片,减少温差。

(4)现场搭设彩条布,做好封闭措施,避免风速影响焊接质量。

(5)进一步加强蜗壳的内外加固工作,避免因自重产生外应力。

(6)进一步加强施工现场的环境监测工作,确保其温度、湿度、风速满足焊接条件。

(7)调整焊接顺序。先焊接蜗壳上、下蝶形边,再依次焊接蜗壳节环缝,最后焊接蜗壳进口段的舌板、环焊缝焊接。蜗壳上、下蝶形边焊接步骤为:首先焊接蜗壳上蝶形边外侧焊接(4 层),再焊接下蝶形边外侧焊缝(4 层),再从蜗壳内侧清根、打磨、焊接。采用多段、多层、多道、退步焊接,每焊接一层,用风铲做均匀锤击处理,焊前预热,后棚内湿度 $< 50\%$,焊接处温度 $> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。焊接后热处理,每天焊接完后,预留约 1 h 的后热时间。环焊缝的焊接是先将坡口侧焊缝焊满,从另一侧进行清根、焊接。

4.3 蜗壳缺陷处理结果

通过承包人焊接工艺及顺序的调整、工序质量精细化管理、现场环境条件的进一步改善。机组蜗壳上、下蝶形边焊接完成后,均进行了 UT 探伤检查,无裂纹缺陷存在。并请第三方对焊接质量进行了检测,未发现线状缺陷。后续承包人按照设计和厂家蜗壳水压试验说明书要求进行了蜗壳水压试验,试验过程顺利,无异常情况。

5 结 语

从锅浪跷水电站蜗壳安装焊接中发现的焊接缺陷、后续的处理措施、处理过程和结果来看,要保证蜗壳安装焊接质量,除加强焊接前的焊接工艺、焊接顺序、方案等技术准备外,焊接过程更要注意减少焊接残余应力,加强焊接环境控制及焊接过程中的预热、后热、层间打磨、焊条保温等

(下转第 93 页)

测点高程中误差范围分别为 $\pm 1.0\sim\pm 2.7\text{ mm}$ 、 $\pm 0.9\sim\pm 2.3\text{ mm}$ 、 $\pm 1.3\sim\pm 2.7\text{ mm}$ 。三种方法计算的高程精度都优于 $\pm 3\text{ mm}$,满足相关规范要求;(2)采用方案三时,各监测点高程中误差范围为 $\pm 9.1\sim\pm 11.5\text{ mm}$,方案三计算的高程数据

不能用于高精度监测;(3)采用方案一、二、四时,各监测点高程极限误差都小于3倍中误差,监测成果可信度高;(4)方案四为提高无法对向观测的监测点高程精度和全站仪自动监测的高程精度提供了一种解决思路。

表 2 各监测点高程中误差和极限误差

mm

方案	一		二		三		四	
	中误差	极限误差	中误差	极限误差	中误差	极限误差	中误差	极限误差
TP ₁₁	1.7	3.4	1.4	3.2	11.1	18.9	2.1	4.2
TP ₁₂	2.3	3.9	1.8	2.4	11.1	16.3	1.5	2.6
TP ₁₃	1.9	3.7	1.7	3.1	10.7	16.3	1.9	3.1
TP ₁₄	2.7	5.0	2.3	4.7	10.3	15.7	2.7	5.8
TP ₂₁	1.1	2.0	0.9	1.8	11.5	17.5	1.3	2.4
TP ₂₂	1.9	3.8	1.5	3.1	11.5	20.2	1.7	3.8
TP ₂₃	2.2	3.7	1.6	2.9	11.1	19.1	2.5	3.7
TP ₃₁	1.0	2.1	0.9	1.9	11.2	16.3	1.5	3.7
TP ₃₂	1.4	2.3	1.0	1.8	10.9	17.0	1.3	2.3
TP ₃₃	1.8	2.9	1.3	2.1	11.4	17.1	2.2	3.3
TP ₃₄	2.2	3.7	1.5	2.7	9.1	13.0	2.3	4.9
TP ₄₁	2.1	4.4	1.6	2.4	9.7	14.3	2.4	4.7
TP ₅₁	2.7	5.3	1.4	2.5	9.5	14.0	2.3	4.4

6 结 语

(1)折光系数受气温、气压、日照、时间、地面情况和视线高度等因素影响,同一条边不同时间的折光系数不同,同一时间不同边的折光系数也不同。

(2)折光系数影响三角高程测量结果;可以通过对向观测减弱折光系数对三角高程的影响,也可以通过取测区平均折光系数的方法提高单向三角高程测量的精度。

(3)该项目监测边长平距达520~790 m时,采取投入高精度测量仪器、选择成像稳定的时间进行观测、多测回测边测角、高精度测量仪器高和棱镜高等措施后,三角高程中误差优于 $\pm 3\text{ mm}$ 。

(4)取测区平均折光系数计算单向观测三角高程的中误差优于 $\pm 3\text{ mm}$,随边长的变短精度还会提高。这为提高无法实施对向观测的监测点位和全站仪自动监测的三角高程精度具有借鉴意义。

参考文献:

(上接第84页)

精细化管理。目前,锅浪跷水电站三台机组投运已稳定运行了半年多,机组运行情况良好,说明蜗壳安装焊接质量可靠。

作者简介:

[1] 沈忱,杨凤芸,胡松会. TM30 测量机器人三角高程代替二等水准测量[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012,(3):335-339.

[2] 杜正乔,杜俊凤. 金沙江乌东德水电站工程中三角高程测量代替二等水准测量的可行性研究[J]. 西北水电,2018,(2):32-36.

[3] 杜文举,张恒,景淑媛. 精密三角高程代替二等水准测量的研究[J]. 铁道勘察,2020,(4):1-4.

[4] 刘明波,何为聪,鹿恩锋. TM30 全站仪精密测距的相对湿度修正[J]. 西北水电,2018,(2):30-31,57.

[5] LeicaTS30/TM30 用户手册 1.1 版.

[6] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程测量规范:SL 197-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社. 2013.

[7] 李天文. 现代测量学[M]. 北京:科学出版社,2007.

[8] 马成梧,范汉文,曾群意. 变形监测中提高三角高程测量精度的方法研究[J]. 电力勘测设计,2020,(S2):78-82.

作者简介:

白雷雷(1985-),男,蒙古族,四川成都人,学士,从事水电站工程建设工作;

刘明波(1982-),男,四川井研人,硕士,从事测绘与安全监测管理工作. (责任编辑:卓政昌)

李万有(1974-),男,内蒙古赤峰人,工程师,学士,主要从事水电站机电安装工程管理工作;

杨小军(1975-),男,四川岳池人,高级工程师,学士,主要从事水电站机电安装监理工作;

杨 宏(1966-),男,陕西汉中,人,工程师,学士,主要从事水电站金结制作安装及监理工作. (责任编辑:卓政昌)