

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.12

核电厂薄壁不锈钢管道 BOSS 头焊缝 在线维修技术研究

匡艳军

中广核工程有限公司 核电安全监控技术与装备国家重点实验室,广东 深圳 518170

摘要: 为解决在运核电厂无法隔离的 BOSS 头焊缝在线修复问题,设计了在不去除原焊缝缺陷情况下的堆焊修复方案,并采用手工钨极氩弧焊工艺对薄壁不锈钢管道上 BOSS 头焊缝在排空以及带水带压条件下进行堆焊返修,通过理化性能分析、金相检验以及相控阵超声波检验模拟仿真、试验,评价所开发的修复方案、工艺和堆焊层质量。结果表明:设计的堆焊返修方案可行,可在核电厂 20 h 的窗口期内完成焊接返修,所开发的焊接工艺,通过控制焊接熔深可避免焊接过程中冷却介质的泄漏并获得组织和力学性能满足要求的焊缝,为电厂薄壁管道在线维修提供了一种新的选项,提升电厂的安全性和经济性。

关键词: 核电厂;薄壁不锈钢;BOSS 头焊缝;在线维修

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)11-0082-07

In-service Repairing Technique Study on BOSS Welds of Thin-walled Stainless Steel Pipes in Nuclear Power Plant

KUANG Yanjun

State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.,
Shenzhen 518172, China

Abstract: In order to repair the BOSS welds which can not be isolated even shutting down the operating nuclear power plant, a overlay repair scheme with pre-existed defects not been removed was proposed, which was carried out using manual GTAW procedure for BOSS welds on thin-walled stainless steel pipes with and without coolant and pressure inside. The scheme, procedure and the quality of the repair welds was evaluated by mechanical properties tests, micro and macro examination, simulation and verified test of phased array ultrasonic examination. Results shows that the proposed repairing scheme is feasible, which can be completed in the 20 hours limited time windows of the plant, the leaking risk of the coolant can be avoid by controlling the welding fusion depth with the specific welding procedure developed, and the microstructure and mechanical properties of the welds can be satisfied. Then a new selection could be in place for the in-service repairing of the thin-walled pipe to guarantee the safety and the economy of the nuclear power plant.

Keywords: nuclear power plant; thin-walled stainless steel; BOSS welds; in-service repairing

引用格式: 匡艳军. 核电厂薄壁不锈钢管道 BOSS 头焊缝在线维修技术研究[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 82-88.

Citation: KUANG Yanjun. In-service Repairing Technique Study on BOSS Welds of Thin-walled Stainless Steel Pipes in Nuclear Power Plant[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 82-88.

0 前言

核电厂管道系统中大量采用加强型管接头结

构^[1],业内简称“BOSS 头焊缝”。2016 年国内首次发生核安全级 BOSS 头焊缝泄漏质量事件,经采用非标射线检验排查^[2],发现 BOSS 头焊缝存在大量

* 收稿日期: 2022-04-24 修回日期: 2022-07-07

作者简介: 匡艳军(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事核电厂核级设备材料焊接及无损检测研究设计。

气孔、夹渣、未熔合等缺陷。按照相关监管要求,在运核电厂绝大部分有超标缺陷的 BOSS 头焊缝已通过打磨去除缺陷后焊接返修、切割更换新 BOSS 头管座后重新焊接等方式完成了处理^[3]。然而,部分 BOSS 头焊缝所处管道系统因无法隔离排水或返修窗口时间短,无法采用前述两种方式进行处理。尽管国内外已有管道焊缝带缺陷堆焊(Overlay)修复的技术和工程案例^[4-10],但该类案例多是在管道内部排空的情况下进行堆焊修复,不能满足部分 BOSS 头焊缝的维修需求,同时非标射线检验排查也存在诸多局限性^[11]。国内部分单位针对 BOSS 头预制焊缝开展了相控阵超声检测技术的研究^[1,12],但针对堆焊返修焊缝的相控阵超声检测技术的相关研究报道较少。

本文通过不锈钢管道内部不带水、带水带压条件下 BOSS 头焊缝在线堆焊修复工艺试验,分析堆焊返修结构的焊缝成形、组织与性能情况,研究 BOSS 头堆焊返修焊缝的相控阵超声检验技术,分析堆焊后接头的残余应力分布状态,旨在为在运核电厂核级 BOSS 头焊缝的在线返修提供技术支撑,具有十分重要的工程意义。

1 试验材料和方法

1.1 BOSS 头焊缝结构与材料

以核电厂不锈钢 BOSS 头焊缝为研究对象,母管外径 273 mm,壁厚 4 mm, BOSS 头焊缝结构形式如图 1 所示。支管外径 44 mm,内径 26 mm,壁厚 9 mm。母管、支管材料为满足 RCC-M^[13] M 3304 的 Z2CN18-10 奥氏体不锈钢,BOSS 头管座材料为满足 RCC-M M 3306 的 Z2CN18-10 奥氏体不锈钢。BOSS 头预制焊缝采用钨极惰性气体保护焊+焊条电弧焊方法进行焊接,坡口角度约为 25°,焊接材料分别为 ER316L 和 E316L,其化学成分和力学性能分别见表 1、表 2。

1.2 堆焊试验设计

根据目标 BOSS 头返修条件和要求,为减小焊接熔深(目标 2 mm 以内),避免堆焊时管道内部介质泄漏,选用热输入较小的钨极惰性气体保护焊工艺(GTAW);为提升工艺对 BOSS 头结构适用性,选

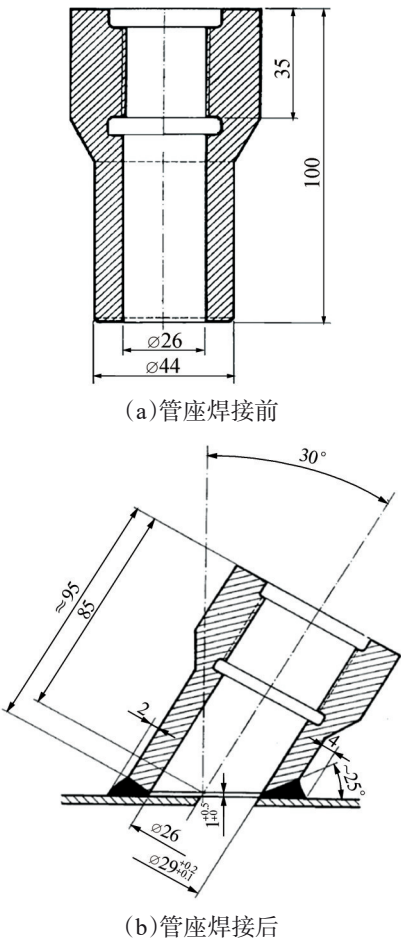


图 1 BOSS 头焊缝结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of BOSS weld

表 1 焊接材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of welding filler materials (wt. %)					
材料	C	Mn	Si	S	P
ER316L	0.010	1.69	0.43	0.011	0.020
E316L	0.021	1.51	0.62	0.008	0.021

材料	Cr	Ni	Mo	Co	δ铁素体数
ER316L	18.41	12.18	2.60	0.10	7.40
E316L	19.08	12.35	2.76	0.03	7.58

表 2 焊接材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of welding materials					
材料	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	Z/%	A/%	KV/J(室温)
ER316L	612	469	55	30	138, 144, 146
E316L	595	502	50	38	70, 75, 75

用手工堆焊方式;为控制焊接变形,堆焊顺序采用从支管向母管侧焊接,施焊顺序见图 2。

为对比分析不同作业条件下的堆焊质量差异,确保堆焊层组织和力学性能满足要求,分别在无水

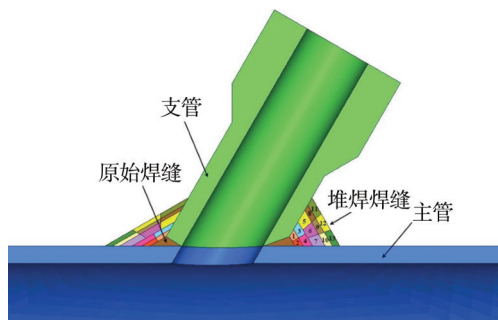


图2 堆焊焊道施焊顺序示意

Fig. 2 Welding sequence of surfacing weld bead

状态、带水带压状态条件下进行目标BOSS头焊缝堆焊工艺试验,并在固化堆焊工艺参数后采用带预制缺陷的试验件(即在预制焊缝上钻贯通内外表面的小孔,然后外表面2 mm厚度范围焊接密封)开展堆焊试验,模拟预制焊缝内部存在缺陷接近贯穿的情况,验证所开发工艺在该极端条件下对BOSS头返修的适用性,不会出现冷却介质泄漏。

带水带压试验工况为:内部为含硼水介质,设计温度 50 °C,设计压力 0.7 MPa,有轻微振动。

1.3 堆焊结构设计

根据BOSS头焊缝的结构尺寸,综合考虑RCC-M和ASME^[15](含相关Code Case)管道设计和在役返修相关要求,对目标BOSS头焊缝进行堆焊结构设计,确保堆焊修复结构满足强度及完整性要求,包括:(1)堆焊结构承载焊缝有效厚度大于结构强度设计要求的最小厚度。(2)堆焊厚度应满足压力所引起的总体一次薄膜应力强度的限制要求。(3)缺陷深度小于堆焊后壁厚的75%。(4)堆焊厚度应满足根据净截面塌陷理论及极限载荷准则计算的最小计算厚度要求。(5)堆焊长度应保证应力能在管道和堆焊层中重新分布,以满足一次局部和弯曲应力和二次峰值应力的限制。

经前期试验确定,本项目设计堆焊厚度6~9 mm,堆焊长度12~15 mm,堆焊层与两侧母材过渡夹角不超过45°。

1.4 超声波检验设备和探头

堆焊后应对BOSS头焊缝及堆焊层进行相控阵超声检验(PAUT)。先采用CIVA-UT软件,对目标BOSS头焊缝及堆焊层可检性进行模拟仿真,获得初步的工艺参数,然后通过专用的模拟试块进行试

验验证和固化。采用TOPAZ(32/128PR)便携式PAUT仪器,根据目标BOSS头焊缝结构,探头选用自聚焦线阵、单晶线阵、双晶线阵以及柔性探头,探头频率2.25~5.0 MHz,采用R35自聚焦或者矩形晶片,以及AOD20~80 mm、凸型和水囊楔块,设计了专用扫查装置(见图3)。

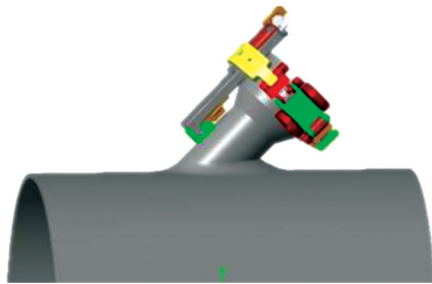


图3 BOSS头焊缝及堆焊层 PAUT 检验示意

Fig. 3 Schematic diagram for PAUT inspection of BOSS welds and overlay

1.5 残余应力模拟和测试

BOSS头堆焊修复时,一方面堆焊层产生抗应力腐蚀开裂的新压力边界,另一方面,堆焊改善了焊缝残余应力分布,将焊缝金属中易发生应力腐蚀开裂的残余应力由拉应力变为轴向和环向应力,从而阻止应力腐蚀开裂的发生和后续生长^[13]。为充分了解堆焊后BOSS结构内部残余应力分布,及验证目标BOSS头焊缝残余应力计算模型,在堆焊模拟试验过程中采用K型热电偶进行了焊接温度场测试。焊接完成后的试件采用切割法、轮廓法进行了残余应力测试。

2 试验结果与分析

2.1 堆焊工艺试验

堆焊试验主要工艺参数如表3所示,其他参数为:保护气体为99.9%氩气,气体流量8~15 L/min,焊接电压9~12 V,焊接设备为WSM-315D,占空比60%。相对于无水条件,带水带压条件下的焊接峰值电流略高,主要原因是背部带水条件下散热较快,熔池冷却速度加快,熔池铺展不充分,为保证焊接成形质量,焊接热输入相对无水条件大。

在表3的焊接参数下,带水和无水条件下堆焊首层焊接熔深最大值分别为1.51 mm和1.99 mm,

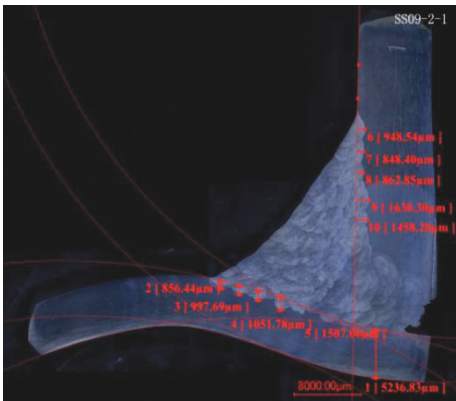
表 3 堆焊主要工艺参数

Table 3 Main welding parameters of overlay

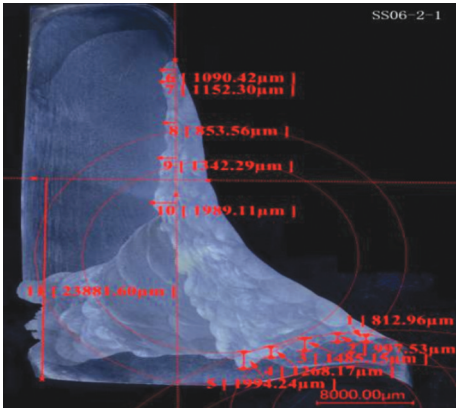
焊层	峰值电流/A		基值电流/A	焊接速度/(mm·min ⁻¹)		道间温度/℃	平均热输入/(kJ·mm ⁻¹)	
	有水	无水		有水	无水		有水	无水
首层	81~95	70~80	56~65	53~55	50~55	≤100	0.539	0.498
其他层	85~100	85~100	60~66	55~60	55~60	≤175	0.565	0.530

注:热输入系数K取0.6.

均可控制在2 mm的预期目标内(见图4)。可以看出,带水条件下的焊接熔深更小,这是因为其焊缝及热影响区的冷却速度相对无水条件更大,能量峰值更低。无水和带水条件下堆焊层及母材金相组织如图5、图6所示。可以看出,由于母材和焊材均为单一的奥氏体组织,在小的焊接热输入条件下,焊缝组织不会发生转变,仍为奥氏体组织,无异常组织。



(a)带水条件



(b)无水条件

图4 堆焊首层焊接熔深

Fig. 4 Weld penetration of the first layer of surfacing

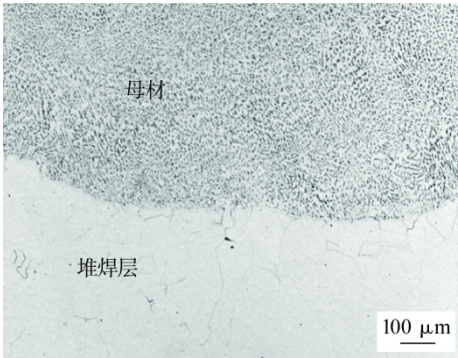
堆焊熔敷金属力学性能如表4所示,无明显差异,均满足设计要求,并与对应母材匹配,主要原因是在相对较小的焊接热输入条件下,焊缝晶粒度大

小相当(见图5、图6),因此其力学性能变化不大。同时,在带水带压条件下,对带预制缺陷试件采用上述工艺参数进行堆焊返修模拟试验,未出现冷却介质渗漏的情况。

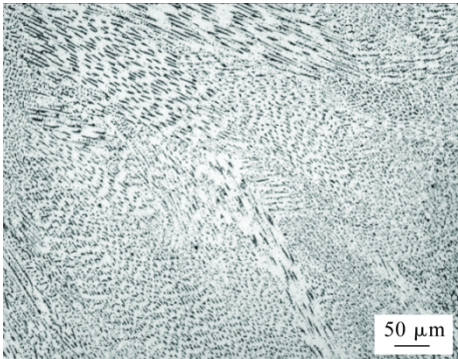
表 4 熔敷金属力学性能

Table 4 Mechanical properties of welding deposition

项目	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	室温冲击吸收 能量/J
设计要求	520~670	≥210	30	60
带水条件	604	420	36	78,74,76
无水条件	591	408	35	70,77,75



(a)熔合线附近组织



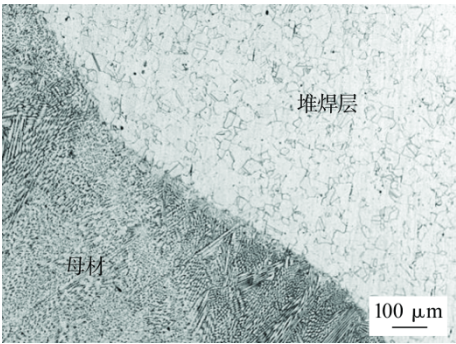
(b)第一层焊缝组织

图5 无水条件堆焊层及母材金相组织

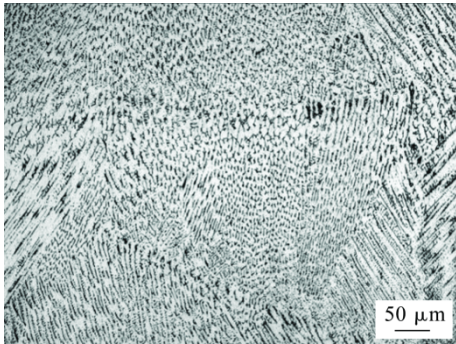
Fig. 5 Metallographic structure of surfacing layer and base metal under water free condition

2.2 超声检验模拟仿真和试验

在 PAUT 技术开发过程中,本项目参照 ASME



(a)熔合线附近组织



(b)第一层焊缝组织

图6 带水条件堆焊层及母材金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of surfacing layer and base metal under water condition

规范较大直径(大于 60 mm)的其他类似接管座焊缝在役检查要求,确定检查范围为内壁 1/3 厚度(常规 UT 检查)作为本项目研究的目标,RCC-M 及 RSEM 规范无此类检查要求。

通过 CIVA 模拟仿真(见图 7),确定目标 BOSS 头 PAUT 检验关键技术要求:探头频率 2.25 MHz,单晶 16 线阵探头,预制焊缝的聚焦法则采用 35°~70°扇形扫查,从 BOSS 头母管侧进行扫查。堆焊层的聚焦法则:声束偏转角度范围为-15°~+15°,从堆焊层表面进行扫查。模拟仿真结果表明,所有 BOSS 头预制焊缝可实现内壁 1/3 区域可检、60%的 BOSS 头预制焊缝可实现内壁 2/3 区域可检,不锈钢堆焊层 100%可检验。

带缺陷模拟试块相控阵超声检验试验结果表明,可实现预制焊缝内壁 1/3 厚度(部分为 1/2 厚度)范围内 5 mm(长)×2 mm(高)×0.2 mm(宽)未熔合、直径 2 mm 气孔的 100%有效检出。不锈钢 BOSS 头焊缝堆焊层区域中 4 mm 当量及以上的缺陷可有效检出,直径 3 mm 气孔无法检出,详见表 5。

2.3 残余应力模拟和测试

针对堆焊试件采用轮廓法测量 BOSS 结构残余

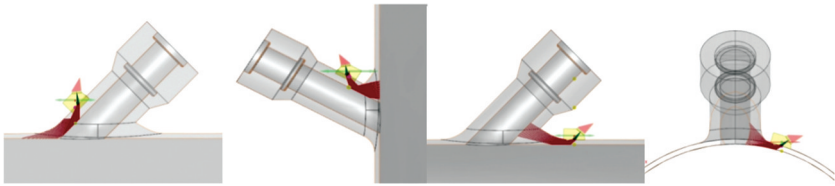


图7 BOSS头焊缝及堆焊层 PAUT 检验仿真示意

Fig. 7 Simulation diagram of PASS inspection for BOSS weld and overlay

表5 BOSS头预制及堆焊焊缝模拟缺陷典型检查结果汇总

Table 5 Summary of typical inspection results for simulated defects of BOSS head prefabrication and overlay welds

检验对象	缺陷编号	缺陷类型	缺陷尺寸/mm	缺陷坐标	波幅 (DAC-dB)	深度/mm	长度/mm	高度/mm	矫正长度/mm
预制焊缝	1	上坡口根部未熔合	5×2×0.2	0°	+3	6.6	6	2.7	3.4
	2	上坡口中部未熔合	5×2×0.2	90°	-8	3.2	4	1.4	3.1
	3	下坡口根部未熔合	5×2×0.2	180°	-9	6.3	4	1	3.3
	4	下坡口中部未熔合	5×2×0.2	270°	-7	2.5	4	2	3.3
	5	气孔	∅2	0°	-14	5.3	5	2	3.2
堆焊层	1	气孔	∅2	0°	—	—	—	—	—
	2	气孔	∅3	90°	—	—	—	—	—
	3	气孔	∅3	180°	—	—	—	—	—
	4	夹杂	4	0°	-10.5	5	7	4	5
	5	夹杂	4	90°	-14	0.1	4	4	4
	6	夹杂	4	180°	-11	3.7	5	3.5	4.5

应力分布状态。首先对需要测量的截面进行切割,再采用超声波清洗设备清洗切割面,之后测量表面粗糙度,测点间距小于 $170\ \mu\text{m}$,扫描精度小于 $20\ \mu\text{m}$ 。

扫描后获得的点云图、点云数据为切割面上的测点相对于基准面的位移量,再通过轮廓法分析模型算出切割面上的残余应力分布,如图 8 所示。

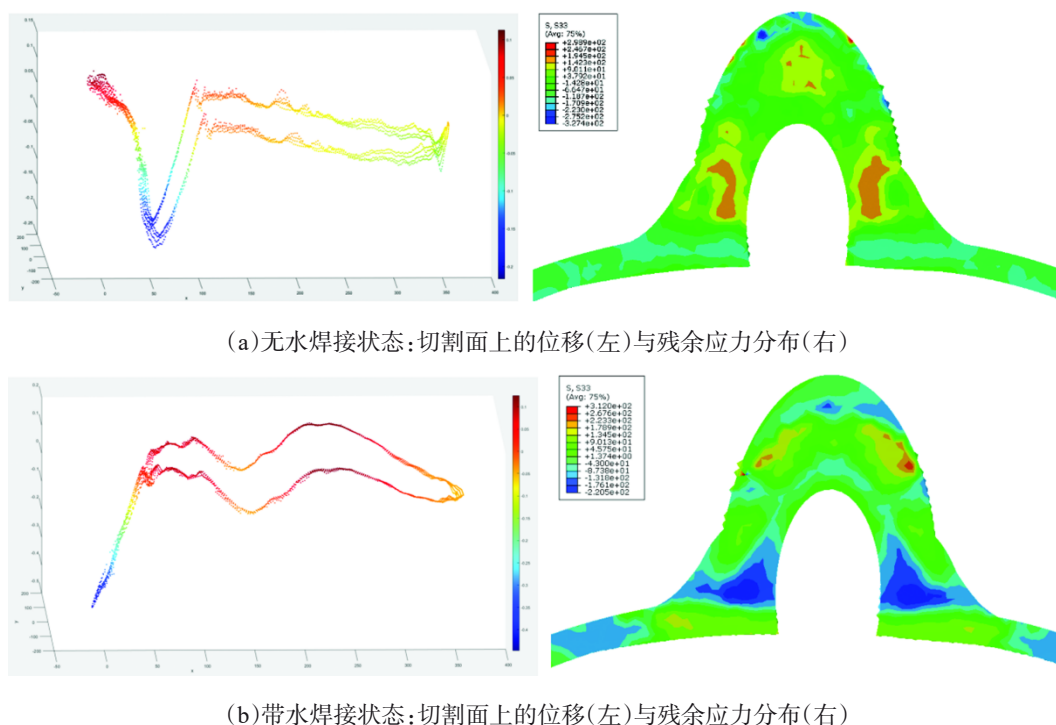


图 8 焊接残余应力分布状态的对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of distribution state of welding residual stress

由图 8 可知,管道内部通水明显影响了焊接传热过程,由于内部水冷作用,焊接热影响区减小,热循环时间缩短,压缩塑性变形区减小,焊接残余应力的分布范围产生了明显变化。无水状态下原始焊缝位置产生了明显向下凹的位移,而带水焊接时焊缝及支管位置呈明显向下的变形,因此形成了两种不同的应力状态。无水焊接时,原始焊缝中呈现低拉应力状态,堆焊位置处为压应力;带水焊接时,原始焊缝与堆焊焊缝大部分呈现不同程度压应力状态(蓝色区域),而压应力可以更好地抑制裂纹的扩展进而提高结构的安全性能。

通过有限元建模建立焊接残余应力模型,并使用实验数据对模型进行修正,进而使用快速断裂的方法对结构的完整性进行评价,结果表明两个试件经堆焊修复后均可满足核电站寿期内运营需求。带水条件进行的堆焊修复,由于产生了更多的压应力区域,对结构的安全评定产生了更多的积极作用。因此,通过堆焊修复方式可以有效抑制结构缺

陷造成的影响,水冷方式下的堆焊可以更加有效地改善由堆焊修复方式引入的残余应力的分布状态,进一步提高安全性能。

3 结论

(1)采用手工 GTAW 焊接工艺可以实现薄壁不锈钢管道 BOSS 头焊缝带水带压条件下的在线堆焊返修,能有效避免管道内部冷却介质泄漏。

(2)PAUT 技术可实现不锈钢 BOSS 头预制焊缝根部缺陷的排查,符合 ASME 规范类似角接头针对根部 $1/3$ 区域的在役监督要求。可实现返修堆焊层 $4\ \text{mm}$ 当量及以上的缺陷可有效检出,无法检出直径 $3\ \text{mm}$ 气孔型缺陷,还有待进一步研究。

(3)带水条件的堆焊能够更加有效地改善由堆焊修复引入的残余应力的分布状态,堆焊返修后 BOSS 头结构满足寿期内服役完整性要求。

参考文献:

- [1] 唐亮,张进,邓小云. 核电厂 BOSS 焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2019, 41(06): 46-50.
TANG L, ZHANG J, DENG X Y. Phased Array Ultrasonic Testing of BOSS Weld in Nuclear Power Plant [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(06): 46-50.
- [2] 李守彬. 管座焊缝的失效原因及改进措施[J]. 电站辅机, 2019, 40(01): 36-39.
LI S B. Failure Reasons and Improvement Measures of Pipe Seat Welding seam [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2019, 40(01): 36-39.
- [3] 熊志亮. 核电厂 BOSS 头焊缝缺陷处理及质量改进[J]. 电焊机, 2019, 49(04): 86-90.
XIONG Z L. Defect treatment and quality improvement of BOSS welds in nuclear power plant [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(04): 86-90.
- [4] American Society of Mechanical Engineers. Code-Case N504-4 Alternative Rules for Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping, Section XI, Division 1[S]. ASME, 2015.
- [5] American Society of Mechanical Engineers. Code-Case N740-2 Full Structural Metal Overlay for Repair or Mitigation of Classes 1, 2, and 3 Items, Section XI, Division 1[S]. ASME, 2015.
- [6] American Society of Mechanical Engineers. Code-Case N666-2 Reinforcement of Classes 1, 2, and 3 Socket Welded Connections, Section XI, Division 1[S]. ASME, 2006.
- [7] American Society of Mechanical Engineers. Code-Case N562-2 Alternative Requirements for Wall Thickness Restoration of Class 3 Moderate Energy Carbon Steel Piping, Section XI, Division 1[S]. ASME, 2007.
- [8] 孙海涛,盛朝阳,高晨,等. OVERLAY 堆焊技术在核电设备维修中的应用[J]. 焊接, 2015(9): 53-56.
SUN H T, SHENG C Y, GAO C, et al. Application of OVERLAY welding technique to nuclear equipment maintenance and repairment [J]. Welding & Joining, 2015(9): 53-56.
- [9] 吴江涛. 控制棒驱动机构密封焊缝缺陷修复技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
WU J T. Study of overlay technology for the repair of control rod drive mechanism canopy seal weld [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [10] 林方强,王建,罗绪珍,等. 核电管道安全端异种金属焊接接头表面堆焊的有限元分析[J]. 电焊机, 2016, 46(7): 129-133.
LIN F Q, WANG J, LUO X Z, et al. Finite element analysis of the overlay welding on a nuclear nozzle safe-end dissimilar metal weld joint [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(7): 129-133.
- [11] 吴伟帮,许金才. 核电厂 BOSS 头焊缝的无损检测要求[J]. 无损检测, 2018, 40(3): 51-55.
WU W B, XU J C. Nondestructive Testing Requirements of BOSS Weld in Nuclear Power Plant [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(3): 51-55.
- [12] 汤建帮,康志平,余哲,等. 核电厂 BOSS 头焊缝相控阵超声检测技术[J]. 无损检测, 2018, 40(10): 29-33.
TANG J B, KANG Z P, YU Z. Phased Array Ultrasonic Inspection of Boss Welds in Nuclear Power Plant [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(10): 29-33.
- [13] 张士朋,刘震顺,吴高峰,等. 某核级管道 BOSS 头含缺陷焊缝处置方案优化研究[J]. 压力容器, 2019, 36(10): 56-61.
ZHANG S P, LIU Z S, WU G F, et al. Research on Optimization of Disposal Scheme of Defective Welds in BOSS Head of a Nuclear Piping [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(10): 56-61.
- [14] French association for design, construction and in-service inspection rules for nuclear island components (AFCEN). Design and construction rules for mechanical components of pressurised water reactor nuclear islands, Section II & IV[S]. RCC-M 2000+2002 Adendum.
- [15] American Society of Mechanical Engineers. Nonmandatory Appendix Q Weld Overlay Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping Weldments, Section XI, Division 1[S]. ASME, 2004.