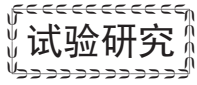


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.05.001



核电稳压器筒体内壁不锈钢堆焊层 309L 过渡层 裂纹产生机理分析

王炜铭^{1,2},张明明²,余 春³,杨淼森¹,罗 庆²,孙志远²,胡光敏²,陆 皓³,纵 海²,张茂龙²

(1.上海电机学院 材料学院,上海 201306;2.上海电气核电设备有限公司,上海 201306;

3.上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240)

摘 要:针对核电稳压器筒体内壁不锈钢堆焊层 309L 过渡层中出现的微裂纹缺陷问题,采用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、光学显微镜(OM)及能谱分析(EDS)等方法,对截取的带裂纹样品进行了深入研究。结果表明,这些微裂纹为高温失延裂纹,其特征是裂纹沿晶界扩展并伴有晶界滑移,且晶界中存在大量氧化物。通过复现试验并结合实际工况,发现裂纹产生的主要原因是焊接过程中焊缝工作区域保护不充分,导致晶界氧化物析出,进而在焊接应力的作用下萌生并扩展。研究开发的高温失延裂纹复现试验方法有效验证了裂纹性质及成因,为核电设备堆焊工艺的改进和优化提供了重要的理论依据,对确保核电设备的安全运行具有重要意义。

关键词:核电稳压器;不锈钢堆焊层;裂纹

中图分类号:TH49;TG455

文献标志码:A

Analysis of crack formation mechanism in 309L transition layer of stainless steel cladding on inner wall of nuclear power pressurizer vessel

WANG Weiming^{1,2},ZHANG Mingming²,YU Chun³,YANG Miaosen¹,LUO Qing²,SUN Zhiyuan²,

HU Guangmin²,LU Hao³,ZONG Hai²,ZHANG Maolong²

(1.Department of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2.Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

3.College of Materials Science and Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:To address the problem of microcrack defects in the 309L transition layer of the stainless steel cladding on the inner wall of a nuclear power pressurizer vessel, methods including scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to conduct in-depth research on intercepted samples with cracks. The results show that these microcracks are high-temperature ductility-dip cracks, characterized by intergranular propagation accompanied by grain boundary sliding, with a large amount of oxides present at the grain boundaries. Through reproduction tests and combined with actual working conditions, it was found that the main cause of crack formation is insufficient protection of the welding zone during the welding process, leading to the precipitation of grain boundary oxides, which subsequently initiate and propagate under welding stress. The developed reproduction test method for high-temperature ductility-dip cracks effectively verified the nature and cause of the cracks, providing an important theoretical basis for the improvement and optimization of cladding processes in nuclear power equipment, which is of great significance for ensuring the safe operation of nuclear power equipment.

Key words:nuclear power pressurizer; stainless steel cladding layer; cracks

收稿日期:2025-02-24 修回日期:2025-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52275354)

0 引言

核电站稳压器是核岛一回路中重要设备^[1-2],由筒体和封头组成,其主体材料为SA-508Gr.3 Cl.1低合金钢锻件。为保证耐腐蚀性能,需在稳压器内壁堆焊一定厚度的309L/308L奥氏体不锈钢^[3-6],此过程涉及低合金钢与不锈钢的异种合金焊接。由于母材稀释使堆焊层成分发生变化,杂质元素也会进入到堆焊层中,并通过扩散在界面处309L堆焊层增碳,使得309L过渡层成分变化明显:奥氏体元素碳增加及铁素体元素Cr减少;过渡层为全奥氏体组织,同时硫、磷等杂质元素也可能增加,导致堆焊层特别是309L过渡层中易出现结晶裂纹和液化裂纹,这是309L/308L不锈钢在低合金钢堆焊中工艺控制重点和难点之一。

关于异种合金焊接裂纹的产生机理分析,国内外已开展大量研究。郭泉等^[7]对奥氏体组织的Inconel 625合金堆焊金属开裂机理进行研究,发现大厚度堆焊金属组织的裂纹为结晶裂纹。冯杰才等^[8]认为低合金钢与奥氏体不锈钢异种金属焊接时,由于异种金属的成分、熔点、热膨胀系数、强塑性等差异较大,焊缝容易出现液化裂纹。崔巍^[9]研究表明,高温失延裂纹(ductility-dip crack,

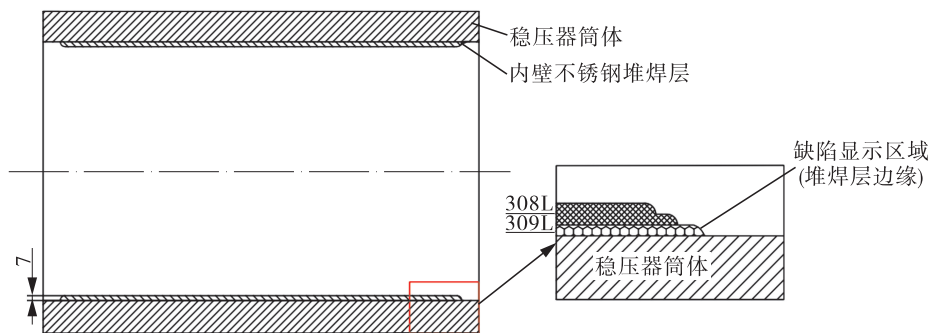
DDC)一般发生在镍基合金焊缝中。余春等^[10]认为高温失延裂纹是镍基合金中常见的一种微观缺陷,常出现在多层多道焊中。目前,关于低合金钢与奥氏体不锈钢异种金属焊接时,堆焊层过渡层出现高温失延裂纹的研究报道较少。

本文以某项目核电稳压器筒体内壁不锈钢堆焊层边缘的309L过渡层为研究对象,通过现场检查 and 样品失效分析,确认裂纹为高温失延裂纹。同时,结合产品焊接实际工况条件,探讨裂纹产生的成因及机理,并通过首次开发的高温失延裂纹复现试验,验证裂纹性质及原因,提出低合金钢材料表面奥氏体不锈钢堆焊层中高温失延裂纹产生机理,为同类堆焊工艺的改进和优化提供理论支撑。

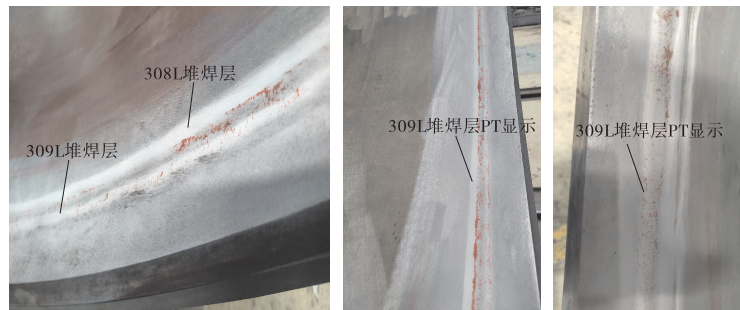
1 理化检验

1.1 试样来源

某项目核电稳压器产品制造过程中,采用超声波检测(UT)和着色检测(PT)对筒体内壁不锈钢堆焊层进行质量检查。结果显示,不锈钢堆焊层内部未发现缺陷信号显示,但在筒体内壁堆焊层边缘表面存在线性和点状密集分布的不合格缺陷显示,且缺陷显示均位于309L过渡层中,如图1所示。



(a)筒体内壁堆焊层缺陷显示区域



(b)筒体内壁堆焊层边缘PT缺陷显示

图1 稳压器筒体内壁堆焊层缺陷显示区域及PT缺陷显示

Fig.1 Defect indication area in cladding layer on inner wall of pressurizer vessel and PT indication

随机选取存在不合格缺陷显示的堆焊层区域,采用砂轮片切割法,从稳压器下筒体内壁边缘的309L堆焊层截取带有裂纹的试样,如图2所示。

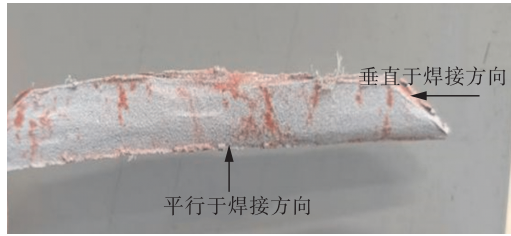


图2 实际产品中截取的带裂纹试样

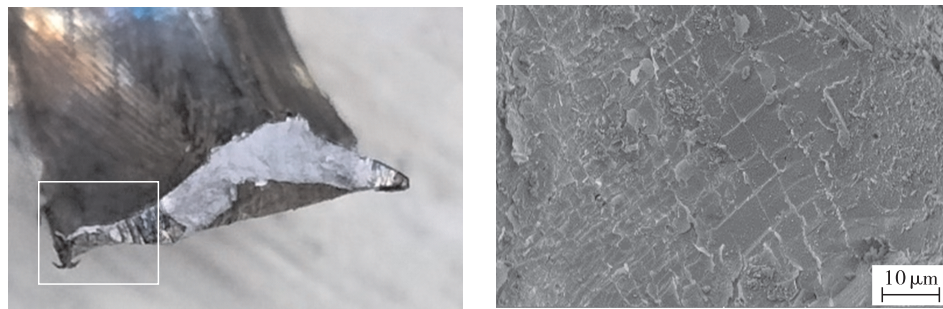
Fig.2 Cracked specimen extracted from actual product

对截取试样进行金相试样制备,经精磨、抛光后,采用15%的铬酸溶液进行电解腐蚀,腐蚀电压6 V,腐蚀时间12~17 s。利用GX52光学显微镜(OM)和XL-30FEG扫描电子显微镜(SEM)对裂纹附近微观组织展开观察。同时,借助

XL-30FEG型SEM上配置的能谱(EDS)对裂纹附近成分进行分析。对于折断的试样,则运用SEM,EDS及D/max-2400PC型X射线衍射仪(XRD)开展断口分析。

1.2 断口分析

对实际产品中截取的带裂纹试样进行断口分析,发现断口表面呈现明显的金属光泽,如图3(a)所示。图3(b)示出带裂纹试样断口局部区域的微观形貌。可以看出,断口表面呈现典型的脆性断裂特征,存在龟裂片状薄层,且未观察到韧窝特征和自由结晶面,不具有结晶裂纹和液化裂纹的特征,而与高温失延裂纹的断面特征一致。为进一步分析断口特征,采用EDS和XRD对断口进行成分分析。图4示出能谱分析结果。可以看出,龟裂的片状薄层中富含氧(O),表明这些龟裂片状薄层存在氧化物。



(a)断口宏观形貌

(b)断口局部区域微观形貌

图3 带裂纹试样的断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of specimens with cracks

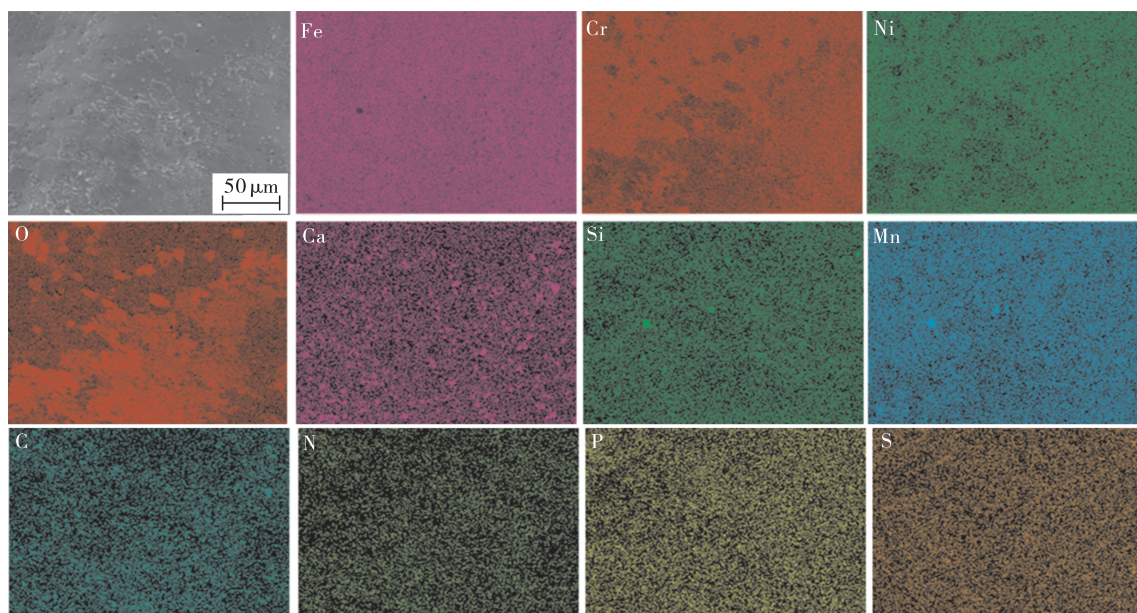


图4 带裂纹试样的断口元素分布

Fig.4 Element distribution of fracture of specimen with cracks

图5示出XRD分析结果。据此初步确认氧化物为氧化铬和氧化铁。

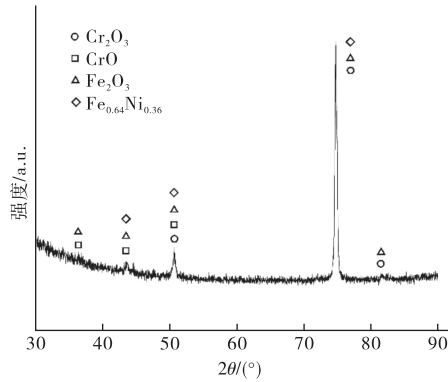
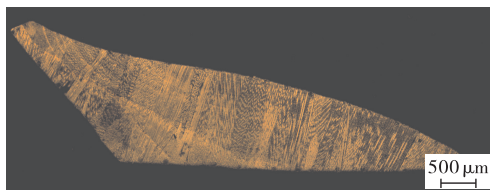


图5 带裂纹试样的断口XRD谱图

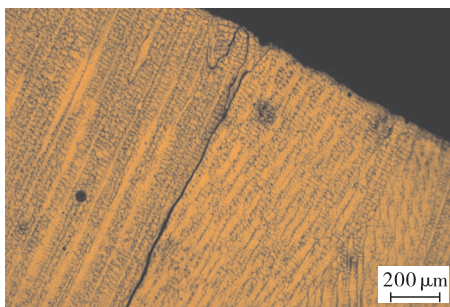
Fig.5 Fracture XRD spectra of cracked specimens

1.3 微观组织与裂纹特征分析

图6示出带裂纹试样关于垂直焊接方向的微观组织形貌。可以看出,该界面的微观组织呈现出晶粒较大的树枝晶特征。就树枝晶的方向而言,它们之间存在一定夹角,据此可区分出晶界,每个晶粒由多束树枝状亚晶构成。从图6(b)可以看出,裂纹出现在晶界上,并沿晶界扩展,部分裂纹甚至贯穿整个焊缝。这种裂纹沿晶扩展的特征与高温失延裂纹的晶界特征相吻合^[11]。



(a) 试样垂直焊接方向低倍金相



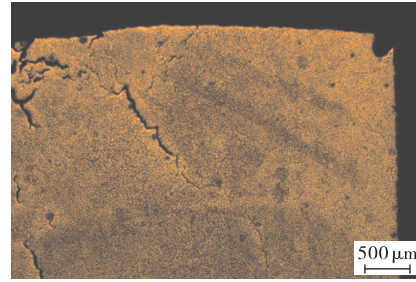
(b) 试样垂直焊接方向高倍金相

图6 带裂纹试样关于垂直焊接方向微观组织的OM图像

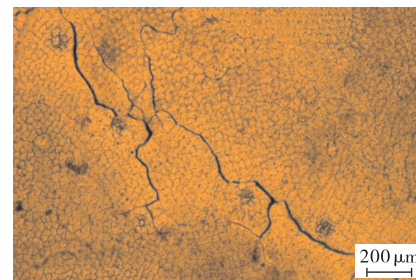
Fig.6 OM images of the microstructure of the cracked specimen in the vertical welding direction

图7示出带裂纹试样关于平行焊接方向的微观组织形貌。可以看出,该界面的微观组织特征呈现出等轴亚晶和近等轴晶粒的特征。沿着焊接方向观察,在界面的两侧均出现了数量较多的裂

纹。从图7(b)可以看出,裂纹沿着近等轴晶的晶界分布。这些裂纹最大长度可达数毫米,扩展路径上涉及多个晶粒。



(a) 试样平行焊接方向低倍金相



(b) 试样平行焊接方向高倍金相

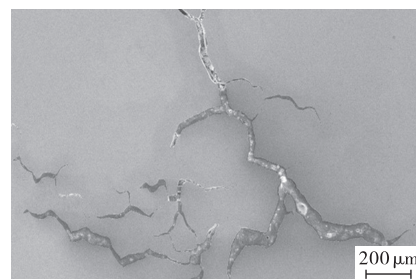
图7 带裂纹试样关于平行焊接方向微观组织的OM图像

Fig.7 OM images of the microstructure of the cracked specimen in parallel welding direction

为进一步探究裂纹的产生机理,采用SEM对裂纹附近区域的微观特征进行了分析。图8示出裂纹在二次电子探测下的特征。



(a) 试样垂直于焊接方向SEM裂纹



(b) 试样平行于焊接方向SEM裂纹

图8 带裂纹试样微观组织的SEM图像

Fig.8 SEM images of the microstructure of cracked specimens

结果显示,裂纹在平行于焊接方向呈弯曲状,在垂直于焊接方向上则表现为平直状,且均沿晶界分布。带裂纹试样中晶界滑移的SEM图像如图9所示。可以看出,裂纹附近的晶界存在非常明显的晶界滑移,这种晶界滑移特征^[12-16]与高温失延裂纹^[17-19]晶界特征也是一致的。

采用EDS对裂纹附近区域进行能谱分析,图10示出该区域的元素分布。可以明显观察到,裂纹内部填充物中O元素含量较高。

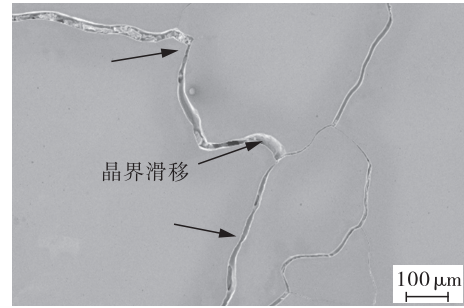
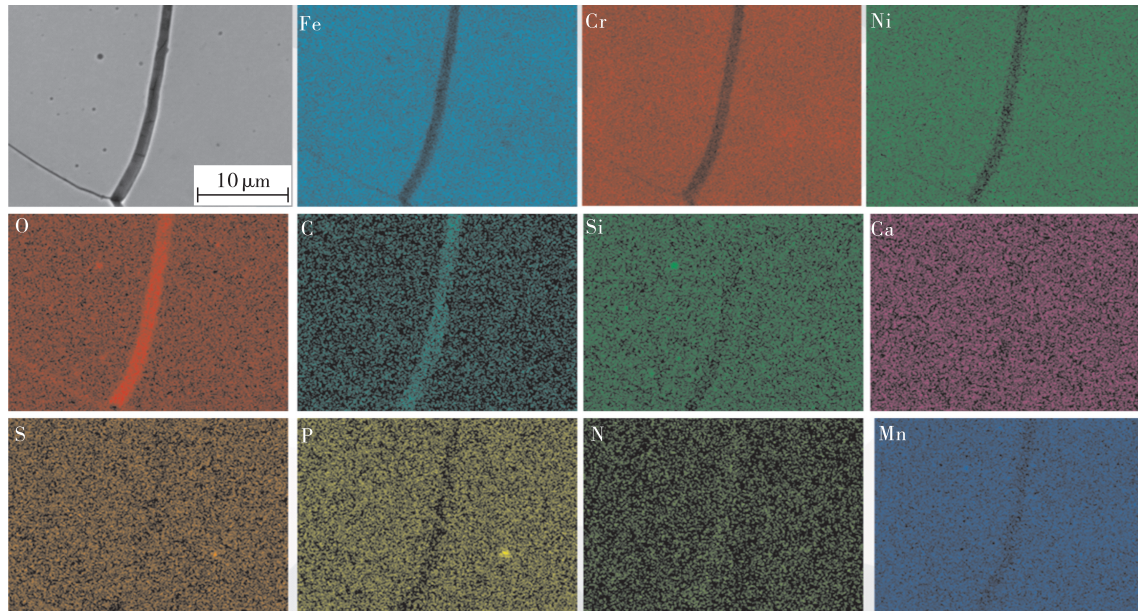
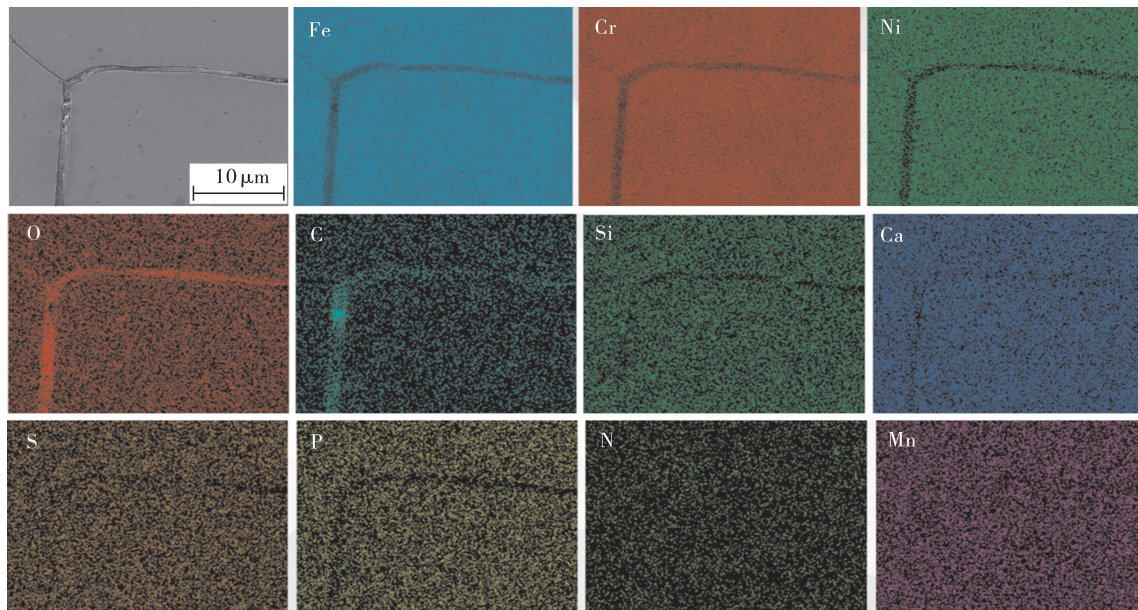


图9 带裂纹试样中晶界滑移的SEM图像

Fig.9 SEM images of grain boundary slip in cracked specimens



(a)试样裂纹附近的元素分布



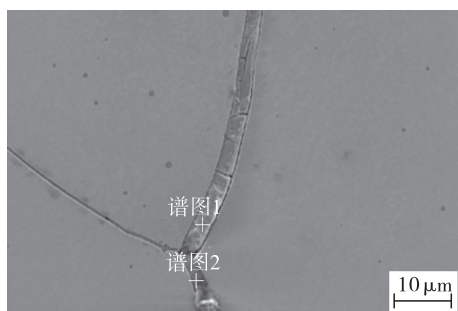
(b)试样裂纹附近的元素分布

图10 带裂纹试样的元素分布

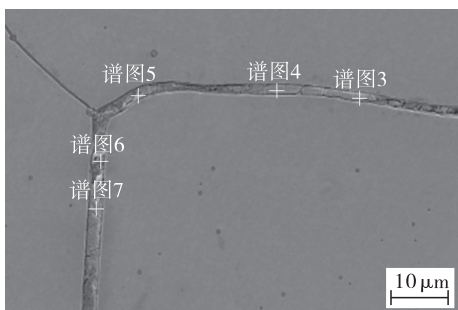
Fig.10 Element distribution of cracked specimen

这一现象表明,在焊接过程中,焊缝工作区域保护不足,致使空气中的O向熔池内部扩散,并与Fe和Cr元素发生氧化反应^[20-21]。反应生成以 Cr_2O_3 和 Fe_2O_3 为主的氧化物,导致晶界区域有大量氧化物析出。这些氧化物在晶界上逐渐聚集,使晶界附近区域发生脆化,进而增加了焊接失延敏感性。

图11示出裂纹特征点的能谱分析结果。可以看出,S和P元素存在局部偏析现象(见表1)。S,P的异常偏聚易与基体金属形成低熔点共晶相,可显著削弱晶界结合力,进而诱发脆性断裂^[22-23]。



(a) 谱图1~2



(b) 谱图3~7

图11 带裂纹试样中特征点的能谱分析

Fig.11 Energy spectrum analysis of characteristic points in cracked specimens

通过断口形貌、成分及微观组织分析表明:断口呈现典型的脆性断口特征,裂纹沿晶界扩展并

表2 稳压器筒体内壁堆焊工艺参数

Tab.2 Cladding process parameters for inner wall of pressurizer vessel

预热温度/°C	层间温度/°C	焊接方法	焊材型号	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(mm·min ⁻¹)
158~181	160~198	SAW	309L	750~850	27~30	180~200
			308L	750~850	27~30	180~200
	165~175	SWAW	309L	150~160	25~30	160~220

经分析发现,由于焊接作业正值夏季高温,焊工使用风扇进行降温,导致焊缝区域的熔池保护不足,同时引发电弧能量输入不稳定。这种不稳

伴有晶界滑移现象,且晶界中存在大量氧化物。这些特征与高温失延裂纹相吻合,可确定该裂纹为高温失延裂纹。另外,由于焊接过程中焊缝区域保护不足及清洁度控制不严,导致氧化物析出及S,P元素偏析,从而降低了晶界结合强度,当满足开裂条件时,在焊接应力的作用下,裂纹开始萌生并扩展。

表1 特征点的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of characteristic points %

元素	谱1	谱2	谱3	谱4	谱5	谱6	谱7
C	7.73	6.22	2.85	1.89	8.45	4.86	17.31
O	1.45	0.85	11.41	10.64	7.54	19.44	15.44
P	0.06	0.11	0.03	0.08	0.06	0.09	0.13
S	0.06	0.12	0.15	0.23	0.23	0.55	0.45

2 分析讨论

2.1 堆焊工艺影响

筒体内壁不锈钢耐蚀层采用带极埋弧工艺及手工电弧焊堆焊工艺实施堆焊,具体堆焊工艺如下:首先采用带极埋弧堆焊工艺在筒体内壁堆焊一层EQ309L不锈钢,随后通过手工电弧焊堆焊一层E309L,使其与EQ309L堆焊层表面齐平;接着再进行第2层和第3层的带极埋弧堆焊,堆焊时两端预留用于搭接的台阶,如图12所示。可以看出,缺陷显示面处于手工电弧焊堆焊的309L过渡层边缘。相关焊接工艺参数见表2。

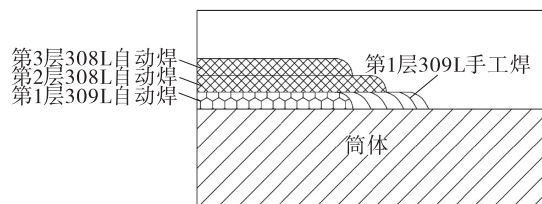


图12 稳压器筒体内壁堆焊工艺示意

Fig.12 Schematic of cladding process on inner wall of pressurizer vessel

定状况致使熔池暴露于空气中,进而使空气中的氧分子向熔池内部扩散。氧分子扩散后,随即与Fe和Cr元素发生氧化反应,生成以 FeO 和 Cr_2O_3

为主的氧化物。在熔池凝固过程中,这些氧化物易于在晶界处偏聚,极大降低了晶界的结合力,诱发裂纹的产生,最终导致焊接失延敏感性增加。

2.2 热处理工艺影响

表3列出SA508-3和309L的热膨胀系数。可以看出,309L的热膨胀系数均高于SA508-3;

室温下,前者热膨胀系数约为后者的1.5倍;在600℃时,前者约为后者的1.3倍。因此,在热处理过程中,309L的膨胀和收缩均受到限制^[24-27],容易产生应力集中。尤其是当309L中存在微裂纹时,应力会在裂纹处集中,进而导致裂纹扩展。

表3 SA508-3和309L热膨胀系数

Tab.3 Thermal expansion coefficient of SA508-3 and 309L

堆焊材料	热膨胀系数/($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)									
	25℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃
SA508-3	11.5	12.1	12.7	13.3	13.8	14.4	14.8	15.3	15.8	16.4
309L	16.70	17.02	17.50	18.03	18.50	19.07	19.60	20.40	21.30	22.10

3 高温失延裂纹复现试验

3.1 试验方法

为验证堆焊工艺执行不规范是导致产生309L裂纹的主要原因,以及热处理对309L裂纹扩展具有促进作用,对奥氏体不锈钢堆焊层进行了高温失延裂纹复现试验。试验依据309L/308L堆焊层的实际工况及实际焊接工艺参数,通过提高

电弧高度并施加定向风冷,向熔池中引入O元素,以氧化晶界,复现高温失延裂纹。

具体试验方案如下:选用低合金钢母材SA508-3(尺寸30 mm \times 300 mm \times 300 mm)作为试验材料,采用手工电弧焊和带极埋弧堆焊工艺,依次堆焊309L过渡层及308L不锈钢耐腐蚀层。焊接工艺参数见表2,各部分材料的化学成分如表4所示。

表4 裂纹复现试验各部分材料的化学成分

Tab.4 Chemical composition of materials for various parts in crack reproduction test

堆焊材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti
SA508-3	≤ 0.25	0.15~0.40	1.20~1.5	≤ 0.008	≤ 0.005	0.40~0.85	≤ 0.15	0.45~0.60	≤ 0.06	≤ 0.040	≤ 0.015
309L	≤ 0.03	—	1.00~2.00	≤ 0.020	≤ 0.002	12.0~14.0	23.0~25.0	≤ 0.50	≤ 0.20	—	≤ 0.50
308L	≤ 0.03	—	1.00~2.00	≤ 0.020	≤ 0.010	9.0~11.0	19.5~21.0	≤ 0.50	≤ 0.20	—	≤ 0.50

采用相同工艺重复堆焊3组试样,分别命名为A,B和C,如图13所示。

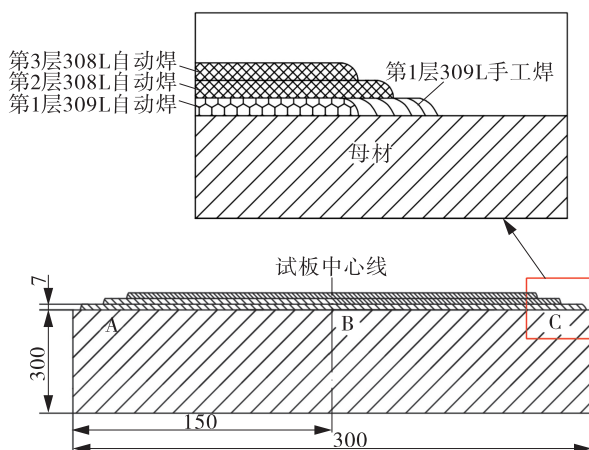


图13 裂纹复现试验中堆焊试样示意

Fig.13 Schematic of cladding specimen in crack reproduction test

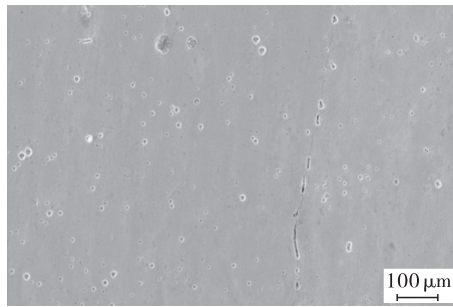
堆焊完成后,分别自A,B,C三组试样截取焊态试样进行微观组织表征,将堆焊余料进行40 h

热处理(595~620℃);对热处理后试件在与焊态试样相同位置处二次取样,开展微观组织表征。通过对比焊接状态与热处理状态试样的微观组织特征,验证焊接工艺执行不规范及热处理对裂纹产生的影响。

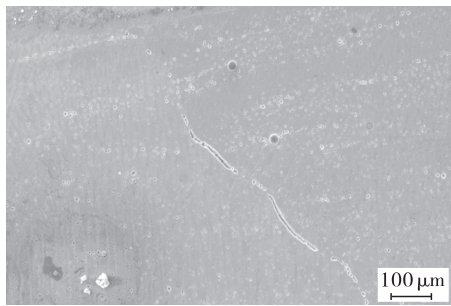
3.2 堆焊工艺对裂纹的影响

在焊接状态下,将验证试样A,B,C通过SEM进行表征分析,结果如图14所示。从图14(a)可以看出,A试样中存在微裂纹,尺寸极小,均位于粗大奥氏体的平直晶界处。晶界及其附近可见小孔洞,部分孔洞聚集后形成微裂纹。这些微裂纹主要分布在309L堆焊层金属中,起点距熔合线0~360 μm 。该裂纹符合高温失延裂纹特征,可初步确定为焊接高温失延裂纹。从图14(b)可以看出,B试样中的微裂纹尺寸较A试样更大,可达500 μm 左右,同样出现在309L堆焊层粗大奥氏体的平直晶界上。其基本特征与A,C试样的裂纹相似,也可初步确定为焊接高温失延裂纹。从

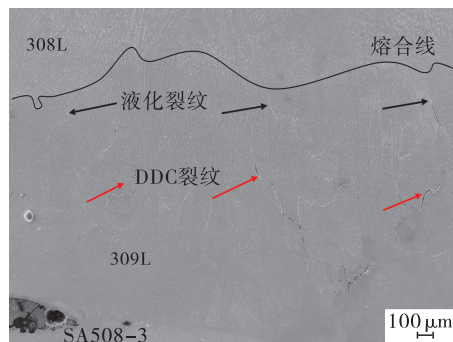
图14(c)可以看出,C试样的309L堆焊层中存在大量沿晶分布的裂纹,其裂纹特征与截取的带裂纹试样的开裂特征相符。裂纹长度介于110~1 000 μm 之间,部分裂纹从308L/309L熔合线向309L堆焊层扩展,另有部分直接出现在309L焊缝中。根据裂纹特征可初步确定,熔合线附近的裂纹为液化裂纹^[28-30],而309L堆焊层金属中的裂纹为焊接高温失延裂纹。



(a)A试样中的裂纹分布及特征



(b)B试样中的裂纹分布及特征



(c)C试样中的裂纹分布及特征

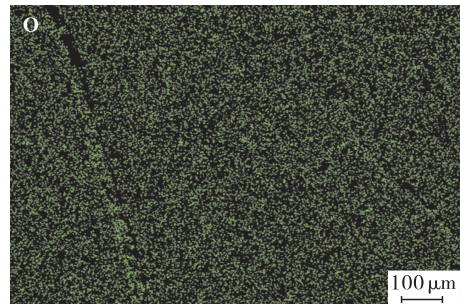
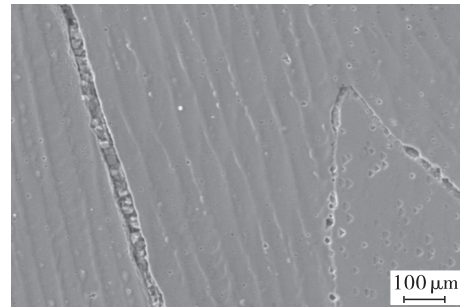
图14 焊接验证试样裂纹表征的SEM图像

Fig.14 SEM images of the crack characterization of the welding verification specimen

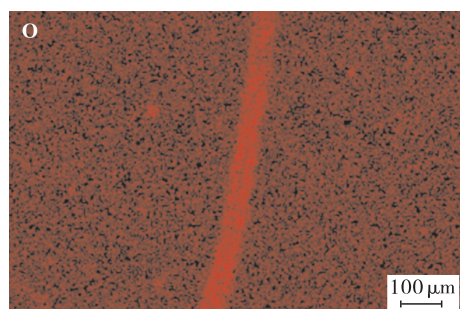
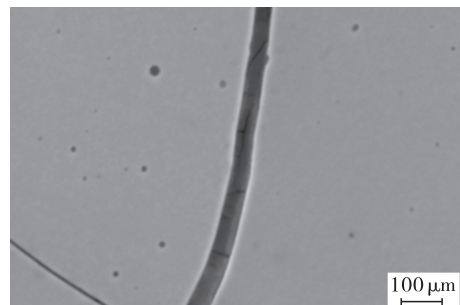
尽管A,B,C三组试样均采用相同的焊接工艺,但手工焊接过程中,参数的波动、焊接位置的差异及焊接顺序的变化,致使残余应变分布存在细微差别,进而导致焊接裂纹状态略有不同。然而,3组试样均表现出显著的高温失延裂纹倾向,且裂纹类型与截取的带裂纹试样一致,均为焊接

高温失延裂纹。

图15示出截取的带裂纹试样与焊接验证试样的基本特征对比。



(a)验证试样中的裂纹及O元素分布



(b)带裂纹试样中的裂纹及O元素分布

图15 核电稳压器产品中截取的带裂纹试样与焊接验证试样对比

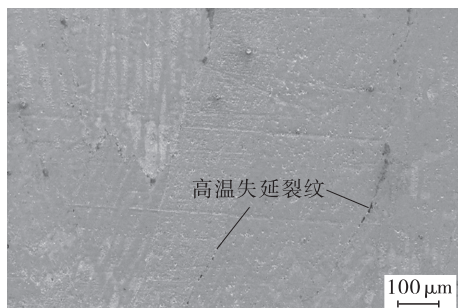
Fig.15 Comparison of cracked specimen extracted from nuclear power pressurizer product and welding verification specimen

可以看出,两类裂纹均沿晶界扩展,具有一定的张开宽度,且裂纹内部含有填充物。通过能谱分析可知,填充物富含O元素。该对比结果证实

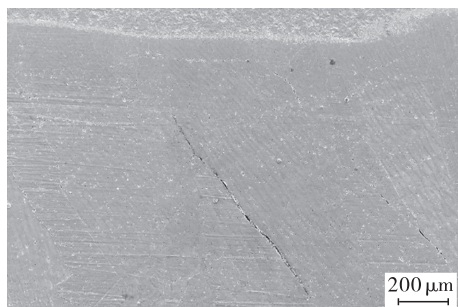
了焊接验证试验裂纹与某项目核电稳压器内壁不锈钢309L产生的裂纹高度吻合,再现效果良好。

3.3 热处理对裂纹的影响

验证试样A,B,C经595~620 °C、高温40 h热处理后,采用SEM进行表征分析,结果如图16所示。相较于焊态,试样在热处理后,裂纹尺寸、数量及张开程度等特征上呈现出显著差异。A试样在焊态下主要呈现约20 μm的微裂纹,且数量较少;热处理后,裂纹扩展至100~200 μm,如图16(a)所示。B试样在焊态下的裂纹长度为50~100 μm,热处理后增至200~300 μm,且裂纹明显张开,宽度约5 μm,如图16(b)所示。对于初始裂纹较严重的C试样,焊态最大裂纹长度约500 μm,热处理后延长至超过1 mm,裂纹最大张开宽度也从10 μm增至约40 μm,如图16(c)所示。



(a)热处理后A试样中的微裂纹



(b)热处理后B试样中的微裂纹



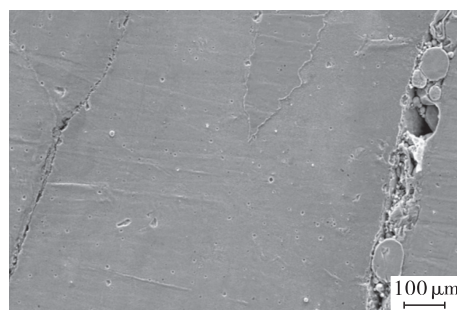
(c)热处理后C试样中的微裂纹

图16 焊接验证试样裂纹表征的SEM图像

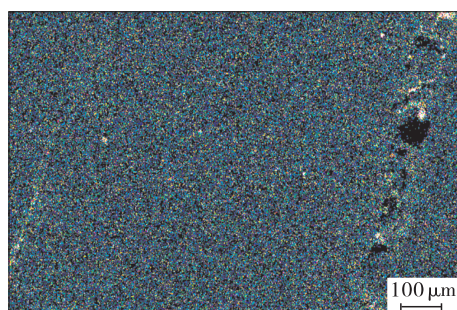
Fig.16 SEM images of the crack characterization of the welding verification specimen

综合上述分析,相较于焊态,经热处理后,高温失延裂纹的连续性显著增强,裂纹数量增多、长度变长,张开宽度也进一步增大。表明在热处理过程中,焊接残余应力和应变逐渐释放,同时,由于SA508-3,309L与308L材料热膨胀系数存在差异,造成应力集中在初始微裂纹处,进而诱导裂纹扩展。

图17示出验证试样裂纹附近区域的元素分布能谱图。可以看出,裂纹区域呈现富O的特征,并形成晶界氧化物,导致晶界脆性增加。这一结果与某项目核电稳压器产品中截取的带裂纹试样表征结果相符,进一步验证了本文所建立的焊接试验验证方法的有效性,且结果可信。



(a)焊接验证试样中裂纹的SEM图像



(b)焊接验证试样中裂纹附近的O元素分布图像

图17 焊接验证试样中裂纹的SEM图像及O元素分布
Fig.17 SEM image of crack in welding verification specimen and oxygen element distribution

4 结论

(1)309L堆焊层中的裂纹为高温失延裂纹。氧化物的析出及硫磷元素的偏析,导致晶界结合力变差,使堆焊层在焊后冷却过程中失延,当达到开裂条件时,在焊接应力的作用下,裂纹开始萌生并扩展。

(2)焊接工艺执行不规范,致使熔池保护失效、电弧能量输入不稳定,这是309L过渡层中高温失延裂纹形成的主要原因。在热处理过程中,

由于低合金钢母材与不锈钢过渡层的热膨胀系数存在差异,进而诱导裂纹扩展。

(3)开发了奥氏体不锈钢堆焊层高温失延裂纹焊接复现试验方法,结合产品实际工况条件验证了高温失延裂纹形成的主要原因。

参考文献:

- [1] 刘全印.核电站稳压器设备内壁带极堆焊技术[J].现代焊接,2009(9):30-32.
LIU Q Y. Surfacing welding technology for inner wall of pressurizer equipment in nuclear power plant [J]. Modern Welding, 2009(9):30-32.
- [2] 许家祥,方力,管接琦,等.稳压器喷淋阀碟簧受力分析及其结构优化[J].机电工程,2023,40(10):1543-1549.
XU J X, FANG L, GUAN A Q, et al. Disc spring force analysis and structure optimization of pressurizer spray valve [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(10):1543-1549.
- [3] OKONKWO B O, MING H, ZHANG Z, et al. Microscale investigation of the correlation between microstructure and galvanic corrosion of low alloy steel A508 and its welded 309/308L stainless steel overlay[J]. Corrosion Science, 2019, 154:49-60.
- [4] 杨乘东,茹祥坤,唐伟宝.核岛主设备不锈钢带极埋弧堆焊剥离机理分析[J].压力容器,2023,40(6):22-26.
YANG C D, RU X K, TANG W B. Disbonding mechanism analysis of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(6):22-26.
- [5] 鲁艳红,张茂龙,唐伟宝,等.18MND5/309L焊接过程中组织演变以及界面剥离机理研究[J].压力容器,2017,34(9):21-29.
LU Y H, ZHANG M L, TANG W B, et al. Research on microstructure evolution and interfacial disbanding mechanism during dissimilar weld between 18MND5 and 309L [J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(9):21-29.
- [6] 梅乐,张俊宝,王永东,等.三代核电反应堆压力容器低合金钢焊缝性能对比分析[J].压力容器,2024,41(2):1-6.
MEI L, ZHANG J B, WANG Y D, et al. Comparison and investigation on the properties of low-alloy steel weld metal in the reactor pressure vessel of the third generation nuclear power reactor [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(2):1-6.
- [7] 郭泉,谷宇,韩莹,等.Inconel 625合金堆焊金属开裂机理研究[J].焊接学报,2023,44(11):117-123.
GUO X, GU Y, HAN Y, et al. Study on cracking mechanism of Inconel 625 alloy surfacing metal [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(11):117-123.
- [8] 冯杰才,刘树磊,骆传万,等.核电异种金属焊接材料及方法研究现状[J].焊接,2022(3):52-57.
FENG J C, LIU S L, LUO C W, et al. Research status of welding materials and methods for dissimilar metals in nuclear power [J]. Welding & Joining, 2022(3):52-57.
- [9] 崔巍.镍基合金焊接接头高温失塑裂纹研究[D].上海:上海交通大学,2013.
CUI W. Study on high temperature plastic cracking of nickel-based alloy welded joints [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [10] 余春,徐济进,魏啸,等.核级镍基合金焊接材料失塑裂纹研究现状[J].金属学报,2022,58(4):529-540.
YU C, XU J J, WEI X, et al. Research status of ductility-dip crack occurring in nuclear nickel-based welding materials [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4):529-540.
- [11] QIN R, WANG H, HE G. Investigation on the microstructure and ductility-dip cracking susceptibility of the butt weld welded with ENiCrFe-7 nickel-base alloy-covered electrodes [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46:1227-1236.
- [12] COLLINS M G, LIPPOLD J C. An investigation of ductility dip cracking in nickel-based filler materials - Part I [J]. Welding Journal, 2003, 82(10):288.
- [13] RAMIREZ A J, LIPPOLD J C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II - Insight into the mechanism for ductility dip cracking [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1/2):245-258.
- [14] NISSLEY N E. Intermediate temperature grain boundary embrittlement in nickel-base weld metals [M]. The Ohio State University, 2006.
- [15] 汪志福,秦宗川,张羽,等.超高压容器开孔处裂纹最深点处应力强度因子的计算方法[J].机电工程,2024,41(6):1109-1115.
WANG Z F, QIN Z C, ZHANG Y, et al. Calculation method of stress intensity factor at deepest point of crack at opening of ultra-high-pressure vessel [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(6):1109-1115.
- [16] 弓锋利,尚飞虎,韩卫,等.裂纹对叶片固有频率影响的研究分析[J].流体机械,2024,52(6):99-104.

- GONG F L, SHANG F H, HAN W, et al. Analysis of the effect of crack on the inherent frequency of blades [J]. *Fluid Machinery*, 2024, 52(6):99-104.
- [17] 党尚达,李霄,刘刚,等.E16-25MoN焊丝熔敷金属高温失塑裂纹敏感性及其微观组织分析[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(19):79-82.
- DANG S D, LI X, LIU G, et al. Analysis on high temperature ductility-dip crack sensitivity and microstructure of E16-25MoN welding wire deposited metal [J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(19):79-82.
- [18] 唐识,刘非,胡庆睿.核电站钢制安全壳SA738Gr.B钢焊缝裂纹产生原因分析及预防[J]. *焊接*, 2017(8):55-60.
- TANG S, LIU F, HU Q R. Nuclear power plant steel containment vessel SA738Gr. B steel weld crack reason analysis and prevent [J]. *Welding & Joining*, 2017(8):55-60.
- [19] CARUSO M, FRAME L. Ductility dip cracking mechanisms and characterization: A review [J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(36):16789-16814.
- [20] SAIDA K, TANIGUCHI A, OKAUCHI H, et al. Prevention of microcracking in dissimilar multipass welds of alloy 690 to type 316L stainless steel by Ce addition to filler metal [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(6):553-560.
- [21] NISHIMOTO K, SAIDA K, OKAUCHI H. Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part 1 - Microcracking susceptibility in reheated weld metal [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(4):455-461.
- [22] JENG S L, CHANG Y H. The influence of Nb and Mo on the microstructure and mechanical properties of Ni-Cr-Fe GTAW welds [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 555:1-12.
- [23] CHEN J Q, LU H, CUI W, et al. Effect of grain boundary behaviour on ductility dip cracking mechanism [J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30(10):1189-1196.
- [24] LUNDIN C D. Dissimilar metal welds-transition joints literature review [J]. *Welding Research Supplement*, 1982, 2(5):58-63.
- [25] 蒋文春,王炳英,涂善东.中子衍射和有限元法研究不锈钢复合板补焊残余应力[J]. *金属学报*, 2012, 48(12):1525-1529.
- JIANG W C, WANG B Y, TU S D. A study of residual stress in the repair weld of stainless steel clad plate by neutron diffraction measurement and finite element method [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(12):1525-1529.
- [26] JAMES M N, NEWBY M, DOUBELL P, et al. Weld residual stresses near the bimetallic interface in clad RPV steel: A comparison between deep-hole drilling and neutron diffraction data [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 274:56-65.
- [27] WOO W, AN G B, KINGSTON E J, et al. Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(10):3564-3574.
- [28] LI G, LU X, ZHU X, et al. The segregation and liquation crackings in the HAZ of multipass laser-welded joints for nuclear power plants [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26:4083-4091.
- [29] RAVIKIRAN K, DAS G, KUMAR S, et al. Evaluation of microstructure at interfaces of welded joint between low alloy steel and stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50:2784-2797.
- [30] 苗龙.16MnDR钢低温压力容器焊接接头缺陷原因分析[J]. *金属加工(热加工)*, 2020(5):61-64.
- MIAO L. Analysis of the causes of defects in welded joints of 16mndr steel low-temperature pressure vessels [J]. *MW Metal Forming (Hot Processing)*, 2020(5):61-64.

作者简介:王炜铭(1999),男,主要从事异种金属界面剥离机理分析工作,通信地址:201306上海市浦东新城临港新城层林路77号上海电气核电设备有限公司,E-mail:wangweiming2023@126.com。

通信作者:张茂龙(1965),男,教授级高工,总工程师,主要从事先进核电设备制造技术、金属材料加工工程(焊接、热处理、成型等)、失效分析等工作,通信地址:201306上海市浦东新城临港新城层林路77号上海电气核电设备有限公司,E-mail:maolong@139.com。

本文引用格式:

王炜铭,张明明,余春,等.核电稳压器筒体内壁不锈钢堆焊层309L过渡层裂纹产生机理分析[J]. *压力容器*, 2025, 42(5):1-11.

WANG Weiming, ZHANG Mingming, YU Chun, et al. Analysis of crack formation mechanism in 309L transition layer of stainless steel cladding on inner wall of nuclear power pressurizer vessel [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2025, 42(5):1-11.