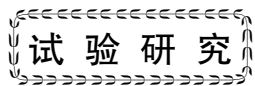


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.06.004



核岛主设备不锈钢带极埋弧堆焊剥离机理分析

杨乘东^{1,2}, 茹祥坤^{1,2}, 唐伟宝^{1,2}

(1. 上海电气核电集团有限公司, 上海 201306; 2. 上海核电装备焊接及检测工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要:对核岛主设备不锈钢带极埋弧堆焊层剥离机理进行研究, 结果表明: 低合金钢母材上的不锈钢带极埋弧堆焊层过渡区出现平均厚度为 25 μm 的硬化层, 硬化层为高硬度、低塑性的板条马氏体组织; 过渡区存在 II 型边界, 硬化层上存在气孔, II 型边界和气孔是堆焊层发生剥离的内因; 随着堆焊层数的增加, 接头界面残余应力增大, 堆焊层数达到 6 层时, 残余应力为 380 MPa, 过渡区的 II 型边界在较大的残余应力作用下作为裂纹源扩展导致不锈钢堆焊层剥离。堆焊层界面较大的残余应力是剥离发生的外因。

关键词:核岛主设备; 不锈钢; 带极埋弧堆焊; 硬化层; II 型边界; 剥离

中图分类号:TH49; TL351; TG115

文献标志码:A

Disbonding mechanism analysis of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode

YANG Chengdong^{1,2}, RU Xiangkun^{1,2}, TANG Weibao^{1,2}

(1. Shanghai Electric Nuclear Power Group Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Nuclear Power Equipment Welding and Examination, Shanghai 201306, China)

Abstract: The disbonding mechanism of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode was studied. The results reveal that hardened layer was found in transition zone of the cladding, and the average thickness is 25 μm . The hardened layer with higher hardness and lower toughness is lath martensite. Type - II grain boundary and porosity appeared in the transition zone and martensite layer respectively is the internal cause for disbonding. Numerical simulation results indicate that the residual stress increases with the increase of number of the cladding layers, and the residual stress reaches 380 MPa when cladding layers reach 6. Type - II grain boundary causes disbonding of the stainless steel cladding as the crack source expands under large residual stress. Greater residual stress is the external cause for disbanding.

Key words: nuclear island main equipment; stainless steel; cladding by submerged arc welding with band-electrode; hardened layer; type - II grain boundary; disbonding

0 引言

核电具有清洁、持续供电能力强的特点, 是未来能源发展的重要方向^[1-4]。作为压水堆核电站核岛主设备的反应堆压力容器、蒸汽发生器和稳压器, 在制造过程中, 需要在低合金钢母材的内表面上堆焊一定厚度的、具有耐高温、抗氧化及硫化氢等腐蚀的不锈钢耐蚀层^[5-6]。由于反应堆压力容器、蒸汽发生器和稳压器的待堆焊面积大, 而带

极埋弧堆焊具有熔敷速度快、生产效率高、成形美观、尺寸稳定、无弧光辐射等优点^[7], 为了提高不锈钢耐蚀层大面积堆焊的效率, 国内外大量采用了带极埋弧堆焊技术^[8-10]。采用带极埋弧焊工艺进行不锈钢堆焊的过程中, 会发生不锈钢堆焊层开裂甚至整体剥离的情况。研究不锈钢带极埋弧堆焊层的剥离机理, 对优化低合金钢母材的不锈钢带极埋弧堆焊工艺、防止堆焊层开裂和剥离、提高堆焊层综合性能具有重要的工程意义。

1 堆焊试验

试验采用母材为 SA508Gr. 3Cl. 2 低合金钢,堆焊材料为 60 mm × 0.5 mm 的 EQ308L 和 EQ309L 焊带, EQ308 和 EQ309L 的焊剂分别为 RECORD INT120 Q5 和 RECORD INT101 Q5,采用带极埋弧堆焊工艺对圆环试样内壁进行不锈钢

堆焊,试环的内径 796 mm,外径 992 mm,过渡层采用 EQ309L 焊带,后续堆焊层采用 EQ308L 焊带,局部堆高区域的堆焊厚度为 18 mm,其余区域堆焊层厚度 8 mm。SA508Gr. 3Cl. 2、EQ308L 和 EQ309L 的化学成分如表 1 所示,带极埋弧堆焊工艺参数如表 2 所示。当堆焊到 3~6 层时,发现内壁堆焊层发生大面积开裂,如图 1 所示。

表 1 母材和焊材的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of base metal and filler metal

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SA508Gr. 3Cl. 2	0.2	0.3	1.3	0.015	0.004	0.7	0.15	0.5	0.1
EQ308L	0.014	0.43	1.78	0.009	<0.001	10.37	20.51	0.028	0.026
EQ309L	0.018	0.49	1.74	0.010	<0.001	12.92	24.03	0.028	0.037

表 2 带极埋弧堆焊工艺参数

Tab. 2 Submerged arc surfacing parameters with band-electrode

焊层	焊接方法	焊材	带极尺寸/ (mm × mm)	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ (mm · min ⁻¹)	预热温度/ ℃	层间温度/ ℃
第 1 层	SAW	EQ309L	60 × 0.5	840 ~ 850	25 ~ 30	190 ~ 200	150(前 2 层)	150
其余焊层	SAW	EQ308L	60 × 0.5	820 ~ 830	25 ~ 30	195 ~ 200	—	150

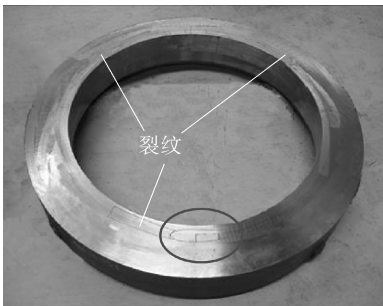


图 1 剥离试样

Fig. 1 Disbonding sample

和终止位置切开试样,堆焊层和母材发生整体剥离,图 2(b)(c) 分别示出不锈钢堆焊层和低合金钢母材剥离面形貌,堆焊层一侧表面有密集的凸起,而母材一侧表面则有众多的凹坑,剥离面无撕裂特征。

2 堆焊层剥离机理分析

2.1 过渡区组织和性能分析

对不锈钢带极埋弧堆焊层取样进行金相分析,试样经打磨、腐蚀后观察到的堆焊层各区域组织如图 3 所示。

从图 3 可以看出,堆焊层组织为树枝晶状奥氏体,树枝晶生长方向垂直于焊接方向,母材组织为贝氏体。在母材基体和堆焊层之间,存在过渡区,过渡区由于元素的扩散,在熔合线两侧产生与堆焊层和母材组织存在明显差异的组织,在光学显微镜下分别为白亮层和缓冲层,如图 3(b) 所示。采用能谱仪(EDS)对过渡区及相邻基体和堆焊层进行主要元素分析,EDS 水平线扫描位置包括基体母材、熔合线和堆焊层。

对比表 1 中 SA508Gr. 3Cl. 2 低合金钢母材和 EQ309L, EQ308L 奥氏体不锈钢焊材成分可以看出,母材中 C 含量较高而 Ni, Cr 含量较低。C, Ni, Cr 的质量分数分别为 0.2%, 0.7% 和 0.15%。EQ309L 和 EQ308L 焊带中 C 含量低

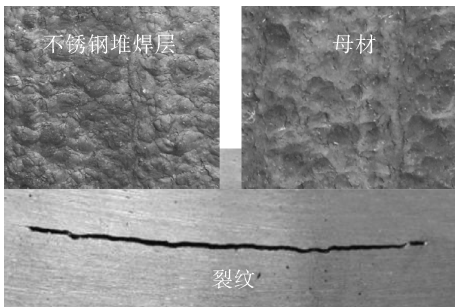


图 2 剥离界面显微组织

Fig. 2 Microstructure of disbonding interface

UT 检测结果表明,圆环绝大部分堆焊层下存在缺陷,图 1 中所指区域均发生大面积开裂。对图 1 中圆圈标注部分的裂纹进行局部放大,放大后的裂纹形貌如图 2(a) 所示。沿裂纹起始位置

而 Ni, Cr 含量高, C, Ni, Cr 质量分数分别为 0.02%, 13% 和 10.5%。EDS 线扫描结果显示, 母材的 C 含量较高而 Ni, Cr 含量较低, 堆焊层 C

含量低而 Ni, Cr 含量高, 与表 1 所示的成分相符。过渡区由于元素扩散的作用, C, Ni 和 Cr 元素的含量增加。

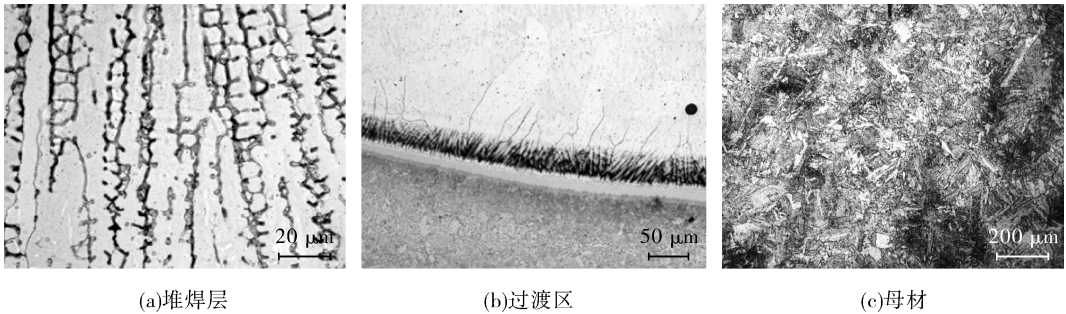


图 3 母材和堆焊层微观组织

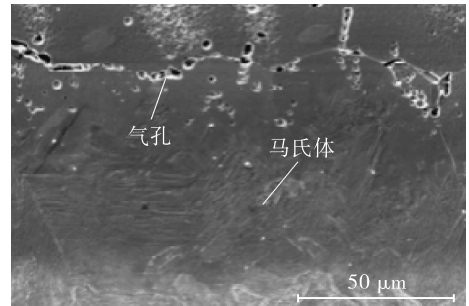
Fig. 3 Microstructure of base metal and cladding

图 4 示出过渡区的微观组织特征, 图 4(a) 显示在过渡区存在 II 型边界。不锈钢带极埋弧堆焊过程中, 在温度接近熔点时, 母材是铁素体, 焊缝金属为奥氏体的情况下, 正常外延的生长会受到抑制, 这会导致形成 II 型边界。II 型

边界与 I 型边界相反, I 型边界是从母材晶粒沿柱状晶增长进入焊缝金属所形成, 其走向大致垂直于熔合边界^[11], II 型边界高低不平地平行于熔合边界伸展^[12], 是堆焊层容易开裂的薄弱部位。



(a) II 型边界



(b) 马氏体组织

图 4 过渡区微观组织特征

Fig. 4 Microstructure feature of transition zone

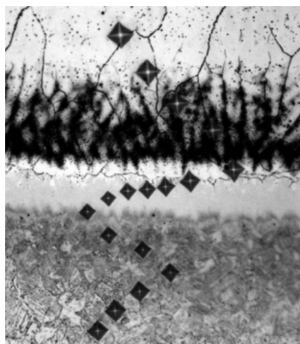
为了确定过渡区白亮层的组织, 用 SEM 进行分析, 白亮层的 SEM 形貌如图 4(b) 所示, 从白亮层的 SEM 形貌可以判断出其组织为板条马氏体。实际焊接过程中, 母材金属 C 含量为 0.2%, 堆焊层金属 C 含量为 0.02%, 母材金属与堆焊层金属相比有较高的 C 含量, C 会在焊接或者焊后热处理时从热影响区向熔合区扩散(或迁移), 可能在熔合边界形成窄的并显示高硬度的马氏体区。如果焊缝金属 Cr 的含量高, 而母材只有少量的 Cr, 则在焊后热处理(PWHT)时, C 从热影响区迁移到焊缝金属的倾向是非常高的^[13-15]。焊接过程中母材 Cr 含量为 0.15%, 而焊缝金属 Cr 含量为 10.5%, 远远高于母材金属的 Cr 含量。因此, 低合金钢上进行不锈钢堆接过程中 C 从热影响区

向焊缝金属迁移的倾向很高。由于 C 元素扩散, 从而形成马氏体带, 经测量图 4(a) 中马氏体带的平均厚度为 25 μm。在图 4(b) 中还可以清楚地看到在板条马氏体上存在气孔。过渡区的 II 型边界及板条马氏体上的气孔, 是形成裂纹导致剥离的内因因素。

测量过渡区显微硬度, 载荷为 50 g, 如图 5 所示。结果显示马氏体硬化层的显微硬度 HV 达到 550, 约是母材组织显微硬度的 2 倍, 是焊缝组织的 3 倍。从图 5(b) 可以看出, 在基体母材的热影响区存在一个硬度略微下降的区域, 原因是 C 元素的迁移和 δ 铁素体含量的增加。

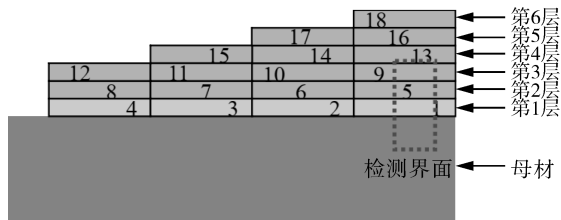
马氏体硬化层硬度高(分别是母材和焊缝的 2 倍和 3 倍)而塑性低(相对于母材和焊缝下降了

17%和50%),使得硬化层抵抗应变的能力减弱,且过渡区存在的Ⅱ型边界及板条马氏体上存在的气孔是形成裂纹的内因因素,当存在较大应力时,堆焊层界面易产生裂纹。

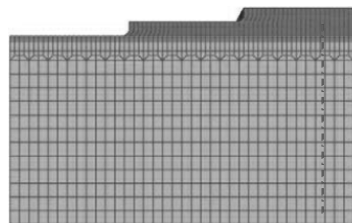


(a) 显微硬度测量位置

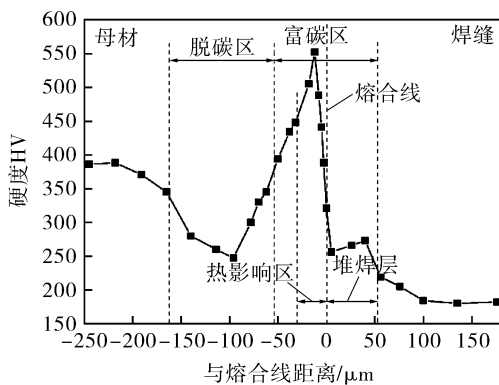
层数为6层时,堆焊层熔合线处残余应力达到380 MPa,超过界面结合强度。



(a) 几何模型



(b) 网格模型



(b) 显微硬度值

图5 过渡区显微硬度

Fig. 5 Micro hardness of transition zone

2.2 堆焊层数对残余应力的影响

采用 Ansys 分析软件对不锈钢带极埋弧堆焊过程建模进行数值模拟,研究在 SA508Gr. 3Cl. 2 低合金钢母材上进行不锈钢带极埋弧堆焊时,堆焊层数对堆焊层界面残余应力的影响。

堆焊层的几何模型如图6(a)所示,前3层各有4条焊道,4~6层焊道数逐层递减,第4层包含3条焊道,第5层包含2条焊道,第6层只有1条焊道。残余应力检测位置为图6(a)虚线框中堆焊层熔合线位置。网格划分如图6(b)所示,采用过渡法划分不均匀网格,对焊缝区和热影响区等焊接重点关注区域用细密的网格,对母材上远离焊缝的区域用相对稀疏的网格。

不同堆焊层数时,堆焊层残余应力的数值模拟结果如图7所示。可以清晰地看出,随着堆焊层数的增加,堆焊层界面的残余应力增大,当堆焊

图6 堆焊层有限元模型

Fig. 6 Finite element model of cladding

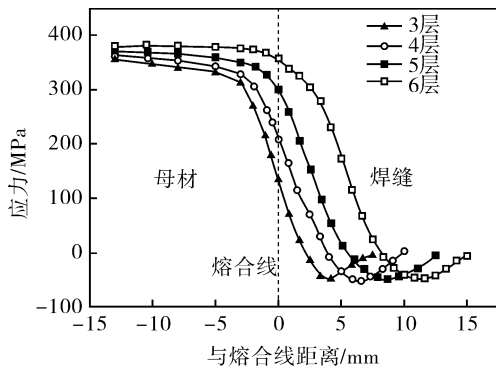


图7 残余应力数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of residual stress

过渡区存在Ⅱ型边界,板条马氏体上存在气孔,且马氏体硬化层硬度高而塑性低,随着堆焊层数的增加,堆焊层界面的残余应力增大,当残余应力增大到超过界面结合强度时,Ⅱ型边界会作为裂纹源并在应力作用下扩展,最终导致不锈钢堆焊层开裂甚至剥离。堆焊层较大的残余应力是诱发不锈钢带极埋弧堆焊层剥离的外因。

3 结论

- (1) 低合金钢母材上不锈钢带极埋弧堆焊层过渡区出现厚度为 25 μm 的白亮层组织,该组织为硬度高、塑性较低的马氏体组织。
- (2) 堆焊层过渡区的Ⅱ型边界和硬化层马氏体组织上的气孔,是不锈钢堆焊层发生剥离的内因。

(3)随着堆焊层数的增加,堆焊层界面残余应力增大,超过界面结合强度,Ⅱ型边界在较大的残余应力作用下作为裂纹源扩展,导致不锈钢堆焊层剥离。堆焊层界面较大的残余应力是发生剥离的外因。

参考文献:

- [1] 欧阳予,汪达升. 国际核能应用及其前景展望与我国核电的发展[J]. 华北电力大学学报,2007,34(5):1-10.
OUYANG Yu, WANG Dasheng. International nuclear power application and its prospect forecast and our country nuclear electricity development [J]. Journal of North China Electric Power University,2007,34(5):1-10.
- [2] CORNER A, VENABLES D, SPENEC A, et al. Nuclear power, climate change and energy security: Exploring British public attitudes [J]. Energy Policy, 2011, 39(9):4823-4833.
- [3] TOTH F L, ROGNER H H. Oil and nuclear power: Past, present, and future [J]. Energy Economics, 2006,28(1):1-25.
- [4] ZWAAN B C C V D. Nuclear energy: Tenfold expansion or phase-out? [J]. Technological Forecasting and Social Change,2002,69(3):287-307.
- [5] 杨巨文,李双燕,张茂龙,等. 三代核岛主设备焊接技术与焊接材料[J]. 压力容器,2017,34(4):68-75.
YANG Juwen, LI Shuangyan, ZHANG Maolong, et al. Welding technique and welding consumable of generation III nuclear island main components [J]. Pressure Vessel Technology,2017,34(4):68-75.
- [6] 张文杨,杨巨文,顾佳磊. 接管内壁堆焊界面剥离问题研究[J]. 压力容器,2019,36(2):10-15.
ZHANG Wenyang, YANG Juwen, GU Jialei. Research on interfacial disbonding problem of nozzle inner surface overlay welding [J]. Pressure Vessel Technology, 2019,36(2):10-15.
- [7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册:焊接方法及设备[M]. 第3版. 北京:机械工业出版社,2008.
Welding Society of Chinese Mechanical Engineering Society. Welding manual Welding methods and equipment [M]. 3rd edition. Beijing: China Machine Press,2008.
- [8] 王志锋,陈佩寅,吴伟,等. 厚板带极埋弧堆焊温度场的有限元模拟[J]. 焊接学报,2009,30(1):89-92.
WANG Zhifeng, CHEN Peiyin, WU Wei, et al. Finite element simulation of temperature field for submerged arc strip overlaying on thick plate [J]. Transactions of the China Welding Institution,2009,30(1):89-92.
- [9] JINYA K, HIROYUKI N, MAKOTO D, et al. Assessments of residual stress due to weld-overlay cladding and structural integrity of reactor pressure vessel [J]. Journal of Pressure Vessels Technology, 2013, 135(5): 051402-1-051402-9.
- [10] PAK S, RIGOAL S, KARLSSON L, et al. Contributed papers electroslag and submerged arc stainless steel strip cladding [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 1998,45(1):41-47.
- [11] DUPONT J N, KUSKO C S. Martensite formation in austenitic/ferritic dissimilar alloy welds [J]. Welding Journal,2007,86(2):51-54.
- [12] MATSUDA F, NAKAGAWA H. Simulation test of disbanding between 2.25% Cr-1% Mo steel and overlaid austenitic stainless steel by electrolytic hydrogen charging technique [J]. Transactions of JWRI,1984,13(1):159-161.
- [13] LUNDIN C D. Dissimilar metal welds-transition joints literature review [J]. Welding Journal,1982,61(2):58-63.
- [14] DUPONT J N, LIPPOLD J C, KISER S D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [15] 冯伟,邹力维,韩宇,等. 堆焊工艺对镍基276带极堆焊晶间腐蚀的影响规律[J]. 压力容器,2021,38(3):25-30.
FENG Wei, ZOU Liwei, HAN Yu, et al. Influence rules of surfacing process on intergranular corrosion properties of nickel-based 276 strip surfacing [J]. Pressure Vessel Technology,2021,38(3):25-30.

作者简介:杨乘东(1983),男,高级工程师,主要从事核电站核岛主设备焊接技术相关工作,通信地址:上海市浦东新区临港新城层林路77号上海电气核电集团有限公司, E-mail: yangchd@shanghai-electric.com。

本文引用格式:

- 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 Chengdong, RU Xiangkun, TANG Weibao. Disbonding mechanism analysis of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode [J]. Pressure Vessel Technology,2023,40(6):22-26.