

• 工艺技术 Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2023.2323

奥氏体不锈钢堆焊层焊接缺陷分析及改进措施

王龙虎, 郭 宁, 陈得润, 马 进

(共享铸钢有限公司, 宁夏 银川 750021)

摘 要:以共享公司生产的某核电高中压外缸为例,在焊接奥氏体耐腐蚀堆焊层时,堆焊层区域经无损检测、焊接完成后经渗透检测发现有显示。随即取样后进行显微组织观察,发现有微裂纹及夹渣缺陷。微裂纹缺陷是因为高温状态下生成的 NbC 相使晶界发生偏移,夹渣缺陷是因为奥氏体焊材本身材料特性导致。通过“不预热、小电流、低热输入、层温控制 $\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及窄摆动”的方式,并经过现场验证焊接工艺,成功解决该问题,并对后续同类产品提供了宝贵经验。

关键词:耐腐蚀堆焊层;过渡层;热裂纹;夹渣;焊接工艺

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2023)12-1152-05

Analysis of Welding Defects of Austenitic Stainless Steel Surfacing Layers and Improvement Measures

WANG Longhu, GUO Ning, CHEN Derun, MA Jin

(Kocel Steel Foundry Co., Ltd., Yinchuan 750021, China)

Abstract: Taking the outer cylinder of a nuclear power plant produced by Kocel as an example, when welding an austenitic corrosion-resistant surfacing layer, the surfacing layer area was subjected to nondestructive testing, and the penetration test found that there were signs after welding was completed. Microcracks and slag defects are found after sampling and observation through a microscope. The microcrack defect is due to the deviation of the grain boundary caused by the NbC phase formed at high temperature, and the slag inclusion defect is caused by the material characteristics of austenitic welding consumables. Through “no preheating, small current, low heat input, layer temperature control $\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, and narrow swing” mode combined with on-site verification welding process, the problems have been successfully solved, providing valuable experience for follow-up similar products.

Key words: corrosion-resistant surfacing layer; transition layer; hot crack; slag inclusion; welding process

奥氏体不锈钢作为一种具备良好塑韧性、耐腐蚀性、无磁性的材料,被广泛应用于能源、航天、化工、生物等领域。近年来,随着奥氏体不锈钢使用比重不断增大,已逐渐被应用于核电、航空航天领域的重要结构中。奥氏体不锈钢主要合金元素为 Cr、Ni,其成本较高,在实际应用过程中铸造成型及生产成本将会大大提高。由于低合金钢和不锈钢在热物理性能、微观组织特征等方面的显著差异,焊接及焊后热处理过程中会产生焊接残余应力,同时出现焊缝金属稀释、碳迁移等问题,进而影响焊接接头的性能^[1-2]。为了降低生产成本,在实际生产中,将整铸成型改为在低合金钢管口表面堆焊不锈钢隔离层,

以提高低合金钢的耐腐蚀能力,然后与不锈钢管进行对接焊^[3-4],但是奥氏体材料在焊接时热影响区极易产生热裂纹,热影响区的液化裂纹是焊接中的一个严重问题^[5]。在进行焊接时,不恰当的焊接工艺会增加焊接缺陷产生的概率。相关研究表明^[6],在含有 Ti、Nb 的奥氏体材料中,热裂纹产生的原因在于热影响区中形成低熔点共晶相,熔合线附近的部分液化区中的低熔点共晶相在晶界处液化,在收缩应力和约束的作用下开裂。

在 ASME IX 焊接和钎接工艺评定标准中对堆焊层弯曲裂纹的说明提到,弯曲试样在堆焊处的裂纹可以小于 2.5 mm,热影响区处裂纹小于 1 mm,根

收稿日期: 2022-11-04

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2023BDE92003)

作者简介: 王龙虎, 1988 年生, 学士, 工程师。主要从事铸钢件生产技术质量管理方面的工作。Email: 13995203771@139.com

引用格式: 王龙虎, 郭宁, 陈得润, 等. 奥氏体不锈钢堆焊层焊接缺陷分析及改进措施[J]. 铸造技术, 2023, 44(12): 1152-1156.

WANG L H, GUO N, CHEN D R, et al. Analysis of welding defects of austenitic stainless steel surfacing layers and improvement measures[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1152-1156.

部裂纹不作为评判,符合以上尺寸裂纹可判定为合格。但是这种细小的裂纹如果出现在核电产品中,将会存在巨大的安全隐患,长时间的运作会使这些细小裂纹转变为宏观裂纹从而导致设备的性能下降,严重的会发生重大安全事故。

本文以某核电高压外缸为例,在内腔瓦口堆焊奥氏体耐腐蚀层,见图1绿色部分;在对接奥氏体结构件前堆焊过渡层,见图1红色部分,以两个焊接区域所产生的裂纹及夹渣缺陷为研究对象,分析并改进焊接工艺。

1 母材与焊材的焊接性分析

缸体材料为低合金耐热钢,材质为 G17CrMo9-10,空冷状态下为贝氏体+部分马氏体组织,具有较强的淬硬倾向。因此为防止产生焊接冷裂纹,焊接过程中需要较高的预热温度。

焊接材料选择 TS309L-FC11 药芯焊丝及ER318 实芯焊丝,该焊材属于奥氏体焊材,热膨胀系数大,热导率小,具有较高的热裂纹敏感性,在焊缝和热影响区都有可能产生热裂纹,焊接过程中需要严格控制层间温度。该焊材对预热温度无要求,室温下焊接即可。

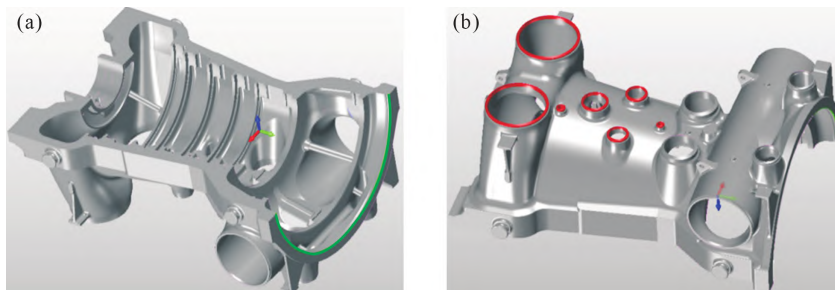


图1 高压外缸示意图:(a)内腔,(b)外腔
Fig.1 Diagram of high-pressure outer cylinder: (a) inside, (b) outside

表1 铸件及焊接材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of castings and welding materials

材质	(mass fraction/%)									
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(Nb)	w(Cu)
G17CrMo9-10	0.12~0.20	max0.6	0.5~0.9	max0.02	max0.02	2.00~2.50	0.90~1.20	-	-	-
TS309L-FC11	0.036	0.61	1.52	0.011	0.003 7	23.75	0.22	13.50	-	0.009 9
ER318	0.039	0.45	1.96	0.020	0.012	19.32	2.55	11.40	0.57	0.18

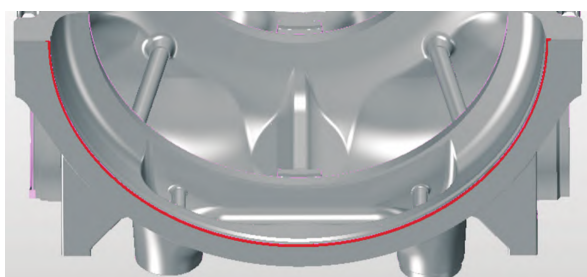


图2 热裂纹缺陷显示区域
Fig.2 Location of thermal crack defects

不锈钢堆焊分为2种:第1种为耐腐蚀层,在低合金缸体上采用 TS309L-FC11 药芯焊丝;第2种是过渡层,首先使用 TS309L-FC11 堆焊一层后,再使用 ER318 实芯焊丝继续堆焊,缸体及焊材具体成分见表1。

2 检测设备

由于奥氏体材料本身不导磁,不能使用磁粉检测,且奥氏体粗大的柱状晶粒对超声波传播的各向异性引起的大衰减和草状波等使其对缺陷定位和定量精度降低^[7],因此按照检测规范对堆焊层进行渗透检测和射线检测,渗透检测按照 ISO 3452-1 执行,射线检测按照 ISO 17636 执行,光学显微镜使用奥林巴斯(OLYMPUS)BX51M。

3 缺陷产生的原因及分析

3.1 微裂纹缺陷

在缸体瓦口处堆焊一层 TS309L-FC11 过渡层,再堆焊 ER318 耐蚀层,经渗透检测发现在耐蚀层线性显示,使用光学显微镜分别放大 100、500 倍后发现该缺陷属于热裂纹,焊接位置见图2红色区域,宏观及微观裂纹见图3。

奥氏体材料具有合金元素高、热导率小、热膨胀系数大、流动性差等特点,焊接过程中熔池在凝固时,由于局部加热和冷却使焊接接头在冷却过程中形成较大的拉应力^[8-9];其次,奥氏体不锈钢对于硫、磷等杂质非常敏感,易与部分溶解度小的元素,如铝、硅、铌等形成低熔点共晶物。在熔池冷却凝固过程中,这些共晶物削弱了晶粒间的联系,致使晶界在焊缝凝固时产生的拉应力作用下开裂。

相关实验结果表明,Nb 的低熔点共晶相的存在

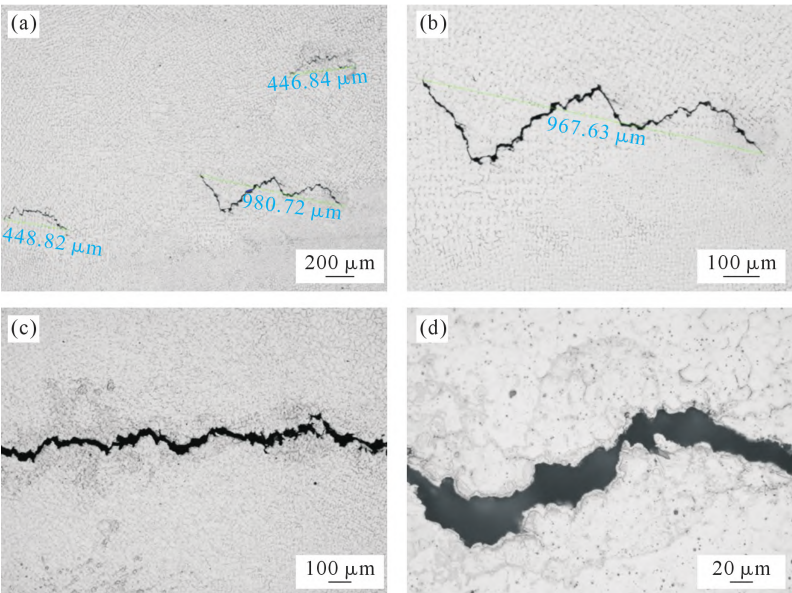


图3 不同倍镜下热裂纹缺陷的微观显示:(a) ×50, (b) ×100, (c) ×100, (d) ×500
Fig.3 Microstructure of thermal crack defects at different magnifications: (a) ×50, (b) ×100, (c) ×100, (d) ×500

是焊缝热裂纹产生的主要原因^[10],Nb 在奥氏体中易形成低熔点相,使 Nb 在奥氏体中的固溶度降低,晶界处富 Nb 的低熔点共晶相的存在会导致热裂纹的产生。表 2 为常见合金元素对纯奥氏体组织焊缝热裂纹倾向的作用^[11]。

表2 常见合金元素对焊缝热裂纹倾向的作用^[11]
Tab.2 Effect of common alloying elements on the hot cracking tendency of the weld^[11]

元素	作用
Cr	形成 Cr-Ni 化合物细化组织
Ni	显著增大热裂倾向
Si	显著增大热裂倾向($\omega \geq 0.3\% \sim 0.7\%$)
Mn	显著提高抗裂性($\omega = 0.4\% \sim 0.7\%$)
Ti	显著增大热裂倾向(当 Ti/C ≈ 6 时,可降低热裂倾向)
Nb	显著增大热裂倾向(当 Nb/C ≈ 10 时,可降低热裂倾向)
Mo	强烈降低热裂倾向
V	稍增大热裂倾向
Cu	显著增大热裂倾向($\omega \geq 2\%$)
C	降低热裂倾向($\omega = 0.3\% \sim 0.5\%$)

ER318 焊丝中添加了 Nb 元素,主要目的是为了形成 NbC 相,避免 C-Cr 化合物形成,导致贫 Cr 现象发生,从而影响奥氏体堆焊层的耐蚀性。焊材材质单显示 Nb 元素含量区间在 $8 \times C\% \sim 1.0\%$,而本次所使用的焊材 $\omega(\text{Nb}) = 0.6\%$,相关文献研究表明^[12-13],当 $\omega(\text{Nb}) = 0.03\%$ 时,NbC 开始从 γ 相中析出,当 $\omega(\text{Nb}) = 0.28\%$ 时,NbC 从液相中开始析出。并且随着 Nb 元素的增加,NbC 由从 γ 相中析出转变为直接从液相中析出,同时 NbC 的析出量和尺寸均增大,降低 Nb 的固溶率。Li 等^[14]在研究 TP347 奥氏体钢时指出,热影响区中 NbC 的溶解动力学与其液化裂纹敏感性之间存在较大的相关性,当碳化物溶解速度越

快,其抗液化开裂的能力越强,而 Nb 在不同钢种中的溶度积不同,超过溶度积后残余的 Nb 只能以析出相的形式存在。

当 C 元素增加时,Nb 与 C 形成 NbC 相,并且在高焊接热输入下,熔池的温度持续时间越长,固溶 Nb 含量和 C 含量越高,Nb 元素和 C 元素的过饱和度就越大,NbC 的析出动力越大,NbC 相析出的就越多^[15]。并在焊缝的热影响区部位出现较为粗大的柱状晶组织,垂直于熔合线方向生长,这种组织会加剧元素偏析,形成低熔点共晶物。凝固结晶后期以液态薄膜形式存在于奥氏体柱状晶粒之间,在一定的拉应力作用下产生裂纹。因此,降低钢中的 C 含量可以提高 Nb 在奥氏体中的溶度积,减少 NbC 的产生,使固溶 Nb 的含量增多,降低裂纹产生几率。然而实际生产过程中,为了提高生产效率,并没有严格控制焊接热输入,且熔池温度较高,这就导致了焊接后出现热裂纹。

3.2 夹渣缺陷

在缸体外腔管口处堆焊耐腐蚀堆焊层,经射线检测堆焊层部位,发现 ER318 堆焊层部位有部分超标的细小夹渣缺陷,见图 4~5,堆焊层焊接位置见图 6 红色区域。

颗粒状夹渣是在焊接过程中,液态熔池中产生的熔点高,且密度大的颗粒状渣子。在堆焊 ER318 焊丝之前,首先用药芯焊丝 TS309L-FC11 堆焊两层后再使用 ER318 堆焊。奥氏体材料导热性差,熔池黏度较高,在液态熔池中经浮力的作用渣子由下向上浮动,但是渣子与熔池之间的界面张力大,其向上浮动的阻力较大,上浮速度慢。因此,在焊缝冷却过

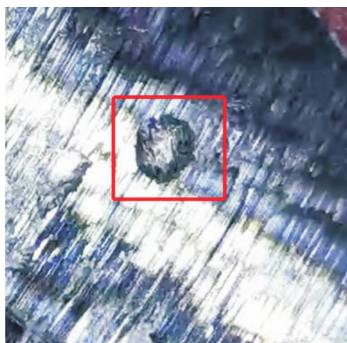


图4 夹渣缺陷
Fig.4 Slag inclusion



图5 射线检测的夹渣缺陷:(a~b)点状夹渣缺陷
Fig.5 Defect of slag inclusion in RT: (a~b) point slag inclusion

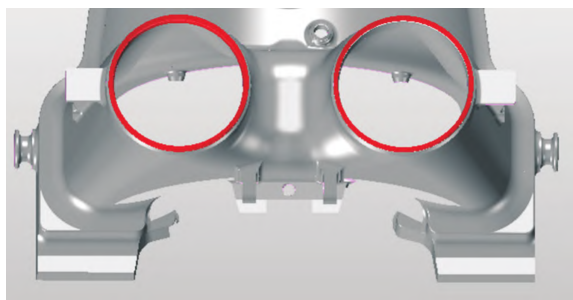


图6 夹渣缺陷显示区域
Fig.6 Location of slag inclusion defects

程中,有部分颗粒状渣子来不及完全浮出熔池表面,从而留在焊缝中,在优先凝固的熔合区附近,这种颗粒状渣子相对较多。之后在堆焊过程中,这些渣子非常小,且始终来不及上浮,即使最终渗透检测合格,但是这些颗粒状夹渣经射线检测后都会被发现。

3.3 解决措施

为解决以上两种缺陷,经过多次实验验证,发现焊接接头在无损检测及破坏性检测下均合格,铸件

结构焊接由平均3次返修合格到目前平均1.5次返修合格,并且缺陷数量较工艺改变前减少70%,实验数据见表3。

经以上实验,确定如下解决方案:

(1)裂纹缺陷 堆焊首层 TS309L-FC11 时,焊接电流控制在 180~190 A,预热温度控制在 $\geq 50^{\circ}\text{C}$,道间温度控制在 $\leq 150^{\circ}\text{C}$;堆焊 ER318 时,不预热,并减少引弧、熄弧次数,避免对接头的重复加热,接头处使用合金头铲磨至利于焊接。按照“角焊缝→平面焊→立面焊”的顺序分区域焊接,焊缝长度控制在 300 mm 以内,焊缝间隔控制在 300 mm 以内,在保证熔合好的情况下,不摆动焊接,提高焊接速度;焊接过程中要严格控制 C 元素的增加,防止产生 C 化物,使用 ER318 时,保护气要选择高氩保护气 (97.5%Ar+2.5%CO₂),最好可以选择手工焊堆焊,从源头避免 C 元素的加入。

(2)夹渣缺陷 在多层多道焊时,必须严格控制焊接热输入及层间温度,层间温度控制在 150°C 以下,必要时可以使用风冷等强制降温手段;在焊接操作过程中,每一层焊接完成后应立即清渣,焊接电弧不宜过长,摆动宽度不宜过宽,选择适当的焊接速度,避免熔池在高温下停留的时间。

4 结语

针对缺陷中的裂纹,以某核电高中压外缸为例,进行深入的原因分析,得出该焊接缺陷为夹渣和热裂纹缺陷。通过模拟产品缺陷进行实验,并将无损检测,证明返修方案的可行。不锈钢耐蚀层的返修,对环境、设备、人员等有非常高的要求,同时,在操作时对焊接热输入、温度、施焊手法等因素的控制尤为重要。奥氏体堆焊层的热裂纹受合金成分、金相组织等影响,可以通过调节焊材的成分、控制焊接过程并选择合适的焊接工艺来控制。

参考文献:

- [1] 丁杰,张志明,王俭秋,等. 三代核电接管安全端异种金属焊接接头的显微表征[J]. 金属学报, 2015, 51(4): 425-439.
DING J, ZHANG Z M, WANG J Q, et al. Micro-characterization of dissimilar metal weld joint for connecting pipe nozzle to

表3 实验数据
Tab.3 Experimental parameters

焊接位置	焊接材料	焊接电流/A	焊接电压/V	预热温度/ $^{\circ}\text{C}$	层间温度/ $^{\circ}\text{C}$	单层焊接宽度/mm
管口堆焊	TS309L-FC11	180	18.5	52	69	20
	ER318	170	18.5	21	22	15
瓦口堆焊	TS309L-FC11	185	22.5	55	73	15
	ER318	175	18.3	20	42	15

- safe-end in generation III nuclear power plant[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(4): 425-439.
- [2] 明洪亮, 张志明, 王俭秋, 等. 国产核电安全端异种金属焊接件的微观结构及局部性能研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(1): 57-69. MING H L, ZHANG Z M, WANG J Q, et al. Microstructure and local properties of a domestic safe-end dissimilar metal weld joint by using hot-wire GTAW[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(1): 57-69.
- [3] 戴佩琨. 压水堆核电站核岛主设备材料和焊接[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2008. DAI P K. Materials and welding of nuclear island main equipment in PWR nuclear power plant[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 2008.
- [4] 李光福, 杨武. 核电站异材焊接件的破裂问题与应力腐蚀评价方法[J]. *核安全*, 2003(2): 37-40. LI G F, YANG W. Cracking of dissimilar metal welds in nuclear power plants and methods to evaluate its susceptibility to stress corrosion cracking[J]. *Nuclear Safety*, 2003(2): 37-40.
- [5] ROBINSON J L, SCOTT M H. Liquation cracking during the welding of austenitic stainless steels and nickel alloys[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1980, 295(1413): 105.
- [6] BHADURI A K, SRINIVASAN G, KLENK A, et al. Study of hot cracking behaviour of 14Cr-15Ni-2.5Mo Ti-modified fully austenitic stainless steels using restraint and hot ductility tests[J]. *Welding in the World*, 2009, 53: 17-27.
- [7] 聂勇, 李晓梅, 许远欢. 核设备不锈钢堆焊层下裂纹超声波检测技术[J]. *无损检测*, 2011, 33(7): 25-28. NI Y, LI X M, XU Y H. Ultrasonic examination research of cracks under stainless steel cladding for nuclear components[J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 33(7): 25-28.
- [8] 姬晶. 奥氏体不锈钢焊接性分析[J]. *煤矿机械*, 2008, 29(7): 85-86. JI J. Austenite stainless steel weldability brief analysis[J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29(7): 85-86.
- [9] 普拉提·艾合买提, 范志国, 罗起, 等. 国产改进型 316L 不锈钢的微结构研究[J]. *原子能科学技术*, 2003, 37(1): 18-21. AHMAT P, FAN Z G, LUO Q. Microstructure study on home made modified 316L stainless steels[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2003, 37(1): 18-21.
- [10] 张旭. 微合金元素铌对奥氏体基焊缝金属组织与性能的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. ZHANG X. Effect of microalloyed element Niobium on the microstructure and properties of austenite based weld metal[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [11] 刘政军, 徐德昆. 不锈钢焊接及质量控制(第二版)[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2015(1): 29. LIU Z J, XU D K. Stainless steel welding and quality control (second edition)[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2015(1): 29.
- [12] 陈思含. Nb、C、Si 对 15-15Ti 与 16-15NbSi 奥氏体不锈钢焊接接头组织性能影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017. CHEN S H. Effects of Nb, C and Si on the microstructure and properties of welding joint of 15-15Ti and 16-15NbSi austenitic stainless steel[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [13] 张亚运, 张玉妥, 王培. 铌(Nb)对 309S 奥氏体不锈钢组织与性能的影响规律[J]. *沈阳理工大学学报*, 2017, 36(5): 57-60. ZHANG Y Y, ZHANG Y T, WANG P. Effect of Nb on microstructure and mechanical properties of 309S steel[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2017, 36(5): 57-60.
- [14] LI L J, MESSLER R W, Jr. Dissolution kinetics of NbC particles in the heat-affected zone of type 347 austenitic stainless steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33: 2031-2042.
- [15] 孙明煜. 高 Nb 微合金钢中 NbC 的析出对组织与硬度的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014. SUN M Y. Research on precipitation of NbC on microstructure and hardness of high Nb microalloyed steels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.