

2205 双相不锈钢 与 304 奥氏体不锈钢的焊接

李 燕,王少刚,马启慧,吴新强

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院,江苏 南京 210016)

摘要 采用焊条电弧焊(SMAW),以 E2209 作填充材料对 2205 双相不锈钢与 304 奥氏体不锈钢异种金属焊接工艺进行研究,通过优化焊接工艺参数,获得了具有良好力学性能和合适双相比率的焊接接头。接头力学性能测试表明,拉伸试样断裂发生在强度相对较低的 304 母材侧,2205 母材侧热影响区的显微硬度值高于焊缝和 2205 母材,而 304 母材侧热影响区的显微硬度值高于 304 母材。对接头过渡层进行 XRD 相结构分析,未发现 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 和 σ 等有害相析出,接头拉伸断口扫描观察表明,接头呈明显韧性断裂特征。接头性能满足工程实际应用要求。

关键词 双相不锈钢;奥氏体不锈钢;异种金属;焊接工艺

中图分类号 TG457.1 **文献标识码** A **文章编号** 1001-2303(2011)01-0073-05

Welding of 2205 duplex stainless steel and 304 austenitic stainless steel

LI Yan, WANG Shao-gang, MA Qi-hui, WU Xin-qiang

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The dissimilar metal welding of 2205 duplex stainless steel and 304 austenitic stainless is performed by shielded metal arc welding(SMAW) with E2209. The dissimilar steel joint takes on good mechanical properties and has ideal biphasic proportion through optimized welding technology. The mechanical properties of the welded joint are studied, and results show that the fracture of tensile specimen occurred at 304 base metal region with relatively low strength. The microhardness of 2205 HAZ is higher than that of the weld metal and 2205 base metal, and the microhardness of 304 HAZ is higher than that of 304 base metal. The XRD analysis shows that no precipitation phases of $M_{23}C_6$, Cr_2N or σ can be found in the weld metal. From SEM observation, the joint presents obvious ductile fracture characteristic. Consequently, the welded joints can meet the request of engineering application.

Key words: duplex stainless steel; austenitic stainless steel; dissimilar metal; welding technology

0 前言

双相不锈钢(Duplex Stainless Steel, DSS)的固溶组织中奥氏体相和铁素体相大约各占一半,兼有两相组织特征。双相不锈钢综合了奥氏体型和铁素体型不锈钢两者的优点,即奥氏体不锈钢具有的良好韧性和焊接性能,铁素体不锈钢具有的较高强度和耐氧化物应力腐蚀性能,因此,被广泛应用于天然气和石油管道、热交换器、压力容器和造纸工业中,

其中在焊接件和焊接结构的应用尤其广泛^[1]。在含有氯离子、硫化氢介质等腐蚀环境中使用的压力容器、换热器、反应器等设备,采用双相不锈钢能够延长设备的使用寿命,如炼油厂的换热器常常处于 HCl、 H_2S 的腐蚀环境中,双相不锈钢制造的换热器的管板可用奥氏体不锈钢,这样既节省了资金,又能保证结构的使用性能。这涉及到双相不锈钢与奥氏体不锈钢异种金属的焊接问题。异种钢焊接的主要困难在于异种金属之间的物理和化学性能差异较大,在焊接过程中经常会出现合金元素的迁移、组织发生变化等现象导致接头性能变差,异种金属的热膨胀

收稿日期:2009-07-13,修回日期:2010-05-17

作者简介:李 燕(1984—),女,湖北襄樊人,在读硕士,主要从事异种金属焊接的研究。

系数不同也会引起热应力、塑性差异和应力增加,从而产生裂纹等,降低接头的力学性能和耐腐蚀性能^[2]。因此,对双相不锈钢和奥氏体不锈钢异种钢焊接进行研究具有较大的实际意义。

1 实验材料和方法

实验用母材为经熔炼和锻造的 00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢(SAF2205)和 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢(304) 将母材试样加工成尺寸 300 mm×150 mm×8 mm。考虑到焊接过程中母材对焊缝金属的稀释作用以及合金元素的烧损等,采用 Cr、Ni 含量相对较高的 E2209 焊条对 2205 双相不锈钢和 304 奥氏体不锈钢异种钢进行焊接,母材和焊条的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材和焊条的化学成分 %

合金元素	w(C)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Si)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)	w(N)
SAF2205	0.016	0.82	0.024	0.001	0.36	22.48	5.46	3.12	0.16
304	0.080	1.78	0.030	0.020	0.48	19.20	8.40	—	—
E2209	0.026	0.90	0.025	0.002	0.90	22.10	10.00	2.84	0.18

实验采用焊条电弧焊(SMAW) 直流反接。接头形式为对接接头,为了保证焊透,开 V 型坡口,如图 1 所示。焊接前先用丙酮、酒精对焊接区进行严格清洗。焊接时,不预热、不摆动焊条、快速焊接。为保证获得焊接质量较高的焊接接头,充分考虑到二次热循环的影响,焊接过程中采用多层多道焊,这样在进行每层焊接的同时又对上一层焊道起到热处理的作用,可在一定程度上促进接头热影响区中的铁素体向奥氏体转变。每焊完一层焊缝都应彻底清理打磨干净,再焊接下一层焊缝。严格控制层间温度(小于等于 150 ℃),以减少焊缝在脆性区间内的停留时间,降低焊缝中脆性相析出的可能性。具体焊接工艺参数如表 2 所示。

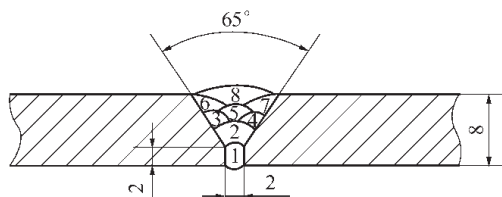


图 1 接头坡口形式

表 2 焊接工艺参数

焊接层数	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/cm·min ⁻¹
1(打底)	100~110	20~22	13~14
2~4(盖面)	120~140	22~24	12~13

焊后根据有关国家标准,在 CMT5105 型电子万能试验机上进行接头的拉伸强度实验;在 HXS-1000A 型显微硬度计上测定接头区域的显微硬度分布;在 Quanta200 型扫描电镜上观察接头拉伸试样的断口微观形貌;在 MM6 型金相显微镜上观察接头区的金相组织;采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪测定接头的相结构组成。

2 实验结果和分析

2.1 力学性能测试

2.1.1 接头拉伸强度

根据 GB2651-1981《焊接接头拉伸试验法》将接头试样加工成标准的拉伸试样,然后在 CMT5105 型电子万能试验机上进行接头拉伸试验,测试条件为:加载速率 8 mm/min,加载载荷 10 kN,接头拉伸实验结果如表 3 所示。为便于比较,将母材本身的抗拉强度一并列入表 3。

表 3 接头拉伸实验结果

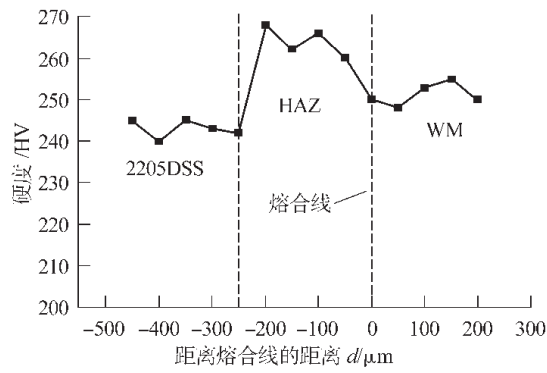
试样	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ /%	断裂位置
2205 母材	870	30	2205
304 母材	610	40	304
接头 A	675	38.8	304 母材
接头 B	655	38.2	304 母材
接头 C	630	38.0	304 母材

由表 3 可知,接头的抗拉强度平均值为 653 MPa,断裂均发生在抗拉强度较低的 304 奥氏体不锈钢母材侧,完全满足工程结构对接头的强度要求。因此,从接头强度角度来看,接头熔合区的组织和性能是合格的,它不是整个焊接接头的薄弱环节。究其原因,因为采用含高铬、镍合金元素的不锈钢焊条作填充材料,接头中的合金元素含量高于母材中的合金元素含量,合金元素起到置换或者间隙强化的作用,在拉伸过程中使位错产生钉扎,阻碍了位错的运动,从而使接头具有较高的强度。并且采用多层多道焊,在一定程度上降低了接头的残余应力,从而获得了满意的焊接接头。

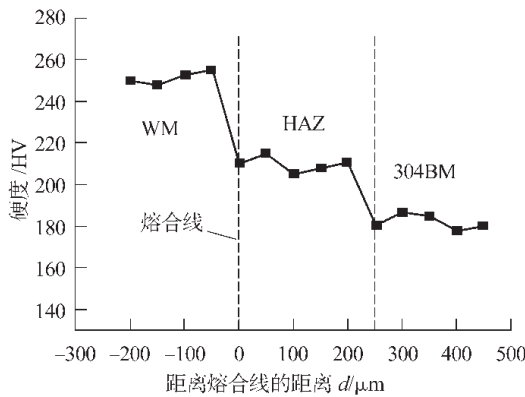
2.1.2 显微硬度测试

采用 HXS-1000A 型显微硬度计沿焊缝金属—热影响区—母材测量接头区域的显微硬度分布,测量条件:负荷 100 g,加载时间 20 s。测量点之间的间隔约为 50 μ m,每个点测量三次后求其平均值,测量结果如图 2 所示。

由图 2a 可知,接头热影响区和焊缝金属区的显



WM—焊缝金属 ;HAZ—热影响区 ;BM—母材
a 2205/WM 界面



b 304/WM 界面

图 2 接头显微硬度分布曲线

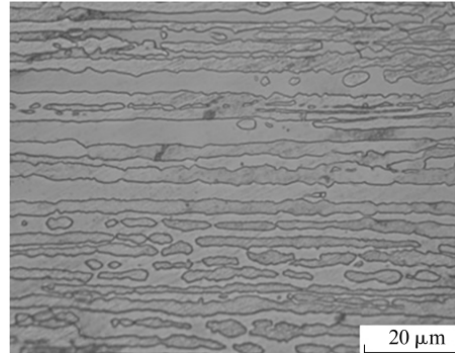
微硬度要高于 2205 母材本身的显微硬度 ,且在热影响区的硬度值最高(268 HV)。这是因为接头组织中的奥氏体在焊接过程中转变成为铁素体 ,在冷却结晶过程中重新在奥氏体边界或内部析出 ,且这一转变速度非常快 ,因此接头 HAZ 中铁素体的含量一般都比较高。而铁素体的硬度大于奥氏体 ,因此热影响区的硬度较高。图 2b 中 304 奥氏体不锈钢侧热影响区的硬度高于 304 母材本身的硬度 ,这是由于在热影响区内有一些条状的晶粒生成 ,分布在奥氏体晶粒上 ,这些晶粒的形成增加了晶界的数量从而产生晶界强化 ,使得热影响区的硬度高于 304 母材。

2.2 微观结构分析

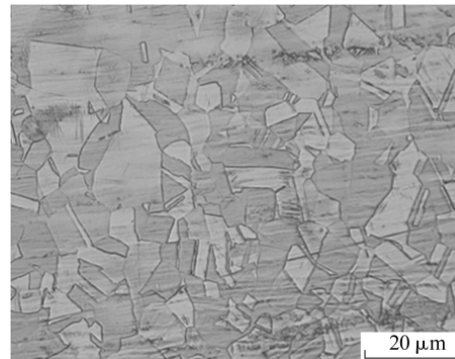
2.2.1 金相组织观察

2205 双相不锈钢与 304 奥氏体不锈钢焊接接头由 2205 母材、2205 焊接热影响区、焊缝金属、异种钢熔合区、304 热影响区、304 母材等部分组成。两种母材的显微组织如图 3 所示。由图 3a 可知 ,双相不锈钢中奥氏体和铁素体的体积分数大约各占一半 ,显微组织存在明显的方向性 ,呈带状组织分

布 ,在铁素体基体上分布着长条状的奥氏体。304 不锈钢的组织为奥氏体组织 ,其中有很少量的铁素体 ,如图 3b 所示。



a 2205 双相不锈钢



b 304 奥氏体不锈钢

图 3 母材组织形貌

焊缝金属区的显微组织如图 4 所示。由图 4 可知 ,焊缝区组织为奥氏体+铁素体 ,其中的奥氏体相呈树枝状 ,奥氏体在铁素体相的晶界或晶内形成 ,形成很多碎枝晶分布在铁素体基体上。双相不锈钢的焊缝区与原始母材相比 ,组织中奥氏体相的体积分数明显增加 ,这是由于所加填充材料中的 $w(\text{Ni})$ 高于双相不锈钢母材的 $w(\text{Ni})$,使焊缝区的奥氏体含量明显增加 ,从而在焊接熔化和快速冷却过程中形成了有别于母材本身形态的组织。焊缝金属从熔化状态冷却至室温时 ,与接头 HAZ 在高温时的转变一样 ,部分铁素体会转变为奥氏体 ,从而形成双相组织。两平衡相的数量和 α/γ 比值无论是对焊缝的抗裂纹能力 ,还是对焊缝的力学性能和耐腐蚀性能都有着重要影响^[3]。理想的双相不锈钢组织应为铁素体和奥氏体各占 50% ,实际上各种材料的相含量在 30%~60%之间都属于正常^[4]。在本实验中采用网格法对焊缝组织中的 γ 相和 α 相含量进行定量测定。测试结果表明 ,焊缝金属中铁素体含量约为 44% ,双相比比例符合要求 ,因此能够使接头保持

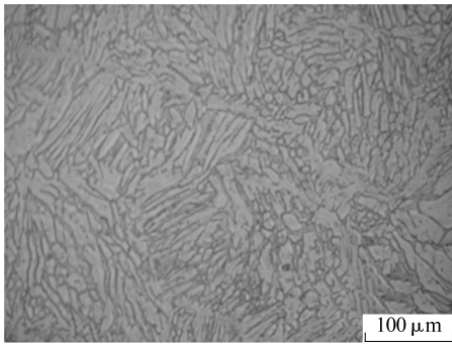


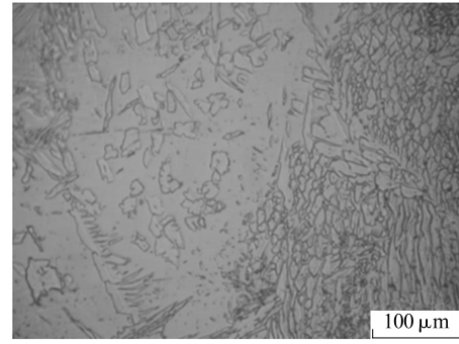
图 4 焊缝金属金相组织

较高的力学性能。

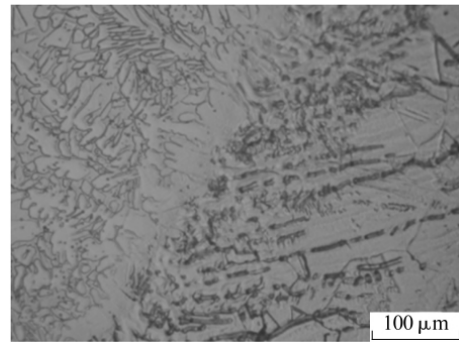
图 5a 和图 5b 分别为 2205 双相不锈钢与焊缝界面、304 奥氏体不锈钢与焊缝界面附近的组织形貌,从图 5 中可看出,焊接热影响区和熔合区的组织过渡情况。图 5a 中左侧为 2205 双相不锈钢母材逐步过渡到右侧的焊缝金属区,可以看出,2205 双相不锈钢热影响区中的奥氏体组织形态与母材中的奥氏体组织形态不同,呈条块状,也有一部分呈尖峰状,呈现出明显的区域性分布特点。这是由于热影响区中的奥氏体组织形态与焊接冷却过程中铁素体向奥氏体的转变有关,由于焊接时冷却速度较快,奥氏体在原铁素体晶界形核长大,形成晶界无定形的奥氏体组织^[5-6]。图 5b 左侧为接头焊缝金属区逐步过渡到右侧的 304 奥氏体不锈钢热影响区,界面微观组织结构显示,在靠近热影响区附近出现长条状的晶粒,这些晶粒呈明显外延生长。根据文献^[7],这些长条状的晶粒是铁素体,条状铁素体在靠近熔合线附近生长,可能是因为在热循环过程中 δ 铁素体形成后由于快速冷却使得更多的铁素体保留下来,这与所测的热影响区硬度值高于母材相吻合。

2.2.2 拉伸试样断口扫描

接头拉伸试样断口扫描电镜照片如图 6 所示。断口形貌为典型的等轴状韧窝断口,韧窝的数量多且分布密集,韧窝尺寸较小,其断裂机制为微孔聚集型断裂。金属多晶材料在连续增加载荷的情况下,材料内部的夹杂物、析出物、晶界、亚晶界或其他塑性变形不连续的部位会发生位错堆积,造成应力集中,从而在局部塑性变形区域导致微孔形成。随着应变的进一步增加,微孔不断连接、聚集、长大,最后材料发生缩颈和断裂,结果在断裂表面上出现了一些形状、大小或深浅不同的韧窝。断口扫描进一步表明所获得的接头质量良好,完全能够满足实际



a 2205 双相不锈钢与焊缝界面



b 304 奥氏体不锈钢与焊缝界面

图 5 焊接接头熔合线附近的组织形貌

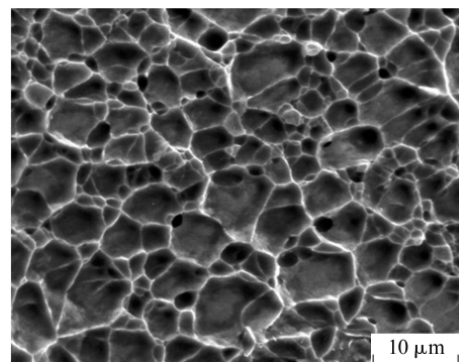


图 6 拉伸试样断口 SEM 照片

使用要求。

2.2.3 接头过渡层 XRD 相结构分析

通常在焊接过程中,接头局部区域经历了高温焊接热循环作用,因此,组织中除了含有铁素体和奥氏体相外,还有可能含有 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 以及类马氏体等有害相。这些有害相硬而脆,若在焊缝中形成将会显著降低接头的塑性和韧性;此外,还可能导致接头部位出现贫铬区而降低接头的耐腐蚀性能。基于此,对接头过渡层进行了 XRD 分析,测试结果如图 7 所示。从图 7 中可知,接头焊缝中主要含有 α 和 γ 两种组成相,符合预期希望获得双相组织的设想,并未发现有 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 和 σ 等有害相析出。因

此可以判断,焊缝组织符合要求,采用的焊接工艺切实可行。

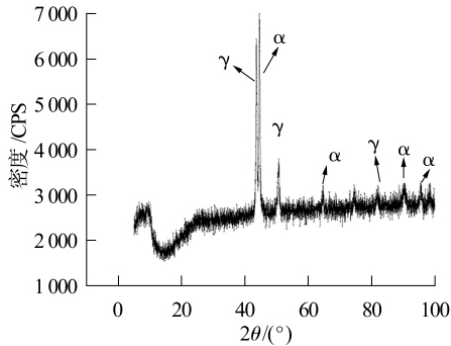


图 7 接头焊缝金属的 XRD 相结构分析曲线

3 结论

(1)采用焊条电弧焊, E2209 焊条作填充材料对 2205 双相不锈钢和 304 奥氏体不锈钢进行焊接,通过优化焊接工艺,获得了性能良好的异种金属焊接接头。

(2)对接头进行力学性能测试,拉伸试样断裂在强度相对较低的 304 母材侧,2205 双相不锈钢侧热影响区的显微硬度高于母材和焊缝的显微硬度,304 奥氏体不锈钢侧热影响区的硬度高于 304 母材。

(3)金相组织观察表明,焊缝金属的显微组织呈树枝状,奥氏体分布在铁素体基体上,对焊缝区铁

素体相含量的测定表明,奥氏体和铁素体两相比比例符合要求。焊接接头过渡区的 XRD 分析,接头焊缝中主要含有 α 和 γ 两种组成相,并未发现有 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 和 σ 等有害相析出。

参考文献:

- [1] Bulent K. The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(3): 138-141.
- [2] 李亚江. 特殊及难焊材料的焊接[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 李为卫, 刘亚旭, 赵新伟, 等. 线能量对 2205 双相不锈钢焊接接头耐蚀性和韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2005(5): 23-24.
- [4] 韩志诚, 王少刚, 胡经洪, 等. 焊接工艺对 2205 双相不锈钢接头组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2008(8): 48-52.
- [5] 张艳, 钱百年, 王宗杰, 等. 00Cr25Ni7Mo3N 双相不锈钢 HAZ 组织对韧性的影响[J]. 材料研究学报, 2001, 15(2): 219-224.
- [6] Henrik S, Rolf S. Austenite reformation in the heat affected zone of duplex stainless 2205[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 418(1-2): 250-256.
- [7] Sireesha M, Shankar V, Albert S. K. *et al.* Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 292(1): 74-82.

好书推荐, 欲购从速!

《中国焊接事业发展历程》

书号: 0236

售价: 20.00



本书为中国科学院院士、清华大学教授潘际銮先生在中国焊接学会成立 45 周年庆典上做的精彩报告。书中大量珍贵的历史照片和资料, 记录了中国焊接事业从萌芽时期的 1950 年, 第一位前苏联焊接博士到哈尔滨工业大学与中国专家创建焊接专业, 到培养出国内第一代焊接专业人才的生根, 成立中国焊接学会的茁壮成长, 与国际焊接学会交流合作, 到今天著名的焊接国家展览、学术交流以及焊接为我国经济建设做出的卓越贡献, 生生不息、发展壮大的历史进程。它是第一部中国焊接事业的历史画卷, 是所有中国焊接人和国际同仁了解中国焊接历史的珍贵资料, 是培养焊接人才、树立爱国精神的重要文献, 极具收藏价值。本书印数有限, 欲购者速与发行部联系。