

引用格式:焦少彬,朱永刚,杨飘,等.外加磁场的激磁电流对316L不锈钢TIG焊接接头组织性能的影响[J].热加工工艺,2025,54(21):4-6

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20240042

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

外加磁场的激磁电流对 316L 不锈钢 TIG 焊接接头组织性能的影响

焦少彬¹, 朱永刚¹, 杨 飘¹, 龚思璠¹, 谢小兵¹, 李承波²

(1. 湖南省特种设备检验检测研究院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要:通过磁场下的钨极氩弧焊(TIG)焊接 316L 不锈钢。结合光学显微镜、扫描电子显微镜和显微硬度测试研究激磁电流对 316L 不锈钢 TIG 焊接接头组织性能的影响。结果表明:随着激励电流的增加,熔透的效果越好,塌陷越明显,焊缝区的宽度增加,焊接接头的硬度下降率增大,与母材相比,激励电流为 1、2 和 3 A 时的接头硬度下降率分别为 9.8%、10.4%和 15.3%,2 A 是最佳的激励电流。随着激励电流的增加,焊缝区域的晶粒尺寸增加,尤其是激励电流从 2 A 增加到 3 A,晶粒尺寸粗化更为显著,焊缝区域最大晶粒尺寸从 170 μm 增加至 350 μm ,焊缝区域为奥氏体和蠕虫状铁素体组织,且存在明显的过渡带和热影响区。

关键词:316L 不锈钢;磁场;钨极氩弧焊;力学性能;微观组织

中图分类号:TG457.11

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)21-0041-06

Effect of Applied Magnetic Field Current on Microstructure and Properties of 316L Stainless Steel TIG Welded Joint

JIAO Shaobin¹, ZHU Yonggang¹, YANG Piao¹, GONG Sifan¹, XIE Xiaobing¹, LI Chengbo²

(1. Hunan Provincial Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xiangtan 411105, China; 2. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract:316L stainless steel was welded by TIG under magnetic field. The effect of excitation current on the microstructure and properties of 316L stainless steel TIG welded joint was studied by combining optical microscope, electron scanning microscope and microhardness testing. The results show that with the increase of the exciting current, the penetration effect get better, the more serious the collapse and the wider the weld zone, the greater the hardness reduction rate of the welded joint. Compared with that of the base metal, the hardness reduction rate of welded joint at excitation currents of 1 A, 2 A and 3 A is 9.8%, 10.4% and 15.3%, respectively, with 2 A being the optimum excitation current. With the increase of the excitation current, the grain size in the weld area increases, especially when the excitation current increases from 2 A to 3 A, the grain size coarseness becomes more significant, and the maximum grain size in the weld area increases from 170 μm to 350 μm . The weld area is austenitic structure and vermicule ferrite, and there are obvious transition zones and heat affected zones.

Key words:316L stainless steel; magnetic field; argon tungsten arc welding; mechanical properties; microstructure

焊接技术是在航空航天^[1]、船舶^[2]、能源装备^[3]、特种设备制造等领域被广泛应用的一种加工技术,其发展水平已经成为衡量一个国家工业先进程度的

重要标志^[4]。焊接结构的熔透状态更是决定焊缝质量的因素之一。为保证焊接结构的可靠性,无一例外地都对其全熔透提出了极为苛刻的要求^[5]。由于电极燃烧磨损、热应力变形、装配误差等原因,很难保证焊接工件的熔透。因此,实现熔透状态的实时控制对提高焊接生产率和焊接质量具有重要意义。

在常用焊接方法中,MIG 和 TIG 焊的热输入较小,且氩气流除了保护高温金属外,也拥有一定程度的冷却作用,可增加焊缝的抗裂能力,从而降低焊接变形。奥氏体不锈钢由于其热传导率小,线膨胀系数大,因此在焊接过程中,焊接接头部位的高温停留时

收稿日期:2024-01-04 修回日期:2025-05-28

基金项目:湖南省市场监督管理局科技项目(2022KJH82);广西科技重大专项(桂科 AA23023028)

作者简介:焦少彬,男,高级工程师,硕士,主要研究方向:锅炉、压力容器、压力管道的焊接及检验检测;

E-mail:bin25223@163.com

通讯作者:李承波,男,副教授,博士,主要研究方向:轻质高强金属材料的制备、成形、焊接及增材制造;E-mail:csulicb@163.com

间较长,焊缝易形成粗大的柱状晶组织,在凝固结晶过程中,在晶间形成低熔点共晶相,在焊接接头承受较高的拉应力时,就易在焊缝中形成凝固裂纹,在热影响区形成液化裂纹,这些都属于焊接热裂纹。防止热裂纹最有效的途径是降低钢及焊材中易产生低熔点共晶的杂质元素和使铬镍奥氏体不锈钢中含有4%~12%的铁素体组织。张凤英等^[6]研究1Cr18Ni9Ti的氩弧焊焊接工艺时发现,氩弧焊焊缝区组织由柱状晶+等轴晶组成。Saha等^[7]在研究奥氏体不锈钢MIG焊接时发现,焊接过程中同时增大焊速和电流能够增强焊接接头的力学性能。

近年来,国内外学者对磁控焊接技术进行了大量的研究。在钨极惰性气体保护焊(TIG)、金属熔化极惰性气体保护焊(MIG)、金属熔化极活性气体保护焊(MAG)、埋弧焊、堆焊等不同工艺方法中加入了不同类型的磁场,可控制焊接过程中的电弧、熔滴、熔池,达到细化晶粒、抑制吹孔、减少飞溅和裂纹的目的。1989年,赵彭生等^[8]在等离子焊机上引入双尖角磁场对不锈钢板进行焊接,提高了焊接厚度极限。刘政军等^[9]对外加横向交流磁场下TIG焊的焊接接头力学性能改善情况进行了分析,发现外加磁场使电弧产生周期性摆动,改善了焊接接头的抗拉强度和硬度。针对在实际工业生产过程中厚板难熔透等问题,本研究通过施加纵向尖角磁场的方式改善热源,使得在焊接过程中更容易焊透并减少咬边等缺陷的形成,同时开展了交变尖角磁场下的激磁电流对316L不锈钢TIG焊的焊接接头组织及性能的影响研究。

1 试验材料和方法

对316L不锈钢进行TIG焊试验,结合实际应用背景板材厚度取4mm。由于施加尖角磁场可良好的改善焊板的熔透性,不需对待焊板材开坡口。电焊机采用YC300WX交直流TIG焊机。焊接工艺参数为:焊接电流150A、焊接速度0.15m/min,在电弧位置外加交变尖角磁场。励磁电源给对称分布的四个磁极提供励磁电流,从而产生尖角磁场。交流电源采用国产的HY-LCS2P交变频电源,励磁电流选取1、2、3A,频率选取10Hz。

将焊接试样进行线切割,用砂纸粗磨试样后,再用抛光机精磨,最后用腐蚀液对磨好的焊接接头试样进行腐蚀。使用金相显微镜观察焊缝的组织。对焊

缝、熔合区和热影响区进行硬度测量,硬度测试采用HV-10B小负载维氏硬度计。在MIRA4LMH扫描电镜上进行显微组织观察,晶粒组织检测采用带有OXFORD EBSD检测器的蔡司EVOMA10扫描电子显微镜。

2 试验结果

2.1 焊接接头的硬度曲线

图1为在不同励磁电流下焊接接头的硬度曲线。可以看出,随着励磁电流的增加,焊接接头的硬度曲线形状发生变化,焊缝区的宽度明显增加,熔合区和焊缝区的硬度也明显下降。励磁电流从1A增加到2A,变化不明显,励磁电流从2A增加到3A,变化非常显著。焊接接头的显微硬度分布规律均为热影响区>母材>焊缝。从励磁电流为1A的焊接接头硬度曲线可以看出,焊接接头的硬度曲线呈M型,从母材区到热影响区硬度值增加,热影响区到焊缝区硬度降低。热影响区的硬度值最高,为183.2HV,熔合区的硬度最低,约为160.5HV,焊合区的硬度值在170HV左右,母材区的硬度值为178HV。由此可知,与母材相比,焊接接头处的硬度下降率约为9.8%,硬度保留值约为0.9。从励磁电流为2A的焊接接头硬度曲线可以看出,焊接接头的硬度曲线呈M型,从母材区到热影响区硬度值增加,热影响区到焊缝区硬度降低。热影响区的硬度值最高,为184.1HV,熔合区的硬度最低,约为160.1HV,焊合区的硬度值在170HV左右,母材区的硬度值为179.0HV。由此可知,与母材相比,焊接接头处的硬度下降率约为10.4%,硬度保留值为0.89。从励磁电流为3A的焊接接头硬度曲线可以看出,焊接接头

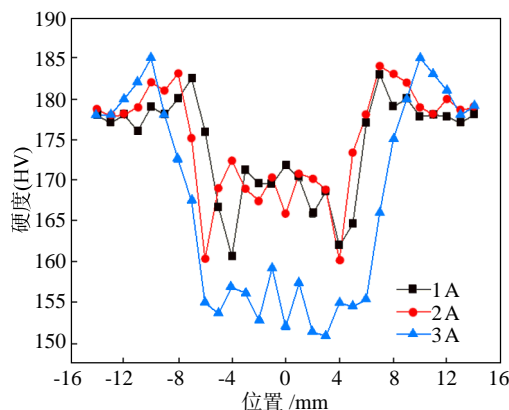


图1 不同励磁电流下的焊接接头硬度曲线
Fig.1 Hardness curves of welded joints under different excitation currents

的硬度曲线呈 M 型,从母材区到热影响区硬度逐渐升高,热影响区到焊缝区逐渐降低。热影响区的硬度最高,最大硬度为 185HV,焊合区的硬度最低,最小值约为 150.8HV,母材区的硬度为 178HV。由此可知,与母材相比,焊接接头处的硬度下降率约为 15.3%,硬度保留值约为 0.85。

2.2 焊接接头的宏观照片

图 2 为不同励磁电流下的焊接接头宏观照片。从图 2 可以看出,激励电流越大,熔透的效果越显著。励磁电流为 1A 时,背面的焊缝处于临界熔透,存在未焊透的风险,正面的焊缝未出现塌陷的现象。励磁电流增加到 2A 时,背面的焊缝完全熔透,正面的焊缝出现塌陷的现象。励磁电流增加到 3A 时,背面的焊缝熔透效果最好,正面的焊缝出现严重的塌陷,热影响区域也显著变宽。由此可以看出,最佳的励磁电流为 2A,可以确保背面的焊缝完全熔透,正面的塌陷又不明显。

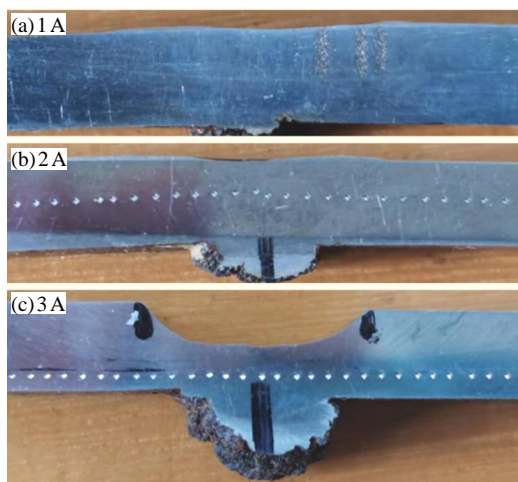


图 2 不同励磁电流下的焊接接头宏观照片

Fig.2 Macro photos of the welded joints at different excitation currents

2.3 金相组织

图 3 为励磁电流 1A 的焊接接头 OM 照片。可看出,当激励电流为 1A 时,热输入相对较小,在热影响区附近未观察到明显界限。焊接接头焊缝中心组织由奥氏体等轴晶和蠕虫状的铁素体组成,熔合线附近主要由奥氏体和树枝状铁素体构成,黑色的蠕虫状、骨架状树枝晶分布于奥氏体区域之间。

图 4 为励磁电流 2A 的焊接接头 OM 照片。可看出,当激励电流增加到 2A 之后,电弧的热输入更大,使得焊缝的过渡区域产生了不规则的粗大晶粒。虽然通过增加激励电流可以更好的改善电弧的熔透

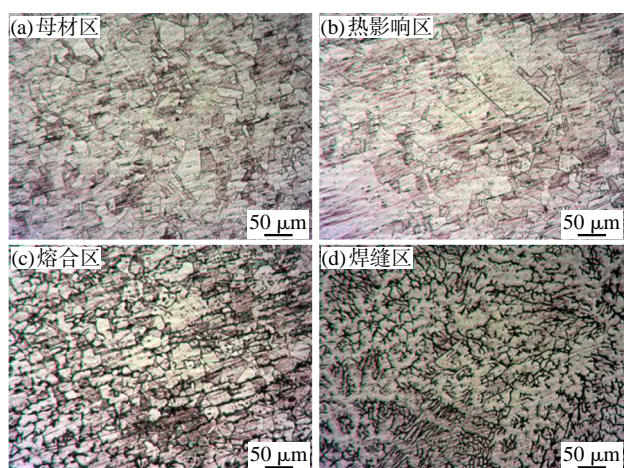


图 3 励磁电流 1 A 的焊接接头 OM 照片

Fig.3 OM photos of welded joint with excitation current of 1 A

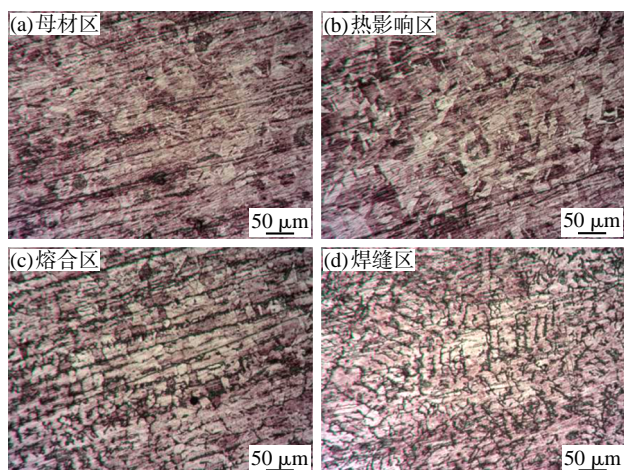


图 4 励磁电流 2 A 的焊接接头 OM 照片

Fig.4 OM photos of welded joint with excitation current of 2 A

行为,但对于焊缝区域的组织略有粗化影响,通过图 1 可以看出,励磁电流为 1A 和 2A 的焊接接头硬度曲线差异不明显,晶粒组织的差异也不明显。

图 5 为励磁电流 3A 的焊接接头 OM 照片。可看出,当激励电流增加到 3A 之后,电弧在工件上的压力最大值和温度最大值增加,虽然熔透性很好,但焊缝区的晶粒发生明显粗化现象。从图 5 可以观察到,这些粗大柱状晶由奥氏体晶粒和 δ 铁素体树枝晶组成,其对于接头性能影响较大。

2.4 SEM 组织

图 6 为不同励磁电流下的焊接接头 SEM 照片。图 6(a)为 2A 下母材的 SEM 照片。可看出母材为奥氏体组织。从图 6(b)可以看出,焊缝区域中无明显焊接缺陷,且无夹杂、气孔等的产生,元素分布均匀。对图 6(b)中灰色区域和基体进行能谱分析,主要元素为 Fe、Cr、Ni 元素。通过对比发现,灰色区域

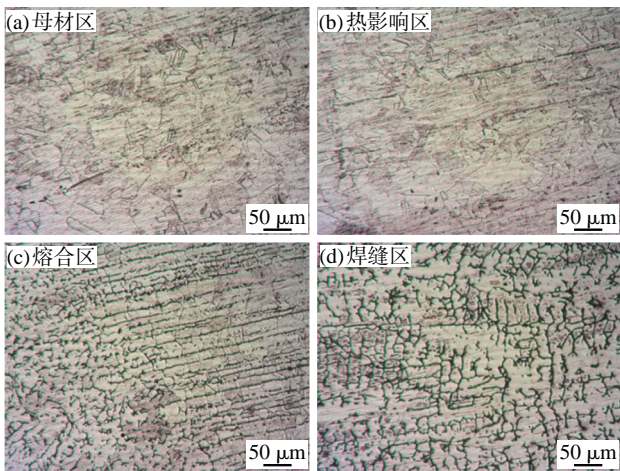


图5 励磁电流3 A的焊接接头 OM 照片
Fig.5 OM photos of welded joint with excitation current of 3 A

的 Cr 含量较基体高一些,能谱结果如图 6(e)、(f)所示。图 6(c)为 3A 下母材的 SEM 照片。可看出,母材为奥氏体组织。从图 6(d)可以看出,焊缝区域中存在黑色颗粒,元素分布均匀。

2.5 EBSD 组织

图 7 为励磁电流 2A 的焊接接头 EBSD 处理结果。图 7(a)、(b)为晶粒尺寸分布图,所显示界面为过渡界面,存在明显的柱状晶,平均晶粒尺寸为 40.48 μm ,最大晶粒尺寸为 170 μm 。图 7(c)、(d)为晶粒取向分布图,所显示界面为过渡界面,高角度晶界含量偏高,为 92.4%,小角度晶界含量为 7.6%。从一定程度上反应该参数下,晶粒发生了充分的回复现象,并且受热温度足够,使得大部分小角度晶界完成了向

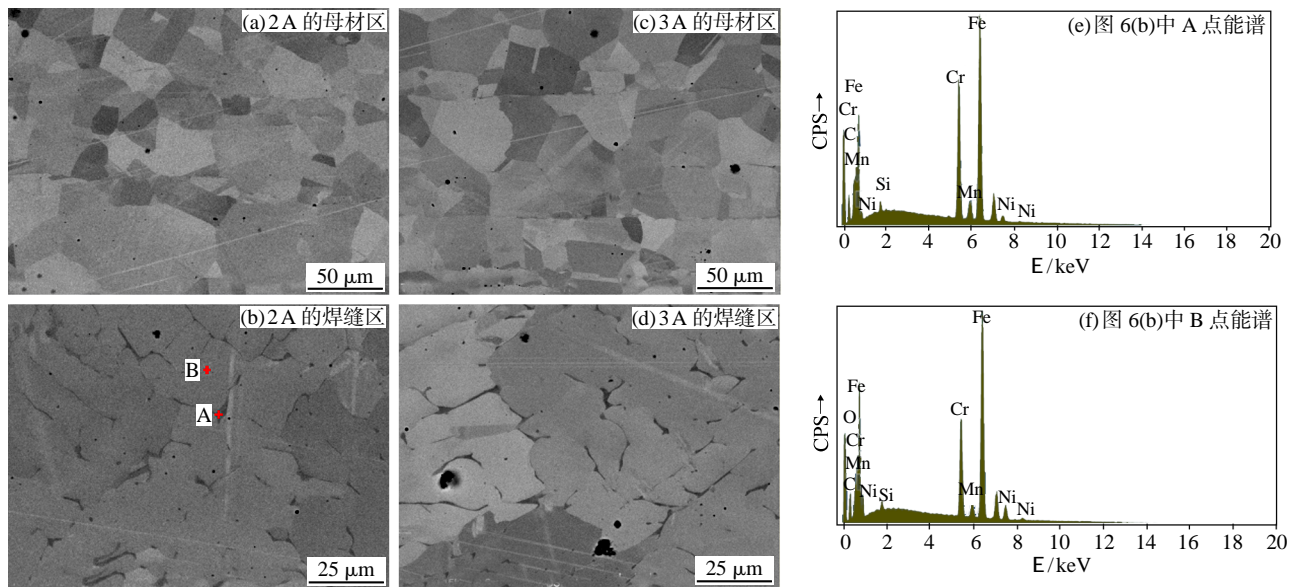


图6 不同励磁电流下的焊接接头 SEM 照片
Fig.6 SEM photos of welded joints with different excitation currents

大角度晶界的转换,且取向一致性好。图 7(e)、(f)为晶粒类型分布图,所显示界面为过渡界面,如图所示蓝色的为再结晶晶粒,红色的为亚结构晶粒,黄色的为形变晶粒。其中大部分为再结晶晶粒,含量为 95.4%,说明在该焊接参数下,可以完全达到钢的再结晶温度;并且冷却速率及作用时间充分。在焊接过程中,熔池受尖角磁场的震荡作用发生了动态再结晶,仅有少部分晶粒未完成由再结晶形成亚晶的过程,其含量为 3.1%,其余部分晶粒为形变晶粒,含量为 1.5%。图 7(j)为极图,表示织构分布图,其中 001 方向存在少量的剪切组织,呈环状非对称状分布,其织构强度最高为 2.885。

图 8 为励磁电流 3A 的焊接接头 EBSD 处理结

果。晶粒尺寸相较于前两组参数发生了明显粗化,出现了粗大的柱状晶。图 8(a)、(b)为晶粒尺寸统计图,其中平均晶粒尺寸为 59.62 μm ,最大晶粒尺寸为 350 μm 。在励磁电流 3A 的参数下晶粒粗化现象较为严重。图 8(c)、(d)为晶粒取向分布图,所显示界面为过渡界面,其中高角度晶界仍占据主导,但其含量相较于前两组参数发生了明显的下降现象,其含量为 73.81%。低角度晶界含量为 26.19%。图 8(e)、(f)为晶粒类型分布图,其中大部分为再结晶晶粒,含量为 93.4%,其中亚晶含量为 4.1%,其余部分晶粒为形变晶粒,含量为 2.5%。图 8(j)为织构极图,其中 001、011、111 这 3 个方向(相对而言)均存在大量的剪切组织,其织构强度最高为 3.475,织构强度相

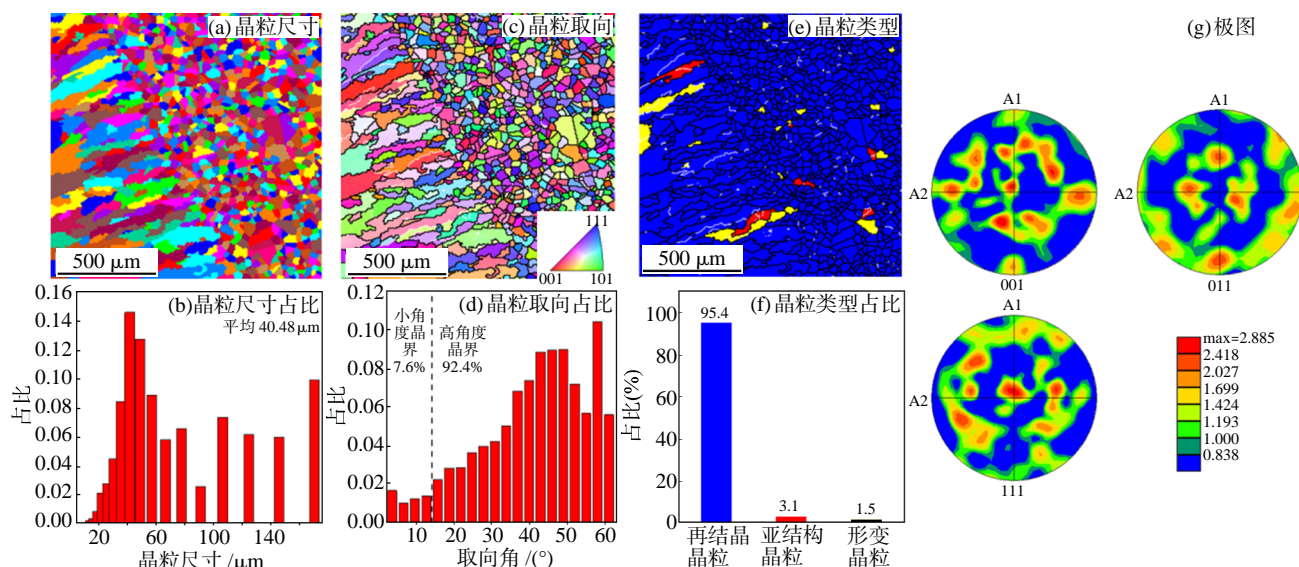


图7 励磁电流 2 A 的焊接接头 EBSD 处理结果
Fig.7 EBSD treatment results of welded joint with field current of 2 A

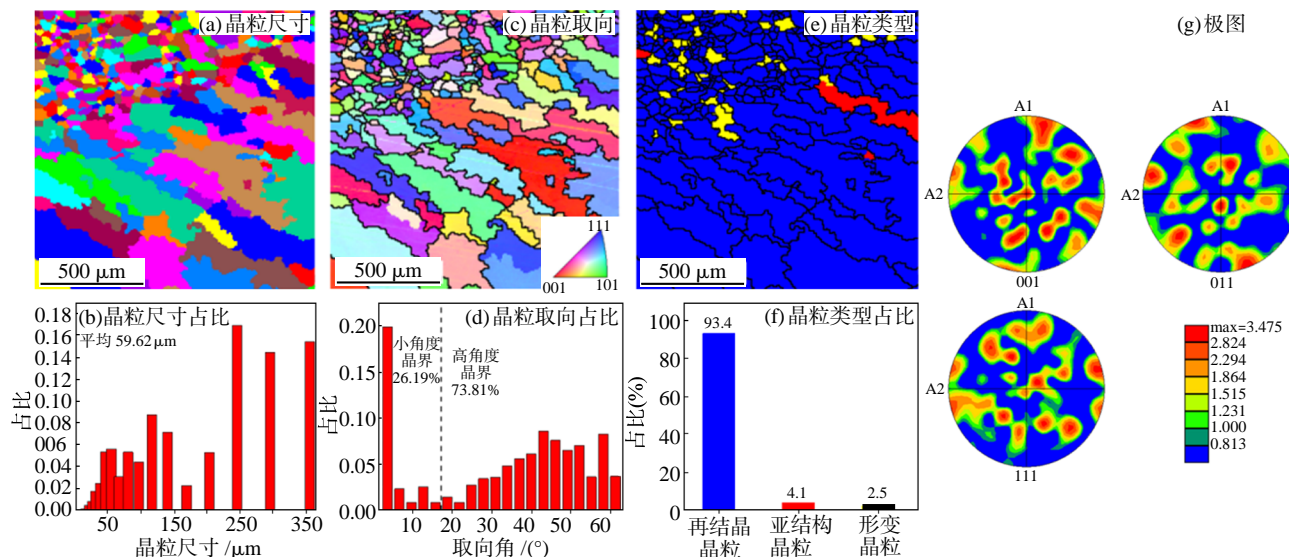


图8 励磁电流 3 A 的焊接接头 EBSD 处理结果
Fig.8 EBSD treatment results of welded joint with field current of 3 A

比其他两组参数较高,一定程度上反应了在此参数下,组织的各向一致性较差。

3 分析与讨论

通过对 316L 不锈钢母材进行金相观察,可以看出母材主要由奥氏体组成,TIG 焊缝为典型的快速凝固组织,由奥氏体晶粒和 δ 铁素体树枝晶组成。其较快的冷却速度使得金属快速凝固,且形成不平衡的金相组织。因此,TIG 焊缝中心区域为奥氏体等轴晶和蠕虫状铁素体,且存在明显的过渡带和热影响区,熔合线附近主要由奥氏体和树枝状铁素体构成,黑色的蠕虫状、骨架状树枝晶分布于奥氏体区

域之间。原因是奥氏体组织在形成的同时,铁素体含量不断减少,结束之后留下类似于骨架形状的富 Cr 铁素体。

随着焊缝金属冷却过程的进行,温度降至铁素体扩散受到限制的温度时,相变受到遏制,转变过程趋于稳定,最终呈现蠕虫状、骨架状铁素体,此凝固模式为标准的 FA 模式。TIG 焊接接头在冷却过程中均经历了一定程度的热循环过程,由于 TIG 焊接接头冷却速度较慢,焊缝区域经历焊接热循环作用时间更长,晶粒相对粗大,熔合线附近组织演变较为复杂,以奥氏体和蠕虫状铁素体为主。熔合线附近由于母材对熔融金属的冷却作用,存在较大的温度梯

度,此时依附于熔合区母材表面形成的晶核便会沿着最大温度梯度方向优先生长,形成柱状晶。导致该区域的显微硬度明显低于母材的。此外,奥氏体不锈钢焊接接头常常由于晶间析出碳化铬而发生贫铬现象,进一步导致焊缝区硬度下降^[10]。TIG焊接接头热影响区的蠕虫状铁素体含量明显增加,致使晶界数量增加,从而产生晶界强化作用,因而热影响区的硬度最高。

随着励磁电流增加,磁感应强度增强,电弧在工件上的压力和温度由圆形逐渐变为椭圆形。同时,随着磁感应强度的增大,电弧在工件上的压力最大值和温度最大值也逐渐增大,Wu等^[11]发现:交变尖角磁场下的电弧电压会随着励磁电流的增大而增大。这是由于尖角磁场压缩电弧形态导致电弧能量更加集中,单位面积的热输入更大,冷却速度慢,焊缝区域晶粒尺寸明显更加粗大,焊缝区域晶粒也出现明显的粗化现象,从而导致焊缝区域的硬度明显下降。因此,随着励磁电流增加,熔透效果越好,同时也导致焊缝区域晶粒粗化,形成较明显的过渡带和热影响区,焊接系数减小。最佳激励电流为2A,此时焊缝完全熔透,且焊缝区域的组织和性能也较好。

4 结论

(1) 随着激励电流的增加,熔透的效果越好,塌陷越严重,焊缝区的宽度增加,焊接接头的硬度下降率增大。与母材相比,激励电流为1、2和3A时的接头硬度下降率分别为9.8%、10.4%和15.3%,2A是最佳的激励电流。

(2) 随着激励电流的增加,焊缝区域的晶粒尺寸增加,尤其是激励电流从2A增加到3A,晶粒尺寸粗化更为显著,平均晶粒尺寸从40.5 μm 增加至59.62 μm ,最大晶粒尺寸从170 μm 增加至350 μm 。焊缝区域为奥氏体和蠕虫状铁素体组织,且存在明

显的过渡带和热影响区。

参考文献:

- [1] Liu Z, Li X, Pan Li, et al. Effects of weld penetration modes on laser welding characteristics of a novel ultra-high strength steel for aerospace application [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 90: 111-124.
- [2] Chen Z, Yu B, Wang P, et al. Fatigue properties evaluation of fillet weld joints in full-scale steel marine structures[J]. Ocean Engineering, 2023, 270: 113651.
- [3] Mohan K, Rajesh K, Pramod R, et al. Testing, characterization and numerical prediction(uni-axial tension and bend test) of double-side TIG welded SS321 plate for pressure vessel application [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 197: 104648.
- [4] 蒋爽,江国业. 高功率激光焊接 X65 管线钢的接头组织与性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52(19): 111-114.
- [5] Chen Z, Wang Z, Wang F, et al. Feasibility study on sensing and prediction of backside weld geometry in cold metal transfer welding of X65 pipeline in the vertical-up position[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 83: 1173-1186.
- [6] 张凤英,杨雪坤,吴博,等. 1Cr18Ni9Ti 激光焊与氩弧焊的显微组织及力学性能对比研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 461-466.
- [7] Saha S M, Mukherjee M, Pal T K. Microstructure, texture, and mechanical property analysis of gas metal arc welded AISI 304 austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(3): 1125-1139.
- [8] 赵彭生,赵彭生,祝树燕,等. 双尖角磁场再压缩等离子弧的物理特征及焊接工艺性能[J]. 焊接学报, 1986(1): 7-14.
- [9] 刘政军,温晓波,苏允海. 外加磁场电流对镁合金焊接接头力学性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(3): 258-262.
- [10] 姜爱华,陈亮,丁毅,等. 焊接工艺对 304 不锈钢焊接接头耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 铸造技术, 2012, 33(9): 1097-1098.
- [11] Wu H, Chang Y, Guan G, et al. Arc shape and microstructural analysis of TIG welding with an alternating cusp-shaped magnetic field[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2021, 289: 116912. 