

DOI: 10. 11973/jxgccl240346

# 工艺参数对热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 合金成形性能及组织的影响

蔡军<sup>1</sup>, 陈成<sup>2</sup>

(1. 南通开放大学机电工程学院, 南通 226006; 2. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816)

**摘要:** 采用热丝脉冲非熔化极惰性气体保护焊(TIG)在低电流(峰值/基值电流为160 A/95 A)和不同焊接速度(220~300 mm·min<sup>-1</sup>)下于AISI 4130钢表面制备Inconel 625合金堆焊层, 研究了焊接电流与焊接速度对堆焊层成形性能及显微组织的影响, 并与高电流(峰值/基值电流为190 A/110 A)条件下进行对比。结果表明: 随着焊接速度的增加, 低电流下堆焊层的宽度和熔深降低, 高度以及熔深与高度之比先降后升; 低电流下堆焊层的宽度、熔深及熔深与高度之比低于高电流下, 高度则高于高电流下。低电流、低焊接速度可获得窄且高, 稀释率低的堆焊层。低电流下堆焊层截面近表面和远离熔池底部主要形成胞状晶、胞状树枝晶, 熔池底部以平面晶为主; 随着焊接速度的降低, 平面晶区扩大, 近表面晶粒向柱状晶或胞状树枝晶发展, 远离熔池底部的晶粒向胞状晶发展。在峰值/基值电流160 A/95 A、焊接速度240 mm·min<sup>-1</sup>和搭接率30%条件下制备的3层10道堆焊层连续致密, 显微硬度在(280±20)HV, 堆焊后还需进行退火处理以降低硬度。

**关键词:** Inconel 625合金; TIG堆焊; 显微组织; 显微硬度; 工艺优化

**中图分类号:** TG455

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2024)11-0061-08

## 0 引言

深海油气钻采管道及阀门等零部件多采用合金钢材材料, 通过在其表面或内壁制备防护涂层以满足使用要求<sup>[1]</sup>。Inconel 625合金作为一种海洋防腐涂层材料, 具有优异的抗氧化、还原介质腐蚀性能, 可满足海洋油气钻采及输送设备的耐腐蚀要求<sup>[2]</sup>。近年来, 电弧堆焊<sup>[3-4]</sup>、等离子弧堆焊<sup>[5]</sup>以及激光熔覆<sup>[6-8]</sup>等技术常被用于在铁基材料表面制备Inconel 625合金涂层, 其中非熔化极惰性气体钨极保护电弧焊(TIG)因效率高、工艺稳定、成本低而在工业生产过程中得到广泛应用<sup>[9]</sup>。在堆焊冶金过程中, 基材中的铁元素会扩散进入Inconel 625合金堆焊层, 显著降低堆焊层的耐腐蚀性能, 影响堆焊层质量。因此, 控制堆焊层铁元素的含量, 即控制稀释率是优化堆焊工艺的核心问题。

研究<sup>[10-13]</sup>表明, 在TIG堆焊Inconel 625合金时, 焊接电流超过180 A和焊接速度超过150 mm·min<sup>-1</sup>(即较大的热输入)条件下能获得良好的堆焊成形。然而, 较大的热输入容易引起较高的稀释率, 且不符

合节能、高效的工艺生产需求。热输入受焊接电流、电压和焊接速度影响, 通过降低焊接电流来减小热输入时还需考虑电压和焊接速度的协同影响。此外, 脉冲TIG工艺可以在较低热输入下保证良好的成形质量<sup>[14]</sup>。作者使用ERNiCrMo-3合金焊丝, 在低电流(峰值/基值电流为160 A/95 A)和不同焊接速度条件下采用热丝脉冲TIG工艺在AISI 4130钢表面制备Inconel 625合金堆焊层, 研究了工艺参数对堆焊层成形及显微组织的影响, 为Inconel 625合金的增材制造提供理论和技术支持。

## 1 试样制备与试验方法

基材采用AISI 4130热轧钢板, 化学成分(质量分数/% ,下同)为0.80~1.10Cr, 0.15~0.25Mo, 0.28~0.33C, 0.40~0.60Mn, 0.15~0.30Si, 0.04S, 0.035P, 余Fe; 焊丝采用进口ERNiCrMo-3合金焊丝, 化学成分为20.0~23.0Cr, 8.0~10.0Mo, 3.15~4.15Nb, ≤5.0Fe, ≤0.4Al, ≤0.4Ti, ≤0.1C, ≤0.5Mn, ≤0.5Si, ≤0.015S, ≤0.02P, ≤0.5其他元素, 余Ni。

设计低电流(峰值/基值电流为160 A/95 A)堆焊工艺, 探讨成形可行性及不同焊接速度对堆焊层成形质量的影响规律, 并以高电流(峰值/基值电

收稿日期: 2024-07-18; 修订日期: 2024-09-30

基金项目: 南通开放大学重大课题(2024ZDA01)

作者简介: 蔡军(1987—), 男, 江苏南通人, 讲师, 硕士

流为190 A/110 A)条件下的堆焊层作为对照。两种电流条件下的工艺参数如表1所示,送丝速度均为 $210 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,焊接电压根据钨针到基板的距离(3 mm)及焊接速度由设备自动控制在 $11.5 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$ 。由于电压波动范围较小,试验时默认焊接电压恒定。按照上述参数,采用WSM-315D型直流钨极氩弧焊机搭配半自动TIG焊接小车、自动送丝系统、热丝系统以及基板预热系统在钢板表面制备单道堆焊层,堆焊前将基板预热至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,通过热丝电源(热丝电流40 A,电压9.5 V)在焊接瞬间接通预热焊丝。采用单道堆焊确定的堆焊工艺参数(峰值/基值电流为160 A/95 A、焊接速度为 $240 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )进行3层10道搭接试验,搭接率为30%。

表1 堆焊试验工艺参数

Table 1 Process parameters of cladding welding test

峰值电流/ A	基值电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	焊接热输入/ ( $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
190	110	11.5	300	345
		11.5	280	370
		11.8	260	408
		11.5	240	431
		11.7	220	479
160	95	11.0	300	281
		11.8	280	322
		11.0	260	324
		11.5	240	367
		11.5	220	400

采用电火花线切割机在成形较好的堆焊层部位取样分析。金相试样经过镶嵌、研磨和抛光后,用质量分数为10%的草酸溶液进行电解腐蚀,采用DM2700M型光学显微镜(OM)观察显微组织,用配套软件测量堆焊层宽度、高度及熔深。采用Hitachi TM-3000型扫描电子显微镜(SEM)观察微观形貌,用附带的X-stream-2型能谱分析仪(EDS)进行微区成分分析。采用HXS-1000AY型显微维氏硬度计测试截面硬度,沿深度方向每隔0.2 mm取点测试,相同深度测3个点取平均值,载荷均为0.98 N,保载时间均为15 s;在距表面1.05 mm深度处,每隔0.2 mm取点测试,取平均值,以此作为堆焊层的显微硬度。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 工艺参数对堆焊成形的影响

由图1可知:不同工艺参数下的单道堆焊层的表

面成形均较好,堆焊层连续度较高,表面及焊趾均未观察到明显的飞边、夹渣及缺陷;随着焊接速度的降低,堆焊层宽度增加,热影响区增大;相比于高电流条件下,低电流条件下的堆焊层较窄,堆焊层表面粗糙度更大。随着焊接电流的增大,作用于焊材及工件上的电弧力和热输入均增大:一方面,热输入增大使得熔池范围增加,即堆焊层宽度增大;另一方面,熔池在电弧搅拌及热作用下混合得更加均匀,堆焊层成形更加均匀,飞溅减少,表面更加平滑。

由图2可知,不同工艺参数下的堆焊层均出现明显的涡状形貌。这是由于熔池内部在热对流和电弧搅拌作用下,中心的高温液体因热膨胀由边缘向上流动,而边缘的低温液体由中心向下流动,形成涡流结构;此外,随着电弧的移动,熔池前端的液态金属因来不及凝固而向后流动,补充至熔池后端,但在重力的影响下继续向两侧流淌,最终在堆焊层顶部形成涡状结构。堆焊层下端并未呈现标准的圆弧形,这与送丝位置在中心而丝材直径小于电弧宽度有关。对比可知,较低电流下的堆焊层弧形轮廓半径较小。

熔深与堆焊层高度的比值反映母材稀释率的大小。由图3可知:随着焊接速度的增加,不同峰值/基值电流下堆焊层的宽度以及熔深均呈降低趋势,低电流下的堆焊层高度及熔深与高度之比均呈先降后升的趋势,其中熔深与高度之比最大降幅达16%;高电流下堆焊层高度呈降低趋势,熔深与高度之比先保持稳定,当焊接速度达到 $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时下降。与高电流条件相比,较低电流下堆焊层各尺寸随焊接速度的变化幅度更明显,这主要是由于焊接电流降低,焊接速度对热输入的影响权重增大,即相比于高电流条件下,低电流条件下相同的焊接速度变化量对整体热输入的影响量更大,从而导致熔池尺寸变化幅度大。较低电流下堆焊层的宽度和熔深以及熔深与高度之比更低,堆焊层的高度更高。这主要是由于在较低电流作用下,电弧对母材的穿透作用明显下降,丝材熔化后大量堆积在表面,形成高且窄的堆焊层。

### 2.2 工艺参数对单道堆焊层显微组织的影响

由图4可知:不同工艺参数下堆焊层截面近熔池底部界面的组织均以平面晶为主,远离熔池底部的组织均以胞状晶、胞状树枝晶为主;随着焊接速度的降低(热输入增大),平面晶区范围逐渐扩大,胞状晶长度增加,并向柱状晶或胞状树枝晶发展。熔池

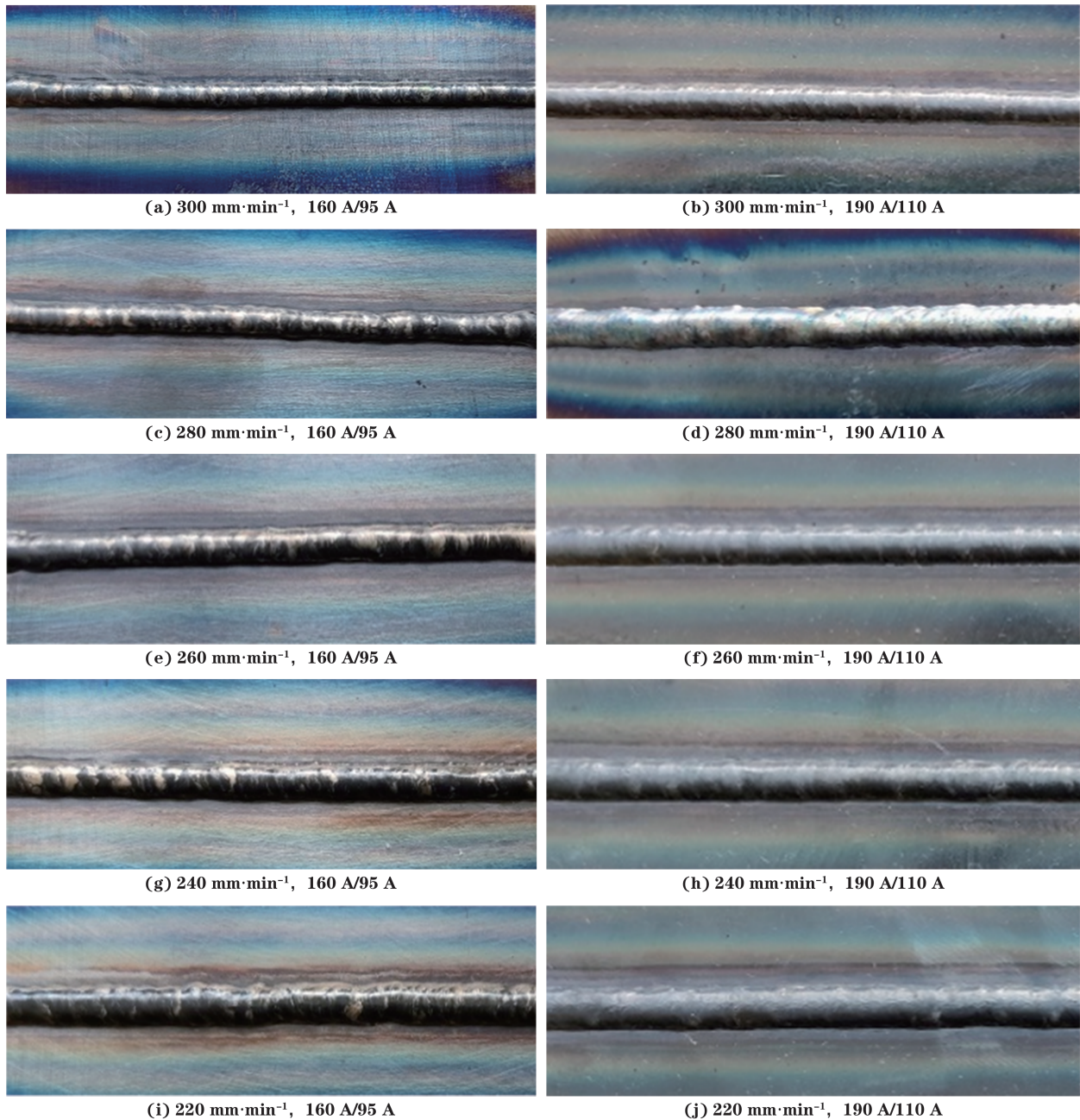


图1 不同焊接速度、不同峰值/基值电流下堆焊层表面的宏观形貌

Fig. 1 Surface macro-morphology of cladding layer under different welding speeds and different peak/base currents

底部与母材紧密接触,散热好,温度梯度大,同时结晶速率慢,因此形成了平面晶;随着距熔池底部距离增大,温度梯度减小,结晶速率增大,结晶形态发生改变。随着焊接速度的降低,冷却速率降低,结晶速率也降低,故平面晶得到更充分的发展,同时胞状晶也得到充分发展成为柱状或胞状树枝晶。对比可知:低电流下堆焊层截面近表面的组织以胞状晶和胞状树枝晶为主,随着焊接速度的降低,晶粒向胞状晶发展;高电流下堆焊层组织以胞状树枝晶为主,随着焊接速度的降低,晶粒变得粗短。这是由于低电流时

冷却速率快,液相温度以上的停留时间缩短,不利于胞状树枝晶的发展;随着焊接速度的降低,近表面层冷却速率减慢,平行于焊接方向的散热速率逐渐与垂直于表面由内至外的散热速率接近,晶粒不再由内至外生长,而是朝各个方向均匀生长。

### 2.3 多道多层堆焊层组织和硬度

由图5可知,3层10道堆焊层连续、致密,并且与基材结合良好,未发现明显的孔洞、裂纹等缺陷。

由图6和表2可知:3层10道堆焊层搭接界面存在不同方向的树枝晶,这与多道搭接过程中最快散

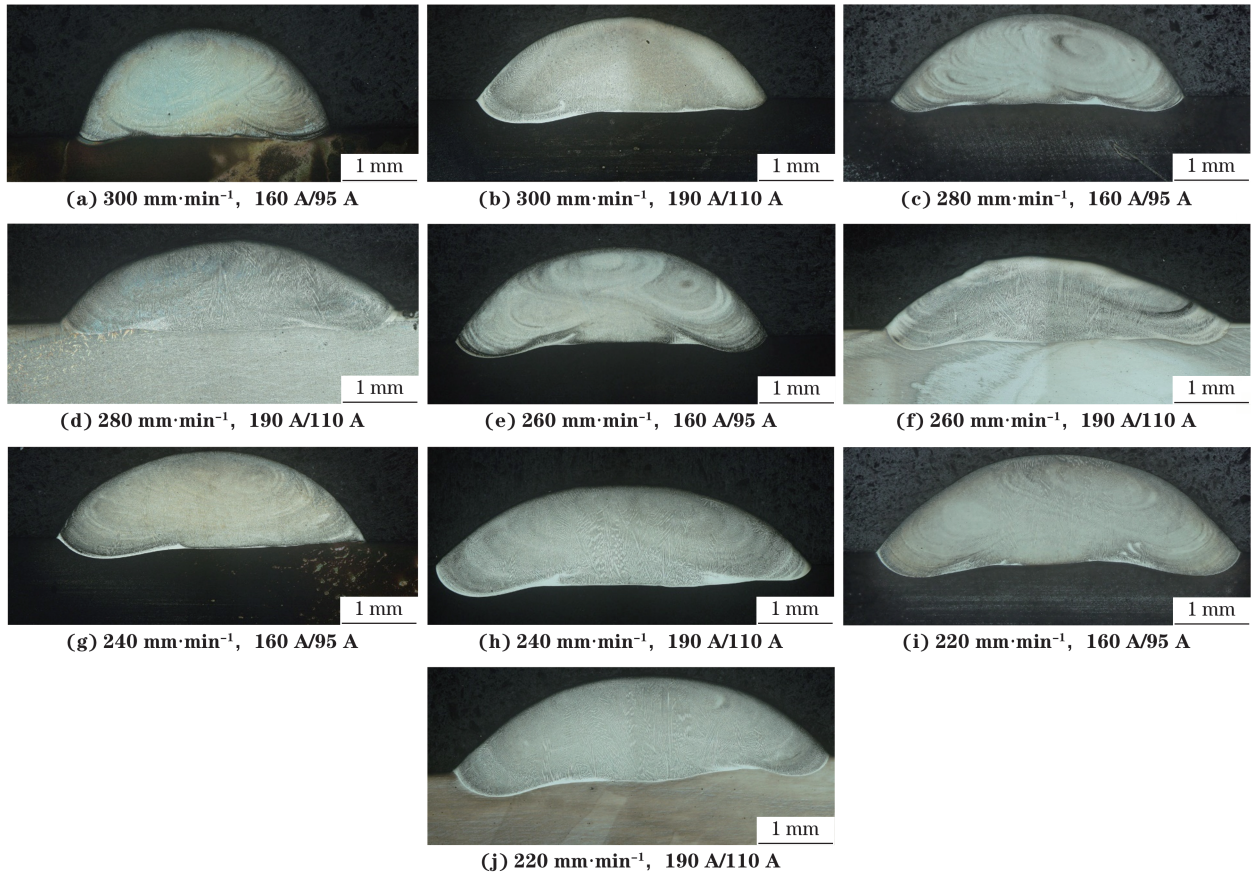


图2 不同焊接速度、不同峰值/基值电流条件下堆焊层截面的 OM 形貌

Fig. 2 OM morphology of cladding layer cross-section under different welding speeds and different peak/base currents

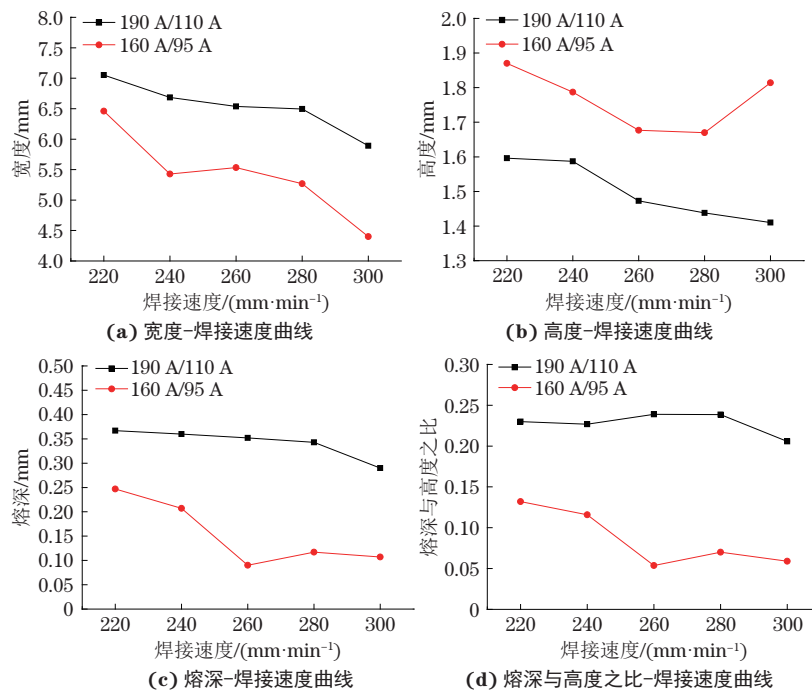


图3 不同焊接电流下堆焊层宽度、高度、熔深以及熔深与高度之比随焊接速度的变化曲线

Fig. 3 Width (a), height (b), depth of fusion (c) and ratio of depth of fusion to height (d) vs welding speed curves of cladding layer

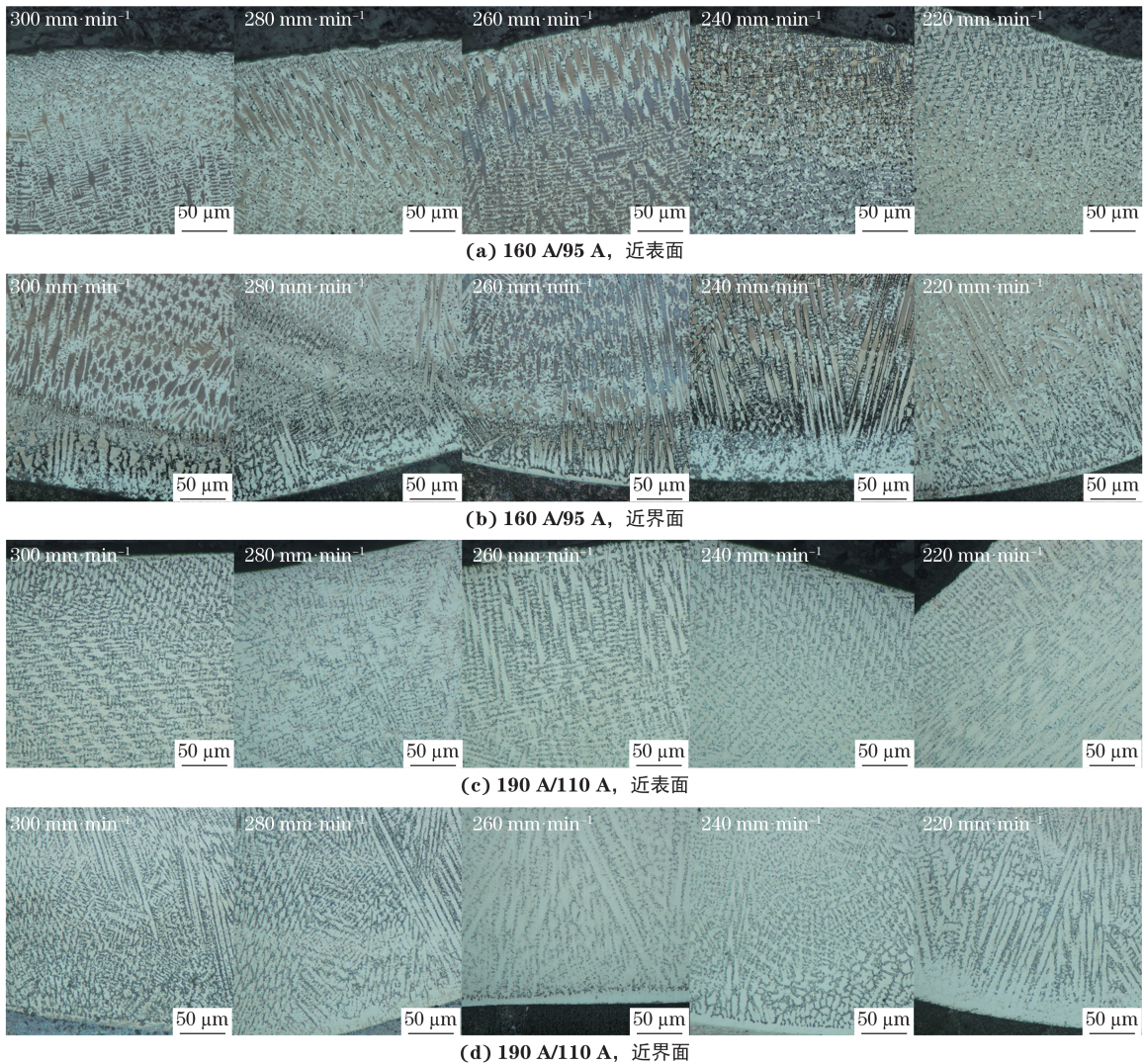


图4 不同焊接电流、不同焊接速度下堆焊层截面近表面和近界面处的显微组织

Fig. 4 Microstructure near surface (a, c) and near interface (b, d) of cladding layer cross-section under different welding currents and different welding speeds

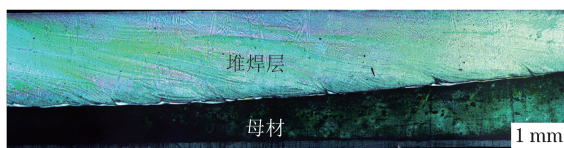


图5 3层10道堆焊层试样截面的OM形貌

Fig. 5 OM morphology of cross-section of three-layer ten-pass cladding layer specimen

热方向有关;堆焊层/基材界面存在连续的平面晶中间层,在堆焊层一侧主要为柱状晶或树枝晶,并且堆焊层一侧组织中存在较多的析出物;由基材向堆焊层方向,铁元素的质量分数由位置1处的86.55%下降到位置6处的8.09%,而其他合金元素的含量增加,其中镍元素含量增长最快;堆焊层中存在白色颗粒状物质(位置5),经过EDS分析可知该白色颗粒状物质富含铌和钼,推测为Laves相<sup>[15]</sup>。

由图7可知:3层10道堆焊层截面近表面处的硬度较高(大于280 HV),随着深度的增加,硬度先降低(低于250 HV)后升高;从堆焊层/基材界面到热影响区的硬度不断提高(大于300 HV)。堆焊层显微硬度在 $(280 \pm 20)$  HV,硬度较高且分布不均匀,后续需要进行退火处理。由图8可知,热影响区在快速冷却的过程中产生了较多的板条马氏体组织,故该区域的显微硬度增加。

### 3 结论

(1)随着焊接速度的增加,低电流条件下堆焊层的宽度和熔深降低,高度及熔深与高度之比先降后升,熔深与高度之比的最大降幅达16%。低电流条件下堆焊层的宽度、熔深及熔深与高度之比低于高电流条件下,堆焊层高度高于高电流条件下。低电

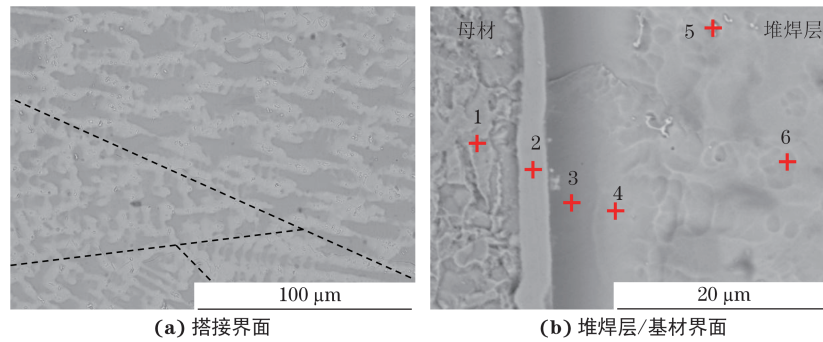


图6 3层10道堆焊层搭接界面和堆焊层/基材界面的SEM形貌

Fig. 6 SEM morphology of overlap interface (a) and cladding layer/base metal interface (b) of three-layer ten-pass cladding layer

表2 图6中不同位置的EDS分析结果

Table 2 EDS analysis results of different positions shown in Fig. 6

位置	质量分数/%					
	Fe	Ni	Cr	Mo	Nb	O
1	86.55	5.61	3.41	0.47		3.96
2	72.32	16.55	5.70	1.26		4.16
3	46.95	21.98	22.26	1.97		6.84
4	41.72	22.53	28.58	1.17		6.00
5	4.81	55.42	19.89	7.23	12.65	
6	8.09	56.44	20.52	7.74	3.73	3.49

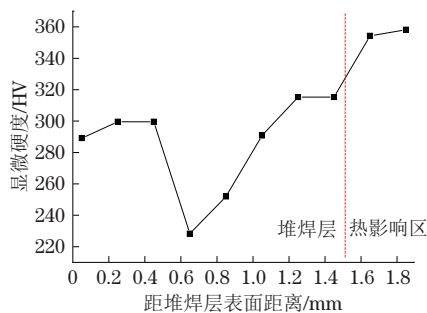


图7 3层10道堆焊试样截面显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution on cross-section of three-layer ten-pass cladding sample

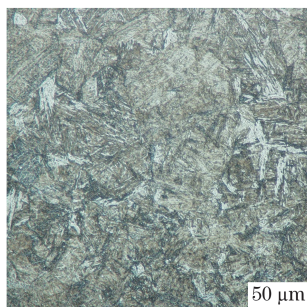


图8 3层10道堆焊试样热影响区的显微组织

Fig. 8 Microstructure of heat affected zone of three-layer ten-pass cladding sample

流、低焊接速度可获得窄且高, 稀释率低的堆焊层。

(2) 低电流条件下堆焊层截面近熔池底部界面的组织以平面晶为主, 远离熔池底部的组织以胞状晶、胞状树枝晶为主, 近表面的组织以胞状晶和胞状树枝晶为主; 随着焊接速度的降低, 近熔池底部界面的平面晶区范围逐渐扩大, 远离熔池底部的胞状晶长度增加, 并向柱状晶或胞状树枝晶发展, 近表面的晶粒向胞状晶发展。

(3) 在峰值/基值电流160 A/95 A、焊接速度 $240 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和搭接率30%条件下制备的3层10道堆焊层连续、致密且界面无裂纹, 显微硬度在 $(280 \pm 20) \text{ HV}$ , 堆焊后需要进行退火处理以降低硬度。

#### 参考文献:

- [1] SANDHU S S, SHAHI A S. Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 1-8.
- [2] CARROLL B E, OTIS R A, BORGONIA J P, et al. Functionally graded material of 304L stainless steel and Inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 46-54.
- [3] ZHANG M, ZHU Z Y, ZHANG L S, et al. Understanding microstructure evolution and corrosion behavior of wire arc cladding Inconel 625 superalloy by thermodynamic approaches[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169530.
- [4] HE K, DONG L J, WANG Q Y, et al. Comparison on the microstructure and corrosion behavior of Inconel 625 cladding deposited by tungsten inert gas and cold metal transfer process[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 435: 128245.
- [5] HUANG J K, LIU S E, YU S R, et al. Cladding Inconel

- 625 on cast iron via bypass coupling micro-plasma arc welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 106-115.
- [6] NAGHIYAN FESHARAKI M, SHOJA-RAZAVI R, MANSOURI H A, et al. Evaluation of the hot corrosion behavior of Inconel 625 coatings on the Inconel 738 substrate by laser and TIG cladding techniques[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 744-753.
- [7] WANG X Y, LIU Z D, LI J Y, et al. Effect of heat treatment on microstructure, corrosion resistance, and interfacial characteristics of Inconel 625 laser cladding layer[J]. *Optik*, 2022, 270: 169930.
- [8] 李继红, 郭钊, 李保铃, 等. Inconel 625合金激光熔覆过程中显微组织演变的数值模拟[J]. *机械工程材料*, 2023, 47(7): 97-103.
- LI J H, GUO Z, LI B L, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of Inconel 625 alloy during laser cladding[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2023, 47(7): 97-103.
- [9] PRAVIN KUMAR N, SIVA SHANMUGAM N. Some studies on nickel based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process[J]. *Wear*, 2020, 456: 203394.
- [10] 郭龙龙. 脉冲TIG堆焊Inconel 625工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- GUO L L. Study on process, microstructure and performance of Inconel 625 cladding layer deposited using pulsed TIG [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [11] 王匀, 陈英箭, 许桢英, 等. 小孔内壁热丝TIG堆焊Inconel 625参数优化研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(19): 1-4.
- WANG Y, CHEN Y J, XU Z Y, et al. Study on parameters optimization of hot-wire TIG cladding Inconel 625 on small hole surface[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(19): 1-4.
- [12] 何江里, 王厚昕, 周海, 等. 焊接热输入对新型低Mn微Nb钢CGHAZ组织及冲击韧性的影响[J]. *上海金属*, 2022, 44(5): 6-12.
- HE J L, WANG H X, ZHOU H, et al. Effect of welding heat input on microstructure and impact toughness of CGHAZ in a novel low-manganese niobium-microalloyed steel[J]. *Shanghai Metals*, 2022, 44(5): 6-12.
- [13] RAFIEI J, GHASEMI A R. Development of thermo-mechanical simulation of WC/Inconel 625 metal matrix composites laser cladding and optimization of process parameters[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 198: 108883.
- [14] CASANUEVA R, BRAÑAS C, DIAZ F J, et al. Characterization of an energy efficient pulsed current TIG welding process on AISI 316 and 304 stainless steels[J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): e19819.
- [15] AMIRI V, NAFFAKH-MOOSAVY H. Microstructural study of additively-manufactured carbon steel-stainless steel 316L-Inconel 625 functionally graded material: Simulation and experimental approaches[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 1164-1170.

## Effects of Process Parameters on Formability and Microstructure of Inconel 625 Alloy by Hot Wire Pulsed TIG Welding

CAI Jun<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nantong Open University, Nantong 226006, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Inconel 625 alloy cladding layer was prepared on AISI 4130 steel surface by hot-wire tungsten inert gas (TIG) welding under a low current (peak/base currents of 160 A/95 A) and different welding speeds (220–300 mm · min<sup>-1</sup>). The effects of welding current and welding speed on the formability and microstructure of the cladding layer were investigated, and compared with those at a high current (peak/base currents of 190 A/110 A). The results show that at the low current, with the increase of welding speed, the width, depth of fusion of the cladding layer decreased, and the height and the ratio of depth of fusion to height of the cladding layer first decreased and then increased. The width, depth of fusion and the ratio of depth of fusion to height of the cladding layer at the low current were lower than those at the high current, and the height was higher than that at a high current. Low current and low welding speed could obtain the narrow and high cladding layer with low dilution rate. At the low current, cellular crystals and dendritic crystals were mainly formed near the surface and away from the bottom of the molten pool on the cross-section of the cladding layer, and planar crystals were dominant at the bottom of the molten pool. With the decrease of welding speed, the planar crystal region expanded, the grains near the surface developed into columnar or dendritic crystals, and the grains away from the bottom of the molten pool developed into cellular crystals. Under 160 A/95 A peak/base current, 240 mm · min<sup>-1</sup> welding speed and 30% bonding rate, the three-layer ten-pass cladding layer was continuously dense and the microhardness was (280 ± 20) HV. After cladding welding, annealing treatment was required to reduce the hardness.

**Key words:** Inconel 625 alloy; TIG cladding; microstructure; microhardness; process optimization