

Inconel 625 合金 TIP-TIG 堆焊涂层工艺及组织性能

张 真, 王晓军, 马继国, 陈 龙
(兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 采用 TIP-TIG(以下简称 TT)焊技术在 316L 不锈钢基材表面堆焊 Inconel 625 镍基合金涂层。选取焊接电流、焊接速度、送丝速度 3 种关键焊接工艺参数,通过正交试验设计开展堆焊试验,以焊缝稀释率为核心评价标准,优化确定最佳焊接工艺参数。采用金相显微镜观察分析最佳工艺下焊接接头的组织特征,通过拉伸试验、维氏硬度试验测试其力学性能,并通过 600 ℃三元氯化物熔盐腐蚀试验,结合扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)等表征手段,系统评定堆焊涂层试样与基材的耐蚀性。结果表明:当焊接电流为 150 A、焊接速度为 2 mm/s、送丝速度为 3.13 m/min 时,堆焊涂层试样综合性能最优;316L 基材的抗拉强度和断后伸长率分别为 633.50 MPa 和 55.90%,而堆焊涂层试样分别为 751.90 MPa 和 50.20%;焊接接头堆焊涂层的硬度(219.60 HV)最大,母材(174.30 HV)次之,热影区(155.10 HV)最小;在 600 ℃三元氯化物熔盐中腐蚀后,基材的平均腐蚀速率为 17.75 mm/a,堆焊涂层试样的平均腐蚀速率仅为 3.35 mm/a,约为基材的 1/5。

关键词: TIP-TIG 焊;堆焊工艺参数;Inconel 625 合金;氯化物熔盐;微观组织;力学性能;耐蚀性

中图分类号: TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2026)03-0001-08

随着现代工业的快速发展,化石燃料的大量消耗引发了严峻的环境污染问题,为应对全球气候变化挑战,“双碳”目标被正式提出,可再生能源的开放与利用成为能源领域的发展核心^[1]。太阳能作为一种清洁、可再生的能源,其发电技术主要分为光伏发电和光热发电两大类。相较于光伏发电,光热发电具有储能成本低、发电系统运行稳定等优势,是实现连续供电的优选方案^[2]。

目前,太阳能光热发电系统中广泛应用的储能介质主要为二元硝酸盐和三元硝酸盐^[3]。然而,这两种硝酸盐体系存在熔解热小、热导率低等固有缺陷,且仅能在 600 ℃以下保持热稳定性,难以满足下一代太阳能光热发电系统对 600~900 ℃高温储能介质的需求,限制了发电效率的进一步提升。

氯化物熔盐凭借价格低廉、密度大、沸点高、饱和蒸汽压力低、热稳定性好等突出特点,成为下一代高温储能介质的理想候选材料。我国西部地区,尤其是青海省拥有丰富的盐湖资源,为氯化物熔盐的规模化应用提供了充足的原料保障^[4]。但

氯化物熔盐具有极强的腐蚀性,在高温运行条件下会对光热发电系统中的金属部件造成严重腐蚀,因此,储能材料的耐蚀性设计成为该领域亟待解决的关键技术难题^[5]。

Inconel 625(镍基)合金具备优异的耐蚀性,特别是对氯离子的抗腐蚀能力突出,但高昂的成本极大地限制了其在工程中的大规模应用。表面改性技术作为一种成本低且能有效改善基材表面性能的方法,为这一问题提供了有效解决方案。堆焊技术因能实现涂层与基材良好的冶金结合,成为常用的表面改性技术之一^[6]。基于此,笔者采用优质高效的热丝钨极氩弧 TIP-TIG(以下简称 TT)焊技术,开展 Inconel 625 合金在 316L 不锈钢基材(以下简称 316L 基材)上的堆焊工艺研究,通过正交试验优化工艺参数,系统分析最佳堆焊涂层的显微组织、力学性能及耐氯化物熔盐腐蚀性能,以期为其在太阳能光热发电系统高温部件中的应用提供理论依据与技术支撑。

1 试 验

1.1 试验材料

本试验选用 316L 不锈钢作为基材,尺寸为 250 mm×200 mm×10 mm,主要化学成分如表 1 所

收稿日期:2023-09-13

通信作者:王晓军(1970—),副教授,博士,研究方向为先进镍基合金及其焊接技术等,13993132239,2890768649@qq.com

示。堆焊所用焊丝为 ERNiCrMo-3(Inconel 625)合金,直径 1.0 mm,化学成分如表 2 所示。为确保焊接质量,焊接前对基材表面进行打磨处理,去除氧化皮与杂质,随后用丙酮溶液清洗表面油污,晾干后备用。

表 1 316L 不锈钢化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 316L stainless steel

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	N	Mo	P	S	Fe
质量分数/%	0.017	0.38	1.06	16.09	10.05	0.51	0.045	2.06	0.044	0.005	余量

表 2 ERNiCrMo-3 合金化学成分

Tab. 2 Chemical composition of ERNiCrMo-3 alloy

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Fe	Mo	Nb+Ta	S	P
质量分数/%	0.005	0.08	0.03	22.15	64.58	0.001	0.09	9.11	3.69	0.001	0.001

1.2 焊接工艺

TT 焊的核心工艺参数包括热丝电流 I_H 、焊接电流 I 、焊接速度 v 、送丝速度 v_F ,这些参数直接影响焊缝几何形状、稀释率及焊接缺陷的产生。采用正交试验法优化工艺参数,在预试验基础上,确定热丝电流保持 70 A 不变,选取焊接电流(A)、送丝速度(B)、焊接速度(C)为试验因素,每个因素设置 3 个水平,采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验设计,因素水平如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平表

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	焊接电流(A)/ A	送丝速度(B)/ ($m \cdot min^{-1}$)	焊接速度(C)/ ($m \cdot s^{-1}$)
1	150	2.47	1.60
2	160	2.80	2.00
3	170	3.13	2.40

预试验结果显示:当焊接电流为 120 A 时,由于热输入量不足,焊丝无法充分熔化,焊缝成形差、不连续[图 1(a)];当送丝速度为 2.14 m/min 时,焊丝填充量不足,熔敷层在基材表面分布不均,难以形成有效的堆焊涂层[图 1(b)]。因此,正式试验中适当提高了焊接电流与送丝速度,以保证焊丝充分熔敷并形成连续均匀的焊缝。

焊接过程中,采用夹具将试样固定在工作台上,调整钨极与工件距离为 2 mm,钨极与焊丝距离为 1.5 mm,保护气体选用纯氩气,流量为 12 L/min,设置提前进气 0.1 s、延迟停气 2.0 s,以避免焊缝金属被氧化。每道焊缝焊接完成后,自然冷却至层温不超过 100 $^{\circ}C$,并清理焊缝表面杂质后再进行下一道焊缝焊接,最终堆焊两层,涂层总厚度为 4~5 mm,得到堆焊涂层试样。

1.3 性能测试与微观表征

1.3.1 稀释率计算

堆焊试验完成后,对涂层表面进行渗透检测,未

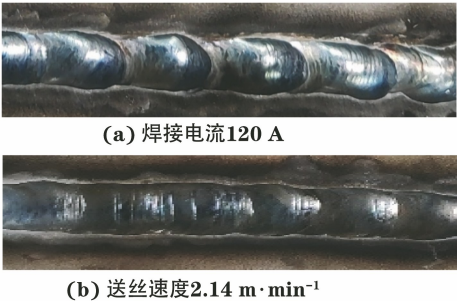


图 1 焊接电流 120 A 和送丝速度 2.14 m/min 时的焊缝形貌
Fig. 1 Weld morphology at welding current of 120 A (a) and wire feed rate of 2.14 m/min (b)

发现未熔合、气孔等明显焊接缺陷,堆焊涂层截面形貌如图 2 所示。采用稀释率 θ 作为堆焊涂层性能的核心评价指标,稀释率越小,表明堆焊效率越高,涂层性能越接近合金焊丝性能。稀释率计算示意如图 3 所示,计算公式如式(1)所示,其中 A_w 为基材熔合区面积, A 为堆焊涂层熔敷金属面积, a 为堆焊涂层最大高度, H 为基材表面的基准线, B 为堆焊涂层在基材表面的宽度。

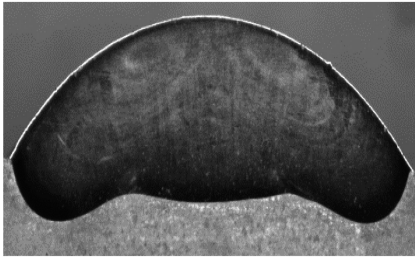


图 2 堆焊涂层截面形貌
Fig. 2 Cross-sectional morphology of overlay coating

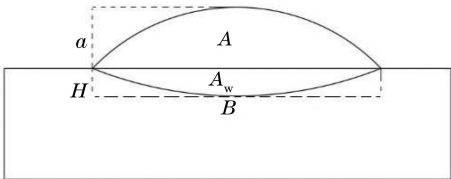


图 3 稀释率计算示意
Fig. 3 Schematic diagram of dilution rate calculation

$$\theta=\frac{A_w}{A_w+A}\tag{1}$$

1.3.2 组织观察

从正交试验样品的焊接接头截取金相试样,经过研磨、抛光处理后,采用王水(HCl+HNO₃)溶液腐蚀,利用金相显微镜观察焊接接头各区域的组织,明确堆焊涂层、热影响区及基材的组织特征。

1.3.3 力学性能测试

按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》标准制备拉伸试样,在常温下进行拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min,测试基材与堆焊涂层试样的抗拉强度及断后伸长率,并观察拉伸断裂位置。按照 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》标准,采用维氏硬度计对焊接接头进行硬度测试,试验载荷为 4.9 N,保载时间为 15 s,沿焊接接头横截面从基材到堆焊涂层表面进行连续硬度测量,绘制硬度分布曲线。

1.3.4 熔盐腐蚀试验

采用熔盐腐蚀试验评价材料的耐蚀性。分别从基材和堆焊涂层试样表面截取尺寸为 15 mm×10 mm×2 mm 的标准试样,打磨去除表面切割痕迹与氧化物,用丙酮清洗后烘干,采用精度为 0.01 mg 的电子天平称量记录初始质量。

腐蚀介质为三元氯化物熔盐,由分析纯无水 NaCl、MgCl₂ 和 KCl 按照质量分数分别为 24.5%、55%、20.5%的配比组成^[7]。先将熔盐原料在 70 ℃下烘干 30 min,去除水分后混合均匀,与试样一同放入烘干后的坩埚中,用高温密封胶密封以隔绝空气,随后将坩埚放入电阻炉中,在 600 ℃下保温 50 h 进行腐蚀试验。

腐蚀试验结束后,将试样取出并放入沸水中清洗表面残留熔盐,烘干后称量记录腐蚀后质量,计算腐蚀速率。采用扫描电子显微镜(SEM)观察腐蚀后试样表面形貌,通过 X 射线衍射仪(XRD)分析腐蚀产物的物相组成,结合能谱仪(EDS)分析腐蚀产物的元素分布特征。

2 结果与讨论

2.1 堆焊工艺参数优化

采用极差分析法对正交试验结果进行处理,极差 R 的计算公式如式(2)所示,R 越大表明该因素对试验指标的影响越显著^[8]。

$$R=\max(K_i)-\min(K_i)\tag{2}$$

式中:K_i 为某一系列上水平号为 i 时对应的试验结果

之和。

正交试验结果如表 4 所示。由表中数据可知,各因素对稀释率的影响主次顺序为:焊接电流(A)、焊接速度(C)、送丝速度(B)。由于试验以稀释率最小化为优化目标,因此选取各因素水平中对应稀释率最小值的组合作为最优堆焊工艺参数,即 A₁B₃C₃,具体参数为:焊接电流 150 A、送丝速度 3.13 m/min、焊接速度 2.0 mm/s。采用该工艺进行堆焊,获得的涂层表面成形良好、平整光滑,无明显缺陷(图 4)。

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Orthogonal test results

试验号	A	误差列	B	C	焊缝形貌	稀释率/%
1	1	1	1	1		19.89
2	1	2	2	2		21.90
3	1	3	3	3		12.13
4	2	3	1	2		42.37
5	2	1	2	3		26.69
6	2	2	3	1		18.37
7	3	2	1	3		28.10
8	3	3	2	1		35.92
9	3	1	3	2		37.48
K ₁	53.11	84.06	90.35	74.17		
K ₂	87.43	68.37	84.51	101.75		
K ₃	101.49	90.41	67.98	66.91		
R	48.39	22.03	22.37	34.84		



图 4 最优工艺条件下堆焊涂层表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of the overlay coating under optimal process parameter conditions

2.2 组织形貌

2.2.1 纵截面显微组织

焊接接头纵截面的显微组织如图 5 所示,可清晰观察到堆焊涂层、热影响区和母材三个特征区域,熔合区无明显缺陷,表明堆焊涂层与基材形成了良好的冶金结合。

图 5(a)为熔合区,是焊缝与热影响区的过渡区域,其范围较窄。焊接过程中,母材边界发生不均匀

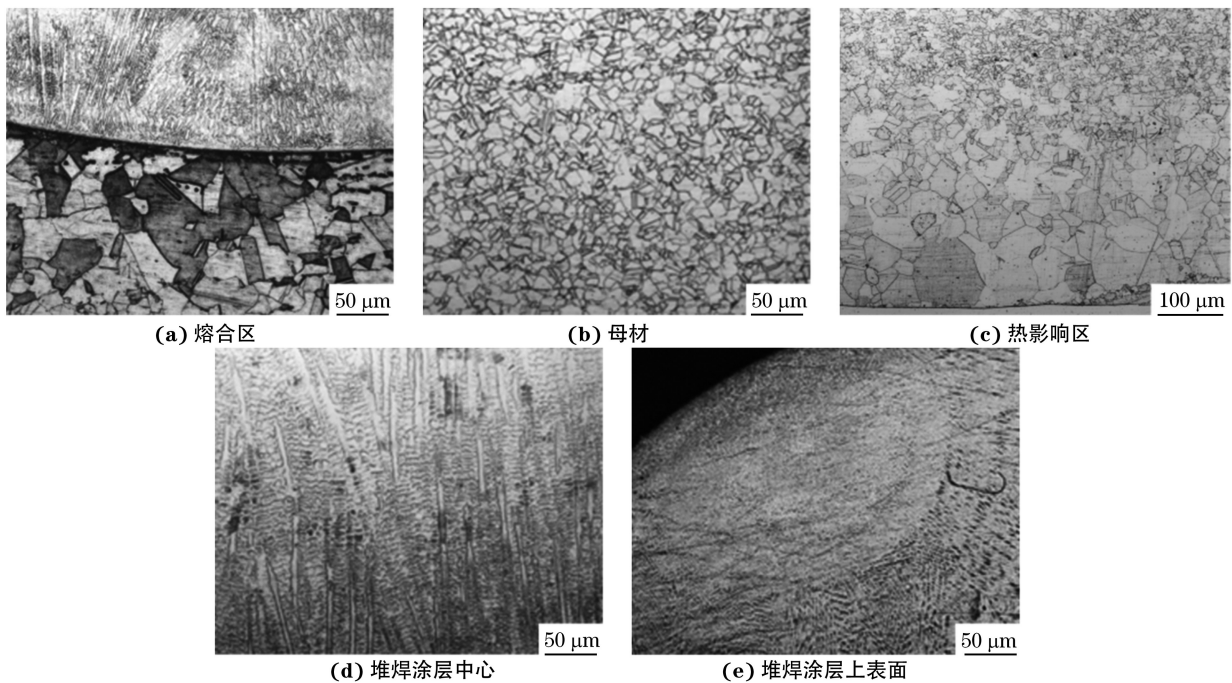


图 5 焊接接头纵截面的显微组织

Fig.5 Microstructure of the longitudinal section of the welded joint: (a) bond area; (b) substrate; (c) heat-affected zone; (d) center of overlay coating; (e) surface of overlay coating

熔化,形成局部熔化和未熔化区域,在图中可清晰辨识熔合线。图 5(b)为 316L 母材组织,呈现典型的奥氏体不锈钢组织特征。图 5(c)为热影响区,图中下半部分为过热区,焊接加热时该区域温度达到 1 100~1 490 ℃,处于过热状态,奥氏体晶粒急剧长大,冷却后形成粗大的组织;上半部分为不完全重结晶区,焊接时温度范围为 750~900 ℃,仅部分组织发生相变重结晶,形成细小晶粒,另一部分未重结晶的组织仍保留粗大晶粒形态。图 5(d)为堆焊涂层中心区域,呈现明显的枝晶组织特征,这是由于焊接过程中熔池与基材接触,热量沿熔合界面向基材快速传导,形成较大温度梯度,枝晶沿温度梯度较大的方向快速生长。图 5(e)为堆焊涂层上表面,与空气直接接触,过冷度大、冷却速度快,晶粒无法长大,形

成细小的等轴晶区。

2.2.2 横截面显微组织

焊接接头横截面的显微组织如图 6 所示。图 6(a)显示,各焊缝之间呈现明显的树枝晶组织特征,树枝晶沿最快冷却速度方向生长,因此与熔合线垂直。图 6(b)为堆焊涂层边缘区域,由于该区域与空气直接接触,过冷度大、冷却速度快,晶粒生长受到抑制,形成明显的细小等轴晶组织,与纵截面涂层上表面的组织特征一致。

2.3 力学性能

2.3.1 拉伸性能

基材及堆焊涂层试样的应力-应变曲线如图 7 所示。测试结果表明:316L 基材的平均抗拉强度为 633.50 MPa,平均断后伸长率为 55.90%;而堆焊涂

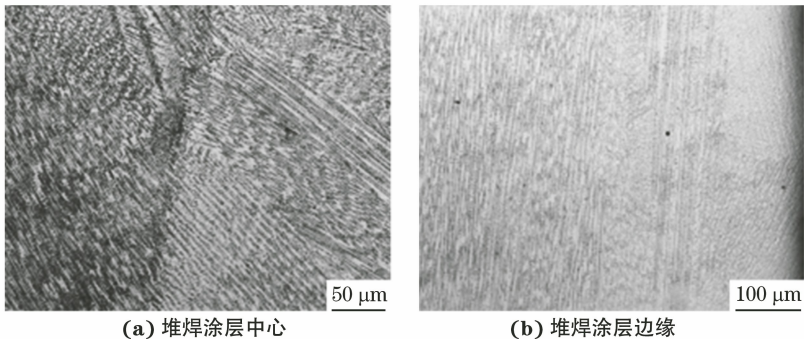


图 6 焊接接头横截面的显微组织

Fig.6 Microstructure of the cross section of the welded joint: (a) center of overlay coating; (b) edge of overlay coating

层试样的平均抗拉强度为 751.90 MPa,相较于基材提高了 18.70%,平均断后伸长率为 50.20%,相较于基材降低了 10.20%。

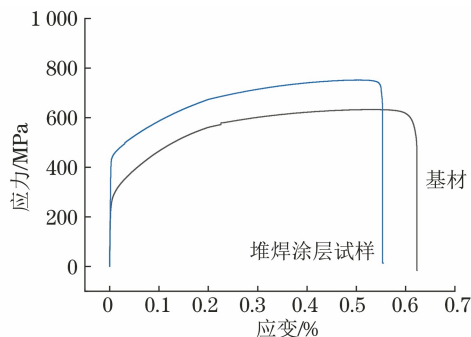


图 7 基材及堆焊涂层试样的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of base material and overlay coating sample

2.3.2 硬度

由图 8 可知,基材的平均硬度为 174.30 HV,热影响区的平均硬度为 155.10 HV,堆焊涂层的平均硬度为 219.60 HV。堆焊涂层硬度高于母材,主要是因为 Inconel 625 合金本身含有 Cr、Mo、Nb 等强化元素,且涂层组织中存在细晶强化效应,尤其是涂层最上层的细小等轴晶区域,细晶强化效应最明显;涂层中部等轴树枝晶与一次树枝晶混合分布,组织均匀性较好,因此硬度分布相对平稳;涂层底部靠近熔合区的位置,晶粒相对粗大,硬度略有下降。热影响区的硬度低于基材,这是因为焊接过程中熔池的高温作用导致该区域晶粒长大,同时固溶相析出,使得硬度降低。整体来看,焊接接头的硬度分布连续且过渡平稳,无明显突变,表明涂层与基材的冶金结合质量良好。

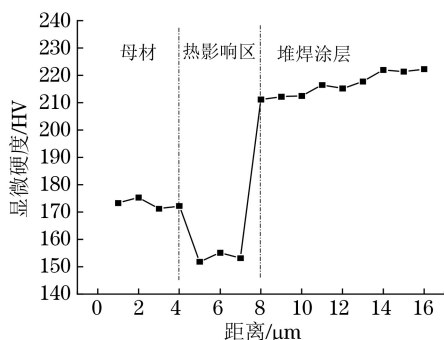


图 8 焊接接头的显微硬度分布曲线

Fig. 8 Microhardness distribution curve of the welded joint

2.4 耐蚀性

2.4.1 腐蚀速率

基材及堆焊涂层试样在 600 °C 三元氯化物熔盐中浸泡 50 h 后的腐蚀速率如图 9 所示。两种试样在腐蚀试验后均出现明显的质量损失,但腐蚀速率

差异显著。316L 基材的腐蚀速率随时间延长急剧增长,50 h 时腐蚀速率达到 17.75 mm/a;而堆焊涂层试样的腐蚀速率增长趋势较缓,50 h 时腐蚀速率为 3.35 mm/a。需要说明的是,本试验腐蚀时间为 50 h,未达到金属在该熔盐环境中的腐蚀稳定阶段,因此测得的腐蚀速率相对较高,但这已能明确反映两种试样的耐蚀性差异,堆焊涂层试样的腐蚀速率约为基材的 1/5。

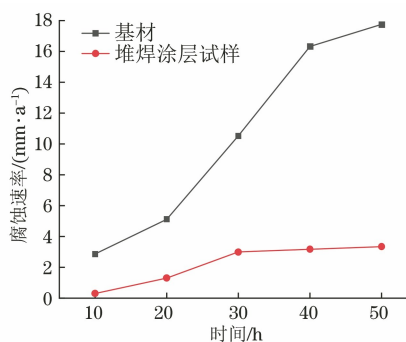


图 9 基材及堆焊涂层试样在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀 50 h 后的腐蚀速率

Fig. 9 Corrosion rates of base material and overlay coating sample after corrosion in ternary chloride molten salt at 600 °C for 50 h

2.4.2 腐蚀产物物相

堆焊涂层试样与基材在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀 50 h 后的 XRD 谱如图 10 所示。腐蚀前,堆焊涂层试样和 316L 基材均出现基体相 $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{Co}_{0.06}$ 。腐蚀 50 h 后,基材表面腐蚀产物的主要物相为 MgO 、 FeO 、 MgCr_2O_4 ,这与基材中 Fe 含量较高、Ni 和 Cr 含量相对较低的化学成分特征相关;而堆焊涂层试样表面腐蚀产物的主要物相为 CrO 、 NiO 和 NiCr_2O_4 ,这是由于 Inconel 625 合金中 Ni、Cr 元素含量显著高于 316L 不锈钢,在腐蚀过程中优先发生氧化反应生成相应氧化物。

2.4.3 腐蚀表面形貌与元素分布

图 11 为基材表面腐蚀形貌及 EDS 扫描结果。由图 11(a)可见,表面腐蚀层呈现明显的双层结构,其形成机制为:试样在氯化物熔盐环境中腐蚀至一定阶段后,初始生成的腐蚀产物会逐渐变得疏松、开裂并最终剥落;而在第一层腐蚀产物出现疏松、开裂缺陷时,基体金属会重新与氯化物熔盐发生化学反应,形成新的腐蚀产物层,进而构成双层结构腐蚀产物。图 11(b)、(c)所示为外层腐蚀产物,可观察到腐蚀产物从疏松到致密的演化过程,且伴随明显的腐蚀开裂现象,表明该阶段腐蚀反应较为剧烈。图 11(d)为内层腐蚀产物层,其由细小的晶粒构成,可对基体起到一定的防护作用。EDS 扫描结果显示,试

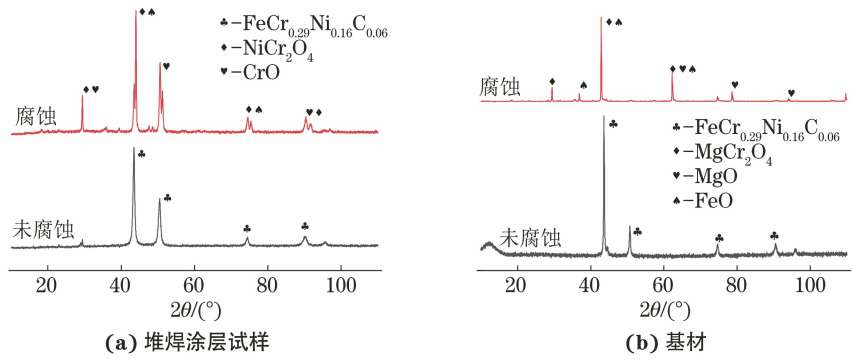


图 10 堆焊涂层试样与基材在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀后的 XRD 谱

Fig.10 XRD patterns of overlay coating sample (a) and base material (b) after corrosion in ternary chloride molten salt at 600 °C

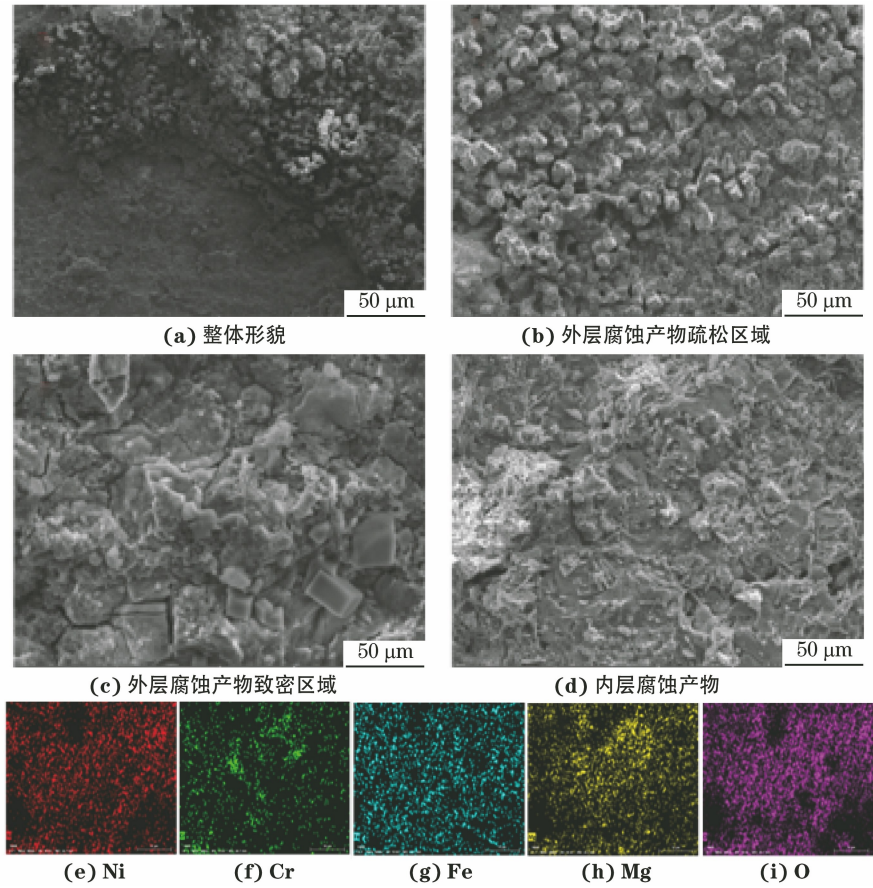


图 11 基材在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀后的表面 SEM 形貌和 EDS 扫描结果

Fig.11 Surface SEM morphology (a—d) and EDS scanning results (e—h) of base material after corrosion in ternary chloride molten salt at 600 °C

样表面腐蚀层中富集 Mg、O 及 Fe 等元素，且元素富集区域与形貌观察中发现的尖晶石结构位置相对应，同时与 XRD 检测确定的 MgO、FeO、MgCr₂O₄ 等物相相一致。上述腐蚀产物均匀覆盖在基材表面，其中部分腐蚀产物具有高热稳定性和致密结构，使得 316L 基材在熔盐环境中具备一定的耐蚀性。

图 12 所示为堆焊涂层试样表面腐蚀形貌及 EDS 扫描结果。低倍镜下观察，试样表面整体较为

平整；放大可见部分区域已发生腐蚀反应，生成细小且不规则的腐蚀产物。EDS 分析表明，腐蚀区域富集 Cr、Mg、O、Ni 等元素，与 XRD 检测出的 CrO、NiO 和 NiCr₂O₄ 等物相完全对应。

综上，Ni、Cr 元素形成的氧化物薄膜相较于 Fe 元素形成的氧化物薄膜，具有更优异的抗氯化物熔盐腐蚀性能，这是堆焊涂层试样耐蚀性优于 316L 基材的核心原因。

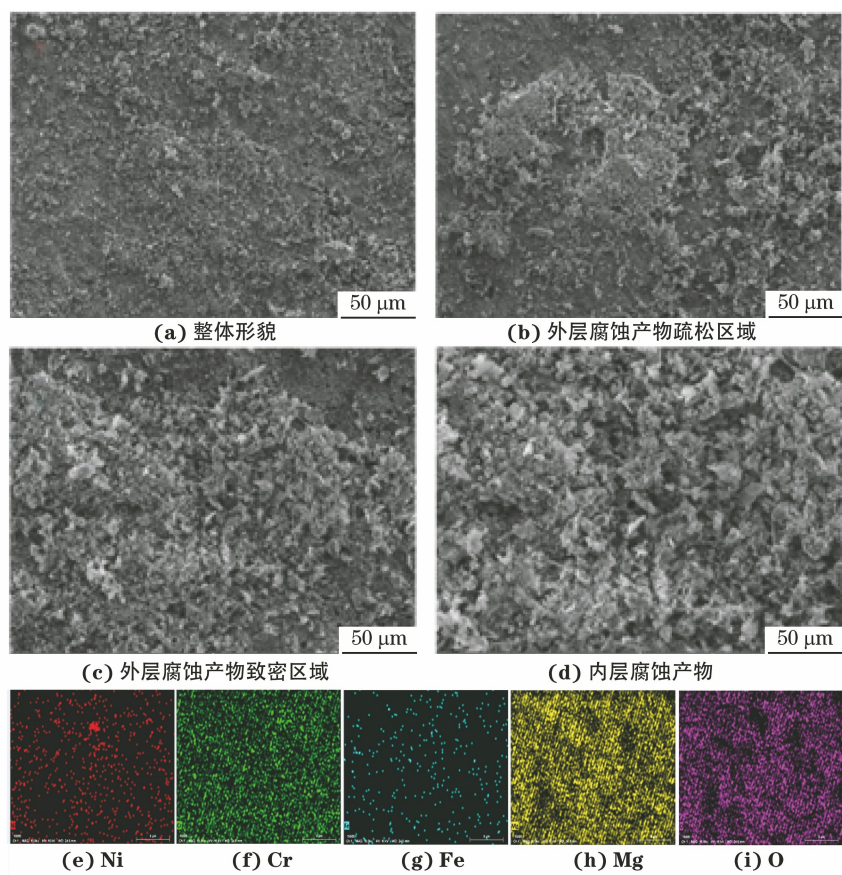


图 12 堆焊涂层试样在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀后的表面 SEM 形貌和 EDS 扫描结果

Fig. 12 Surface SEM morphology (a—d) and EDS scanning results (e—h) of overlay coating sample after corrosion in ternary chloride molten salt at 600 °C

3 结 论

(1) 通过 $L_9(3^4)$ 正交试验,以稀释率为评价标准,确定了 316L 基材表面 TT 堆焊 Inconel 625 合金涂层的最佳工艺参数:焊接电流 150 A、焊接速度 2 mm/s、送丝速度 3.13 m/min,该参数下获得的堆焊涂层表面成形良好,无明显焊接缺陷。

(2) 焊接接头由堆焊涂层、热影响区及母材三部分组成,熔合区无缺陷,形成良好冶金结合。堆焊涂层中心为枝晶组织,上表面及边缘为细小等轴晶;热影响区分为过热区(粗大晶粒)和不完全重结晶区(细晶与粗晶混合);母材为典型奥氏体不锈钢组织。

(3) 堆焊涂层试样的力学性能优于基材:堆焊涂层试样的平均抗拉强度为 751.9 MPa,较基材提高 18.7%;平均断后伸长率为 50.2%,较基材降低 10.2%;焊接接头堆焊涂层的平均硬度为 219.6 HV,高于母材(174.3 HV),热影响区硬度最低,为 155.1 HV。

(4) 在 600 °C 三元氯化物熔盐中腐蚀 50 h 后,

基材的平均腐蚀速率为 17.75 mm/a,堆焊涂层试样的平均腐蚀速率为 3.35 mm/a,约为基材的 1/5,其优异的耐蚀性源于表面形成的致密 Ni、Cr 氧化物保护薄膜。

参考文献:

[1] 白永秀,鲁能,李双媛. 双碳目标提出的背景、挑战、机遇及实现路径[J]. 中国经济评论,2021(5):10-13.
BAI Y X, LU N, LI S Y. The background, challenges, opportunities and realization path of the double carbon target[J]. China Economic Review, 2021(5):10-13.

[2] 陈昕,范海涛. 太阳能光热发电技术发展现状[J]. 能源与环境,2012(1):90-92.
CHEN X, FAN H T. Development status of solar photothermal power generation technology[J]. Energy and Environment, 2012(1):90-92.

[3] 孙汉军,张国兴,徐家德. 硝酸盐类熔盐在太阳能光热发电中的应用[J]. 氮肥技术,2017,38(S1):8-10,17.
SUN H J, ZHANG G X, XU J D. Application of molten nitrate salt on solar thermal power generation[J]. Nitrogenous Fertilizer Technology, 2017,38(S1):8-10, 17.

- [4] 孙华,苏兴治,张鹏,等. 聚焦太阳能热发电用熔盐腐蚀研究现状与展望[J]. 腐蚀科学与防护技术,2017,29(3):282-290.
- SUN H, SU X Z, ZHANG P, et al. Research status and progress of molten salts corrosion for concentrated solar thermal power [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(3):282-290.
- [5] 李俊谊. 几种材料在氯化物储热熔盐中腐蚀行为研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.
- LI J Y. Study on corrosion behavior of several materials in chloride thermal storage molten salts[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [6] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2010.
- XU B S, ZHU S H. Theories and technologies on surface engineering [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press,
- [7] MOHAN G, VENKATARAMAN M, GOMEZ-VIDAL J, et al. Assessment of a novel ternary eutectic chloride salt for next generation high-temperature sensible heat storage [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 167:156-164.
- [8] 朱伟勇. 回归正交设计法[J]. 东北工学院学报, 1976(4):77-90.
- ZHU W Y. Regression orthogonal design method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1976(4):77-90.

Process, Microstructure and Properties of Inconel 625 Alloy TIP-TIG Weld-Overlay Coating

ZHANG Zhen, WANG Xiaojun, MA Jiguo, CHEN Long

(School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Inconel 625 nickel-based alloy was cladded on the surface of 316L stainless steel substrate using TIP-TIG (hereinafter referred to as TT) welding technology. Three key welding process parameters, namely welding current, welding speed, and wire feed speed, were selected. Overlay welding experiments were carried out via orthogonal experimental design, and the optimal welding process parameters were determined and optimized using weld dilution rate as the core evaluation criterion. The microstructure characteristics of the welded joint under the optimal process were observed and analyzed by optical metallographic microscope. Mechanical properties were tested through tensile tests and Vickers hardness tests. Furthermore, the corrosion resistance of the overlay coating and the base material was systematically evaluated by ternary chloride molten salt corrosion tests at 600 °C, combined with characterization methods such as scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometry (XRD). The results show that the overlay coating exhibited the best comprehensive performance when the welding current was 150 A, welding speed was 2 mm/s, and wire feed speed was 3.13 m/min. The tensile strength and elongation after fracture of the 316L base material were 633.50 MPa and 55.90%, respectively, while those of the overlay coating were 751.90 MPa and 50.20%, respectively. The overlay coating of the welded joint exhibited the maximum hardness of 219.60 HV, the substrate ranked second with 174.30 HV, and the heat-affected zone had the minimum hardness of 155.10 HV. After corrosion in ternary chloride molten salt at 600 °C, the average corrosion rate of the substrate was 17.75 mm/a, whereas that of the overlay coating was only 3.35 mm/a, which was about one-fifth of that of the base material.

Key words: TIP-TIG welding; overlay welding process parameter; Inconel 625 alloy; chloride molten salt; microstructure; mechanical property; corrosion resistance