

# 基体表面粗糙度对热丝 TIG 堆焊 Inconel625 组织和耐腐蚀性能的影响

Effect of Surface Roughness of AISI8630 on Microstructure and Corrosion Resistance of Inconel625 Cladding Layer by Using Hot-wire TIG

王 匀,陈英箭,许桢英,唐书浩

(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

WANG Yun, CHEN Ying-jian, XU Zhen-ying, TANG Shu-hao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University,

Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

**摘要:** 基体表面粗糙度对堆焊层组织和性能有着深刻的影响。采用热丝 TIG 在 AISI8630 表面堆焊 Inconel625, 研究基体表面粗糙度对堆焊层组织和耐腐蚀性能的影响。应用 OM, EDS 及 SEM 等对堆焊层的元素分布以及显微组织进行分析, 采用失重法测定堆焊层腐蚀速率。结果表明: 随着基体粗糙度值的减小, 堆焊过程的陷光效应相应减弱, 堆焊稀释率降低。堆焊层中铁元素含量随之减少, 显微组织更加细化, 分布更加均匀。当基体粗糙度值由  $12.5\mu\text{m}$  减小到  $0.4\mu\text{m}$  时, 堆焊层耐腐蚀性能提高 32%。

**关键词:** 粗糙度; 堆焊; 稀释率; 显微组织; 耐腐蚀性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001470

**中图分类号:** TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)07-0094-06

**Abstract:** Surface roughness has a profound influence on the microstructure and properties of cladding layer. Clad Inconel625 on AISI8630 surface by using hot-wire TIG and the effect of surface roughness of AISI8630 on microstructure and corrosion resistance was studied. The microstructure and distribution of Fe element of cladding layer were analyzed by means of optical microscope (OM), energy dispersive spectroscopy (EDS), and scanning electron microscopy (SEM). Mass loss method was carried out to determine the corrosion ratio. The results indicate that with the reduction of surface roughness, the light trapping effect, dilution ratio and Fe content are all reduced and the grains become finer and are distributed more uniformly. When the surface roughness is decreased from  $12.5\mu\text{m}$  to  $0.4\mu\text{m}$ , the corrosion resistance of cladding layer is improved by more than 32%.

**Key words:** roughness; cladding; dilution ratio; microstructure; corrosion resistance

随着油气开采环境的日益恶化,对油气钻采设备的性能要求也越来越高。尤其是近年来对深层、高腐蚀性以及深海油气田的开采,其地质环境非常复杂,工作环境恶劣,对采油树以及节流阀等井口设备的强度以及耐腐蚀性有很高的要求,即材料必须为 HH 级 (API6A)<sup>[1]</sup>。AISI8630 属于低合金高强度钢,具有优异的综合性能,目前越来越多地应用于井口设备中<sup>[2]</sup>。Inconel625 是镍基高温合金,价格较高,为兼顾经济效益,经常和价格相对较低的低碳钢或低合金钢组成双金属复合材料使用。Inconel625 具有优

良的综合性能,包括高温强度、耐腐蚀性、延展性等,被广泛应用于航空航天、石油化工、压力容器等领域<sup>[3-4]</sup>。

陷光效应是指光在进入陷光结构时,在其内部发生一系列的反射、折射和散射,使得光程变长,光子吸收量增加,从而使得陷光结构反射出去的光相应减少,该效应称为陷光效应。陷光结构的形态有很多种,应用不同的手段在表面刻意制造一定数量和形貌的凸起或者凹坑,以增加光程,使光吸收增加。

随着基体表面粗糙度值  $R_a$  的变化,焊接过程中的

陷光效应以及待堆焊表面与电弧的接触面积发生变化,对堆焊过程的热输入以及堆焊层化学成分分布,尤其是对铁元素的分布产生很大影响。而铁元素含量的改变又会直接导致堆焊层耐腐蚀性能的变化<sup>[5-7]</sup>。同时,堆焊过程中的热输入量又深刻影响着堆焊层、热影响区以及结合区的组织和性能。为了得到组织和性能良好的堆焊层,研究粗糙度对堆焊层组织和性能的影响是非常必要的。

国内外学者对于 Inconel625 堆焊的研究已经取得了一定的成果<sup>[8-11]</sup>,但是采用热丝 TIG 堆焊、针对基体表面粗糙度对堆焊层质量影响的研究相对较少。已有研究表明,金属表面粗糙化处理可以大幅增强其对入射光的吸收<sup>[12-14]</sup>。Vorobyev 等<sup>[12]</sup>用激光加工技术在铂金表面制备出微纳粗糙结构,所制备的表面在紫外-红外范围内对光的吸收率达到 95%。Vorobyev 等<sup>[15-16]</sup>还进一步在铂金、钨和钛合金表面用激光制备了微纳结构,同样获得了较好的陷光效果。Yang 等<sup>[17]</sup>利用飞秒激光在 NiTi 合金表面制备不同的微纳结构,其对紫外-红外范围内光的吸收率高达 90%以上。本工作以高含硫化氢的酸性油气田井口耐腐蚀设备制造为背景,采用热丝 TIG 在 AISI8630 表面堆焊 Inconel625 合金,重点研究基体表面粗糙度对堆焊层微观组织、铁元素分布以及耐腐蚀性能的影响。结果可为耐腐蚀阀门、复合钻采设备的堆焊提供理论与实验依据,为堆焊质量控制提供新的思路,具有一定的工

程价值及科学意义。

1 实验材料与方法

基体材料为调质 AISI8630,化学成分如表 1 所示。焊前用丙酮清洗基体表面以去除污物和氧化膜。AISI8630 基体碳当量大于 0.7,较难焊接,且层温过高时,极易产生热裂纹。故堆焊前将其预热至 200℃,堆焊层间温度严格控制在 250~300℃ 范围内。堆焊材料为 Inconel625 (牌号 ERNiCrMo-3) 焊丝,直径 1.2mm,化学成分见表 1。实验采用 Fronius 电流预热焊丝 TIG 系统进行堆焊,钨极与工件的距离由系统电流电压控制(AVC)自动保持在 3.5mm,钨极直径 3.2mm,喷嘴直径 12.5mm,保护气体采用纯度为 99.999%的工业纯氩,氩气流量 16L/min,堆焊实验的工艺参数如表 2 所示。由热丝 TIG 堆焊的热输入公式(式 1)计算出堆焊过程的热输入量  $H$ :

$$H = \frac{60(0.6U_t I_t + U_w I_w)}{V_w} \times \frac{1}{1000} \tag{1}$$

式中: $U_t$  为热丝电压,V; $I_t$  为热丝电流,A; $U_w$  为焊接电压,V; $I_w$  为焊接电流,A; $V_w$  为堆焊速率,cm/min。焊道重合率为 30%<sup>[18]</sup>。表 2 中  $V_{wire}$  为送丝速率。基体粗糙度用相应目数的砂纸打磨抛光至所需的粗糙度值,采用研磨法获得粗糙度值为 0.4,0.2μm 的基体试样。应用 MMD-HR320 粗糙度轮廓仪进行粗糙度检测。

表 1 AISI8630 和 Inconel625 化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of AISI8630 and Inconel625(mass fraction/%)

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti	Nb+Ta	Fe
AISI8630	0.310	0.900	0.260	0.008	0.001	0.930	0.420	0.880	0.130	0.021	0.004	—	Bal
Inconel625	0.012	0.010	0.080	0.003	0.001	22.500	8.800	Bal	0.020	0.170	0.190	3.450	—

表 2 堆焊工艺参数

Table 2 Parameters utilized for cladding

$I_t/A$	$I_w/A$	$U_w/V$	$V_w/$ (cm·min <sup>-1</sup> )	$V_{wire}/$ (cm·min <sup>-1</sup> )	$H/$ (kJ·cm <sup>-1</sup> )
60	180	11.4	15	120	5.23

将堆焊之后的工件应用磁粉探伤进行无损检验,检测合格后进行线切割,加工制成 15mm×15mm×5mm 的试块,试块经打磨、抛光,用 5%硝酸酒精溶液进行清洗,找出熔合线位置,测量堆焊层的几何尺寸以便计算稀释率大小。运用 DM2500M 金相显微镜进行金相分析。用 JSM-7001F 扫描电镜进行组织观察及化学成分分析。

根据 GB/T 4157—2006《金属在硫化氢环境中抗特殊形式环境开裂实验室试验》的要求,选取腐蚀

溶液为 5.0% (质量分数,下同) NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH + H<sub>2</sub>S(饱和),实验温度为 (10±1)℃ 以模拟深度为 200m 的海水温度,实验周期为 7×24h。腐蚀完的样件经 1:1 盐酸溶液清洗之后吹干,称量其损失质量。

2 结果与分析

2.1 堆焊层成型质量

稀释率  $\theta$  的计算公式为:

$$\theta = \frac{A_w}{A + A_w} \tag{2}$$

式中: $A$  为堆焊层面积; $A_w$  为熔合区面积。不同粗糙度试样稀释率的测量位置如图 1 所示。

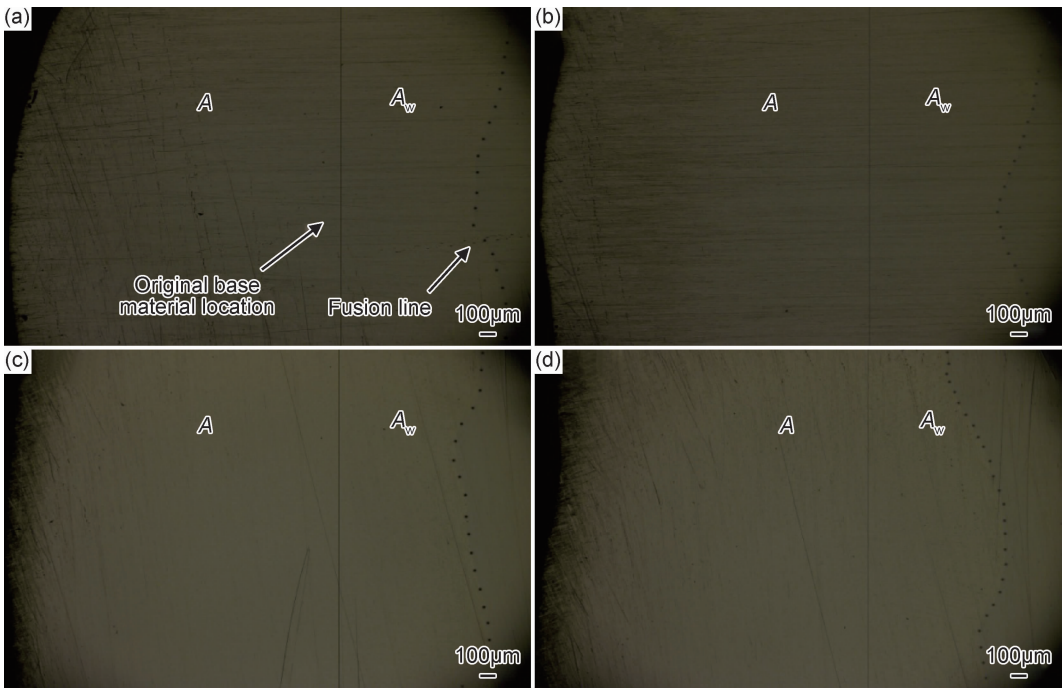


图 1 不同粗糙度值时稀释率的测量位置 (a) $R_a=12.5\mu\text{m}$ ;(b) $R_a=3.2\mu\text{m}$ ;(c) $R_a=0.8\mu\text{m}$ ;(d) $R_a=0.4\mu\text{m}$

Fig. 1 Measuring positions of dilution ratio under different roughnesses (a) $R_a=12.5\mu\text{m}$ ;(b) $R_a=3.2\mu\text{m}$ ;(c) $R_a=0.8\mu\text{m}$ ;(d) $R_a=0.4\mu\text{m}$

采用超景深显微镜(基恩士 VHX-1000)自带的面积计算功能模块,结合公式(2)计算出三组不同粗糙度值样件稀释率的值  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , 取平均值作为最终稀释率  $\theta$ 。不同粗糙度值  $R_a$  对应的堆焊稀释率  $\theta$  如表 3 所示。

表 3 不同粗糙度值时的堆焊稀释率

Table 3 Dilution ratio of cladding under different roughnesses				
$R_a/\mu\text{m}$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta$
25.0	0.400	0.401	0.401	0.401
12.5	0.374	0.373	0.374	0.374
6.3	0.340	0.341	0.341	0.341
3.2	0.319	0.319	0.319	0.319
1.6	0.308	0.308	0.307	0.308
0.8	0.305	0.305	0.305	0.305
0.6	0.306	0.305	0.305	0.305
0.4	0.302	0.302	0.302	0.302
0.2	0.301	0.301	0.300	0.301

由表 3 可以看出,基体表面的粗糙度对堆焊稀释率有较大影响。粗糙度值越大,陷光效应越强,从而使焊接电弧与基体的有效接触面积变大,因此热输入增大,导致堆焊的稀释率增加<sup>[19]</sup>。由表 3 数据还可看出,当基体表面粗糙度减小到一定值时,稀释率的变化趋缓,当粗糙度值小于  $0.8\mu\text{m}$  时,稀释率几乎无变化。但当粗糙度值变为  $0.4\mu\text{m}$  时,稀释率有一个小幅度的突变。初步判断,这是由于采用研磨方法加工粗糙度为  $0.4\mu\text{m}$  及  $0.2\mu\text{m}$  的试件时,试件表面产生加工硬度<sup>[20]</sup>,进而影响稀释率的值。

初步推测堆焊基体表面粗糙度对堆焊稀释率的作用机制模型如图 2 所示。

表面粗糙度对堆焊过程可能存在的影响机制主要为:随着粗糙度值增加,电弧与堆焊表面的接触面积相应增大,进而导致热输入增加;同时,在一定范围内,粗

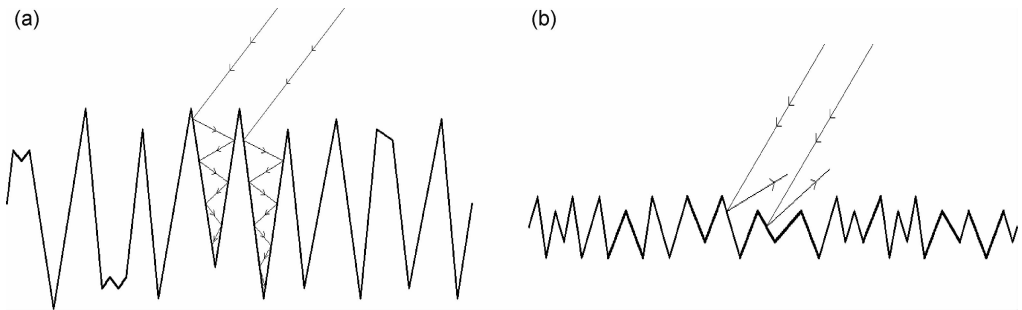


图 2 不同粗糙度值对堆焊稀释率的作用机制模型 (a)大表面粗糙度值;(b)小表面粗糙度值

Fig. 2 Functionary mechanism of different roughnesses on cladding dilution ratio (a)roughness of large surface;(b)roughness of small surface

糙度值越大,陷光效应越强,多重反射越明显,从而基体吸收热量增加,热输入提高,稀释率相应增大。陷光效应对热输入的影响在电弧接触到待堆焊表面的瞬间可能会表现得更为明显,因为此时焊丝未及时填充熔池,电弧直射待堆焊表面,陷光效应较强。待焊丝填充之后,电弧能量主要用于融化焊材,且此时电弧直射熔池,基体材料几乎不融化,从而对稀释率的影响亦相应减小,这也是堆焊速率降低导致稀释率减小的原因。故电弧与母材接触瞬间对热输入和稀释率的影响尤为重要。此外,电弧所产生的高温辐射还可能对靠近电弧的待堆焊表面进行加热。当表面粗糙度值较大时,待堆焊表面接触到高温辐射的面积相应增加,母材温度升高,从而在堆焊过程中更易融化,进而影响堆焊层的组织和性能。

针对电弧堆焊的特点,还可能存在的影响机制为表面粗糙度值的变化对堆焊电弧等离子体热力学温度以及等离子体内部电子密度分布产生一定影响,尤其是电弧下层(靠近基体区)热力学温度以及电子密度分布,其对堆焊热输入会产生直接影响。故在研究堆焊热输入时应综合考虑堆焊过程中各方面影响因素,如母材表面性状,而不仅仅针对堆焊电流、电压和堆焊速率等。

2.2 堆焊层铁元素分布

研究表明,Fe 元素含量对堆焊层耐腐蚀性有很大影响<sup>[5-7]</sup>。取不同粗糙度值的样件针对 Fe 元素的含量进行对比分析。在垂直于堆焊方向的横截面内沿熔合线垂线的 EDS 点扫描位置如图 3 所示,扫描结果如图 4 所示。

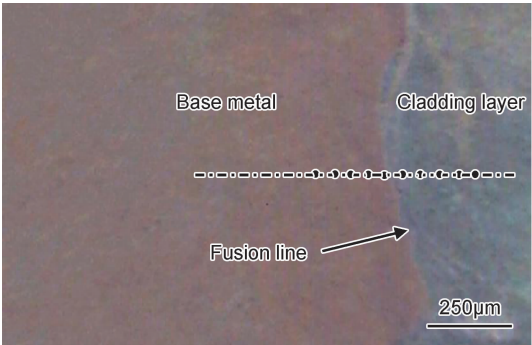


图 3 堆焊层扫描位置

Fig. 3 EDS spot analysis positions of cladding layer

由图 3 可以看出,基体与堆焊层之间形成良好的冶金结合,无夹渣、气孔、未熔合等缺陷。由图 4 可以看出,堆焊过程中,基体的铁元素随着融化过程进入熔池,在电弧搅拌力的作用下与堆焊材料充分融合,使得堆焊层的铁元素含量最大可达 34%,远大于原焊材中 5%的铁元素含量。

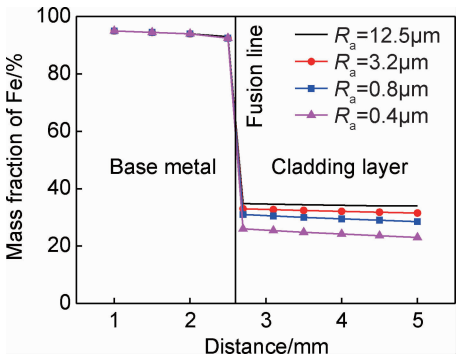


图 4 铁元素含量分析结果

Fig. 4 Analysis results of Fe content

随着堆焊表面粗糙度值的变化,堆焊层中铁元素含量也相应地变化,整体呈现正相关。同时发现,铁元素随着基体表面粗糙度值的增大而愈发均匀。这是由于表面粗糙度值的增大导致堆焊热输入增加,使得基体融化量增多,结晶凝固时间延长,利于来自基体的铁元素在熔池中充分混合。

当粗糙度为 0.4μm 时,铁元素的含量有一个相对较大的变化,初步判断这种现象亦与研磨所产生的表面硬度相关,随着基体表面硬度升高,堆焊稀释率进一步降低,从而使得堆焊层中铁元素的含量有相对较大程度的减少。

2.3 堆焊层微观组织

取不同基体粗糙度值下,堆焊层热影响区的显微组织结构如图 5 所示。

由图 5 可以看出,所取堆焊层样件皆为垂直于界面定向生长的柱状晶组织,经退火处理后,焊缝金属主要由铁素体和块状分布的珠光体组成,如图 3 所示,黑色为铁素体组织,白色为珠光体组织。同时,随着基体表面粗糙度值的降低,堆焊层的柱状晶组织更加细小均匀。这是因为基体表面粗糙度的降低,使得堆焊过程的热输入和温度梯度相应减少,熔池中的液态金属凝固时间缩短,熔池结晶速率加快,进而得到的组织更加细小,分布更加均匀,综合性能更好。

2.4 堆焊层耐腐蚀性分析

由 2.2 节可知,堆焊层中元素分布比较均匀,故其内部耐腐蚀性能差异较小。用线切割设备截取堆焊层部分,制成 15mm×15mm×2mm 的堆焊层腐蚀试样。每组粗糙度值选用 3 个试样,组内求得的腐蚀速率平均值为试样的最终腐蚀速率。

腐蚀速率  $v$  的计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$v = \frac{\tau}{A \times t}$$

(3)

式中:  $\tau$  为失重, g;  $A$  为试样表面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为实验时间, h。



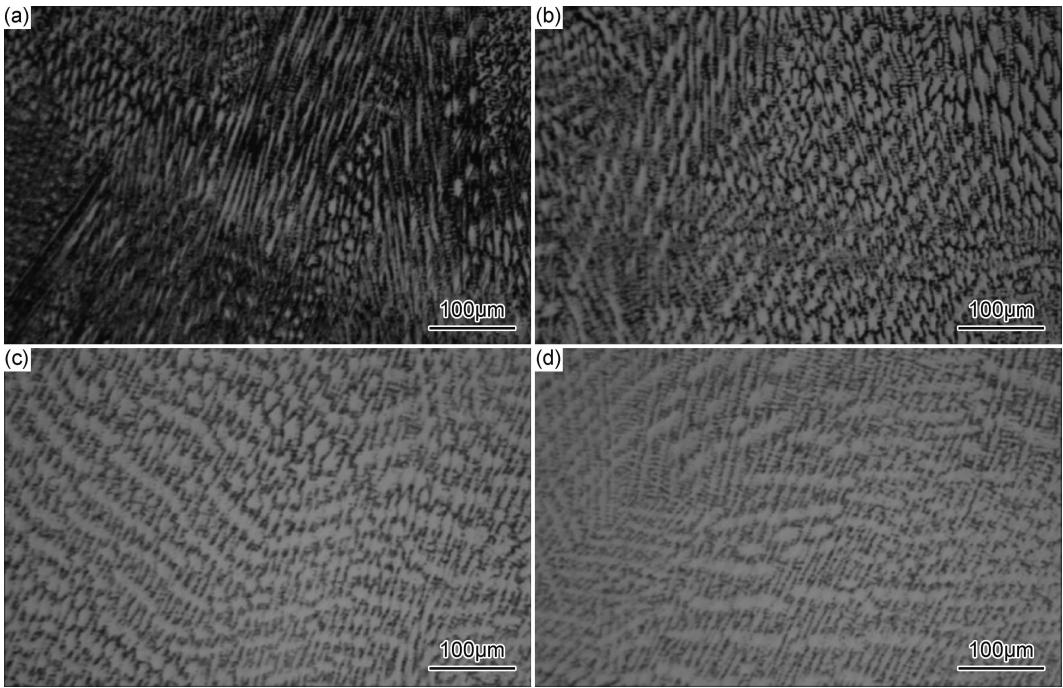


图 5 不同粗糙度值时热影响区微观组织 (a) $R_a=12.5\mu\text{m}$ ;(b) $R_a=3.2\mu\text{m}$ ;(c) $R_a=0.8\mu\text{m}$ ;(d) $R_a=0.4\mu\text{m}$

Fig. 5 Microstructures of HAZ under different roughnesses (a) $R_a=12.5\mu\text{m}$ ;(b) $R_a=3.2\mu\text{m}$ ;(c) $R_a=0.8\mu\text{m}$ ;(d) $R_a=0.4\mu\text{m}$

不同基体粗糙度值下获得的堆焊层试样的腐蚀速率如图 6 所示。

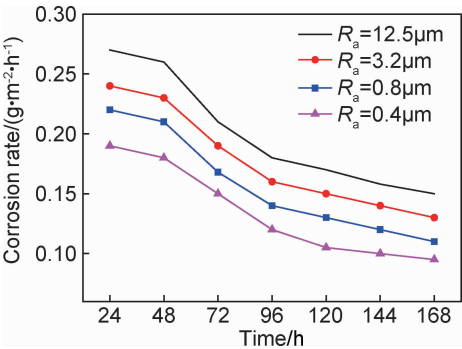


图 6 不同粗糙度值下堆焊层的腐蚀速率

Fig. 6 Corrosion rates of overlay cladding layer under different roughnesses

由图 6 可以看出,横向上,所有样件的腐蚀速率都呈现一个相同的趋势,即刚开始时腐蚀速率较快,随后逐步变缓趋于一个稳定值。这是由于在腐蚀初期,焊接后的样件表面存在一定的粗糙度,使得样件与腐蚀液的实际接触面积变大,因而腐蚀速率较大。随着腐蚀过程的进行,样件表面在类似腐蚀抛光的作用下趋于光滑,腐蚀速率也随之变缓,最终趋于一个稳定值。

同时,在纵向上,基体表面粗糙度值越小的堆焊样件,其腐蚀速率整体呈现减小趋势。这是由于基体表面粗糙度值的减小使得热输入相应减少,进而稀释率

降低,从而焊缝金属中来自基体的铁元素相应减少,样件耐腐蚀性能增强,腐蚀速率相应降低。当表面粗糙度为  $0.4\mu\text{m}$  时,堆焊层耐腐蚀性能提高 32%。

### 3 结论

(1)应用热丝 TIG 堆焊工艺可以在 AISI8630 基体表面获得与基体结合良好的堆焊层;当基体粗糙度值减少时,焊接过程的陷光效应相应减弱,堆焊热输入随之减少,稀释率也相应减少,但当粗糙度值小于  $0.8\mu\text{m}$  时,减小趋势不明显。

(2)堆焊层中铁元素含量最大可达 34%,且随着基体表面粗糙度值的减小而相应降低;基体表面粗糙度越大,铁元素在堆焊层中的分布越均匀;当采用研磨法获得粗糙度为  $0.4\mu\text{m}$  的基体表面时,堆焊层中铁元素含量降低幅度可达 25%。初步判断与研磨过程产生的显微硬度有关。

(3)堆焊层热影响区处的显微组织为垂直于界面生长的柱状晶组织;且随着基体表面粗糙度值的减小,堆焊层的柱状晶组织变得更加细小均匀,综合性能更好。

(4)样件的腐蚀速率表现为初期较快,中期有所下降,后期变缓趋稳的一个规律。同时随着基体表面粗糙度值的减小,其腐蚀速率整体呈现减小趋势,当基体粗糙度值由  $12.5\mu\text{m}$  减小到  $0.4\mu\text{m}$  时,堆焊层耐腐蚀

性能提高 32%。

### 参考文献

- [1] 郭必永. ASTM4130 自动氩弧堆焊 Inconel625 焊接工艺[J]. 石油化工设备, 2014, 43(8): 44-46.  
GUO B Y. Procedure of Inconel625 overlay weld on ASTM 4130 75K [J]. Petro-chemical Equipment, 2014, 43(8): 44-46.
- [2] BALA Y G, SANKARANARAYANAN S R, PANDEY K S. Assessment of densification and mechanical property of AISI 8630 steel composition on different heat treatments produced through hot upsetting powder preform forging [J]. Assessment of Densification and Mechanical Property, 2015, 21: 1044-1053.
- [3] 郭龙龙, 郑华林, 李悦钦, 等. 热丝脉冲 TIG 堆焊 Inconel625 的组织及性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 77-84.  
GUO L L, ZHENG H L, LI Y Q, et al. Microstructure and performance of Inconel625 cladding deposited by hot wire pulsed TIG [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 77-84.
- [4] 赵吉宾, 王志强, 赵宇辉, 等. 真空热处理对激光近净成形 In625 和 C-276 合金性能的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(3): 28-34.  
ZHAO J B, WANG Z G, ZHAO Y H, et al. Influence of vacuum heat treatment on properties of laser engineered net shaping In625 and C-276 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(3): 28-34.
- [5] ABIOYE T E, MCCARTNEY D G, CLARE A T. Laser cladding of Inconel625 wire for corrosion protection [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 232-240.
- [6] ZAREIE RAJANI H R, AKBARI MOUSAVI S A A, MADANI SANI F. Comparison of corrosion behavior between fusion clad-ded and explosive clad-ded Inconel625/plain carbon steel bimetal plates [J]. Materials & Design, 2013, 43: 467-474.
- [7] ABIOYE T E, FARAYIBI P K, MCCARTNEY D G, et al. Effect of carbide dissolution on the corrosion performance of tung-stencarbide reinforced Inconel625 wire laser coating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 89-99.
- [8] SHAKIL M, AHMAD M, TARIQ N H, et al. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel625 and stainless steel 304L[J]. Vacuum, 2014, 110: 121-126.
- [9] XU F J, LV Y H, LIU Y X, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel625 alloy fabri-cated by pulsed plasma arc deposition [J]. Physics Procedia, 2013, 50: 48-54.
- [10] VERDI D, GARRIDO M A MUNEZ C J, et al. Mechanical properties of Inconel625 laser clad-ded coatings: depth sensing in-dentation analysis [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 598: 15-21.
- [11] 徐富家, 吕耀辉, 刘玉欣, 等. 脉冲等离子弧快速成形 Inconel625 组织性能研究[J]. 材料工程, 2012(11): 6-11.  
XU F J, LU Y H, LIU Y X, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel625 components deposited by pulsed plasma arc rapid prototyping [J]. Journal of Materials Engineering, 2012(11): 6-11.
- [12] VOROBYEV A Y, GUO C L. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals [J]. Appl Phys A, 2007, 86(3): 321-324.
- [13] 黄永光, 刘世炳. Ti-6Al-4V 合金表面微纳米结构的超快激光制备及其反射光谱响应[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3133-3137.  
HUANG Y G, LIU S B. Preparation and reflection spectra re-sponse of Ti-6Al-4V alloy surface with ultrafast laser micro-nano-structuring [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3133-3137.
- [14] DOBRZANSKI L A, DRYGALA A, GOLOMBEK K, et al. Laser surface treatment of multicrystalline silicon for enhancing optical properties [J]. J Mater Process Tech, 2008, 201(1/3): 291-296.
- [15] VOROBYEV A Y, GUO C L. Femtosecond laser blackening of platinum [J]. J Appl Phys, 2008, 104(5): 053516.
- [16] GUO C L, VOROBYEV A Y. Black metals produced by femto-second laser pulses [J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1278: 838-842.
- [17] YANG Y, YANG J J, LIANG C Y, et al. Ultra-broadband en-hanced absorption of metal surfaces structured by femtosecond laserpulses [J]. Opt Express, 2008, 16(15): 11259-11265.
- [18] 郭龙龙, 郑华林, 刘振平, 等. 考虑重合率的热丝 TIG 堆焊 In-conel625 成形质量研究[J]. 热加工工艺, 2015(21): 230-233.  
GUO L L, ZHENG H L, LIU Z P, et al. Investigation on for-mation quality of overlay beads Inconel625 considering overlap ratio by using hot-wire TIG [J]. Hot Working Technology, 2015(21): 230-233.
- [19] LI R F, LI Z G, HUANG J, et al. Dilution effect on the forma-tion of amorphous phase in the laser clad-ded Ni-Fe-B-Si-Nb coat-ings after laser remelting process [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(20): 7956-7961.
- [20] 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI304 不锈钢表-层纳米化[J]. 金属学报, 2003, 39(4): 342-346.  
ZHANG H W, LIU G, HEI Z K, et al. Surface nanocrystalliza-tion of AISI 304 stainless steel induced by surface mechanical at-trition treatment [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(4): 342-346.
- [21] 王晓军, 杨洁. 30CrMo 合金表面堆焊 Inconel625 镍基合金的耐-腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(8): 655-657.  
WANG X J, YANG J. Corrosion resistance of 30CrMo alloy with surfacing welding of Inconel625 nickel alloy in hydrogen sulfide saturated solution [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(8): 655-657.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179076, 51679112); 江苏省重点研发计划(BE2015134)

收稿日期: 2016-12-08; 修订日期: 2018-03-22

通讯作者: 王勾(1975—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为海工装备制造和激光加工, 联系地址: 江苏省镇江市江苏大学机械工程学院(212013), E-mail: wangyun@ujs.edu.cn

(本文责编: 解 宏)