

# 热处理对奥氏体不锈钢熔覆层微观组织、力学性能和服役性能的影响<sup>①</sup>

吉效科<sup>1</sup>, 毛勇<sup>1</sup>, 李茂<sup>1</sup>, 张海瑜<sup>2</sup>, 见飞龙<sup>1</sup>, 庄磊<sup>1</sup>, 王伟晨<sup>1</sup>, 王明静<sup>2</sup>, 刘二勇<sup>2</sup>

(1. 中国石油长庆油田公司 机械制造总厂, 陕西 西安 710200; 2. 西安科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对奥氏体不锈钢激光熔覆层成分偏析、脆性倾向明显的现状, 利用激光熔覆技术制备奥氏体熔覆层, 考察预热、退火热处理对熔覆层及热影响区微观组织、力学性能和服役(腐蚀与腐蚀磨损)性能的影响。结果表明, 预热、退火奥氏体熔覆层物相仍以奥氏体相为主, 仅出现晶粒长大和(111)晶面择优转变; 熔覆层及热影响区硬度下降, 而抗拉强度和延伸率明显升高, 因为热处理不仅减弱了熔覆层的沿晶断裂倾向, 还改善了热影响区的韧性断裂倾向; 其次, 预热、退火提升了奥氏体熔覆层的耐磨抗蚀性能, 尤其是退火处理效果更明显, 归因于熔覆层和热影响区的成分偏析减弱和塑性提升的协同改善。

**关键词:** 激光熔覆; 奥氏体不锈钢; 熔覆层; 热影响区; 热处理; 退火处理; 微观组织; 力学性能; 服役性能; 耐磨性能; 抗蚀性能

中图分类号: TG174; TN249

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.036

文章编号: 0253-6099(2025)03-0212-06

## Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Service Performance of Cladded Coating of Austenitic Stainless Steel

Ji Xiaoke<sup>1</sup>, MAO Yong<sup>1</sup>, LI Mao<sup>1</sup>, ZHANG Haiyu<sup>2</sup>, JIAN Feilong<sup>1</sup>, ZHUANG Lei<sup>1</sup>,

WANG Weicheng<sup>1</sup>, WANG Mingjing<sup>2</sup>, LIU Eryong<sup>2</sup>

(1. Machine Manufacture Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710200, Shaanxi, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** As for the current situation of component segregation and significant brittleness tendency in laser cladded coating of austenitic stainless steel, an austenitic cladded coating was prepared by adopting laser cladding technology, and then effects of preheating and annealing treatment on the microstructure, mechanical properties and service performance (corrosion and corrosive wear) of the cladded coating and heat-affected zone (HAZ) were investigated. The results show that the phase composition of the austenitic coating after preheating or annealing process remains predominantly austenitic, exhibiting only grain growth and a preferential orientation shift towards the (111) crystal plane. Both the cladded coating and HAZ have decreased hardness, but significant improvement in the tensile strength and elongation. This is because that the heat treatment not only reduces the intergranular fracture tendency of the cladded coating but also improves the ductile fracture tendency of the HAZ. Furthermore, preheating or annealing process can enhance the corrosion resistance and wear resistance of the austenitic cladded coating, among which annealing process can bring a significant effect. These improvements are attributed to the synergistic effect of reduced component segregation and enhanced plasticity and toughness in both cladded coating and HAZ.

**Key words:** laser cladding; austenitic stainless steel; cladded coating; heat-affected zone (HAZ); heat treatment; annealing; microstructure; mechanical properties; service performance; wear resistance; corrosion resistance

激光熔覆技术是随着大功率激光器发展而出现的一种新兴表面技术, 该技术利用激光束将熔覆粉末与

基体表面同时加热并熔化, 随着激光束移开后在基体的自激冷却作用下形成与基体冶金结合且稀释率极低

① 收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科技项目专题(2023DQ0108-23)

作者简介: 吉效科(1976—), 男, 甘肃临洮人, 博士, 高级工程师, 主要从事油气田设备管理与技术、装备研发与制造、装备再制造等专业领域的管理与技术工作。E-mail: jxk\_cq@petrochina.com.cn

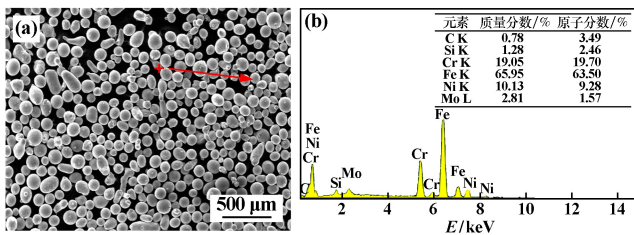
通信作者: 刘二勇(1982—), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 主要从事金属表面工程、腐蚀与摩擦学研究。E-mail: liueryong@xust.edu.cn

的熔覆层,有效改善基体的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化等特性<sup>[1-3]</sup>。然而,激光熔覆技术的急热骤冷特性极易导致熔覆层出现偏析、气孔、裂纹、残余应力和淬硬性差等缺陷,是影响熔覆层成形质量及耐磨抗蚀性能的重要因素之一<sup>[4-5]</sup>。因此,对激光熔覆层进行热处理调控<sup>[6-9]</sup>,有望消除成分偏析和改善淬硬性,这对提高熔覆层性能具有重要意义。基于此,本文选择调质态 27SiMn 为基材,利用激光熔覆技术在基材表面制备奥氏体熔覆层,系统研究预热、退火热处理制度对熔覆层和热影响区的微观组织、力学性能和耐磨抗蚀性能的影响,以期拓展熔覆技术的应用提供技术支持。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

选择调质态 27SiMn 为熔覆基体、1712 奥氏体不锈钢粉末为熔覆粉体。其中,熔覆粉体的微观形貌与 EDS 分析结果见图 1。由图 1 可知,该粉体为粒径 50~100  $\mu\text{m}$  的规则球状粉体,EDS 结果显示该粉体成分与 316 奥氏体不锈钢接近。其中,高 Ni 含量不仅有助于改善熔覆成形性,高 Cr、Ni 和 Mo 元素还有助于改善熔覆层的耐磨抗蚀性能。



(a) 微观形貌; (b) EDS 分析

图 1 1712 奥氏体不锈钢熔覆粉体的微观形貌与 EDS 分析结果

Fig. 1 Microstructure and EDS analysis of

1712 austenitic stainless steel cladding powder

### 1.2 实验设备与工艺参数

采用 BS-OF-3000-15-4F 激光熔覆设备制备熔覆层,熔覆工艺为:功率 3 kW、扫描速度 7 mm/s、送粉率 33 g/min、搭接率 40%,所制备熔覆样品标记为熔覆态样品。预热与退火热处理工艺为:选择熔覆基体进行预热处理,温度 200  $^{\circ}\text{C}$ 、保温 2 h 后直接在其表面熔覆,标记为预热态样品;选择熔覆层进行退火热处理,温度 420  $^{\circ}\text{C}$ 、保温 150 min,随炉冷却,标记为退火态样品。

### 1.3 表征

采用 D8 Advance X 射线衍射仪分析熔覆层物相;采用 VEGA3 XMU 扫描电镜及 INCA 能谱仪分析熔覆层

截面、断口、腐蚀和磨损形貌与成分;采用 CS2350 电化学工作站进行熔覆层的电化学腐蚀测试,测试条件为:质量分数 3.5% NaCl 溶液、三电极体系(试样为工作电极,饱和氯化银单盐桥式电极为参比电极,铂片为辅助电极);采用 HV-1000 显微硬度计测试熔覆层、热影响区和基材的硬度,测试参数为:四棱锥体金刚石压头、载荷 500 g、保载时间 10 s、间隔 0.1 mm;采用 WDW 电子万能试验机测试熔覆层的拉伸性能,测试样品为包含熔覆层、热影响区和基材板状样品,加载速率 1 mm/min;采用 JB-300B 冲击试验机测试熔覆层的冲击性能,测试参数为:缺口半径 0.25 mm、缺口深度 2 mm 的 45 $^{\circ}$  夹角 V 形缺口位于基材处;采用 MRT-R4000 往复摩擦磨损试验机测试熔覆层的摩擦磨损性能,测试条件为:干摩擦和乳化液工况(质量分数 3% 乳化油+质量分数 97% 去离子水)、试样尺寸 15 mm $\times$ 15 mm $\times$ 10 mm、对磨球为 GCr15 钢球( $\Phi$ 6 mm)、载荷 30 N、行程 10 mm、测试时间 60 min、频率 2 Hz。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 物相分析

不同热处理制度下奥氏体熔覆层 XRD 图谱见图 2。以 1712 粉体所制备的熔覆层主要为奥氏体组织,标记为熔覆态奥氏体熔覆层。经过预热、退火热处理后,熔覆层未出现物相转变,仍为奥氏体组织。其次,相比熔覆态和预热态奥氏体熔覆层,退火态奥氏体熔覆层的(111)取向显著强化,且熔覆层出现衍射峰尖锐的变化,反映出退火热处理对熔覆层晶粒尺寸、取向的影响更为明显,有望改善熔覆态奥氏体熔覆层的耐磨抗蚀等服役性能。

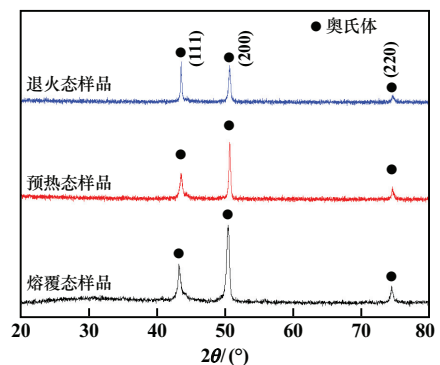


图 2 不同热处理制度下奥氏体熔覆层 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of cladded coating after

different heat treatment

### 2.2 微观组织

熔覆态、预热态和退火态奥氏体熔覆层的微观组

织如图3~5所示。图3表明,利用激光熔覆技术可制备组织致密、结合良好的熔覆层,其微观组织从熔合线到熔覆层顶部依次生长为平面晶、胞状晶、柱状枝晶和等轴树枝晶。图4显示,经过200℃预热处理,预热态熔覆层仍为致密结构,但较熔覆态样品出现了晶粒尺寸增大的现象,其原因在于熔覆层的冷却速率有所降低。图5显示,经过420℃退火热处理,退火态熔覆层的枝晶组织进一步长大,尤其熔覆层顶部出现了粗大的等轴晶组织。经过预热、退火热处理后,奥氏体熔覆层保持了致密、冶金结合的状态,仅出现了晶粒增大的变化。

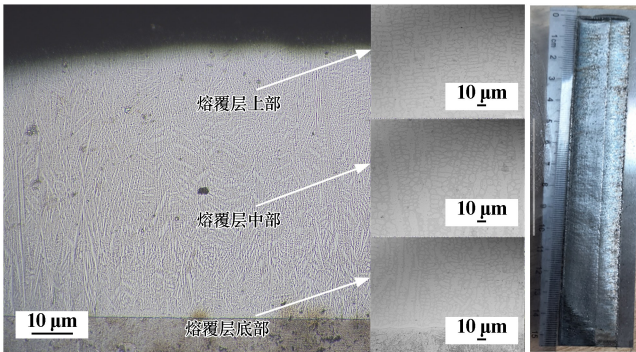


图3 熔覆态奥氏体熔覆层微观组织

Fig.3 Microstructure of original cladded coating

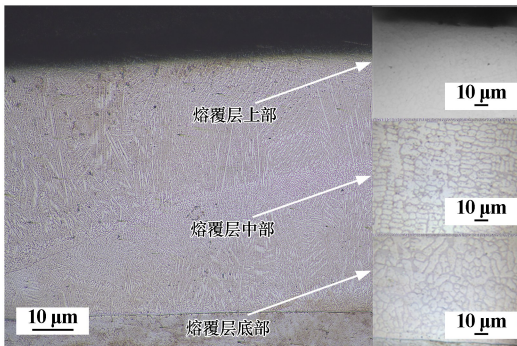


图4 预热态奥氏体熔覆层微观组织

Fig.4 Microstructure of cladded coating after preheating treatment

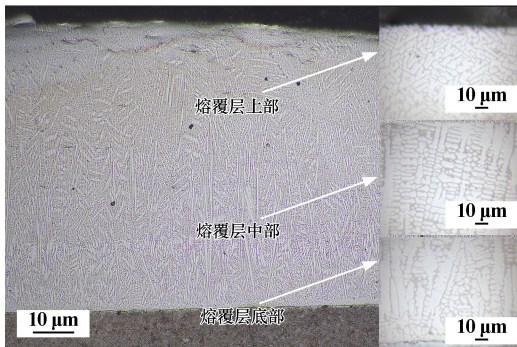


图5 退火态奥氏体熔覆层微观组织

Fig.5 Microstructure of cladded coating after annealing treatment

## 2.3 力学性能

图6为不同状态样品的截面硬度。经过预热或退火后,不仅熔覆层区硬度降低,热影响区域的硬度更是显著降低。其中,不同热处理状态熔覆层的硬度较为接近,均为(300~350)HV<sub>0.5</sub>。然而,熔覆层热影响区呈现截然不同的硬度变化。如熔覆态奥氏体熔覆层的热影响区宽度约为0.75 mm,硬度达(645~770)HV<sub>0.5</sub>;经过预热后,熔覆层热影响区的宽度超1 mm,硬度则降至约590HV<sub>0.5</sub>,其原因在于预热后熔覆层与基体的冷却速率降低,热影响区马氏体相含量显著减少,这不仅降低了熔覆层与热影响区的硬度,也因马氏体的减少出现塑、韧性提升的现象;经过退火后,热影响区硬度降低更加明显,仅约455HV<sub>0.5</sub>,原因在于退火过程中热影响区马氏体转变为回火屈氏体组织,而其硬度远低于马氏体和贝氏体<sup>[10]</sup>。

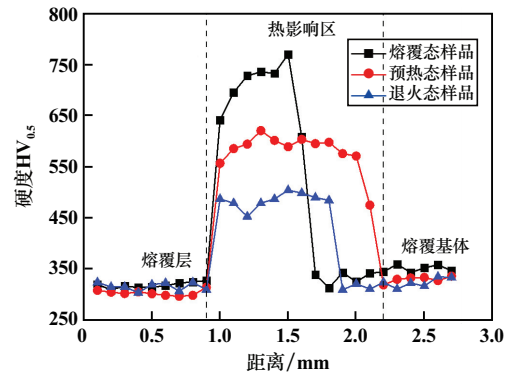


图6 不同状态样品的截面硬度

Fig.6 Cross-sectional hardness of different samples

图7为不同状态样品的应力-应变曲线。预热态、退火态奥氏体熔覆层的抗拉强度均有所升高,较熔覆态样品提升约6.0%。其次,退火态奥氏体熔覆层的延伸率同步提升,较熔覆态样品提升约4.5%。热处理尤其是退火热处理明显改善了奥氏体熔覆层的塑韧性,使其具有更优异的使役性能。

图8为不同状态样品的冲击功。选择基体作为对比可以看到,基体的冲击功超过50 J,呈现优异的耐冲击性能。与基体相比,经过激光熔覆后,样品的冲击功大幅度降低。与熔覆态样品相比,预热态样品的冲击功小幅下降,而经过退火后,退火态样品的冲击功明显升高,较熔覆态样品提升约43%。因此,热处理尤其是退火可显著改善熔覆层的耐冲击性能,这对提升其使役性能有重要作用。

图9为不同状态样品的拉伸断口形貌。熔覆态奥氏体熔覆层和热影响区有明显的撕裂棱和细小孔洞,

呈现明显的沿晶脆性断裂特性。热影响区和基体的断口出现大量韧窝,韧性断裂特性明显。其原因在于,奥氏体熔覆层以柱状晶为主,导致弱结合的枝晶晶界出现断裂。细小孔洞是由于碳化物颗粒的脱落。对于热影响区和基体而言,近熔合线位置马氏体组织的脆性较大,而远端的大量贝氏体组织呈现良好的强韧性。经过预热、退火后,预热态、退火态熔覆层的断面较为平整,呈现沿着晶界的沿晶断裂特性。而相应的热影响区表面较粗糙,呈现典型的韧性断裂特性。热处理过程导致熔覆层的热影响区出现明显的物相转变,进而改善熔覆层的力学性能。

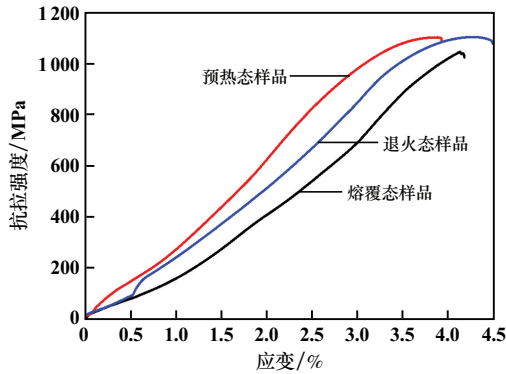


图7 不同状态样品的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of different samples

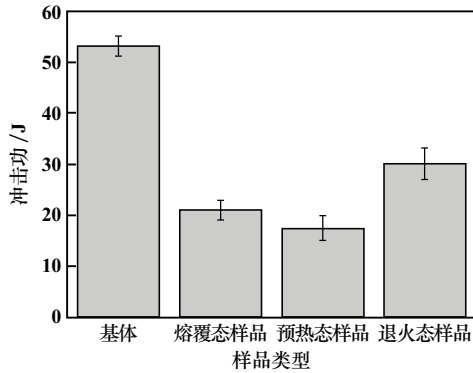
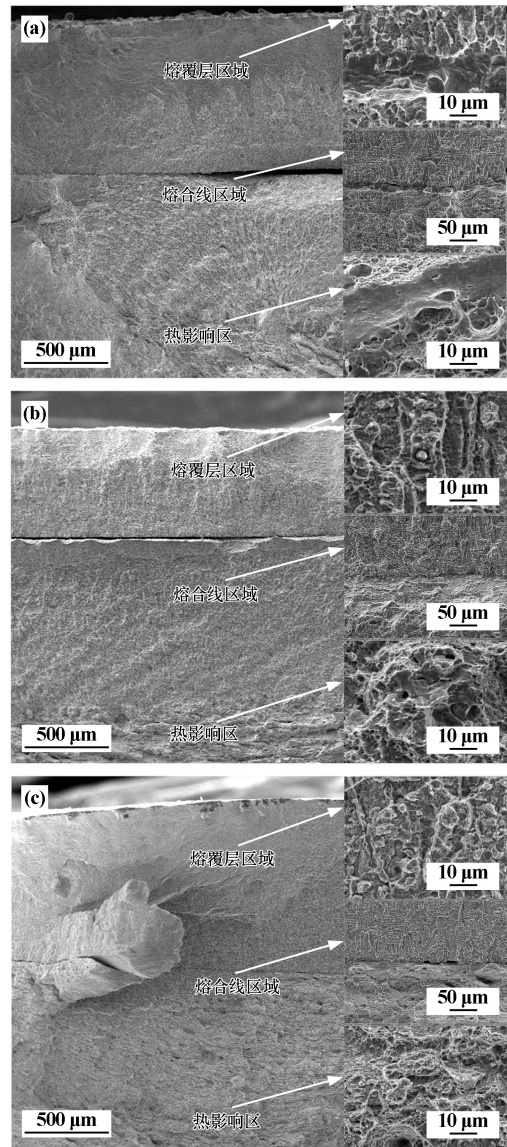


图8 不同状态样品的冲击功

Fig.8 Impact energy of different samples

图10为熔覆基体和不同状态熔覆层样品的冲击断口形貌。基体的冲击断口较为粗糙,呈明显的韧性特性。奥氏体熔覆层的冲击断口形貌分成了熔覆层、热影响和基体3个差异明显的区域。熔覆态熔覆层区域呈明显的沿晶拔出特性,为典型的沿晶断裂机理;热影响区呈现细小的韧窝特性,原因在于激光熔覆的淬火效应导致热影响区出现了再结晶的晶粒细化现象;基体区则出现河流状的解离特性,主要为穿晶脆性断裂。经过预热后,预热态熔覆层的热影响区断口更为

粗糙,韧性断裂特性更加明显。但是,熔覆层区的断口特性更为粗大,原因在于预热降低了熔覆层的冷却速率,导致熔覆组织出现粗大现象;退火态熔覆层的基体和热影响区的解离特性显著减少,尤其是热影响区出现了细小的韧窝特性,这是由于回火屈氏体的出现改善了材料的韧性。同时,熔覆层枝晶拔出特性更加显著,有利于提高耐冲击性能。



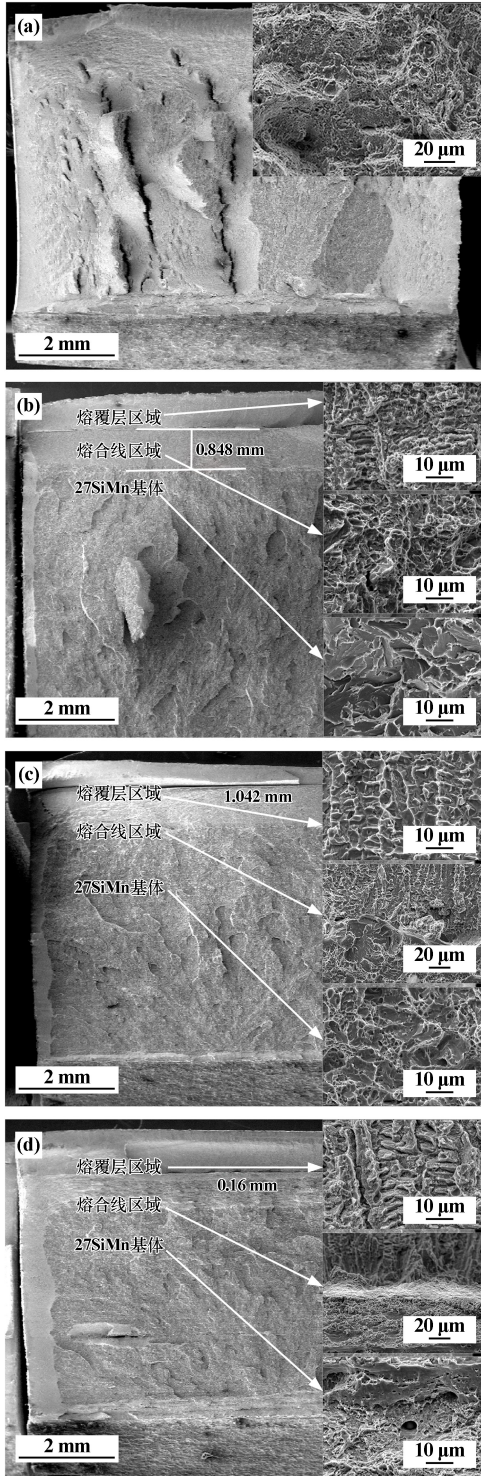
(a) 熔覆态; (b) 预热态; (c) 退火态

图9 不同状态样品的拉伸断口形貌

Fig.9 Tensile fracture morphology of different samples

### 2.4 腐蚀行为

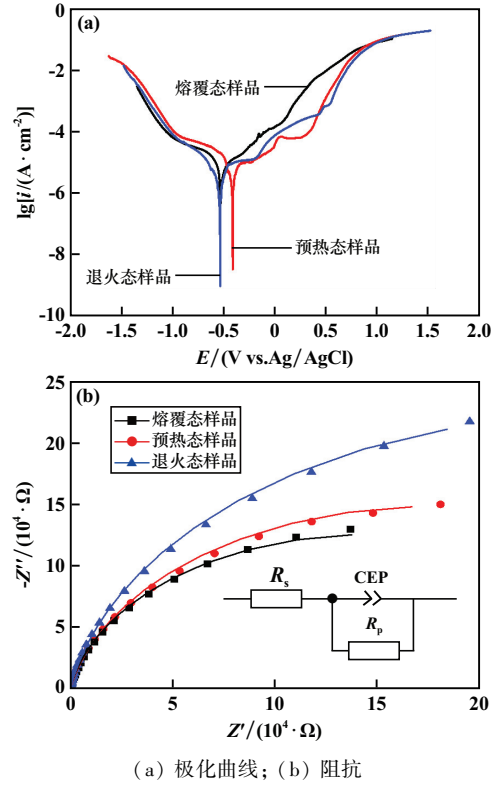
质量分数 3.5% NaCl 溶液中,不同状态样品的电化学腐蚀结果见图11。从图11(a)可以看出,奥氏体熔覆层极化曲线均分为活化区、钝化区和过钝化区,意味着出现了点蚀腐蚀。对比发现,3种熔覆层的腐蚀



(a) 基体; (b) 熔覆态; (c) 预热态; (d) 退火态  
 图 10 熔覆基体和不同状态熔覆层样品的冲击断口形貌  
 Fig. 10 Impact fracture morphology of substrate and different cladded coatings

电流密度  $I_{corr}$  从低到高依次为退火态、预热态、熔覆态,即退火态熔覆层的腐蚀速率极慢,耐蚀性极好。从图 11(b) 可以看出,预热态、退火态熔覆层的电容式圆弧半径均增大,且退火态熔覆层的半径更大,表明退火

态熔覆层的耐蚀性更优异,而熔覆态熔覆层的耐蚀性差,与极化曲线结果一致。经过预热、退火热处理后,奥氏体熔覆层的腐蚀电流密度  $I_{corr}$  降低,且阻抗  $R_p$  升高,显示其耐蚀性有了显著提升,表明预热、退火热处理可以提高奥氏体熔覆层耐蚀性,尤以退火热处理对熔覆层耐蚀性影响更显著。

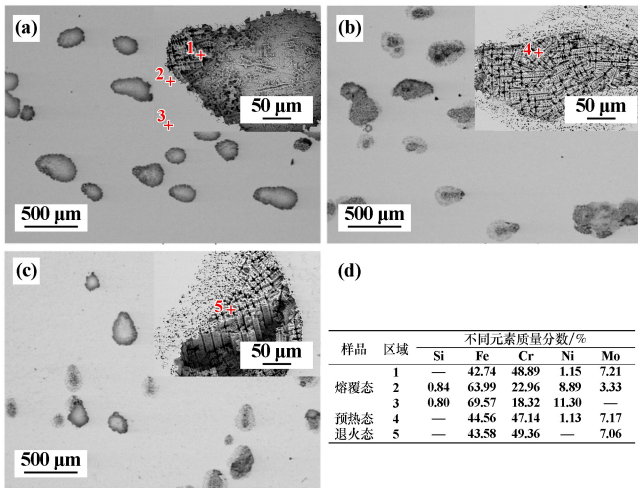


(a) 极化曲线; (b) 阻抗  
 图 11 不同状态样品的电化学腐蚀结果

Fig. 11 Electrochemical properties of different samples

图 12 为质量分数 3.5% NaCl 溶液中不同状态样品的电化学腐蚀形貌。由图 12 可以看出,熔覆态奥氏体熔覆层的腐蚀以点蚀为主,点蚀坑的数量、尺寸随着预热、退火热处理后而减少,尤其是退火热处理对熔覆层耐蚀性影响更明显。从高倍 SEM 图片可以看到,熔覆层点蚀坑内部为蜂窝状结构,其原因在于熔覆层的晶界因形成碳化铬、碳化钼等而造成的局部贫铬,从而形成了微观电偶腐蚀。经过预热、退火热处理后,预热态奥氏体熔覆层的 Cr 元素更易于形成碳化铬相,且碳化铬的尺寸增大,从而形成骨架特性更为明显的点蚀坑。EDS 成分结果表明,熔覆态熔覆层点蚀坑骨架的 Cr 含量明显高于熔覆层。同时,点蚀坑边界区域的合金元素含量偏高,有助于抑制点蚀坑的扩大。退火态熔覆层点蚀坑骨架的 Cr、Mo 元素含量显著升高,意味着热处理过程中促进了碳化物的析出。热处理过程改善了熔覆层的合金元素分布均匀性,抑制了点蚀的萌

生与长大,这对提高熔覆层的耐蚀性起到了重要作用。



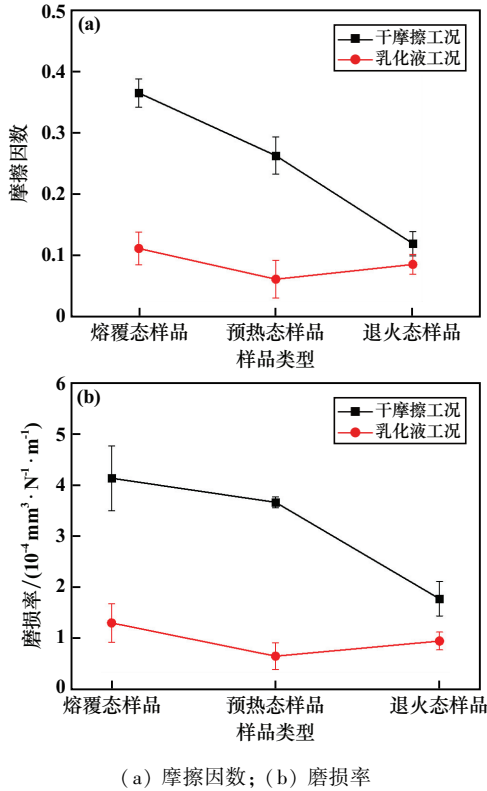
(a) 熔覆态; (b) 预热态; (c) 退火态

图 12 不同状态样品的电化学腐蚀形貌

Fig. 12 Electrochemical corrosion morphology of different samples

### 2.5 腐蚀磨损性能

图 13 为不同工况、不同状态样品的腐蚀磨损性能。干摩擦条件时,预热、退火热处理的奥氏体熔覆层摩擦因数显著降低,尤其是退火态奥氏体熔覆层具有更加优异的减摩效果。同时,预热、退火热处理后奥氏



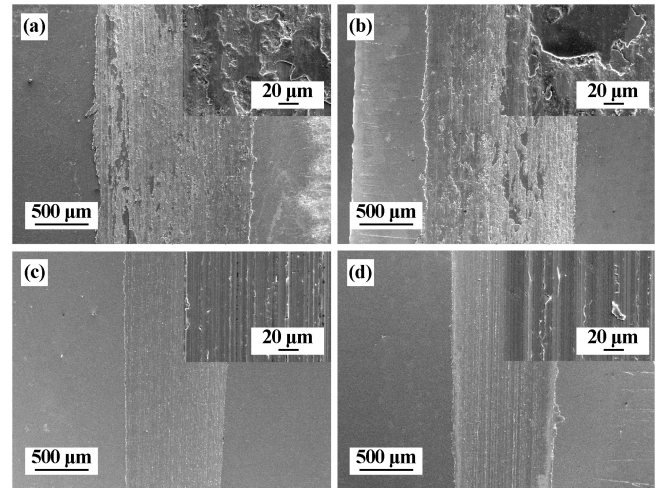
(a) 摩擦因数; (b) 磨损率

图 13 不同工况、不同状态样品的腐蚀磨损性能

Fig. 13 Corrosive wear of different samples under different working condition

体熔覆层的磨损率分别较熔覆态熔覆层降低约 12.0% 和 57.0%。乳化液条件时,经过预热、退火热处理后奥氏体熔覆层的摩擦因数同样下降,说明热处理有效改善了奥氏体熔覆层的减摩效果。其次,预热态、退火态熔覆层的磨损率较熔覆态熔覆层分别降低约 50.0% 和 27.5%。因此,预热和退火均有助于改善奥氏体熔覆层在干摩擦/乳化液工况中的磨损性能,尤其是退火态熔覆层具有更为优异的耐磨蚀性能。

不同工况、不同状态样品的磨痕形貌如图 14 所示。干摩擦工况中,预热态、退火态奥氏体熔覆层表面存在明显的剥落和微犁沟现象,且退火态熔覆层磨损表面更为平滑,磨损机制以磨粒磨损与黏着磨损为主;乳化液工况时,预热态、退火态奥氏体熔覆层磨痕表面以微犁沟为主,磨损机制为磨粒磨损。预热、退火热处理过程熔覆层微观组织的转变以及伴随的力学和耐蚀性能改善是提高其耐磨抗蚀性能的主要原因。



(a) 干摩擦工况, 预热态; (b) 干摩擦工况, 退火态; (c) 乳化液工况, 预热态; (d) 乳化液工况, 退火态

图 14 不同工况、不同状态样品的磨痕形貌

Fig. 14 Morphology of worn surface of different samples under different working condition

### 3 结论

1) 经过预热、退火热处理后,以奥氏体组织为主的不锈钢熔覆层组织出现了晶粒长大和(111)晶面的择优转变。

2) 经过预热、退火热处理后,奥氏体熔覆层硬度保持稳定,然而热影响区硬度明显下降,且熔覆层抗拉强度、延伸率与冲击性能明显改善,归因于熔覆层的沿晶断裂倾向减弱和热影响区的韧性断裂倾向加强的共同作用。

(下转第 223 页)

- 220-225.
- [6] SHI Y, JIN H, WU P D. Analysis of cup earing for AA3104-H19 aluminum alloy sheet [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2018, 69: 1-11.
- [7] PAPAPOPOULOU S, GAVALAS E, VOURLAKOU C, et al. The influence of second phase particles on texture during rolling of Al 3104[J]. *International Journal of Material Forming*, 2022, 15(6): 1-14.
- [8] EVGENII A, KAWALLA R, VLADIMIR A, et al. Investigation of texture and structure evolution during hot rolling of 1070, 3104 and 8011 aluminum alloys in continuous mill[J]. *La Metallurgia Italiana*, 2017, 109(3): 11-21.
- [9] TANG J, ZHANG X, DENG Y, et al. Texture decomposition with particle swarm optimization method[J]. *Computational Materials Science*, 2006, 38(2): 395-399.
- [10] JIAO H, XU Y, ZHAO L, et al. Texture evolution in twin-roll strip cast non-oriented electrical steel with strong Cube and Goss texture[J]. *Acta Materialia*, 2020, 199: 311-325.
- [11] ZHAO Q, LIU Z, LI S, et al. Evolution of the Brass texture in an Al-Cu-Mg alloy during hot rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 691: 786-799.
- [12] AHL S R, SIMONS H, DETLEFS C, et al. Subgrain dynamics during recovery of partly recrystallized aluminum[J]. *Acta Materialia*, 2020, 185: 142-148.
- [13] HUANG K, LOGÉ R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials[J]. *Materials & Design*, 2016, 111: 548-574.
- 引用本文:**赵千愉,叶凌英,韦卫昌,等.热终轧温度对罐体材料用3104铝合金织构演变的影响[J].*矿冶工程*, 2025, 45(3): 218-223.
- ZHAO Qianyu, YE Lingying, WEI Weichang, et al. Effect of finish rolling temperature on texture evolution of 3104 aluminum alloy for tank material[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(3): 218-223.

(上接第217页)

3) 经过预热、退火热处理后,奥氏体不锈钢熔覆层腐蚀电流降低,阻抗升高,点蚀坑区域Cr含量升高,且干摩擦及乳化液工况中熔覆层的摩擦因数和磨损率均明显下降,磨损表面更加光滑,归因于预热、退火过程熔覆层的微观组织转变及伴随的力学和耐磨抗蚀性能改善,尤其是退火热处理效果更为明显。

#### 参考文献(References):

- [1] 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].*表面技术*, 2020, 49(10): 1-11.
- ZHANG Jinchao, SHI Shihong, GONG Yanqi, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 1-11.
- [2] LIU Y N, DING Y, YANG L J, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 341-363.
- [3] 李聪玮,刘泽,王明,等.铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J].*矿冶工程*, 2021, 41(5): 149-152.
- LI Congwei, LIU Ze, WANG Ming, et al. Microstructure, friction and wear properties of iron-based laser cladding coating[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(5): 149-152.
- [4] SHI D S, FABIJANIC D, BARR C, et al. In-situ quench and tempering for microstructure control and enhanced mechanical properties of laser cladded AISI 420 stainless steel powder on 300M steel substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 333: 210-219.
- [5] HALDAR B, SAHA P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 13090-13101.
- [6] 董会,郭鹏飞,徐龙,等.热处理温度对高速激光熔覆Ni/316L涂层组织及摩擦磨损性能的影响[J].*表面技术*, 2022, 51(5): 111-120.
- DONG Hui, GUO Pengfei, XU Long, et al. Effect of heat treatment temperature on microstructure and friction and wear properties of high-speed laser cladded Ni/316L coating[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(5): 111-120.
- [7] 张海瑜. 液压支架油缸内壁熔覆层的组织与性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- ZHANG Haiyu. Study on microstructure and properties of cladding layer on inner wall of hydraulic support cylinder[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [8] 贺天柱,吴喆,张成武,等.扫描速度对车用316L不锈钢熔覆层组织及力学性能的影响[J].*矿冶工程*, 2023, 43(5): 159-163.
- HE Tianzhu, WU Zhe, ZHANG Chengwu, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and hardness of laser cladded 316L coating[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(5): 159-163.
- [9] 郭长辉,李聪玮,杨辉,等.预热对27SiMn钢激光熔覆热影响区显微组织和力学性能的影响[J].*矿冶工程*, 2023, 43(1): 145-149.
- GUO Changhui, LI Congwei, YANG Hui, et al. Effects of preheating on microstructures and mechanical properties of heat affected zone of 27SiMn steel after laser cladding process[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(1): 145-149.
- [10] 刘东雨,徐鸿,杨昆,等.贝氏体/马氏体复相组织对低碳合金钢强韧性的影响[J].*金属学报*, 2004, 40(8): 882-886.
- LIU Dongyu, XU Hong, YANG Kun, et al. Effect of bainite/martensite mixed micro-structure on the strength and toughness of low carbon alloy steels[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2004, 40(8): 882-886.
- 引用本文:**吉效科,毛勇,李茂,等.热处理对奥氏体不锈钢熔覆层微观组织、力学性能和服役性能的影响[J].*矿冶工程*, 2025, 45(3): 212-217.
- Ji Xiaoke, MAO Yong, LI Mao, et al. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and service performance of cladded coating of austenitic stainless steel[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(3): 212-217.