

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.13

激光沉积304/Norem 02梯度过渡层组织和性能研究

韩潮宇^{1,2}, 杨佳¹, 谢臻轩³, 黄远⁴, 王开坤², 朱平¹, 陈忠兵^{1*}

1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215000
2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083
3. 苏州大学 沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215000
4. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300000

摘要: 为解决铁基合金阀门密封面电弧堆焊制造过程中基体与堆焊层界面处易产生焊接热裂纹的问题, 引入梯度过渡的思路, 根据JMatpro和Thermo-Calc计算获得的硬度和析出相随Norem 02合金含量的变化规律, 设计了两种不同的梯度过渡层。采用激光直接能量沉积的方法制备了不同梯度过渡沉积层和无过渡沉积层, 并系统对比分析了三种沉积层的显微组织、硬度分布及摩擦磨损性能。结果表明, 梯度过渡沉积层界面两侧硬度梯度较小, 界面附近沉积层组织以一次枝晶形貌为主, 沿枝晶间处分布富Cr一次碳化物。无过渡沉积层界面两侧硬度梯度较大, 沉积层一次枝晶间处分布着大量的富Cr共晶组织, 二次枝晶臂处存在富Mo一次碳化物。通过采用梯度过渡沉积方式, 缓解了界面处过大的硬度梯度, 消除了界面附近的低熔点共晶组织, 对降低焊接热裂纹倾向起到积极作用。但是, 梯度过渡沉积层在摩擦磨损测试过程中抗塑性变形能力较差, 磨损量较大。梯度过渡沉积层耐磨性不足与激光沉积稀释率较大有关, 导致其最表层Norem 02合金含量低于设计值。后续可通过调整激光沉积工艺进行优化, 以提高梯度过渡沉积层表层的耐磨性。

关键词: 激光沉积; 梯度过渡; 铁基合金; 显微组织; 摩擦磨损

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0095-09

Research on Microstructure and Properties of 304/Norem 02 Gradient Transition Layer by Laser Direct Energy Deposition

HAN Chaoyu^{1,2}, YANG Jia¹, XIE Zhenxuan¹, HUANG Yuan⁴, WANG Kaikun¹, ZHU Ping¹, CHEN Zhongbing^{1*}

1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, China
2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100080, China
3. Shagang Institute of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, China
4. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China

Abstract: To solve the problem of welding hot cracks at the interface between the substrate and the iron-based sealing surfaces during arc surfacing process, this paper introduced the idea of gradient transition. The variations of hardness and precipitates with the content of Norem 02 alloy in the gradient transition layer were analyzed by JMatPro and Thermo-Calc software. Based on the calculation results, two gradient transition strategies were designed. Different gradient transition deposition layers and non-transition deposition layers were prepared by the direct laser energy deposition, and the microstructure, hardness distribution, wear performance was studied systematically. The results showed that the gradient transition layers exhibited a smaller hardness gradient at the interface, and the microstructure primarily consisting of primary dendrites and Cr-rich primary carbides distributed along the interdendritic regions. In contrast, the non-transition layers showed a larger hardness gradient at the interface, and abundant Cr-rich eutectic phases at the interdendritic regions and Mo-rich primary carbides at the secondary dendrite arms were found. The gradient transition layers effectively reduced the excessive hardness

收稿日期: 2025-04-30 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(U23B2073); 江苏省自然科学基金(BK20221244); 中国博士后科学基金(2024M752338)

作者简介: 韩潮宇(1992—), 男, 工程师, 博士, 主要从事电站设备焊接结构完整性研究。

通讯作者: 陈忠兵(1966—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事电站构件及其焊接接头完整性研究。E-mail: czbing2000@163.com。



gradient at the interface and eliminated eutectic phases with low melting point, thereby mitigating the hot cracks tendency. However, the gradient transition layers demonstrated poorer resistance to plastic deformation, resulting in higher wear rates. The low wear resistance of the gradient transition layers was attributed to the high dilution rate in laser deposition, leading to a lower than designed Norem 02 alloy content in the outer layer. Future optimization of the laser deposition process is expected to improve the wear resistance of the gradient transition layers.

Keywords: laser deposition; gradient transition; iron-based alloy; microstructure; wear

引用格式:韩潮宇,杨佳,谢臻轩,等.激光沉积304/Norem 02梯度过渡层组织和性能研究[J].电焊机,2025,55(6):95-103.

Citation:HAN Chaoyu, YANG Jia, XIE Zhenxuan, et al. Research on Microstructure and Properties of 304/Norem 02 Gradient Transition Layer by Laser Direct Energy Deposition[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 95-103.

0 引言

阀门是核岛设备中的重要关键部件,服役期间其密封面在热态下会受到擦伤、冲刷、腐蚀、氧化等作用,故对密封面材料的耐磨性与耐腐蚀性提出了严苛要求^[1]。在过去的几十年内,广泛采用以 Stellite 为代表的钴基合金堆焊熔覆方法来制造核级阀门密封面^[2-3]。然而,钴基合金密封面在磨损后产生的碎屑中,⁵⁹Co 会受到辐射激发形成半衰期很长的放射性同位素 ⁶⁰Co,增加了检修人员受辐射剂量和运维成本^[4-5]。

为了尽可能降低在核岛中使用钴基合金阀门的比例,美国电力协会(EPRI)开发了无钴铁基合金 Norem 02 来代替钴基合金,该合金在耐磨性方面几乎可以达到与钴基合金相当的水平^[6-7]。但是 Norem 02 合金焊接性较差,容易产生焊接热裂纹,制造工艺窗口极窄。导致铁基合金焊接性较差的因素主要包括两方面:一是阀座材料(一般为奥氏体不锈钢)与密封面沉积层界面处两侧材料较大的物理性能(硬度、热膨胀系数)差异,使得界面处产生较高的应力集中,诱发开裂^[8];二是在焊接凝固过程中,界面处产生的低熔点共晶脆性相易成为裂纹的起裂源^[9]。

为了解决界面处两侧材料物理性能差异较大的问题,有学者采用过渡层的方式,通过制备母材1+过渡层+母材2的复合接头,降低界面处的化学成分梯度,以降低界面应力^[10-11]。但是,由于过渡层大多为单一均质材料,成分未经特别设计,导致其选择性和适用性明显不足^[12]。

本研究通过设计合理的过渡梯度,以实现沉积

层化学成分的连续梯度过渡,降低界面应力集中程度,抑制界面处焊接热裂纹的形成。采用激光直接能量沉积的方式制备梯度过渡层,并对梯度过渡沉积层和无过渡沉积层的显微组织和力学性能进行对比分析,建立梯度过渡层成分—显微组织—耐磨性的关系,为进一步优化过渡梯度的设计及性能调控提供理论指导。

1 试验方法与设备

1.1 试验材料

为了实现沉积层成分由304不锈钢至Norem 02硬质合金的梯度过渡,本研究选用304和Norem 02两种金属粉末进行梯度过渡层的制造。两种金属的粉末形貌如图1所示,304粉末为球形,表面较为光滑(见图1a);Norem 02粉末颗粒形貌虽也呈球状,但是其表面较为粗糙(见图1b)。Norem 02粉末颗粒表面粗糙度较大,推测与其组织中存在大量析出相有关。304粉末和Norem 02粉末颗粒的粒径分布分别如图1c、1d所示,其粒径分布范围主要在53~106 μm之间。采用厚度为10 mm的304不锈钢板作为基板材料,基板及两种合金粉末的具体成分如表1所示。

1.2 梯度过渡层设计

梯度过渡层的化学成分需根据两种材料不同混合比例下的性能进行特殊设计。过渡层设计应遵循以下两点要求:(1)尽可能降低界面两侧物理性能差异;(2)尽可能保证表面抗摩擦磨损性能良好。基于上述两点,采用Jmatpro材料物理性能计算软件,对不同比例的304+Norem 02合金进行了硬



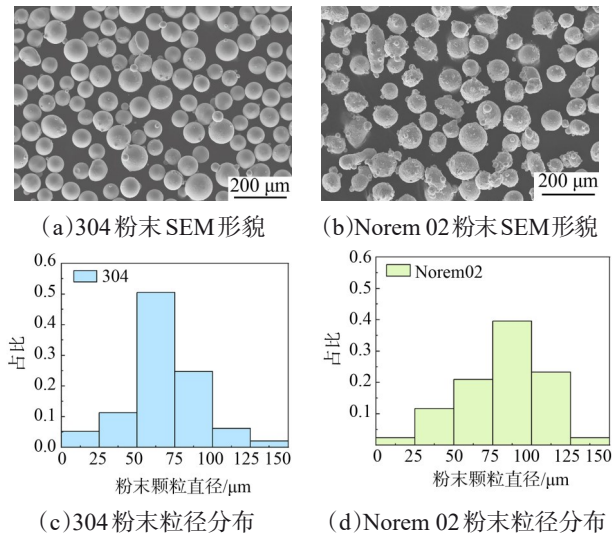


图1 金属粉末形貌和粒径分布

Fig. 1 Morphology and particle size distribution of metal powders

表1 熔覆金属粉末和基板化学成分(质量分数,%)

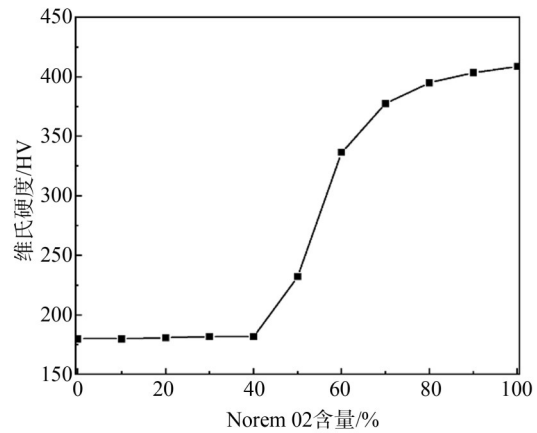
材料	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	B	N	Fe
304 基板	0.03	0.39	1.03	7.83	18.22	0.01	—	—	bal
304 粉末	0.01	0.20	1.12	10.50	18.62	—	—	0.107	bal
Norem 02 粉末	1.38	3.26	4.28	4.08	25.32	1.99	0.02	0.03	bal

度计算,其结果如图2a所示。由图2a可见,当过渡层合金中Norem 02占比大于40%时,其硬度呈明显增长趋势。此外,还通过Thermo-Calc热力学软件中Scheil非平衡凝固模块计算得到了不同混合比例下过渡层合金中一次析出相的占比,如图2b所示。当Norem 02占比大于30%时, M_7C_3 共晶碳化物开始析出。 M_7C_3 共晶碳化物作为Norem 02合金中主要的析出相,对其硬度有较大的影响,该结果与硬度变化趋势也较为一致。

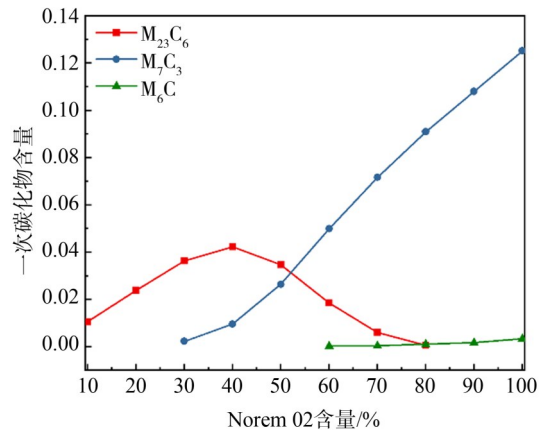
基于以上性能和析出相的计算结果,设计了如下两种过渡层,分别记作40-70-100和10-55-100,具体如表2所示。此外,还准备了一组无过渡沉积层以作为对照组。

1.3 激光熔覆工艺

激光直接能量沉积(L-DED)平台由YLS-2000-TR型光纤激光器、GTV PF2/2M型送粉机、KUKA机械臂、中空环形同轴送粉激光头、水冷系统和保护气系统组成。采用氩气作为送粉和保护气氛。沉积过程采用连续Z字形往复扫描沉积策略,扫描



(a)显微硬度随Norem 02含量变化规律



(b)析出相含量随Norem 02含量变化规律

图2 不同304和Norem 02混合比例下硬度和一次析出相含量

Fig. 2 Hardness and primary precipitation content under different mixing ratios of 304 and Norem 02

表2 不同梯度过渡沉积层合金占比

过渡方式	第一层	第二层	第三层
40-70-100	40% Norem 02 + 60% 304	70% Norem 02 + 30% 304	100% Norem 02
10-55-100	10% Norem 02 + 90% 304	55% Norem 02 + 45% 304	100% Norem 02
无过渡	100% Norem 02	100% Norem 02	100% Norem 02

方向(Scanning Direction, SD)如图3a所示。单层共计扫描15道,搭接率30%,宽度方向(Transverse Direction, TD)沉积层尺寸约为20 mm。每层扫描策略相同,扫描长度约为30 mm,如图3b所示。不同于其他梯度过渡方式,考虑到此类硬质合金材料进行熔覆时熔覆层数越多,热应力越大,越容易产生裂纹,故一般仅熔覆三层。每层沉积层厚度方向(Building Direction, BD)尺寸约为1 250 μm,三层沉积

层总厚度约为4 mm,如图3c所示。具体的激光工艺参数如表3所示。

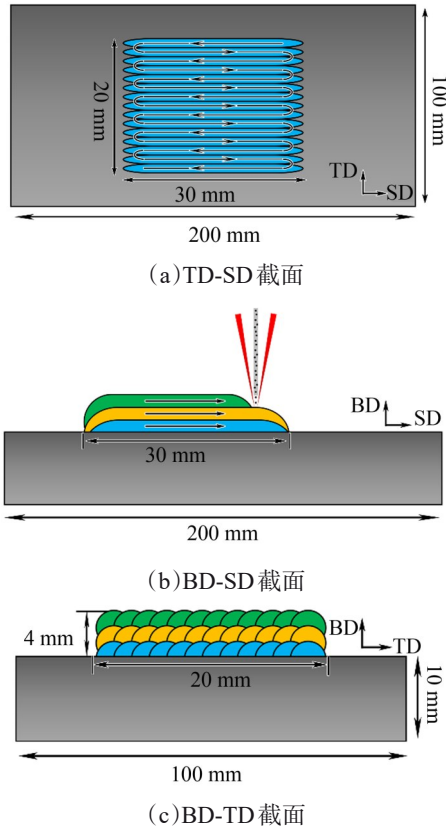


图3 激光沉积扫描策略

Fig. 3 Laser deposition scanning strategy

表3 具体激光沉积工艺参数

Table 3 Specific laser deposition process parameters

功率 /W	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	送粉速度 /(g·min ⁻¹)	离焦量 /mm	搭接率 /%
1 050	4	2	-1	30

1.4 组织及性能表征

激光熔覆完成后,线切割加工金相试样,其尺寸大小为10 mm (BD)×10 mm (TD)×1.5 mm (SD),随后对BD-TD截面进行机械磨抛。采用10%草酸水溶液对试样进行电解腐蚀,电压3 V,时间15 s。采用Olympus CX14型光学显微镜进行宏观组织观察,采用HITACHI SU8220冷场发射扫描电镜进行显微组织形貌观察和能谱分析。采用FM-810型显微维氏硬度仪对基体和沉积层进行显微维氏硬度测试,测试载荷200 g,保载时间10 s。

采用UMT TriboLab摩擦磨损试验机对沉积层上表面(TD-SD截面)进行摩擦磨损测试。摩擦磨

损试样经线切割取样后进行机械磨抛,以保证表面平整度。摩擦磨损试样尺寸为10 mm (TD)×10 mm (SD)×2.5 mm (BD)。摩擦磨损测试采用 $\varnothing 4$ mm氧化铝小球,室温往复干摩擦,行程5 mm,载荷5 N,频率5 Hz,时间30 min。摩擦磨损测试完成后,采用ZYGO NexView NX2白光干涉仪对磨痕三维形貌进行观察,并通过体积法计算磨损量。此外,采用SEM对磨痕形貌进行观察。

2 试验结果及分析

2.1 梯度过渡层显微组织

沿BD-TD截面对不同过渡方式沉积层进行显微硬度测试,显微硬度压痕位置及对应的硬度值如图4所示。采用梯度过渡的沉积方式,在304基体与沉积层界面两侧的硬度梯度得到明显减小,硬度过渡较为平缓,如图4a、图4b所示。而无过渡沉积层与基体之间的硬度差异较大,硬度值从250 HV急剧增加至450 HV,如图4c所示。对比两种不同梯度过渡方式沉积层的硬度分布可以看出,40-70-100过渡沉积层后两层整体硬度高于10-55-100过渡沉积层后两层整体硬度,且在近表层硬度值可达457 HV。从沉积层硬度分布来看,40-70-100过渡沉积层在界面处硬度过渡平缓,且在近表层硬度值更高,与Jmatpro计算结果较为吻合。

采用电子探针(EPMA)沿BD-TD截面进行成分点分析,以获得沿沉积层厚度方向(BD方向)合金元素的分布规律,EPMA光斑直径3 μm ,测试位置位于硬度点上方,测试步长与硬度测试步长相同,均为250 μm ,三组试样EPMA测试结果如图5所示。以304不锈钢和Norem 02合金中主合金元素Cr和Ni元素沿沉积方向的分布为例,可以看出,40-70-100过渡沉积层Ni元素过渡更为平缓,在基体与沉积层界面处并未形成明显阶梯状分布。

对不同沉积层界面处进行光镜观察。如图6a、图6b所示,过渡沉积层熔池熔深较大;而无过渡沉积层熔池熔深较小,如图6c所示。在304基体与沉积层界面处,不同沉积层的组织生长模式均由平面晶转变为树枝状晶^[13],如图6a~图6c所示。通过光镜形貌可以看出,在界面上方的过渡沉积层组织形

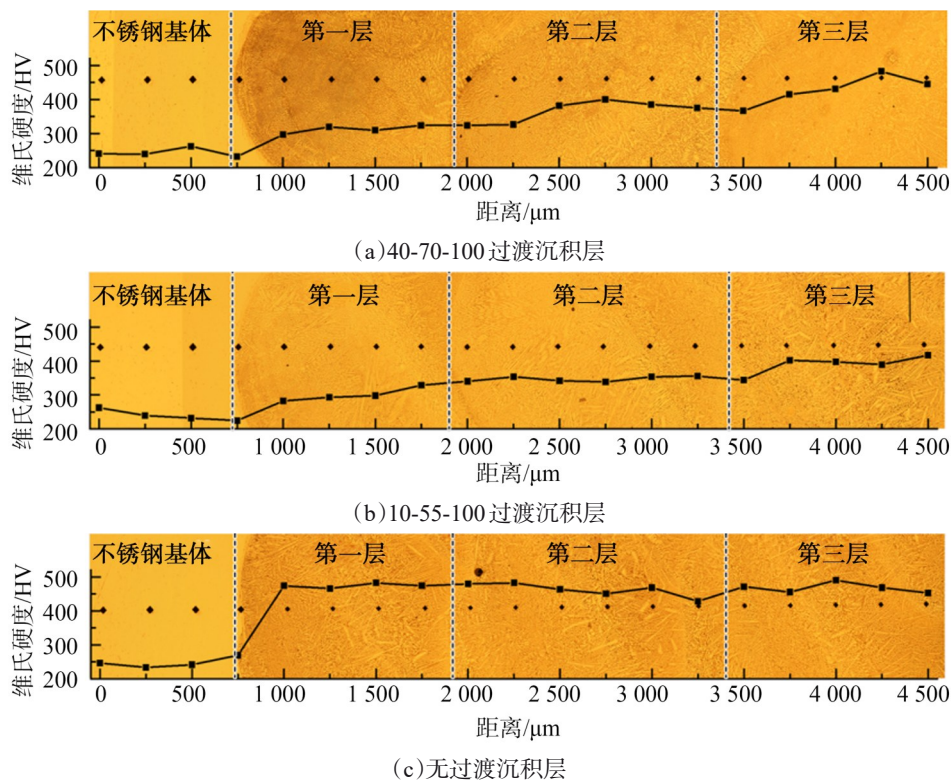


图 4 不同沉积层显微维氏硬度测试位置及结果

Fig. 4 Location and results of the micro-vickers hardness test for different deposited layers

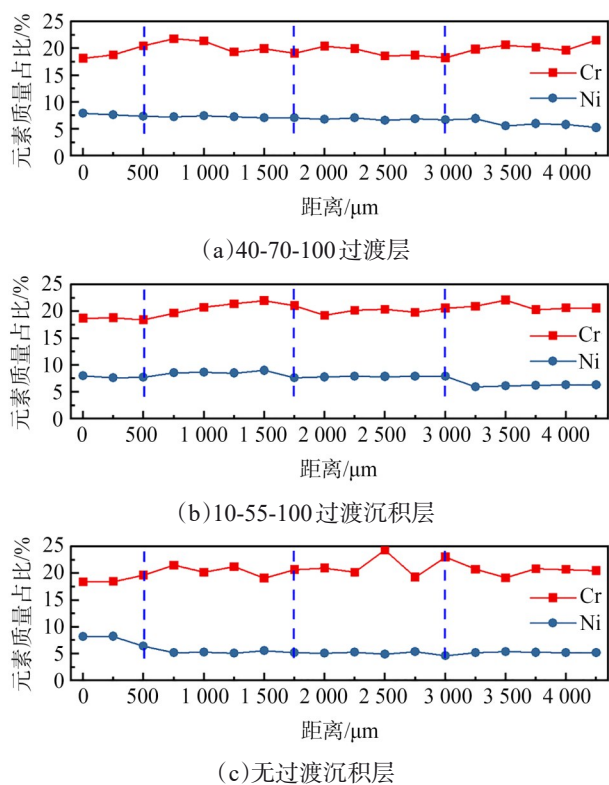


图 5 不同沉积层 EPMA 测试结果

Fig. 5 EPMA test results of different deposited layers

貌以一次枝晶为主,枝晶生长方向各异,如图 6a 和图 6b 所示。与过渡沉积层组织明显不同,无过渡沉积层显微组织中,可以明显观察到在其枝晶间位置处存在大量的深褐色组织,且相邻枝晶间之间存在二次枝晶组织,如图 6c 所示。

对 40-70-100 过渡沉积层第一层的显微组织进行成分面扫描分析,其结果如图 7 所示。从图 7a 中可以看出,沿着枝晶间位置分布着大量长条状析出相,这些析出相主要富 C、Cr、Mo、Mn 等元素,贫 Fe 元素,推测可能为一次析出的 M_7C_3 型碳化物。由于采用梯度过渡方式,第一层沉积层中 Norem 02 合金含量降低,C 元素含量较低,故并不会发生 $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$ 的共晶转变,而是在枝晶间处形成一次碳化物。

对无过渡沉积层第一层显微组织进行成分面扫描分析,其结果如图 8 所示。从图 8a 中可以看出,枝晶晶处存在大量层片状组织。根据成分分布可以判断出层片状组织由富 Fe 相和富 Cr 相组成共同组成,为 $\gamma + M_7C_3$ 共晶组织。此外,在二次枝晶臂上发现了富 Mo 贫 Fe 相组织,推测其为一次析出的 M_6C 型碳化物。

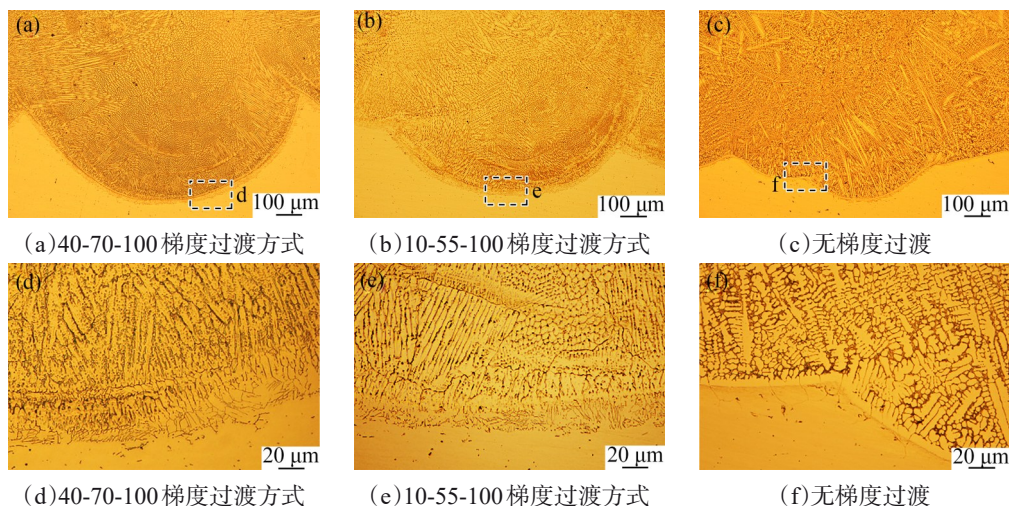


图6 不同沉积层显微组织形貌

Fig. 6 Microstructure morphology of different deposited layers

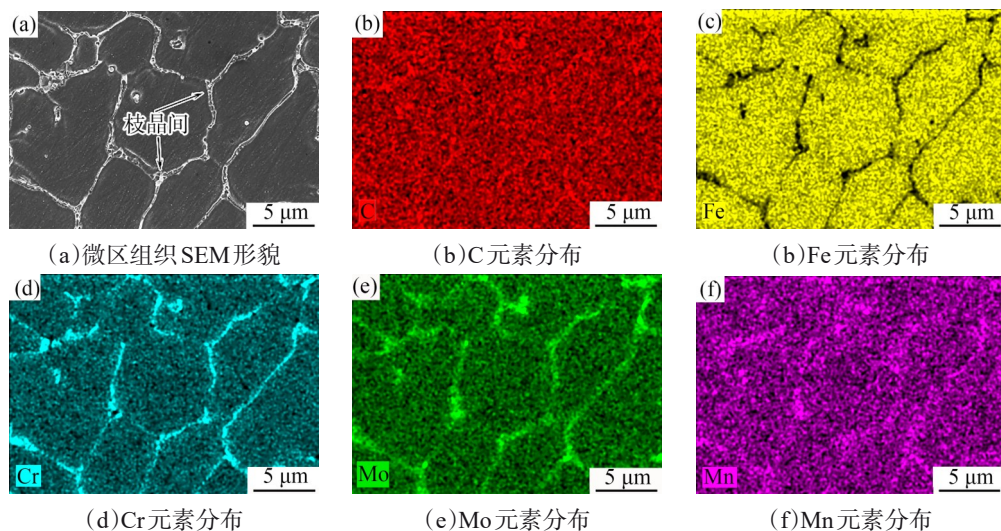


图7 40-70-100过渡沉积层第一层微区组织形貌及成分分布

Fig. 7 Microstructure and composition distribution in the first layer of the 40-70-100 deposited layer

通过以上对不同过渡方式沉积层的硬度、成分及显微组织分析发现,采用梯度过渡方式可以有效降低基体与沉积层界面两侧之间的硬度梯度,避免了沉积层第一层凝固过程中发生共晶转变,消除了界面附近低熔点共晶组织,对降低界面处产生焊接热裂纹起到了一定的抑制作用。

2.2 表层摩擦磨损性能

为了对比不同沉积层的耐磨性,对沉积层TD-SD截面最外层进行摩擦磨损性能测试。不同沉积层摩擦系数随时间的变化趋势如图9所示,40-70-100过渡沉积层和无过渡沉积层摩擦系数随时间的增加而增加,10-55-100过渡沉积层摩擦系数较为

稳定。对测试后的磨痕进行白光观察。截取了不同沉积层磨痕的三维形貌,如图10所示。可以明显看出,无过渡沉积层磨痕宽度明显较窄,如图10c所示。对不同沉积层磨痕的深度、宽度及整体磨损量进行测量,其结果如表4所示。可以看出,40-70-100过渡沉积层磨损量略低于10-55-100过渡沉积层,但明显高于无过渡沉积层的磨损量,耐磨性低于无过渡沉积层。

导致梯度过渡沉积层耐磨性较差的原因与其沉积稀释率有关。从图6a、6b可以看出,梯度过渡沉积的熔深较大,沉积层被304基体稀释得较为严重。以40-70-100过渡沉积层为例,受沉积稀释率

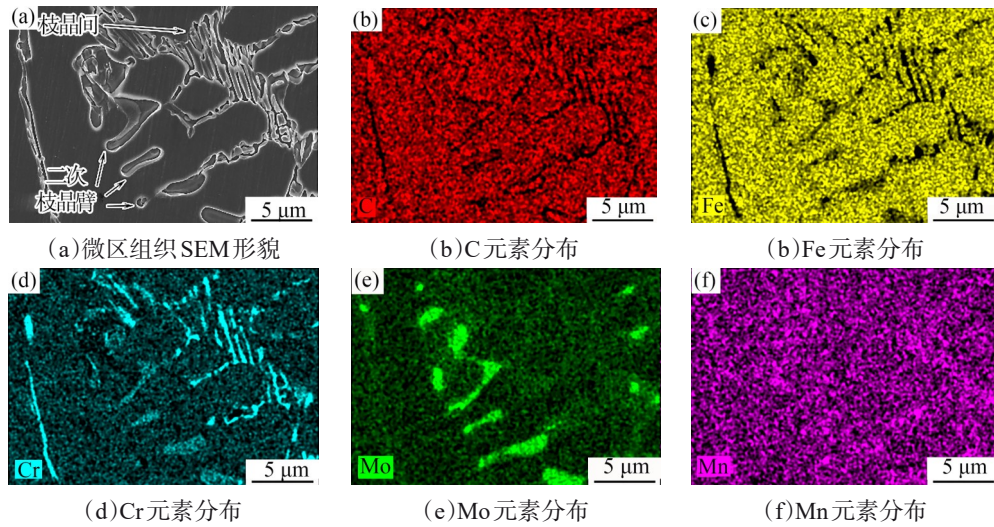


图 8 无梯度过渡沉积层微区组织形貌及成分分布

Fig. 8 The microstructure and composition distribution in the first layer of the non-transition deposited layer

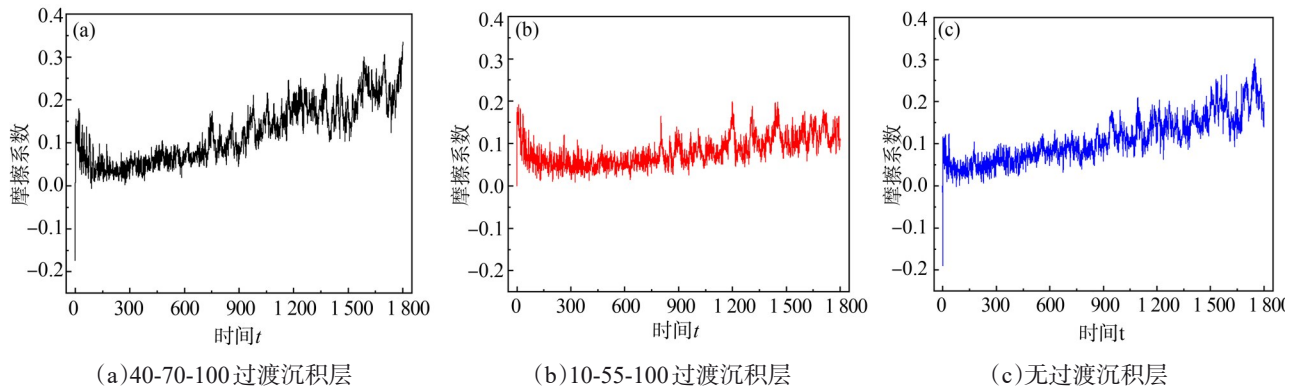


图 9 不同沉积层表层摩擦系数

Fig. 9 Coefficient of friction of different deposited layers

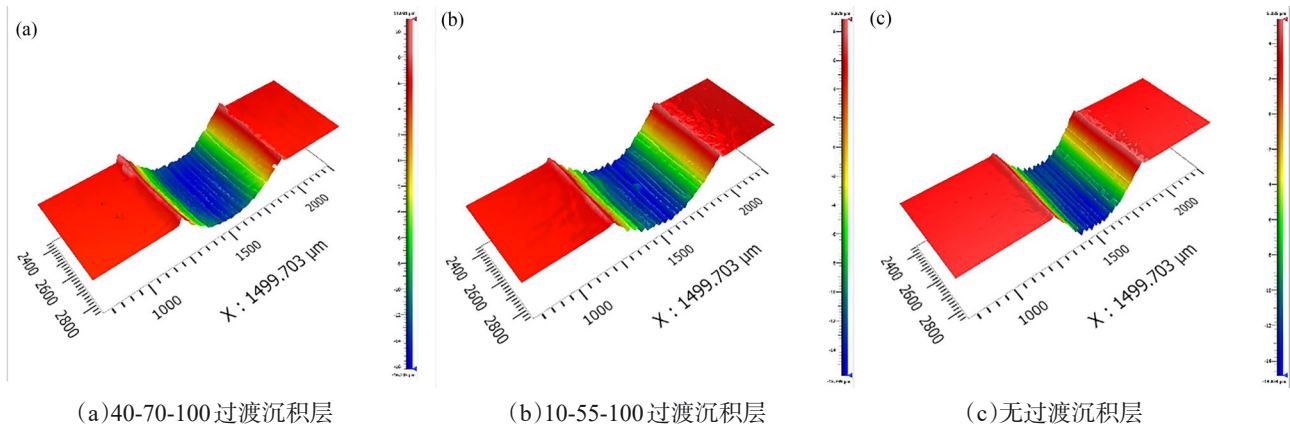


图 10 不同沉积层磨痕白光测试结果

Fig. 10 White light test results of wear tracks on different deposited layers

的影响,第一层沉积层中 Norem 02 合金含量会低于 40%。随后沉积的第二和第三层中 Norem 02 的含量也会低于设计的 70% 和 100%,从而导致摩擦磨

损测试的表面 Norem 02 合金含量低于 100%,耐磨性低于无过渡沉积层的耐磨性。

对不同沉积层磨痕形貌进行 SEM 观察,其结果

表4 不同沉积层表层磨痕尺寸及磨损量

Table 4 The size of wear tracks and the amount of wear of different deposited layers

过渡方式	磨痕深度/ μm	磨痕宽度/ μm	磨损量/ μm^3
40-70-100	21.683	598.331	35 553 271
10-55-100	20.411	609.808	38 303 055
无过渡	18.501	495.492	23 459 427

如图11所示。不同沉积层磨痕表面均存在大量的犁沟,为典型的磨粒磨损。犁沟深度较浅,边缘存在层状折痕,折痕上存在二次裂纹,如图11a、11c中所示。根据犁沟深度较浅认为磨粒压入深度较小,

材料塑性流动较小,磨损机制以微观切削为主^[14]。对比不同沉积层磨痕的犁沟宽度,可以发现10-55-100过渡沉积层磨痕的犁沟宽度较宽,如图11b所示。犁沟宽度较大,说明其抗塑性变形能力较弱,在摩擦过程中发生了更多的塑性流动,导致更快的材料损失,磨损量较大,耐磨性较差。从磨痕形貌角度,也说明了10-55-100过渡沉积层的耐磨性较差,与白光测试结果较为一致。此外,在无过渡沉积层磨痕表面还观察到剥落坑,推测可能是共晶组织在摩擦过程中发生了脱落。

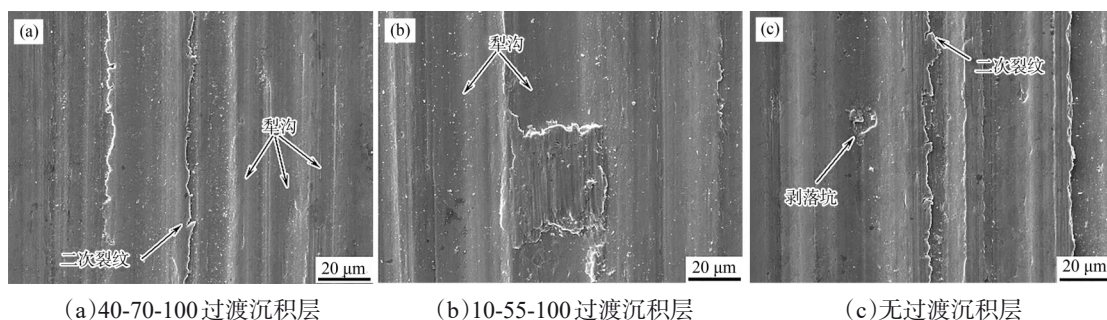


图11 不同沉积层磨痕SEM形貌

Fig. 11 SEM morphologies of the wear tracks on different deposited layers

从目前的试验结果来看,40-70-100梯度过渡沉积层相比于10-55-100过渡沉积层具有更好的耐磨性,且对于降低界面处硬度梯度有着较好的效果。从梯度过渡层的设计、制备及组织性能测试结果来看,已经初步达到了设计要求,即可大幅降低界面处硬度梯度,减少了低熔点共晶相的数量,对于提高焊接质量有着积极的作用。

3 结论

为了解决在304不锈钢上直接沉积Norem 02合金,其沉积界面处会产生焊接热裂纹的问题,本研究提出了采用梯度过渡的沉积方式,基于材料性能计算和析出相计算方法,设计了两种不同梯度过渡方式,并采用激光沉积方式进行制备。通过对梯度过渡沉积层和无过渡沉积层进行显微组织和耐磨性进行分析,现有如下结论:

(1)采用梯度过渡方式在304不锈钢上沉积Norem 02合金,通过降低界面两侧成分梯度,大幅降低了界面处的硬度梯度。

(2)梯度过渡层界面附近组织由一次枝晶形貌的基体和沿枝晶间分布的条状富Cr一次碳化物组成。而无过渡沉积层界面附近组织则由基体、一次枝晶间处的富Cr共晶相和二次枝晶臂处的富Mo一次碳化物组成。

(3)梯度过渡层可以有效降低界面处成分和硬度梯度,消除界面附近的低熔点共晶相,对抑制界面处的焊接热裂纹存在积极的作用。

(4)梯度过渡沉积层相比于无过渡沉积层,其抗磨损能力较弱。在摩擦过程中,梯度过渡沉积层塑性流动较大,磨损量较大,耐磨性不足。

(5)梯度过渡沉积层耐磨性较低主要与激光沉积较大的稀释率有关,导致其最外层成分低于Norem 02合金成分。后续可通过优化激光沉积工艺调整沉积稀释率,以提高梯度过渡沉积层的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 汤丹,王建新. 钴基合金在阀门密封面上的应用[J]. 阀门,2012(05):19-22.
TANG D, WANG J X. Application of cobalt-based al-

- loys on valve sealing surfaces[J]. Valves, 2012(05): 19-22.
- [2] Dufrane K F, Ocken H. Measurements of wear in nuclear components [J]. Wear, 1985, 101(1): 13-31.
- [3] Bahn C B, Han B C, Bum J S, et al. Wear performance and activity reduction effect of Co-free valves in PWR environment [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231(1): 51-65.
- [4] Ocken H. Reducing the Cobalt Inventory in Light Water Reactors [J]. Nuclear Technology, 2017, 68(1): 18-28.
- [5] 刘双, 石世宏, 魏宏璞, 等. 强化核阀密封面的 NOREM02 激光熔覆层性能研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(04): 365-369.
LIU S, SHI S H, WEI H P, et al. Performance Research of NOREM02 Laser Cladding Layer on the Sealing Surface of Nuclear Valves[J]. Lasers and Infrared, 2010, 40(04): 365-369.
- [6] Ocken H. The galling wear resistance of new iron-base hardfacing alloys: a comparison with established cobalt- and nickel-base alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76-77: 456-461.
- [7] 孙志强, 李予卫, 吴义党, 等. 无钴基硬质合金在核级阀门中的应用分析[J]. 焊接技术, 2024, 53(02): 11-15.
SUN Z Q, LI Y W, WU Y D, et al. Analysis of the application of cobalt-free hard alloys in nuclear-grade valves[J]. Welding Technology, 2024, 53(02): 11-15.
- [8] 汤恒, 银帮耀, 王琪, 等. 核电机组主蒸汽安全阀阀瓣密封面堆焊层开裂原因分析及预防措施[J]. 电焊机, 2024, 54(04): 63-70.
TANG H, YIN B Y, WANG Q, et al. Analysis of the Cause of Cracking in the Overlay Welding Layer on the Sealing Surface of the Main Steam Safety Valve of Nuclear Power Units and Preventive Measures[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(04): 63-70.
- [9] Que Z, Ahonen M, Virkkunen I, et al. Study of cracking and microstructure in Co-free valve seat hardfacing[J]. Nuclear Materials and Energy, 2022, 31: 101202.
- [10] Saleh B, Jiang J, Fathi R, et al. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 201: 108376.
- [11] Sanjeevprakash K, Kannan A R, Shanmugam N S. Additive manufacturing of metal-based functionally graded materials: overview, recent advancements and challenges[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(5): 241.
- [12] 杨光磊, 王东, 李玉艳, 等. ENiCrFe-3 过渡层对钴基硬质层成分和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(04): 131-134.
YANG G L, WANG D, LI Y Y, et al. Influence of ENiCrFe-3 Transition Layer on the Composition and Properties of Cobalt-based Hard Layer [J]. Thermal Processing Technology, 2019, 48(04): 131-134.
- [13] 李克俭, 李晓刚, 张宇, 等. 异种金属焊接接头微观组织演化及高温失效机理综述[J]. 电焊机, 2020, 50(09): 17-43.
LI K J, LI X G, ZHANG Y, et al. A review on the microstructure evolution and high-temperature failure mechanism of dissimilar metal welding joints[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(09): 17-43.
- [14] Zhuang M, Li M, Wang J, et al. Study on Composition, Microstructure and Wear Behavior of Fe-B-C Wear-Resistant Surfacing Alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(12): 6182-6192.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

