

镍基熔覆层表面超声冲击处理组织及耐蚀性研究

李美艳¹, 张琪¹, 杨洁¹, 韩彬¹, 宋立新²

(1. 中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520)

摘要: **目的** 提升激光熔覆 Ni 基涂层表面组织及耐蚀性能。**方法** 采用激光熔覆技术制备成形好、无裂纹的 Ni 基涂层, 随后进行超声冲击处理。采用扫描电子显微镜 (SEM)、电子探针 (EPMA) 及电化学设备等, 研究熔覆层和冲击硬化层的组织及耐蚀性能, 分析 Ni 基熔覆层的冲击强化机制。**结果** 激光熔覆 Ni 基涂层主要由 γ -(Fe,Ni) 固溶体和晶界碳化物组成, 组织形貌由底及表为胞状树枝晶和细小的树枝晶。熔覆层内晶界的 Cr 元素含量高于晶内, 且上部枝晶内的 Cr 元素含量高于底部和中部。超声冲击处理未改变熔覆层内的物相组成, 但在表面形成厚度约 5 μm 的细晶层, 冲击硬化层内晶界的碳化物被破碎成细小的碳化物并弥散分布于晶内, 起到细晶强化和弥散强化的作用。超声冲击后, 表面粗糙度由 0.52 μm 降至 0.29 μm , 硬度提升 50% 以上。电化学测试表明, 冲击硬化层的平均自腐蚀电位上升 37.21 mV, 平均自腐蚀电流密度下降 57.9%, 腐蚀表面均匀平整, 大量细小的碳化物弥散分布。**结论** 超声冲击处理细化了 Ni 基熔覆层的表层组织, 且表面的耐蚀性能明显提高。

关键词: 激光熔覆; 超声冲击; Ni 基涂层; 组织; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)10-0055-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.006

Study on the Structure and Corrosion Resistance of Laser Clad Ni-based Coatings by Ultrasonic Impact Treatment

LI Mei-yan¹, ZHANG Qi¹, YANG Jie¹, HAN Bin¹, SONG Li-xin²

(1. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: To improve the microstructures and corrosion resistance of Ni-based cladding coatings, the crack free Ni-based coatings were prepared by laser cladding technology, and then were treated by ultrasonic impact. The microstructure and corrosion resistance of cladding coating and impact hardening layer were studied by scanning electron microscope (SEM),

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-07

Received: 2020-07-27; Revised: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51801234); 山东省自然科学基金 (ZR2019MEM047); 山东省重点研发计划 (2019GGX102052); 中石油重大科技项目 (ZD2019-184-004)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51801234); Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2019MEM047); Key Research and Development (R&D) Plan of Shandong Province (2019GGX102052); Major Scientific and Technological Projects of CNPC (ZD2019-184-004)

作者简介: 李美艳 (1982—), 女, 博士, 副教授, 硕导, 主要研究方向为激光表面强化工艺技术及应用。邮箱: limeiyan@upc.edu.cn。

Biography: LI Mei-yan (1982—), Female, Doctor, Associate professor, Postgraduate tutor, Research focus: laser surface modification technology and application. E-mail: limeiyan@upc.edu.cn.

引文格式: 李美艳, 张琪, 杨洁, 等. 镍基熔覆层表面超声冲击处理组织及耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 55-60.

LI Mei-yan, ZHANG Qi, YANG Jie, et al. Study on the structure and corrosion resistance of laser clad Ni-based coatings by ultrasonic impact treatment[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 55-60.

electron probe microanalysis (EPMA) and electrochemical equipment, and the hardening mechanism of Ni-based cladding coating by ultrasonic impact treatment was analyzed. The results show that the laser cladding Ni-based coating was mainly composed of γ -(Fe,Ni) solid solution and carbides along grain boundary. The microstructure of laser cladding Ni-based coating was composed of cellular dendrite and fine dendrite from the bottom to top region. In addition, the Cr content at the grain boundaries in cladding coating was higher than that at grain boundaries while the Cr content intragranular at upper region was higher than at the bottom and middle regions. Ultrasonic impact treatment does not change the phase composition of Ni-based cladding coating, but on the surface of which a fine grain layer with a thickness of 5 μm was formed. The carbides distributed along the grain boundaries in the impact hardening layer were broken into fine carbides and dispersed inside the grains, which played the role of fine grain strengthening and dispersion strengthening. After ultrasonic impact treatment, the surface roughness decreased from 0.52 μm to 0.29 μm , and the surface hardness increased by more than 50%. The general self-corrosion potential of impact hardened layer increased by 37.21 mV, and the general self-corrosion current density decreased by 57.9%, while the corrosion surface was even and smooth with many fine carbides dispersed. Therefore, ultrasonic impact treatment could refine the microstructures of laser cladding Ni-based coating, and the corrosion resistance of which was improved obviously.

KEY WORDS: laser cladding; ultrasonic impact treatment; Ni-based alloy; microstructure; corrosion resistance

激光熔覆技术作为一种先进表面工程技术,具有热影响区小、可控性高、涂层与基体冶金结合强度高、优势,在矿山、冶金、化工、能源等领域的关键零件表面改性及再制造中获得广泛关注^[1-4]。然而,激光熔覆处理是一个快速加热、快速冷却的过程,熔覆层内极易形成较高的残余拉应力,裂纹成为高硬度熔覆层中的常见缺陷,严重影响该技术的推广应用^[5]。通过调整激光工艺参数、加入合金元素、预热及后热处理等措施^[6-9],一定程度上能够解决熔覆层开裂问题。但是强度和韧性的倒置关系,使激光熔覆高硬度涂层很难满足应用表面对精度和性能日益提高的要求,迫切需要解决激光熔覆层成形质量差的问题^[10]。

超声冲击技术作为一种表面强化技术,克服了传统塑性加工方法及剧烈塑性变形工艺局限于薄片或块体材料的弊端^[11-12],通过在金属表面施加高速高频冲击,使其以 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 高应变率发生压缩塑性变形,表面组织致密、光洁度高,产生的晶粒细化及加工硬化有助于改善组织及性能^[13-15]。陈芙蓉等^[16]采用超声冲击技术对 7A52 铝合金焊接接头进行处理,形成了致密的塑性变形层,接头表面晶粒细化,显微硬度和耐磨性显著提高。陈健等^[17]利用超声冲击处理等离子喷涂 Mo 涂层,其热震失效次数明显提高,且失效形式由整体剥落转变为小块剥落。此外,超声冲击处理激光快速成形 Ni 基高温合金表面,有助于消除搭接沟痕,细化组织,显微硬度提高 1.2 倍,残余应力消除达到 93.64%^[18]。然而,目前利用超声冲击技术对激光熔覆层进行强化处理的研究较少,冲击层的组织特征及耐蚀性有待研究。

本文拟采用激光熔覆技术制备镍基涂层,然后通过超声冲击强化熔覆层表面,研究两个独立的工艺过程叠加后表面冲击强化层的组织特征、碳化物分布以及耐腐蚀性能,为关键零部件表面改性提供理论依据。

1 实验材料及方法

基体为 200 mm×100 mm×20 mm 的 Q235 钢板,熔覆材料的 Ni 基合金粉末,其化学成分如表 1 所示。采用 HWF100 型激光加工设备同轴送粉、多道搭接方式制备熔覆层(图 1a)。优化后,激光功率为 2100 W,扫描速度为 10 mm/s,光斑直径为 3 mm,搭接率为 30%,送粉率为 12 g/min,保护气体为 Ar。激光熔覆后,采用 HK30S 超声加工设备对其进行表面处理(图 1b),工作气压为 0.2 MPa,谐振电压为 13.25 V,电流为 1.2 A,振幅为 12~18 μm ,冲击头直径为 14 mm,步距为 0.05 mm,进给速度为 118 mm/min。

表 1 Ni 基合金粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ni-based alloy

wt. %						
C	Si	Cr	Fe	B	La ₂ O ₃	Ni
0.30	3.50	10.50	10.00	2.00	0.7	Bal.

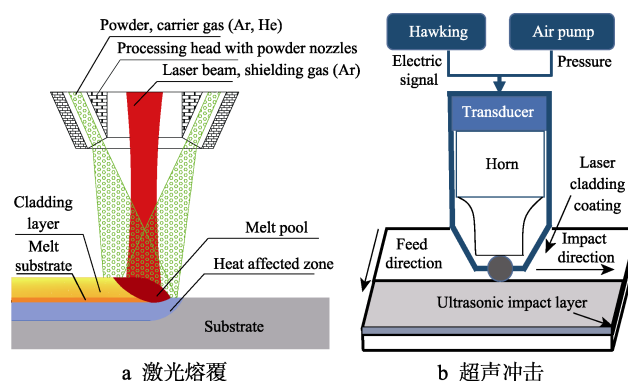


图 1 Ni 基合金层表面处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of Ni-based coating: (a) laser cladding; (b) ultrasonic impact treatment

2 结果及分析

2.1 超声冲击处理 Ni 基熔覆层的显微组织

图 2 为 Ni 基熔覆层的显微组织, 可知熔覆层内形成典型的树枝晶组织, 受凝固控制因素 G/R 影响, 熔池底部形成具有方向性较强的胞状树枝晶, 沿晶界析出具有一定厚度、连续分布的碳化物 (图 2a)。随着距熔池底部距离的增加, G/R 值逐渐减小, 熔池的成分过冷度增大^[19-20], 熔池中部形成树枝晶 (图 2b), 且熔覆层上部形成的枝晶更加细小 (图 2c)。结合 EDS 成分分析发现, 熔覆层内晶界的 Cr 元素含量高于晶

内, 且上部枝晶内的 Cr 元素含量高于底部和中部。分析认为, 高能束激光照射时, Ni 基合金粉末和基体发生熔化, 高温下合金元素固溶于奥氏体中, 在熔池凝固过程中, 熔池上部的凝固速度快, Cr 元素的扩散速度慢, 来不及向晶界扩散形成晶界碳化物, 而导致涂层上部奥氏体晶内的 Cr 元素含量偏高。

图 3 为超声冲击处理 Ni 基熔覆层的显微组织。由图 3a 可知, 在近表层区, 熔覆层树枝晶组织明显细化, 原始激光熔覆层内沿晶界析出的连续分布的碳化物明显破碎, 同时形成大量细小的碳化物弥散分布于晶内 (图 3b), 起到细晶强化和弥散强化的作用。随着距表层深度的增加, 组织未发生变化。

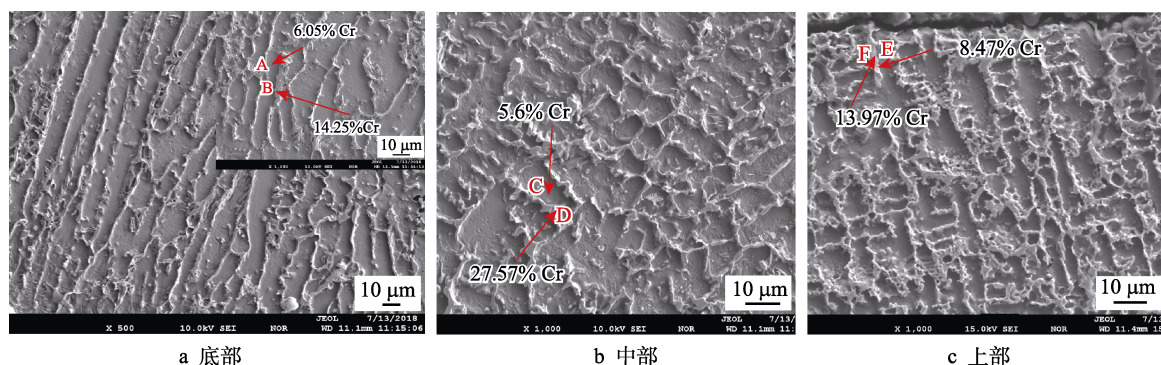


图 2 激光熔覆 Ni 基合金层的显微组织

Fig.2 Microstructure of laser cladding Ni-based coating: (a) at the bottom region; (b) at the middle region; (c) at the upper region.

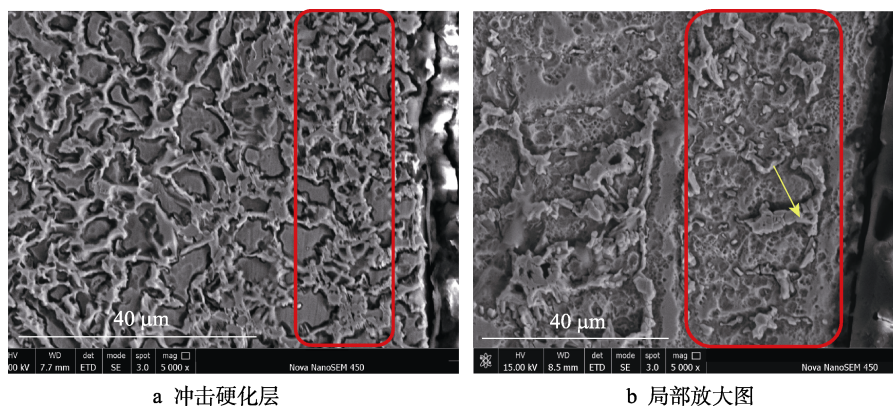


图 3 超声冲击 Ni 基熔覆层的显微组织

Fig.3 Microstructures of ultrasonic impacted layer: (a) impact strengthening layer; (b) enlarged photograph.

2.2 物相分析

图 4 为超声冲击前后 Ni 基熔覆层的 XRD 图谱。由图 4 可知, Ni 基熔覆层主要由 γ -(Fe,Ni) 固溶体组成, 超声冲击处理未改变涂层的物相组成, 仍主要由 γ -(Fe,Ni) 固溶体组成。

根据 Debye-Scherrer 公式 (式(1)) 及 XRD 衍射图谱, 计算激光熔覆层与超声冲击层的晶粒尺寸。

$$D = \frac{K\gamma}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

式中: D 为晶粒垂直于晶面方向的平均厚度; K 为 Scherrer 常数, $K=0.89$; γ 为 X 射线波长, $\gamma=0.154\ 056\ \text{nm}$,

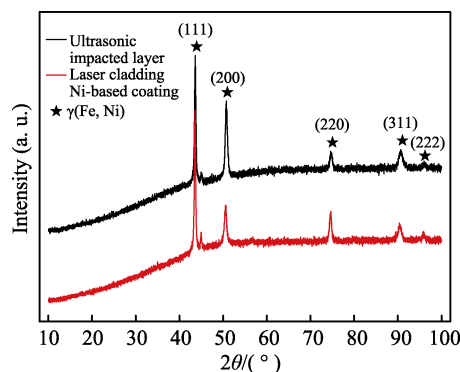


图 4 X 射线衍射图谱
Fig.4 XRD analysis curves

β 为衍射峰半高宽; θ 为布拉格衍射角。经计算可得, 激光熔覆层的晶粒尺寸为 $56.71\ \mu\text{m}$, 超声冲击处理后熔覆层的晶粒尺寸为 $19.4\ \mu\text{m}$, 表明超声冲击处理后晶粒发生了细化。

2.3 表面粗糙度和硬度分析

超声冲击前后 Ni 基熔覆层表面粗糙度和宏观硬度值列于表 2。由表 2 可知, 超声冲击处理后, 熔覆层表面粗糙度由 $0.52\ \mu\text{m}$ 降至 $0.29\ \mu\text{m}$, 表面更加光洁平整。Ni 基熔覆层的表面硬度约为 32.4HRC, 冲击处理后硬度提高至 51.2HRC, 约为熔覆层的 1.6 倍。超声冲击导致熔覆层晶粒细化, 增加晶界对位错的阻碍, 提高其局部抗变形能力, 从而提高表面硬度^[21-22]。此外, 高频冲击作用下熔覆层表面由于剧烈塑性变形, 导致气孔和划痕闭合, 进一步提高了硬度及表面光洁度。

表 2 超声冲击前后熔覆层表面粗糙度及硬度值
Tab.2 Surface roughness and hardness values

Samples	Surface roughness/ μm	Surface hardness(HRC)
Cladding coating	0.52	32.4
Impacted layer	0.29	52.1

2.4 耐蚀性分析

图 5 为 Ni 基熔覆层和超声冲击硬化层的极化曲线, 采用塔菲尔曲线外推法检测自腐蚀电位 E_{corr} 和自腐蚀电流密度 J_{corr} 。由表 3 可知, 超声冲击处理后, 熔覆层的平均自腐蚀电位正移了 37.21 mV, 单位面积腐蚀电流显著降低, 约为未经冲击处理熔覆层平均腐蚀电流密度的 42%, 说明超声冲击处理明显改善了熔覆层的耐蚀性。

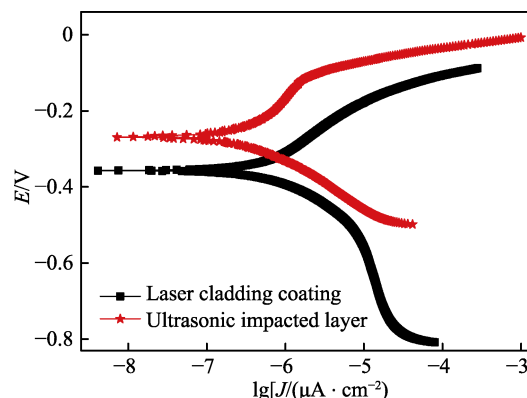


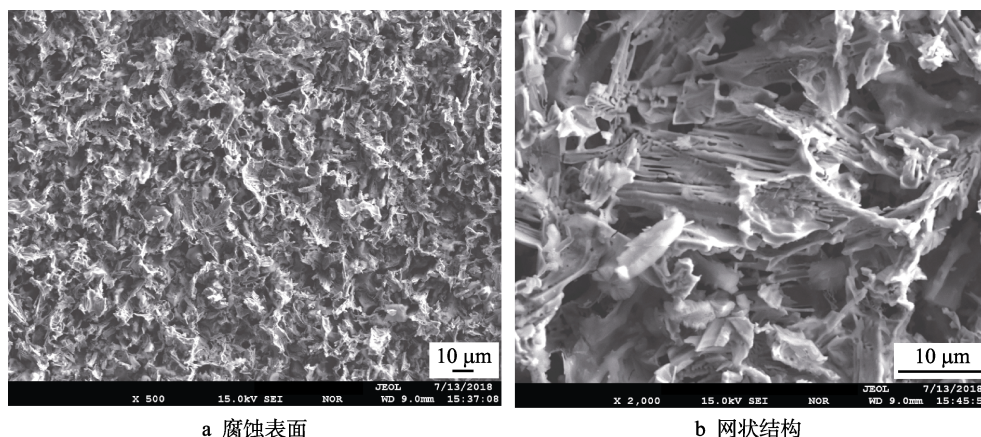
图 5 激光熔覆层和冲击硬化层的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of laser cladding coating and ultrasonic impacted layers

表 3 激光熔覆 Ni 基涂层和冲击硬化层的腐蚀参数
Tab.3 Corrosion parameters of Ni-based coatings

Corrosion parameter	Cladding coating	Impacted layer
General self-corrosion potential $E_{\text{corr}}/\text{mV}$	-356.73	-319.52
General self-corrosion current $J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.3793	0.5808

图 6 为激光熔覆 Ni 基涂层的腐蚀形貌。由图 6a 可知, 熔覆层表面腐蚀严重, 腐蚀面较粗糙, 呈现空间网状分布 (图 6b)。由图 2 可见, Ni 基熔覆层由奥氏体及内沿晶界连续分布的碳化物组成, 当熔覆层处于 3.5%NaCl 腐蚀介质中, 晶界碳化物的耐蚀性优于晶内, 晶内腐蚀速度较快, 导致腐蚀后形成网状结构。

图 7 为熔覆层超声冲击处理后的腐蚀形貌。由图 7a 可知, 腐蚀表面均匀平整, 大量碳化物清晰可见。高倍放大图可见, 冲击强化层表面的碳化物尺寸较小、数量多且不连续 (图 7b)。由此可见, Ni 基熔覆层内晶界连续分布的碳化物在超声冲击作用下发生了明显的破碎。

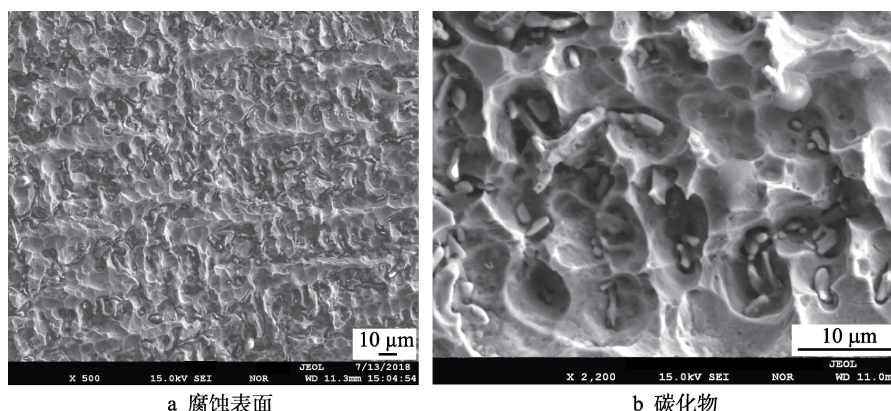


a 腐蚀表面

b 网状结构

图 6 激光熔覆 Ni 基涂层的腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphologies of laser cladding Ni-based coating: (a) corrosion surface; (b) reticular structure



a 腐蚀表面

b 碳化物

图 7 超声冲击 Ni 基涂层的腐蚀形貌

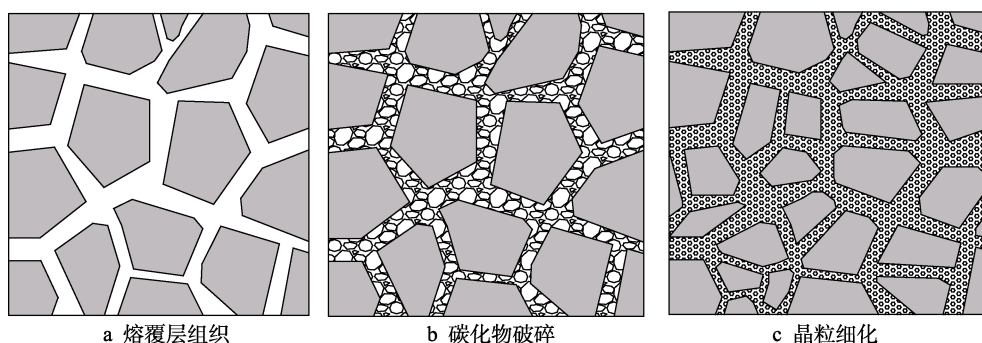
Fig.7 Corrosion morphologies of ultrasonic impacted layer: (a) corrosion surface; (b) fine carbides particles

2.5 Ni 基熔覆层表面冲击强化机制

图 8 为 Ni 基熔覆层表面冲击硬化示意图。结合图 3 和图 7, 激光熔覆处理后, 涂层内由奥氏体枝晶和晶界连续分布的碳化物组成 (图 8a); 当施加超声冲击时, 在高频冲击载荷作用下碳化物内产生裂纹 (图 8b), 并产生明显的破碎 (图 8b); 随着冲击载荷的持续作用, 碳化物被破碎成更小的颗粒^[23], 同时奥氏体晶粒被细化, 从而在弥散碳化物和细小晶粒的

共同作用下, 冲击层得以强化。

此外, 当涂层置于腐蚀介质环境中时, 腐蚀优先从碳化物和基体交界处发生^[24-25]。Ni 基熔覆层内碳化物连续分布, 腐蚀一旦产生, 将沿着基体与碳化物界面快速发展, 而超声冲击处理后, 碳化物被破碎成细小颗粒, 其与基体界面短小而且断续分布, 有助于阻碍腐蚀的进一步发展。此外, 超声冲击处理后, 表面气孔、划痕等缺陷减小, 表面光洁度显著提高, 有利于耐蚀性能的提高。



a 熔覆层组织

b 碳化物破碎

c 晶粒细化

图 8 激光熔覆层表面冲击强化示意图

Fig.8 Diagram of impact hardening for laser cladding coating: (a) structural characteristics of laser cladding coating; (b) fragmentation of carbides; (c) grain refinement

3 结论

1) 激光熔覆 Ni 基涂层主要由 γ -(Fe,Ni) 固溶体和碳化物组成, 由底及表形成胞状树枝晶和细小的树枝晶, 晶界的 Cr 元素含量高于晶内, 且上部枝晶内的 Cr 元素含量高于底部和中部。

2) 超声冲击处理未改变熔覆层内的物相组成, 但在表面形成厚度约为 5 μm 的细晶层, 晶粒尺寸由 56.71 μm 减小到 19.4 μm , 冲击硬化层内晶界的碳化物被破碎成细小的碳化物并弥散分布于晶内, 起到细晶强化和弥散强化的作用。

3) 经过超声冲击处理后, 熔覆层表面粗糙度由 0.52 μm 降至 0.29 μm , 表面硬度提升 50% 以上, 冲击硬化层的平均自腐蚀电位上升 37.21 mV, 自腐蚀

电流密度下降 50%, 表面均匀平整, 大量细小的碳化物弥散分布, 表明超声冲击处理明显提高了 Ni 基熔覆层的耐腐蚀性。

参考文献:

- [1] JIAO Xiang-yi, WANG Jun, WANG Can-ming, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and wear properties of T15M cladding coating fabricated by laser cladding technology[J]. Optics and lasers in engineering, 2018, 110: 163-171.
- [2] 雷靖峰, 祁文军, 谢亚东, 等. U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 66-71.
- LEI Jing-feng, QI Wen-jun, XIE Ya-dong, et al. Optimization of process parameters of laser cladding Ni60-25%WC

- coating on U71Mn steel[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 66-71.
- [3] KHORRAM A, AKBAR D J, MOSLEM P, et al. Laser cladding of Inconel 718 with $75\text{Cr}_3\text{C}_2 + 25(80\text{Ni}20\text{Cr})$ powder: Statistical modeling and optimization[J]. Surface and coatings technology, 2019, 378: 124933.
 - [4] HE X, SONG R G, KONG D J. Microstructures and properties of Ni/TiC/La₂O₃ reinforced Al based composite coatings by laser cladding[J]. Optics and laser technology, 2019, 117: 18-27.
 - [5] 钟敏霖, 刘文今. Stellite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究[J]. 中国激光, 2002(11): 1031-1036.
ZHONG Min-lin, LIU Wen-jin. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding stellite and NiCrSiB alloys[J]. Chinese journal of lasers, 2002(11): 1031-1036.
 - [6] 郑启池, 金亚娟, 李瑞峰, 等. 功率输入对激光熔覆镍基涂层组织和裂纹生成的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 293-297.
ZHENG Qi-chi, JIN Ya-juan, LI Rui-feng, et al. Effect of power input on microstructure and crack formation of Ni based coating by laser cladding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(natural science edition), 2017, 31(3): 293-297.
 - [7] 张坚, 王震, 赵龙志, 等. 激光功率对激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 27-31.
ZHANG Jian, WANG Zhen, ZHAO Zhi-long, et al. Effect of laser power on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe-36Ni Invar alloy coating[J]. Applied laser, 2017, 37(1): 27-31.
 - [8] 姚成武, 徐滨士, 黄坚, 等. 铁基合金激光熔覆层裂纹控制的组织设计[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 74-79.
YAO Cheng-wu, XU Bin-shi, HUANG Jiang, et al. Microstructure design of controlling crack of Fe-based laser cladding layer[J]. China surface engineering, 2010, 23(3): 74-79.
 - [9] 盛家锦, 王梁, 刘蓉, 等. 热处理对激光熔覆 IN939 合金涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 202-209.
SHENG Jia-jin, WANG Liang, LIU Rong, et al. Effects of heat treatment on microstructure and performance of laser clad IN939 alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 202-209.
 - [10] 张津超, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光熔覆 CaF_2/Ni 基合金复合涂层的裂纹敏感性及其力学性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 22-26.
ZHANG Jin-chao, FENG Ai-xin, XUE Wei, et al. Research on crack susceptibility and mechanical properties of CaF_2/Ni composite coating by laser cladding[J]. Applied laser, 2017, 37(1): 22-26.
 - [11] LI Liang, KIM Mi-ru, LEE Seung-jun, et al. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel[J]. Surface & coatings technology, 2016, 307: 517-524.
 - [12] STATNIKOV E S, KOROLKOV O V, VLADIMIR N V. Physics and mechanism of ultrasonic impact[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 533-538.
 - [13] LESYK D A, MARTINEZ S, MORDYUK B N, et al. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment[J]. Surface & coatings technology, 2017, 328: 344-354.
 - [14] 吕宗敏, 何柏林, 于影霞. 超声冲击诱发表面纳米化及其对表面完整性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(2): 311-315.
LYU Zong-min, HE Bo-lin, YU Ying-xia. Ultrasonic impact induced surface nano-crystallization and influence on surface integrity[J]. Journal of materials science & engineering, 2017, 35(2): 311-315.
 - [15] HU Jun, SHIMIZU Tetsuhide, YOSHINO Tomoaki, et al. Ultrasonic dynamic impact effect on deformation of aluminum during micro-compression tests[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 258: 144-154.
 - [16] 陈芙蓉, 赵永胜, 邱小明, 等. 超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 49-53.
CHEN Fu-rong, ZHAO Yong-sheng, QIU Xiao-ming, et al. Influence of ultrasonic impact treatment on microstructure and properties of surface layer of 7A52 aluminum alloy welded joint[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 49-53.
 - [17] 陈健, 吉祥, 肖跃. 超声冲击对 Q235 钢表面等离子喷涂涂层组织及抗热震性能的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014(4): 332-336.
CHEN Jian, XI Xiang, XIAO Yue. Structure and heat shock resistance of coating prepared by plasma spraying on the Q235 steel after ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2014(4): 332-336.
 - [18] 戚永爱. 基于超声冲击的激光快速成形镍基高温合金强化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
QI Yong-ai. Research on enhancing technology of laser rapid forming nickel-based superalloy by ultrasonic impact treatment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
 - [19] XIANG Shuo, LUAN Heng-wei, WU Jian, et al. Microstructures and mechanical properties of CrMnFeCoNi high entropy alloys fabricated using laser metal deposition technique[J]. Journal of alloys and compounds, 2019, 773: 387-392.
 - [20] YA Wei, PATHIRAJ B, LIU Shao-jie. 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 230: 217-232.
 - [21] 易伟, 陈辉, 吴影, 等. 原位 NbC 对激光熔覆 Co 基涂层组织和磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302010.
YI Wei, CHEN Hui, WU Ying, et al. Effect of in situ NbC on microstructure and wear properties of laser cladding Co-based coatings[J]. Chinese journal of lasers, 2020, 47(3): 0302010.
 - [22] CHENAKIN S P, FILATOVA V S, MAKEEVA I N, et al. Ultrasonic impact treatment of CoCrMo alloy: Surface composition and properties[J]. Applied surface science, 2017, 408: 11-20.
 - [23] LI Mei-yan, ZHANG Qi, HAN Bin, et al. Investigation on microstructure and properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeMnNi}$ high entropy alloys by ultrasonic impact treatment[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 8: 152626.
 - [24] 种凯. 原位自生 TiC-VC 增强 Fe 基激光熔覆层组织细化及其性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.
ZHONG Kai. Study on microstructure refinement and properties of TiC-VC reinforced Fe-based laser cladding layers[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.
 - [25] DAAVARI M, SADOUGH VANINI S A. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment[J]. Materials letters, 2015, 139: 462-466.