

超声振动对激光熔覆涂层组织与性能的影响

申井义, 林晨, 姚永强, 徐欢欢, 刘佳

(青岛理工大学, 山东 青岛 266520)

摘要: **目的** 改善传统激光熔覆涂层中常出现的气孔和裂纹等缺陷, 提高涂层整体质量和使用性能。**方法** 首先利用粘接剂将镍包 WC 合金粉末预置于 Q235 基体材料上, 采用正交试验得到的最优参数 (激光功率 $P=1600$ W, 光斑直径 $d=5$ mm, 扫描速度 $v=4$ mm/s) 进行熔覆试验, 整个熔覆过程使用 20 kHz 的超声波发生器, 以空气为载体, 向激光熔池中同步施加超声振动, 然后分别使用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD)、显微硬度仪及万能摩擦磨损试验机 (UMT), 对涂层的显微组织、元素成分及物相、显微硬度和耐磨性能进行测量分析。**结果** 施加超声振动后涂层的晶粒更加细小, 主要由细小等轴晶和少量枝晶组成, 涂层中气孔和裂纹明显减少, Cr、Ni、W、C 等元素分布趋于均匀, 涂层物相主要由固溶体 γ -(Ni, Fe)、金属间化合物 Ni_3Fe 、WC、 Cr_{23}C_6 等组成。施加超声振动后涂层平均显微硬度为 937HV, 与未施加超声振动的涂层相比提高了 13%, 摩擦系数为 0.43, 降低了约 26%, 耐磨性能提高了 44%。**结论** 利用空载式超声振动辅助激光熔覆, 可使制备出的涂层质量显著改善, 微观组织更加致密, 硬度、耐磨性得到提升。

关键词: 激光熔覆; 超声振动; 镍包 WC; 元素分布; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0226-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.027

Effect of Ultrasound Vibration on Microstructure and Properties of Laser Cladding Coatings

SHEN Jing-yi, LIN Chen, YAO Yong-qiang, XU Huan-huan, LIU Jia

(Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to eliminate the defects such as pore and crack in traditional laser cladding coatings, and improve the overall quality and performance of coatings. Nickel-coated WC alloy powders were pre-placed on Q235 matrix by adhesive and the cladding test was carried out with the optimum parameters obtained through orthogonal test (laser power $P=1600$ W, spot diameter $d=5$ mm, scanning speed $v=4$ mm/s). During the whole cladding process, a 20 kHz ultrasonic generator was used to synchronously apply ultrasonic vibration to the laser pool with air as the carrier. Then, the microstructure, element composition, phase, microhardness and wear resistance of the coatings were measured and analyzed by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD), microhardness tester and universal friction and wear tester (UMT). The grains of the dynamic coatings by ultrasonic vibration were finer and mainly consisted of fine equiaxed grains and columnar grains. The pores and cracks in such coatings were obviously reduced. Elements such as Cr, Ni, W, and C tended to be distributed uniformly. The coating was mainly composed of solid solution γ -(Ni,Fe), intermetallic compound Ni_3Fe , WC, Cr_{23}C_6 .

收稿日期: 2019-07-13; 修订日期: 2019-08-19

Received: 2019-07-13; Revised: 2019-08-19

作者简介: 申井义 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光熔覆技术。

Biography: SHEN Jing-yi (1989—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 林晨 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向表面工程。邮箱: 748579908@qq.com

Corresponding author: LIN Chen (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: 748579908@qq.com

and so on. The average microhardness of the coating after application of ultrasonic vibration was 937HV, which was 13% higher than that of the coating not treated by ultrasonic vibration. The coefficient of friction was 0.43, which was reduced by about 26% and the wear resistance was improved by 44%. Laser cladding assisted by air-load ultrasonic vibration can significantly improve the quality of the coatings, make the microstructure more compact, and increase the hardness and wear resistance.

KEY WORDS: laser cladding; ultrasonic vibration; nickel-coated WC; element distribution; microhardness; wear resistance

激光熔覆技术作为一种新型的表面改性技术,它诞生于 20 世纪 70 年代,进入 80 年代激光熔覆技术得到了进一步发展,迅速成为快速成形领域的研究热点。由于激光熔覆可在普通低成本钢材表面制备出具有高硬度、高耐磨性、抗腐蚀和抗高温氧化性能优良的涂层,以替代贵重材料、稀有金属材料,扩展普通材料的应用范围,所以广泛应用于汽车制造、石油化工、航空航天及生物医学等领域^[1-3]。然而,激光熔覆过程中涂层材料以极快的速度熔化和冷却,涂层和基体间存在着较大的温度梯度,同时熔覆材料与基材的热膨胀系数不同,导致凝固后涂层内留存有较大的残余拉应力,再加上熔池内元素成分分布不均匀,使涂层易出现明显的宏观裂纹。此外,由于熔池冷却速度极快,熔池内气体无法在凝固前上浮排出,致使涂层中存在大量气孔^[4-6]。正是因为目前的激光熔覆工艺还不能很好地解决上述问题,使之成为阻挡激光覆熔技术工业化应用的一大障碍。

超声振动作为一种外加物理场,具有获得方便、安全无污染和应用范围广等优点,它最早被应用于传统铸造领域,随后逐渐发展到焊接、熔覆等领域^[7-8]。超声振动在金属铸造领域的应用,起到了细化晶粒、使组织均匀化、提高了材料强度、增强材料塑性等作用^[9-10]。目前,国内外已有不少学者和研究人员将超声振动作为一种新的技术工艺引入到了激光熔覆领域。研究表明,超声振动的空化效应和热效应可以降低激光熔覆过程中熔池内的温度梯度,提高熔融金属的流动性,提高形核率,以细化晶粒,降低残余热应力抑制裂纹产生,加速气体排出,减少气孔产生,改善涂层组织与性能。然而,目前关于超声振动辅助激光熔覆的研究大都采用由工作台将超声间接传递至试件,这种方式不但会使超声波在传播过程中发生衰减,而且易受试件尺寸、形状和质量的影响,难以实现自动化和批量化生产。

本试验运用较为简易辅助的方式,将频率为 20 kHz 的超声波以空气为载体直接引入镍包 WC 的激光熔池中,在 Q235 基体上制备高性能熔覆涂层。研究空载式超声振动对涂层显微组织、元素分布、硬度和耐磨性,以及裂纹和气孔的影响。使用空载式施加超声振动的方式,不仅可以很好地控制超声衰减问题,而且操作更加灵活方便,可以作用于各种不同试件易于工业化应用。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验基材选用应用广泛且价格低廉的普通低碳钢 Q235,尺寸为 100 mm×60 mm×15 mm。涂层材料选用一种具有核壳结构的镍包 WC 粉末,粒度为 150~30 目,其化学成分如表 1 所示。为防止超声振动产生的冲击将预置的合金粉末层破坏,选用质量分数为 20%的松香酒精溶液作为粘接剂。

表 1 镍包 WC 粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of nickel-coated WC

wt. %						
WC	Cr	Fe	B	Si	Co	Ni
25.0	9.8	2.3	2.3	3.2	3.8	Bal.

1.2 试验方法

将试验基材用不同目数的砂纸打磨,并用无水乙醇和丙酮清洗后晾干,以去除表面氧化皮和油污。利用松香的酒精溶液将镍包 WC 粉末调至黏稠状,预置于处理干净的基材表面,涂敷过程中用自制模具控制粉末厚度约为 1.5 mm,并压实防止粉末内出现原始气孔或裂纹。随后放入烘干箱烘干 4 h,温度设定为 80 ℃。试验使用额定输出功率为 2 kW 的光纤激光器,熔覆功率 $P=1600\text{ W}$,光斑直径 $d=5\text{ mm}$,扫描速度 $v=4\text{ mm/s}$ 。经多次优化试验验证,搭接率为 50% 时得到的涂层宏观形貌最为平整。熔覆过程中利用自制的超声波发生器对激光熔池同步施加超声振动,如图 1 所示,超声振动参数如表 2 所示。根据声学原理可知,超声波的波长短,衍射性差,以空气作为弹性媒质传播具有良好的方向性,因此在一定范围内能够形成能量密度较强的声场,声场中高频往复振动的空气分子与激光熔池接触时可将超声振动引入其中。当超声波的入射角为 45°时,可保证振动合力在竖直和水平方向分力均衡,为减少超声衰减对试验效果产生的影响,将试件与声源间距约为 30 cm。整个熔覆过程采用高纯氮气作保护气体,气流量为 15 L/min。利用同样方法和相同工艺参数,在不施加超声振动的条件下进行一组试验作为对比。最后借助扫描电子显微镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD)

和显微硬度仪等设备,对所得两种激光熔覆涂层进行比较分析。

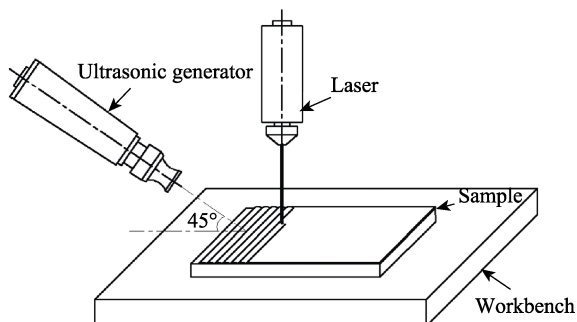


图1 空载式超声振动辅助激光熔覆示意图
Fig.1 Diagram of laser cladding assisted by air-load ultrasonic vibration

表2 熔覆时超声振动参数

Tab.2 Parameters of ultrasound vibration for cladding

Parameters	Value
Ultrasound power/W	150
Frequency/kHz	20
Amplitude/ μm	60~70
Incident angle/(°)	45

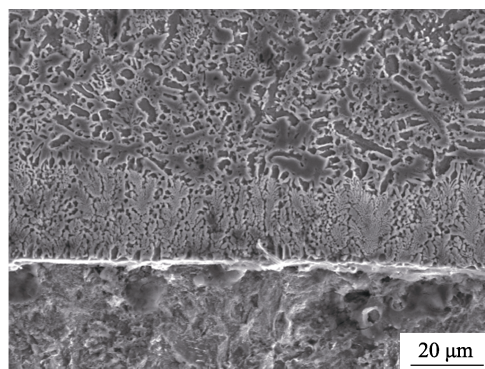
2 结果与分析

2.1 涂层显微组织分析

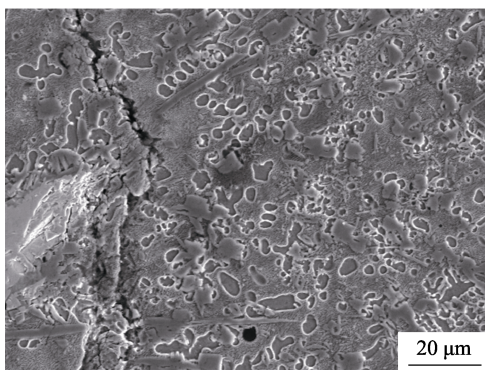
将熔覆后得到的试件利用电火花线切割切成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 16.5\text{ mm}$ 的试样,在垂直于涂层的横截面上依次使用不同目数的金相砂纸打磨并抛光,制成金相试样,用王水 [$V(\text{HNO}_3) : V(\text{HCl}) = 1 : 3$] 腐蚀 30 s,随后利用日本 HITACHI 公司生产的 S-3400N 型扫描电子显微镜 (SEM),对试样的显微组织进行观测。图 2、图 3 分别为未施加超声振动和施加超声振动后涂层底部和中部的显微组织。

通过图 2 和图 3 可以看到,由于温度场分布不同,熔覆过程中受热流因素影响,涂层底部和涂层内部的显微组织有所不同。在图 2a 和图 3a 中,靠近基体的界面结合区都有一条明显的白亮带,可以看到这条白亮带由平行于涂层生长的平面晶组成,其原因是结合区处温度梯度较大,而结晶速率极小,根据结晶理论得知这种条件下易形成平面晶^[11-13]。结合区上方为涂层的底部,图 2a 中未施加超声振动的涂层底部柱状晶大多垂直于结合区生长,图 3a 中施加超声振动的涂层底部柱状晶生长方向较为凌乱,这主要是由于在底部组织生长初期,超声振动破坏了晶粒生长的方向性,使成形后的晶粒变得杂乱无序。观察图 2 可以看到,未施加超声振动的涂层组织主要由粗大的柱状晶和树枝晶组成,且伴有气孔和裂纹产生,利用 Image-

Pro Plus 图像分析软件测得其枝晶主干长度约为 $51 \sim 65\text{ }\mu\text{m}$ 。造成这种现象的原因:一方面,由于熔覆材料快速冷却时,树枝晶交错封闭,继续冷却凝固时会产生较大拉应力,拉应力超过一定值就会沿枝晶方向产生裂纹^[14-16];另一方面,熔覆过程中材料中的 Cr、B、C 等元素会生成复杂的脆硬相,降低了涂层承受热应力的能力,使其更易产生裂纹。此外,还可以看到涂层中有白色聚集区存在,组织分布不均匀。



a 涂层底部



b 涂层内部

图2 未施加超声振动的涂层微观组织
Fig.2 Microstructure of coatings without ultrasonic vibration (SEM): (a) bottom of coating, (b) internal coating

观察图 3 可以看到,施加了超声振动的涂层晶粒更加细小,主要由细小等轴晶和少量枝晶组成,微观组织更加致密,没有明显的裂纹和气孔等缺陷,且白色聚集区消失,涂层质量得到提升。利用 Image-Pro Plus 图像分析软件测得施加超声振动后涂层的晶粒尺寸为 $34 \sim 48\text{ }\mu\text{m}$,相比未施加超声振动的涂层减小约 29%。产生这种改善的主要原因是超声振动作用于熔融的液态金属时,空化效应使液态金属内压力处于非稳态,导致局部形成负压区,弥散于周围的气体在压差作用下向该区域聚集成为气泡(如图 4 所示),气泡(空化泡)破灭时液体金属突然冲入气泡而产生激波,激波的冲击可使刚生成的枝晶从晶粒主杆上脱离^[17],充当二次形核提高形核率,从而起到细化晶粒的效果。另外,超声振动的搅拌作用加速了液态金属的流动性,有利于熔池内气体的溢出。

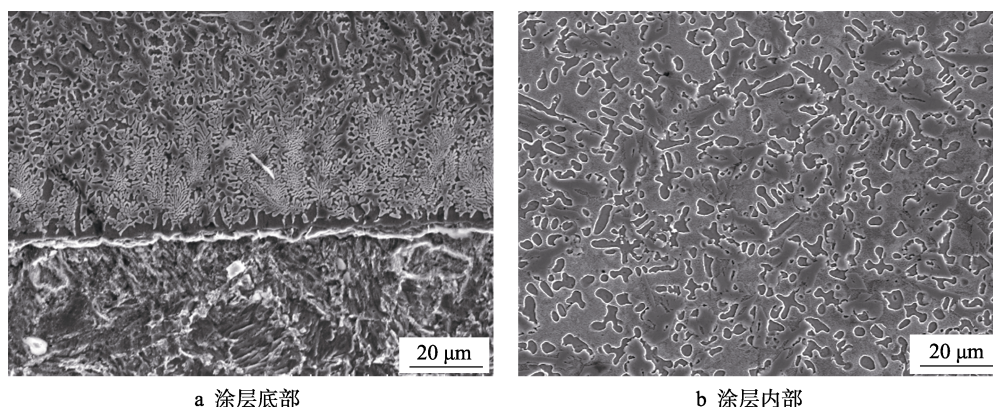


图 3 施加超声振动的涂层微观组织

Fig.3 Microstructure of coatings with ultrasonic vibration (SEM): (a) bottom of coating, (b) internal coating

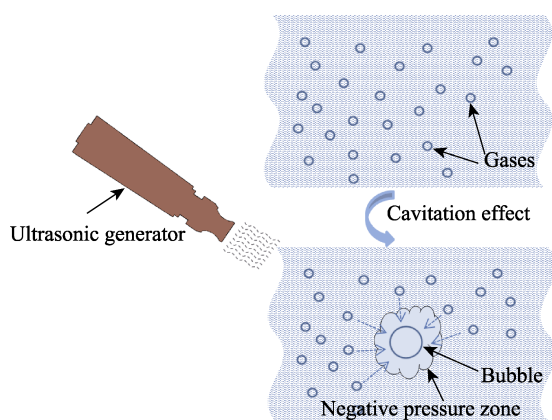


图 4 超声振动空化效应示意图

Fig.4 Diagram of cavitation effect of ultrasound vibration

2.2 元素分布及物相分析

为研究超声振动对激光熔覆涂层内元素分布的影响,利用扫描电子显微镜附带的能谱分析仪(EDS)对涂层截面进行线扫描。由图 5a 可以看到, Ni、Cr 元素纵向分布不均匀,且中部出现 W、C 元素聚集的现象,可以推测为未溶解的 WC 颗粒聚集区。对应图 6a 未施加超声振动涂层的面扫描结果可以看到, Ni

在涂层各元素含量中据重要地位, Cr 元素呈现枝状或条状分布, W 元素区域性分布现象较明显。通过观察图 5b 和图 6b 可知,施加超声振动后涂层各元素分布趋于均匀化,没有出现单一元素聚集的现象。产生以上明显差别的原因是施加超声振动后改善了熔池内液体的流动性,减小了因快速冷却而产生的成分偏析现象,同时也提高了未溶解 WC 的弥散性,使其在涂层内分布更加均匀。

图 7 是试样涂层的 X 射线衍射仪(XRD)物相分析图谱。由图 7 可以看到,施加超声振动对涂层的物相组成没有产生明显影响,两者均由固溶体 γ -(Ni,Fe)、金属间化合物 Ni_3Fe 、未溶解或再生成的 WC、 M_{23}C_6 (M=Cr、Fe) 型化合物、 Cr_7C_3 等组成。根据冶金学理论可知,金属中相的形成主要受成分和冷却条件的影响^[7]。同电场、磁场等类似,超声场属于一种物理场,将超声波应用到激光熔覆过程中是为了提高涂层质量,改善缺陷对其组织性能的影响,并没有引入新的元素。此外,激光熔覆冷却速度极快,虽然超声振动在熔池内传播过程中产生的热效应一定程度上可减小温度梯度,但难以改变整体冷却条件,因此两种涂层的物相组成基本一致。

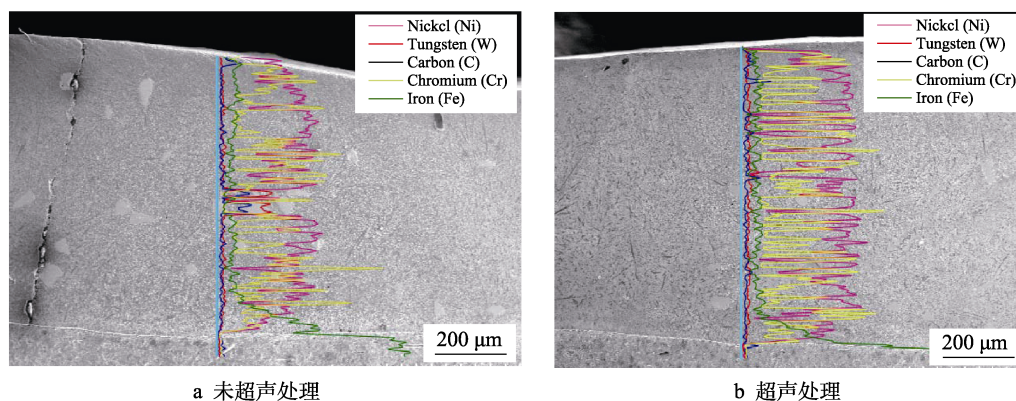


图 5 涂层的线扫描元素分布

Fig.5 Element distribution of coatings by line scanning (EDS): (a) no ultrasonic vibration, (b) ultrasonic vibration

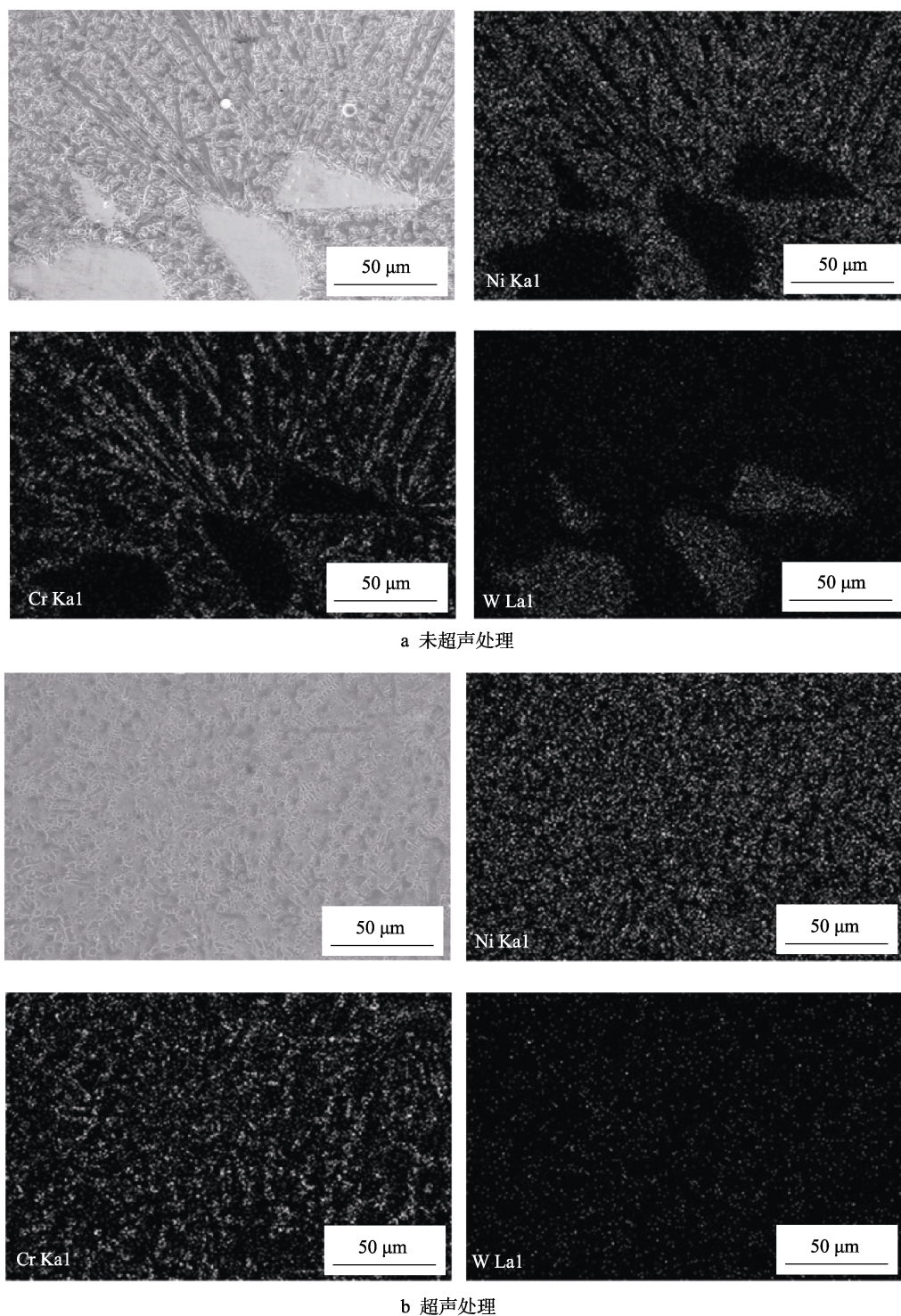


图6 涂层的面扫描元素分布

Fig.6 Element distribution of coatings by surface Scanning (EDS): (a) no ultrasonic vibration, (b) ultrasonic vibration

2.3 显微硬度分析

利用 FM700 型显微硬度仪对试样沿垂直于结合区方向进行显微硬度测试, 载荷选用 100 g, 保压时间为 15 s。为减少测量误差, 以结合区为原点每一深度面取 3 点测试, 计算平均硬度, 两试样的显微硬度分布曲线如图 8 所示。观察图 8 可以看到, 超声振动对基体的显微硬度影响不大, 其平均值约为 192HV,

结合区平均显微硬度约为 520HV, 并且结合区两侧硬度值变化明显, 说明涂层与基体之间的稀释率较低。相比于基体, 两个试样的涂层部分显微硬度都有很大提高, 这是由于涂层组织中 Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、WC 均属于硬质相, 硬质相强化对提高涂层硬度起了关键性作用^[18-20]。此外, 镍包 WC 粉末材料的主要成分是镍基合金, 所以涂层中占主要地位的物相是固溶体 $\gamma\text{-(Ni,Fe)}$, 起到了固溶强化作用。经计算, 未施加超

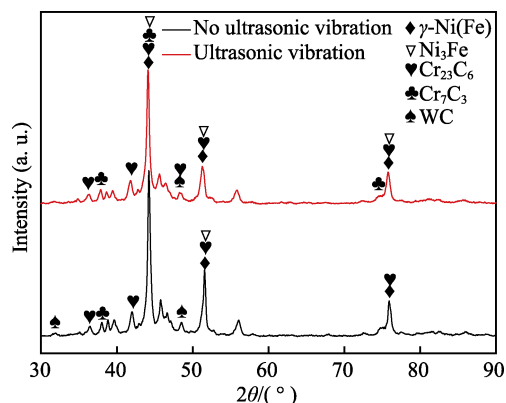


图 7 两种涂层物相分析图谱
Fig.7 Phase analysis atlas of two coatings

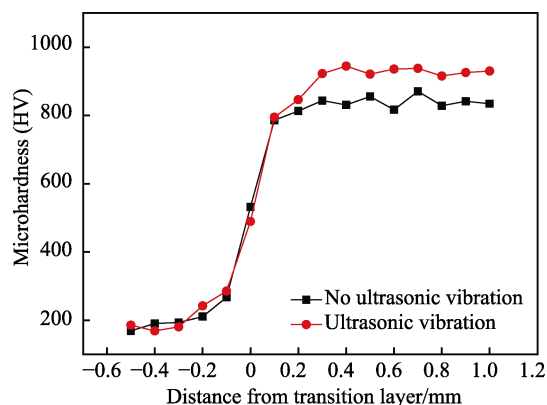


图 8 两种涂层硬度分布曲线
Fig.8 Hardness distribution curves of two coatings

声振动的涂层平均显微硬度为 831HV, 施加了超声振动的涂层平均显微硬度为 937HV, 对比发现施加了超声振动后, 涂层的平均显微硬度提高了约 13%, 其原因是在超声振动的空化作用下, 二次形核率增加, 使凝固后的组织晶粒更加细小, 起到了细晶强化的作用; 同时超声振动在传播过程中因衰减而产生声压梯度, 促进熔池内液态金属流动, 使硬质相分布更加均匀, 弥散强化作用更加明显。

2.4 耐磨性分析

耐磨性是评价熔覆涂层力学性能必不可少的重要指标。利用 GETR 公司的 UMT-3 型多功能摩擦磨损试验机对试样涂层进行耐磨性测试, 对磨件选用轴承钢球 (GCr15), 设定载荷为 10 N, 频率为 2 Hz, 在干摩擦条件下往复直线运动对磨 20 min, 得到摩擦系数变化曲线如图 9 所示。由图 9 可见, 未施加超声振动涂层的摩擦系数较大, 且曲线波动较大; 施加超声振动后涂层的摩擦系数明显减小, 并且变化趋势更加平稳。经计算得到, 未施加超声振动涂层的平均摩擦系数为 0.58, 施加超声振动后, 涂层的平均摩擦系数为 0.43, 减小了 26%。根据上述涂层微观组织分析可知, 未施加超声振动的涂层内存在气孔裂纹和硬质相分布不均匀现象, 当钢球在对磨过程中遇到分布不均匀的硬质相时, 摩擦系数变大, 随着摩擦的进行,

硬质相周围材料不断被去除, 在摩擦力作用下硬质相会成块剥落, 随后摩擦系数会变小, 使最终得到的摩擦系数曲线起伏较大且不稳定。熔覆过程中施加同步超声振动后, 涂层组织由粗大的树枝晶向细小等轴晶和少量枝晶转变, 组织更加致密, 涂层中各元素和硬质相分布均匀, 磨损部位组织和物相变化不大, 所以施加超声振动后的涂层表现出的摩擦系数较小且相对平稳。

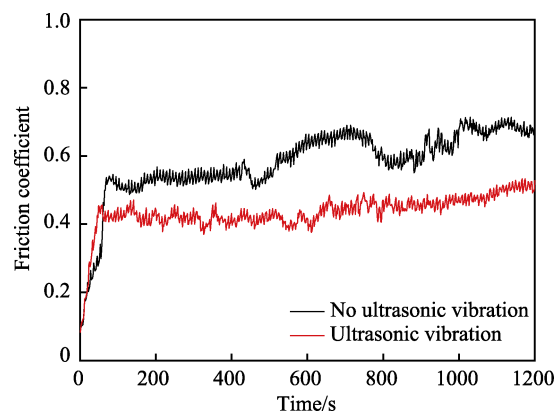


图 9 有无超声振动涂层摩擦系数变化曲线
Fig.9 Friction coefficient curves of two coatings with and without ultrasound vibration

利用表面粗糙度仪测得磨痕的截面轮廓, 经三次测量计算取平均值得到两种涂层和基体 (Q235) 的磨损量, 如图 10 所示。无涂层的基体的磨损量为 $49.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 未施加超声振动的涂层磨损量为 $11.4 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 施加超声振动后的涂层磨损量仅为 $7.9 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 可见镍包 WC 涂层明显提高了试件的耐磨性。此外, 对比发现施加超声振动后涂层比未施加超声振动的涂层耐磨性提高了约 44%, 这一结果与上述涂层显微组织、元素分布和硬度分析结果相吻合。

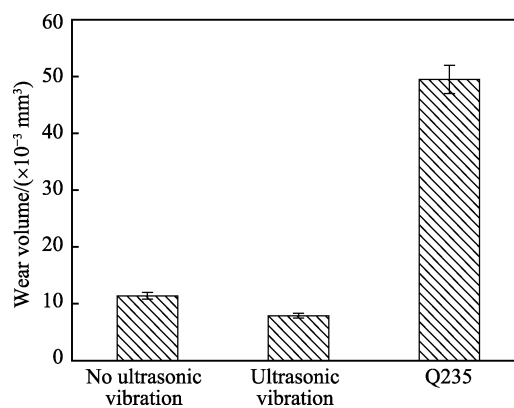


图 10 两种涂层和基体磨损量对比
Fig.10 Comparison of wear rates of two coatings and substrates

3 结论

1) 激光熔覆过程中同步施加空载式超声振动可提高二次形核率, 涂层由细小等轴晶和少量枝晶组

成, 微观组织更加致密, 没有明显的裂纹和气孔等缺陷, 涂层质量得到提升。

2) 超声振动的空化效应和热效应使涂层中各元素分布更加均匀, WC 聚集现象得到改善, 超声振动对熔覆后涂层的物相组成没有显著影响。

3) 施加超声振动后涂层的显微硬度和耐磨性都有明显提升, 与未施加超声振动的涂层相比, 硬度提高了 13%, 耐磨性提高了 44%。

参考文献:

- [1] HUANG S W, NOLAN D, BRANDT M. Pre-placed WC/Ni clad layers produced with a pulsed Nd:YAG laser via optical fibres[J]. Surface and coatings technology, 2003, 165: 76-80.
- [2] 王维, 郭鹏飞, 张建中, 等. 超声波对 BT20 钛合金激光熔覆过程的作用[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803004. WANG Wei, GUO Peng-fei, ZHANG Jian-zhong, et al. Ultrasonic effect on laser cladding BT20 titanium alloy process[J]. Chinese journal of lasers, 2013, 40(8): 0803004.
- [3] 刘洪喜, 陶喜德, 张晓伟, 等. 机械振动辅助激光熔覆 Fe-Cr-Si-B-C 涂层的显微组织及界面分布形态[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2192-2202. LIU Hong-xi, TAO Xi-de, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and interface distribution of Fe-Cr-Si-B-C laser cladding alloy coatings assisted by mechanical vibration[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(8): 2192-2202.
- [4] 周昌欢, 林晨, 张娟娟, 等. 镍基钎料对 45# 钢激光熔覆镍基 WC 合金熔覆层缺陷的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 91-95. ZHOU Chang-huan, LIN Chen, ZHANG Juan-juan, et al. Effect of Ni-based solder on defects of laser cladding WC alloy layers on 45# steel[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 91-95.
- [5] LIN Y, LEI Y P, LI X Q, et al. A study of TiB₂/TiB gradient coating by laser cladding on titanium alloy[J]. Optics and lasers in engineering, 2016, 82: 48-55.
- [6] 周圣丰, 曾晓雁. 影响激光感应复合快速熔覆碳化钨金属陶瓷层的因素分析[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1380-1385. ZHOU Sheng-feng, ZENG Xiao-yan. Analysis of related factors to affect WC ceramic-metal composite coatings prepared by laser induction hybrid rapid cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2010, 37(5): 1380-1385.
- [7] 李美艳, 韩彬, 王勇, 等. 超声振动对激光熔覆 Ni55 涂层组织及性能影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(10): 199-203. LI Mei-yan, HAN Bin, WANG Yong, et al. Effect of ultrasonic vibration on microstructure and property of laser cladding Ni55 coating[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36(10): 199-203.
- [8] 戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧, 等. 超声冲击细化 FGH95 镍基高温合金激光熔覆层组织[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 59-63. QI Yong-ai, ZHAO Jian-feng, XIE De-qiao, et al. Fining grain of FGH95 nickel-based superalloy laser cladding layer by ultrasound impact treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(3): 59-63.
- [9] 李康, 李晓谦, 李瑞卿. 铸造过程中超声处理对 2219 铝合金固溶后组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(13): 18-26. LI Kang, LI Xiao-qian, LI Rui-qing. Effect of ultrasonic treatment during casting on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy after solid solution treatment[J]. Hot working technology, 2018, 47(13): 18-26.
- [10] 斯松华, 徐锐, 袁晓敏, 等. 激光熔覆 Cr₃C₂/Co 基合金复合涂层组织与摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(2): 125-129. SI Song-hua, XU Kun, YUAN Xiao-min, et al. Microstructure and wear performance of laser cladding Cr₃C₂/Co alloy composite coatings[J]. Tribology, 2006, 26(2): 125-129.
- [11] SONG Wu-lin, ECHIGOYA J, ZHU Bei-di, et al. Vacuum laser cladding and effect of Hf on cracking susceptibility and the microstructure of Fe-Cr-Ni laser-clad layer[J]. Surface and coatings technology, 2000, 126(1): 76-80.
- [12] 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(38): 2116-2120. YUAN Qing-long, FENG Xu-dong, CAO Jing-jing, et al. Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2010, 37(38): 2116-2120.
- [13] 付宇明, 高中堂, 郑丽娟. 镍基碳化钨合金粉末激光熔覆工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(14): 102-105. FU Yu-ming, GAO Zhong-tang, ZHENG Li-juan. Research on technological parameters of laser cladding Ni-based alloy with WC[J]. Hot working technology, 2011, 40(14): 102-105.
- [14] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37: 44-48. CHEN Chang-yuan, DENG Qi-lin, SONG Jian-li. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding[J]. Journal of nanjing university of aeronautics and astronautics, 2005, 37: 44-48.
- [15] 李震, 孙荣禄. 激光功率对 Ni 基 WC 熔覆层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(9): 107-111. LI Zhen, SUN Rong-lu. Influence of laser power on microstructure and properties of Ni-based WC clad layer[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(9): 107-111.
- [16] ZHOU Sheng-feng, HUANG Yong-jun. A study of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding with elliptical spot[J]. Applied surface science, 2008, 254: 3110-3119.
- [17] 王玉玲, 刘善勇, 张翔宇, 等. 超声振动辅助激光熔覆 3540Fe/CeO₂ 涂层实验及分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(21): 2600-2605. WANG Yu-ling, LIU Shan-yong, ZHANG Xiang-yu, et al. Experiments and analyses of 3540Fe/CeO₂ coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding[J]. China machinery engineering, 2018, 29(21): 2600-2605.
- [18] MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan. Investigation on cored-eutectic structure in Ni60/WC composite coatings fabricated by wide-band laser cladding[J]. Journal of alloys and compounds, 2015, 645: 151-157.
- [19] GUO Chun, CHUN Jian-min, ZHOU Jian-song, et al. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating[J]. Surface & coatings technology, 2012, 206: 2064-2071.
- [20] VAMSI K B, SUSMITA B, AMIT B. Microstructure and wear properties of laser deposited WC-12%Co composites[J]. Materials science and engineering, 2010, 527: 6677-6682.