

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.005

## 42CrMo 钢表面激光熔覆复合涂层的显微组织与性能

菅光霄<sup>1\*</sup>, 王清华<sup>1</sup>, 药晓江<sup>1</sup>, 丁元皓<sup>1</sup>, 陈妍<sup>2</sup>, 徐欢欢<sup>3</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司, 河北 三河 065201; 2. 江苏联合职业技术学院 无锡交通分院, 江苏 无锡 214000; 3. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 为了研究超声波对激光熔覆过程的影响, 在确定最优激光工艺参数的基础上, 运用超声波辅助技术, 该技术通过在 42CrMo 钢基体表面应用, 成功制备了镍基合金复合熔覆层。随后, 借助 SEM、XRD、EDS 以及显微硬度仪等精密仪器对涂层的性能进行了全面的检测与分析。通过与无超声振动的激光熔覆层进行对比, 分析了两种方式下的涂层在组织与力学性能方面的差异。从而得出: 在对比研究超声振动对激光熔覆涂层性能的影响中, 无论是否引入超声振动, 涂层的物相组成均包括固溶体  $\gamma$ -Ni(Fe), 金属间化合物 Ni<sub>3</sub>Fe, 以及 WC、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 等; 然而, 超声振动显著细化了涂层晶粒, 主要由树枝晶和细小枝晶组成, 这一变化不仅提高了涂层的平均显微硬度至 891.3 HV, 相较于无超声振动涂层, 提升了约 27%; 涂层的摩擦性能也得到了显著改善, 摩擦因数降低至 0.311, 磨损量减少至  $9.17 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ , 分别降低了约 19% 和 25%。此外, 涂层的磨损形式为轻微的磨粒磨损, 进一步证实了超声振动对涂层性能的积极改善作用。

**关键词:** 激光熔覆; 超声波; 显微组织; 硬度; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.4

**文献标识码:** A

## Microstructure and properties of laser cladding composite coating on 42CrMo steel surface

Jian Guangxiao<sup>1\*</sup>, Wang Qinghua<sup>1</sup>, Yao Xiaojiang<sup>1</sup>, Ding Yuanhao<sup>1</sup>,  
Chen Yan<sup>2</sup>, Xu Huanhuan<sup>3</sup>

(1. CNOOC Oilfield Services Co., Ltd., Sanhe 065201, China; 2. Wuxi Transportation Branch of Jiangsu United Vocational and Technical College, Wuxi 214000, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In order to study the influence of ultrasonic wave on laser cladding process, on the basis of determining the optimal laser process parameters, the ultrasonic assisted technology was applied on the 42CrMo steel matrix surface to successfully prepare the nickel-base alloy composite cladding layer. Then, the properties of the coating were tested and analyzed by SEM, XRD, EDS and microhardness tester. Compared with laser cladding without ultrasonic vibration, the differences in microstructure and mechanical properties of the two coatings were analyzed. The results show that in the comparative study

收稿日期: 2024-05-13      修回日期: 2024-05-29

通信作者: 菅光霄(1995—), 男, 硕士, 中级工程师, email: jiangx@cosl.com.cn

基金项目: 中国海油旋转导向谱系化技术与产业化研究(CNOOC-KJGG-2022-1402)

引用信息: 菅光霄, 王清华, 药晓江, 等. 42CrMo 钢表面激光熔覆复合涂层的显微组织与性能[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 30-37, 45.

Jian Guangxiao, Wang Qinghua, Yao Xiaojiang, et al. Microstructure and properties of laser cladding composite coating on 42CrMo steel surface[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 30-37, 45.

of the effect of ultrasonic vibration on the properties of laser cladding coating, the phase composition of the coating includes solid solution  $\gamma$ -Ni(Fe), intermetallic compound  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , WC,  $\text{C}_{123}\text{C}_6$ ,  $\text{Fe}_7\text{C}_3$ , etc., regardless of whether ultrasonic vibration is introduced. However, ultrasonic vibration significantly refines the grain of the coating, which is mainly composed of dendrites and fine dendrites. This change not only increases the average microhardness of the coating to 891.3 HV, but also increases by about 27% compared with the coating without ultrasonic vibration. The friction performance of the coating was also significantly improved, with the friction factor reduced to 0.311 and the wear amount reduced to  $9.17 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ , which were reduced by about 19% and 25%, respectively. In addition, the wear form of the coating is slight abrasive wear, which further confirms the positive effect of ultrasonic vibration on the coating performance.

**Keywords:** laser cladding; ultrasonic; microstructure; hardness; friction and wear

42CrMo钢属于一种中碳低合金结构钢,凭借其高强度、优越韧性和低淬火变形等特性,在调质处理后展现出卓越的疲劳抗性和冲击韧性,一般可用于石油深井钻杆和井下打捞工具的加工制造等。石油钻杆在井下服役过程中需要承受冲击载荷作用,在与井壁接触过程中会产生不同形式的摩擦磨损<sup>[1-2]</sup>。

材料表面改性技术是一种通过对传统金属材料表面进行一定处理来获得较好综合性能的工艺方法,常见的表面改性技术主要有表面淬火、热喷涂、气相沉积、激光熔覆技术等<sup>[3-4]</sup>。近些年来,随着激光器设备的不断发展与应用,激光熔覆技术得到迅速发展,该技术通过在价格低廉的基体表面制备出具有高硬度和良好耐磨性能的涂层,来达到局部修复或整体强化基体、延长零部件的使用寿命以及降低生产成本的目的,因此激光熔覆技术迅速成为表面改性技术领域研究热点<sup>[5-6]</sup>。然而,激光熔覆技术,作为一种典型的快速熔化与冷却工艺,其在实施过程中,熔覆层与基体间温度梯度较为显著,且由于熔覆材料和基体在热膨胀系数上的差异,易引发裂纹和气孔问题。尽管工艺参数的优化有助于调控熔覆层内应力,进而降低裂纹产生的风险,但当激光制造工艺自身的调控能力趋于饱和时,就需要寻求更为有效的外部辅助手段,这些手段将进一步提升激光熔覆技术的稳定性和可靠性,以满足高精度制造的需求<sup>[7-8]</sup>。

超声波因其独特的空化、声流、机械和热效应,可有效干预熔池的凝固过程,将超声振动作用于熔池中,不仅能够安全、节能的条件下操作,更能有效改善涂层的组织与性能。因此,超声振动辅助激光熔覆技术已经成为国内外学者的研究新思路<sup>[9]</sup>。在Chen等<sup>[10]</sup>的深入探究中,揭示了超声振动

频率对激光熔覆工艺的影响,当超声振动频率超过2 kHz时,超声的穿透深度得到了显著的扩展,这一扩展不仅优化了激光熔覆工艺,而且显著减少了熔覆层中缩孔的数量,进而提升了熔覆层的整体质量和性能;Ma等<sup>[11]</sup>研究发现,随着超声功率的增大,激光熔覆层与基体的润湿性增大,晶粒尺寸细化,激光熔覆层的摩擦因数降低,常温耐磨性变好;姚芳萍等<sup>[12]</sup>研究发现,超声振动细化了H13热作模具钢表面Ni25合金激光熔覆层的显微组织;陈畅源<sup>[13]</sup>证明了超声振动的空化效应能够均匀激光熔覆层组织,降低裂纹数量。目前,在激光熔覆层的研究中,超声振动主要影响组织细化和常温下的力学性能的显著提升上,尽管这一领域已有一定的研究积累,但关于超声振动如何影响熔池内增强颗粒的分布及作用机制,以及随后激光熔覆复合层在高温耐磨性方面的表现,研究和探讨尚显不足,这些研究空白为未来的科研工作提供了广阔空间和重要方向。

针对当前研究不足,本文选用碳化钨作为增强材料,借助超声振动辅助激光熔覆技术,在42CrMo钢基体上成功制备镍基合金复合涂层,系统研究了超声振动对涂层显微结构、物相、硬度及耐磨性能的具体影响,以期制备性能优异的复合涂层提供试验参考。

## 1 试样制备与试验方法

在本项研究中,选择42CrMo钢作为基体材料,通过电火花切割技术将其加工成规格为60 mm×40 mm×15 mm的标准试样。为确保熔覆层的附着质量,首先使用砂纸对试样表面进行打磨处理,去除氧化皮和其他杂质,随后采用无水乙醇和丙酮对表面进行彻底清洗,并将试样晾干备用。基体材料的

详细化学成分列于表1。作为熔覆材料,选用由中国冶金研究院提供的镍包碳化钨粉末,其粒径范围介于48~106  $\mu\text{m}$ 之间,其中碳化钨的质量分数为25%。该粉末由镍基自熔性合金包裹碳化钨硬质陶瓷颗粒组成,具有独特的结构特点(如图1所示),其详细

的化学成分可参见表2。在熔覆前,使用20%的松香酒精溶液作为黏结剂,将粉末调至黏稠状态,并均匀涂覆于基体表面,控制涂覆厚度为1.5 mm,随后在80  $^{\circ}\text{C}$ 下烘干4 h以确保涂层与基体的紧密结合。

表1 42CrMo 钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 42CrMo steel

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
含量/(wt.%)	0.38~0.45	0.2~0.4	0.5~0.8	0.9~1.2	0.15~0.25	Bal.

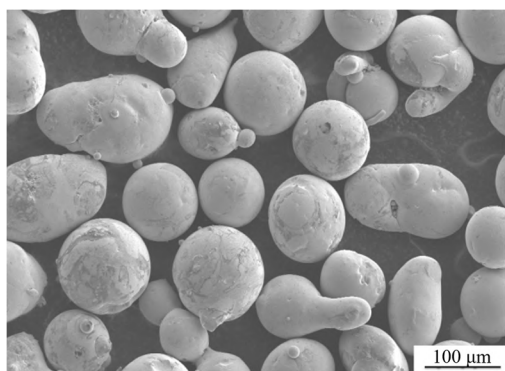


图1 镍包碳化钨粉末的形貌

Fig.1 Morphology of nickel-coated tungsten carbide powder

表2 镍包碳化钨的化学成分

Tab.2 Chemical composition of nickel-coated WC powder

元素	WC	Cr	Fe	B	Si	Co	Ni
含量/(wt.%)	25	9.8	2.3	2.3	3.2	3.8	Bal.

为深入探究多道搭接激光熔覆技术的优化效果,本研究选用了FL020型光纤激光器,其激光输出能力强大,最大功率达2 000 W,波长范围为950~1 100 nm。通过多次正交实验,确定了最佳工艺参数:激光功率1 200 W,扫描速度5 mm/s,光斑直径4 mm,多道熔覆搭接率优化至40%。在熔覆过程中运用特制的超声波发生器,以20 kHz的工作频率和250 W的超声功率,对激光熔覆层同步施加超声振动,工具头输出端振幅控制在60~70  $\mu\text{m}$ 之间。同时,为防止熔覆层高温氧化,选用了高纯度(99.9%)氮气作为保护气体,流量设定为15 L/min。试验开始前,预先启动超声振动设备,并在试验结束后延迟60 s关闭,以避免涂层因过早冷却而产生缺陷,确保熔覆层质量。

为了对激光熔覆层的各项性能进行全面分析,

首先,利用D/Max2500PC型X射线衍射仪(XRD),以铜靶和K $\alpha$ 1射线(波长为0.154 18 nm)为检测手段,在40 kV的管电压下,以5  $^{\circ}/\text{min}$ 的扫描速率,精确分析熔覆层的物相组成。接着从熔覆层中截取尺寸规格为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm的试样,经过打磨和抛光处理后,使用王水(由体积比为1:3的HNO $_3$ 和HCl混合而成)腐蚀60 s,随后采用Merlin Compact型场发射扫描电子显微镜(SEM)对截面形貌进行细致观察,并利用其附带的能谱仪(EDS)对微区成分进行分析。为了评估熔覆层的硬度性能,采用FM700型显微硬度计,在5 N的载荷下保载5 s,对由熔覆层与基体的结合界面向两侧每隔0.1 mm的位置进行硬度测试,每个距离处测试3次并取平均值,以确保数据的准确性。最后,截取尺寸规格为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 15 mm的试样,使用UMT-3型多功能摩擦磨损试验机,在20 N的载荷下,以Si $_3$ N $_4$ 陶瓷球为对磨件,进行20 min的往复运动磨损试验,试验结束后,利用Mitutoyo SJ-210型表面粗糙度仪精确测量了磨痕的宽度和深度,并通过积分求得磨痕截面积,进而计算出磨损量。此外,还需利用扫描电子显微镜对磨损形貌进行了观察和分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 对显微组织的影响

图2为有、无超声振动辅助激光熔覆涂层横截面和结合区的显微组织。由2(a)可以看出,无超声振动时,涂层横截面出现了明显的凹坑和黑点,在横截面的中下部分还出现了一条裂纹;相对2(a)来说,有超声振动的涂层横截面未出现以上缺陷,显微形貌更平整、均匀。无超声振动的激光熔覆层结合区不明显,说明涂层与基体之间未形成良好的冶金结合;而图2(d)有超声振动的涂层结合区存在一条明显清晰的光亮带,其主要成分为平面晶,这是由于

镍包碳化钨在激光辐照下迅速熔化,熔池与基体间热交换导致温度梯度显著增大,进而使结晶速率减缓,在高温下垂直生长的枝晶溶解加速,促进了平行于生产方向的平面晶的形成,因此根据结晶理论可知结合区晶粒应为平面晶<sup>[14]</sup>。结合区的上方为熔覆层的底部,无超声振动的激光熔覆层底部多为柱状晶,有少量的胞状晶,垂直于结合区的方向生长且大小不均匀;有超声振动的激光熔覆层底部柱状晶的生长方向性减弱,分布着一些破碎的枝晶,且组织较为致密、均匀。这是因为在激光熔覆工艺中,

超声波的传播会引发空化效应,在这一过程中形成的空化泡会在瞬间产生高温高压状态,显著增强合金熔体的过冷度。这种效应导致原本在熔池中形成的粗大枝晶因晶界破裂而被有效破碎。此外,超声波的热效应诱发的声流搅拌作用进一步将这些破碎的枝晶均匀分散至熔体的不同区域,不仅促进了新晶核的形成,提升了形核率,还实现了晶粒组织的细化,从而优化了熔覆层的微观结构特性<sup>[15]</sup>,改善涂层组织中出现的缺陷。

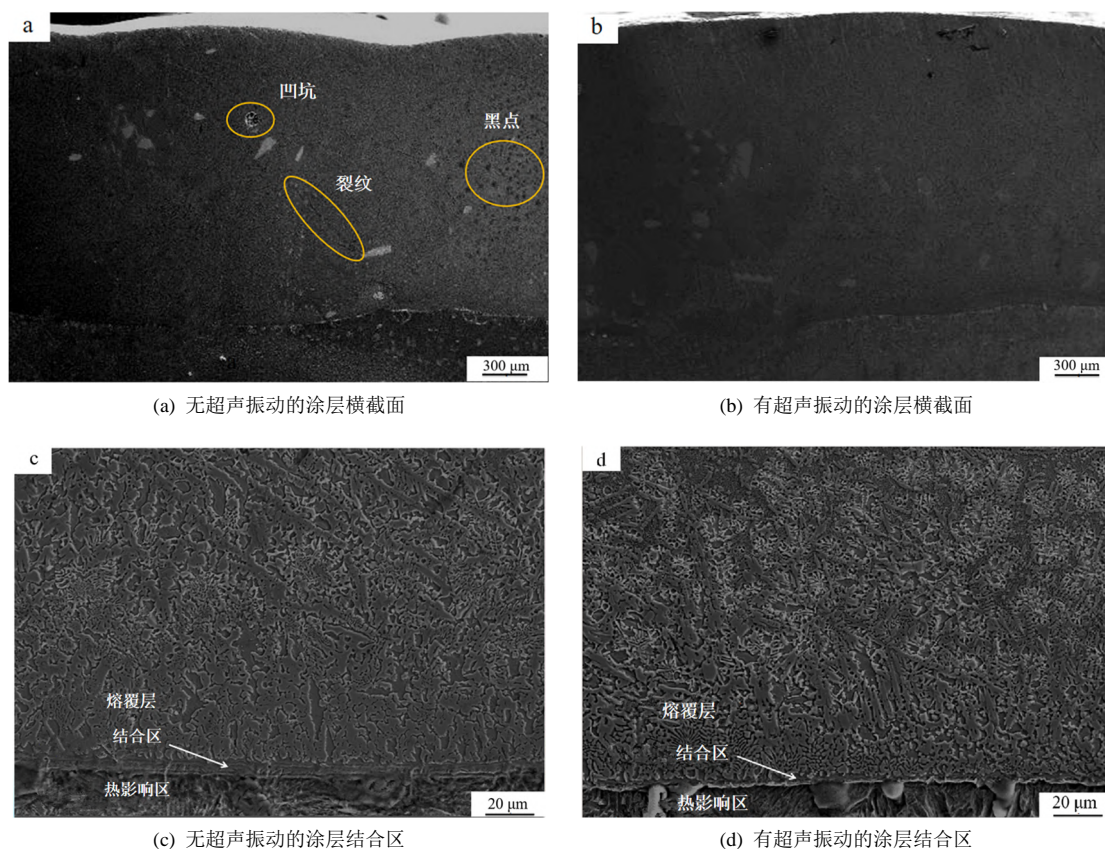


图 2 有无超声振动辅助涂层横截面和结合区的显微组织

Fig.2 Microscopic structure of cross-section and bonding zone of coating with or without ultrasonic vibration assistance

图3对比了有无超声振动辅助下激光熔覆涂层中部的显微组织。如图3(a)所示,无超声振动时,激光熔覆层中部存在两处明显的块状物质聚集区,这些物质的聚集现象较为显著,为了深入分析这些块状物质的成分,对A点进行EDS能谱分析。分析结果显示,该块状物质主要由以下元素组成(以质量分数/%表示): W(42.65%)、C(17.71%)、Ni(16.69%)、Fe(7.25%)、Cr(14.12%)、Si(1.58%)组成,这一分析结果揭示了材料在激光熔覆过程中的微观结构变化。由此得出块状物质主要为镍包碳化钨粉末中未

溶解的碳化钨颗粒;而有超声振动的激光熔覆层中部为细小枝晶和树枝晶,不存在大块碳化钨颗粒,组织分布也较图3(a)致密。产生上述现象的原因在于超声振动对熔池的持续作用,其产生的空化效应使得液态金属处于非平衡状态的压力环境中,这种非平衡状态导致熔池局部形成负压区,进而在高频周期性振荡的条件下,促使弥散于周围的气体形成气泡,这些气泡在崩溃、闭合的瞬间产生强烈的高温高压现象,形成了对熔覆层中粗大枝晶的强烈冲击。在这种作用下,原本粗大的枝晶被打断、打碎,



并重新熔化。随着熔体的流动和搅拌,这些被打碎的枝晶碎片被均匀分散至熔体各处,为新的晶核形成提供了条件。因此,熔覆层中的组织得以重新生

长,形成了更加细小的断裂枝晶组织和粒状结构。这一过程不仅提高了液态熔池的形核率,还有效地细化了晶粒,改善了熔覆层的微观结构<sup>[16]</sup>。

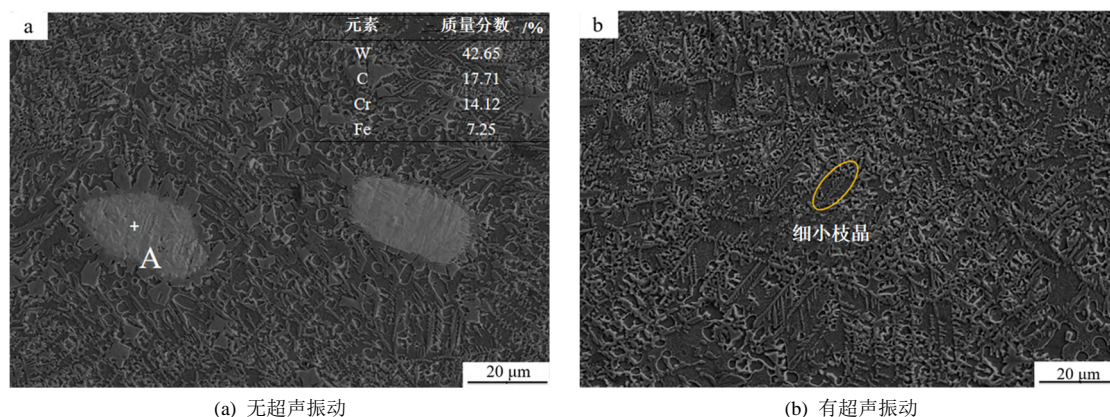


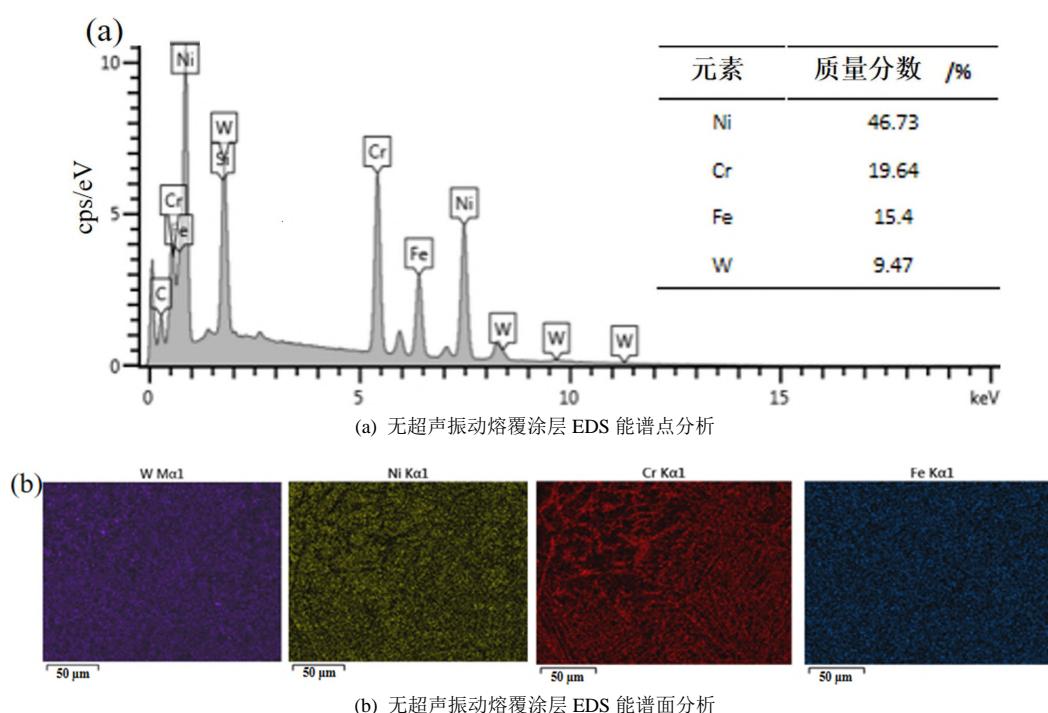
图3 有无超声振动辅助涂层中部的显微组织

Fig.3 Microstructure in the middle of the coating with or without ultrasonic vibration assistance

## 2.2 对元素组成成分的影响

为了进一步分析超声振动对激光熔覆涂层内部元素分布的影响机制,本研究采用EDS能谱分析仪对两种不同条件下制备的涂层进行了面扫描分析。由图4的数据可以看出,枝晶的主要成分为Ni,其次是Cr、Fe、W,还有微量的C、Si。图(a)未施加超声振动时,涂层中的Ni、Cr分布不均匀,且Ni元素含量较高,导致涂层易出现成分偏析现象。同步超声振动后,Ni、W元素含量降低,由此可知涂层中WC聚集和成分偏析现象得到明显改善,相较于

无超声振动,Cr元素的含量相对提升,这归因于Cr与C之间的强亲和性,促使其在初生枝晶位置形成碳化物,均匀了涂层中的各元素分布。此外,超声振动的施加能够加强金属流体之间的对流作用,打断涂层中的粗大枝晶组织,提高基体和熔体二者元素间的渗透力、扩散力,增强WC聚集物的可溶解性,从而促进合金元素的微观组织分布更加均匀化,这些发现对于优化激光熔覆涂层的性能具有重要意义。



(b) 无超声振动熔覆涂层 EDS 能谱面分析

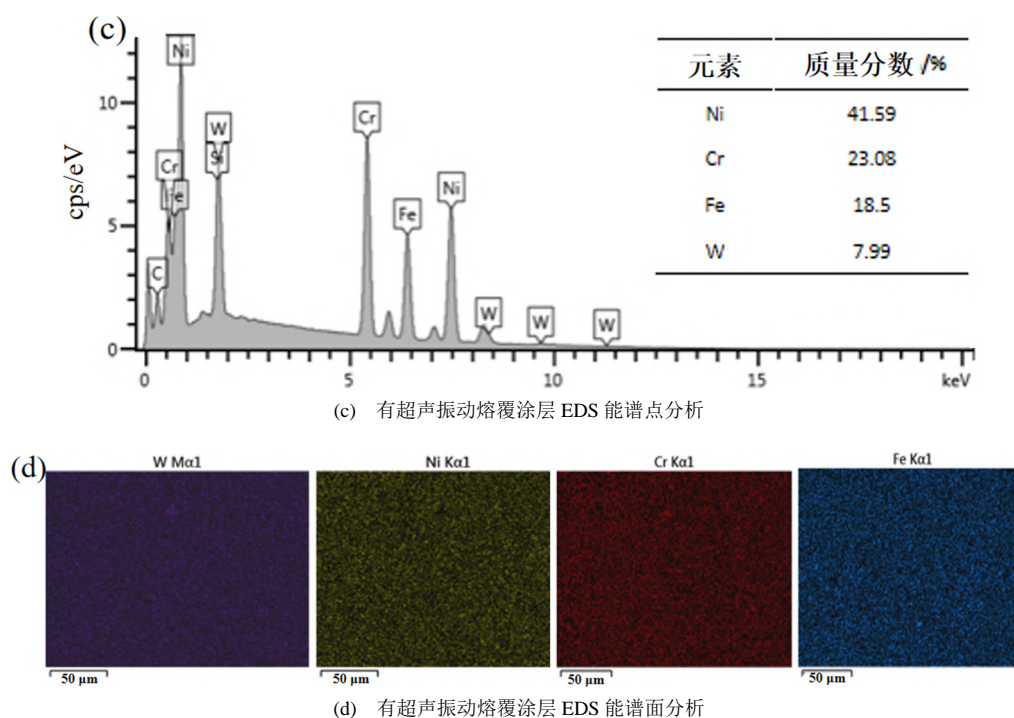


图 4 有无超声振动辅助涂层的 EDS 能谱分析

Fig.4 EDS energy spectrum analysis of coatings with or without ultrasonic vibration assistance

### 2.3 对物相组成的影响

图5为有、无超声振动辅助激光熔覆镍基碳化钨涂层的XRD图谱。由图可知,两种涂层的物相组成相同,物相组成主要与成分和冷却条件有关,由此得出超声振动对涂层物相结构的改变不产生影响,仍主要由 $\gamma$ -Ni(Fe)、金属间化合物 $\text{Ni}_3\text{Fe}$ 、增强相 $\text{WC}$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Fe}_7\text{C}_3$ 等组成,这些物相结构共同决定了涂层的性能。其中,固溶体 $\gamma$ -Ni(Fe)在熔池中的存在对提升涂层硬度和耐磨性具有显著作用;从衍射

分析中,晶界处Cr元素含量因其与C结合形成碳化物 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 而提升,这一现象揭示了Cr元素在涂层性能优化中的重要作用。超声波作为外加物理场的一种,在熔池传播时产生的热效应有助于减少温度梯度,加快熔体流动,使熔体受热均匀,由于元素含量及分布发生变化,涂层晶界变薄。因此,超声振动的施加起到了增强熔池中晶体形核长大的作用,同时促进碳化物 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 的析出,从而细化晶粒组织,改善晶体结构的完整性。

### 2.4 对显微硬度的影响

图6为有无超声振动辅助激光熔覆涂层的显微硬度变化曲线。从图6(a)可以清晰观察到,随着距离涂层界面的增加,涂层的显微硬度逐渐上升,但其增长过程并非线性,而是呈现出较大的波动。这种硬度提升现象主要归因于固溶体 $\gamma$ -Ni(Fe)的形成,以及碳化物 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 在枝晶上的析出。前述分析表明,无超声振动辅助的涂层内部枝晶成分分布不均匀,这种不均匀性导致了显微硬度曲线的显著波动。与此同时,与基体相比,无论是否施加超声振动,热影响区的显微硬度较母材均有所提高,这与热影响区存在的板条马氏体有关,能够阻碍基体的变形,从而使硬度曲线呈现上升的趋势。经计算得出无超声振动的涂层平均显微硬度为704.4 HV,而施加超声振动后,硬度提升至891.3 HV,较无超声振动的涂

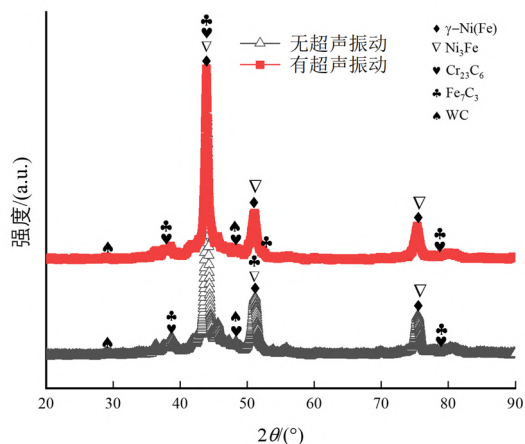


图 5 有无超声振动辅助涂层的 XRD 谱

Fig.5 XRD Spectrum of Coating with and without Ultrasonic Vibration

层硬度提高了27%左右,且硬度曲线分布较为平缓,提升效果较为明显。由此可见,超声振动的施加对提高涂层的显微硬度有很大的帮助,超声波产生的空化效应会加快熔池内液态金属流动,使熔池凝固过程中的温度场分布更加均匀,弥散强化作用更加明显。此外,超声振动对涂层微观结构产生了积极影响,促进了固溶体 $\gamma$ -Ni(Fe)的均匀分布,并加速了碳化物 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 的析出,从而增加晶粒的二次形核率,晶粒尺寸变小,晶核数量增多,晶体的完整性得以增强。根据Hall-Petch理论<sup>[17]</sup>,晶粒细化可提升材料屈服强度,因此,超声振动的应用有效提高了涂层的硬度,显著增强了其抗变形能力,进而获得了硬度更高的涂层。

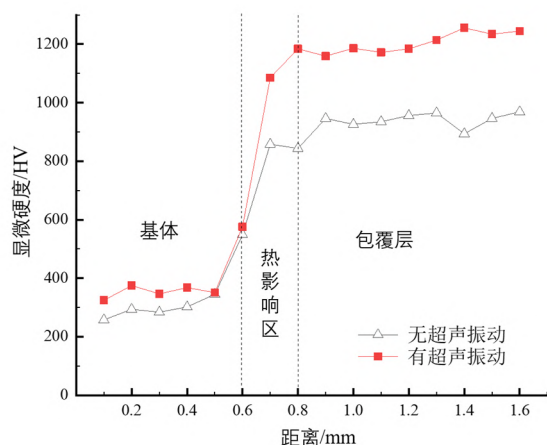


图6 有无超声振动辅助涂层的显微硬度分布曲线

Fig.6 Microhardness distribution curve of coatings with and without ultrasonic vibration assistance

## 2.5 对耐磨性能的影响

摩擦磨损性检测是评价涂层耐磨性好坏的重要参数,除了材料本身的固有特征之外,外界的各种因素也会影响摩擦系数和磨损量的检测结果。因此,为了更好地研究超声振动对涂层耐磨性的影响,在保证试验条件一致的前提下,对比分析了有无超声振动辅助下激光熔覆镍基碳化钨涂层的耐磨性能,并绘制了相应的摩擦因数曲线(如图7所示)。在摩擦试验初期,两种涂层的表面粗糙度均较低,因此摩擦因数也较小。随着摩擦过程的进行,涂层表面逐渐磨损,进入磨合期后摩擦因数有所上升。最终,经过磨合期的调整后,摩擦因数趋于稳定,最后进入稳定磨损阶段。由试验结果可知,无超声振动的涂层平均摩擦因数约为0.383,有超声振动的涂层平均摩擦因数约为0.311,相较于无超声振动的涂层摩擦因数减小了19%。通过对比两条曲线,

有超声振动的涂层较于无超声振动的涂层更平稳,其磨合期显著缩短,从而更快地进入稳定的磨损阶段。在激光熔覆过程中引入超声振动以后,激光熔覆层组织多数为树枝晶和细小晶粒,物相组成和硬质相分布也较为均匀,因此在摩擦磨损试验之后摩擦因数较小且变化程度较小。

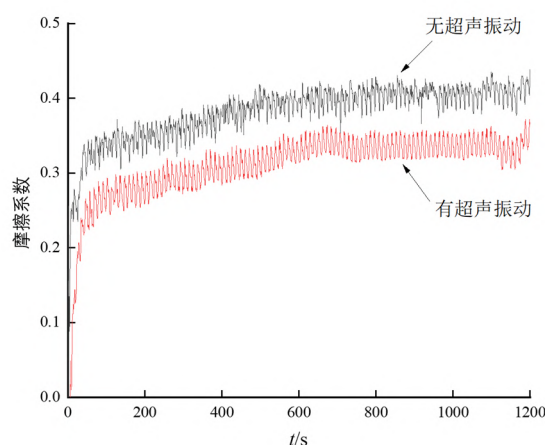


图7 有无超声振动辅助涂层的摩擦因数曲线

Fig.7 Friction coefficient curves with and without ultrasonic vibration auxiliary coating

图8为经摩擦磨损试验后,经过对磨痕截面轮廓的细致测量与计算,得到了各组涂层的磨损量数据。结果显示,基体磨损量最大,达到 $44.70 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,而无超声振动涂层的平均磨损量为 $12.25 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。值得注意的是,采用超声振动辅助的涂层磨损量显著降低至 $9.17 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,其耐磨性较无超声振动涂层提升了约25%,显示出优越的耐磨性能。这一结论与Holm-Archard磨损理论相符,即硬度高的材料耐磨性能更佳<sup>[18]</sup>,这一结果也与涂层的摩擦因数相一致。

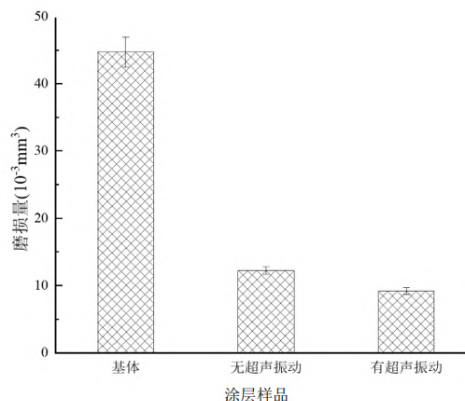


图8 有无超声振动辅助涂层的磨损量

Fig.8 Wear amount of auxiliary coatings with and without ultrasonic vibration



为了更好地探究超声振动在激光熔覆涂层耐磨性方面的作用机制及其磨损机理,采用扫描电子显微镜对两组试样的磨痕表面进行了系统性的观测与分析,如图9所示。由图可以看出,无超声振动涂层的磨痕表面犁沟较深,平整性较差,这是因为对磨件为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷球的高硬度与涂层之间在摩擦过程中产生了显著的差异,导致涂层在反复的摩擦作用下表面温度升高,进而形成大量片状磨屑,其

磨损形式主要包括黏着磨损和磨粒磨损。然而,在有超声振动辅助的情况下,涂层表面的磨损情况则呈现出截然不同的特点,超声振动有效促进了熔池内液态金属的流动,破碎了粗大的柱状晶,使得涂层组织更加均匀。因此,涂层表面的磨痕较为平整,磨损形式主要表现为轻微的磨粒磨损,显著提升了涂层的耐磨性能,增强了涂层的抗黏着力,从而使得黏着磨损基本消失。

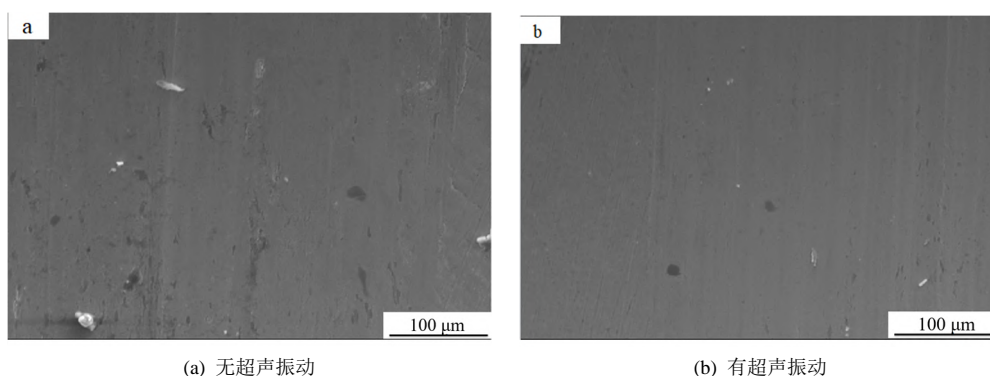


图 9 有无超声振动辅助涂层的磨损形貌

Fig.9 Wear morphologies of auxiliary coatings with and without ultrasonic vibration

### 3 结 论

(1)无超声振动的激光熔覆层结合区未见明显光亮带,而有超声振动的激光熔覆层结合区存在一条明显的光亮带,这说明激光熔覆层与基体之间形成了冶金结合;无超声振动的激光熔覆层为粗大的柱状晶,其中分布着粗大的碳化钨颗粒,有超声振动的激光熔覆层中部为细小枝晶和树枝晶,不存在大块碳化钨颗粒,组织细化效果明显。

(2)施加超声振动并不能改变涂层的物相组成成分,由超声波产生的热效应起到了增强熔池中晶体形核长大的作用,元素分布更加均匀,从而改善晶体结构的完整性。

(3)超声振动显著提升了激光熔覆涂层的显微硬度和耐磨性,平均显微硬度达891.3 HV,硬度分布均匀,较无超声振动涂层硬度提升约27%,展现出更优异的机械性能;摩擦因数和磨损量分别减小了约19%和25%;无超声振动激光熔覆层的磨损形式为黏着磨损和磨粒磨损,而有超声振动激光熔覆层的磨损形式为轻微的磨粒磨损。

### 参考文献

[1] Ju J, Zhou Y, Kang M D, et al. Optimization of process

parameters, microstructure, and properties of laser cladding Fe-based alloy on 42CrMo steel roller[J]. Materials, 2018, 11(10): 2061.

[2] 顾建, 李多青, 王开明. 42CrMo 钢表面激光熔覆镍基复合熔覆层组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 111-114.

[3] 朱浩. 42CrMo 钢表面涂层制备工艺的研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.

[4] 赵彦辉, 董利民, 杜昊, 等. 等离子体氮化与物理气相沉积复合处理的研究进展[J]. 机械工程材料, 2012, 36(6): 1-4.

[5] Kai Z, Liu W J, Shang X F. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping [J]. Optics and Laser Technology, 2007, 39(3): 549-557.

[6] 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.

[7] 王争强, 李文戈, 杜旭, 等. 激光熔覆技术在轴类零件再制造过程中的应用现状[J]. 机械工程材料, 2020, 44(11): 35-40.

[8] 高敬翔, 李昌, 陈正威, 等. 基于相场法的超声振动对激光熔覆多晶凝固行为的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12161-12168.