

机械振动辅助激光熔覆铁基涂层的微结构特征及结合界面处的元素扩散行为

杨昕恬 刘洪喜 张晓伟 陶喜德 蒋业华

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093

摘要 采用机械振动辅助同步送粉,通过激光熔覆技术在 45 钢表面制备了 Fe60 合金涂层。利用光学显微镜(OM)、X 射线扫描仪(XRD)、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)研究了铁基涂层与基体结合界面处的显微形貌、物相组成,元素分布及其扩散行为。结果表明,熔覆层结合界面处均是完整向上生长的胞状树枝晶,主要物相为 (Fe,Cr) 固溶体和少量化合物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, Fe_2B 和 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 。机械振动的能量致使树枝晶中 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 由枝晶内离散至枝晶间,大量 (Fe,Cr) 固溶体未能在凝固前端排出而残留在枝晶内。机械振动的能量越高,越有利于激光熔池中元素的扩散。同时,振动的振幅和频率对结合界面前沿晶粒细化及元素分布的影响也存在差异,频率的增加有利于枝晶定向生长,振幅增加则有利于在结合界面前沿 $40\ \mu\text{m}$ 左右范围内的枝晶弥散分布。振幅增加对结合界面间的 Si 和 Cr 元素扩散影响更大。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 机械振动; 铁基涂层; 微观结构; 扩散行为

中图分类号 TN249;TG156.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s214007

Microstructure and Element Diffusion Behavior at Interface of Fe-Based Coatings by Mechanical Vibration Assisted Laser Cladding

Yang Xintian Liu Hongxi Zhang Xiaowei Tao Xide Jiang Yehua

Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650093

Abstract Fe60 alloy coating is fabricated on 45 steel surfaces using mechanical vibration assisted synchronous powder feeding laser cladding process. The microstructure of Fe-based cladding coating and bonding interface, phase composition, element distribution characteristic and diffusion behavior at the interface are investigated by optical microscope (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS), respectively. The results show that the bonding interface are complete to cellular dendritic crystal growth, the main phases are composed of (Fe,Cr) solid solution and a small amount of $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, Fe_2B and $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ compound. Mechanical vibration energy causes dendrite $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ discrete from dendrite internal to interdendrite, and a large amount of (Fe,Cr) solid solution remains in the dendrite internal. Higher mechanical vibration energy leads to better element diffusion in laser molten pool. Meanwhile, the effect of vibration amplitude and frequency on the elements distribution and grain refining at the bonding interface front are also different. Increase the frequency is beneficial to the directional dendrite growth and increase the amplitude is beneficial to the dendritic dispersed distribution at the bonding interface front $40\ \mu\text{m}$ scope. Increase amplitude is more advantageous to the Si and Cr element diffusion at the bonding interface.

Key words laser technique; laser cladding; mechanical vibration; Fe-based coating; microstructure; diffusion behavior

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 310.1515

收稿日期: 2015-04-10; **收到修改稿日期:** 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61368003),昆明理工大学分析测试基金(20140186)

作者简介: 杨昕恬(1990-),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆表面改性方面的研究。E-mail:2480283086@qq.com

导师简介: 刘洪喜(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事离子束和激光束表面改性方面的研究。

E-mail:piiiluhx@sina.com(通信联系人)

1 引言

激光熔覆是采用高能激光束在被选定工件表面熔覆一层具有特殊性能的合金粉末,以改善工件综合性能的一种表面改性技术。由于激光熔覆可在低成本钢材表面制备出具有高硬度、抗疲劳、良好耐磨耐蚀和高温抗氧化性的功能复合涂层以代替大量贵金属、稀有或稀贵金属材料来实现对机械零部件表面遭受磨损、冲击、氧化和腐蚀等部位的修复,因而被普遍应用于汽车、航空、航天、石油、化工、机械、轧辊和生物医学等领域^[1-3]。

作为在交变负荷下工作的齿轮、轴类、连杆、螺栓等重要结构件,一直大量选用经过热处理后强度、塑韧性等综合力学性能均较优良的 45 钢。但经热处理后的 45 钢仍存在着表面硬度低、耐磨性差、易氧化等不足而限制了它的进一步广泛应用。实践证明,铁基合金粉末在激光熔覆过程中可形成以 α -Fe 或 γ -Fe 为基体的合金碳化物 ($\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 和少量以 Fe_2B 为代表的硼化物,这些碳化物和硼化物具有较高的强度和硬度、优异的耐磨耐腐蚀性和良好的抗氧化性能^[4-6]。因此,通过激光熔覆在 45 钢表面制备出与基材成分接近、界面结合牢固、高硬耐磨且成本低廉的铁基合金涂层便成为近年来材料科学和表面工程领域致力于研究的热点^[7-10]。

然而,铁基合金熔点较高,流动性不好,自熔性差,熔覆层内易产生气孔和裂纹等缺陷,这些固有缺陷限制了它在激光熔覆领域的更深入扩展。研究发现,熔覆涂层的失效与涂层和基体之间存在较大的热物性参数不匹配而导致的热应力密切相关。针对此问题,目前的改善方法主要有对基材进行局部热处理、合理选用熔覆粉末及其配比、优化激光熔覆工艺参数、激光熔覆与其他表面改性技术相结合等等^[11-13]。通过这些方法可提高激光熔池温度场的稳定性、降低熔池冷却速率、细化和均匀涂层内部组织,从而达到抑制或降低涂层开裂的目的。

有关机械振动在工业领域的应用,已有通过机械振动来改善铸造合金晶粒度,并证明机械振动对金属凝固过程中显微组织和晶粒细化有着明显促进作用的报道^[14]。同时,由于机械振动的作用能影响熔池内部液体流动,使成分过冷区和魏氏组织减少,打碎枝晶而促进等轴晶形成,大大降低了焊缝宏观偏析、气孔和夹杂等缺陷,故后来此技术也逐渐被应用到焊接领域^[15,16]。在激光熔覆方面,作者所在课题组近几年将机械振动引入激光熔覆涂层制备过程中,发现机械振动辅助作用下,激光熔池中的结构起伏和能量起伏状态发生了改变,晶粒生长形态和显微组织不同于普通激光熔覆,熔覆层中气孔和裂纹也明显减少,涂层耐磨耐蚀性能和使用寿命均得到了显著提高^[17,18]。但对在机械振动辅助作用下激光熔覆涂层中合金元素在结合界面处扩散行为的研究却鲜见涉及。鉴于此,本文采用机械振动辅助激光熔覆复合改性新技术,在 45 钢表面制备了 Fe60 合金涂层,分析了熔覆涂层的宏观形貌、显微组织、化学组成和物相结构,研究了不同机械振动参数下涂层与基体之间的结合界面特征和结合界面处元素的扩散行为,并结合快速凝固原理和扩散理论,探究了机械振动辅助作用下激光熔覆涂层中界面处元素的扩散机制,以期进一步为机械振动在改善激光熔覆涂层质量和性能方面提供理论和技术基础。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

基材是尺寸为 100 mm×40 mm×6 mm 的 45 钢,其主要化学组成如表 1 所示。实验前,所有试样需除去表面的油、锈、氧化物,然后经不同粒度的金相砂纸打磨、抛光处理,再用无水乙醇和丙酮各超声清洗 10 min。熔覆材料选用 Fe60 合金粉末(粒度范围 20—100 μm),其主要合金元素组成亦如表 1 所示。

表 1 45 中碳钢和 Fe60 合金粉末的化学组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 45 middle carbon steel and Fe60 alloy powder (mass fraction, %)

Chemical composition	C	Si	Mn	Cr	B	Ni	Cu	Fe
45 middle carbon steel	0.42—0.50	0.17—0.37	0.50—0.80	≤0.25	—	≤0.30%	≤0.25	Bal.
Fe60 alloy powder	1.0—4.0	2.0—5.0	—	20—50	2.0—4.0	10—20	—	Bal.

2.2 涂层制备

激光熔覆涂层制备在 GS-TFL6000A 型 6 kW 横流多模 CO_2 激光器及其配套的五轴四联动西门子数控机床、GS-TEL 型激光同步送粉器和 ESS-025 型标准振动系统上共同完成。熔覆工艺参数如下:激光功率 3.8 kW;圆形光斑直径 6 mm;激光扫描速度 500 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$;离焦量 55 mm。采用同步侧向送粉,送粉量 20 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ 。氩气(纯度 99.99%)侧向保护,气流量 25 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。激光熔覆过程中同时施加机械振动,机械振动方向垂直于激光扫描方向,振动模式为正弦波。振动工艺参数为:振幅范围 0.05~0.15 mm,振动频率范围 100~200 Hz。相应的试样编号和振动参数如表 2 所示。经优化工艺后,采用机械振动辅助激光

熔覆复合改性技术在 45 钢表面制备了成形和冶金结合良好、稀释率低且厚度约 1 mm 的铁基合金涂层。

表 2 机械振动参数

Table 2 Experimental parameters of vibration

Sample No.	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C
Frequency/Hz	100	100	100	200	200	200	0
Amplitude/ μm	50	100	150	50	100	150	0

2.3 性能表征

熔覆结束后,用线切割分别沿垂直和平行于激光扫描方向切割截取 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 的试块,经镶嵌、研磨和抛光后,用王水[体积比 $V(\text{HCl}):V(\text{HNO}_3)=3:1$ 配置]深度腐蚀制成金相试样,以便进行界面观察和分析。运用 LEICADFC280 型光学图像分析系统和 Quanta 200 型扫描电镜(SEM)观察激光熔覆涂层和基体之间结合界面处的显微的形貌。借助 EDAX-AMETEK 一体化能谱仪(EDS)对结合界面两侧的元素分布作定性点扫描和定量线扫描,同时对不同的微区和冶金结合界面区域进行元素组成分析。通过 D/max-3BX 型 X 射线衍射仪(Cu 靶 $K\alpha$ 线波长为 1.540 6 nm,管电压为 40 kV,管电流为 30 mA,衍射角范围 $20^\circ\sim 90^\circ$,连续扫描模式)对熔覆涂层进行物相表征。

3 结果与讨论

3.1 涂层结合界面处的显微形貌

图 1 为机械振动作用前后熔覆涂层与基体结合界面前沿放大 400 倍的显微组织。可以看出,机械振动辅助作用下的激光熔覆涂层结合界面前沿均有完整向上生成的胞状晶和树枝晶结构,呈定向凝固特征。振动频率为 100 Hz 的 A 组试样中,随着振幅的增加,在界面前沿 40 μm 范围内的树枝晶呈弥散分布状态,树枝晶主干部分有一定程度的熔断,且弥散分布范围有所扩大。振动频率为 200 Hz 的 B 组试样中,随着振幅的增加,树枝晶和等轴晶的分界线变得模糊,树枝晶被打碎而独立生成等轴晶,但熔覆层结合界面前沿的弥散分布

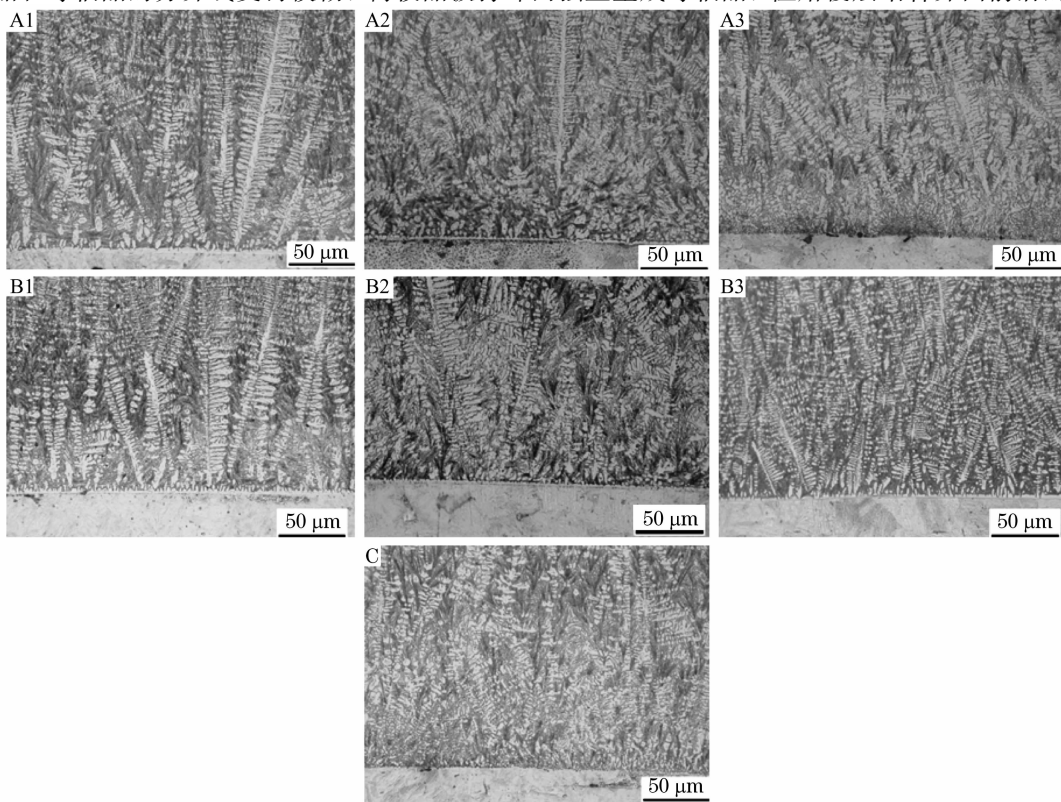


图 1 有无机械振动辅助下激光熔覆涂层的显微组织形貌

Fig. 1 Microstructure of laser cladding coatings with or without mechanical vibration

现象没有 A 组试样明显。在同样振幅情况下,100 Hz 频率的 A 组试样涂层结合界面处树枝晶生长更加完整,且胞状树枝晶的生长范围更宽。出现这种现象的原因是机械振动造成熔体过冷度增大,远离界面处产生大量的均匀等轴晶会抑制树枝晶生长,同时折断的胞状树枝晶亦在熔池中独立生长。由于振幅和频率对熔池的作用特点不同,因此,从图 1 中所示的试样 A1 和 B1 可看出,频率越高,越能促进树枝晶的生长,致使枝晶尺寸较小,且生长更加完整。

激光熔覆过程中的振幅和频率保持一定,因而可视此时的机械振动为无阻尼的往复简谐运动。由于振动过程主要依靠动能传输且所采用的振幅是微米级,所以机械振动势能造成的影响很小,计算过程中可将其忽略。另外,在试样尺寸和质量较小且凝固时间较短的条件下,可假设试样的振动能量吸收率为 1,故机械振动规律应满足(1)式:

$$x = A\sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

对(1)式微分,则

$$v = x' = A\omega\cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mA^2\omega^2\cos^2(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中, x 表示质点在振幅方向的位移(mm); ω 表示振动频率(Hz); t 表示振动作用时间(s); m 表示试样和夹具的重量(g); φ 为初位相(可忽略不计); E_k 表示动能(J)。

根据(3)式,可计算出不同振幅和频率下试样在激光熔覆过程中所受的激振能如图 2 所示。由图 2 可见,试样 B3 的激振能最高,其次是 B2。当振动频率较低(100 Hz)且一定时(对应 A 组的 A1、A2 和 A3),激振能随着振幅增大而逐渐增加(A1 到 A3),但激振能增加的幅度并不大。当振动频率较高(200 Hz)且一定时(对应 B 组的 B1、B2 和 B3),激振能随着振幅增大而增加的幅度较大(B1 到 B3)。可见机械振动中的振幅对激振能的变化影响比较明显,频率只起到辅助振幅的作用。

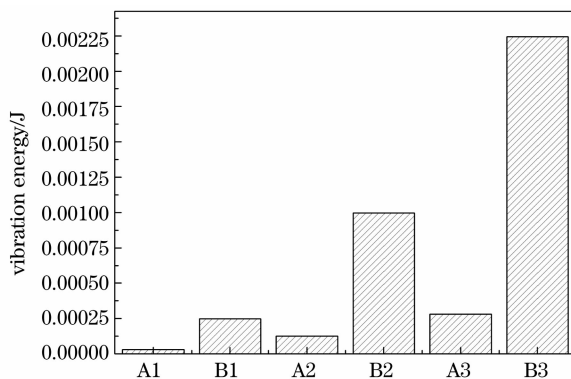


图 2 不同振幅和频率下涂层试样的振动能量

Fig. 2 Vibration energy of laser coating samples under different amplitude and frequency conditions

图 3 是机械振动辅助激光熔覆 Fe60 合金涂层界面的显微形貌。可见,由于涂层试样 A1(50 μm)的振幅较小,结合界面处呈现出平缓的冶金结合层,随着振幅的增大,试样 A2(100 μm)界面处开始明显有细小均匀的胞状起伏,且胞状起伏随着振幅的增加而逐渐加剧,至试样 A3(振幅最大 150 μm)时最为剧烈。频率为 200 Hz 的 B 组试样则正好相反,也就是说,涂层试样 B1 界面处的胞状起伏最剧烈,随着振幅的增加,胞状起伏逐渐趋于平整。在不同频率下,随着振幅的增加,结合界面处冶金结合层的厚度有所减小。另外,在最大振幅为 150 μm 的涂层试样 A3 和 B3 中,枝晶细化效果最为严重。由于机械振动的作用,两个试样涂层中的枝晶均被打碎且弥散分布在熔覆层与基材界面前沿,但由于试样 B3 频率高,枝晶被打碎的程度和分布的均匀性亦更加明显。这说明在机械振动辅助激光熔覆过程中,频率和振幅均会对结合界面处的胞状起伏起到加剧作用,也都能使晶粒得到细化,只是振幅的影响效果更加明显而已。

3.2 熔覆涂层的物相分析

图 4 是有机械振动辅助作用下激光熔覆涂层试样表面的 X 射线衍射(XRD)谱。对照标准 PDF 卡片,可知熔覆层中主要含有(Fe, Cr)固溶体和(Fe, Cr)₇C₃合金碳化物。不同参数的机械振动作用下,熔覆

涂层中所形成物相的衍射峰位基本一致,只是峰强有所不同,A1,A3,B1,B3 试样在衍射角为 65° 处的衍射峰都要比无机械振动的 C 试样强,但 A3,B1,B3 试样在衍射角为 83° 处的峰强比 C 试样都有不同程度的降低。这是由于机械振动改变了熔体内热流分布,导致 Cr,Si,B 和 Fe 出现在某些晶面内的择优生长取向。另外,在衍射角为 51° 处的 (Fe, Cr) 固溶体衍射峰强随着振幅的增加(从 A1 到 A3 和 B1 到 B3)而降低,半高宽亦变小。这是因为,随着振幅的增加,熔池中搅拌作用加强,促进了 (Fe, Cr) 固溶体相的定向择优生长。但对比相同振幅不同频率下的试样(A1 和 B1,A3 和 B3),除 A3 衍射峰强度较 B3 弱以外,其他条件下制备的熔覆涂层试样表面衍射峰强度和半峰全宽都基本相同。由此可以看出,机械振动辅助激光熔覆可使合金涂层中的物相择优生长取向发生改变和晶体结构完整性得到改善,而且振幅的改变比频率更加明显。

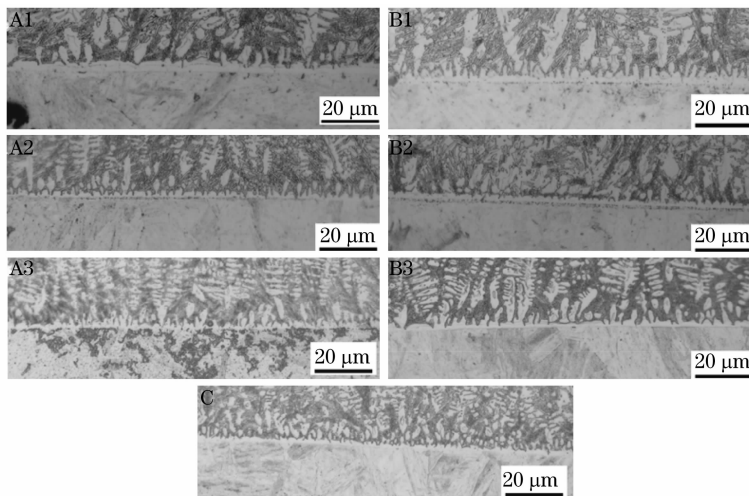


图 3 有无机械振动辅助作用下激光熔覆涂层界面处的组织形貌

Fig. 3 Microstructure at the bonding interface of laser cladding coating with or without mechanical vibration

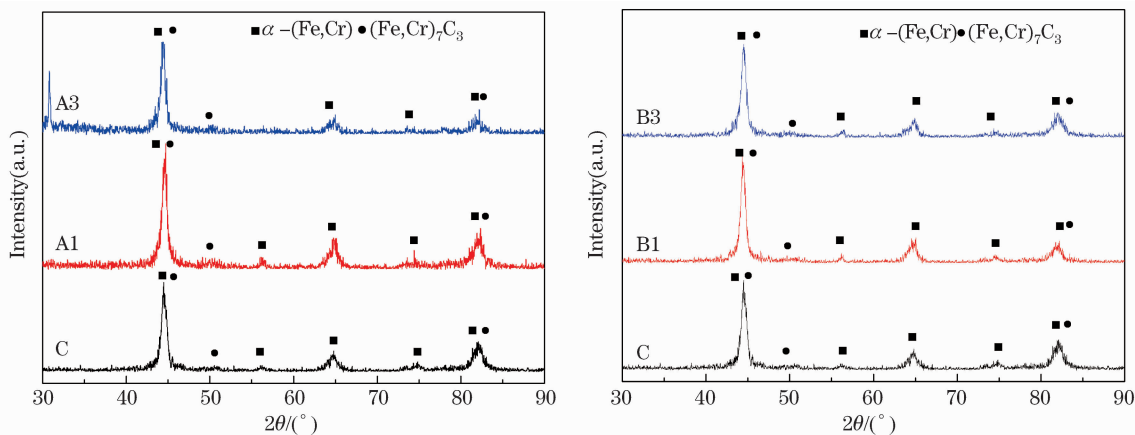


图 4 有无机械振动辅助下激光熔覆合金涂层的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of laser cladding alloy coating with or without mechanical vibration

3.3 熔覆涂层中的元素分布

图 5 是有无机械振动条件下激光熔覆涂层界面不同位置处元素能谱(EDS)分析的 SEM 形貌。相应涂层试样中各点的成份分析结果示于表 2。由于 EDS 对原子序数较小的元素检测灵敏度较低,故表 2 中 C 含量仅作定性分析。结合图 5 和表 2 中各相的元素含量可看出,四种涂层试样在结合界面的点 1 处 Cr 含量要比结合界面前沿的其它点低,试样 A1 和 B3 中 Cr 元素的含量最低,可推断凝固过程中界面生长时排出了 Cr 元素。各涂层试样在 4 点处都为胞状树枝晶,树枝晶内 Cr 含量比非树枝晶的其它点要低,而 Si 则比其它点高,说明凝固过程中与热流方向生长相反的胞状树枝晶尖端排出了固溶度较小的 Cr 原子。结合 XRD 图谱分析结果,可推断树枝晶内形成了大量聚集的 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 。其中,试样 C 在 4 点处 Cr 元素含量最少, Si 含量最多,而试样 B3 在 6 点处 Cr 含量最多, Si 含量最少。根据机械振动能量理论, B3 试样的机械振动能最

大,说明机械振动能量改变了界面处熔体的运动,最终影响元素的分布,且机械振动能量越大,元素分布越均匀。A1(3),B1(3),B3(5),C(3)各点中的颗粒处于胞状树枝晶之间,依 XRD 图谱及 EDS 分析结果,可判断其物相为 (Fe,Cr) 固溶体或 (Fe,Cr)₇C₃ 合金碳化物。另外,A1(3),B1(3)和 B3(5)位置处 Cr 的含量要高于 B1(3)和 B3(5),而 Si 的含量则低于 B1(3)和 B3(5)。同样说明加入机械振动后,激光熔池搅动更加剧烈,熔体内部热流因机械振动作用发生紊流,使得胞状树枝晶在长大过程中没有足够的自由能和时间来排出 Cr 原子而发生了凝固。这个过程减小了 Cr 原子的偏析程度,使熔覆涂层中的硬质相分布更加均匀,有利于改善涂层性能。值得注意的是,C 试样涂层界面前沿的结合区在白亮带与熔覆区之间形成了约 0.3 μm 厚的黑色过渡带,此过渡带上的合金元素含量相对较低。这是由于激光熔覆过程中,界面处于温度场的边缘,热量从高温熔体向低温基体流动速度最快,且界面两侧因元素浓度不同而存在浓度差,致使熔覆过程中发生原子或空位的定向流动产生扩散现象而造成柯肯达尔效应^[19, 20]的缘故。

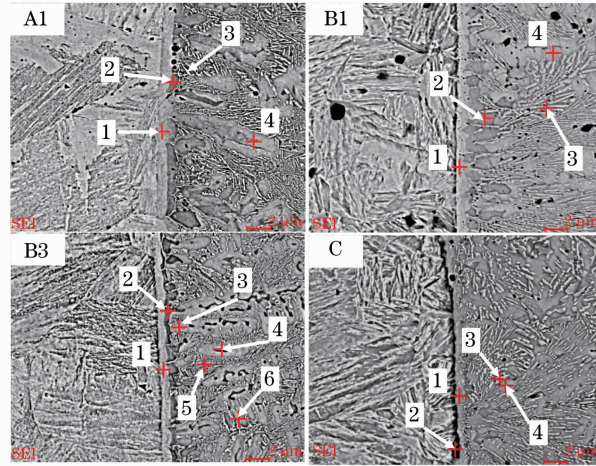


图 5 有无机械振动下激光熔覆涂层及其界面处各点的 EDS 分析位置

Fig. 5 Position of EDS point analysis in coating and bonding interface under with or without mechanical vibration conditions

表 3 有无机械振动下激光熔覆涂层及其界面处各点的 EDS 分析结果

Table 3 EDS results in coating and bonding interface under with or without mechanical vibration conditions

Sample	Position	Cr	Si	C	Mn	Fe
A1	1	9.72	5.61	3.01	0.49	81.16
	2	12.61	6.34	4.03	0.42	76.62
	3	17.22	5.11	3.37	0.33	73.96
	4	14.13	6.79	3.45	0.39	75.23
B1	1	12.24	6.57	4.10	0.45	76.64
	2	12.97	6.68	4.26	0.43	75.66
	3	12.74	7.53	5.85	0.45	73.43
B3	4	17.28	6.11	5.03	0.33	71.26
	1	9.75	5.04	5.28	0.54	79.39
	2	12.83	5.97	3.41	0.40	77.39
	3	13.18	5.66	4.17	0.45	76.54
	4	14.34	8.34	5.21	0.43	71.69
	5	15.42	6.30	4.68	0.43	73.17
C	6	17.74	4.43	4.60	0.53	72.70
	1	12.33	5.56	5.01	0.40	76.70
	2	6.19	0	3.13	0.50	89.82
	3	20.70	3.71	3.41	0.40	71.36
	4	13.10	6.54	4.09	0.67	78.88

3.4 熔覆涂层中元素的扩散

在 Fe-Cr-Si 激光熔覆涂层结合界面处, 基材处含量较多的 Fe 元素在温度梯度和浓度梯度的作用下向熔覆层迁移, 熔覆层(2)处相对含量较多的合金元素 Cr 和 Si 在温度梯度和浓度梯度的作用下有较多数量向基体迁移, 如图 6 所示。

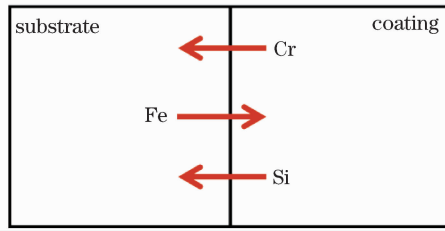


图 6 涂层界面处元素扩散示意图

Fig. 6 Interface elements characteristic between diffusion coating

图 7 和图 8 分别为 Si 和 Cr 元素在界面处扩散分布的 EDS 线扫描结果。可以看出, 加载机械振动的激光熔覆涂层结合区(BZ)内 Si 和 Cr 元素原子分数线分布(ZAF)变化较为平缓, 说明凝固过程中机械振动有利于 Si 和 Cr 元素在结合区的扩散, 使其分布均匀。图 7 中基材和结合区的过渡处, C 试样因 Si 含量较低而出现先下降后上升现象, 这与上面结合界面处由于柯肯达尔效应引起的黑色过渡带吻合, 也说明辅助机械振动的激光熔覆涂层与基材(SUB)界面处的冶金结合要优于未加机械振动。从图 7 中还可发现, 相同振幅不同频率的 A1 和 B1 涂层中, 界面处 Si 元素扩散规律基本一致, 相比而言, C 涂层由熔覆层渗入到基材的 Si 元素质量分数都升高。相同频率不同振幅的 B1, B2, B3 涂层中, 界面处 Si 分布规律各不相同, 基材和结合区之间的元素分布变化 B2 最为平缓, 其次是 B1, 而结合区和熔覆区的变化 B3 最为平缓。可得出机械振动的振幅对 Si 元素分布影响比频率大, 且机械振动能量越大, 结合界面处 Si 元素分布就更加均匀。图 8 中, 相同振幅不同频率的 A1 和 B1 试样界面处 Cr 元素分布相似, 都在结合区中部出现一段浓度不变的平台, 说明

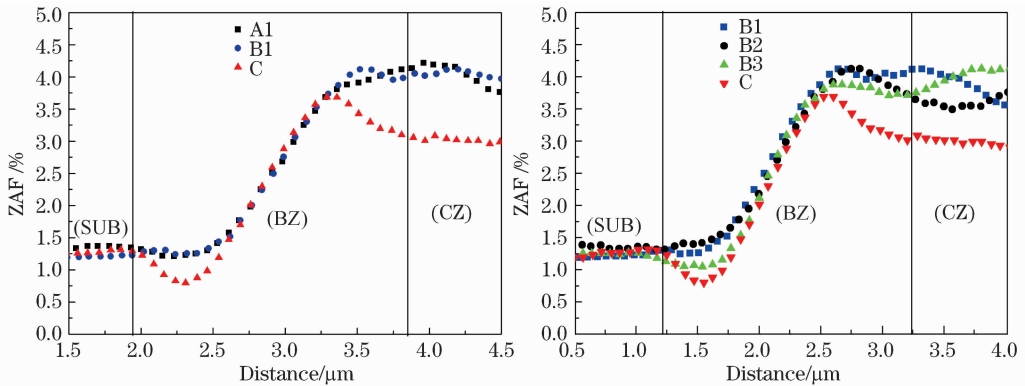


图 7 不同涂层试样 Si 元素在结合区附近的 EDS 线扫描结果

Fig. 7 EDS line scanning results of Si element along line bonding zone for different coating samples

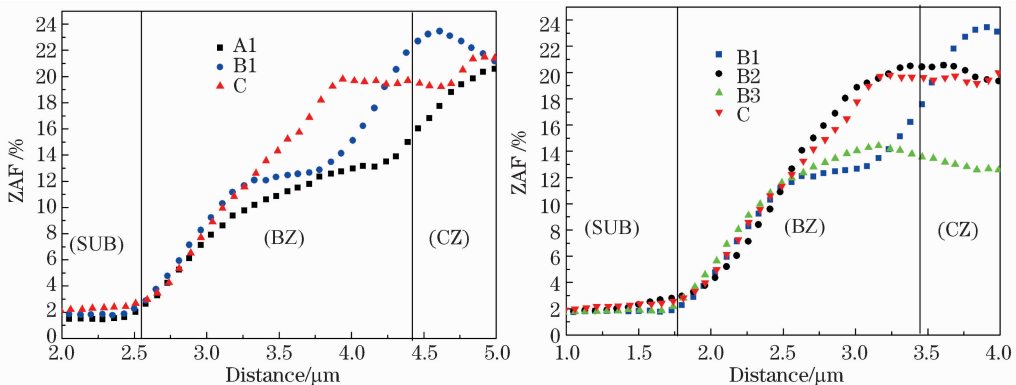


图 8 不同涂层试样 Cr 元素在结合区附近的 EDS 线扫描结果

Fig. 8 EDS line scanning results of Cr element along line bonding zone for different coating samples

凝固过程中结合区出现了近似界面前沿液相有限扩散的溶质再分配现象,促进了 Cr 元素在界面处的均匀扩散。B2 试样结合区内未出现浓度不变的平台,且 B3 在结合区和熔覆层之间 Cr 含量比其它试样小很多。综合分析,Cr 元素主要存在于奥氏体基体中,伴随着快速冷却,先共晶奥氏体在随后快速冷却过程中发生了马氏体转变,且由于合金元素大量固溶,使得亚共晶基体得到了强化,于是形成以马氏体为基体,内含大量均匀弥散分布的合金碳化物的复合强化组织。另外,凝固过程中,固液界面处排出的 Cr 元素在界面前沿富集,机械振动加剧了熔池的快速凝固,加上振动能量不同而使得能量最高的 B3 试样出现界面结合区浓度较小现象。

4 结 论

采用机械振动辅助同步送粉激光熔覆复合改性技术在 45 钢表面制备了 Fe60 合金涂层。涂层主要物相为 (Fe, Cr) 固溶体及少量化合物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 Fe_2B 和 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 。结合界面处是完整向上生长的胞状晶,机械振动导致胞状晶中富含 Si 的 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ 由枝晶内离散至枝晶间,大量 (Fe, Cr) 固溶体未能在凝固界面前端排出而残留在枝晶内。机械振动能量越高,越益于熔池中元素的扩散,使界面结合更加致密。振动的振幅和频率对结合界面前沿晶粒细化和元素分布的影响有所差异,频率增加有利于枝晶定向生长,振幅增加则有利于结合界面间的 Si 和 Cr 元素扩散,且在界面前沿 $40\ \mu\text{m}$ 左右范围内的枝晶发生弥散分布。未加机械振动的涂层界面结合区和基材间由于柯肯达尔效应出现宽度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的深色过渡带。

参 考 文 献

- 1 Zheng Xiong, Guangxia Chen, Xiaoyan Zeng. Effects of process variables on interfacial quality of laser cladding on aeroengine blade material GH4133 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (3): 930–936.
- 2 Peilei Zhang, Hua Yan, Chengwu Yao, *et al.* Synthesis of Fe-Ni-B-Si-Nb amorphous and crystalline composite coatings by laser cladding and remelting [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206 (6): 1229–1236.
- 3 Chengwu Yao, Jian Huang, Peilei Zhang, *et al.* Toughening of Fe-based-clad alloy coating [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (6): 2184–2192.
- 4 Xinhong Wang, Min Zhang, Shiyao Qu. Development and characterization of (Ti, Mo)C carbides reinforced Fe-based surface composite coating produced by laser cladding [J]. Optics and Laser Engineering, 2010, 48 (9): 893–898.
- 5 Jianmin Chen, Chun Guo, Jiansong Zhou. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (9): 2171–2178.
- 6 Yanbing Guo, Zhuguo Li, Chengwu Yao, *et al.* Microstructure evolution of Fe-based nanostructured bainite coating by laser cladding [J]. Materials & Design, 2014, 63 (11): 100–108.
- 7 Hongxi Liu, Chuanqi Wang, Xiaowei Zhang, *et al.* Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228 (8): S296–S300.
- 8 Steffen Nowotny, Lutz-Michael Berger, J? rg Spatzier. Coatings by Laser Cladding [J]. Comprehensive Hard Materials, 2014, 1: 507–525.
- 9 Lili Gao, Xiufang Bian, Yongsheng Tian, *et al.* Effect of Co on microstructure and interfacial properties of Fe-based laser cladding [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 16 (4): 84–88.
- 10 Huahui Chen, Caiyun Xu, Jun Chen, *et al.* Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear [J]. Wear, 2008, 264 (7–8): 487–493.
- 11 Yibo Wang, Shusen Zhao, Wenyan Gao, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding FeCrBSi composite powder coatings with higher Cr content [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (4): 899–905.
- 12 Qinying Wang, Yangfei Zhang, Shulin Bai, *et al.* Microstructures, mechanical properties and corrosion resistance of Hastelloy C22 coating produced by laser cladding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 553 (3): 253–258.
- 13 Qingtang Li, Yongping Lei, Hanguang Fu. Laser cladding in-situ NbC particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 239 (1): 102–107.
- 14 Zhong Zhao, Zitian Fan, Xuanpo Dong, *et al.* Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy [J]. China Foundry, 2010, 7 (1): 24–29.
- 15 Zhang Guofu, Song Tianmin, Yin Chengjiang, *et al.* The effect of mechanical vibration welding on the microstructure of weld and HAZ [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2001, 22(3): 85–88.
张国富, 宋天民, 尹成江, 等. 机械振动焊接对焊缝及热影响区金相组织的影响 [J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 85–88.
- 16 Qinghua Lu, Ligong Chen, Chunzhen Ni. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 457 (1–2): 246–253.
- 17 Chuanqi Wang, Hongxi Liu, Rong Zhou, *et al.* Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi-TiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration [J]. Acta Metallurgy Sinica, 2013, 49(2): 21–228.
王传琦, 刘洪喜, 周 荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征 [J]. 金属学报, 2013, 49(2): 221–228.
- 18 Hongxi Liu, Chuanqi Wang, Xiaowei Zhang. Corrosion and wear behavior of Ni60CuMoW coatings fabricated by combination of laser cladding and mechanical vibration [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 621(1): 357–363.
- 19 Jinsheng Pan, Jianmin Gong. Foundation of material science [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007, 28–79.
潘生, 全健民. 材料科学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 28–79.
- 20 Pingchang Chen, Liumei Zhu. Principle of material forming [M]. Beijing: China Machine-building Industry Press, 2009: 17–86.
陈平昌, 朱六妹. 材料成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 17–86.