

文章编号 1004-924X(2015)08-2192-11

## 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

刘洪喜\*, 陶喜德, 张晓伟, 杨昕恬

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:**采用机械振动辅助激光熔覆复合改性新工艺,在 45 钢表面制备了单道 Fe-Cr-Si-B-C 合金涂层。借助 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和能量分散谱 (EDS) 分析了熔覆层的物相组成、微观结构和元素分布,通过 HVS-1000 型显微硬度计测试了熔覆层的显微硬度。结果表明,熔覆层主要由  $\alpha$ -(Fe, Cr) 固溶体、 $M_7C_3$  ( $M=Fe, Cr$ ) 碳化物、 $Fe_2B$  硼化物和少量  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  组成。在机械振动辅助作用下,熔覆层结合界面组织由平面晶向带状和柱状晶转变,振幅为 0.13~0.18 mm 时的晶粒细化效果最为明显;熔覆层中增强相形态随着频率的增加由短杆状向颗粒状、层状、条状转变,分布形态由杂乱分布向弥散分布和网状分布转变。相比未加机械振动的熔覆层,机械振动下的熔覆层中气孔、裂纹减少,显微硬度提高了约 13.9%。这些结果显示熔覆层中显微组织形态及其分布主要受振幅和频率协同作用的影响。

**关键词:**机械振动;激光熔覆;Fe-Cr-Si-B-C 涂层;复合涂层;显微组织;界面分布

**中图分类号:**TG156.99 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2192

## Microstructure and interface distribution of Fe-Cr-Si-B-C laser cladding alloy coatings assisted by mechanical vibration

LIU Hong-xi\*, TAO Xi-de, ZHANG Xiao-wei, YANG Xin-tian

(Faculty of Material Science and Engineering, Kunming  
University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

\* Corresponding author, E-mail: piiliuhx@sina.com

**Abstract:** Fe-Cr-Si-B-C alloy coatings were fabricated on 45 medium carbon steel by combination of a laser cladding and a mechanical vibration surface modification process. The microstructures, element distributions, phase compositions and microhardnesses of the Fe-Cr-Si-B-C cladding coatings were investigated by the X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Disperse Spectroscopy (EDS) and the HVS-1000 hardness tester. The results show that the cladding coatings are mainly composed of  $\alpha$ -(Fe, Cr) solid solution,  $M_7C_3$  ( $M=Fe, Cr$ ) carbide,  $Fe_2B$  boride and a small amount of  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  compound. The microstructure of cladding coating interface transforms from a plane crystal to a banded structure and a columnar crystal under the mechanical vibration condition, and the grain refinement effect is the most obvious when the amplitude is 0.13–0.18 mm. Moreover, the enhanced phases in cladding coatings transform from the short rod to granular, lamellar and banded structures with the increase of vibration frequency, and the distribution patterns change from

收稿日期:2015-02-08;修订日期:2015-03-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61368003);昆明理工大学分析测试基金资助项目(No. 20140186)

random distribution to dispersed and network distributions. Compared with the normal laser cladding coating, more less pores and cracks exist in the cladding coating under mechanical vibration condition, and the maximum microhardness increases by 13.9%. These results mean that the microstructures and distributions in the cladding coatings are influenced by a synergetic mechanism of amplitude and frequency.

**Key words:** mechanical vibration; laser cladding; Fe-Cr-Si-B-C coating; composite coating; microstructure; interface distribution

## 1 引言

激光熔覆是二十世纪七八十年代兴起的一种新型表面改性技术。由于激光熔覆涂层可显著改善基材表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电气性能,既能满足在特定服役环境下对材料表面特殊性能的要求,又能节约大量的贵重元素,因此,近年来该技术发展迅速,并已在汽车、航空、航天、模具、轧辊、石油等行业得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。通常,涂层的优劣决定着激光熔覆产品或零件的使用性能和服役寿命,而涂层的优劣除与激光熔覆工艺直接相关外,还取决于熔覆粉末材料。常见的激光熔覆粉末主要有铁基自熔性合金粉末、镍基自熔性合金粉末、钴基自熔性合金粉末和金属陶瓷粉末。其中,铁基自熔性合金粉末适用于局部要求耐磨且容易变形的零件,基体材料多为铸铁和低碳钢,其优点是粉末价格低廉、所制备出的涂层耐磨性能好,所以,有关铁基自熔性合金粉末的设计和优化便成为激光熔覆材料研究的一个热点<sup>[2-5]</sup>。

一直以来,激光熔覆最棘手的问题就是涂层裂纹,裂纹会对熔覆层质量产生不利影响。因此,消除裂纹、改善铁基涂层凝固组织具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。目前,在工艺上抑制和消除裂纹的措施主要有四种<sup>[7-10]</sup>:一是对基材和熔覆粉末进行预热处理或对熔覆层进行后热处理;二是在激光熔覆过程中施加超声振动;三是向熔覆材料中添加一定量的硬质相或通过激光原位自生出相应的颗粒增强相来控制裂纹产生;四是在激光熔覆过程中施加外场,通过外场的耦合作用来打碎枝晶,细化晶粒,减少或者消除拉应力的产生,从而抑制裂纹的萌生和扩展。实践证明,施加外场辅助激光熔覆所制备的涂层的使用性能最为理想。

在工业领域已有通过机械振动来改善铸造合金晶粒度的应用,该应用表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的促进作用<sup>[11]</sup>。由于机械振动能影响熔池内部的流动,减少成分过冷区的大小,打碎粗大枝晶而促进等轴晶形成,从而大大降低焊缝宏观偏析、气孔和夹杂等缺陷,因此这项技术已逐渐被应用到焊接领域<sup>[12-15]</sup>。在激光熔覆方面,Ehsan Foroozmehr等<sup>[16]</sup>在激光粉末沉积过程中加载机械振动,结果表明,在机械振动作用下涂层的晶粒尺寸较未加振动时要小,且显微硬度分布更加均匀。此外,上下振动比水平振动所制备的涂层中气孔率和气孔直径小。王传琦等<sup>[17]</sup>采用机械振动辅助激光重熔复合改性工艺在45#钢表面制备了NiCrBSi+TiC复合涂层,发现基体相由树枝晶向胞状枝晶转变,增强相呈现出递增趋势,结合界面显微硬度波动减缓。可见,机械振动作为一种能量场,对激光熔覆凝固过程中涂层的显微组织有着较大影响。不过,目前的文献尚未见有关机械振动对激光熔覆涂层在结合界面处的显微组织特征及其分布形态的影响的报道。本文采用机械振动辅助激光熔覆复合改性工艺在45#钢表面制备了Fe-Cr-Si-B-C合金涂层,研究了不同振幅和频率下激光熔覆涂层结合界面处的显微组织特征及其增强相分布,并初步分析了机械振动作用下激光熔覆Fe-Cr-Si-B-C合金涂层的凝固机理。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

基材采用尺寸为100 mm×40 mm×10 mm的45#中碳钢,经酸洗除锈和打磨除去表面氧化皮后分别用无水乙醇和丙酮进行15 min超声清洗,以进一步除去表面残留的氧化物和油污等杂质。熔覆材料选用铁基自熔性合金粉末,粉末的平均粒度为100 μm,形貌如图1所示。熔覆粉末的主要化学成分(质量分数,%)为:Cr(16%~

20%)、C(0.7%~1.5%)、Si(2%~4%)、B(2%~3%)、Fe(余量)。实验前,将熔覆粉末置于干燥箱中,在 100 °C 环境下干燥 24 h 待用。

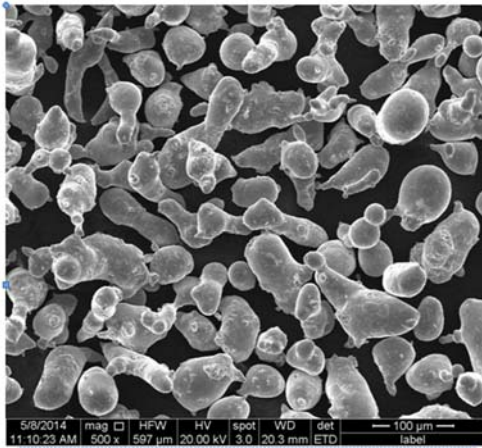


图 1 Fe-Cr-Si-B-C 粉末形貌

Fig. 1 Morphology of Fe-Cr-Si-B-C powder used for laser cladding

## 2.2 实验方法

实验在 GS-TFL6000A 型 6 kW 横流多模 CO<sub>2</sub> 激光器及其配套的五轴四联动数控机床、GS-TFL 型激光同步送粉器和 ESS-025 标准振动系统等设备上进行。为研究振幅  $A$  和频率  $f$  等振动参数对熔覆层的作用效果,实验过程中激光工艺参数如下:激光功率为 3.8 kW,单道扫描长度为 80 mm,扫描速度为 500 mm·min<sup>-1</sup>,离焦量为 55 mm,采用同步侧向送粉,送粉速度为 16 g·min<sup>-1</sup>;氩气(纯度为 99.99%)侧向保护,流量为 0.15 L·s<sup>-1</sup>。机械振动方向垂直于试样表面,选用正弦波振动模式,振幅  $A$  为 0.01~0.35 mm,频率  $f$  为 20~250 Hz。机械振动参数通过振动台的控制端来调节。沿激光扫描垂直方向的同一位置用线切割截取 10 mm×10 mm×10 mm 的试块制成金相试样,每组试样切割表面均经不同粒度的金相砂纸研磨和金刚石抛光膏抛光后用王水(VHNO<sub>3</sub>:VHCl=1:3)腐蚀。经 LEICA DFC280 型光学显微镜(OM)和 XL30 ESEM-TMP 型扫描电子显微镜(SEM)观察熔覆层的微观组织形态,通过 XL30 ESEM-TMP 型扫描电镜(SEM)及所附的 Phoenix+OIM 能量分散谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析熔覆层中的元素分布。借助 Dmax-3BX 型 X 射线衍射仪(X-ray Diffraction XRD)(CuK $\alpha$ )表

征涂层的物相结构,管压为 40 kV,管流为 30 mA,采用连续扫描模式,衍射角为 20~90°。利用 HVS-1000 显微硬度计测试涂层试样沿截面处的显微硬度分布,载荷为 200 g,保持时间为 15 s,同一层深取 5 点测量求平均值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 熔覆层的 XRD、EDS 分析

图 2 是不同振幅和频率下激光熔覆涂层表面的 XRD 图谱。从图谱中可以看出,有无机械振动的熔覆层中物相并没有发生改变,均主要由

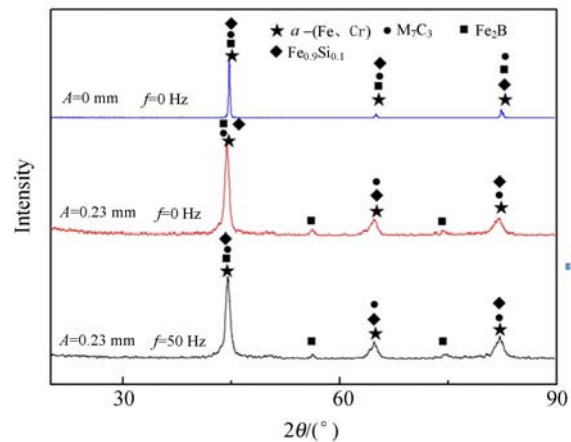


图 2 激光熔覆涂层 Fe-Cr-Si-B-C 的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of laser clad coating Fe-Cr-Si-B-C with or without mechanical vibration

$\alpha$ -(Fe, Cr)固溶体、 $M_7C_3$  ( $M=Fe, Cr$ ) 碳化物和少量的  $Fe_2B$ 、 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  组成。同时,从图 2 中还可发现,在机械振动作用下激光熔覆涂层在相同衍射角处的衍射峰有所变宽,根据 Debye-Scherrer 公式:

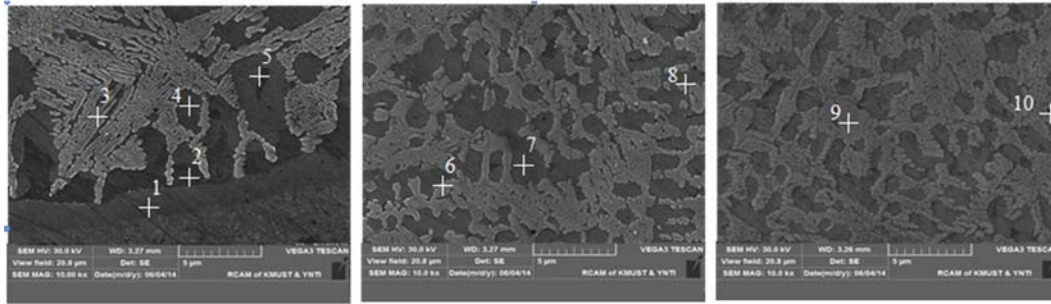
$$D = K\lambda / B \cos \theta, \quad (1)$$

式中: $K$  为 Scherrer 常数, $D$  为晶粒尺寸, $B$  为半高宽, $\theta$  为衍射角, $\lambda$  为 X 射线波长。可知,半高宽  $B$  增大,则晶粒尺寸  $D$  减少。同时,在机械振动作用下激光熔覆涂层对应的衍射峰强度有所增加( $M_7C_3$  在 81.2°处、 $Fe_2B$  在 58.3°和 75.8°处),表明激光熔覆涂层中晶体结构的完整性得到了改善。由此说明,机械振动作用下激光熔覆涂层中的晶粒得到了细化,涂层中晶体结构的完整性得到了提高。

图 3 是放大后熔覆层 ( $A=0.28$  mm,  $f=200$

H<sub>z</sub>)横截面的 SEM 形貌。由于 Cr 和 Fe 的原子半径接近,Cr 易取代 Fe 原子形成置换式固溶体。根据 Fe-Cr-C 相图可知<sup>[18]</sup>,在熔池快速凝固中, $M_7C_3$  作为初生相从熔体中析出,析出过程中大量 Cr 原子置换 Fe 原子形成复合碳化物。当温度降到共晶温度时发生共晶转变,生成  $\gamma$ -(Fe, Cr)

固溶体和  $M_7C_3$  的共晶组织。从图 3(a)中可看出, $M_7C_3$  共晶碳化物介于层状与棒状之间,由于熔覆粉末中含有 B、Si,发生共晶转变时也会形成硼化物  $Fe_2B$  和硅化物的复杂共晶体。温度继续下降会发生包晶转变,使得  $\gamma$ -(Fe, Cr)固溶体转变为  $\alpha$ -(Fe, Cr)固溶体。



(a) 涂层底部 (b) 涂层中部 (c) 涂层顶部  
(a) Bottom area (b) Middle area (c) Top area

图 3 A=0.28 mm 和 f=200 Hz 条件下熔覆层横截面的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM morphologies of cross-section for cladding coating under A=0.28 mm and f=200 Hz conditions

表 1 列出了涂层底部、中部、顶部 3 个不同区域的 EDS 选区组织分析结果。这里需要注意的是,由于 B、C 的相对原子质量较小,受测量方法和精度的限制,EDS 选区分析中未能列出 B 的含量,C 的结果也存在不确定性。图 4 是熔覆层中部析出的增强相与基体相成分的线扫描图。在激光熔覆过程中,元素之间存在相互扩散,前面提到的 Fe 与 Cr 取代在 EDS 分析中也得到了很好的验证。Fe 含量上升则 Cr 含量下降,Cr 含量上升则 Fe 含量下降,但 Fe 与 Cr 的总量维持平衡。Si 元素影响复合共晶碳化物的形态,且在晶界处的含量高于晶内。C 元素主要参与碳化物的形成,这对提高熔覆层的硬度和耐磨性起到很好的促进作用。

表 1 图 3 中的 EDS 选区组织分析结果

Tab. 1 Mass fraction of contents in EDS selective area of Fig. 3 (%)

Point	C	Si	Cr	Fe
1	0.69	3.00	10.12	86.19
2	0.93	3.44	13.07	82.56
3	0.97	2.73	21.82	74.48
4	0.80	3.67	14.58	80.95
5	1.38	3.25	14.47	80.90
6	0.78	2.55	21.53	75.14
7	0.91	3.82	13.94	81.33
8	0.68	2.64	23.03	73.65
9	1.03	2.88	20.02	76.07
10	1.29	3.21	20.60	74.90

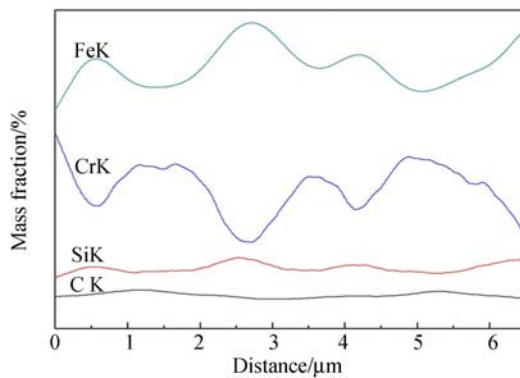
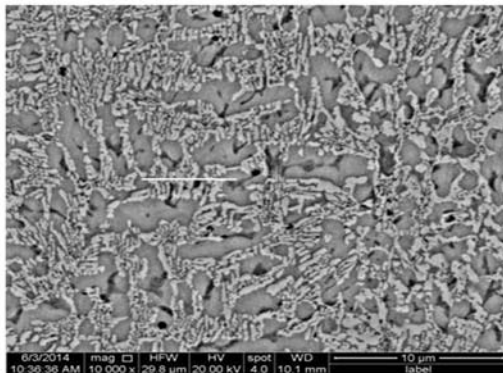


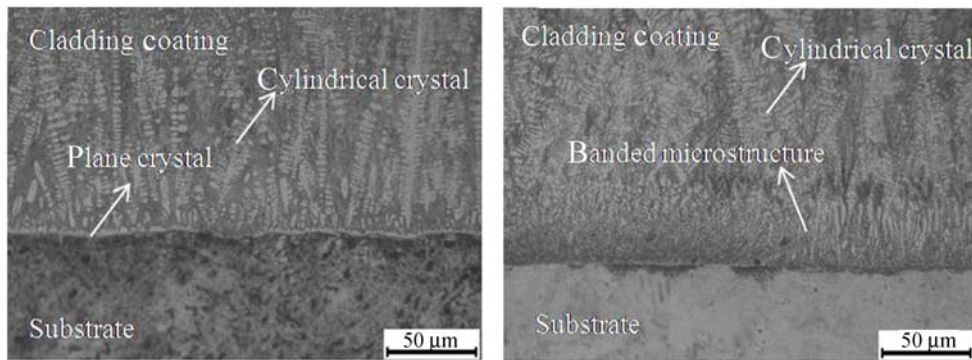
图 4 熔覆层中部析出的增强相与基体相成分线扫描图

Fig. 4 Element line scanning spectra of enhancement phase and matrix phase composition precipitated from cladding layer

### 3.2 熔覆层的显微组织特征

在激光熔覆过程中,凝固初期结合界面处的温度梯度最大,以结合界面为基底的初生晶生长速率最快,生长过程受到熔池内部对流、晶粒之间相互制约、晶体前端过冷度、溶质分配等因素的影响,晶粒生长形态多样,从而使熔覆层各区域的凝固组织存在差异化现象。其中,熔覆层的结晶形态主要考虑熔池内的液相成分和形状控制因子。形状因子是结晶方向上的温度梯度  $G$  和凝固速

度  $R$  之比(即  $G/R$ )。在成分相对稳定的情况下,  $G/R$  决定了凝固组织的生长形态。结合界面处的温度梯度  $G$  最大,凝固速度  $R$  趋近 0,随着凝固前沿的推进,  $G$  逐渐减小、 $R$  增加到一个极限值。  $G/R$  值最大时,凝固组织以低速平面生长形成平面晶;随着  $G/R$  的逐渐减少,开始形成柱状胞晶和柱状枝晶。如图 5(a)所示,未加机械振动的熔覆层凝固结合界面组织转变为:平面晶→柱状胞晶和柱状枝晶。如图 5(b)所示,未加机械振动的熔覆层凝固结合界面组织转变为:平面晶→柱状胞晶和柱状枝晶。



(a) 无机械振动

(b) 有机械振动 ( $A=0.28$  mm and  $f=200$  Hz)(a) Without mechanical vibration (b) With mechanical vibration ( $A=0.28$  mm and  $f=200$  Hz)

图 5 有机械振动辅助作用下激光熔覆涂层横截面的 OM 形貌

Fig.5 OM morphologies of cross-section for laser cladding coating with or without mechanical vibration conditions

图 5(b)是机械振动辅助作用下熔覆层的显微组织形貌。可明显看出,熔覆层组织中平面晶厚度减少,柱状胞晶基本消失,取而代之的是相间交替的带状枝/胞晶组织,柱状晶生长方向杂乱,不再单一地垂直于界面生长。出现这种现象的原因是加载机械振动干扰后,结合界面的液-固由平衡状态变成非平衡状态,带状组织(枝/胞晶)逆着散热方向生长成长短不一的“带”。可见,带状组织是高速生长速率下界面非平衡的结果<sup>[19]</sup>。机械振动的作用强迫熔池内部对流,使得结合界面处温度梯度减少。在激光熔覆过程中,温度梯度定义为<sup>[20]</sup>:

$$G = \frac{2k(T - T_0)^2}{\eta P}, \quad (2)$$

式中:  $T$  为液态金属温度,  $T_0$  为基材初始温度,  $\eta$  为吸光率,  $P$  为激光功率,  $k$  为基材导热系数。

当其他参数固定时,温度梯度  $G$  减少,意味着  $T - T_0$  减少,而  $T_0$  为一固定值,从而液态金属温度  $T$  减少,结合界面向基材散热加快。从凝固

动力学来看,熔池内部动力学液相线温度  $T_L$ 、固相线温度  $T_S$  两者之差减少时,两者向两相平衡温度  $T$  靠近,晶体生长速率增加。结合界面的过冷度随着生长速率的增大而减少,结合界面由平衡转变为非平衡,图 5(b)所示机械振动下熔覆涂层结合界面处的转变为:平面晶→带状组织→柱状枝晶。

图 6 所示为相同频率不同振幅下熔覆层底部、中部、顶部的横截面显微组织。从图 6(a<sub>1</sub>)、(b<sub>1</sub>)和(c<sub>1</sub>)可明显看出,随着振幅  $A$  的增大,熔池底部的带状组织区域范围发生变化。在振幅  $A=0.13$  mm时,带状组织区域宽度达到最大  $72.3 \mu\text{m}$ 。加载机械振动时,结合界面处于非平衡状态,根据简谐振动(正弦振动模式可近似为简谐振动的能量公式:

$$E = \frac{1}{2} k A^2, \quad (3)$$

式中:  $E$  为能量,  $k$  为简谐振动的弹性系数,  $A$  为振幅。

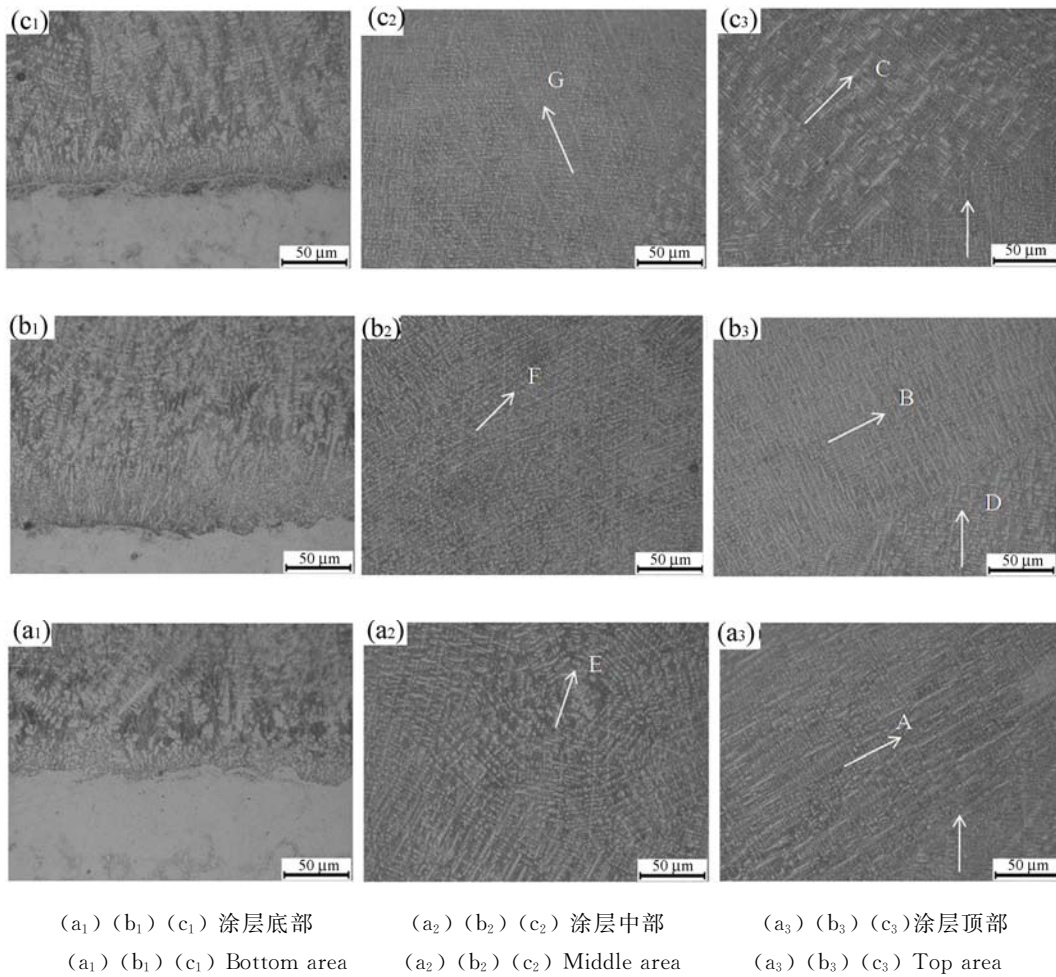


图 6 不同振幅下激光熔覆涂层横截面的显微组织

Fig. 6 Cross-section microstructures of laser cladding coating under different amplitude conditions

振幅 A 较小时,能量输入较少。由于带状组织区域中液态金属本身的黏度较大,对流作用效果较弱,能量输入较低,能量起伏的变化范围窄。而形核的两个必备条件是相起伏和能量起伏,能量起伏低,形核数目少,从而导致带状组织区域范围较窄。由于激光熔池内部存在两个对称的对流中心,熔池内部对流模式由下往上流动<sup>[21]</sup>。较大的振幅 A 可改变熔池内部的对流中心,使得熔池内部搅动加快,致使带状组织区域的枝/胞晶上浮,带状组织区域减少。从图 6(a<sub>2</sub>)、(b<sub>2</sub>)、(c<sub>2</sub>)来看,熔池中部 E 处是细枝晶朝向的中心, F 处是纵横交错的细枝晶, G 处是向上朝向一致的细枝晶。当振幅 A 较小时,机械振动的作用效果并没影响到熔池中部,形成了带有中心环的细枝晶网;当振幅 A 较大时,机械振动的效果加强,树枝晶被打断形成细小枝晶,并重新分布排列;振幅 A 适中时,刚好使树枝晶折断,但机械振动的作用还不能

使其重新分布排列,从而形成纵横交错的细枝晶网。从图 6(a<sub>3</sub>)、(b<sub>3</sub>)、(c<sub>3</sub>)来看,熔池顶部 A 处是斜向上的条状细枝晶, B 处是斜向上的致密细枝晶, C 处是斜向上的粗大等轴晶, D 处是垂直向上的细枝晶。在激光熔池顶部,由于熔池中的液态金属与空气接触,散热速度快, G/R 减少,成分过冷增大,从而使得熔覆层顶部的枝晶尺寸较小。振幅 A 较小时,机械作用效果有限,影响不到熔池顶部从而形成条状细枝晶。振幅 A 适中时,机械振动所带来的能量可促进形核率升高,根据公式<sup>[22]</sup>:

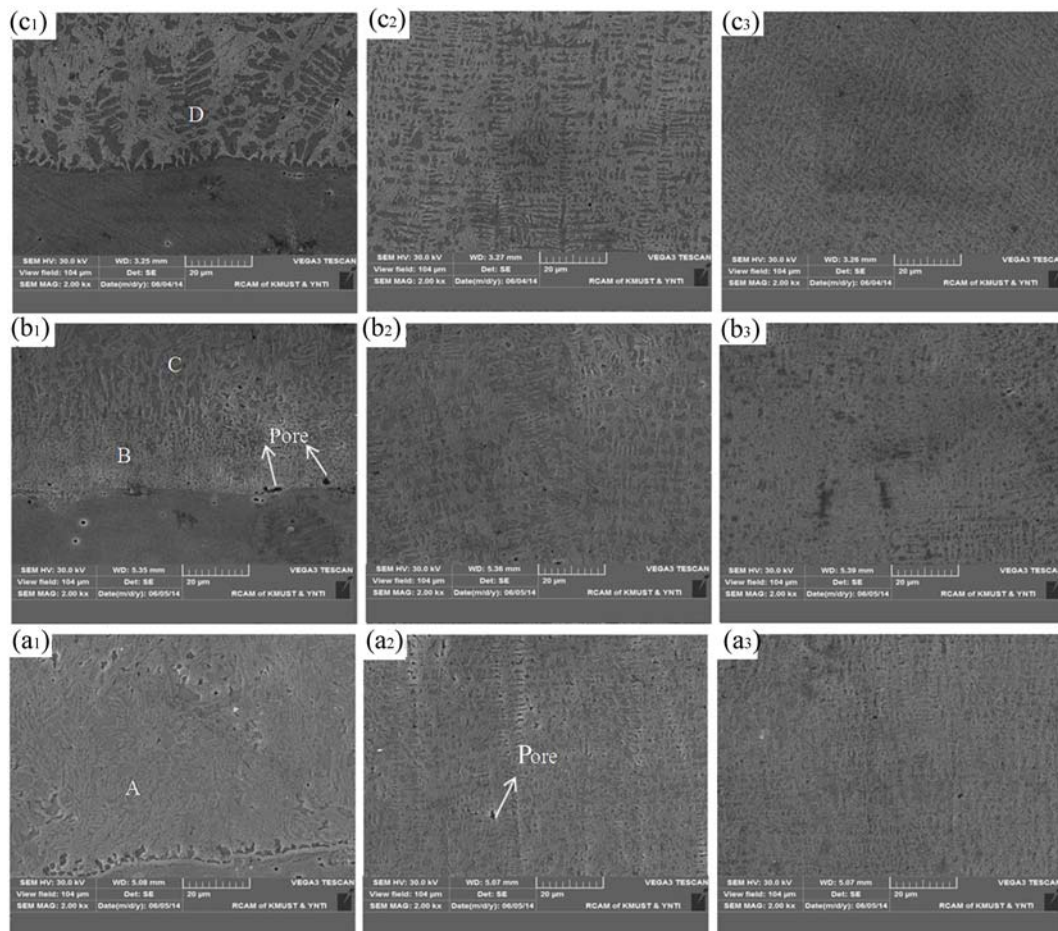
$$Z_s = 1.1 \left( \frac{N}{g} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中:  $Z_s$  为单位面积中的晶粒数目,  $N$  为形核率,  $g$  为长大速度。

可见,形核率  $N$  增大,单位面积内的晶粒数目  $Z_s$  增加。细晶粒方向斜向上与熔池顶部的热流方

向有关。振幅  $A$  较大时,熔池搅动带动上浮的细晶粒重新成为非均匀形核的质点,晶粒长大形成等轴晶,由于机械振动和对流的作用,顶部等轴晶并

不会形成树枝晶。一方面是由于枝晶在机械振动作用下被打断,另一方面是强对流使得枝晶流动,不易稳定长大成树枝晶并形成粗大的等轴晶。



(a<sub>1</sub>) (b<sub>1</sub>) (c<sub>1</sub>) 底部 (a<sub>2</sub>) (b<sub>2</sub>) (c<sub>2</sub>) 中部 (a<sub>3</sub>) (b<sub>3</sub>) (c<sub>3</sub>) 顶部  
(a<sub>1</sub>) (b<sub>1</sub>) (c<sub>1</sub>) Bottom area (a<sub>2</sub>) (b<sub>2</sub>) (c<sub>2</sub>) Middle area (a<sub>3</sub>) (b<sub>3</sub>) (c<sub>3</sub>) Top area

图 7 不同频率下激光熔覆涂层横截面的 SEM 形貌

Fig. 7 SEM of cross-section for laser cladding coating under different frequency conditions

图 7 是未加机械振动和不同频率机械振动作用下熔覆层底部、中部和顶部组织的 SEM 形貌。可以看出,图 7(a<sub>1</sub>)中,未加机械振动的基体与熔覆层结合界面处为一平面晶区,界面达到了良好的冶金结合。熔覆层组织形貌随着与结合界面间距离的增加而发生了明显变化。A 处的增强相  $M_7C_3$  和硼化物  $Fe_2B$  以细小块状和条状为主,致密分布在  $\alpha-(Fe, Cr)$  基体上。图 7(b<sub>1</sub>)中,在振幅  $A=0.23$  mm、频率  $f=50$  Hz 的机械振动作用下,平面晶上部 B 处的增强相形态由颗粒状过渡到 C 处的细小块状、条状形态,并呈弥散分布。图 7(c<sub>1</sub>)中, D 处的增强相为层片状网络分布。可见,振动频率  $f$  对熔覆层底部的增强相形态和分

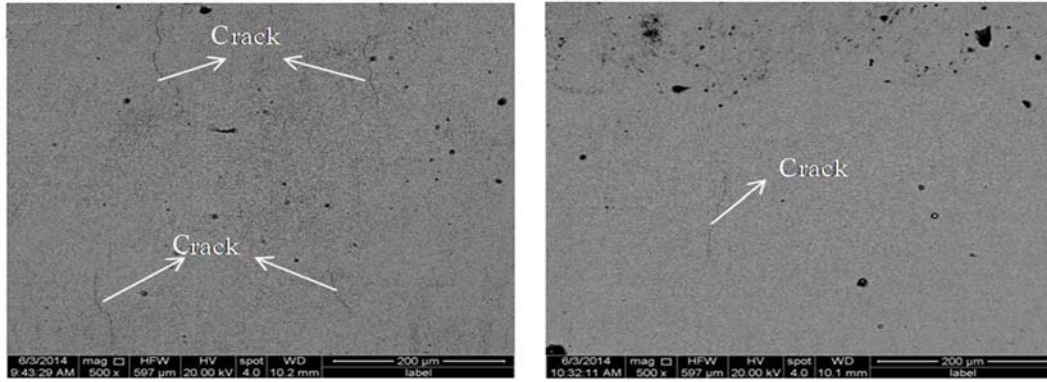
布有着一定的影响。产生这种现象的原因是:振动频率  $f$  表示的是单位时间的作用次数,在相同振幅下,随着频率的增加,析出的细小块状和条状增强相的棱角由于液态金属中的对流和增强相之间的相互冲击而其棱角变得光滑,有些冲击脱落的晶粒重新作为新的晶核长大,因而形成了颗粒状形态。当频率增加 200 Hz 时,颗粒状增强相重新聚集形成层片状,并且相互交接成网络。从图 7(a<sub>3</sub>)、(b<sub>3</sub>)、(c<sub>3</sub>)熔覆层顶部可以看出,随着频率的增加,增强相分布变得更加致密。

### 3.3 机械振动对熔覆层裂纹的影响

一般认为,激光熔覆层中的裂纹主要是凝固裂纹。图 8 是有无机械振动作用下激光熔覆层表

面的宏观形貌。可见,涂层中均存在着裂纹,裂纹垂直于激光扫描方向,且未加机械振动的涂层中裂纹条数明显多于施加机械振动的裂纹条数。评价熔覆层的开裂敏感性时,通常采用熔覆层单位长度上的裂纹条数(line)(分布的总裂纹数/熔覆

层总长度)作为评价体系标准<sup>[23]</sup>。在振幅  $A=0.28\text{ mm}$ 、 $f=200\text{ Hz}$  时,单位长度的裂纹数为  $0.06\text{ line/mm}$ ;相比未加机械振动下涂层单位长度的裂纹数  $0.32\text{ line/mm}$  下降了  $81.25\%$ 。这说明机械振动明显减少和抑制了熔覆层中的裂纹产生。



(a) 无机械振动 (a) Without mechanical vibration (b) 有机械振动( $A=0.28\text{ mm}$  and  $f=200\text{ Hz}$ ) (b) With mechanical vibration( $A=0.28\text{ mm}$  and  $f=200\text{ Hz}$ )

图 8 有无机械振动辅助作用下激光熔覆涂层中的裂纹形貌

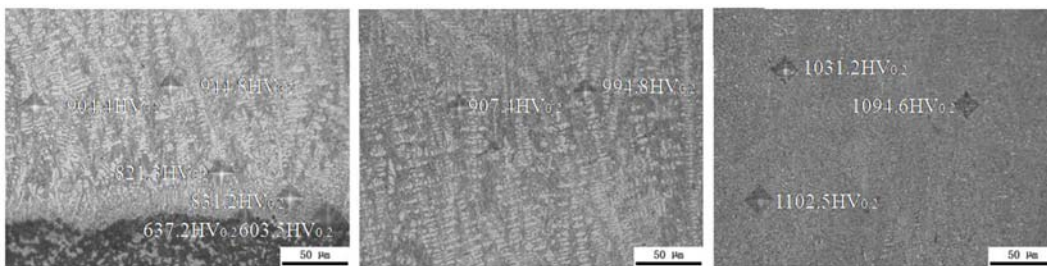
Fig. 8 Crack morphologies of laser cladding coating with and without mechanical vibration conditions

熔覆层凝固时,初生的枝晶会相互连接成网络,造成枝晶间的液态金属封闭不易流动,枝晶外部的液体不能满足枝晶间的凝固需求,同时枝晶间倾向于聚集低熔点杂质,导致枝晶间开裂的敏感性增大而易产生裂纹。在机械振动作用下,连接成网络的初生枝晶会断开形成缺口,促进了枝晶内部与外部之间的液态流动。同时,机械振动导致扩散加快,低熔点杂质不再聚集在枝晶间造成偏析而使得熔池内部成分趋于均匀一致,枝晶间残余应力减小,开裂敏感性大大降低,裂纹数减少。

### 3.4 涂层显微硬度

图 9 显示的是机械振动辅助作用下沿熔覆涂

层底部、中部和顶部的显微硬度变化情况。可以看出,熔覆层底部硬度在  $810\sim 940\text{HV}_{0.2}$ ,相比基体热影响区的  $637.2\text{HV}_{0.2}$  有所提高。中部和顶部的硬度分别为  $900\sim 1\ 000\text{ HV}_{0.2}$  和  $1\ 000\sim 1\ 100\text{ HV}_{0.2}$ 。由于涂层中部分布的是打碎的树枝晶,晶粒尺寸相对减少,因而硬度提高。熔覆层顶部,由于晶粒明显细化且析出的增强相分布较为致密,因而硬度也得以大大提高。另外,从熔覆层底部到顶部,显微硬度呈现递增趋势,相对于顶部,底部结合界面处的硬度较低,韧性稍高,而熔覆层顶部是实际与外界接触工作面,较高的硬度有利于提高材料的耐磨性能。



(a) 底部 (a) Bottom area of coating (b) 中部 (b) Middle area of coating (c) 顶部 (c) Top area of coating

图 9 激光熔覆涂层的显微硬度

Fig. 9 Microhardness distribution of laser cladding coatings

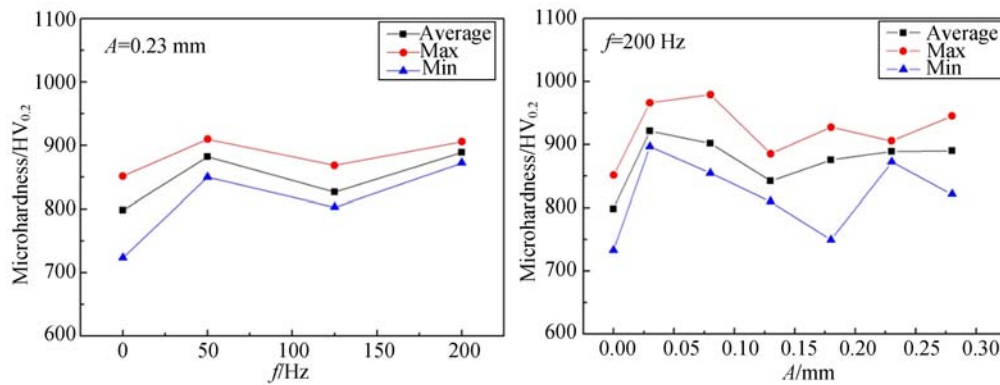


图 10 激光熔覆涂层中显微硬度随频率和振幅的变化

Fig. 10 Microhardness variation as functions of frequency and amplitude respectively

振幅  $A$  和频率  $f$  是影响机械振动的两个主要参数,振幅  $A$  影响晶粒尺寸、形态和分布,频率  $f$  影响析出增强相的形态和分布。图 10 是不同振动参数下熔覆涂层的显微硬度变化。可以看出,加机械振动相比未加载机械振动的熔覆层硬度增加了近  $110 \text{ HV}_{0.2}$ ,提高了  $13.9\%$ 。随着振幅  $A$  的增加,硬度值先减少后增加,当振幅  $A$  增加到  $0.18 \text{ mm}$  后硬度值变化趋于平缓。这是因为振幅  $A$  增加到某一极限值时,刚好改变熔池内部的对流而影响晶粒生长,过高的振幅并不会使晶粒细化(见图 4)。增强相的形态和分布不仅会影响熔覆层的显微硬度,还与振动频率  $f$  有着直接关系。含有颗粒状弥散分布的增强相的熔覆层硬度最高,而短杆状成网状分布的增强相的熔覆层则相比较低。这说明显微硬度并不只受某个振动参数的影响,而是振幅  $A$  和频率  $f$  的协同作用使得熔覆层中晶粒和增强相分布发生改变,从而影响熔覆层的显微硬度。

## 4 结 论

本文利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 Fe-Cr-Si-B-C 合金涂层,涂层物相由  $\alpha$ -(Fe, Cr) 固溶体、 $\text{M}_7\text{C}_3$  碳化物和少量  $\text{Fe}_2\text{B}$ 、 $\text{Fe}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$  组成。熔覆层结合界面处晶粒形态由平面晶向柱状枝晶转变。机械振动辅助的熔覆层气孔、裂纹减少,树枝晶被打碎,晶粒明显细化。

机械振动的振幅和频率分别影响着涂层中晶粒的生长形态和增强相的形状、分布。当振幅在  $0.13 \sim 0.18 \text{ mm}$  时,晶粒细化效果最好;频率影响着增强相由颗粒状弥散分布变成层片状网络分布,频率越高,增强相分布越致密。

机械振动辅助作用下的熔覆层平均显微硬度高于未加机械振动的熔覆层  $110 \text{ HV}_{0.2}$  左右,提高了  $13.9\%$ 。熔覆层硬度从底部、中部到顶部依次递增,最高硬度在涂层顶部达到  $1100 \text{ HV}_{0.2}$ 。振幅和频率的协同作用影响着熔覆层中晶粒和增强相分布,从而影响熔覆层的显微硬度。

## 参考文献:

- [1] GIRISH R D, PAUL C P, GANDHI B K, *et al.*. Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel [J]. *Wear*, 2009, 266 (9-10): 975-987.
- [2] MERIAUDEZU F, TRUCHETET F. Control and optimization of the laser cladding process using matrix cameras and image processing [J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, 8: 317-324.
- [3] 李胜,胡乾午,曾晓雁. 激光熔覆专用铁基合金粉末的研究进展 [J]. *激光技术*, 2004, 28 (6): 591-594.
- LI SH, HU Q W, ZENG X Y. Research development of Fe-based alloy powder for laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (6): 591-594. (in Chinese)

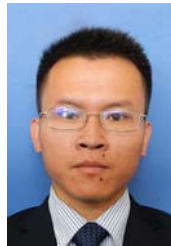
- [4] 李美艳,韩彬,高宁,等. 高硬度铁基熔覆层组织、成分及耐蚀性[J]. 中国激光,2013, 40 (5): 0503003. LI M Y, HAN B, GAO N, *et al.*. Microstructure composition and corrosion resistance of laser cladding Fe-based coating with high hardness [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (5): 0503003. (in Chinese)
- [5] 董世运,马运哲,徐滨士,等. 激光熔覆材料研究现状 [J]. 材料导报,2006, 20 (6): 5-9. DONG SH Y, MA Y ZH, XU B SH, *et al.*. Current status of material for laser cladding [J]. *Materials Review*,2006, 20 (6): 5-9. (in Chinese)
- [6] 邱星武,李刚,邱玲. 激光熔覆技术发展现状及展望 [J]. 稀有金属与硬质合金,2013, 40 (5): 54-56. QIU X W, LI G, QIU L. The latest development and prospects of laser cladding technology [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2013, 40(5): 54-56. (in Chinese)
- [7] 王传琦,刘洪喜,周荣,等. 回火处理对多道 Ni 基熔覆涂层组织和耐蚀性能的影响 [J]. 材料热处理学报,2011, 32 (7): 145-150. WANG CH Q, LIU H X, ZHOU R, *et al.*. Influence of tempering on microstructure and corrosion resistance of multi-pass Ni-based coatings on 45 steel prepared by laser cladding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32 (7): 145-150. (in Chinese)
- [8] 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(增刊):44-48. CHEN CH Y, DENG Q L, SONG J L. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*,2005,37 (suppl.):44-48. (in Chinese)
- [9] 张维平,刘硕,季首华,等. 激光熔覆金属陶瓷细晶复合涂层晶粒细化行为研究 [J]. 材料工程,2004, 8: 12-16. ZHANG W P, LIU SH, JI SH H, *et al.*. Research on behavior of grain refinement in metal-ceramic surface fine composite coating by laser cladding [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2004, 8: 12-16. (in Chinese)
- [10] 刘洪喜,蔡川雄,蒋业华,等. 交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变 [J]. 光学精密工程,2012, 20 (11): 2402-2410. LIU H X, CAI CH X, JIANG Y H, *et al.*. Influence of alternative magnetic field on macro morphology and microstructure of laser cladding Fe-based composite coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (11): 2402-2410. (in Chinese)
- [11] ZHAO ZH, FAN Z T, DONG X P, *et al.*. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy [J]. *China Foundry*, 2010, 7 (1): 24-29.
- [12] 管建军,宋天民,张国福,等. 机械振动对焊接熔池金属凝固过程的影响 [J]. 抚顺石油学院学报, 2001, 21 (4): 51-54. GUAN J J, SONG T M, ZHANG G F, *et al.*. The effect of mechanical vibration on solidification of weld pool metal [J]. *Journal of Fushun Petroleum Institute*, 2001, 21 (4): 51-54. (in Chinese)
- [13] 张国福,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): 85-87. ZHANG G F, SONG T M, YIN CH J, *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): 85-87. (in Chinese)
- [14] 朱政强,张华,陈立功,等. 振动对焊缝金属动态力学性能的影响 [J]. 中国机械工程, 2007, 18 (7): 859-861. ZHU ZH Q, ZHANG H, CHEN L G, *et al.*. Influence of vibration on the dynamic mechanics properties of weld metal [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(7): 859-861. (in Chinese)
- [15] WU W T. Influence of vibration frequency on solidification of weldments [J]. *Scripta Materials*, 2000, 42 (7): 661-665.
- [16] FOROOZMEHR E, LIN D, KOVACEVIC R. Application of vibration in the laser powder deposition process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2009, 16 (11): 38-44.
- [17] 王传琦,刘洪喜,周荣,等. 机械振动辅助激光重熔 Ni 基合金 TiC 复合涂层微观组织研究 [J]. 红外与激光工程,2013, 42 (10): 2651-2657. WANG CH Q, LIU H X, ZHOU R, *et al.*. Microstructure of mechanical vibration assisted laser remelting Ni-based alloy and TiC composite coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (10): 2651-2657. (in Chinese)
- [18] EDWARD H, Jr KOTTCAMP. *Volume 3 of the*

- ASM Handbook [M]. The Materials Information Company, 1992;1562-1563.
- [19] 胡汉起. 金属凝固原理 [M]. 北京:机械工业出版社,2000;279-284.
- HU H Q. *Metal Solidification Principle* [M]. Beijing:China Machine Press, 2000; 279-284. (in Chinese)
- [20] HUANG Y J, ZENG X Y, HU Q W, *et al.*. Microstructure and interface interaction in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255 (7): 3940-3945.
- [21] 杨洗陈, 郑天禧, 张乃坤, 等. FeCrSiB 合金激光熔敷中对流传质研究 [J]. *金属学报*, 1992, 28 (2): 84-88.
- YANG X CH, ZHANG T X, ZHANG N K, *et al.*. Convection and mass transfer in laser cladding on FeCrSiB alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1992, 28 (2): 84-88. (in Chinese)
- [22] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007;53-58.
- CUI ZH Q. *Metallography and Heat Treatment* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 53-58. (in Chinese)
- [23] 石世宏. 激光熔覆工艺与粉末对覆层开裂行为的影响 [J]. *金属热处理*, 1998, 23 (9): 31-32.
- SHI SH H. Influences of technology and powder in laser cladding treatment on cracking behavior of cladding layer [J]. *Heat Treatment of Metals*, 1998, 23 (9): 31-32. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘洪喜(1972—),男,湖北黄冈人,博士,教授,博士生导师,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事离子束和激光束表面改性方面的研究。E-mail:piiiliuhx@sina.com



陶喜德(1989—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,2012年于湖南涉外经济学院获得学士学位,主要从事激光束表面改性方面的研究。E-mail:piiiliuhx@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)