

# 铌、铬对激光熔覆原位合成颗粒增强铁基复合涂层的影 响

吴 琦 雯<sup>1</sup> 马 明 星<sup>1</sup> 朱 天 辉<sup>1,2</sup> 张 伟 明<sup>1</sup> 刘 文 今<sup>1</sup> 杨 林<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 清华大学机械工程系先进成形与制造教育部重点实验室, 北京 100084  
<sup>2</sup> 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100084  
<sup>3</sup> 河南飞孟金刚石工业有限公司, 河南 孟州 454763

**摘要** 研究了铌、铬对激光熔覆制备的铁基颗粒增强复合涂层组织和性能的影响。在 FeCSiB 系熔覆粉末中复合添加 Ti、W、Nb、Cr 等碳化物形成元素, 通过激光熔覆制备原位合成颗粒增强复合涂层。研究表明, 单独及复合添加铌、铬均能获得显微硬度均匀分布且成形良好的熔覆层。通过改变铌和铬的含量和配比可以有效改变颗粒相的分布情况。单独添加铌时, 熔覆层显微硬度随着铌含量的增加先减小后增大; 单独添加铬时, 随着铬含量的增大, 熔覆层显微硬度呈下降趋势。抗冲击磨损性能与材料的韧性有关, 微米级碳化物颗粒对涂层抗冲击磨损性能的提高并没有促进作用。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 颗粒增强复合涂层; 抗冲击磨损性能

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0703004

## Influences of Nb and Cr on *In situ* Particle Reinforced Fe-Matrix Composite Coating by Laser Cladding

Wu Qiwen<sup>1</sup> Ma Mingxing<sup>1</sup> Zhu Tianhui<sup>1,2</sup> Zhang Weiming<sup>1</sup> Liu Wenjin<sup>1</sup> Yang Lin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China  
<sup>3</sup> Henan Famous Diamond Industrial Co., Ltd., Mengzhou, Henan 454763, China

**Abstract** The influences of Nb and Cr on the microstructure and properties of the Fe-matrix laser clad composite coating reinforced by *in situ* particles are studied of Ti, W, Nb and Cr with different contents and ratios adding into the FeCSiB cladding powder, and *in situ* particle reinforced Fe-matrix composite coating is produced by laser cladding. It reveals that clad layers with good forming and homogeneous microhardness distribution are produced by adding Nb and Cr other separately or simultaneously. The particle distribution can be influenced by the contents of Nb and Cr efficiently. The microhardness of the layers increases firstly and then decreases with the content of Nb increasing, and decreases with the content of Cr increasing. The impact wear resistance is related to the toughness of the material. The micron carbide particles will not improve the impact wear resistance of the particle reinforced composite coating.

**Key words** laser technique; laser cladding; particle reinforced composite coating; impact wear resistance

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.4990

## 1 引 言

颗粒增强复合材料因其增强相的高硬度、高熔点、高弹性模量或低密度等优异性能, 并结合其强韧

结合等特征, 而具有优于基体的耐磨性、耐热性、强韧性等特点。原位合成颗粒更因其结合强度高、界面清洁、热稳定性强等特点, 引起了很高的关注。近

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-20

**作者简介**: 吴琦雯(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光表面强化方面的研究。E-mail: wuqiwen07@gmail.com

**导师简介**: 马明星(1977—), 男, 硕士生导师, 主要从事激光表面强化及激光制备新材料等方面的研究。

E-mail: mamx@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

20 余年来,研究人员在激光制备原位合成颗粒增强复合涂层方面进行了非常系统且深入的研究,并得到了广泛的产业化应用<sup>[1-5]</sup>。

激光制备原位合成颗粒增强复合涂层,是利用激光熔覆快速熔凝的特征,向熔池中添加强碳化物形成元素,通过原位反应从基体中析出碳化物颗粒作为增强相而实现的。前期研究发现,通过调整粉末成分,可以初步控制增强颗粒的分布状态,并相应地影响涂层性能<sup>[6]</sup>。因此,研究各元素和涂层组织、性能之间的联系就显得尤为重要。现有研究主要专注在 Ti、Zr、W 等几种碳化物形成元素和激光加工工艺对涂层组织及性能的影响<sup>[6-8]</sup>,但对于 Nb 和 Cr 这两种元素却鲜有讨论。因此,本文重点研究 Nb、Cr 在激光熔覆制备铁基颗粒增强复合涂层中的影响,期望完善碳化物形成元素对颗粒增强复合涂层影响的研究体系。

在矿山机械、煤矿机械、沙石开采等重工业领域中,冲击磨损是工件失效的重要原因之一,因而提高材料的抗冲击磨损性能可以延长工件使用寿命,降低生产成本。但是针对颗粒增强复合涂层,现有研究更多注重于材料的磨损性能和弹塑性性能<sup>[9-11]</sup>,对冲击磨损性能却没有涉及,因此本文将原位合成颗粒增强复合涂层的冲击磨损性能进行相应的研究。

## 2 试验材料与方法

在 45# 钢表面进行单道及搭接激光熔覆试验。激光试验前,用砂纸打磨试块待加工面并用丙酮清洗。试验采用粉末为高碳含量的 FeCSiB 系熔覆粉末,并复合添加 Ti、W、Nb、Cr 等碳化物形成元素,通过改变 Nb、Cr 的含量以改变粉末成分。将按比例配置好的粉末与适量粘结剂充分混合,涂覆于试块表面并干燥,涂覆厚度为 1.8 mm。采用 GS-6000 型 CO<sub>2</sub> 激光器,激光输出功率为 1500 W,扫描速度为 4 mm/s,光斑直径为 3 mm,用氩气侧吹保护;进行搭接熔覆试验时搭接率为 33%。

垂直激光扫描方向切割出大小适宜、包含熔覆层和基材截面的试样,经镶样、磨样、抛光、腐蚀处理。使用 HX-200 型显微硬度计、JSM-7001F 型扫描电子显微镜 (SEM) (配 Oxford INCA X-sight7573 能谱仪) 观察分析试样,取典型视场进行颗粒分布情况统计。测试显微硬度前,用质量分数为 5% 的硝酸酒精进行浅腐蚀;观察金相组织前,用体积比  $V(\text{H}_2\text{O}_2):V(\text{HCl})=1:1$  的水溶液深腐蚀。此外,使用自制的冲击磨损试验机进行冲击磨损试

验,试块尺寸为 12.5 mm×12.5 mm×12.5 mm,冲击载荷为 5 kg,以细砂为磨料,磨削时间为 20 min,结合试样失重评估熔覆层的抗冲击磨损性能。

## 3 试验结果及分析讨论

### 3.1 熔覆层的成形与组织特征

单独添加 Nb、Cr 以及复合添加两种元素的情况下都得到了表面较光洁、成形良好的熔覆层 [图 1(a)],通过调整工艺参数,可显著降低搭接熔覆层的裂纹倾向,着色渗透探伤结果如图 1(b) 所示。熔覆层与基体间形成良好的冶金结合,组织均匀。



图 1 熔覆层外观。

(a) 着色渗透探伤前; (b) 着色渗透探伤后

Fig. 1 Morphology of the cladding layers. (a) Before the dye penetrant inspection; (b) after the dye penetrant inspection

单独添加 Cr 时,搭接熔覆层并无裂纹产生;而单独添加 Nb 时,部分试样出现贯穿整个熔覆层的裂纹,调整工艺参数后虽可得到无裂纹的熔覆层,但其表面成形较差,有一定数量的凹坑;当复合添加 Nb 和 Cr 时,熔覆层中存在些许微小的裂纹。由此推断,在大面积激光熔覆的情况下,Nb 的加入会导致材料的裂纹敏感性增加。

熔覆层组织为典型的亚共晶介稳组织,单独及复合添加 Nb、Cr 得到的组织如图 2 所示,其中图 2(a) 为 1000 倍放大组织,图 2(b)~(d) 为 3000 倍放大组织。各试亲组织均由细小的先共晶奥氏体枝晶的急冷转变相(马氏体和残余奥氏体)均匀分布在更为细小的莱氏体基底上,大量颗粒均匀弥散地分布其中。这是由于碳化物颗粒的析出,以及在由激光导致的快速凝固过程中大量过饱和固溶体的形成,均会导致熔池碳当量的降低,因而形成亚共晶组织。此外,Nb 较 Cr 与碳元素的结合能力更强,因此加 Nb 会得到更低的共晶度,先共晶奥氏体面积更大,共晶莱氏体面积更小。此外,从马氏体形态上看,属于高碳针状马氏体,这与吴朝锋<sup>[6]</sup>的研究结论一致。

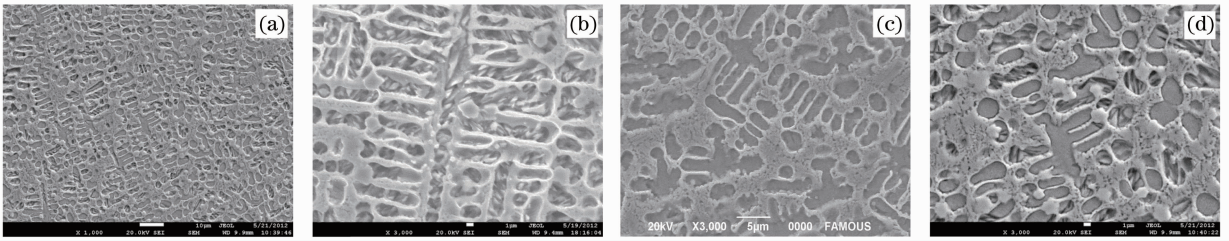


图 2 粉末成分为 FeCSiB+Ti+W+(a) Nb+Cr, (b) Nb, (c) Cr 和 (d) Nb+Cr 的激光熔覆层中部的典型组织

Fig. 2 Typical microstructure in the middle of the laser layers with the powder compositions of FeCSiB+Ti+W+(a) Nb+Cr, (b) Nb, (c) Cr and (d) Nb+Cr

### 3.2 颗粒相的分布及成分分析

从图 2 中可以看出,不同成分的熔覆层中均有大量颗粒相存在,分布密度达到  $10^4/\text{mm}^2$ 。颗粒的形状多为规则多边形,其中大多数颗粒弥散分布在先共晶奥氏体枝晶内,并且尺寸较小,少数尺寸较大

的颗粒散落在共晶莱氏体上。对不同成分(质量分数)的熔覆层中颗粒的分布情况进行统计(表 1),其中,单独加 Cr 时熔覆层中析出的颗粒尺寸多小于  $0.5 \mu\text{m}$  而难以进行人工统计,因此未定量统计其颗粒分布状态。

表 1 不同成分的熔覆层中颗粒分布情况

Table 1 Particle distributions in cladding layers with different compositions

Contents of Nb and Cr in the cladding powder	Minimum diameter of the particles / $\mu\text{m}$	Maximum diameter of the particles / $\mu\text{m}$	Contribution density of the particles /( $10^4/\text{mm}^2$ )
none	1.0	1.4	1.65
1% Nb	0.7	2.6	1.46
2% Nb	1.1	2.3	1.28
3 %Nb	0.9	2.8	1.37
4% Nb	1.4	3.0	1.10
1% Nb+1% Cr	1.0	3.0	1.78
1% Nb+2% Cr	1.0	1.2	4.07
2% Nb+1% Cr	1.1	4.1	0.80
2% Nb+2% Cr	1.1	2.6	2.41

统计发现,Nb 的添加会显著增大颗粒尺寸,并破坏颗粒尺寸的均匀性。同时,随着 Nb 含量的增加,颗粒分布密度呈略微减小的趋势。这说明在有更强的碳化物形成元素 Ti 存在的情况下,Nb 更倾向于促使颗粒生长。当复合添加 Nb 和 Cr 时,发现随着 Cr 含量的增加,颗粒尺寸减小,但尺寸均匀性得到改善,说明 Cr 在多种碳化物形成元素存在的情况下会在一定程度上阻碍颗粒长大。

通过改变 Nb、Cr 的含量和配比可以有效改变颗粒相的尺寸大小和均匀性以及颗粒分布密度。当质量分数分别为 1% 的 Nb 和 2% 的 Cr 复合添加时,可以得到分布密度高且尺寸均匀、直径为  $1 \mu\text{m}$  左右的弥散分布的碳化物颗粒。

利用电子探针对熔覆层中较大的颗粒相进行化学成分分析(表 2),发现无论是单独添加

Nb,还是复合添加 Nb 和 Cr,都会造成强碳化物形成元素在颗粒中的富集。当 1% 的 Nb 和 2% 的 Cr 复合添加时,由于颗粒尺寸均为  $1 \mu\text{m}$  左右,因此电子能谱扫描范围并非仅限于颗粒内,造成了一定的误差,但仍可反映出颗粒内的元素分布趋势。当单独添加 Nb 元素时,大部分 Nb 都分布在颗粒相中,这与其他强碳化物形成元素的分布规律一致。当 Nb 含量增加时,它在颗粒中所占的比例也随之增加,而 Ti、W、Mo 等其他碳化物形成元素的含量略有下降。这说明相对而言,Nb 在碳化物颗粒中的富集程度最高,但促使 Mo、W 等元素进入颗粒的能力却弱于 Ti。当复合添加 Nb 和 Cr 时,颗粒中也同样出现了其余碳化物形成元素含量降低的情况,但不同于 Nb,加入的 Cr 元素多数分布在莱氏体和奥氏体急冷转变相中。

表 2 不同成分的熔覆层中颗粒的主要成分(质量分数,%)

Table 2 Main components of the particles in cladding layers with different compositions (mass fraction, %)

Content of Nb and Cr in the cladding powder	Fe	Mo	Ti	Nb	Cr	W
none	7.31	7.92	19.38	—	—	44.50
2% Nb	9.94	4.98	12.43	22.53	—	29.18
4% Nb	8.88	3.79	8.79	36.28	—	19.23
1% Nb+1% Cr	8.82	5.63	13.79	11.67	—	36.15
1% Nb+2% Cr	24.37	—	11.27	10.09	0.77	24.07
2% Nb+1% Cr	7.52	5.43	8.11	26.02	0.46	26.57
2% Nb+2% Cr	7.12	4.29	8.18	29.27	0.76	23.72

### 3.3 熔覆层显微硬度分析

测量单独添加 Nb 时熔覆层的平均显微硬度(表 3),可以看出熔覆层硬度随着 Nb 含量的增加呈先减小再增大的变化趋势。研究表明<sup>[12]</sup>,熔覆层显微硬度由硬度较低的奥氏体、马氏体和硬度很高的合金渗碳体及颗粒相共同决定。涂层中虽弥散分布着大量高硬度颗粒,但由于颗粒所占面积小,因此并不能对涂层硬度起到决定性作用。Nb 和 Ti、Zr 形

成碳化物的能力相近,因而更多 Nb 元素加入意味着有更多碳元素参与反应,导致基体碳当量下降,共晶度也随之下降。因此熔覆层中奥氏体含量增加,合金渗碳体含量减少,致使涂层硬度下降。但当 Nb 含量增加到一定程度后,会固溶进合金渗碳体和先共晶奥氏体中,对基体组织起到固溶强化作用,使熔覆层显微硬度增大。

表 3 Nb 含量不同的熔覆层平均显微硬度

Table 3 Microhardness of cladding layers with different contents of Nb

Content of Nb in the cladding powder /%	1	2	3	4
Average microhardness /HV <sub>0.2</sub>	884	850	872	1037

如图 3 所示单独添加 Cr 时,熔覆层硬度分布较

为均匀,均在 550~900 HV<sub>0.2</sub>之间。随着 Cr 含量的增加,熔覆层显微硬度呈减小趋势。结合熔覆层组织分析,当单独添加 Cr 元素时,随着 Cr 含量的增加,奥氏体晶粒细化,但所占面积增加,同时微米级颗粒的分布密度降低,因此导致了涂层硬度下降。

### 3.4 熔覆层抗冲击磨损性能分析

采用自制的冲击磨损试验机对不同 Cr 含量的熔覆层进行性能测试,并与市售的双金属耐磨材料进行对比,以试验后试块失重表征材料的抗冲击磨损性能(表 4),其中“相对冲击磨损性能”为“对照试样失重”和“分析试样失重”的比值。

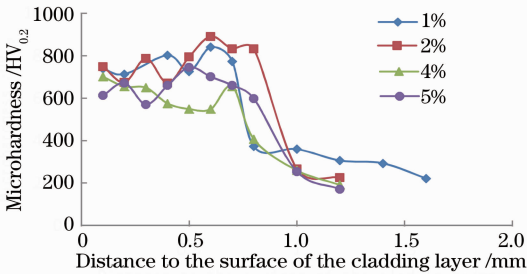


图 3 Cr 含量不同的熔覆层显微硬度分布

Fig. 3 Distribution of microhardness in cladding layers with different contents of Cr

表 4 Cr 含量不同的熔覆层抗冲击磨损性能及显微硬度

Table 4 Impact wear resistance and microhardness of cladding layers with different contents of Cr

Test material	1% Cr	2% Cr	4% Cr	5% Cr	Double metal wear-resisting material
Weight loss after impact wear test /g	0.7503	0.6011	0.4982	0.5345	0.5447
Relative impact wear resistance	0.73	0.91	1.09	1.02	1
Average hardness /HV <sub>0.2</sub>	766	779	619	660	680

结果表明,材料硬度较低时其抗冲击磨损性能比较好。此外,含 Cr 较少,微米级颗粒较多的涂层抗冲击磨损性能弱于对照材料,而添加 Cr 较多微米级颗粒比较少少的情况下,涂层的抗冲击磨损性能反而优于对照材料。其中的一个原因是,抗冲击磨损

性能主要要求材料具有良好的韧性和抗塑性变形能力,而 Cr 含量增多使得细化的奥氏体相增多,涂层韧性提高,因此性能更好。

为了进一步研究增强颗粒与抗冲击磨损性能之间的关系,保持其他碳化物形成元素的含量不变,只



调整 Ti 元素的含量,分析涂层的抗冲击磨损性能(表 5)。前期研究<sup>[8]</sup>表明,Ti 含量增多会导致颗粒分布密度以及颗粒尺寸的增大,因此含 Ti 越多即意味着微米级颗粒比例越大。分析结果表明,涂层的抗冲击磨损性能与微米级颗粒所占比例呈负相关,

表 5 不同颗粒含量涂层的抗冲击磨损性能

Table 5 Impact wear resistance of cladding layers with different contents of particles

Test material	5% Ti	10% Ti	12% Ti	15% Ti	Double metalwear-resisting material
Weight loss after impact wear test /g	0.4865	0.5201	0.5704	0.5529	0.5447
Relative impact wear resistance	1.12	1.05	0.99	0.95	1

选择熔覆层磨损程度较轻的一侧,对比其在进行冲击磨损试验前后的硬度分布(图 4)。结果表明,Cr 含量 4% 的熔覆层在冲击试验后平均硬度有所提高,其硬度分布也更为稳定,而不含 Cr 的熔覆

由此推断颗粒增强复合涂层中的微米级增强颗粒并不能对材料抗冲击磨损性能的提高起到促进作用。因此,含 Cr 量高的涂层抗冲击磨损性能更好的另一个原因可能是由于其中微米级碳化物颗粒的减少,以及亚微米级颗粒的增多。

层硬度则略有下降。分析结果表明,不同成分的涂层在冲击磨损试验后分别出现了硬化和软化这两种对立的现象。初步推测,在冲击磨损后材料的硬度变化主要由初始的材料组织特征所决定。

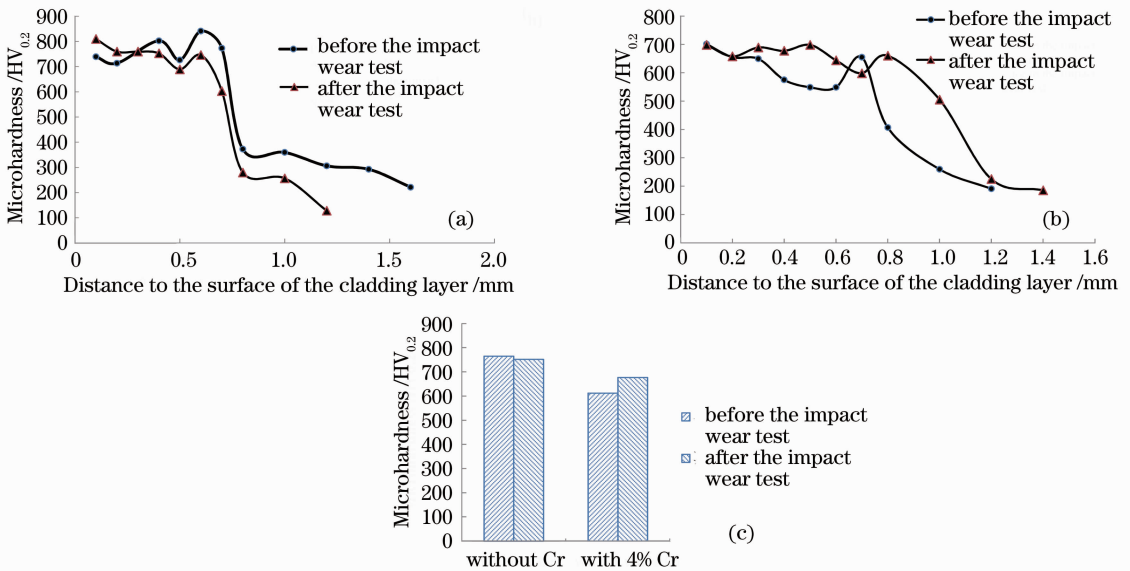


图 4 冲击磨损试验前后熔覆层显微硬度。(a) 不含 Cr 涂层硬度分布;(b) 含 4%Cr 涂层硬度分布;(c) 熔覆层平均硬度

Fig. 4 Microhardness of cladding layers before and after impact wear experiments. (a) Microhardness distribution of coating without Cr; (b) microhardness distribution of coating with 4% Cr; (c) average microhardness of cladding layer

## 4 结 论

1) 单独或复合添加铌和铬均可得到由先共晶奥氏体急冷转变相(马氏体和残余奥氏体)、莱氏体和弥散分布的微米级颗粒相组成的熔覆层,并会造成碳化物形成元素在颗粒中的富集。通过改变铌和铬的含量和配比可以有效改变颗粒相的尺寸大小和均匀性以及颗粒分布密度。

2) Nb 的作用介于 Ti、Zr 等强碳化物形成元素和 W、Mo 等中碳化物形成元素之间,主要促进碳化物颗粒生长,但也可以部分固溶进奥氏体和渗碳体中起到固溶强化的作用;Cr 作为一种较弱的碳化

物形成元素,主要进入到莱氏体,且不利于颗粒长大。

3) 熔覆层显微硬度随着铌含量的增加先减小后增大;随着铬含量的增大,熔覆层显微硬度呈下降趋势。

4) 抗冲击磨损性能与材料的韧性有关,微米级碳化物颗粒对涂层抗冲击磨损性能的提高并没有促进作用。

## 参 考 文 献

1 Zhang Xiaojian, Liu Wenjin, Ma Mingxing, et al.. Investigation

- on generating Ni-based composite coatings reinforced by laser cladding on the surface of alloy iron exhaust valve ring [J]. *Applied Laser*, 2009, 29(1): 14-17.
- 章晓剑, 刘文今, 马明星, 等. 合金铸铁气门座圈激光熔覆镍基复合涂层的研究[J]. *应用激光*, 2009, 29(1): 14-17.
- 2 Wang Zhongke, Zheng Qiguang, Tao Zengyi, *et al.*. Behavior characteristics of particle phases in laser cladding WC-TiC-TaC/Co based ceramic-metal composite coating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(10): 1027-1030.
- 王忠柯, 郑启光, 陶曾毅, 等. 激光熔覆多元复合硬质合金覆层中颗粒相的行为特征[J]. *金属学报*, 1999, 35(10): 1027-1030.
- 3 Liu Wenjin, Zhu Youhui, Ma Mingxing. Laser ceramic particle intensified compound coating piston ring with excellent abrasability and mating ability [J]. *Diesel Engine*, 2005, (suppliment): 302-323.
- 刘文今, 朱有慧, 马明星. 具有优异耐磨性和配副性的激光陶瓷颗粒增强复合涂层活塞环[J]. *柴油机*, 2005, (增刊): 320-323.
- 4 X Y Xu, W J Liu, M L Zhong, *et al.*. Direct laser fabricated in situ TiC particulate reinforced Ni<sub>30</sub>Al<sub>20</sub>Fe intermetallic matrix composite [J]. *Journal Materials Science*, 2004, 39(13): 4289-4293.
- 5 Li Qinghao, Zhao Changxi, Liu Hongyang. Recnet development of particle reinforced metal matrix composites[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1997, 17(5): 25-32.
- 李晴昊, 赵长喜, 刘宏阳. 颗粒增强型金属基复合材料的研究进展[J]. *中国空间科学技术*, 1997, 17(5): 25-32.
- 6 Wu Chaofeng. Investigation on the Control of Particle Distributions in Laser Producing Particle Reinforced Composite Coatings by In-situ Synthesis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- 吴朝锋. 激光制备原位合成颗粒增强复合涂层中颗粒分布控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- 7 Wu Chaofeng, Ma Mingxing, Liu Wenjin, *et al.*. Laser cladding in-situ carbide particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition[J]. *J Rare Earths*, 2009, 27(6): 997-1002.
- 8 Ma Mingxing. Investigation on Laser Producing Fe-based Composite Coatings Reinforced by In-situ Synthesized Particles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- 马明星. 激光制备原位合成颗粒增强铁基复合涂层的研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- 9 Chen Suiyuan, Dong Jiang, Chen Jun, *et al.*. Nano-particles reinforced Co-based gradient coating with high wear-resistance prepared in-situ by laser on surface of crystallizer copper alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0703006.
- 陈岁元, 董江, 陈军, 等. 结晶器铜合金表面激光原位制备纳米颗粒增强钴基梯度涂层[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0703006.
- 10 Yang Wenchao, Chao Mingju, Sun Yanmin, *et al.*. In-situ synthesis of WB-CrB reinforced Ni-based coatings by laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 081403.
- 杨文超, 晁明举, 孙艳敏, 等. 原位生成 WB-CrB 增强镍基激光熔覆层[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(8): 081403.
- 11 Gu Shengting, Hou Yifang, Chai Guozhong, *et al.*. Laser cladding of elasto-plastical properties of particle reinforced H13-TiC composite coatings[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603019.
- 顾盛挺, 侯义芳, 柴国钟, 等. 激光熔覆 H13-TiC 颗粒增强复合涂层的弹塑性能[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603019.
- 12 Ma Mingxing, Liu Wenjin, Zhong Minlin, *et al.*. Influence of Nb on the microstructure of laser clad composite coating reinforced by in-situ particles[J]. *Applied Laser*, 2006, 26(3): 145-147, 186.
- 马明星, 刘文今, 钟敏霖, 等. 铌对激光熔覆铁基原位合成颗粒增强复合涂层组织的影响[J]. *应用激光*, 2006, 26(3): 145-147, 186.

栏目编辑: 宋梅梅