激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的 显微组织与性能

靳鸣¹**,贺定勇^{1,2}*,王曾洁²,周正^{1,2},王国红²,李小璇¹

¹北京工业大学材料科学与工程学院,北京 100124; ²北京市生态环境材料及其评价工程技术研究中心,北京 100124

摘要 采用激光熔覆技术,在16Mn钢表面制备了2205双相不锈钢/TiC复合涂层,研究了TiC含量对熔覆层微观 组织、显微硬度及摩擦磨损性能的影响,并讨论了熔覆层中TiC的熔解、析出行为与熔覆层性能之间的关系。结果 表明,随着TiC含量的增大,熔覆层的稀释率逐渐增大。熔覆过程中TiC发生了熔解及析出现象。随着TiC含量 的增大,熔覆层的显微硬度逐渐增大。当TiC质量分数达到15%时,熔覆层的显微硬度最大值可达612 HV,该熔 覆层的磨损失重最小。

关键词 激光技术;激光熔覆;2205 双相不锈钢/TiC复合涂层;显微组织;硬度;摩擦磨损
 中图分类号 TG174.44
 文献标识码 A
 doi: 10.3788/LOP55.111403

Microstructure and Properties of Laser Cladded 2205 Dual-Phase Stainless Steel/TiC Composite Coatings

Jin Ming^{1 **}, He Dingyong^{1,2 *}, Wang Zengjie², Zhou Zheng^{1,2}, Wang Guohong², Li Xiaoxuan¹

¹ College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ² Beijing Engineering Research Center of Eco-Materials and LCA, Beijing 100124, China

Abstract The laser cladding technique is adopted for the fabrication of 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coating on the 16Mn steel surface. The effect of TiC content on the microstructure, microhardness and frictional wear properties of cladding layer is investigated and the relationship between the melting and precipitation behaviors of TiC in the cladding layer and the properties of cladding layer is also discussed. The results show that the dilution rate of cladding layer increases gradually with the increase of TiC content. Moreover, the TiC particles melt and precipitate during the laser cladding process. The microhardness of cladding layer increases gradually as the TiC content increases, and the highest microhardness of cladding layer is up to 612 HV when the TiC mass fraction is 15%. Simultaneously, the wear weight loss of cladding layer is the lowest.

Key words laser technique; laser cladding; 2205 dual-phase stainless steel/ TiC composite coating; microstructure; hardness; frictional wear

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引 言

激光熔覆技术是利用激光将熔覆材料与基体同 时熔化并形成良好冶金结合的表面改性方法,被广 泛用于工件表面改性与修复^[1-4]。大部分需要表面 强化的工件为钢材,选用与母材成分接近的不锈钢 材料进行激光熔覆,可使熔覆层与基体之间的界面 结合更牢固^[5-6]。同时,不锈钢涂层可以显著增强工 件表面的耐腐蚀性能。相比于普通 304 和 316L 不 锈钢,奥氏体-铁素体双相不锈钢具有更大的屈服强 度和疲劳强度,以及优良的耐腐蚀性能^[7-8]。2205 型不锈钢是双相不锈钢中应用最广泛的一种,其具 有高强度及良好的耐腐蚀能力^[9-10]。

然而,不锈钢硬度小、耐磨性差,难以应用于承

收稿日期: 2018-04-27;修回日期: 2018-05-21;录用日期: 2018-06-04

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0306100)

^{*} E-mail: dyhe@bjut.edu.cn; ** E-mail: S201609005@emails.bjut.edu.cn

受较重负荷或对硬度和耐磨性有较高要求的工件表面^[11]。通过在金属基熔覆层中加入高硬度的陶瓷 颗粒可以提高熔覆层硬度和耐磨性能,并保留不锈 钢涂层原有的耐腐蚀性能^[12-14]。TiC具有高强度、 高硬度、良好的化学稳定性以及优良的耐磨、耐腐蚀 性能,在熔覆层中添加TiC可以显著增大熔覆层的 硬度及耐磨性^[15]。由于TiC与不锈钢的各项属性 差异较大,因此,添加TiC 会对复合熔覆层成形及 性能产生较大的影响。此外,TiC 在激光作用下易 发生熔解和析出的现象^[16-18],其对熔覆层显微组织 结构及性能的影响有待研究。

本文采用激光熔覆技术制备了 2205 不锈钢/ TiC 复合涂层,研究了 TiC 含量对熔覆层成形、显微 组织、硬度及耐磨性的影响,分析了熔覆层中 TiC 的熔解与析出行为,探讨了原始 TiC 以及析出相对 熔覆层性能的影响。

2 试 验

2.1 试验材料

采用 2205 型奥氏体-铁素体双相不锈钢粉末作 为试验材料,其化学成分见表 1。不锈钢粉末与 TiC 粉末的粒径均为 40~75 μm。熔覆前,将 TiC 分别以质量分数为 0,5%,10%,15%的比例掺入 2205 不锈钢粉末中,并混合均匀。熔覆用基材为 16Mn钢,尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm,其表 面经砂纸打磨去除氧化层后用乙醇清洗干净。

表 1 2205 型奥氏体-铁素体双相不锈钢的

化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 2205 austenitic-ferrite dual-phase stainless steel (mass fraction, %)

| Element | Cr | Ni | Mo | Mn | С | Fe |
|---------|----|----|-----|------|------|------|
| Content | 22 | 6 | 3.2 | 0.65 | 0.05 | Bal. |

2.2 熔覆层制备

采用德国 JPG Photonics Corporation 公司生产的 YLS-6000 型镱玻璃激光器进行试验,激光波 长为 1070 nm,最大输出功率为 6 kW,矩形光斑尺 寸为 5 mm×5 mm。采用氩气作为保护气体,气流 量为 10 L·min⁻¹。采用北京航空制造研究院生产 的 BTSF-2 型 同 轴 送 粉 器 送 粉,送 粉 速 率 为 15 g·min⁻¹。激光熔覆试验选用的激光功率为 2.5 kW,扫描速率为 4 mm·s⁻¹。为了制备摩擦磨 损试样,需进行多道搭接熔覆,搭接率为 30%。

2.3 结构表征及力学性能测试

在熔覆层样品中间位置切割取样,经磨制抛光

后,采用三氯化铁乙醇混合液进行腐蚀。使用光学 显微镜观察熔覆层横截面形貌。采用日本 KYOWAGLAS-XA 公司生产的 H-12 型 X 射线衍 射仪进行熔覆层的物相分析,衍射条件为:Cu 靶 X 射线,扫描角度 20°~90°,扫描速度 2(°)•min⁻¹。 采用荷兰 FEI 公司生产的 Quanta 200 型扫描电子 显微镜观察熔覆层的显微组织,并使用荷兰 FEI 公 司生产的 EDAX Genesis 2000 型 X 射线能谱仪分 析区域成分。采用上海泰明光学仪器有限公司生产 的 HVS-1000 型维氏数显显微硬度计测量熔覆层横 截面显微硬度,加载载荷为200g,加载时间为15s。 采用济南思达测试技术有限公司生产的 MRH-3W 型高速环块摩擦磨损试验机进行磨损试验,施加载 荷为 600 N,转速为 200 r·min⁻¹,试验条件为无润 滑的干摩擦,磨损时间为2h。磨损试验前后分别 用电子天平称量试样质量,两者的差值即为试样的 磨损失重。

3 分析与讨论

3.1 熔覆层稀释率及成形

不同 TiC 含量的熔覆层截面形貌如图 1 所示, 其中,η 为熔覆层稀释率,H 为熔覆层堆高,W 为熔 覆层熔宽。可以看出,随着 TiC 含量的增大,熔覆 层的稀释率呈逐渐增大的趋势。这是因为 TiC 对 于激光的吸收能力比不锈钢强很多^[19];随着 TiC 含 量的增大,粉末吸收的热量增大,相同激光功率下整 体熔覆区域的温度升高,更多的基材被熔化,最终熔 覆层的稀释率增大^[20]。

从图 1 还可以看出,当 TiC 质量分数为 0 和 5%时,熔覆层的成形良好,内部无缺陷;当 TiC 质 量分数为 10%时,熔覆层顶部出现一些气孔;当 TiC 质量分数达到 15%时,熔覆层出现开裂现象, 开裂起始于熔覆层与基体的交界处,并逐渐向熔覆 层内部延伸。

激光熔覆试验所用的 2205 不锈钢粉末与 16Mn钢基体均为铁基材料,两者成分相近,可将 2205 不锈钢视作 TiC 与基体之间的"缓冲剂"和"粘 结剂",其在保证复合涂层良好成形的同时,可以将 TiC 更牢固地沉积在熔覆层中。随着熔覆层中 TiC 含量的增大,不锈钢粉末含量相应减小,从而在一定 程度上减弱了熔覆层与基体间的结合,且大量引入 的 TiC 使熔覆区域的导热性变差,严重影响到熔池 的形成和凝固过程,从而导致熔覆层发生开裂,成形 变差。



图 1 不同质量分数 TiC 的熔覆层截面形貌。(a) 0;(b) 5%;(c) 10%;(d) 15%

Fig. 1 Sectional morphologies of cladding layers with different mass fractions of TiC. (a) 0; (b) 5%; (c) 10%; (d) 15%

3.2 熔覆层微观结构

不同 TiC 含量的熔覆层 X 射线衍射图谱如图 2 所示。可以看出,不添加 TiC 的熔覆层组织呈典型 的双相结构,组织中包含了 α-Fe 相和 γ-Fe 相。然 而,随着 TiC 的引入,熔覆层中的 γ-Fe 相消失,熔覆 层主要由 α-Fe 固溶体、TiC 及少量的(Cr_{0.2},Ti_{0.8})C 和 MoC 组成。同时,随着 TiC 含量的增大,TiC 相 的峰强明显增强,而 α-Fe 相的峰强逐渐减弱。当 TiC 质量分数达到 15%时,熔覆层中又重新出现了 少量的 γ-Fe 相,表明熔覆层中部分组织发生了奥氏 体化转变。

不同 TiC 含量的熔覆层显微组织如图 3 所示。 可以看出,随着 TiC 含量的增大,熔覆层中析出相 形貌有较大差异。当 TiC 质量分数为 5%时,熔覆 层中的析出物呈细小球状或方块状,熔覆层中几乎 不存在原始形貌的 TiC;当 TiC质量分数增大至 10%时,熔覆层中析出相形貌与尺寸均发生明显变 化,出现了更多的十字状相;当 TiC 质量分数达到 15%时,熔覆层中保持原始形貌的 TiC 数量明显增 大,且多数 TiC 边缘存在细小粒状相。



Fig. 2 X-ray diffraction patterns of cladding layers with different TiC contents



图 3 不同质量分数 TiC 的熔覆层显微组织。(a) 5%;(b) 10%;(c) 15%;(d) 15% Fig. 3 Microstructures of cladding layers with different mass fractions of TiC. (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 15%

图 3(b)、(c)中十字状相和熔覆层基体的成分 分析结果见表 2。可以看出,十字状相主要包含了 Ti、Fe、Cr 和 C 元素。原始 TiC 的熔解使熔池中 Ti 与 C 元素的浓度迅速增大。由于 MoC、Mo₂C、Fe₃C 等碳化物与 TiC 的吉布斯自由能相近^[21],熔池中分 散的 Fe、Ti、Cr、Mo 元素均有可能与 C 元素反应, 析出多种碳化物,因此,熔覆层中不仅存在 TiC,还 有少量(Cr_{0.2},Ti_{0.8})C和 MoC。当TiC 质量分数为 10%时,熔覆层的熔宽和堆高均大于TiC 质量分数 为5%的熔覆层,如图1所示;同时,TiC 质量分数 为10%的熔覆层的过冷度更大,熔池中的Ti、C 原 子浓度也更大,为相析出提供了有利的偏聚或生长 条件,因此,在熔覆层形成了尺寸相对较大的十字状 析出相。

激光与光电子学进展

由表 2 可以看出,粒状相主要包含 Ti 和 C 元 素,这说明粒状相为从原始 TiC 上熔解、脱落下来 的小颗粒。原始 TiC 熔解的过程可分别从图 3(d) 中标记①、②、③、④处依次清晰看出,标注 ①、②、 ③的 TiC 可清晰看到未熔解的核心,其边缘粒状 相仍按原始 TiC 形貌分布,而标注④的 TiC 已全 部裂解,无未熔 TiC 核心。由此推断,TiC 的熔解 过程是由外向内逐步进行的,当 TiC 吸收激光能 量后,其边缘先发生熔解,部分小颗粒逐渐从原始 颗粒上脱落。随后,热量通过热传导作用逐渐向 颗粒中心传递,最终,原始 TiC 完全被熔解成分散 的小颗粒。

表 2 熔覆层基体与第二相颗粒的 EDS 分析结果(原子分数,%)

Table 2 Cladding layer base material and EDS analysis results of its second-phase particles(atomic fraction, %)

| Position | Fe | Ti | Cr | Ni | Мо | С |
|----------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Point-1 | 17.56 | 36.52 | 4.08 | 1.04 | 1.32 | 39.49 |
| Point-2 | 78.53 | - | 15.47 | 4.48 | 1.52 | - |
| Point-3 | 9.82 | 44.68 | 4.17 | - | - | 41.33 |
| Point-4 | - | 42.77 | - | - | - | 57.23 |

当 TiC 质量分数为 5%和 10%时,添加的 TiC 几乎全部熔解并在凝固过程中以细小十字状形貌重 新析出。在相同激光功率下,当 TiC 质量分数增大 至 15%时,单位时间内的热输入不足以熔解所有添 加的 TiC,因此,大量的 TiC 部分熔解或者未熔。这 些 TiC 以原始形貌保存在熔覆层基体中,会影响熔 覆区域的热量传递,导致熔覆层与基体的结合弱化, 最终在凝固过程中发生开裂现象。

3.3 熔覆层的显微硬度

不同 TiC 含量的熔覆层横截面的显微硬度分 布如图 4 所示。可以看出,熔覆层的显微硬度随着 TiC 含量的增大而增大。当 TiC 的质量分数达到 15%时,熔覆层的显微硬度最大值可达 612 HV,约 为不添加 TiC 的熔覆层的 2 倍;该熔覆层底部区域 的显微硬度明显大于顶部区域。





添加 TiC 的熔覆层的强化机制主要为第二相 强化。当 TiC 的质量分数为 5%和 10%时,第二相 强化颗粒主要为弥散分布在 Fe 基固溶体上的析出 相。随着 TiC 含量的增大,析出相的数量逐渐增 大,强化效果增强,熔覆层的显微硬度得到增大。当 TiC的质量分数达到 15%时,熔覆层中第二相颗粒除了各种析出相以外,还包含了大量从原始 TiC 上脱落下来的小颗粒,如图 3(c)~(d)所示。这些小颗粒随熔池的流动均匀地分布在熔覆层中,并与析出相发生共同作用,使 TiC 质量分数为 15%的熔覆层的显微硬度明显大于其他熔覆层的。

3.4 熔覆层的摩擦磨损性能

不同 TiC 含量的熔覆层磨损失重情况见表 3。 可以看出,随着 TiC 含量的增大,熔覆层的磨损失 重基本呈逐渐减小的趋势。当 TiC 质量分数为 15%时,熔覆层的磨损失重最小,约为不添加 TiC 的熔覆层的 1/4。

表 3 不同 TiC 含量的熔覆层的磨损失重 Table 3 Weight loss of cladding layers with different TiC contents

| Mass fraction of TiC /% | 0 | 5 | 10 | 15 |
|----------------------------|------|------|------|------|
| Loss mass /mg | 52.7 | 56.7 | 36.4 | 13.3 |

不同 TiC 含量的熔覆层的磨损表面如图 5 所示。可以看出,不添加 TiC 的熔覆层的磨损表面存 在较多的犁沟和片状剥落,且犁沟痕迹较深;当 TiC 质量分数为 5%时,熔覆层磨损表面中犁沟数量明 显减少,且痕迹变浅;当 TiC 质量分数为 10%时,熔 覆层磨损表面上开始出现大量的鳞片状翘起;当 TiC 质量分数达到 15%时,熔覆层磨损表面的犁沟 和剥落现象明显减少,磨损表面上存在很多被暴露出的 TiC。

耐磨性的提升是熔覆层基体与镶嵌在其中的 TiC共同作用的结果。结合显微硬度测试结果可以 看出,随着 TiC 含量的增大,熔覆层中析出相的数 量增多,熔覆层基体硬度得到增大。熔覆层的硬度 越大,其磨损失重量越小,材料的耐磨性能越好^[22]。 同时,熔覆层中未熔解或部分熔解的 TiC 可以有效 地抑制划痕的扩展,从而减弱对基体的磨损作用。

另外,在磨损表面中并未观察到 TiC 的破碎和剥落,说明 Fe 基固溶体对 TiC 起到支撑和保护的作用,使得熔覆层的耐磨性增强。



图 5 不同质量分数 TiC 的熔覆层磨损表面。(a) 0;(b) 5%;(c) 10%;(d) 10%,高放大倍数;(e) 15%;(f) 15%,高放大倍数 Fig. 5 Worn surfaces of cladding layers with different TiC contents. (a) 0; (b) 5%; (c) 10%;

(d) 10%, high magnification; (e) 15%; (f) 15%, high magnification

4 结 论

采用激光熔覆技术在 16Mn 钢表面制备了 2205 双相不锈钢/TiC 熔覆层,并对熔覆层的微观 组织、显微硬度以及摩擦磨损性能进行了测试和分 析,得到以下结论。

1) 熔覆层的稀释率随着 TiC 含量的增大而增 大,当 TiC 质量分数达到 15%时,熔覆层出现了开 裂现象。

2) 在激光的作用下,熔覆层中的 TiC 发生熔解 及析出现象。当 TiC 含量较小时,熔覆层中的原始 TiC 几乎全部熔解;当 TiC 含量较大时,熔覆层中大 量的原始 TiC 只发生部分熔解。

3)随着 TiC 含量的增大,熔覆层的显微硬度增大,磨损失重逐渐减小。熔覆层中未熔解的 TiC 颗粒可阻碍划痕的扩展,提升熔覆层整体耐磨性。

参考文献

 Zhong M L, Liu W J. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (11): 1653-1659.

> 钟敏霖,刘文今.国际激光材料加工研究的主导领域 与热点[J].中国激光,2008,35(11):1653-1659.

[2] Abboud J H, West D R F. Ceramic-metal composites produced by laser surface treatment [J]. Materials Science and Technology, 1989, 5(7): 725-728.

- [3] Chang J, Wang F. Microstructure of Fe-based alloy coating by plasma cladding process on Q235[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(23): 103-104, 108.
 常婕, 王峰. Q235 钢等离子弧熔覆铁基合金涂层的 组织分析[J]. 热加工工艺, 2008, 37(23): 103-104, 108.
- [4] Cui Z Q, Wang W X, Cao G G, et al. Microstructure and properties of Fe-based alloy and B₄C ceramics composite coating on low carbon steel by laser cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(3): 134-138. 崔泽琴, 王文先,曹国光,等. 碳钢表面激光熔覆铁 基 B₄C 陶瓷涂层的组织与性能 [J]. 材料热处理学 报, 2011, 32(3): 134-138.
- [5] Li S, Xu G H, Han L F, et al. Application status and research development of Fe-based alloy material for laser cladding [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(6): 112-114, 117.
 李胜,许光辉,韩立发,等.激光熔覆用铁基合金材 料的使用现状和研制进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(6): 112-114,117.
- Zan S P, Jiao J K, Zhang W W. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53 (6): 061406.

咎少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔 覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53 (6): 061406.

- [7] Fan J W, He C C, Du C F, et al. Effects of aging treatment at 590 °C on the phase structure and hardness of 2205 duplex stainless steel[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2011, 32(2): 61-65.
 范君伟,何晨冲,杜春风,等. 590 ℃时效处理对 2205 双相不锈钢组织及硬度的影响[J].上海有色金属, 2011, 32(2): 61-65.
- [8] Momeni A, Dehghani K, Zhang X X. Mechanical and microstructural analysis of 2205 duplex stainless steel under hot working condition[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(6): 2966-2974.
- [9] Zeng X G, Luo H, Wu C. The effect of heat treatment process on the corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel [J]. Heavy Casting and Forging, 2009(4): 12-15.
 曾宪光,罗宏,吴灿. 热处理工艺对 2205 双相不锈 钢耐蚀性能的影响[J]. 大型铸锻件, 2009(4): 12-15.
- [10] Chen L, Ma X C, Liu X, et al. Processing map for hot working characteristics of a wrought 2205 duplex stainless steel [J]. Materials & Design, 2011, 32 (3): 1292-1297.
- [11] Lin S J, Xiong W H, Wang S Y, et al. Effect of reinforcing particles content on properties of TiC/ 316L composites [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2013, 18 (3): 373-378.
 蔺绍江,熊惟皓,王赛玉,等. 增强体含量对 TiC/ 316L 复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与

工程, 2013, 18(3): 373-378. [12] Akhtar F, Guo S J. Microstructure, mechanical and

- fretting wear properties of TiC-stainless steel composites[J]. Materials Characterization, 2008, 59 (1): 84-90.
- [13] Duan X X, Gao S Y, Gu Y F, et al. Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L + SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103004.
 段晓溪,高士友,顾勇飞,等.激光熔覆 316L+SiC

的强化机制和摩擦磨损性能研究[J].中国激光, 2016,43(1):0103004.

[14] Xue M P, Han B, Wang Y, et al. Microstructures and corrosion resistance properties of Ni-based WC/ Cr₃C₂ coating prepared by laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 091403. 薛敏鹏, 韩彬, 王勇, 等. 激光熔覆 Ni 基 WC/Cr₃C₂ 涂层显微组织和耐蚀性研究[J]. 激光与光电子学进 展, 2011, 48(9): 091403.

- [15] Wang Z W, Zhang H, Zhao C. Study on microstructure and properties of TiC-Fe45-based composite coating by argon tungsten-arc cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 51-54, 75.
 王泽旺,张寰,赵程. 氩弧熔覆 TiC 颗粒增强 Fe 基 涂层组织性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 51-54, 75.
- [16] Qiao H, Li Q T, Fu H G, et al. Microstructure and micro-hardness of in situ synthesized TiC particles reinforced Fe-based alloy composite coating by laser cladding [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2014, 45(2): 85-90.
- Lee J M, Euh K, Oh J C, et al. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 323(1/2): 251-259.
- [18] He C L, Chen S K, Zhou Z H, et al. Research situation and application prospects of laser cladding metal-based titanium carbide reinforced coating [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 7-10. 贺长林,陈少克,周中河,等.激光熔覆金属基碳化 钛强化涂层的研究现状及应用前景 [J].热加工工艺, 2013, 42(12): 7-10.
- [19] Zhang X J, Fang J, Shi H Z, et al. Study of laser cladding Fe-based alloy/ceramic TiC layer on 20 steel
 [J]. Hot Working Technology, 1997(2): 24-26.
 张细菊,方军,史华忠,等.钢表面激光熔覆 Fe 基TiC 陶瓷涂层的研究[J].热加工工艺, 1997(2): 24-26.
- [20] Huang Z F, Zhang C, Tang Q H, et al. Effects of WC particles on the microstructure and hardness of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 13-19.
 黄祖凤,张冲,唐群华,等. WC 颗粒对激光熔覆

Gun, 所, 店中中, 中. IIC 線徑內做九席復FeCoCrNiCu 高熵合金涂层组织与硬度的影响[J].中国表面工程, 2013, 26(1): 13-19.

- [21] Wang X H, Qu S Y, Du B S, et al. Effect of molybdenum on microstructure and wear properties of Fe-Ti-Mo-C laser clad coatings [J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(7): 1222-1228.
- [22] Tjong S C, Lau K C. Abrasion resistance of stainless-steel composites reinforced with hard TiB₂ particles [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(8): 1141-1146.