

文章编号: 0258-7025(2010)05-1380-06

影响激光感应复合快速熔覆碳化钨金属陶瓷层的因素分析

周圣丰¹ 曾晓雁²

(¹ 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063
² 华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 研究了激光感应复合快速熔覆(LIHRC)碳化钨金属陶瓷层的影响因素。结果表明,随着感应预热温度的增加,激光感应复合快速熔覆的效率增加;基材类型对激光感应复合快速熔覆的效率也有较大影响,这主要是由基材的热物理性能参数(如熔点、电阻率与磁导率)决定;随着激光比能与基材感应预热温度的增加,复合层的稀释率增加;随着粉末面密度的增加,复合层的稀释率降低。此外,在激光感应复合快速熔覆过程中,复合粉末的利用率不仅与激光工艺参数、感应预热温度有关,还与 WC 颗粒的含量以及粘结金属的种类有关。

关键词 激光技术;激光感应复合快速熔覆;金属陶瓷层;激光比能;基材类型

中图分类号 TG154.5;TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1380

Analysis of Related Factors to Affect WC Ceramic-Metal Composite Coatings Prepared by Laser Induction Hybrid Rapid Cladding

Zhou Shengfeng¹ Zeng Xiaoyan²

(¹ School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The related factors to affect WC ceramic-metal composite coatings prepared by laser induction hybrid rapid cladding (LIHRC) are investigated. The results show that, with the preheated temperature of substrate increasing, the efficiency of LIHRC increases. The substrate types also have a significant effect on the efficiency of LIHRC, which is determined by the thermophysical properties (i. e. melting point, resistivity and permeability). With the laser specific energy and the preheated temperature of substrate increasing, the dilution of the composite coating increases, while the dilution decreases with the increase in the powder density per area. Moreover, the efficiency of the composite powder not only depends on the laser processing parameters and the preheated temperature of substrate, but also relates to the weight percent of WC particle and the types of the bonding metal during LIHRC.

Key words laser technique; laser induction hybrid rapid cladding; ceramic-metal composite coating; laser specific energy; substrate types

1 引言

激光熔覆金属陶瓷层技术可以将基材的高塑性与韧性以及金属陶瓷层的高硬度、高耐磨与高耐蚀

等性能相结合,从而大幅度提升基材的整体性能。因此,该技术在关键零部件的表面强化与修复以及三维快速制造等领域具有很好的发展前景^[1,2]。但

收稿日期: 2009-09-16; 收到修改稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(50901040)、航空科学基金(2009ZE56013)和南昌航空大学博士启动基金(EA200901170)资助课题。

作者简介: 周圣丰(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光表面强化与激光快速制造等方面的研究。

E-mail: zhousf1228@163.com

是,激光熔覆金属陶瓷层易开裂的特性已严重限制了该技术的实际应用。目前,采用加热炉或氧乙炔火焰作为热源对基材进行预热处理,以抑制熔覆层裂纹的产生,被激光熔覆界普遍认为是最有利于消除裂纹的方法之一^[3]。但对于大型零部件如轧辊、曲轴等,需要大型的加热炉,长时间的加热与保温容易产生氧化铁皮,导致熔覆层性能降低,而且装卸极不方便,不易实现自动化,导致熔覆效率很低。基于此,文献[4]率先提出了激光感应复合快速熔覆的方法,采用该方法能够在效率提高约4倍的情况下,获得无裂纹的高硬度碳化钨金属陶瓷层。

影响激光熔覆层的因素有很多,如激光工艺参数(激光功率、激光扫描速度、激光模式与激光光斑直径)、粉末颗粒与激光束之间的交互作用等^[5,6]。那么,在激光感应复合快速熔覆过程中,由于感应加热源的引入,使得影响熔覆层的工艺因素增加,如何调整复合熔覆的工艺参数成为制备高质量涂层的关键。因此,本文对影响激光感应复合快速熔覆碳化钨金属陶瓷层的效率、稀释率以及粉末利用率的因素进行了研究。

2 实验材料、装置与方法

2.1 材料与装置

实验采用的基材为120 mm × 50 mm × 7 mm的A3钢,经砂轮机磨光除锈与丙酮清洗待用。所用的陶瓷相为多角状铸造WC,其组织为WC + W₂C共晶,粒度为-400目(0.0374 mm)。粘结金属分别为Fe基合金与Ni60A,粒度均为-180~320目,其中Fe基合金的化学成分质量分数(%)分别为0.4~0.6 C,1.0~2.0 Si,2.0~3.0 B,1.0~2.5 Cr,4.3 Ni,其余为Fe,Ni60A的化学成分质量分数(%)分别为0.5~0.8 C,3~4 B,3~5 Si,12~17 Cr,10~14 Fe,其余为Ni。实验前,将粘结金属与铸造WC分别按4:1与13:7的质量比均匀混合,采用本实验室开发的造粒法制备成流动性好且适合于同步送粉的复合粉末。

采用文献[4]中的激光感应复合快速熔覆的实验装置进行实验。在实验过程中,采用Rofin-TR050型5 kW轴快流CO₂激光器作为热源,激光束经光束调节装置调节成椭圆形光斑,光斑的主轴与短轴分别为7与5 mm,且主轴平行于激光扫描速度方向。高频感应加热设备的频率为30 kHz,基材与感应线圈之间的距离为2~8 mm,基材表面被感应加热的平均温度为300~1223 K,采用红外测

温仪TN425LE1进行测量,其精度为±1℃。送粉装置为HUST-VI型自动送粉器,采用氩气将复合粉末从孔径为4 mm的喷嘴中吹入激光熔池,喷嘴与工件的距离为8 mm,夹角为45°。

2.2 方案设计

2.2.1 激光工艺参数

当采用椭圆形光斑时,激光感应复合快速熔覆过程中激光比能可以表示为^[7]

$$E = 60 \frac{P}{V_s \cdot D}, \quad (1)$$

式中 P 为激光功率, V_s 为激光扫描速度, D 为垂直于激光扫描速度方向的椭圆光斑尺寸。

根据激光熔覆的特点,引入名义粉末面密度的概念,定义为在激光熔覆过程中,单位面积内沉积的合金粉末质量,理论值计算为

$$\psi = 10000 \frac{\dot{m}}{V_s \cdot D}, \quad (2)$$

式中 \dot{m} 为送粉量。

2.2.2 基材类型选择

为了研究基材类型对复合熔覆效率的影响,基材分别选择A3钢,304不锈钢与QT50-5球墨铸铁。

2.2.3 稀释率的测定

实验结束后,将试样沿横截面切开,按标准的制备工序制备成金相试样,运用体视显微镜测量基材的熔深,用游标卡尺测量复合层的厚度,记录后取其平均值。采用文献[8]的方法表征复合层的稀释率

$$\eta = \frac{h}{H+h} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 H 为复合层的厚度, h 为基材的熔深。

2.2.4 粉末利用率的测定

将准备好的基材在电子天平上称重(精度为0.1 mg),记下其原始质量为 W_i 。采用单道激光感应复合快速熔覆的方法,在试样表面制备碳化钨金属陶瓷层。实验结束后,用游标卡尺测量复合层的长度 L 三次,取其平均值。然后用钢丝刷去除试样表面未熔化的粉末颗粒,并用乙醇清洗、烘干后称重,记录此时的质量为 W_f ,则试样的实际增重为 $\Delta W_p = W_f - W_i$ 。由于 V_s 与 \dot{m} 均已知,激光感应复合快速熔覆后,基材理论上应增重为 $\Delta W_t = (L/V_s) \cdot \dot{m}$,则粉末利用率为 $\xi = \Delta W_p / \Delta W_t$ 。

2.3 极限熔覆状态的定义

在激光感应复合快速熔覆过程中,当固定激光比能而改变粉末面密度,或者同时改变激光比能与粉末面密度(即固定送粉量和激光功率而改变激光

扫描速度)时,熔覆层存在这样的状态:

1) 随着激光比能的进一步降低,熔覆层的宽度变小且边部的小凹坑逐渐增多,出现不饱满的现象。因此,当熔覆层边部开始出现小凹坑时的激光扫描速度即为最大激光扫描速度。

2) 随着粉末面密度的进一步增大,熔覆层中心部位的小凹坑逐渐增多,甚至相互连接成沟槽,出现烧不透的现象。因此,当熔覆层中心部位出现小凹坑时的送粉量为最大送粉量。

3 实验结果与分析

3.1 影响熔覆效率的因素

3.1.1 感应预热温度

对于 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合粉末而言,在激光感应复合快速熔覆过程中,当激光功率为 5 kW 时,基材的感应预热温度对激光感应复合快速熔覆效率的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着基材感应预热温度的增加,激光感应复合快速熔覆所能够允许的最大送粉量与最大激光扫描速度均增加,即最大熔覆效率增加。

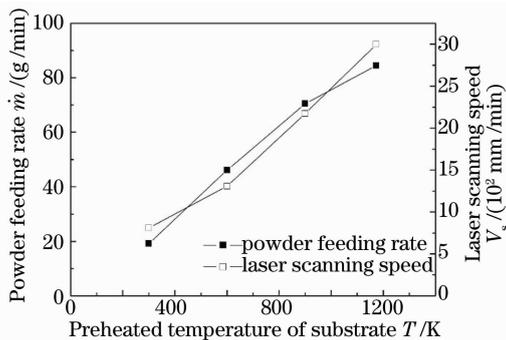


图 1 基材的感应预热温度对激光感应复合快速熔覆效率的影响

Fig. 1 Effect of the preheated temperature of substrate on the efficiency of LIHRC

事实上,在激光熔覆过程中,激光能量主要消耗在以下三个方面:1)熔化复合粉末;2)通过热传导使基材升温,熔化基材表面形成激光熔池;3)热辐射及其他损失。因此,根据能量守恒可得^[9]

$$P = P_p + P_s + P_L, \quad (4)$$

式中 P_p 为用于熔化熔覆材料的功率; P_s 为用于熔化基材表面形成熔池的功率; P_L 为激光由于反射、辐射与热传导等损失的功率。在激光感应复合快速熔覆过程中,基材对激光能量的吸收率随感应预热温度的增加而增加^[4],激光由于反射而损失的能量则减小。另外,基材温度的升高,有利于熔融的合金

熔池在基材表面铺展开而形成冶金结合的熔覆层,而且用于熔化基材表面形成熔池的功率 P_s 与激光由于热传导而损失的功率 P_L 均减小。根据(4)式可知,用于熔合金粉末的功率 P_p 增加,即在单位时间内可以熔覆更多的复合粉末。因此,激光感应复合快速熔覆的最大效率随基材感应预热温度的增加而增加。

3.1.2 基材类型

对于 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合粉末而言,当激光功率为 5 kW 时,基材类型对熔覆效率的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出,当基材为铸铁时,激光感应复合快速熔覆的效率最高,即最大激光扫描速度可以提高到 3300 mm/min,送粉量约 90 g/min。当基材为 A3 钢时,激光感应复合快速熔覆的效率相对于基材为铸铁时的效率有所降低,最大激光扫描速度为 3000 mm/min,送粉量为 82.7 g/min。当基材为 304 不锈钢时,激光感应复合快速熔覆的效率最低,激光扫描速度只有基材为 A3 钢时的 1/2,送粉量为 62.3 g/min。可见,基材类型对激光感应复合快速熔覆的效率有重要的影响。这是因为在相同的感应加热工艺参数下,不同的基材将吸收不同的感应加热能量,导致在相同的时间内基材被加热到不同的温度。为了便于比较,理想化的感应加热效率可以计算为^[10]

$$\eta = \frac{1}{1 + \sqrt{\rho_c / (\rho_s \cdot \mu_s)}}, \quad (5)$$

式中 ρ_c 为感应加热线圈的电阻率; ρ_s 为基材的电阻率; μ_s 为基材的磁导率。(5)式表明,具有高电阻率和高磁导率的负载基材,感应加热效率很高,如果负载的电阻率和磁导率均很低,则感应加热效率很低。此外,基材在被感应加热的过程中,电阻率随温度的升高基本上呈线性增加,而磁导率随温度的升高逐渐减小,在温度升高到 A_{c1} 之前,感应加热效率随着

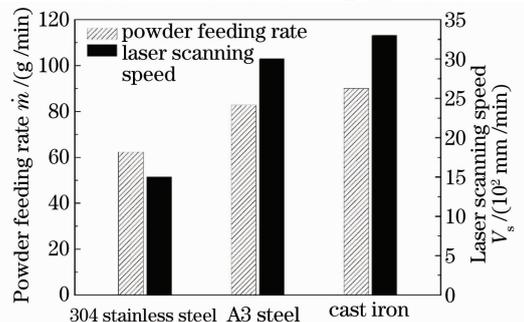


图 2 基材类型对激光感应复合快速熔覆效率的影响
Fig. 2 Effect of substrate types on the efficiency of LIHRC

感应加热温度的增加而增加。但是,当温度升高到 A_{c1} 与 A_{c3} 之间时,钢的磁导率将急剧降低,导致感应加热效率降低^[11]。表 1 为不同基材的热物理性能参数以及采用(5)式计算的感应加热效率(293 K)。从表 1 可以看出,铸铁具有较高的电阻率与磁导率,因此可以在短时间内被感应加热到很高的温度(1203 K)。此外,上述材料中,铸铁的熔点最低,熔化铸铁基材所需要的激光能量最小,其吸收激光能

量后最容易在表面形成激光熔池,导致在单位时间内可以熔化更多的复合粉末,所以熔覆效率最高。但是,对于 304 不锈钢,由于其磁导率很小,感应加热效率很低,即 304 不锈钢仅能被感应加热到最低的温度(673 K)。此外,304 不锈钢的熔点也相对较高,因此需要消耗更多的激光能量才能熔化基材和合金粉末,导致熔覆效率最低。

表 1 不同基材类型的热物理性能参数

Table 1 Thermophysical properties of different substrate types

Substrate types	Melting point /K	Resistivity / $10^{-8} (\Omega \cdot m)$	Permeability / $10^{-6} (H/m)$	Efficiency of induction heating /% (293 K)	Preheated temperature /K
304 stainless steel	1723	70	1.339	0.74	673
A3 steel	1673	17.86	251.4	4.89	1093
QT50-5 cast iron	1473	67	377.1	10.87	1203

3.2 影响复合层稀释率的因素

3.2.1 激光比能与粉末面密度

激光比能与粉末面密度对 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合层稀释率的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着激光比能的增加,复合层的稀释率也相应地增加;随着粉末面密度的增加,复合层的稀释率减小。根据(4)式可知,当粉末面密度保持一定

时,输入的激光功率 P 越大,基材吸收的激光能量 P_s 越大,基材的熔化深度越深,复合层的稀释率也就越大[图 3(a)];当激光比能保持不变时,粉末面密度增加,用于熔化复合粉末的激光功率 P_p 增加,则基材吸收的激光功率 P_s 减小,相应地通过热传导而使基材的熔化深度降低,因此复合层的稀释率随着粉末面密度的增加而减小[图 3(b)]。

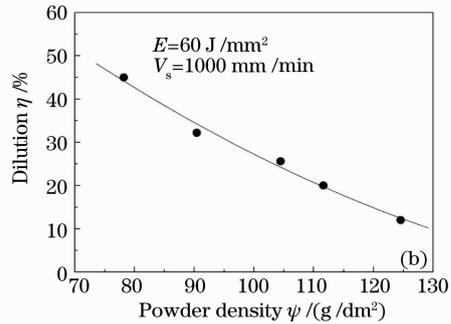
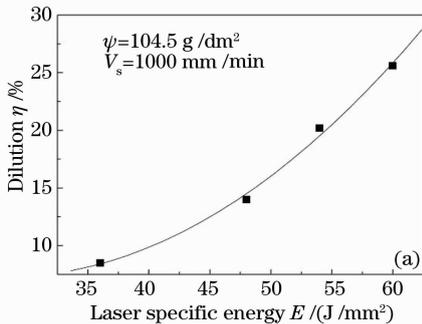


图 3 激光比能(a)与粉末面密度(b)对复合层稀释率的影响

Fig. 3 Effects of laser specific energy (a) and powder density (b) on the dilution of composite coating

3.2.2 感应预热温度

基材被感应预热的温度对 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合层稀释率的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着感应预热温度的增加,复合层的稀释率逐渐增加。这是因为随着基材感应预热温度的增加,基材对激光能量的吸收率逐渐增加,而用于熔化基材表面所消耗的激光能量则减小。当激光比能与粉末面密度保持不变时,最终使基材的熔深也随着感应预热温度的增加而增加,根据(3)式可知,熔覆层的稀释率随着基材感应预热温度的增加而增加。

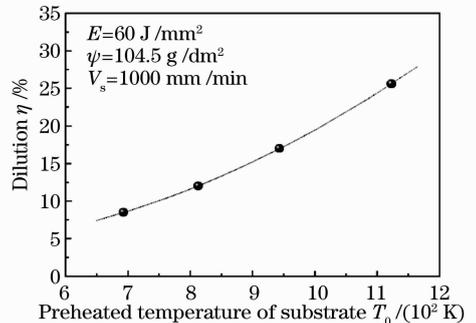


图 4 基材的感应预热温度对复合层稀释率的影响

Fig. 4 Effect of the preheated temperature of substrate on the dilution of composite coating

3.3 影响粉末利用率的因素

激光感应复合快速熔覆 Ni 基 WC 复合粉末利用率的测试结果如表 2 和表 3 所示。可以看出,在相同的感应预热温度下,随着激光扫描速度的增加,粉末利用率逐渐降低。这是因为激光扫描速度的增加,导致激光比能降低,单位时间内熔化的粉末量也降低;在相同的激光扫描速度下,随着感应预热温度的降低,粉末利用率降低。其原因主要包括以下两个方面:

1) 随着感应预热温度的降低,熔化基材表面形成

表 2 激光感应复合快速熔覆 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合粉末的利用率

Table 2 Efficiency of Ni60A+20% (mass fraction) WC composite powder during LIHRC

Preheated temperature /K	Dimension / (mm×mm×mm)	W_i/g	$V_s/(mm/min)$	$\dot{m}/(g/min)$	$\Delta W_p/g$	$\Delta W_i/g$	$\zeta/\%$
1203	45×92×8	247.1	300	22.6	5.98	6.40	93.4
	45×92×8	253.1	600	22.6	2.93	3.20	91.6
	43×93×8	228.3	1000	52.2	3.94	4.44	88.7
	44×98×8	247.1	3000	82.7	2.10	2.48	84.6
923	45×96×8	248.6	1000	52.2	3.78	4.44	85.2

表 3 激光感应复合快速熔覆 Ni60A+35%(质量分数)WC 复合粉末的利用率

Table 3 Efficiency of Ni60A+35% (mass fraction) WC composite powder during LIHRC

Preheated temperature /K	Dimension / (mm×mm×mm)	W_i/g	$V_s/(mm/min)$	$\dot{m}/(g/min)$	$\Delta W_p/g$	$\Delta W_i/g$	$\zeta/\%$
1203	43×93×8	232.2	300	25.2	6.23	7.14	87.3
	45×92×8	256	600	25.2	3.04	3.57	85.2
	43×93×8	238.4	1000	57.2	4.06	4.86	83.5

从表 3 还可以看出, Ni60A+35%(质量分数)WC 复合粉末利用率的变化规律与 Ni60A+20%(质量分数)WC 复合粉末的相似,但是相对于后者而言有所降低。究其原因,可能是在激光感应复合快速熔覆过程中,随着 WC 颗粒含量的变化,熔覆材料的物理性质也会发生相应的变化,而且 WC 颗粒的含量越高,粘结金属完全包覆住 WC 颗粒所需要的时间越长,则 WC 颗粒更容易依惯性而冲出激光作用区,导致粉末的利用率降低。

激光感应复合快速熔覆 Fe 基合金+20%(质量分数)WC 复合粉末利用率的测试结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,其粉末利用率的变化规律与 Ni 基 WC 复合粉末(表 2 和表 3)的相同。但是,相对于 Ni 基 WC 复合粉末而言,Fe 基合金+20%(质

表 4 激光感应复合快速熔覆 Fe 基合金+20%(质量分数)WC 复合粉末的利用率

Table 4 Efficiency of Fe-based alloy+20% (mass fraction) WC composite powder during LIHRC

Preheated temperature /K	Dimension / (mm×mm×mm)	W_i/g	$V_s/(mm/min)$	$\dot{m}/(g/min)$	$\Delta W_p/g$	$\Delta W_i/g$	$\zeta/\%$
1203	52×95×8	293.2	300	20.3	4.93	5.75	85.7
	50×90×8	260.7	600	20.3	2.4	2.86	83.9
	52×95×8	298.1	1000	50.8	3.5	4.32	81

熔池需要消耗的激光能量增加,而用于熔化复合粉末消耗的激光能量则减小,导致不能完全熔化的复合粉末增加(特别是在激光光斑的边缘部位),从而使粉末的利用率降低。

2) 随着感应预热温度的降低,基材对激光能量的吸收率也降低,在其表面形成的激光熔池尺寸也相应地减小,导致粉末在基材表面形成的粉末尺寸大于激光熔池尺寸,即粉末并不能完全进入激光熔池,导致一部分粉末与基材表面相撞而反弹损失掉,从而使粉末的利用率降低。

量分数)WC 复合粉末的利用率最小。主要原因可能来自以下两个方面:

1) Fe 基合金粉末的熔点高于 Ni60A,熔化前者消耗的激光能量大于熔化后者消耗的激光能量。

2) 在激光感应复合快速熔覆过程中,高温液态的 Fe 基合金与 WC 颗粒发生剧烈的交互作用,使 WC 颗粒基本上完全溶解^[12],这也会增加激光能量的消耗。

综上所述,激光感应复合快速熔覆的粉末利用率不仅与激光工艺参数、感应预热温度和 WC 颗粒的含量以及粘结金属的种类有关,还与复合粉末自身的特性(如熔点)、粘结金属与陶瓷相之间的交互作用等因素有关。

4 结 论

1) 在激光感应复合快速熔覆过程中, 基材的感应预热温度越高, 激光感应复合快速熔覆的效率也越高。另外, 基材类型对激光感应复合快速熔覆的效率也有较大影响, 在铸铁表面的熔覆效率最高, 在 A3 钢表面的效率次之, 在 304 不锈钢表面的效率最低。

2) 激光比能、粉末面密度与感应预热温度可以综合地反映激光感应复合工艺参数对复合层稀释率的影响规律。当粉末面密度不变时, 随着激光比能与基材感应预热温度的增加, 复合层的稀释率增加; 当激光比能与基材感应预热温度不变时, 随着粉末面密度的增加, 复合层的稀释率降低。

3) 在激光感应复合快速熔覆过程中, 在相同的感应预热温度下, 随着激光扫描速度的增加, 粉末利用率逐渐降低; 在相同的激光扫描速度下, 随着感应预热温度的降低, 粉末利用率降低; 随着 WC 颗粒含量的增加, 粉末利用率降低; 粘结金属为 Ni60A 时的粉末利用率高于粘结金属为 Fe 基合金时的粉末利用率。

参 考 文 献

- 1 J. D. Majumdar, A. Kumar, L. Li. Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316 L stainless steel [J]. *Tribol. Int.*, 2009, **42**(5): 750~753
- 2 Chen Yanbin, Liu Dejian, Li Liqun *et al.*. Formation mechanism of WC_p/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1718~1722
- 陈彦宾, 刘德健, 李俐群等. 激光熔注 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层形成机制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1718~1722

- 3 Qian Zhaoyong, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. High wear-resistant particulate reinforced composite coatings for corrugated rollers by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1271~1276
- 钱兆勇, 钟敏霖, 刘文今等. 瓦楞辊高耐磨激光熔覆颗粒增强铁基复合涂层[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1271~1276
- 4 Shengfeng Zhou, Yongjun Huang, Xiaoyan Zeng *et al.*. Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Mater. Sci. Eng. A-Struct.*, 2008, **480**(1-2): 564~572
- 5 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 杨楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 6 Dong Zhe, Yang Xichen. Research of scattering intensity with spherical particles in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1296~1300
- 董哲, 杨洗陈. 激光熔覆中球形粒子对激光散射强度的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1296~1300
- 7 J. P. Coelho, M. A. Abreu, M. C. Pires. High-speed laser welding of plastic films [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2000, **34**(4-6): 385~395
- 8 G. Abbas, D. R. F. West. Laser surface cladding of stellite and stellite-SiC composite deposits for enhanced hardness and wear [J]. *Wear*, 1991, **143**(2): 353~363
- 9 H. Gedda, J. Powell, G. Wahlstrom *et al.*. Energy redistribution during CO₂ laser cladding [J]. *J. Laser Appl.*, 2002, **14**(2): 78~82
- 10 John Davis, Peter Simpson. *Induction Heating Handbook* [M]. London: McGraw-Hill, 1979. 4~6
- 11 Zeng Xiaoyan, Wu Yiping. *Surface Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2001. 51~52
- 曾晓雁, 吴懿平. *表面工程学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 51~52
- 12 Zhou Shengfeng, Zeng Xiaoyan. Microstructure characteristics of Fe-based WC composite coatings prepared by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1143~1146
- 周圣丰, 曾晓雁. 激光感应复合快速熔覆 Fe 基 WC 涂层的显微组织特征[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1143~1146