

# 激光与光电子学进展

## U75V 钢轨多层多道激光熔覆工艺研究

童佟<sup>\*\*</sup>, 朱加雷<sup>\*</sup>, 梁栩

北京石油化工学院京冶新能源技术与装备创新研发中心, 北京 102617

**摘要** 针对钢轨长期使用后出现的磨损问题,通常采用激光熔覆技术对损伤表面进行修复。本文以 U75V 钢轨为基体材料,对多层多道激光熔覆成形过程中的工艺参数进行优化研究。结果表明:U75V 钢轨激光熔覆修复成形的最佳工艺参数为激光功率 900 W、熔覆速度 600 mm/min、送粉速度 7.58 g/min、搭接率 58.8%、Z 轴抬升量 0.6 mm、预热温度 200 °C。多层多道熔覆区多为等轴晶,热影响区中存在针状马氏体组织。熔覆区的硬度为 480 HV,与母材最大硬度 430 HV 相差不大;热影响区受马氏体组织的影响,硬度为母材的 2 倍左右;熔覆层的耐磨性略低于母材。

**关键词** 激光熔覆; U75V 钢轨; 工艺优化; 多层多道; 马氏体

中图分类号 TG156.1; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714005

## Research on Multilayer and Multipass Laser Cladding Process for U75V Rails

Tong Tong<sup>\*\*</sup>, Zhu Jialei<sup>\*</sup>, Liang Xu

Jingye New Energy Technology and Equipment Innovation R & D Center,  
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

**Abstract** Because rails wear down after long-term use, laser cladding technology is used to repair damaged surfaces. Using U75V rail as base material, we optimize the process parameters of multilayer and multipass laser cladding. The results show that optimal process parameters is laser power of 900 W, cladding speed of 600 mm/min, feeding speed of 7.58 g/min, overlapping ratio of 58.8%, Z-axis lifting amount of 0.6 mm and preheating temperature of 200 °C. There are many equiaxed grains in multilayer and multipass cladding areas, but acicular martensite is present in heat-affected areas. Hardness of the cladding zone is not much different from that of a base material; 480 HV in the cladding zone and a maximum of 430 HV for the base material. Under the effects of martensite, the hardness of the heat-affected zone is about twice that of the base material. Wear resistance of the cladding layer is slightly lower than that of a base metal.

**Key words** laser cladding; U75V rail; process optimization; multilayer and multipass; martensite

**OCIS codes** 140.3390; 160.3380; 350.3390; 350.3850

### 1 引言

随着铁路运营规模的不断扩大和运营时间的增加,钢轨表面容易出现擦伤、剥离等缺陷<sup>[1-3]</sup>,如果

任由这些问题恶化而不采取相应措施,将会严重威胁到铁路质量和乘客的安全<sup>[4]</sup>。因此,在铁路维修和更换的费用中,运营费用占很大比例。据铁路总公司 2016 年的初步统计,全国铁路钢轨每年的损伤

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-08-23; 录用日期: 2020-09-09

基金项目: 北京石油化工学院京冶新能源技术与装备创新研发中心开放基金(H2019-003/002)

\*E-mail: zhujiawei@bipt.edu.cn; \*\*E-mail: 416728380@qq.com

费用超过了 100 亿人民币<sup>[5]</sup>。

国内外常用的钢轨在线修复技术各有不同程度的缺陷和限制。激光熔覆技术具有速度快、精度高、热影响区小的优点,且采用该技术获得的熔覆层的组织和化学成分可控,后期的切削加工较为容易<sup>[6]</sup>,更能满足钢轨在线修复的硬性要求。Clare 等<sup>[7]</sup>在钢轨上激光熔覆了 4 种优质耐磨合金材料,通过对比试验发现,其中的 Hadfield 合金涂层能满足轨道要求的硬度,涂层无气孔、裂纹等问题,而且通过优化的工艺能控制涂层稀释率,保证涂层的完整性。Mortazavian 等<sup>[8]</sup>以 304 不锈钢为沉积材料建立了钢轨修复的激光沉积三维热动力学模型,该模型的计算结果与实验结果基本吻合;此外他们还发现,热影响区和熔覆区组织为铁素体和奥氏体相,导致钢轨头部强度低于最小屈服强度,涂层的抗剪切能力增强,负荷下降 65%。齐海波等<sup>[9]</sup>在受损钢轨三维模型的基础上采用激光熔覆技术对钢轨进行自动修复,之后进行回火处理,得到了各项性能均满足修复要求的铁基合金层。郑哲文<sup>[10]</sup>对钢轨表面进行了激光填丝熔覆修复,获得了最优的多层多道修复方式,他认为各道与各层之间的回火作用能有效改善熔覆层的组织并降低熔覆层的硬度。

激光熔覆铁基合金粉末时的速冷特性相当于表面淬火工艺,易使熔覆层中生成马氏体组织;对基板进行预热处理能够降低冷却速度,从而能避免马氏体相变的发生。赵龙志等<sup>[11]</sup>在不同预热温度的钢轨表面激光熔覆了贝氏体涂层,对涂层进行研究后发现,在 280~380 °C 的预热温度下,随着预热温度升高,涂层中的马氏体/残余奥氏体组织先增多后减

少。Ding 等<sup>[12]</sup>对 U75V 钢轨表面预热后以其为基体制备了铁基合金熔覆层,结果发现,预热处理为熔覆层的后等温处理提供了条件,熔覆层的硬度随着预热温度的降低而略有增加。在多层多道堆积熔覆层时,成形质量不仅与基础工艺参数有关,Z 轴抬升量对成形质量的影响也很大。Z 轴抬升量能影响粉末与光斑聚焦点相对于基板的距离,且每层的抬升量与熔覆层高度的匹配度对于熔覆层的立体成形质量至关重要<sup>[13]</sup>。辛博等<sup>[14]</sup>分析了 Z 轴抬升量对激光熔覆成形件的影响规律,结果发现,熔覆层中存在的较多柱状晶的生长方向和尺寸随着抬升量的改变而改变,进而影响成形件拉伸性能的各向异性。

激光熔覆技术正在逐步被应用于国内外的钢轨修复领域,但目前人们采用该技术对 U75V 钢轨进行修复的相关研究还相对较少。鉴于此,本文在 U75V 钢轨表面激光熔覆了 15-5ph 铁基合金涂层,研究了多层多道激光熔覆的优化工艺参数,并对单层多道预热工艺与多层堆积中 Z 轴抬升量之间的关系进行探究,探索在钢轨上小面积激光熔覆修复的可行性与可靠性。

## 2 熔覆工艺研究

### 2.1 试验材料及研究方法

选取攀钢集团有限公司生产的 U75V-60/kg 钢轨作试验样件,其成分如表 1 所示。将钢轨段沿着横截面切成 15 mm 厚的片状。熔覆材料为 15-5ph 铁基合金粉末,其成分如表 2 所示。使用 IPG 公司的 YLS-4000 激光器和 Precitec 公司的 YC52 熔覆头进行工艺试验。

表 1 U75V 钢轨的化学成分

Table 1 Chemical composition of U75V rail

Element	C	Si	Mn	P	S	V
Mass fraction / %	0.71-0.80	0.50-0.80	0.70-1.05	<0.03	<0.03	0.04-0.12

表 2 15-5ph 铁基合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of 15-5ph Fe-based alloy powder

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	B	Cu	Fe
Mass fraction / %	≤0.07	≤1.0	≤1.0	14-15	3.5-5.5	0.7-0.9	2.5-4.5	Bal.



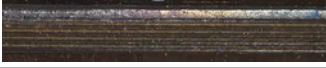
根据正交试验、单道单因素变量试验结果,获得了优化的单层熔覆工艺参数:激光功率 900 W,熔覆速度 600 mm/min,送粉速度 7.58 g/min,搭接率 58.8%,熔覆层高度 0.7 mm。

### 2.2 预热温度的影响

在激光熔覆过程中,升温速度和冷却速度均较快,容易产生使钢轨脆断的马氏体组织,而利用后期

高温回火来消除马氏体组织的工艺温度要求较高,保温时间较长,在钢轨的在线修复中难以应用。为满足使用要求的修复质量,本文尝试在熔覆过程中使整个工件保持较高的温度来减小加工温度的变化,以减少马氏体的产生。本文采用可调控加热炉对 U75V 钢轨基板进行不同温度(100, 200, 300 °C)的预热处理。熔覆工艺参数与样件外观形貌如表 3 所示。

表 3 不同预热温度下样件的外观形貌  
Table 3 Appearances of samples prepared at different preheating temperatures

Specimen label	Factor				Appearance
	Power /W	Cladding speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	Feeding speed / (g·min <sup>-1</sup> )	Preheating temperature /°C	
A1	900	600	7.58	100	
A2	900	600	7.58	200	
A3	900	600	7.58	300	

由表 3 可知,当预热温度为 200 °C 时,熔覆层成形良好,表面连续且无裂纹和明显的凹坑、凸起等缺陷。若试件的预热温度过高,母材和熔覆层表面容易被高温氧化,影响熔覆层的质量。从上述试验可知,在 900 W 激光功率和 200 °C 预热温度下的成形质量最佳。

图 1(a) 为无预热单道工艺下试件的宏观截面,可见,由于激光光斑直径小、功率密度大,激光能量输入多,工件表面温度急剧升高,生成了马氏体,熔

覆层内部出现了裂纹和气孔等缺陷。图 1(b) 为 200 °C 预热后的单道熔覆试件的宏观截面,可见,此时的熔覆层中没有出现无预热时的裂纹、气孔缺陷,熔覆层的高度有所降低,表面更加平整光滑,热影响区明显。进行硬度测试后发现,200 °C 预热后单道熔覆试件的硬度由无预热时的 900 HV 降低至 830 HV,说明预热对裂纹缺陷有明显的改善作用,且能减少激光熔覆层中马氏体的产生。

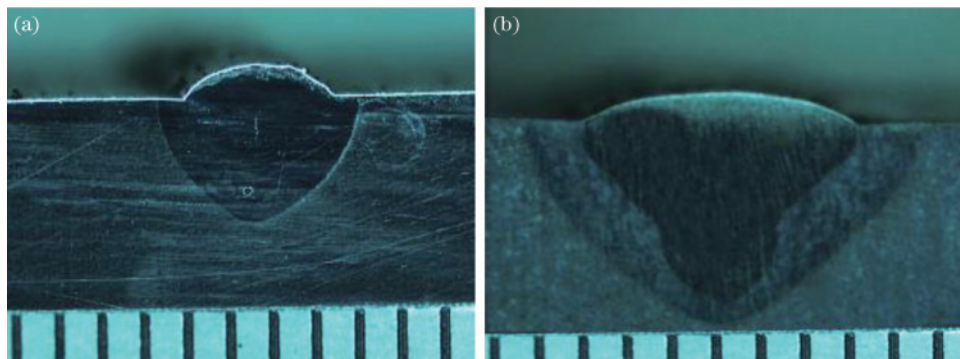


图 1 试件的宏观截面图。(a) 无预热;(b) 200 °C 预热

Fig. 1 Macro cross-section of sample. (a) Without preheating; (b) preheating at 200 °C

### 2.3 Z 轴抬升量的影响

单道熔覆最佳的熔覆层高度为 0.7 mm。在激光熔覆过程中,由于激光的穿透性较强且能量多层堆积,热量散失的速度赶不上热堆积的速度,在竖直向上堆积时各层间易造成挤压、坍塌等,因此 Z 轴提升量与单层堆积高度的匹配是提高激光熔覆立体成形质量的关键因素。为了改善成形质量,并探究出 Z 轴抬升量与单层堆积高度之间的关系,本次试验将立体成形过程中每一层都搭接 6 道熔道作为 Z 轴抬升的基础。熔覆工艺参数及样件外观形貌见表 4。

从表 4 中可以看出,Z 轴抬升量对熔覆层多层成形质量的影响很大。试件 B1 的 Z 轴抬升量为 0.4 mm,设定抬升高度远小于熔覆层单道的实际高度,随着多层搭接的进行,粉末聚焦的位置与基板

的距离不断改变,导致成形失败。当 Z 轴抬升量为 0.8 mm 时,由于实际熔覆层高度达不到设定的 Z 轴抬升量,熔覆层与前层之间的结合性越来越差,最后导致熔池流淌,整个堆积层呈凸状,成形质量较差。试件 B2 的 Z 轴抬升量虽然也比熔覆层单道的实际高度略低,但由于表面张力梯度引起的异种材料的强制对流以及液体分子间的润湿性,熔覆表层为凸面,实际单层测量的是最高点的高度,因此最佳 Z 轴抬升量应比单道实际高度略小。在单层单道最佳工艺参数下选用 Z 轴抬升量为 0.6 mm 进行多层搭接,此时多层成形效果良好,表面平整光滑。




### 2.4 组织分析

激光熔覆成形工艺过程具有局部快速升温、快速冷却的特性<sup>[15-17]</sup>,易导致熔覆层中生成脆硬的马氏体



表 4 不同 Z 轴抬升量下试件的外观形貌

Table 4 Appearances of samples prepared at different Z-axis lifting values

Specimen label	Power /W	Cladding speed / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Feeding speed / $(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$	Overlapping ratio /%	Z-axis lifting amount /mm	Appearance
B1	900	600	7.58	58.8	0.4	
B2	900	600	7.58	58.8	0.6	
B3	900	600	7.58	58.8	0.8	

相。本文对优化工艺参数下获得的成形良好的熔覆试件进行了金相组织分析。在激光熔覆多层堆积时,由于每层都有预热和回火效果,因此大部分熔覆区都变成了等轴晶,如图 2(a)所示。对于激光功率为 900 W

的激光熔覆工艺来说,其熔深比熔覆层高,使得上一层熔覆的激光会对下一层的熔覆道产生一定的激光相变作用,晶粒得到一定的细化,但仍有一定量的柱状晶。热影响区仍存在针状马氏体,如图 2(b)所示。

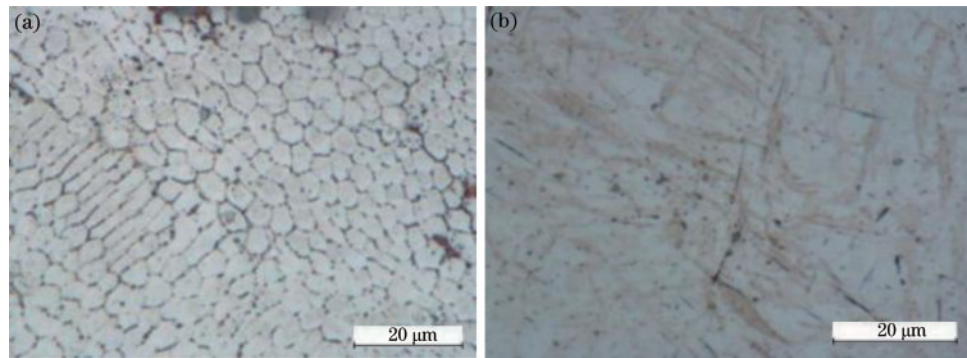


图 2 多层多道修复试样的显微组织。(a)熔覆区;(b)热影响区

Fig. 2 Microstructures of multilayer and multipass repair sample. (a) Cladding zone; (b) heat-affected zone

### 2.5 硬度分析

图 3 为多层多道修复层的硬度分布。硬度的测量路径如下:沿着母材至熔覆区中心线方向,每隔 0.25 mm 取一个点。母材的硬度在 380~430 HV 之间,熔覆区的平均硬度为 480 HV,热影响区(HAZ)

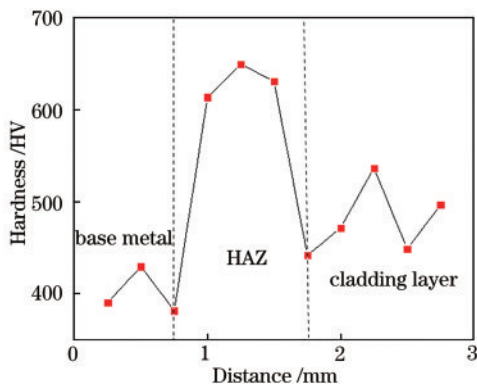


图 3 多层多道修复试样的硬度分布

Fig. 3 Hardness distribution of multilayer and multipass repair sample

的平均硬度为 630 HV。因多层搭接过程中的预热和回火作用,熔覆层的硬度显著低于热影响区,基本满足修复要求。在多层搭接时,熔覆首层对热影响区的影响最大。熔覆材料中高含量的 Cr、Ni、Mn 元素会降低马氏体的转化温度,加剧孪晶马氏体的形成,因此,热影响区中针状马氏体的存在使其硬度为母材的 2 倍左右,需要在后期进行回火处理。

### 2.6 耐磨性能分析

摩擦因数可以间接地反映物体耐磨性的强弱<sup>[18]</sup>。由摩擦学公式可知,当正压力不变时,摩擦因数与摩擦力成正比,摩擦因数越小,材料的耐磨性越好。

图 4 为母材、熔覆层表面摩擦因数与时间的对应关系,可以看出,母材的平均摩擦因数在 0.2 上下波动,熔覆层的平均摩擦因数为 0.25,熔覆层的平均摩擦因数比母材高 25%。因熔覆材料中的 C 含量较低,Cr、Ni 等元素不能与其形成较多的强碳化

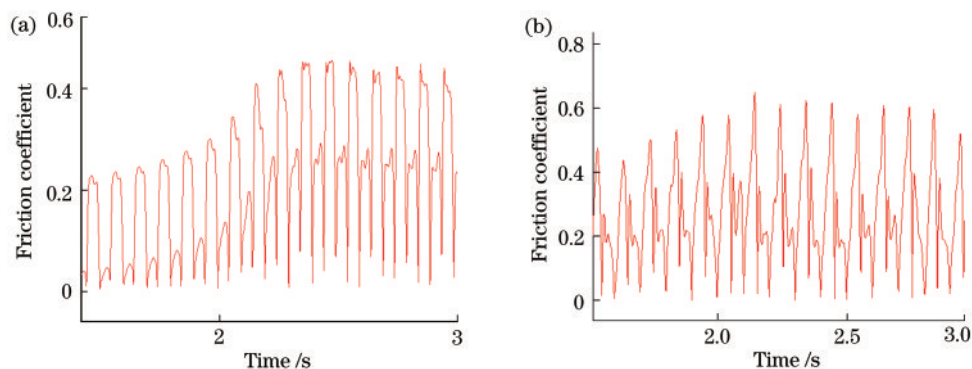


图4 母材、熔覆层摩擦因数与时间的关系。(a)母材;(b)熔覆层

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and time for base metal and cladding metal. (a)Base metal; (b) cladding metal

物,而Mn为弱碳化物形成元素,只对熔覆层的耐磨性起到改善作用,因此熔覆层的耐磨性能比母材稍弱。

### 3 结 论

通过对钢轨的多层多道激光熔覆工艺参数进行研究,得到了钢轨的最佳修复工艺参数:激光功率 $P=900\text{ W}$ ,熔覆速度 $v=600\text{ mm/min}$ ,送粉速度 $v_f=7.58\text{ g/min}$ ,搭接率为58.8%,Z轴抬升量为0.6 mm,预热温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。在此工艺参数下可以获得立体成形质量良好,无裂纹、气孔等缺陷的熔覆层。

优化的预热工艺能够减少熔覆过程中马氏体的产生,消除裂纹、气孔等缺陷,获得成形质量良好的多道熔覆层;优化的Z轴抬升量使得整个熔覆过程连续无间断,熔覆各层向上堆积时不会出现熔池流淌或成形失败等现象,获得了立体成形良好的堆积层。

对修复后的熔覆层进行金相检测,发现热影响区存在针状马氏体,熔覆区主要由等轴晶和柱状晶组成。在多层多道激光熔覆过程中,层与层之间的回火作用使熔覆区的大部分组织变成等轴晶,晶粒得到了细化。

熔覆层的硬度在480 HV左右,略高于母材,热影响区的硬度因针状马氏体组织存在而偏大;熔覆层的耐磨性稍弱于母材。

### 参 考 文 献

[1] Tian G Y, Gao B, Gao Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.  
田贵云,高斌,高运来,等.铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J].仪器仪表学报,2016,37(8): 1763-1780.

[2] Wang S L. Detection technology on rail surface defects based on machine vision [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.  
王时丽.基于机器视觉的钢轨表面缺陷检测技术研究[D].绵阳:西南科技大学,2016.

[3] Li S Z, Liu D Y, Liu P T, et al. Corrugation formation and microstructure evolution of rail steel U75V [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(5): 66-71.  
李双志,刘德义,刘鹏涛,等.U75V钢轨钢波磨的形成过程及其组织演变[J].大连交通大学学报,2019,40(5): 66-71.

[4] Lewis S R, Lewis R, Fletcher D I. Assessment of laser cladding as an option for repairing/enhancing rails[J]. Wear, 2015, 330/331: 581-591.

[5] Ding Z K. Study of inspection technology for rail surface defects based on machine vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.  
丁政开.基于机器视觉的钢轨表面缺陷检测技术研究[D].北京:北京交通大学,2017.

[6] Liu J, Meng F J, Yin F L, et al. Progress in research on bonding interface between thermal spraying coating and substrate[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(1): 101-110.  
柳建,孟凡军,殷凤良,等.热喷涂涂层与基体结合界面研究进展[J].材料工程,2017,45(1): 101-110.

[7] Clare A, Oyelola O, Folkes J, et al. Laser cladding for railway repair and preventative maintenance [J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24 (3) : 032004.

[8] Mortazavian E, Wang Z, Teng H. Thermal-kinetic-mechanical modeling of laser powder deposition process for rail repair [C]//ASME 2019 International

- Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S.l.:s.n.] 2019: 1-20.
- [9] Qi H B, Xu Q G, Zhao Y Q, et al. Study on realization method of automatic repair wear rail by laser cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 160-165.  
齐海波, 徐全盖, 赵衍庆, 等. 无缝线路磨损钢轨激光熔覆自动修复方式的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 160-165.
- [10] Zheng Z W. Process and device of wire filling fiber laser overlaying welding for U71Mn rail[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015: 4-69.  
郑哲文. 光纤激光填丝修复 U71Mn 钢轨工艺及装置研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015: 4-69.
- [11] Zhao L Z, Yang H C, Tang Y C, et al. Effect of preheating temperature on laser clad bainitic coating on surface of steel rail[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(16): 102-105.  
赵龙志, 杨海超, 唐延川, 等. 预热温度对钢轨表面激光熔覆贝氏体涂层的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16): 102-105.
- [12] Ding H, Dai J W, Dai T, et al. Effect of preheating/post-isothermal treatment temperature on microstructures and properties of cladding on U75V rail prepared by plasma cladding method[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126122.
- [13] Wang X L, Deng D W, Hu H, et al. Effect of single  $z$ -increment on laser cladding forming [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 702-705.  
王鑫林, 邓德伟, 胡恒, 等.  $z$ 轴单层行程对激光熔覆成形的影响[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 702-705.
- [14] Xin B, Zhou X X, Gong Y D, et al. Impact of  $Z$ -increment on microstructure and mechanical properties of laser cladding forming parts [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102014.  
辛博, 周显新, 巩亚东, 等.  $Z$ 轴提升量对激光熔覆成形件组织与力学性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102014.
- [15] He L, Tan Y F, Wang X L, et al. Tribological properties of laser cladding TiB<sub>2</sub> particles reinforced Ni-base alloy composite coatings on aluminum alloy [J]. Rare Metals, 2015, 34(11): 789-796.
- [16] Zhang L, Chen X M, Liu W, et al. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-cladded Ni-based-alloy coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111401.  
张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111401.
- [17] Jiang G Y, Li M, Xu P, et al. Asymmetric macro-morphologies formation mechanism and microscopic characteristics of Co-based alloys by laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 081401.  
江国业, 李敏, 徐平, 等. 激光熔覆钴基合金非对称宏观形貌形成机理及微观特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 081401.
- [18] Han Y L, Jia F G, Tang Y R, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 173-179.  
韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 173-179.