

# Ni 基指数分布梯度熔覆层低应力多碰趋表效应

孔茗<sup>1</sup>, 沈玲琳<sup>2</sup>, 石世宏<sup>2</sup>

(1.苏州工业职业技术学院, 江苏 苏州 215104; 2.苏州大学 激光制造技术研究所, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** **目的** 研究在低应力多碰条件下, 在零件表面激光熔覆制备指数分布梯度涂层的效应。**方法** 采用网格坐标划分法, 在低应力条件下通过对 Ni 基指数分布梯度熔覆层的 0Cr18Ni9 试件进行多碰试验, 获取变形数据, 计算获得变形率, 绘制规律曲线。借助工具显微镜, 获得碰撞前后组织金相图。**结果** 采用的碰撞应力仅有 115 MPa, 远低于涂层材料与基体的静压缩屈服强度, 但指数分布的梯度涂层发生了可测的塑性变形, 第一网格层变形率最为明显, 达到了 18.97%, 第二网格层变形率为 15.03%, 靠近基体的最后一个网格层的变形率为 0.29%, 可以表明指数分布梯度涂层在低应力多碰后的形变具有“趋表效应”。基体的形变情况与梯度涂层的形变基本一致, 从距表面 6 mm 处开始, 涂层与基体结合处由于有瞬间激光高温熔覆, 出现了应变的突变现象, 宏观塑性变形增大, 变形率突增到 3.92%, 但基体的形变总的来说也符合“趋表效应”。同时借助金相图看到的晶体滑移现象也证实了这一点。**结论** 在低应力多碰作用后, 试件表层的累积变形量最大, 随着涂层深度的增加梯度减小, 表明具有“趋表效应”, 同时抗多冲形变的能力显著增强。

**关键词:** 指数梯度涂层; 多次碰撞; 网格坐标法; 变形率; 趋表; 组织金相图

**中图分类号:** TG174.44; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0244-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.039

## Skin Effect of Low Stress Repeated Impact of Ni-based Exponential Gradient Cladding

KONG Ming<sup>1</sup>, SHEN Ling-lin<sup>2</sup>, SHI Shi-hong<sup>2</sup>

(1.Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;

2.Institute of Laser Manufacturing Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study effects of exponential gradient coating prepared on surface of parts by laser cladding under low stress repeated impact. Multipacting experiment was performed to 0Cr18Ni9 specimen on Ni-based exponential gradient cladding layer under low stress in grid coordinate division method, so as to acquire deformation data, calculate deformation rate and draw law curve. Phase diagram of the microstructure before and after collision was obtained by means of microscope. The impact stress applied was only 115 MPa, far below static compressive yield strength of the coating material and substrate, but the exponential gradient coating was subject to measurable plastic deformation. Deformation rate of the first grid layer was up to 18.97%, the most significant of all, and that of the second grid layer was up to 15.03%, that of the last grid layer close to the substrate was 0.29%, indicating that deformation of the exponential gradient coating had the “skin effect” after low stress and multipacting. The deformation of the substrate was basically consistent with that of the gradient coating. As juncture between coating and substrate was subject to instant high temperature laser cladding, the strain changed suddenly at the distance of at

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-03-03

Received: 2017-01-18; Revised: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (10972150); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015B186)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (10972150), Top-notch Academic Programs Project of Jiangsu Higher Education Institutions (PPZY2015B186)

作者简介: 孔茗 (1977—) 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为先进制造技术。

**Biography:** KONG Ming (1977—), Male, Master, Associate professor, Research focus: advanced manufacturing technology.

通讯作者: 石世宏 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光先进制造技术、材料表面工程。

**Corresponding author:** SHI Shi-hong (1956—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: laser advanced manufacturing technology, material surface engineering.

least 6 mm from the surface macroscopic plastic deformation increased, deformation rate increased to 3.92% sharply, but deformation of the substrate was generally consistent with the “skin effect”. Meanwhile, translation gliding observed with the phase diagram confirmed the fact as well. Under the low stress and repeated impact, the accumulated deformation of the specimen surface is the maximum, and the gradient decreases with the increase of the coating depth, which has confirmed the “skin effect”. At the same time, the resistance to repeated impact deformation is remarkably enhanced.

**KEY WORDS:** exponential gradient cladding; repeated impact; grid coordinate method; deformation rate; skin effect; micro-structure phase diagram

实际工作过程中,大多数零件的失效并不是由于某次突然作用的大于其屈服极限的力,而是由于长期受到反复作用的较小应力<sup>[1-2]</sup>。实验研究表明,在零件的表面熔覆涂层可以起到一定的抗冲击作用,对提高零部件的使用寿命有很大的帮助,但即使是在低应力条件下,多碰反复作用后,涂层材料依然会产生一定的塑性变形<sup>[3-5]</sup>。

以往进行的大量多碰试验,研究的重点主要集中在熔覆工艺开发、涂层材料选用等方面。近几年,研究团队对材料在低应力下,多次碰撞后引起形变的机理以及遵循的基本变形规律展开了实验研究。大量实验数据显示:低应力多碰后表层材料所表现出来的应变率最为明显,随着深度的增加,应变率迅速衰减,累积应变表现得越来越不明显,而且衰减的分布基本呈现指数变化的规律<sup>[6-7]</sup>。

本文提出制备指数分布的梯度激光熔覆层,实现了材料从熔覆层逐步过渡到基体,通过低应力多碰实验验证“趋表效应”的同时,论证制备指数分布的梯度涂层抵抗基体变形的可行性,为材料性能改善,延长使用寿命,提供一定的实验参考<sup>[8-10]</sup>。

## 1 试验过程

### 1.1 涂层试样的制备

选用 0Cr18Ni9 作为基体,在其表面熔覆了指数分布的梯度 Ni 基强化涂层。0Cr18Ni9 是一种应用比较广泛的不锈钢,具有良好的机械特性<sup>[11-12]</sup>。

采用指数分布梯度激光熔覆层,预定指数分布梯度涂层的第一层和第五层 Ni 含量分别为 10%和 50% (含量均为质量分数),预设每一熔覆层高度为 1.5 mm。可以设计出指数方程:

$$y = ae^{bx}$$

$$\begin{cases} 1.5 = ae^{0.1b} \\ 7.5 = ae^{0.5b} \end{cases}$$

解:

$$\begin{cases} a = 1.5e^{-\frac{\ln 5}{4}} \\ b = \frac{5}{2} \ln 5 \end{cases}$$

$$y = 1.5e^{-\frac{\ln 5}{4}} e^{\frac{5}{2} \ln 5 x}$$

求解方程可以得指数分布梯度熔覆层第二层至第四层的 Ni 含量分别为 27.23%、37.30%和 44.45%。整个试件各个熔覆涂层的 Ni 含量如图 1 所示。

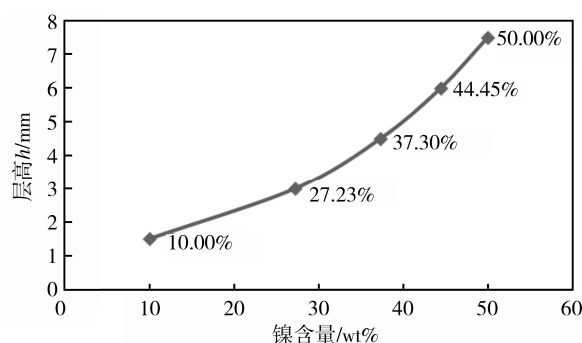


图 1 指数分布梯度涂层 Ni 含量图  
Fig.1 Ni content of exponential gradient cladding

Ni 基指数分布梯度涂层在 GS-TFL-10 kW 型高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器上进行熔覆加工,各个熔覆层采用预置粉末的熔覆方式。0Cr18Ni9 粉末中 Ni 含量为 10%,因此可以将 0Cr18Ni9 粉末直接作为涂层的第一层熔覆材料。另一种预制熔覆粉末 Ni-45 的 Ni 含量为 67.5%,超过所有涂层预定的 Ni 含量,制备第二至第四层熔覆材料时,将两种粉末进行混合配比得到每层设定的需要量。预置熔覆层宽度为 6 mm,熔覆涂层厚度控制在 2~3 mm,保证各涂层的表面基本平整。扫描速度维持在  $v=5$  mm/s。每完成一层的熔覆后,后处理退火温度控制在 600 °C 左右,经过探伤检验之后,利用 KENT 平面磨床,将熔覆层表面精磨至  $Ra=0.2$ ,同时保证在精磨后熔覆层厚度为 1.5 mm。制备试件最表层时,熔覆后检测发现出现了微小的裂纹,为了实验数据的精准,最表层不合适作为本次试验层,因此全部磨掉。最后获得试件的指数分布梯度涂层共 4 层,总厚度 6 mm。

制备试件各层的 EDS 图谱分析实际结果如图 2 所示。表 1 为各层所对应的实际成分含量。从表 1 可以看出,每一个熔覆层的 Ni 含量由基体向上,随着层数的上升逐步增加,基本符合预期的指数分布状态。此外,梯度涂层中 Fe、Cr、Mn 等的含量也呈现一定的梯度分布状态。制备试件的 Ni 实际含量与计算获得的理论 Ni 含量值稍有误差,最大误差约为 +4.2%,偏差量不大,仍然可以作为实验试件。

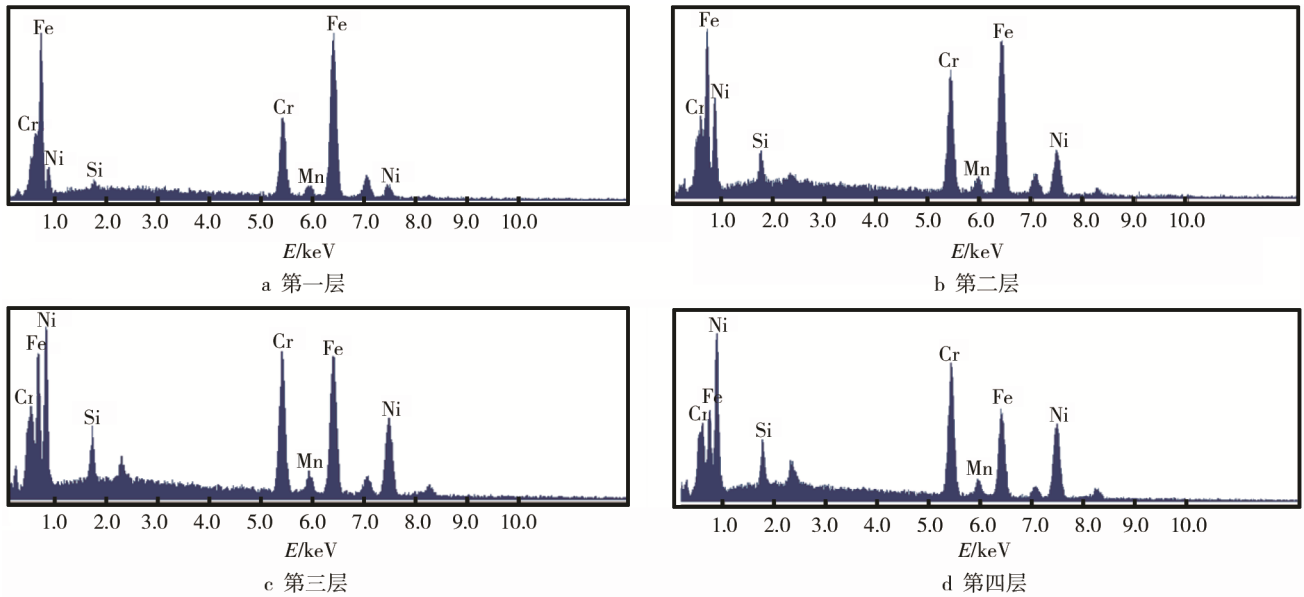


图2 指数分布梯度涂层 EDS 成分分析结果

Fig.2 Component analysis results of EDS component exponential gradient coating: a) XRD results of the first layer, b) XRD results of the second layer, c) XRD results of the third layer, d) XRD results of the fourth layer

表1 各涂层所对应成分  
Tab.1 The component of each coating

Coat-ings	wt%					实际Ni含量与设 计含量误差/%
	Fe	Cr	Mn	Si	Ni	
1	69.42	18.51	0.89	0.76	10.42	+4.2
2	51.33	20.11	0.28	1.94	26.34	-3.3
3	37.45	22.91	0.14	2.59	36.91	-1.0
4	28.17	24.94	0.05	2.88	43.96	-1.1

## 1.2 试样测试条件

试验在自行研制的第二代多次冲击碰撞疲劳试验机上进行,模拟了实际工作的状况,通过弹簧的压缩-释放,冲头向试件反复施加脉冲碰撞载荷。本次试验测试条件预先设定为:实验碰撞应力为 115 MPa,碰撞的频率为 3 Hz,碰撞行程控制在 18 mm。实验中为了数据的采集与统计顺利开展,试验碰撞次数按几何倍数依次增加。在低应力条件下,当冲击次数为  $1 \times 10^3$ 、 $2 \times 10^3$  次时采集试验数据,最后停止采集次数设定为  $128 \times 10^3$  次。

## 2 试验分析

### 2.1 各层变形率分析

试验中借助了坐标网格划分法来分析在低应力多碰条件下试件涂层以及基体的宏观塑性变形<sup>[13-15]</sup>。低应力多碰试验前,以 OLYMPUS BX53 金相显微镜拍摄的实验前试件网格照片作为参考标准,达到设定的碰撞次数后取下试件,采集同一位置的网格图片。利用 AutoCAD 图像处理软件,比较前后照片,计算网

格之间线段长度的变形量,可以获得预定碰撞次数后试件的塑性变形数据。通过数据计算,可以获得试样在低应力多碰撞试验后产生的变形量,依据变形量,计算出碰撞后的应变率与应变率。

指数分布梯度涂层的任一层网格在任一循环次数下的应变率可近似表述为式(1)。

$$\varepsilon_i \approx \frac{h_{ij} - h_{i(j+1)}}{h_{i0}(N_{i(j+1)} - N_{ij})} \quad (i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m_i) \quad (1)$$

式中,  $N_{i(j+1)} - N_{ij}$  为第  $i$  层网格第  $j$  到第  $j+1$  时间段的循环次数;  $h_{i(j+1)} - h_{ij}$  为第  $i$  层网格第  $j$  到第  $j+1$  时间段的变形量;  $h_{i0}$  为第  $i$  层原始厚度;  $m_i$  为第  $i$  层网格碰撞时间间隔数。

图3为各层变形率曲线,由图可以看出,虽然在多碰试验过程中采用的碰撞应力仅仅只有 115 MPa,远低于涂层材料 1150 MPa 与基体材料 520 MPa 的静压缩屈服强度,但是指数分布的梯度涂层和基体在设定的碰撞次数之后还是发生了可测的宏观塑性变形。从实验获得的数据可以看到试件从梯度涂层最表面开始向基体的应变过程是不均匀的。就本次实验所采

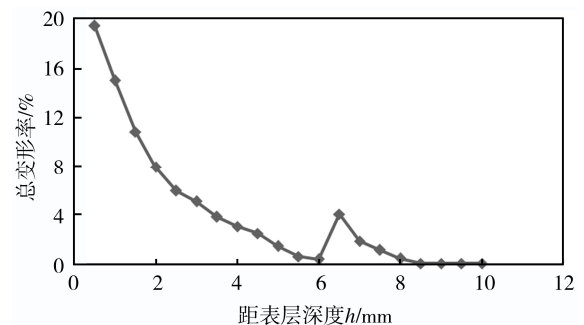


图3 指数分布梯度试件各层变形率

Fig.3 The deformation rate of each layer of the exponential distribution



用的指数分布梯度涂层而言,最表层也就是划定的第一网格层变形率最为明显,达到了 18.97%,第二网格层的变形率也达到了 15.03%,第三网格层为 10.74%,靠近基体的最后一个网格层的变形率为 0.29%,整个涂层的变形率随着层深增加逐步梯度减小。借助实验数据可以得出,指数分布梯度涂层多碰试验后,材料的形变确实具有“趋表效应”。

基体材料的形变情况与涂层形变大致相同,从距离涂层表面 6 mm 处开始,即从基体自身开始,发生塑性变形突变情况,变形率突然增加到 3.92%,这是由于混合涂层粉末与基体结合的时候出现了瞬间高温熔覆,发生突变现象,再往材料内部变形率逐步减少,直至基本为零,基体的形变也表现出“趋表效应”的特点。

总体来说,试样的变形率从涂层最表面向内部梯度降低,逐渐趋向于零,进入基体的时候虽然出现了应变突变,但随后变形率又逐步减少,到距涂层表面 8.4 mm 处不再发生变化。

相同的试验条件下,单一 0Cr18Ni9 试样在经历了

碰撞之后的各层变形率如图 4 所示。第一网格层的变形率达到了 41.60%,直至距表面 14.7 mm 处不再发生变化。

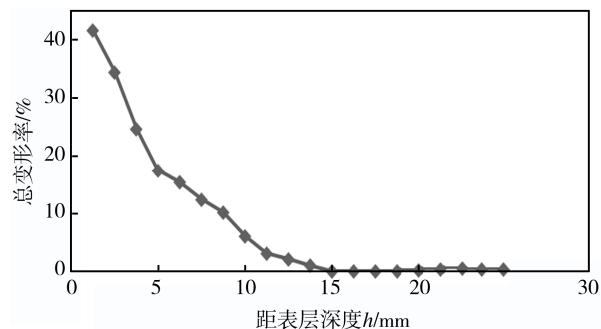


图 4 0Cr18Ni9 试件各层变形率

Fig.4 The deformation rate of each layer of 0Cr18Ni9 specimen

## 2.2 各层组织变化分析

在低应力条件下,12.8 万次碰撞前后实验试件上指数分布梯度熔覆层各层组织变化情况比较如图 5 所示。由图可以观察到第二熔覆层至第四熔覆层有明

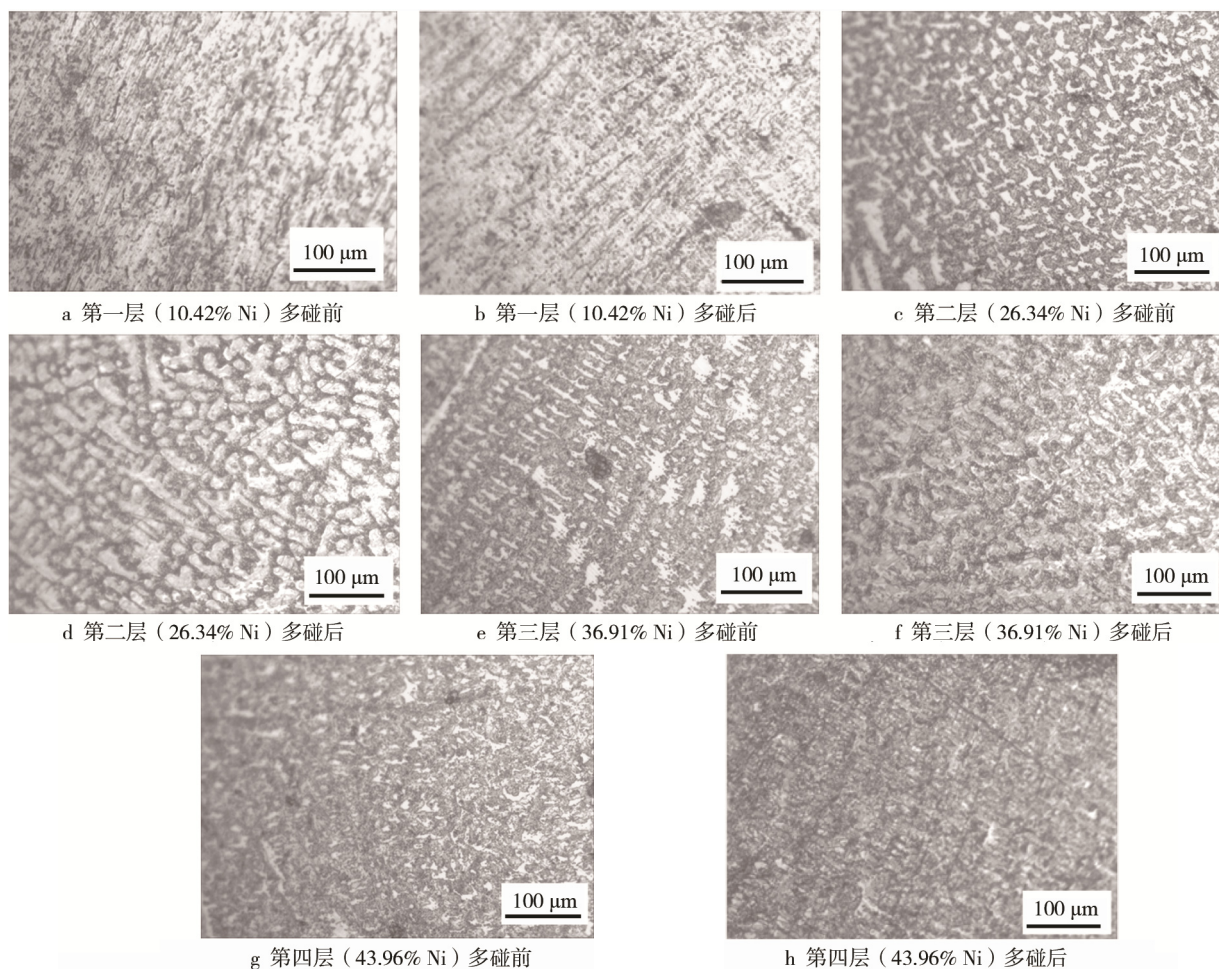


图 5 指数分布梯度涂层多碰前后组织比较

Fig.5 Comparison of tissue with exponential distribution gradient coating before and after repeated impact : a) the first floor (10.42% Ni) before Repeated Impact, b) the first floor (10.42% Ni) after Repeated Impact, c) the second floor (26.34% Ni) before Repeated Impact, d) the second floor (26.34% Ni) after Repeated Impact, e) the third floor (36.91% Ni) before Repeated Impact, f) the third floor (36.91% Ni) after Repeated Impact, g) the fourth floor (43.96% Ni) before Repeated Impact, h) the fourth floor (43.96% Ni) after Repeated Impact

显组织变化的现象。在经过了低应力多碰后,靠近表面的第四熔覆层组织最为模糊混乱,内部的材料在承受了多次冲击碰撞后,应力和应变不断地集中增大,最后发生晶粒碎化现象;中间部位的熔覆层,晶粒虽然也出现了比较明显的形变,但集中应力尚不足够,晶粒的碎化现象不是十分严重;在最靠近基体位置的第一熔覆层,集中起来的应力和应变更小,组织虽然也有一定程度的变化,但不明显。

### 3 结论

1) 在低应力多碰试验之后,可以看出覆盖了指数分布梯度涂层试件的形变与单质材料相比,可测的塑性形变量与变形深度都明显减少,材料抗多冲形变的能力显著增强。由此可以推断如果指数分布梯度涂层的厚度达到一定值,基体将不再发生变形。

2) 通过对金相显微图分析可以知道,在本次研究条件下,塑性形变的效应随着碰撞次数的增加而逐渐增大时,累积起来的应力增加到一定程度时,会使得晶粒发生剪切,出现碎化现象,形成可测塑性变形,随着深度的增加,组织变化越不明显。

3) 由于受到实验次数与器材等因素的影响,实验采集到的数据存在一定误差。今后可采用实时监测的方法,提高试验的准确度。

### 参考文献:

- [1] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2013, 32(12): 538—544.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Research Status and Development of Laser Cladding Technology[J]. Applied Laser, 2013, 32(12): 538—544.
- [2] 孙会来, 赵方方, 林树忠, 等. 激光熔覆研究现状与发展趋势[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 4—6.  
SUN Hui-lai, ZHAO Fang-fang, LIN Shu-zhong, et al. Research Progress and Development Trend on Laser Cladding[J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 4—6.
- [3] 赵晔婷, 石世宏, 傅戈雁. 钴基合金-不锈钢梯度强化材料低应力多碰塑变分析[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 68—72.  
ZHAO Ye-ting, SHI Shi-hong, FU Ge-yan. Low-stress Multi-touch Plastic Deformation Analysis of Cobalt-based Alloy-Stainless Steel Gradient Reinforcement Materials [J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 68—72.
- [4] 张昌春, 石岩. 激光熔覆高厚度涂层技术研究现状及发展趋势[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 448—452.  
ZHANG Chang-chun, SHI Yan. Current Status and Development of High Thickness Coating by Laser Cladding Technology[J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 448—452.
- [5] PITCHUMANI R, GUPTA N, MEESTERS G M H, et al. Analysis of Single Particle Attrition during Impact Experiments[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2003, 20(5): 323—326.
- [6] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29—39.  
SONG Jian-li, LI Yong-tang, DENG Qi-lin, et al. Research Progress of Laser Cladding Forming Technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29—39.
- [7] 孙耀宁, 梁泽芬, 张旭东. 不锈钢表面激光熔覆耐磨涂层的进展及关键技术分析[J]. 热加工工艺, 2009(16): 113—116.  
SUN Yao-ning, LIANG Ze-fen, ZHANG Xu-dong. Progress and Key Technology Analysis of Laser Cladding Wear Resistance Coating on Stainless Steel Surface[J]. Hot Working Technology, 2009(16): 113—116.
- [8] LEYENS C, BEYE E. 8-Innovations in Laser Cladding and Direct Laser Metal Deposition[J]. Laser Surface Engineering, 2015, 8239: 181—192.
- [9] 王一博, 应丽霞, 董国君, 等. 激光熔覆技术研究进展及其工业应用[J]. 中国材料进展, 2009(3): 17—21.  
WANG Yi-bo, YING Li-xia, DONG Guo-jun, et al. Development and Industrial Application of Laser Cladding Technology[J]. Materials China, 2009(3): 17—21.
- [10] ALIMARDANI M, FALLAH V, KHAJEPOU R A, et al. The Effect of Localized Dynamic Surface Preheating in Laser Cladding of Stellite 1[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(23): 3911—3919.
- [11] CLAUSSENK U, GIESA R, SCHMIDT H W. Longitudinal Polymer Gradient Materials Based on Cross Linked Polymers[J]. Polymer, 2014, 55(14): 29—38.
- [12] 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, 2008, 36(3): 54—66.  
QIU Xing-wu, LI Gang, QIU Ling. The Latest Development and Prospects of Laser Cladding Technology[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(3): 54—66.
- [13] 吴培桂, 张光钧. 激光多层熔覆技术的研究现状及发展[J]. 上海工程技术大学学报, 2009, 23(4): 374—378.  
WU Pei-gui, ZHANG Guang-jun. Status and Development of Multi-layer Laser Cladding Technology[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2009, 23(4): 374—378.
- [14] 刘发兰, 赵树森, 高文焱, 等. 基材属性对 Ni60A-WC 激光熔覆涂层性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1319—1326.  
LIU Fa-lan, ZHAO Shu-sen, GAO Wen-yan, et al. Effect of Substrate on Ni60A-WC Laser Cladding Coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1319—1326.
- [15] 石世宏, 傅戈雁, 孙承峰. 多冲载荷对镍基激光涂层及基体的影响[J]. 机械工程材料, 2005(11): 28—30.  
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, SUN Cheng-feng. Influence of Multishock Load on Ni Base Laser Cladding Coat and Its Substrate[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005 (11): 28—30.