

钴基合金-不锈钢梯度强化材料低应力多碰塑变分析

赵晔婷, 石世宏, 傅戈雁

(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要: **目的** 研究钴基合金-不锈钢梯度强化材料抵抗低应力多碰塑性变形的能力,以改善单一涂层应力集中问题。**方法** 制备指数梯度和线性梯度涂层试样,与304不锈钢基体试样一起进行低应力多碰实验,比较分析3种材料的塑性变形量、硬度变化量与金相组织变化。**结果** 线性梯度涂层试样的累积塑性变形量约为304不锈钢的1/2,指数梯度涂层试样的累积塑性变形量约为304不锈钢的1/3;两种涂层试样均存在循环硬化及软化现象,硬度值由表及里逐渐减小,多碰后塑性变形符合“趋表效应”。**结论** 两种梯度涂层强化材料的抗低应力多碰塑变能力均明显优于未强化材料,且指数梯度强化材料性能优于线性梯度强化材料。

关键词: 低应力多碰; 塑变; 梯度强化; 趋表效应

中图分类号: TG174.445

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)02-0068-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.013

Low-stress Multi-touch Plastic Deformation Analysis of Cobalt-based Alloy-Stainless Steel Gradient Reinforcement Materials

ZHAO Ye-ting, SHI Shi-hong, FU Ge-yan

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the resistance of Cobalt-based alloy- stainless steel gradient reinforcement materials against low-stress multi-touch plastic deformation, in order to improve the stress concentration problem of single coating. **Methods** The samples were prepared by laser cladding Cobalt-based alloy powder with exponential and linear weight fraction on substrates. Low-stress multi-touch experiment was conducted against the 304 stainless steel substrate. The plastic deformation, hardness and microstructure of all coatings were analyzed and compared in details. **Results** The cumulative plastic deformation of the sample with addition of linear gradient weight fraction Cobalt-based alloy powder was reduced by about 50% compared to the 304 stainless steel substrate, while the cumulative plastic deformation of the sample with addition of exponential gradient weight fraction Cobalt-based alloy powder was reduced by about 67% compared to the 304 stainless steel substrate. Although cyclic hardening and cyclic softening phenomena existed in both Cobalt-based gradient reinforced samples, the overall variation trend of the micro-hardness was that mi-

收稿日期: 2014-09-27; 修订日期: 2014-10-22

Received: 2014-09-27; Revised: 2014-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172191); 江苏省科技支撑计划(BE2012068)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(11172191) and Jiangsu Science and Technology Support Program(BE2012068)

作者简介: 赵晔婷(1989—), 女, 辽宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: ZHAO Ye-ting (1989—), Female, from Liaoning, Master graduated student, Research focus: material surface engineering.

通讯作者: 石世宏(1956—), 男, 湖南人, 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, from Hunan, Ph. D., Professor, Research focus: laser advanced manufacturing technology, material surface engineering.

cro-hardness values gradually decreased from the surface to the substrate. Besides, the plastic deformation of reinforced materials conformed to "skin effect" after multi-touch. **Conclusion** The resistance of both gradient reinforced coatings against low-stress multi-touch plastic deformation was much better than that of the substrate without reinforcement, and the properties of exponential gradient reinforced samples were better than those of the linear reinforced samples.

KEY WORDS: low-stress multi-touch; plastic deformation; gradient reinforced; skin effect

工程中许多零部件,如凹凸模、控制阀、活塞等,因多次承受低于屈服极限的碰撞应力而产生累积塑性变形,继而发生尺寸失稳、裂纹、磨损等多种形式的失效。研究表明,材料承受多次低应力碰撞后,累积塑性变形存在“趋表效应”^[1-3]。目前,常通过涂层表面强化的方法改善材料抵抗低应力塑性变形的能力,使材料保持外强内韧的良好综合力学性能^[4-6]。但是单一涂层强化的材料也有不足,涂层和基体的结合区由于热膨胀系数不匹配等原因,存在明显的应力集中^[7]。

本文在 304 不锈钢基体材料上制备成分呈梯度变化的钴基涂层^[8-12],改善单一涂层强化中应力集中的现象。前期研究表明,材料在低应力多碰载荷作用下,形变由表及里近似于指数递减分布^[13],本文设计一种钴基材料成分由表及里呈指数梯度递减的强化涂层试样,通过低应力多碰试验,研究其在低应力多碰载荷作用下的形变规律,同时制备钴基成分呈线性梯度分布的试样及无涂层 304 不锈钢试样进行对比试验。

1 试验

本文两种钴基梯度强化材料按照表 1 和表 2 的粉末成分,以激光先进制造手段,按图 1 所示熔覆在 304 不锈钢基体上。钴基合金粉末成分与钴基合金材料力学性能见表 3 和表 4。

表 1 指数梯度强化材料成分(以质量分数计)
Tab.1 Composition of exponential gradient reinforced materials

层级	Co 粉比例/%	基体比例/%
基体层	0	100
1	8.75	91.25
2	36.88	63.12
3	58.22	41.78
4	91.71	8.29
5	100	0

表 2 线性梯度强化材料成分(以质量分数计)
Tab.2 Composition of linear gradient reinforced materials

层级	Co 粉比例/%	基体比例/%
基体层	0	100
1	20	80
2	40	60
3	60	40
4	80	20
5	100	0

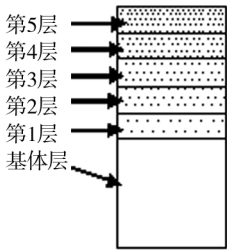


图 1 梯度涂层示意
Fig.1 Gradient coating schematic

表 3 钴基合金粉末组成
Tab.3 Composition of Cobalt-based alloy powder

元素	C	Cr	Si	W	Fe	Mo	Ni	Mn	Co
质量分数/%	1.2	29	1.1	4	3	1	3	0.5	余量

表 4 钴基合金材料力学性能
Tab.4 Mechanical performance of Cobalt-based alloy material

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	硬度(HRC)
1077	1661	42 ~ 45

将制备好的两种梯度强化材料与 304 不锈钢材 料用电火花线切割机切成 5 mm×10 mm×45 mm 的长 方体试样,并进行打磨。采用激光刻线方式,在试样 侧面紧靠多碰表面的 5 mm×10 mm 范围内(如图 2 所 示)刻划 0.5 mm 的网格。

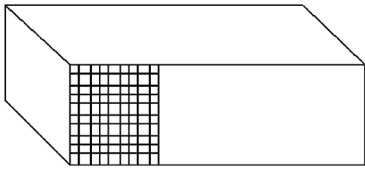


图 2 网格示意
Fig. 2 Grid schematic

采用自制多碰试验机对试样进行低应力多碰试验。试验时,电动机经减速箱减速增力后,带动凸轮做周期性旋转,凸轮带动冲击机构上下运动,对试件进行多次碰撞,碰撞应力 $\sigma = 100 \text{ MPa}$,碰撞行程 $h = 20 \text{ mm}$,碰撞频率 $f = 4 \text{ Hz}$ 。

碰撞次数分别达到 2×10^3 , 4×10^3 , 8×10^3 , 16×10^3 , 32×10^3 时,分别记录网格的尺寸变化量,用 MH-5 型维氏硬度计测量碰撞前后的硬度,用 XTL-1 型体式显微镜观察碰撞前后试样的组织。

2 结果与分析

2.1 形变分析

通过对试样网格形变量与整体形变量的测量,并对测得的数据进行处理,得到不同材料试样累积碰撞 32×10^3 次后距表层不同距离的应变和累积形变量随碰撞次数的变化,如图 3 所示。

由图 3a 可知:1) 3 种试样的塑性形变都符合“趋表效应”;2) 距表层相同位置时 304 不锈钢的平均应变最大;3) 304 不锈钢应变曲线近似为指数函数曲线且应变较大,钴基指数应变曲线近似为一次函数曲线且应变很小,而钴基线性试样的应变与曲线形状皆介于前两者之间。

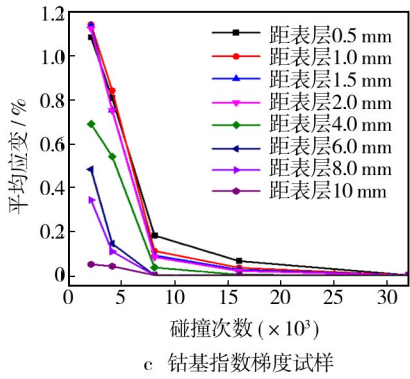
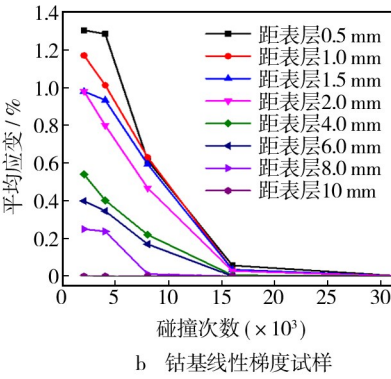
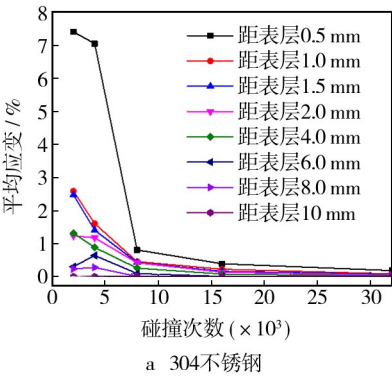


图 4 多碰 32×10^3 次后不同层深应变曲线比较

Fig. 4 Comparison of strain curves of different distance from the surface after 32×10^3 multi-touch

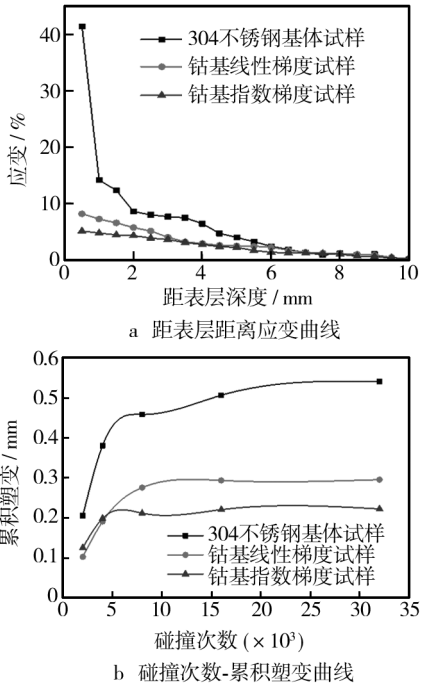


图 3 试样的形变与应变

Fig. 3 Deformation and strain of the specimen

由图 3b 可知:1) 两种梯度材料试样的累积塑性形变均小于 304 不锈钢试样,线性梯度试样的累积应变约为 304 不锈钢的 1/2,而指数梯度试样的累积应变仅约为 304 不锈钢的 1/3;2) 3 种材料试样的形变率均随碰撞次数的增加而减小,碰撞次数达 16×10^3 次后,两种梯度强化试样的塑性变形基本停止,304 不锈钢依然会产生塑性变形。

以上分析表明,钴基指数梯度材料对抗低应力多碰塑性变形有显著的效果,线性梯度材料亦有效果,但是效果亚于前者。

图 4 为 3 种不同材料试样的平均应变随碰撞次数变化的关系图。通过比较可以发现,在相同的条件

下,304 不锈钢试样的塑变最大,并且第 1 层塑变严重;钴基线性强化试样与钴基指数强化试样由表及里塑变变化比较平稳。钴基指数梯度试样的单层最大应变值小于钴基线性梯度试样,这说明钴基指数梯度试样抗低应力塑变的性能较钴基线性梯度试样好。

2.2 硬度分析

多碰前后,304 不锈钢基体试样的硬度变化如图 5a 所示。碰撞后,出现了明显的硬化,硬化程度随距表面距离的增加而逐渐减小,直至距表层约 8 mm 处等于基体的硬度。

图 5b,c 为碰撞前后两种梯度试样硬度距表面距离变化的曲线。在距表层相同距离处,梯度试样的硬化程度明显小于 304 不锈钢基体试样,这说明梯度材

料能有效地抵抗低应力塑变。梯度试样的硬度沿其深度方向呈梯度变化,但并没有出现台阶式的突变,这是因为激光熔覆技术在层间结合区存在稀释过渡的特点^[14],避免了界面应力集中和界面突变。此外梯度涂层试样在低应力多碰载荷作用下,会出现循环硬化和循环软化重叠的现象^[15],且此现象由表及里有衰减趋势。出现循环硬化或因塑性变形过程中,形变到一定程度时,晶界附近造成足够大的应力集中,软位相的晶粒滑移停止。出现循环软化可能是由于低应力多碰载荷作用下,材料内部产生了孪生,出现了新的晶格位相,即出现了新的滑移方向;亦或塑性变形过程中晶界附近应力集中,激发邻近处于次软相位的晶粒产生了新的滑移系^[16]。

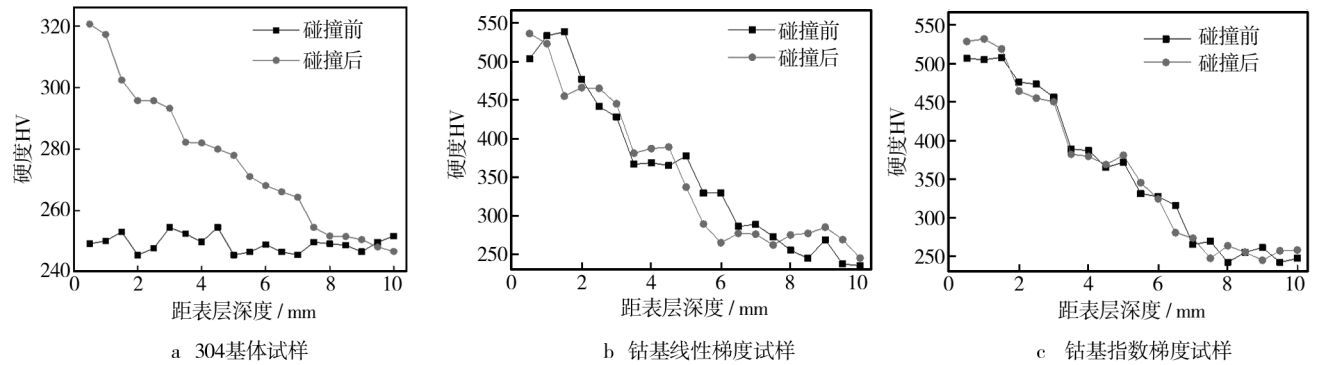


图 5 304 基体试样和梯度试样多碰前后硬度变化

Fig. 5 Hardness variation of the 304 substrate and the gradient samples before and after multi-touch

2.3 组织分析

图 6 与图 7 为钴基指数梯度试件不同层位碰撞前后的金相组织图。可以观察到:1) 试件表层碰撞前,组织清晰,晶界方向基本相同;碰撞后,晶粒明显碎化并伴有方向转动,晶界有明显的破坏。2) 第 3 层多碰前,由于材料同时含有钴基材料与 304 不锈钢成分,故组织同时具有两种材料的特点,即晶粒大致呈一个方向,晶粒大小介于表层与基体晶粒大小之间;多碰后,晶粒轻微碎化,晶界轻微破坏。3) 基体部分多碰前,晶粒排列呈各向异性,晶粒粗大;多碰后,组织无变化。

随碰撞次数的增加,位错不断增多,滑移系数量也不断增加,应力和应变将在晶界等障碍处不断集中增大,当产生的总应力增大到一定值时,晶粒发生剪切碎化现象。

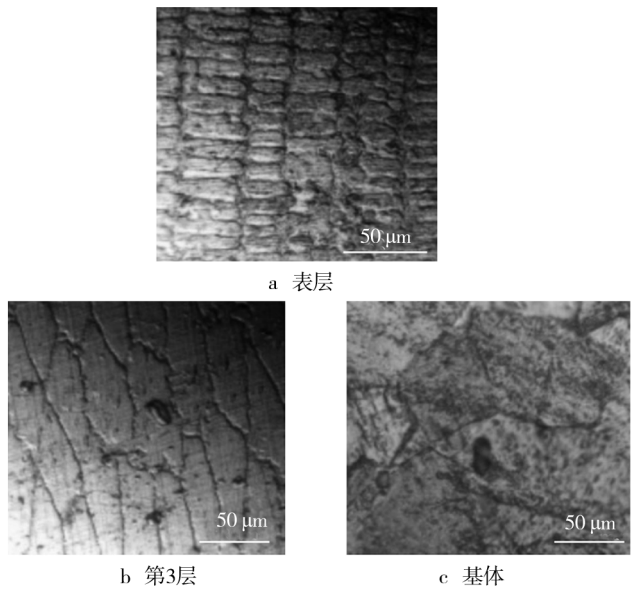


图 6 指数梯度强化试样多碰前金相

Fig. 6 Metallurgical structure of the exponential gradient reinforced sample before multi-touch

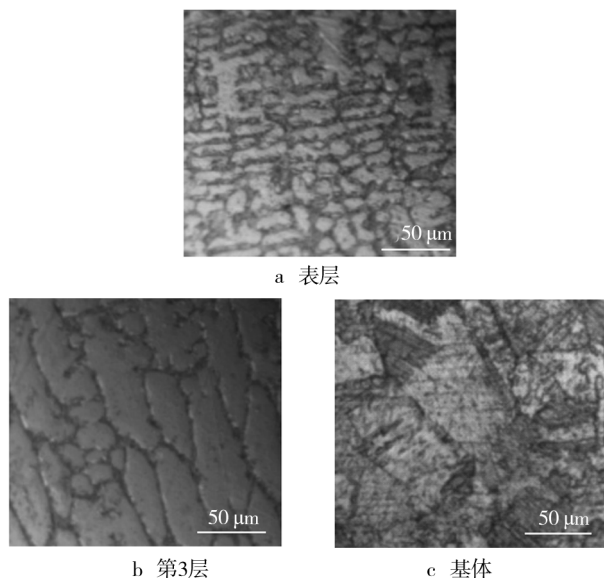


图7 指数梯度强化试样多碰后金相

Fig. 7 Metallurgical structure of the exponential gradient reinforced sample after multi-touch

多碰后表层组织有明显破坏,中间第3层组织轻微破坏,基体组织无破坏,说明多碰具有“趋表效应”的特点,也说明在原材料上面熔覆钴基指数梯度强化材料能有效地提高原材料抗低应力塑变的能力。

3 结论

1) 钴基梯度涂层材料与304不锈钢未强化材料在远低于屈服极限的低应力多碰载荷作用下,均会出现累积塑性变形,且累积塑性变形规律符合“趋表效应”。

2) 钴基梯度涂层材料抗低应力多碰塑变性能优于未强化材料,且指数梯度涂层材料优于线性梯度涂层材料。钴基线性梯度涂层的累积形变量为304不锈钢的1/2,钴基指数梯度涂层的累积形变量为304不锈钢的1/3。

3) 钴基梯度涂层材料在低应力多碰下的硬度稳定性高于304不锈钢,且存在循环硬化与循环软化现象。

4) 钴基梯度涂层材料低应力多碰后,表层晶粒碎化,晶界破坏,中部的晶粒与晶界破坏较不明显,基体部分无变化。

参考文献

[1] 傅戈雁,石世宏.多冲碰撞载荷下激光涂层的接触损伤分析[J].激光与红外,2006(7):587—589.

FU Ge-yan, SHI Shi-hong. Analysis of Contact Damification of Laser Coating under Repeated Impact Loading[J]. Laser & Infrared, 2006(7):587—589.

[2] 吴炯杰.碰撞能对低应力多碰塑性变形的影响研究及建模[D].苏州:苏州大学,2013.

WU Jiong-jie. Research and Model of Plastic Accumulation under Low Stress Repeated Impact and Different Impact Energy[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.

[3] 刘磊.涂层强化材料低应力多碰塑性累积研究与建模[D].苏州:苏州大学,2010.

LIU Lei. Research on Modeling of Plastic Accumulation of Coating Strengthening Material under Low Stress Repeated Impact[D]. Suzhou: Soochow University, 2010.

[4] 徐峰,李文虎,艾桃桃. Q235 钢表面氩弧熔覆 TiC 复合涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 53—55.

XU Feng, LI Wen-hu, AI Tao-tao. The Micro Structure and Property of TiC Composite Coating Deposited by Argon Arc Cladding on Q235 Steel Surface[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 53—55.

[5] 韩文强,何辉波,李华英. TiN 涂层刀具对 20CrMo 钢的干切削性能的影响及磨损机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(1): 64—70.

HAN Wen-qiang, HE Hui-bo, LI Hua-ying. Effect of Coated Tools on Machinability and Wear Mechanism in Dry Turning of 20CrMo Steel[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014(1): 64—70.

[6] 周思华,晁明举,刘奎立,等.原位生成 WC-B₄C 增强镍基激光熔覆层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 25—30.

ZHOU Si-hua, CHAO Ming-ju, LIU Kui-li, et al. Research on In-situ Synthesis of WC-B₄C Particulate Reinforced Ni-based Coatings by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 25—30.

[7] 张程显,徐滨士,王海斗,等. ZrO₂/NiCoCrAlY 功能梯度涂层残余应力分析[J]. 材料热处理学报, 2005(2): 86—89.

ZHANG Cheng-xian, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Analysis on the Residual Stresses in Functionally Gradient ZrO₂/NiCoCrAlY Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005(2): 86—89.

[8] CLAUSSENK U, GIESA R, SCHMIDT H W. Longitudinal Polymer Gradient Materials Based on Cross Linked Polymers[J]. Polymer, 2014, 55(14): 29—38.

[9] WU D J, LIANG X K, LI Q, et al. Fabrication of SS316L/Ni25 Functionally Gradient Materials Using Laser Engineered Net Shaping[J]. Advanced Material Science and Technology, 2011, 675—677; 803—806.

- REN Yi, ZHANG Shuai, WANG Shuang. Effect of Structure Pattern on the Performance of X80 Pipeline Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(8): 798—802.
- [6] 张卫华, 陈小伟, 闻康. X80 钢中非金属夹杂物的检验及其对性能的影响[J]. 理化检验, 2009, 10(45): 628—634.
- ZHANG Wei-hua, CHEN Xiao-wei, WEN Kang. Identification of Nonmetallic Inclusions and Their Influence on the Properties of X80 Pipeline Steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2009, 10(45): 628—634.
- [7] LIANG P, DU C W, LI X G. Effect of Hydrogen on the Stress Corrosion Cracking Behavior of X80 Pipeline Steel in Ku'erle Soil Simulated Solution[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 407—413.
- [8] 杨志国, 胡传顺, 梁平. X80 钢在库尔勒和高 pH 值土壤模拟溶液的腐蚀行为[J]. 装备与环境工程, 2012, 9(1): 41—44.
- YANG Zhi-guo, HU Chuan-shun, LIANG Ping. Corrosion Behaviors of X80 Steel in Ku'erle and High pH Soil Simulated Solutions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 41—44.
- [9] CHEN Xing, ZHEHG Yue-ping, LI Lei. Study of Corrosion and Protection Technology of Oil and Gas Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2010(2): 49—53.
- [10] 马平. 海底天然气管道腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2012, 26(8): 1—5.
- MA Ping. Corrosion and Protection of Submarine Gas Pipeline[J]. Total Corrosion Control, 2012, 26(8): 1—5.
- [11] 李红英, 康巍, 胡继东. X70 和 X80 管线钢的电化学腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(10): 151—153.
- LI Hong-ying, KANG Wei, HU Ji-dong. Electrochemical Corrosion Behavior of Grade X70 and X80 Pipeline Steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10): 151—153.
- [12] TANG J G. Surface Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Cathode Assisting Discharge Setup and Conventional Plasma Nitriding Methods[J]. Science China (Technological Sciences), 2013(8): 35—38.
- [13] DLAZGUILLE N. Surface Properties of Fe4N Compounds Layer on AISI 4340 Steel Modified by Pulsed Plasma Nitriding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013(3): 287—289.
- [14] 梁平, 张云霞, 胡传顺. 腐蚀产物膜对 X80 钢在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2012(4): 62—67.
- LIANG Ping, ZHANG Yue-xia, HU chuan-shun. Effect of Corrosion Product Films on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Ku'erle Soil Simulated Solution[J]. Materials Science and Engineering, 2012(4): 62—67.
- [15] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction of Electrochemistry Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] DU C W, LI X G, LIANG P. Effect of Microstructure on Corrosion of X70 Pipe Steel in an Alkaline soil[J]. Journal of Materials Engineering Performance, 2009, 18(2): 216—220.

(上接第 72 页)

- [10] GALKIN M P, LIBMAN M A, ESTRIN E I. Phase Transitions Use for Gradient Materials Creation[J]. Materials Science, 2014, 3: 25—28.
- [11] ZHANG N, CHEN S P, LIANG L J, et al. In-situ Synthesis of (TiC)_pNi/TiAl/Ti Functional Gradient Materials Via Field-activated[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(4): 25—38.
- [12] SURYAKUMAR S, SOMASHEKARA M A. Manufacture of Functionally Gradient Materials Using Weld-deposition [C]//24th International SFF Symposium — An Additive Manufacturing Conference. [s. l.]: SLSFF, 2013: 939—949.
- [13] 徐桃. 多次冲击碰撞载荷下 T10 钢的累积宏观塑性变形及其机理分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 22—23.
- XU Tao. Analysis the T10 Carbon Tool Steel Accumulative Macrography Plastometric Set and Mechanism at the Multi-shock Compression[D]. Suzhou: Soochow University, 2011: 22—23.
- [14] 杨胶溪, 王智勇, 左铁钊. 高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. 中国激光, 2009(12): 3262—3266.
- YANG Jiao-xi, WANG Zhi-yong, ZUO Tie-chuan. High Power Diode Laser Cladding Aggregate Tungsten Carbide-Ni Based Superhard Composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009(12): 3262—3266.
- [15] 石荣, 陈大明, 康沫狂, 等. 16NiCo 钢的循环硬化/软化特性及机理[J]. 钢铁, 1997(4): 55—59.
- SHI Rong, CHEN Da-ming, KANG Mo-kuang, et al. Cyclic Hardening/Softening Behavior and Mechanism of 16NiCo Steel[J]. Iron & Steel, 1997(4): 55—59.
- [16] 戴枝荣, 张明远. 工程材料[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- DAI Zhi-rong, ZHANG Ming-yuan. Engineering Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.