

激光原位合成 NiAl 金属间化合物覆层的性能*

杨连斌¹, 俞友军^{2,3}, 赵杰荣^{2,3}, 周健松², 雷自强¹, 陈建敏²

(1. 西北师范大学 化学化工学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院 北京研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用激光熔覆技术在不锈钢(1Cr18Ni9Ti)基材上原位合成了单相 NiAl 金属间化合物覆层, 利用 XRD 和 SEM 分析了覆层的组成和微观组织, 用栓-盘摩擦磨损试验机对覆层摩擦学性能进行了研究。结果表明: 激光工艺对 NiAl 覆层的显微组织结构有重要影响, 在较低的功率密度条件下制备的 NiAl 覆层内部无裂纹和孔洞, 与基底呈良好的冶金结合; 覆层显微组织结构致密, 显微硬度达到 500 HV 并呈现出良好的摩擦磨损性能。

关键词: NiAl; 金属间化合物; 激光熔覆; 摩擦学性能

中图分类号: TG146.1⁺5; TG115.5⁺8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2010)05-0036-05

The Properties of NiAl Intermetallic Compound Coating Synthesized by Laser Cladding

YANG Lian-bin¹, YU You-jun^{2,3}, ZHAO Jie-rong^{2,3}, ZHOU Jian-song², LEI Zi-qiang¹, CHEN Jian-min²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Single NiAl phase intermetallic compound coatings were successfully in-situ synthesized by laser cladding with preplaced Ni and Al mixed powders. The phase composition and microstructure of the NiAl coatings were studied by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. Tribological properties were examined using pin-on-disk tester under dry sliding conditions. The effects of laser cladding parameters on the microstructure of the NiAl coatings were investigated. Results show that the laser power density has a crucial influence on the microstructure and tribological properties of the NiAl coatings. The NiAl coatings synthesized under the lower power density have a dense and fine microstructure as well as some excellent properties such as higher and homogeneous distribution microhardness(500 HV), lower friction coefficient and wear rate.

Key words: NiAl; intermetallic compound; laser cladding; tribological properties

0 引言

NiAl金属间化合物具有密度低、熔点高、导热率好以及良好的抗高温氧化性等优异的性能而成为航天航空工业中具有良好应用前景的高温结构材料和涂层材料^[1,2]。近年来,国内外研究人员对NiAl金属间化合物的制备、结构等方面已做了大量研究^[3-6]。其中,利用表面改性技术在某些金属或合金基体上制备NiAl金属间化合物表面改性层以提高材料的整体性能,获得了较好的结果^[7-9]。激光表

面工程技术作为现代材料表面改性技术的一种重要方法,能够方便地在金属基底表面制备出结构和性能优异的涂层材料或者原位合成金属间化合物覆层材料^[10]。但是利用激光表面工程技术原位合成反应制备NiAl金属间化合物覆层材料等方面的研究工作鲜有报道。

文中利用激光表面工程技术在不锈钢基底上原位合成了NiAl金属间化合物覆层,系统地研究了激光工艺参数对覆层的物相组成和显微组织结构的影响,探讨了覆层的显微组织结构演变及其显微组织结构与摩擦磨损性能之间的关系,以期NiAl金属间化合物覆层的工程应用提供科学依据。

收稿日期: 2010-05-16; 修回日期: 2010-07-09

基金项目: *国家自然科学基金(基金号20674063, 20774074) 资助项目; 高校博士点专项基金(20050736001) 资助项目

作者简介: 杨连斌(1984—), 男(汉), 甘肃兰州人, 硕士生。

1 试验

将镍粉(粒度75 μm , 纯度99.0%)和铝粉(粒度30~150 μm , 纯度99.5%)按原子比Ni:Al=1:1在QM-3SP4J型行星式球磨机上混合120 min后备用。激光熔覆前将Ni、Al混合粉末预置于不锈钢1Cr18Ni9Ti($\Phi 45\text{ mm} \times 16\text{ mm}$)基底表面,厚度约为1.5 mm。将试样置于电炉上400 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行半小时预热处理,然后用横流连续波 CO_2 激光器(沈阳大陆成套设备有限责任公司生产)对预置粉末进行激光熔覆。激光熔覆后将样品放置于碳钢平盘中并在电炉加热下缓慢冷却,以释放试样在熔覆过程中产生的应力。激光熔覆的工艺参数见表1。

表1 激光原位合成 NiAl 覆层工艺参数

Table 1 Laser processing parameters for fabricating the NiAl coatings by laser cladding

样品编号	激光功率/ W	扫描速度/ (mm/min)	功率密度/ (W/mm^2)
1	2500	250	125
2	3000	300	150
3	3500	350	175

用X射线衍射仪(XRD, Philips X'Pert-MRD)分析覆层的物相组成,用扫描电子显微镜(SEM, JSM-5600L)观察覆层横截面显微组织结构形貌,用韦氏显微硬度计(MH-5-VM)测定覆层的横截面硬度值,用瑞士CSM公司生产的THT摩擦磨损试验机测试覆层的摩擦磨损性能,用MicroXAM三维表面轮廓仪(ADE Corporation, Massachusetts, USA)测量覆层的磨损体积并计算出体积磨损率。

2 结果与讨论

2.1 NiAl 覆层的物相组成

图1为Ni、Al混合粉末背散射SEM形貌照片,由图可以看出Ni、Al粉未经球磨后均匀混合并呈现不规则的片状形貌。

图2为Ni、Al混合粉末激光熔覆前后的XRD谱图,其中图2(a)为混合粉末的XRD谱图,图2(b)~(d)分别对应于表1所列3种激光工艺参数下原位合成的NiAl覆层样品的XRD谱图。由图2(a)可以看出, Ni、Al粉未经球磨混合后,没有新的物相衍射峰出现,表明球磨过程仅实现了Ni、Al粉末的均匀混合,未发生机械合金化反应。由图2(b)~(d)可以看出,

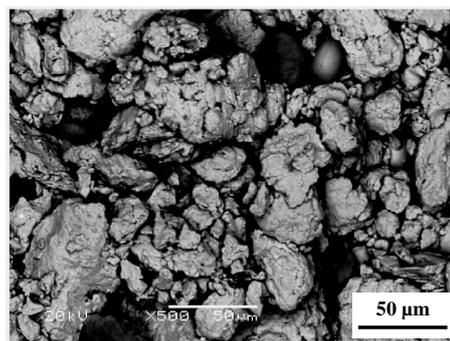


图1 Ni、Al混合粉末的SEM照片

Fig.1 SEM micrograph of the Ni and Al mixed powders

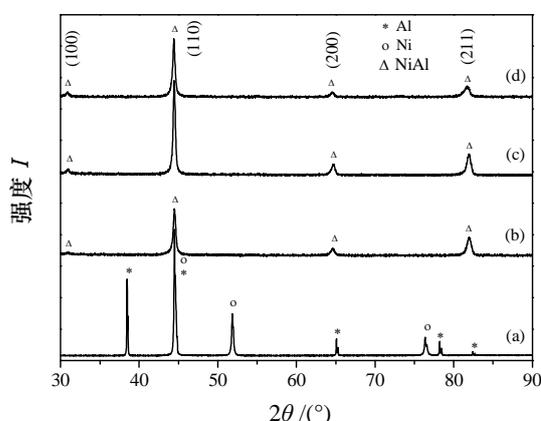


图2 Ni、Al混合粉末及NiAl覆层样品1、2和3 XRD谱图
Fig.2 XRD patterns of the mixed powders (a) and the laser cladding NiAl coatings: (b), (c) and (d) corresponding to samples 1, 2 and 3, respectively

在文中所采用的激光工艺参数范围内,混合粉末经激光熔覆后获得的覆层均由单相NiAl金属间化合物组成,同时可以看出,激光功率密度对NiAl金属间化合物沿(100)晶面生长有明显的影 响,随着激光功率密度增大, NiAl相沿(100)晶面生长速度加快,从而减缓了NiAl相沿(110)晶面取向生长。

2.2 NiAl 覆层的显微组织

图3为NiAl金属间化合物覆层横截面SEM照片,其中图3(a)~(c), 3(d)~(f)和3(g)~(i)分别对应于样品1、2和3。由图3可以看出激光功率密度对NiAl金属间化合物覆层的显微组织结构有很明显的影响,如图3(a)~(c)所示,在较低的激光功率密度下获得的NiAl覆层组织结构致密,内部无裂纹和孔洞,覆层与基底之间出现一条明显白色亮带,说明覆层与基底呈冶金结合,同时可以看出,覆层靠近基底部分显微组织主要呈树枝状晶体结构,随着离基底距离增加其显微组织迅速转变为等轴晶结

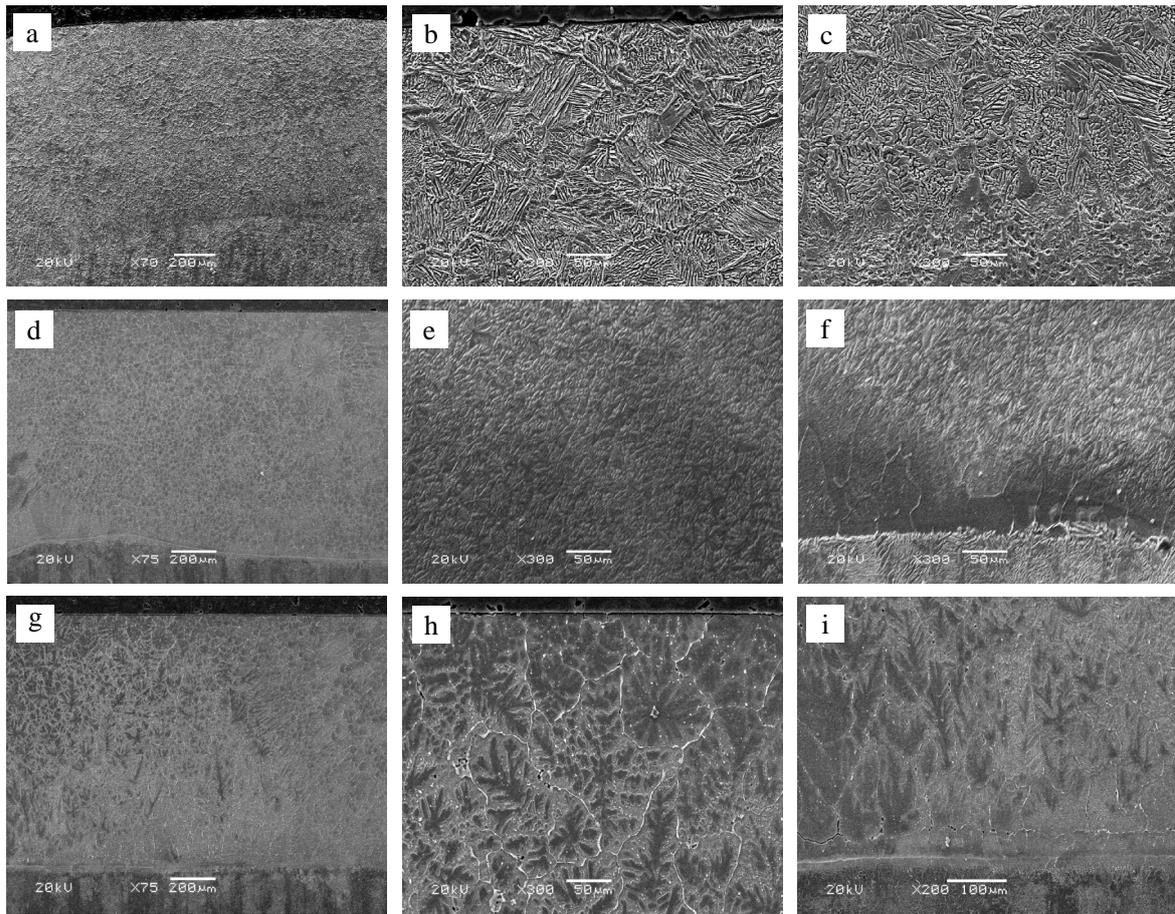


图3 NiAl覆层横截面SEM照片:(a)~(c),(d)~(f)和(g)~(i)分别对应样品1,2和3截面形貌

Fig.3 Cross-sectional SEM micrographs of NiAl coatings: (a)~(c), (d)~(f) and (g)~(i) corresponding to samples 1, 2 and 3, respectively ((a), (d) and (g) overview cross-section of the coatings; (b), (e) and (h) the top of the coatings; (c), (f) and (i) the bottom of the coatings)

构。这是由于激光熔覆过程是一个超快速加热和冷却过程,在基底附近激光熔池内存在较高的温度梯度,从而为NiAl晶粒提供了一个垂直于基底方向定向生长的驱动力,所以NiAl晶粒结晶并生长成柱状和树枝状组织结构。但是,随着离基底距离增加激光熔池内的温度梯度迅速减小,更有利于形成各向同性的驱动力,所以NiAl晶粒结晶形成等轴晶组织结构,晶粒之间结合紧密。从图3(b)可以看出,NiAl相等轴晶组织内部形成了更为精细的树枝晶组织结构。从图3(d)~(i)可以看出,随着激光功率密度增加,NiAl相晶粒尺寸增大,初生枝晶和等轴晶粗大,等轴晶内二次结晶形成晶粒尺寸较大的枝晶结构,尤其从图3(h)~(i)可以看出在较高的激光功率密度下,晶粒之间结合紧密度下降,晶粒之间出现微裂纹和孔洞等缺陷,覆层的致密性明显下降。

图4分别为3个样品横断面断裂形貌SEM照片。

如图4(a)所示,在较低的激光功率密度工艺下制备NiAl金属间化合物覆层横断面断裂形貌呈现出明显的河流样层状断裂形式,并且在层状断裂的间隙分布有大量韧窝。由图4(b)~(c)可以看出,随着激光功率密度增加,NiAl金属间化合物覆层横断面断裂形貌从尺寸较大的条状断裂形式转变为块状大颗粒剥离形式。结合图3所示的NiAl覆层的横截面SEM照片可以得出,在激光原位合成NiAl金属间化合物覆层的过程中激光功率密度对其显微组织结构产生十分重要的影响。

2.3 NiAl覆层的显微硬度

图5为NiAl金属间化合物覆层显微硬度值曲线图。如图5所示,NiAl覆层的显微硬度值随激光功率密度增加而逐步减小。这是因为激光功率密度增加时,一方面增大对基底的稀释作用,另一方面也促使晶粒过快地长大,导致粗大的柱状和树枝状晶

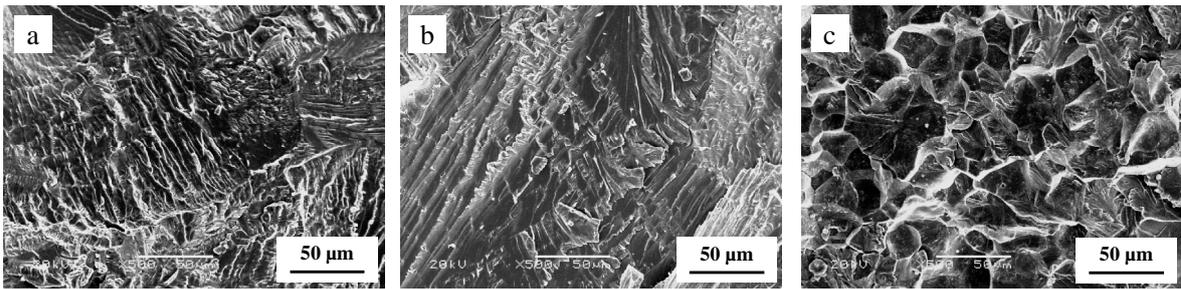


图 4 NiAl 覆层横断面 SEM 照片: (a), (b) 和 (c) 分别对应样品 1、2 和 3 横断面形貌

Fig.4 Cross-sectional fracture SEM micrographs of NiAl coatings: (a) (b) and (c) corresponding to samples 1, 2 and 3 respectively

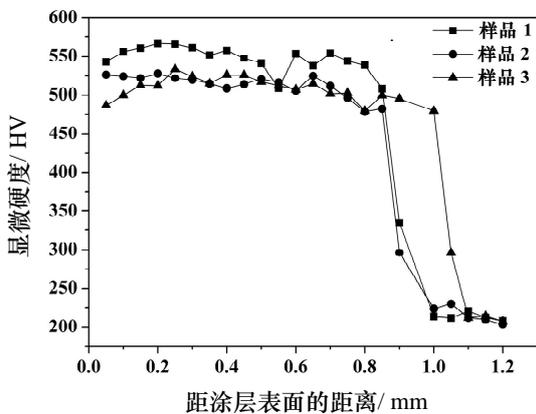


图 5 NiAl 覆层的横截面显微硬度分布曲线

Fig.5 Microhardness profile of the NiAl coatings

体结构含量增加,晶粒之间出现微裂纹和孔洞等缺陷,从而使得覆层的致密度下降,显微硬度值减小。

2.4 NiAl 覆层的摩擦磨损性能

图6和图7分别为NiAl金属间化合物覆层样品1、2和3的摩擦系数和磨损率变化曲线图。由图6可以看出,在摩擦测试进行约200 s后3个样品均处于稳定的摩擦磨损阶段。但是,3个样品的摩擦系数

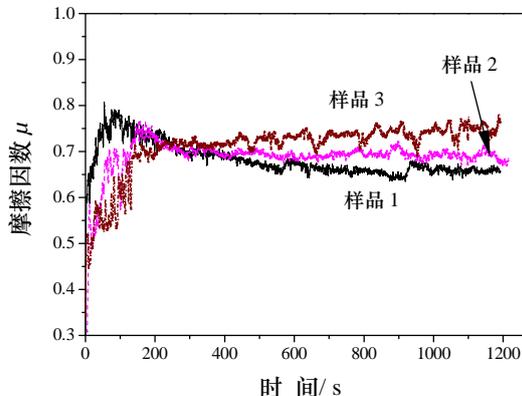


图 6 NiAl 覆层的摩擦系数随测试时间变化曲线

Fig.6 Friction coefficient of the NiAl coatings as a function of test time (load 5 N, sliding velocity 0.21 m/s)

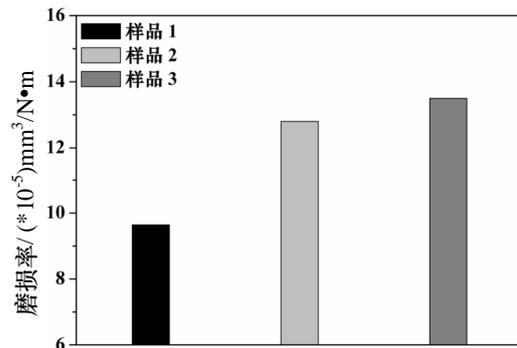


图 7 NiAl 覆层的磨损率变化曲线

Fig.7 Variation in the wear rate of the NiAl coatings at a normal load of 5 N

随着时间的变化关系表现出了明显的差异,样品1和2的摩擦系数随着摩擦过程的进行波动较小,并且样品1具有较低的摩擦系数;样品3的摩擦系数曲线波动较大且具有较高的摩擦系数。同时,从图7也可以明显地看出,样品1具有较低的磨损率,而样品3具有较高的磨损率。结合前文所述对3个样品的显微组织结构和显微硬度分布的分析,说明NiAl覆层的显微组织结构对其摩擦磨损性能有直接的影响,具有精细、致密显微组织结构的NiAl覆层在摩擦磨损过程中表现出较好的抗摩擦磨损性能。

图8为NiAl金属间化合物覆层样品1、2和3的摩擦磨损表面形貌SEM照片。由图8(a)可以看出,样品1的磨损表面存在少量剥落坑和轻微的刮擦痕迹,这表明样品1在摩擦过程中发生了轻微的磨粒磨损。如图8(b)所示,样品2的磨损表面存在明显的剥落坑和犁沟,这表明样品2与对偶摩擦过程中发生了严重的磨粒磨损,同时也说明样品2具有较强的脆性断裂特征。从图8(c)可以清楚地看出,样品3的磨损表面均匀地分布有大量剥落坑洞和较严重的刮擦犁沟,这表明样品3具有极强的脆性断裂特征,在摩擦过程中样品3的摩擦表面发生了严重的

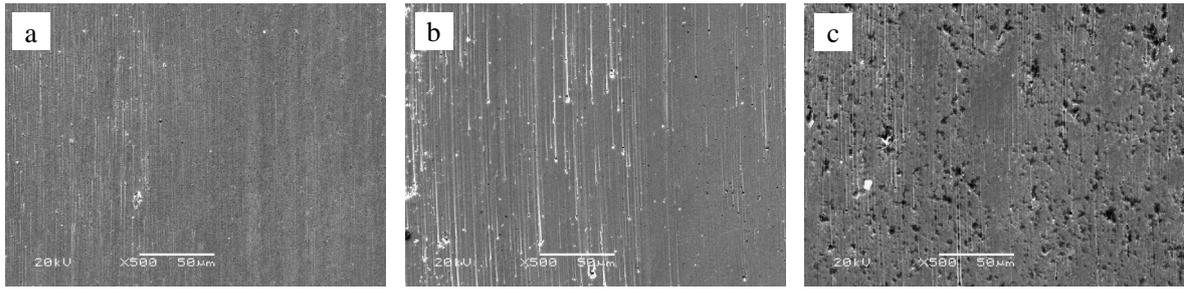


图8 NiAl覆层的摩擦磨损SEM照片:(a)、(b)和(c)分别对应样品1、2和3磨损表面形貌

Fig.8 SEM morphologies of the worn surface of NiAl coatings: (a), (b), and (c) corresponding to samples 1, 2, and 3, respectively

脆性断裂,产生了较多的磨粒,大量磨粒参与摩擦过程构成典型的三体磨粒磨损形式,从而导致样品3的磨损表面出现了大量严重的剥落坑洞和犁沟。结合前文对3个样品的微观组织结构和横断面断裂形式及其摩擦因数的变化趋势可以得出,激光功率密度对NiAl金属间化合物覆层的组织结构有十分重要的影响,覆层的组织结构决定了覆层材料的摩擦磨损性能,通过选择适宜的激光熔覆工艺参数可以制备出结构精细,抗磨性能良好的NiAl金属间化合物覆层材料。

3 结论

(1) 利用激光熔覆技术原位合成了单相 NiAl 金属间化合物覆层,激光工艺参数对 NiAl 覆层的显微组织结构有重要的影响,通过选取适宜的工艺参数可以原位合成出显微组织结构精细、致密,内部无裂纹和孔洞,与基底形成良好冶金结合的 NiAl 覆层。

(2) 激光功率密度对NiAl覆层的显微组织结构和显微硬度分布有明显的影响,在较低的功率密度工艺条件下制备的NiAl覆层具有精细的显微组织结构和较高的均匀分布的显微硬度值,并且表现出了较好的抗摩擦磨损性能。

参考文献:

- [1] Darolia R. NiAl alloys for high-temperature structural applications [J]. *J Metals*, 1991, 43(3): 44-49.
- [2] Miracle D B. The physical and mechanical properties of NiAl [J]. *Acta Metall Mater*, 1993, 41(3): 649-684.
- [3] Bowman R R, Noebe R D, Raj S V, et al. Correlation of deformation mechanisms with the tensile and compressive behavior of NiAl and NiAl(Zr) intermetallic

alloys [J]. *Metall Trans A*, 1992, 23(5): 1493-1508.

- [4] Guo J T, Sheng L Y, Tian Y X, et al. Effect of Ho on the microstructure and compressive properties of NiAl-based eutectic alloy [J]. *Mater Lett*, 2008, 62(23): 3910-3912.
- [5] Lasalmonie A. Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines? [J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10-11): 1123-1129.
- [6] Albitzer A, Espinosa-Medina M A, Casales M, et al. Corrosion performance of NiAl intermetallic with Mo, Ga and Fe in neutral and alkaline media [J]. *J Appl Electrochem*, 2004, 34: 1141-1145.
- [7] Ding Y, Zhang Y, Northwood D O, et al. PVD NiAl intermetallic coatings: microstructure and mechanical properties [J]. *Surf Coat Tech*, 1997, 94-95: 483-489.
- [8] Chen Y, Wang H M. Microstructure and wear resistance of laser-melted TiC reinforced nickel aluminide dual phase matrix in situ composite [J]. *Intermetallics*, 2006, 14(3): 325-331.
- [9] Yang S L, Wang F H, Sun Z G, et al. Influence of columnar microstructure of a sputtered NiAl coating on its oxidation behavior at 1000 °C [J]. *Intermetallics*, 2002, 10(5): 467-471.
- [10] Yu Y J, Zhou J S, Chen J M, et al. Preparation, microstructure and tribological properties of Ni₃Al intermetallic compound coating by laser cladding [J]. *Intermetallics*, 2010, 18(5): 871-876.

作者地址: 兰州市天水中路 18 号

730000

中科院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室

Tel: 1389 345 6092

E-mail: yanglianbin_2008@163.com