

文章编号: 0258-7025(2006)07-0987-06

原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层

牛 薪, 晁明举, 王文丽, 袁 斌, 梁二军

(郑州大学物理工程学院教育部材料物理重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘要 激光熔覆技术是金属材料表面强化和改性的有效方法之一。利用该技术, 在 A3 钢表面激光熔覆预置涂层, 成功制备出了原位生成 NbC 颗粒增强的镍基复合涂层, 并进行了硬度、摩擦性能测试, X 射线衍射 (XRD) 和显微组织分析。扫描电镜 (SEM)、能谱分析 (EDS) 和 X 射线衍射分析结果表明, 原位生成 NbC 颗粒增强的镍基复合涂层与基材呈现良好的冶金结合, 熔覆层的组织为先共晶析出的树枝晶 (Cr, Fe 碳化物相) 和原位生成的 NbC 颗粒相均匀分布在 $\gamma(\text{Ni-Fe})$ 基体中。硬度测试和摩擦磨损实验表明, 激光熔覆原位生成 NbC 颗粒增强镍基复合涂层平均硬度高达 $\text{HV}_{0.3} 1200$, 耐磨性是纯 Ni60 激光熔覆层的 2.5 倍。分析认为, 其硬度和耐磨性提高的原因在于涂层中形成了大量的、原位生长的 NbC 颗粒增强相, 且均匀分布于基体中。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 原位生成; 碳化铌; 显微组织; 耐磨性

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

In Situ Synthesized NbC Particulate Reinforced Ni-Based Composite Coatings by Laser Cladding

NIU Xin, CHAO Ming-ju, WANG Wen-li, YUAN Bin, LIANG Er-jun

(Department of Physics & Key Laboratory of Material Physics of Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract Laser cladding is the one of the efficient methods for the surface hardening and modifying of metal material. Using this technology, NbC particulate reinforced Ni-based composite coating has been successfully in situ synthesized on steel A3 substrate by prior to pasting. The microstructure observation and hardness test on the cross-section of the laser clad layer were performed. And that X-ray diffraction (XRD) analysis and tribotesting on the surface of the coatings were also accomplished. The microstructural and metallographic analyses by a scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffractometer reveal that the coating epitaxial growing from the substrate with excellent bonding between the coating and substrate is ensured by the strong metallurgical interface and suggest the presence of the in situ synthesized NbC particles in the clad layer. These NbC particles together with the carbide dendrites present as reinforcements of the composite coatings and are homogeneously disperse in the $\gamma(\text{Ni-Fe})$ matrix. The experimental results show that the composite coating gives high average hardness of $\text{HV}_{0.3} 1200$ and excellent wear resistance, which is 2.5 times as high as that of pure Ni60 coatings. The improvement of wear resistance is due to the presence of the substantive in situ synthesized NbC particles and their homogenous distribution in the coatings.

Key words laser technique; laser cladding; in-situ synthesis; NbC; microstructure; wear resistance

收稿日期: 2005-11-29; 收到修改稿日期: 2006-02-08

基金项目: 河南省高校青年骨干教师计划 (2002-218) 和河南省教育厅自然科学研究计划 (200510459005, 2006140009) 资助项目。

作者简介: 牛 薪 (1979—), 男, 河南兰考人, 郑州大学硕士研究生, 主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail: niuxin2002v@sohu.com

导师简介: 晁明举 (1964—), 男, 河南泌阳人, 郑州大学物理工程学院教授, 硕士生导师, 目前研究方向为激光与物质的相互作用和激光加工技术。E-mail: chaomingju@zzu.edu.cn

1 引 言

激光熔覆金属陶瓷涂层是材料表面改性中的一项重要技术,它成功地将金属的高强度、高塑韧性和陶瓷的高熔点、高化学稳定性、高硬度和抗磨损等性能相结合,大大提高了材料的表面性能,具有很好的发展前景^[1~8]。颗粒增强金属基复合材料按增强体的加入方式可分为外加颗粒增强金属基复合材料和原位析出颗粒增强金属基复合材料。原位析出颗粒增强金属基复合材料的增强体是从金属基体中原位形核、长大的热力学稳定相,因此,增强体表面无污染,与金属基体浸润性好,避免了与基体相容性不良的问题,且界面结合强度高,增强颗粒细小、分布均匀^[1~9]。目前研究较多的是 Ti, W, Zr, Mo 的碳化物、硼化物、氮化物等^[4,10]。

碳化铌(NbC)为立方晶体,相对密度 8.47,显微硬度 >235 GPa (>2400 kg/mm²),比刚玉还硬,弹性模量 338000 N/mm²,热膨胀系数 $6.65 \times 10^{-6}/K$,不溶于冷热盐酸、硫酸、硝酸^[11]。由于 NbC 硬度大、熔点高、高温性能良好,因此它在表面强化和改性技术中有着重要的用途^[12~14]。本文以 Ni60+(Nb₂O₅+C)合金混合粉末为熔覆材料,采用预涂法,在 A3 钢上制备出了原位生成 NbC 颗粒增强的镍基复合涂层。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验用基材为 A3 钢,其化学成分(质量分数(*w*))为: $w(C) = 0.14 \sim 0.22$, $w(Si) = 0.12 \sim 0.30$, $w(Mn) = 0.40 \sim 0.65$, $w(P) \leq 0.045$, $w(S) \leq 0.055$,其余为 Fe,试样尺寸 100 mm×35 mm×20 mm。实验前将待涂敷面用砂纸打磨并用丙酮清洗干净。熔覆粉末为 Ni60+(Nb₂O₅+C)合金粉末。Ni60 粉末成分如表 1 所示,粒度-150~+320 目;Nb₂O₅ 纯度>98%,粒度≤45 μm;C 为分析纯的石墨粉,纯度99.85%,粒度≤35 μm。

表 1 Ni60 合金粉末成分(质量分数)

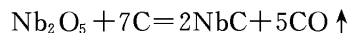
Table 1 Composition of Ni60 alloy (*w*)

Element	C	Si	B	Cr	Fe	Ni
<i>w</i>	0.8~1.0	3.5~5.5	3~4.5	16	<10	Bal

2.2 实验方法

(Nb₂O₅+C)粉末按下述反应的摩尔比进行配

比:



实验用 Ni60+(Nb₂O₅+C)合金粉末中(Nb₂O₅+C)的加入量(质量分数)分别为 10%,15%和 20%。将按比例配好的合金粉末在 QM-ISP04 行星球磨机中研磨均匀,将混合均匀的熔覆粉末用特制的黏结剂预涂在清洗干净的试样上,预涂层厚度为 1.8 mm,在空气中自然干燥 3 h 以上。

实验用激光器为 TJ-HL-5000 横流连续波 CO₂ 激光器,工作模式为多模。实验中使用焦距 300 mm 的 GaAs 透镜聚焦光束,激光光束垂直入射样品表面,离焦量 50 mm,扫描速度固定为 2 mm/s,激光功率分别为 1.2 kW,1.4 kW,1.6 kW,1.8 kW 和 2.0 kW。

将熔覆后的试样沿垂直于扫描方向线切割,横截面抛光后用高氯化铁溶液腐蚀。在 4XB-TV 金相显微镜和 Jeol JSM-6700F 扫描电镜(SEM)下观察显微组织,利用扫描电镜附件 Inca Energy 能谱仪(EDS)拍摄能谱分析图谱,进行成分分析。在 HXD-1000 显微硬度仪上测试显微硬度,利用 D/MAX-3B 型转靶 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层的相构成。摩擦实验在 MRH-3 高速环块磨损试验机上进行。上试样为 12 mm×12 mm×19 mm 块,摩擦面(熔覆面)尺寸为 12 mm×19 mm,下试样为标准环(GCr15),硬度 HRC60.5。摩擦实验参数为:滑动速度 54.07 m/min,持续时间 900 s,法向载荷 300 N,大气室温无润滑滑动摩擦。使用分析天平(精度 0.1 mg)称量试块摩擦前后质量,计算摩擦磨损损失重。

3 实验结果及分析

3.1 熔覆层形貌

对(Nb₂O₅+C)加入量(质量分数)分别为 10%,15%和 20% 的各个试样,在激光功率分别为 1.2 kW,1.4 kW,1.6 kW,1.8 kW 和 2.0 kW 下进行单道和多道搭接激光熔覆,均可连续成形。对三种(Nb₂O₅+C)加入量的试样分别做 X 衍射能谱,结果表明当 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C})$ 加入量为 15% 时,NbC 峰值最为显著,并且在此成分下熔覆层表面光滑,形貌最好,平均硬度最高。当 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C})$ 加入量为 20% 时,熔覆层形貌变差,表面出现凹陷。综合形貌观察,X 射线衍射图谱和硬度测量,当 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C})$ 加入量为 15%,激光功率 1.4 kW 时,可获得表面连续、光滑、硬度高、含有原位生成 NbC 颗粒的熔覆层。

3.2 显微组织

图 1(a), (b), (c) 分别为在激光输出功率 1.4 kW, 扫描速率 2 mm/s 条件下, 激光熔覆 Ni60 + 质量分数为 15% ($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$) 合金粉末的涂层底部、中部和上部的扫描电镜图像。由图 1(a) 可见, 在基底和涂层间存在一狭窄的界面冶金结合带(厚度约为 $30\mu\text{m}$), 涂层的组织呈现定向快速凝固特征, 为逆热流方向生长的树枝晶结构, 且在其间弥散分布有大量的白色颗粒相; 在涂层中部(图 1(b)), 其组织的主要特征仍然是树枝晶结构, 且生长方向基本上沿同一方向, 枝晶间存在大量的白色颗粒相; 在涂层上部(图 1(c)), 树枝晶结构不再呈现定向生长, 且白色颗粒分布均匀。图 1(d) 为涂层中部的大面积成分像($200\times$), 整个区域内白色颗粒相均匀分布。

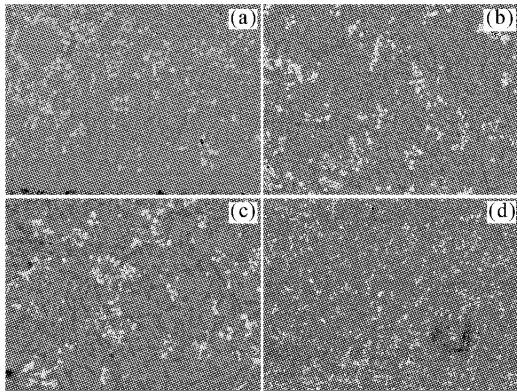


图 1 Ni60+[w($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$)=15%]的熔覆层的扫描电镜像

(a) 底部; (b) 中部; (c) 上部; (d) 中部低倍

Fig. 1 SEM micrograph of (a) lower, (b) middle, (c) upper and (d) bigger area of middle zone in the clad layer of Ni60+[w($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$)=15%]

由于在熔池底部, 温度梯度 G 最大, 凝固速率 R 最小, 凝固首先以无晶核、直接在基底上通过晶体外延附生的方式生长出一层平面晶; 随着固/液界面的推进, G 逐渐减小, R 逐渐增大, G/R 减小, 凝固组

织转变成成为树枝晶甚至成为等轴晶^[15,16]。由于在 Ni60 合金粉末中加入 ($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$) 粉末, 使得熔覆粉末的化学成分发生了变化, 可能导致新相的形成, 因此在涂层中出现了白色颗粒相^[17~19]。

图 2 是该试样熔覆层中部的 X 射线衍射图谱, 熔覆层的相成分主要为: NiFe, NbC, Cr_2C , $\text{Cr}_5\text{Si}_3\text{C}$ 等, 其中 NbC 峰很明显, 表明在熔覆层中有 NbC 相存在。

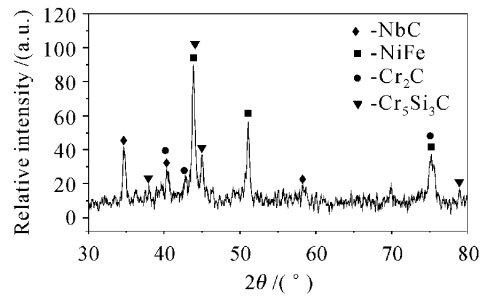


图 2 Ni60+[w($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$)=15%]熔覆层的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction spectra of the clad layer of Ni60+[w($\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{C}$)=15%]

图 3(a) 为涂层中部的扫描电镜像, 其组织主要包括三种相: 白色的颗粒相(针状、菱形、块状)、深灰色的树枝相(卵状和针状相)和浅灰色相。图 3(b), (c), (d), (e), (f) 和 (g) 分别为这三种相的能谱分析图谱(分别对应于图 3(a) 中的点 1, 2, 3, 4, 5 和 6), 表 2 是这三种相的能谱成分分析结果。从图 3(b), (c), (d) 和表 2 可知, 白色相(图 3(a) 中点 1, 2 和 3) 中富含 Nb 和 C, 结合图 2, 可判断白色颗粒相应为 NbC, 为先共晶析出的颗粒增强相。从图 3(e) 和表 2 可知, 深灰色相中富含 Cr 和 Fe, 一定量的 C 和 Ni, 结合图 2, 它应为先共晶析出的强化相 Cr_2C , 其中 Cr 原子可部分地被 Ni 或 Fe 原子置换。由图 3(f), (g) 和表 2 可知, 大量的浅灰色相中富含 Ni, Fe, 结合图 2, 它应为 $\gamma(\text{NiFe})$ 固溶体, 是涂层的基体。

表 2 能谱成分分析(质量分数)

Table 2 Composition related to Fig. 3 by EDS investigation (w)

	C	Si	Cr	Fe	Ni	Nb	Total
Spectrum 1	21.14	0.01	2.64	3.50	7.80	64.91	100.00
Spectrum 2	14.94	0.17	2.43	2.09	3.23	77.14	100.00
Spectrum 3	13.18	0.26	3.44	2.29	4.50	76.33	100.00
Spectrum 4	7.35		57.44	25.26	9.95		100.00
Spectrum 5	4.20	2.13	4.11	26.84	62.29	0.43	100.00
Spectrum 6	1.31	4.66	3.80	26.41	63.41	0.42	100.00

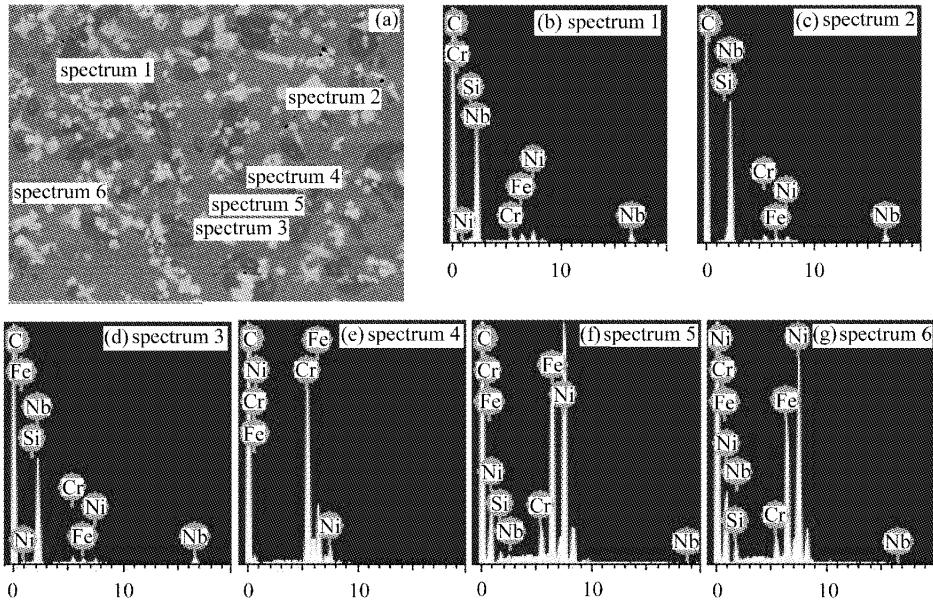


图 3 (a) Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%]熔覆层中部扫描电镜像及(b, c, d, e, f, g)对应点的 EDS 图谱
 Fig. 3 (a) Typical SEM micrograph of the Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] coatings and (b, c, d, e, f, g) corresponding EDS spectra

综上所述, Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%]激光熔覆层组织为先共晶析出的 Cr, Fe 的碳化物枝状强化相和原位生成的 NbC 颗粒增强相分布在 γ (NiFe) 基体中, 并且原位自生的 NbC 颗粒在整个熔覆层中分布均匀。大量 NbC 颗粒的形成且先共晶析出, 成为新的异质核, 大大提高了结晶形核率, 使得涂层组织得到均匀细化。

3.3 显微硬度

图 4 给出了在载荷约 3 N, 保持时间 15 s 条件下

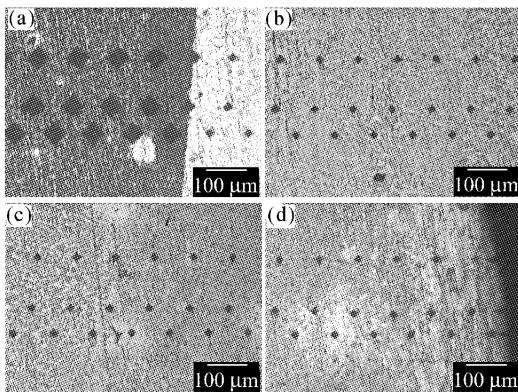


图 4 Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%]试样横截面硬度压痕照片
 (从(a)至(d)依次为基材、熔覆层底部、中部和顶部)

Fig. 4 Impressions made by a Vicker's micro-hardness tester on the substrate, bottom, center and upper region of the cross-section of Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] coatings from (a) to (d), respectively

进行维氏显微硬度测试时, 该试样横截面上的压痕照片。从图中可以看出, 熔覆层底部、中部和顶部的压痕尺寸基本一致, 表明熔覆层的硬度较为均匀。图 5 为 Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%]涂层沿层深方向的硬度分布曲线。除熔覆层底部外, 由于涂层组织中有原位自生 NbC 的白色颗粒增强相的新相形成, 同时非平衡快速凝固过程使得涂层组织细小均匀, 因而该涂层具有很高的硬度且沿层深方向分布均匀, 硬度一般在 HV_{0.3} 1000~1300 之间(平均硬度约为 HV_{0.3} 1200)。而靠近界面(涂层/基材)的熔覆层底部, 由于基材对涂层的稀释作用, 因此熔覆层硬度逐渐降低至基材硬度。

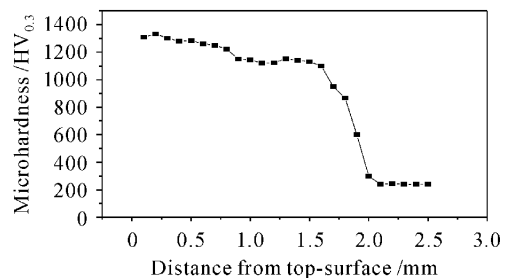


图 5 Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%]熔覆层显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution in the cross-section of Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] coatings

3.4 摩擦实验

图 6 是在载荷 300 N, 大气环境、干摩擦条件下, Ni60 熔覆层和 Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] 熔覆层的摩擦磨损失重, 从图中可以看出, 与 Ni60 熔覆层相比, NbC/Ni 熔覆层的耐磨性提高了 1.5 倍。图 7(a) 和 (b) 分别是 Ni60 熔覆层与原位自生 NbC/Ni 熔覆层的摩擦表面形貌图。Ni60 熔覆层摩擦表面既有深的犁沟, 又发生严重黏着, 表面上布满块状磨屑脱落的痕迹和许多即将脱落的磨屑, 而原位自生 NbC/Ni 熔覆层的摩擦表面非常光滑, 无明显划痕和黏着痕迹, 仅有极微小的脱落, 表明涂层具有优良的抵抗滑动摩擦磨损的能力。分析认为, NbC/Ni 涂层中原位自生的 NbC 颗粒增强相是其耐磨性得以大大提高的关键因素。具有很高硬度的、占涂层一定体积分数的、原位生成的 NbC 颗粒增强相的存在, 使涂层具有很高的硬度, 对磨偶件微小凸体难以有效压入产生犁削磨损, 只能依靠轻微擦划缓慢的磨耗涂层, 以致于涂层的磨损表面非常光滑, 划痕十分轻微。此外, 涂层组织细小、均匀, 赋予其优良的强韧性配合, 减少了涂层在磨损过程中产生裂纹和显微剥落的可能性, 因而激光熔覆 NbC/Ni 复合涂层表现出优良的抗干滑动摩擦磨损能力。

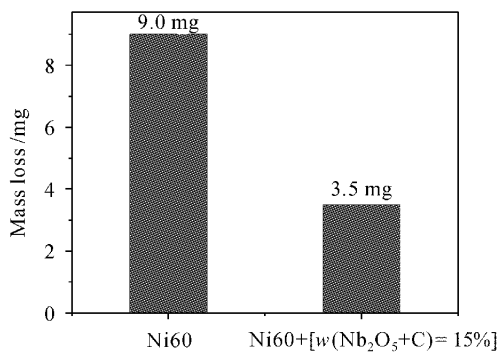


图 6 摩擦磨损失重

Fig. 6 Wear and tear mass loss of the specimens

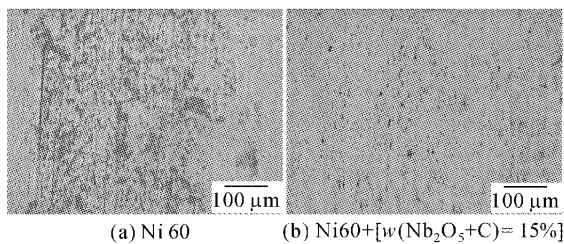


图 7 磨损表面形貌

Fig. 7 Worn pattern of the specimens

4 结 论

1) 激光熔覆 Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] 合金粉末, 可以获得树枝晶(金属碳化物强化相)和原位自生 NbC 颗粒双重强化的复合涂层, 且原位自生 NbC 颗粒在涂层中分布均匀。熔覆层成形连续且表面光滑。

2) 原位自生 NbC 颗粒增强的镍基熔覆层具有高硬度(平均硬度达 HV_{0.3}1200), 与纯 Ni60 熔覆层相比, 耐磨性提高 1.5 倍。涂层中原位自生的 NbC 颗粒增强相是其耐磨性得以大大提高的关键因素。

3) Ni60+[w(Nb₂O₅+C)=15%] 激光熔覆层的组织为先共晶析出的 Cr, Fe 的碳化物枝状强化相和原位生成的 NbC 颗粒增强相分布在 γ(NiFe) 基体中。

参 考 文 献

- Xiaolei Wu. Rapidly solidified nonequilibrium microstructure and phase transformation of laser-synthesized iron-based alloy coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, **115**(2-3):153~162
- Sun Ronglu, Liu Yong, Yang Dezhuang. Microstructure and tribological properties of NiCrBSi-TiC laser clad layer on titanium alloy substrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 659~662
孙荣禄, 刘 勇, 杨德庄. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的组织和摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 659~662
- D. W. Zeng, C. S. Xie, M. Q. Wang. In situ synthesis and characterization of Fe_p/Cu composite coating on SAE 1045 carbon steel by laser cladding [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, **A344**(1-2):357~364
- Zhang Qingmao, He Jinjiang, Liu Wenjin *et al.*. Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **162**(2-3):140~146
- Si Songhua, Yuan Xiaomin, He Yizhu *et al.*. Microstructures and properties of laser clad Ni-based metal-ceramics layers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):759~762
斯松华, 袁晓敏, 何宜柱 等. 激光熔覆镍基金属陶瓷涂层的组织性能研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):759~762
- Ma Ying, Hao Yuan, Kou Shengzhong *et al.*. Fabrication methods of metal matrix composites in-situ [J]. *Materials Review*, 2002, **16**(12):23~26
马 颖, 郝 远, 寇生中等. 原位自生增强金属基复合材料的制备方法[J]. *材料导报*, 2002, **16**(12):23~26
- Tian Nailiang, Du Rongjian, Zhou Changchi. Study on stress status of WC doped Ni-based alloy by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):505~508
田乃良, 杜荣建, 周昌炽. 激光熔覆添加碳化钨的镍基合金应力状况研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):505~508
- Wu Ping, Jiang Enyong, Zhou Changchi *et al.*. Microstructure and properties of Ni/WC composite coating prepared by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):357~360
吴 萍, 姜恩永, 周昌炽 等. 激光熔覆 Ni/WC 复合涂层的组织和性能[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):357~360

- 9 Liu Xiubo, Wang Huaming. Study on wear and high temperature oxidation properties of laser clad metallic silicide composite coatings on TiAl intermetallic alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1143~1149
刘秀波,王华明. TiAl 合金激光熔覆金属硅化物复合材料涂层耐磨性和高温氧化性能研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(8):1143~1149
- 10 Sen Yang, Na Chen, Wenjin Liu *et al.*. Fabrication of nickel composite coatings reinforced with TiC particles by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, **183**:254~260
- 11 Le Zhiqiang, Bo Shengmin, Wang Guangjian. Handbook of Fine Inorganic Compounds [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2001. 862~863
乐志强,薄胜民,王光建 主编. 无机精细化学品手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2001. 862~863
- 12 Zhou Juqiu, Huang Lieru, Tan Rishan *et al.*. Production and applications of TaC & NbC in China [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1998, **27**(1):26~31
周菊秋,黄列如,谭日善 等. 中国钽、铌碳化物的生产和应用[J]. 稀有金属材料与工程, 1998, **27**(1):26~31
- 13 Li Shunpu, Zhao Deqian, Chen Xichen. Character of nucleation and branching of strengthening phase in Ni-NbC alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1995, **31**(9):405~410
李顺朴,赵德乾,陈熙琛. Ni-NbC 合金中强化相的形核与分支特点[J]. 金属学报, 1995, **31**(9):405~410
- 14 Dong Zhizhong, Liu Wenxi, Chen Jinming *et al.*. Effect of NbC precipitation on microstructure and shape memory recovery of FeMnSiCrNi shape memory alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, **32**(11):927~929
董治中,刘文西,陈金铭 等. NbC 对 FeMnSiCrNi 合金组织与记忆性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, **32**(11):927~929
- 15 R. Vilar. Laser cladding [J]. *The International Journal of Powder Metallurgy*, 2001, **37**(2):31,34~48
- 16 Xinlin Wang, Shihong Shi, Qiguang Zheng. Wear resistance of laser cladding and plasma spray welding layer on stainless steel surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):151~153
- 17 Li Qiang, Wang Fuchi, Lei Tingquan *et al.*. Microstructures and friction and wear properties of laser clad NiCrBSiC alloy [J]. *Chinese J. Nonferrous Metals*, 1998, **8**(2):201~205
李 强,王富耻,雷廷权 等. 激光熔覆 Ni-Cr-B-Si-C 合金的组织及其摩擦磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 1998, **8**(2):201~205
- 18 Niu Xin, Chao Mingju, Zhou Xiaowei *et al.*. Research on in-situ synthesis of B₄C particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1583~1588
牛 薪,晁明举,周笑薇 等. 激光熔覆原位生成 B₄C 颗粒增强镍基复合涂层的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11):1583~1588
- 19 Chao Mingju, Liang Erjun, Zhao Dong. Effect of TiO₂ on the laser cladding layers of Ni based alloy on 45# steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):947~952
晁明举,梁二军,赵 栋. TiO₂ 对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的影响[J]. 中国激光, 2003, **30**(10):947~952