

40Cr 刀具钢表面激光熔覆钴基碳化物复合涂层的组织与性能

李 闯 刘洪喜 张晓伟 陶喜德 蒋业华

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093

摘要 以 WC、TiC、Co 和 Co50 合金粉末为原料, 通过设计不同的成分配比, 在 40Cr 刀具钢表面激光熔覆了 WC/Co、WC/Co50 和 WC-TiC/Co50 钴基碳化物复合涂层。借助 XRD、OM、SEM 和 EDS 等表征手段分析了粉末成分配比和激光熔覆工艺参数对刀具表面复合涂层物相结构、宏观形貌和微观组织的影响。结果表明, 当激光功率为 4.2 kW, 扫描速度为 350 mm/min 时, 制备的 WC/Co50 和 WC-TiC/Co50 复合涂层表面形貌良好, 平整连续且无宏观裂纹。硬度测试和摩擦磨损试验表明, 复合涂层具有高的硬度和良好的耐磨性, 最高显微硬度达到 1211 HV_{0.2}, 最低磨损失重 2.1 mg, 分别为基材的 3.03 倍和 34.4%。熔覆层中大量存在的 WC、TiC 以及原位自生的 W₂C、Fe₃W₃C 等碳化物增强相对提高复合涂层的硬度和耐磨性起到了主要作用。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 陶瓷复合涂层; 40Cr 钢; 显微组织; 磨损性能

中图分类号 TN249; TG156.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1103002

Microstructure and Property of Co-Based Carbide Composite Coating Fabricated by Laser Cladding on 40Cr Tool Steel Surface

Li Chuang Liu Hongxi Zhang Xiaowei Tao Xide Jiang Yehua

Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract WC/Co, WC/Co50 and WC-TiC/Co50 carbide composite coatings are prepared by laser cladding process on 40Cr tool steel surface through designing different composition ratio of WC, TiC, Co and Co50 powder. The influence of laser cladding process parameters and powder composition ratio on the composite coating phase structure, macroscopic morphology and microstructure are investigated by X-ray diffraction (XRD), optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS), respectively. The results show that the WC/Co50 and WC-TiC/Co50 composite coatings surface morphology is good, smooth and without continuous macroscopic crack under the laser power of 4.2 kW and scanning speed of 350 mm·min⁻¹ conditions. Hardness and friction wear tests indicate that the composite coating has high hardness and good wear resistance, the highest microhardness is 1211 HV_{0.2} and the minimum wear weight loss is 2.1 mg. The maximum microhardness and minimum wear weight loss is 3.03 times and 34.4% of the substrate, respectively. A lot of WC, TiC and *in-situ* W₂C, Fe₃W₃C carbide reinforced phases play a major role on improving the cladding coating hardness and wear resistance.

Key words laser technique; laser cladding; ceramic composite coatings; 40Cr steel; microstructure; wear behavior

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 310.1515

1 引 言

40Cr 钢是机械制造业使用最为普遍的钢之一。调质处理后的 40Cr 钢具有良好的综合力学性能, 良好的

收稿日期: 2015-04-15; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61368003, 51165015)

作者简介: 李 闯(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆表面改性方面的研究。E-mail: 2480283086@qq.com

导师简介: 刘洪喜(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事离子束和激光束表面改性方面的研究。E-mail: piiliuhx@sina.com

低温冲击韧性、淬透性和低的缺口敏感性。切削性能好,当硬度为HB174~229时,相对切削加工性可达60%。广泛被用做制造模具、齿轮、轴、蜗杆、套环、刀具等机械零件的候选材料^[1-6]。但作为刀具材料使用时,难以同时满足高温硬度和耐磨性,必要的抗弯强度、冲击韧性、红硬性和冷脆性要求。长期以来,刀具生产基本上都是将粉末冶金技术制造出来的硬质合金刀片经高频感应钎焊或火焰钎焊工艺连接到钢刀杆上,其中主要涉及到两方面问题,一是粉末冶金制造硬质合金刀片工艺的稳定性,二是刀片与刀杆钎焊工艺的稳定性,这无论是对生产出来刀片的切削性能还是对整个刀具生产过程成本的控制都是不利的^[7-9]。另外,近年来国内外机械工程行业的经营状况也面临着较之过去更大的风险,这就要求行业进行技术革新。因此,在改善刀具切削性能的前提下,设法改进刀具生产工艺对于促进机械工程材料发展、振兴国民经济具有十分重要的意义。

目前,通过优化结构设计和选择更理想材料来改善刀具使用寿命的途径已越来越困难,因而表面改性技术便得到了快速发展^[10-14]。相对于其他表面改性技术,激光熔覆具有稀释率较低、热影响区小、基材热变形小、熔覆层与基材呈牢固冶金结合、组织致密、适用范围广、过程易于实现自动化等优点。研究者们开始通过激光熔覆在低成本基材上制备出了多种满足使用性能要求的陶瓷涂层^[15-18]。但从目前的文献来看,有关激光修复工艺所用刀具材料品种比较单一,且大多集中于普通碳钢表面预置硬质合金粉末层设计和工艺参数优化等方面^[19-22],有关刀具钢表面激光熔覆钴基陶瓷复合涂层的研究几乎未见涉及。鉴于此,本文以WC、TiC、Co和Co50合金粉末为原料,通过自行设计不同的成分配比,在40Cr刀具钢表面激光熔覆了WC/Co、WC/Co50和WC-TiC/Co50钴基陶瓷复合涂层。分析了复合涂层的宏观形貌、显微组织和物相组成,重点研究了涂层的硬度和耐磨性,以期能为激光熔覆在刀具使用性能的改善方面提供理论和工艺基础。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料和涂层制备

实验基材选用经调质处理且尺寸为80 mm×40 mm×6 mm的40Cr钢,硬度为32~38 HRC。其主要合金元素成分(质量分数,%)如下:C 0.37~0.45, Si 0.17~0.37, Mn 0.5~0.8, Cr 0.8~1.1,其余Fe。实验前,所有试样需除去表面的油、锈和氧化物,然后经不同粒度的金相砂纸打磨、抛光处理,再用无水乙醇和丙酮各超声清洗10 min。熔覆材料是粒度为150目(约100 μm)的Co50合金粉末,其化学成分(质量分数,%)为:C 0.62, W 3.1, Si 3.4, B 2.25, Cr 20.0, Mo 5.0, Fe 5.0, Ni 14.0,其余Co。预置粉末按成分配比不同分为A、B、C三组,其中A组配比采用纯Co粉和90%WC(质量分数,%,下同);B组采用Co基自熔性合金粉末Co50和90%WC;C组为Co基合金粉末和85%WC并加入5%TiC。由于Co50粉和TiC、WC粉的物理性能存在差异,采用感量为0.1 mg的电子天平按上述比例称量好相应粉末,机械混合均匀后在真空干燥箱中干燥48 h,然后用有机粘接剂将其预置于40Cr钢表面,厚度约1.0 mm。

涂层制备在GS-TFL6000A型6 kW横流多模CO₂激光器及其配套的五轴四联动西门子数控机床和GS-TEL型激光同步送粉器上共同完成。激光功率为4.0~4.4 kW,圆形光斑直径为5 mm,扫描速度为300~400 mm·min⁻¹,离焦量为50 mm。采用同步侧向送粉,送粉量为20 g/min。氩气(纯度99.99%)侧向保护,气流量为16 L·min⁻¹。试样编号和具体的激光熔覆工艺如表1所示。

表1 试样编号和激光熔覆工艺参数

Table 1 Sample No. and experimental parameters in laser cladding process

Coating composition ratio (mass fraction, %)	Sample No.	Laser power <i>P</i> /kW	Scanning speed <i>V_s</i> / (mm·min ⁻¹)	Laser power density <i>P_a</i> / (kW·cm ⁻²)
90%WC+10%Co	A1	4.0	300	20.320
	A2	4.2	350	18.288
	A3	4.4	400	16.764
90%WC+10%Co alloy	B1	4.0	300	20.320
	B2	4.2	350	18.288
	B3	4.4	400	16.764
85%WC+10%Co alloy+5%TiC	C1	4.0	300	20.320
	C2	4.2	350	18.288
	C3	4.4	400	16.764

2.2 性能表征

将上述激光熔覆试样沿垂直于激光扫描方向切取 10 mm 制成 XRD 试样,通过 D/max-2200 型 X 射线衍射仪(Cu 靶 K α 线波长 1.5406 nm,管电压 40 kV,管电流 30 mA,衍射角范围 20°~90°,连续扫描模式)对涂层表面进行物相表征。自涂层表面沿垂直于激光扫描方向在中部切取 10 mm \times 6 mm \times 1 mm 制成金相试样,用王水对试样截面腐蚀 10 s 后在莱卡 DMI 5000M 型金相显微镜下进行显微组织观察。运用 Quanta 200 型扫描电镜(SEM)及其所附的 EDAX Genesis 2000 X-射线能谱仪(EDS)进一步分析熔覆层截面的显微组织和成分。采用 HV-1000ZDT 型自动转塔显微硬度计测量涂层试样沿截面深度方向的显微硬度分布,载荷 200 g,加载时间 15 s,每个试样取 10 个点求其平均值。

将试样制成尺寸为 ϕ 4 mm \times 15 mm 的上试样(每组 6 件),下试样对磨件是经热处理后硬度达到 50 HRC 的 Cr12MoV 冷作模具钢(ϕ 43 mm \times 3 mm 的圆盘形)。通过 MMU-5G 型摩擦磨损试验机测试熔覆涂层与基材的磨损性能。加载试验力 200 N,主轴转速 200 r \cdot min $^{-1}$,加载时间 30 min,预磨 2 min。试验前后用超声波清洗试样,烘干后用精度为 0.0001 g 的电子天平称重,以计算试样的磨损失重。

3 实验结果与分析

3.1 涂层表面质量

图 1 给出了不同成分配比下激光熔覆涂层试样 A2、B2、C2 的表面形貌。可以看出。A2 涂层的表面质量最差,C2 次之,B2 最好。C2 中由于加入了 TiC,涂层颜色加深。另外,A2 涂层表面出现过烧和孔洞现象,熔覆层不均匀、不连续,有较高的粗糙度,而采用加入了 B、Si、Ni 等其他元素的 Co 基自熔性合金粉末来替代纯 Co 金属粉末的 B2 涂层则表面光滑、平整、连续,无宏观裂纹和气孔等缺陷。主要是因为 Co 基自熔性合金粉末中 Si 和 B 元素的加入有利于脱氧造渣和自熔,提高了润湿性;同时,Ni 的添加还能够降低 Co 基合金涂层的热膨胀系数,缩减合金成分的熔化温度区间,亦利于改善涂层与基材的润湿性,有效减少了合金涂层的裂纹产生^[23]。



图 1 不同成分配比复合涂层的表面宏观形貌
Fig.1 Macro surface morphology of composite coatings in different component proportions

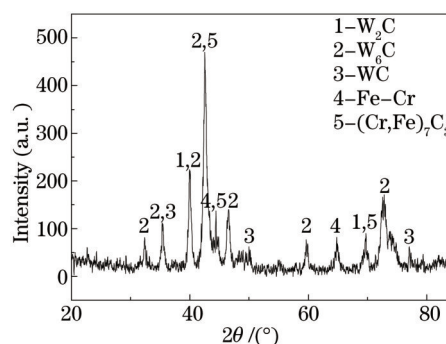


图 2 B2 试样复合涂层表面 XRD 图谱
Fig.2 XRD pattern of the laser cladding composite coating sample B2 surface

3.2 涂层 XRD 物相分析

图 2 是熔覆涂层试样 B2 表面的 XRD 图谱。通过比对标准 PDF 卡片,可知涂层主要由 WC、W₂C、Fe₃W₃C、(Cr, Fe)₇C₃ 和 (Fe, Cr) 固溶体等组成。W₂C、Fe₃W₃C、(Cr, Fe)₇C₃ 等新相的产生说明在激光熔覆过程中发生了一系列剧烈的物理化学变化,其中,预置 WC 颗粒在激光辐照作用下会部分发生分解,形成 W₂C,进而继续与熔覆层中的 Fe 结合生成 Fe₃W₃C。此外,熔覆层中 Co 基合金粉末中原有的 W 也可与 Fe 形成此类似 Fe₃W₃C 型的碳化物(具体反应如下):



3.3 涂层显微组织

图 3 是激光熔覆涂层试样 B2 的 OM 形貌。可以看出,所制备的 WC/Co 基复合涂层在光学显微镜下无裂纹和气孔缺陷,且涂层与基材结合紧密,结合区有一条明显的“白亮带”,表明熔覆涂层和基材之间形成了良

好的冶金结合。涂层与基材之间“白亮带”产生的原因是因为激光熔覆是一个快速加热快速冷却的过程,基材与金属工件台之间导热系数高、传热快,使得涂层底部与基材结合处的温度梯度大,但此处熔池中结晶速度较小,所以该处熔池中的金属凝固以平面晶形式生长并向前推移,随之形成很薄的平面柱状晶区,在光学显微镜下便表现出一条“白亮带”。此外,在熔覆层底部有很多较大的碳化物出现,这是由于加入的 WC 颗粒未完全溶解,在“下沉”过程中被保留下来所致。熔覆层中上部主要为等轴晶和树枝晶及枝晶间共晶组成[图 3(b)],这些组织形态的出现是由于激光作用后熔池内部复杂的凝固条件所决定的。

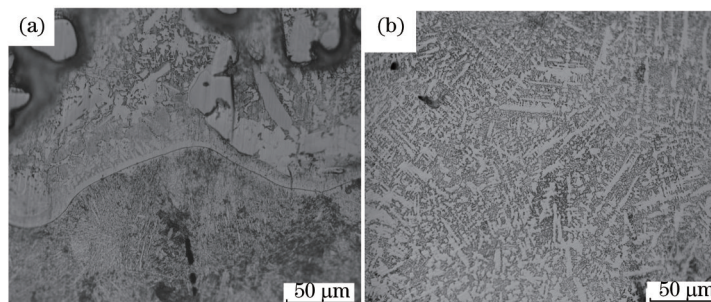


图3 B2熔覆涂层(a)底部和(b)中上部的OM形貌

Fig.3 OM images of (a) bottom region and (b) upper part region of the composite coating of sample B2 cladding

图4显示的是B2试样涂层截面中部和底部相应的SEM形貌。其中,熔覆层底部存在着尺寸较大的亮白色块状 WC(20~30 μm), WC 周围弥散分布的亮色片状组织主要为 WC 分解后与其他元素形成的碳化物 (Fe_3W_3C 和 W_2C), 黑色网状组织则是 Fe 和 $(Cr, Fe)_7C_3$ 的混合物, 在其中还固溶了少量 W、Cr, 这类网状组织分布于 WC 和 Fe_3W_3C 之间, 起到充当基体提供塑性的作用。相比熔覆层底部的 WC, 熔覆层中上部 WC 尺寸相对较小(小于 10 μm)。无论是中上部还是熔覆层底部, WC 的颗粒尺寸均小于预先加入的 WC 颗粒尺寸(大于 100 μm)。这说明在激光熔覆过程中, 由于激光的热作用使得 Co 基合金粉末先熔化形成熔池, WC 颗粒随之进入熔池, 温度继续升高, WC 表面发生熔化, 表面熔化的部分停留在液态熔池中随熔池一起发生对流; 未熔的部分则由于自身比重较大而在熔池中发生沉降, 一边下沉一边熔化分解, 最终尺寸较大的 WC 沉降到熔覆层底部, 而下沉过程中熔化和分解的 WC 发生脱碳反应, 最终形成 W_2C 和 Fe_3W_3C , 在凝固过程中被“冻结”在熔覆层中。

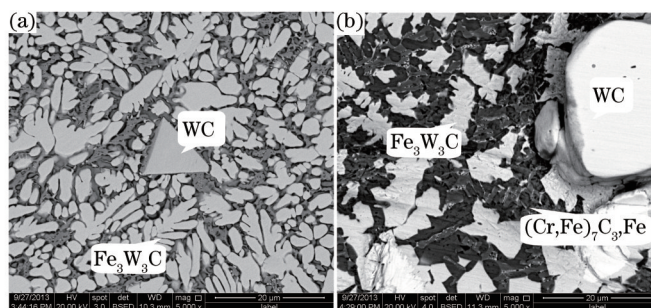


图4 B2熔覆涂层(a)中部和(b)底部的SEM形貌

Fig.4 SEM images of (a) middle region and (b) bottom region of the composite coating of sample B2 cladding

3.4 熔覆涂层硬度

图5是B2试样复合涂层截面自涂层表面到基材方向的硬度分布。可以看出,复合涂层显微硬度呈现比较均匀的梯度分布,自涂层表面向基材硬度逐渐递减,涂层表面硬度最大。其中,B2和C2试样复合涂层的平均显微硬度分别为 1127 $HV_{0.2}$ 和 1211 $HV_{0.2}$, 均远大于 40Cr 钢的 400 $HV_{0.2}$, 分别是基材的 2.82 和 3.03 倍。这种均匀的硬度梯度分布对于 40Cr 钢零件承受较大的载荷极为有利。由于 C2 和 B2 涂层的激光工艺参数完全相同, 但 C2 熔覆层中加入了 5%TiC, 故表现出其显微硬度要高于 B2。涂层具有较高的显微硬度, 一方面是由于熔覆层中外加的未熔 WC、TiC 具有极高硬度, 另一方面 WC 在分解后形成的 W_2C 和 Fe_3W_3C 也具有很高硬度。需要注意的是, 在激光束作用下, 熔覆层组织会存在一定的偏析和不均匀性, 因而表现出来的显微硬度值会存在一定波动。

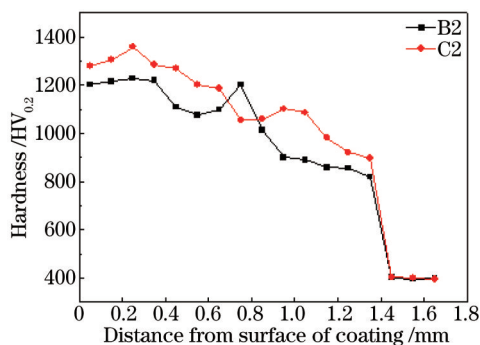


图5 复合涂层的显微硬度分布

Fig.3 Vick-hardness distributions of laser cladding composite coatings

3.5 涂层磨损性能

图6是基材和熔覆涂层试样在相同磨损条件下的磨损失重对比。可以看出,40Cr钢基材的磨损失重最大,为6.1 mg,激光熔覆复合涂层B2、C2的磨损失重比40Cr钢基材有大幅度减小,分别为2.8 mg和2.1 mg,是基材40Cr钢的45.9%和34.4%。表明激光熔覆陶瓷复合涂层可大大提高基材的耐磨性。由于在一定范围内,硬度越高,耐磨性越好,而C2熔覆层中加入了少量TiC, TiC的硬度要大于WC,故表现出C2涂层的耐磨性要略高于B2。另外,WC和TiC本身硬度很高,都是好的耐磨材料,在一定工艺参数的激光束作用下,其发生烧损和熔化的比例低,因而可以使WC和TiC的高硬度和耐磨性得以保留。

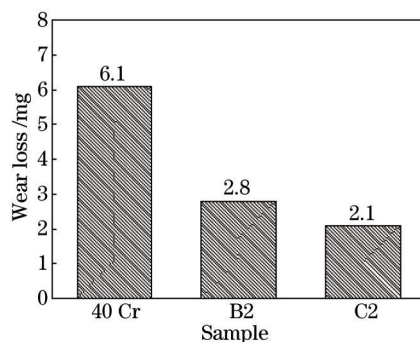


图6 40Cr钢基材和B2、C2涂层的磨损失重

Fig.6 Wear losses of 40Cr steel substrate and composite coatings of B2 and C2

4 结 论

通过向Co基自熔性合金粉末中加入B、Si、Ni等元素来替代纯Co金属粉末并设计不同的成分配比,在40Cr钢表面激光熔覆了表面形貌良好、无裂纹和孔洞,组织均匀致密的WC/Co、WC/Co50和WC-TiC/Co50钴基碳化物复合涂层。WC/Co50复合涂层中除主要物相WC外,还存在激光原位自生的W₂C、Fe₃W₃C和(Cr, Fe)₇C₃碳化物,这些碳化物硬质相以树枝晶、枝晶间共晶以及弥散形式分布于熔覆涂层中。复合涂层最高显微硬度达到1211 HV0.2,最低磨损失重为2.1 mg,分别是基材的3.03倍和34.4%。涂层中硬质相WC和TiC对提高激光熔覆钴基碳化物复合涂层的硬度和耐磨性起到了主要作用。

参 考 文 献

- 1 Wang Yaoli, Yu Hua, Shi Hongxin, *et al.*. Interface behavior of WC coatings on 40 Cr steel by electro-spark deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(8): 173-176.
王要利, 于 华, 石红信, 等. 40 Cr钢表面电火花沉积WC的界面材料热处理学报, 2013, 34(8): 173-176.
- 2 Yao Shuang, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.*. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coatings on H13 steel surface by laser *in-situ* synthesis[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003004.
姚 爽, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13钢表面激光原位自生TiC颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2014,

- 41(10): 1003004.
- 3 Honggang Dong, Lianzhen Yu, Hongming Gao, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of friction welds between TiAl alloy and 40 Cr steel rods[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3126–3133.
- 4 Liu Hongxi, Tang Shujun, Cai Chuanxiong, *et al.*. Microstructure and property of laser *in situ* preparation of Ni-based alloy composite coating on die steel surface[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603002.
刘洪喜, 唐淑君, 蔡川雄, 等. 模具钢表面激光原位制备 Ni 基金复合涂层的微结构与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603002.
- 5 Zhou Yefei, Gao Shiyu, Wang Jingjing. Microstructure–property of laser cladding high carbon Fe–based alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203001.
周野飞, 高士友, 王京京. 激光熔覆高碳铁基金组织性能研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203001.
- 6 He Qian, Su Huali, Liu Hongzhao, *et al.*. Research on 40 Cr steel for high–speed spinde laser transformation hardenin technics[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2192–2195.
何 强, 苏华礼, 刘宏昭, 等. 高速主轴用 40 Cr 钢的激光相变硬化工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2192–2195.
- 7 Kedong Zhang, Jianxin Deng, Youqiang Xing, *et al.*. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co–based TiAlN coated tools under different lubrication conditions[J]. Applied Surface Science, 2015, 326(1): 107–118.
- 8 Johannes Kümmel, Daniel Braun, Jens Gibmeier, *et al.*. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wearimprovement and built–up edge stabilisation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215(1): 62–70.
- 9 Hongxi Liu, Chuanqi Wang, Xiaowei Zhang. Corrosion and wear behavior of Ni60CuMoW coatings fabricated by combination of laser cladding and mechanical vibration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 621(1): 357–363.
- 10 Anqi Wu, Qibin Liu, Shuijie Qin. Influence of yttrium on laser surface alloying organization of 40 Cr steel[J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(10): 1004–1008.
- 11 Ting Wang, Dongpo Wang, Gang Liu, *et al.*. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824–1829.
- 12 Pei Yan, Jianxin Deng, Ze Wu, *et al.*. Friction and wear behavior of the PVD (Zr,Ti)N coated cemented carbide against 40Cr hardened steel [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 35(11): 213–220.
- 13 Hui Zhang, Yong Zou, Zengda Zou. Effects of CeO₂ on microstructure and corrosion resistance of TiC–VC reinforced Fe–based laser cladding layers[J]. Journal of Rare Earths, 2014, 32(11): 1095–1100.
- 14 J H Yao, Q L Zhang, F Z Kong. Laser remanufacturing to improve the erosion and corrosion resistance of metal components[J]. Laser Surface Modification of Alloys for Corrosion and Erosion Resistance, 2012: 320–354.
- 15 Qinying Wang, Yangfei Zhang, Shulin Bai, *et al.*. Microstructures, mechanical properties and corrosion resistance of Hastelloy C22 coating produced by laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 553 (3): 253–258.
- 16 Qingtang Li, Yongping Lei, Hanguang Fu. Laser cladding *in-situ* NbC particle reinforced Fe–based composite coatings with rare earth oxide addition[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 239(1): 102–107.
- 17 Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong, *et al.*. Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi–TiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration[J]. Acta Metallurgy Sinica, 2013, 49(2): 221–228 .
王传琦, 刘洪喜, 周 荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi–TiC 复合涂层中颗粒相行为特征[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 221–228.
- 18 Zhang Guofu, Song Tianmin, Yin Chengjiang, *et al.*. The effect of mechanical vibration welding on the microstructure of weld and HAZ [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2001, 22(3): 85–88.
张国富, 宋天民, 尹成江, 等. 机械振动焊接对焊缝及热影响区金相组织的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 85–88.
- 19 Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii, Tadashi Mizuno, *et al.*. Fabrication of nanostructured tool steel layer by combination of laser cladding and friction stir processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(11): 3397–3403.
- 20 Soundarapandian Santhanakrishnan, Fanrong Kong, Radovan Kovacevic. An experimentally based thermo–kinetic hardening model for high power direct diode laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(7): 1247–1259.
- 21 J Leunda, C Soriano, C Sanz, *et al.*. Laser cladding of vanadium–carbide tool steels for die repair[J]. Physics Procedia, 2011, 12A: 345–352.
- 22 Matej Pleterski, Tadej Muhič, Bojan Podgornik, *et al.*. Blanking punch life improvement by laser cladding[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(6): 1527–1537.
- 23 Shengfeng Zhou, Xiaoyan Zeng, Qianwu Hu, *et al.*. Analysis of crack behavior for Ni–based WC composite coatings by laser cladding and crack–free realization[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1646–1653.