

钛合金表面激光熔覆 h-BN 固体润滑涂层

王培, 叶源盛

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘要: 目的 优化钛合金激光熔覆固体润滑涂层的熔覆工艺参数, 提高钛合金表面耐磨性能。方法 采用 Nd:YAG 激光器, 分别在高功率和低功率条件下, 在 TC4 钛合金表面制备 h-BN 固体自润滑涂层。观察分析熔覆陶瓷层的宏观形貌、物相组成、显微组织和硬度, 采用摩擦磨损试验仪对熔覆层的摩擦学性能进行研究。结果 低激光功率下, 熔覆材料上浮流失严重, 熔覆层的相成分主要是 TiN, TiB, TiB₂ 等硬质相, 硬度较高, 存在裂纹。高激光功率下, 基材的熔化稀释较好地抑制了润滑相 h-BN 的上浮, 减少了溅射损失, 发生了包晶反应, 生成了单质金属 Ti, 熔覆层硬度低, 但摩擦磨损试验表明, 涂层中润滑相 h-BN 含量的增加使得形成了更好的润滑膜, 降低了摩擦系数。结论 在输出电流 400 A, 脉宽 5 ms, 频率 12 Hz, 扫描速度 120 mm/min, 搭接率 50% ~ 60% 的条件下进行激光熔覆, 所得熔覆层的表面状态平整, 耐磨性能最好。

关键词: 激光熔覆; TC4 钛合金; h-BN; 自润滑涂层; 摩擦系数; 耐磨性能

中图分类号: TG174.45

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)08-0044-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.008

Solid Self-lubricating Coatings on TC4 Titanium Alloy by Laser Cladding with h-BN

WANG Pei, YE Yuan-sheng

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the process parameters for laser cladding of solid self-lubricating coatings on titanium alloy, and improve the surface wear resistance of titanium alloy. **Methods** Using the Nd: YAG laser, h-BN (hexagonal boron nitride) solid self-lubricating coatings were prepared on the surface of TC4 titanium alloy under conditions of high power and low power, respectively. The macro morphology, layer phase composition, microstructure, hardness and wear resistance of the ceramic layer were analyzed, and the tribological property of the ceramic layer was studied using a friction and wear tester. **Results** At low laser power, there was severe floating loss of cladding material, and the phase composition of the cladding layer was mainly composed of TiN, TiB, TiB₂ and other hard phase components, the hardness was relatively high, with the presence of cracks. At high laser power, melting of the substrate inhibited the floating of the lubricating phase h-BN, reducing the sputtering loss, and peritectic reaction occurred, generating elemental metal Ti, the hardness value of the cladding layer was low, but the friction and wear tests showed increased h-BN content in the lubricating phase led to better formation of lubricating coating, further reducing the friction

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-05-11

Received: 2015-04-20; Revised: 2015-05-11

基金项目: 陕西省青年自然科学基金(2015JM5252)

Fund: Supported by the Youth Natural Fund of Shaanxi(2015JM5252)

作者简介: 王培(1984—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为稀有金属表面处理。

Biography: WANG Pei(1984—), Female, Master, Engineer, Research focus: surface treatment of metals.

coefficient. **Conclusion** Under the condition of output current 400 A, pulse width 5 ms, 12 Hz frequency, scanning speed 120 mm/min, overlapping rate 50% ~ 60%, the surface state of the laser cladding coating obtained was smooth and flat, and the friction resistance was the best.

KEY WORDS: laser cladding; TC4 titanium alloy; h-BN; self-lubricating coatings; friction coefficient; Wear resistance

钛的硬度低,耐磨性能差,在使用过程中由摩擦所导致的磨损失效是其应用的瓶颈,限制了其在极端工况条件下的使用^[1]。为了改善上述问题,人们利用等离子喷涂^[2]、PVD^[3]、CVD^[4]、化学镀^[5]和激光熔覆^[6-10]等方法在材料表面制备高硬度耐磨涂层,这些技术已获得广泛应用。但是在某些情况下,高硬度耐磨涂层会加剧对相对运动的摩擦副的磨损,因此需要在材料表面制备自润滑涂层,以大大降低摩擦系数,减轻材料表面的磨损。

以激光熔覆等为代表的激光表面改性技术,由于其能量密度高,热影响区小,熔覆层致密且厚度可控,熔覆层与基底可实现冶金结合,可以选择性地处理工件特定表面等优点,被认为是目前最有发展前景的技术之一。近年来,国内外不少研究人员开始利用激光熔覆制备自润滑涂层。章小峰等^[11]采用激光熔覆技术在 45 号钢表面熔覆 Ni45-CaF₂-WS 混合合金粉末,在激光熔覆过程中,WS₂ 发生了部分分解,形成了新的润滑相,复合涂层的摩擦系数较小,摩擦磨损性能获得改善。刘秀波等^[12]利用 Nd:YAG 激光器在 γ-TiAl 合金基体上制备 γ-Al₄C₃/TiC/CaF₂ 自润滑耐磨复合涂层,涂层的硬度高,摩擦系数和磨损率低。Zhang 等^[13]在不锈钢表面激光熔覆了 NiAl-Ag-hBN 和 Ni-hBN 自润滑涂层,涂层与基材呈冶金结合,表现出良好的自润滑性能。目前应用和研究较多的复合粉末体系主要是包括碳化物、氮化物、硼化物、氧化物在内的混合粉末。特别需要指出的是,固体润滑剂的添加形式可以是一种,也可以是多种。在实际应用中发现,因为使用需求的不同而进行多元组合,可以扩展其使用温度范围。

文中选用 h-BN 陶瓷粉末,采用激光熔覆技术制得与基体冶金结合良好的自润滑涂层,主要分析激光熔覆工艺参数对熔覆层的影响,拟为激光熔覆 h-BN 陶瓷自润滑涂层在工业上的广泛应用提供参考。

1 实验

1.1 材料

激光熔覆基材为尺寸 20 mm×20 mm×5 mm 的矩

形 TC4 钛合金块(Ti-6Al-4V),需先进行前处理,包括打磨抛光、丙酮清洗等。

熔覆材料为粒径 2 ~ 5 μm 的 h-BN 粉末。h-BN 具有良好的自润滑性能,它的结构类似于石墨的层状结构,属六方晶系,俗称白石墨。大多数情况下都选取金属-陶瓷混合粉末作为熔覆材料,才能得到较好的熔覆效果,而 h-BN 粉末的原子半径小,对熔融金属的润湿性比其他陶瓷粉末好,因此以纯 h-BN 陶瓷粉末进行熔覆。

Ti-6Al-4V 及 h-BN 的性能参数见表 1^[14]。

表 1 Ti-6Al-4V 和 h-BN 的参数
Tab. 1 Material properties of Ti-6Al-4V and h-BN

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点 /℃	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数 /℃ ⁻¹
Ti-6Al-4V	4.47	1660	7 ~ 16	9.6×10 ⁻⁶
h-BN	2.27	2973	35(1000℃)	1.2×10 ⁻⁶

1.2 激光熔覆

先用粘结剂将 h-BN 陶瓷粉末均匀涂覆在 TC4 钛合金基材表面,然后进行激光熔覆。激光熔覆采用 JHM-1GY-400D 型激光器,用氩气保护。最佳工艺选取原则是:材料与基体熔合充分,无缺陷,熔覆层表面质量平整。根据本项目组的前期研究,钛合金表面进行激光熔覆处理的最佳工艺参数范围为:输出电流 100 ~ 600 A,脉宽 2 ~ 10 ms,频率 5 ~ 15 Hz,扫描速度 100 ~ 200 mm/min,搭接率 50% ~ 60%,等等。功率太小时,基材稀释少,熔池浅,会产生裂纹等缺陷,但熔覆层表面硬度高,平整度好;功率过高时,对基体稀释严重,熔池深,熔覆层表面硬度低且平整度差。文中对表 2 的两组典型工艺参数进行分析。

表 2 两组典型激光熔覆工艺参数
Tab. 2 Two groups of typical process parameters of laser cladding

工艺号	电流 /A	脉宽 /ms	频率 /Hz	扫描速度 /(mm·min ⁻¹)	搭接率 /%
1	200	2.0	10	120	50 ~ 60
2	400	5.0	12	120	50 ~ 60

1.3 测试表征

在 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪上对熔覆层进行物相标定。采用 JSM-6460 钨灯丝扫描电镜对熔覆层的组织形貌进行观察。采用 HXD-1000TM 型电子显微硬度计测定熔覆层的显微硬度。

用 MS-T3000 摩擦磨损试验机测试熔覆层的摩擦磨损性能。通常在实验中需对试样进行充分预磨,使试样销和对磨盘充分贴合。设计条件为:转速 500 r/min,载荷 1000 g,回转半径 5 mm,摩擦副采用 GCr15 陶瓷滚珠。

2 结果与讨论

2.1 熔覆层宏观形貌

熔覆 h-BN 陶瓷粉末时采用多道熔覆,搭接率为 50%。由于 h-BN 的相对原子质量小,溅射现象严重,激光熔覆参数对熔覆层表层温度的作用不同导致表面熔覆效果不同。如图 1a 所示,在激光功率较低的情况下,溅射严重,材料损失,导致涂层成形性差,涂层薄。剩下的 h-BN 颗粒大部分保持原有固体状态,与基体合金不润湿;小部分发生熔解反应,在快速凝固条件下,受扩散控制,使得基材与熔覆材料的反应时间短,表面生成的 BN 熔解后重新析出硬质相,使得熔覆层表面呈现棕黑色。随着激光功率的提高,熔覆层表面温度升高,出现了深熔效果,基体对熔覆材料稀释严重,可以较好地抑制 h-BN 颗粒溅射和受热分解,熔覆层表面呈现金属光泽,缺陷较少,如图 1b 所示。实际应用中需要综合考虑这些因素,才能够保证在润滑相不被大量损失的情况下,又得到表面质量较高的熔覆层。

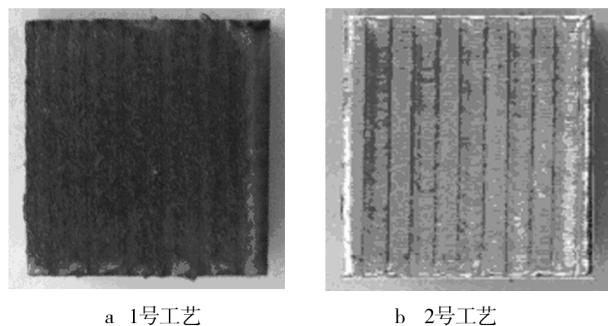


图 1 激光熔覆自润滑涂层的宏观形貌

Fig. 1 Macro-surface morphology of self-lubricating coating by laser cladding: a) process 1; b) process 2

2.2 熔覆层 XRD 分析

图 2 对比了不同激光熔覆工艺参数下所得熔覆层的 XRD 图谱。通过物相分析可知,在较低功率下,涂层物相主要由 TiN, TiB, TiB₂, AlV 等金属间化合物组成,另外还残留很少的 h-BN 相和一些未知相,如图 2a 所示;在较高功率下,熔覆层由 Ti, TiN, TiB, TiB₂, BN 等金属间化合物组成,如图 2b 所示。

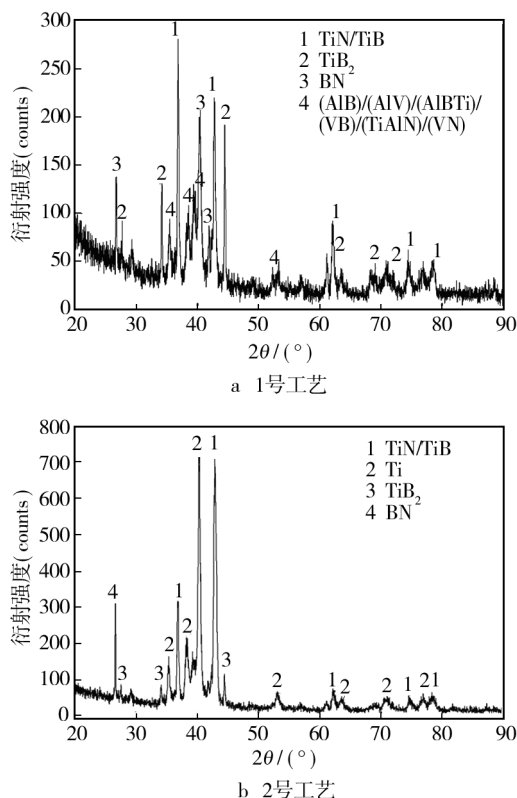
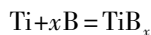
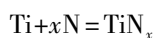
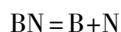


图 2 激光熔覆自润滑涂层的 XRD 衍射图谱

Fig. 2 XRD patterns of self-lubricating coating by laser cladding: a) process 1; b) process 2

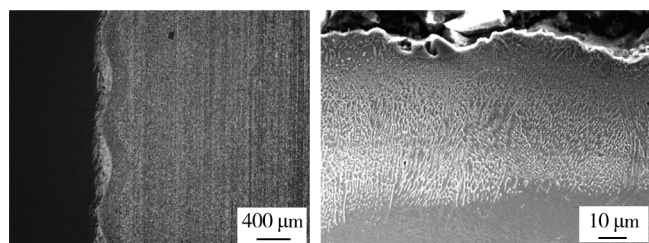
在熔覆过程中,基体中的钛元素大量进入熔池,在熔覆层表面,h-BN 熔解分离成氮原子和硼原子,并向熔融钛金属液中扩散,因此在熔覆层中原位合成了 TiN_x 和 TiB_x 强化相。TiN 和 TiB₂ 的生成自由能分别为 -307.6, -288.4 kJ/mol^[15]。TiN 的生成自由能低,说明 TiN 的结晶形核能力比 TiB₂ 强,故首先形核。此外,由 XRD 图谱分析可知,随着激光功率的提高,逐渐出现了 Ti 的衍射峰,说明熔覆层中 Ti 的凝固要晚于 TiN_x 和 TiB_x。原因是随着熔池中 TiN 的不断形核长大,导致 TiN 晶粒前沿的 N 元素含量迅速下降, TiN 的形核驱动力减弱,多余的液态金属 Ti 以单质形式析出长大,从 Ti-N 相图可知,发生了包晶反应,先

形核长大的 TiN 被后形成的单质 Ti 包覆。其溶解反应方程式如下:



2.3 熔覆层微观形貌

激光处理过程是一个近快速凝固过程,凝固首先从与基体相交的地方开始。熔覆层组织形态受温度梯度和凝固速度的控制,由于 G/R (G 为固液界面温度梯度, R 为凝固速度) 在基体交界处下降的速度非常快,所以观察不到明显的平面晶带,凝固组织主要



a 熔覆层截面形貌

b 熔覆层组织形貌

图3 1号工艺激光熔覆自润滑涂层的组织

Fig. 3 The microstructure of self-lubricating coating by laser cladding process 1: a) section morphology; b) microstructure

2.4 熔覆层性能分析

2.4.1 显微硬度

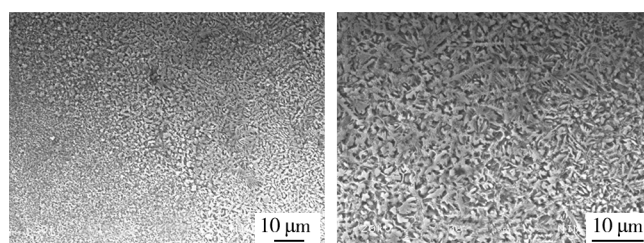
对于固体自润滑涂层而言,硬度是很重要的特性之一。软的润滑相只有在硬质相的支撑下,才能发挥较好的润滑效果。激光熔覆会产生固溶强化和细晶强化效应,并且生成了较多的硬质相,因此熔覆层硬度比基材有较大提高。在低功率下获得的熔覆层表面平均硬度达到 1200HV 左右,随着激光功率的增加,熔覆层的表面硬度下降,平均硬度在 700HV 左右。这主要是由于 h-BN 属六方晶系,具有类似石墨的层状结晶结构,硬度值低,在涂层中作为软相,具有良好的润滑特性。基材对涂层的稀释率提高,会使得金属溶液包裹 h-BN 颗粒,减弱熔覆粉末的分解流失,在激光近快速凝固作用下,熔池表面和内部存在由于扩散不及时而被储存在熔覆层中的 h-BN 颗粒形成的软质点,导致涂层整体硬度下降。

2.4.2 摩擦磨损性能

从摩擦学角度,在同等的磨损条件下,熔覆层硬

是有一定方向性的柱状树枝晶组织,生长方向大致与熔池底部向上的方向平行(即最大散热方向),并保证了熔覆层与基体的冶金结合。1号工艺条件下制备的熔覆层组织主要由初生的定向树枝晶 TiN_x 和枝晶间的 TiB_x 组成,由于熔覆层顶部凝固速度较快,所以其组织比底部组织细小,如图3所示。

随着激光输出能量的增大,观察到两种不同形貌的强化相生成:针棒状组织和等轴树枝晶。能谱分析结果显示,等轴树枝晶主要含有 Ti 和 N 元素,针棒状组织为 Ti 与 B 组成的组织。熔覆层中原位生成的针棒状和等轴树枝晶状的强化相颗粒均匀分布在包晶反应的 Ti 基体上(如图4所示)。陶瓷增强相均匀分布在金属基体上的特征可以使熔覆层达到强韧效果。



a 1000x

b 2000x

图4 2号工艺激光熔覆自润滑涂层的组织

Fig. 4 The microstructure of self-lubricating coating by laser cladding process 2

度越低,耐磨性能越差,反之亦然。通过计算两种工艺下所得熔覆层的磨损量,发现虽然1号工艺熔覆层的硬度值大于2号工艺熔覆层,但是2号工艺熔覆层的耐磨性比1号工艺熔覆层好,说明润滑相的存在能明显降低熔覆层的摩擦系数,使其具有优良的耐磨性能。另一方面,加入 h-BN 后,熔池内的 N 和 B 等元素与基体金属反应形成硬质相,涂层硬度非常高,脆性增加,容易剥落,加剧磨损。为了考察激光熔覆自润滑涂层的摩擦磨损性能,在常温条件下,对高激光功率下制备的自润滑熔覆涂层进行摩擦磨损性能试验,摩擦系数见图5,可见含有润滑相的熔覆层试样的摩擦系数呈现稳中下降的趋势。

在磨损初期,熔覆层与对磨材料处于磨合阶段,随着磨损时间的延长,在载荷的作用下,润滑相不断析出,并呈弥散分布。涂层表面减磨层的形成过程如下:首先,润滑相最表层 h-BN 颗粒剥落;然后,次表层 h-BN 颗粒在摩擦过程中也不断被挤出,在接触表面形成 h-BN 覆盖膜层。该膜层可以使摩擦发生在其之间,而且摩擦系数非常低,从而减轻了对基体材料的

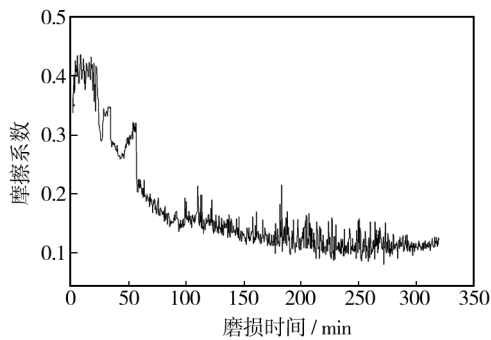


图5 激光熔覆自润滑涂层的摩擦曲线

Fig. 5 Friction curve of self-lubricating coating by laser cladding

磨损。因此,熔覆层中含有的润滑相 h-BN 越多,形成的润滑膜减磨效果越好。

3 结论

1) 陶瓷粉末与基体金属的熔点相差大,当激光能量较小时,表面陶瓷熔化不充分,发生溅射流失现象严重,涂层表面状态较差;激光能量较大时,熔池深,先熔化的基体金属液具有较好的流动性,可对高熔点的润滑相颗粒进行包裹,阻碍其因受激光辐照而发生分解等不良反应,同时还能降低后续凝固过程中热应力的释放,缓解裂纹等缺陷的产生。

2) 采用纯 h-BN 粉末进行激光熔覆制得的涂层表面状态平整,熔覆层与基体呈冶金结合,主要由 TiN, TiB, TiB₂ 等硬质相组成。由于激光熔覆区的温度梯度和冷却速率不同,熔覆区凝固组织多为取向杂乱的粗/细树枝晶和等轴晶。

3) 激光熔覆为制备固体润滑涂层提供了有效途径,与传统方法相比存在很多优点,具有广阔的工程应用前景。但是目前的工作离实际应用还有一段距离,存在如激光辐照过程中,由于温度很高会使润滑材料分解等问题。

参考文献

- [1] 王培. TC4 钛合金表面激光熔覆不同 WC 添加量的涂层研究[J]. 钛工业进展, 2014(3): 39—42.
WANG Pei. Research of Coatings on TC4 Titanium Alloy by Laser Cladding with Different WC Content[J]. Titanium, 2014(3): 39—42.
- [2] HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhou, ZHANG Wei-gang. Effects of Solid Lubricant Content on the Microstructure and Properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ Composite Coatings[J].

- Journal of Alloys and Compounds, 2009(479): 777—784.
- [3] LIU Xiu-bo, MENG Xiang-jun, LIU Hai-qing, et al. Development and Characterization of Laser Clad High Temperature Self-lubricating Wear Resistant Composite Coatings on Ti-6Al-4V Alloy [J]. Materials & Design, 2014(55): 404—409.
- [4] CHOUDHURY N R, KANNAN A G, DUTTA N. Chapter 21—Novel Nanocomposites and Hybrids for High-temperature Lubricating Coating Applications[J]. Tribology of Polymeric Nanocomposites (Second Edition), 2008(55): 501—542.
- [5] LIU Xiu-bo, ZHENG Chen, LIU Yuan-fu, et al. A Comparative Study of Laser Cladding High Temperature Wear-resistant Composite Coating with the Addition of Self-lubricating WS₂ and WS₂/(Ni-P) Encapsulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(1): 51—58.
- [6] LI M, HUANG J, ZHU Y Y, et al. Effect of Heat input on the Microstructure of in-situ Synthesized TiN-TiB/Ti Based Composite Coating by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(19/20): 4021—4026.
- [7] 乔晓勇. 激光熔覆亚微/纳米固体自润滑涂层[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
QIAO Xiao-yong. Research on Process and Structure of Sub-Micron/Nano Solid Self-lubricant Laser Cladding Coating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [8] 项坤, 王维, 杨光, 等. 钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 91—93, 104.
XIANG Kun, WANG Wei, YANG Guang, et al. Study on Titanium Alloy Single Track Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91—93, 104.
- [9] 高霖, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80, 87.
GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80, 87.
- [10] 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-hu, CHAO Ming-ju, LIU Kui-li, et al. Research on in-situ Synthesis of WC-B₄C Reinforced Ni-based Coatings by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 25—30.
- [11] 章小峰, 王爱华, 张祥林. 激光熔覆 Ni45-CaF₂-WS₂ 自润滑涂层组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 215—220.

(下转第75页)

- 2013.
- SUN Min, YU Ming-xun. Stealth Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [5] 任登凤, 韩玉阁, 宣益民. 使用低发射率膜层的目标红外特性分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2916—2920.
- REN Deng-feng, HAN Yu-ge, XUAN Yi-min. Analysis on Infrared Signature of the Target with Low Emissivity [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2916—2920.
- [6] 游毓聪, 杜仕国, 施冬梅, 等. 红外隐身涂料黏合剂的应用与研究[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 9(7): 50—51.
- YOU Yu-cong, DU Shi-guo, SHI Dong-mei, et al. Application and Research of the Infrared Camouflage Coatings [J]. Modern Paint & Finishing 2006, 9(7): 50—51.
- [7] YU H, XU G, SHEN X, et al. Low Infrared Emissivity of Polyurethane/Cu Composite Coatings [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(12): 6077—6081.
- [8] 陈娇, 黄啸谷, 韩朋德, 等. Al/Cr₂O₃ 复合粒子的制备及其多波段兼容隐身性能的研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(12): 1298—1302.
- CHEN Jiao, HUANG Xiao-gu, HAN Peng-de, et al. Preparation and Multiple-band Stealth Properties of Al/Cr₂O₃ Composite Particles [J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(12): 1298—1302.
- [9] 黄啸谷, 陈娇, 李少炳, 等. 热处理温度对 Bi₂O₃/ATO 复合功能填料红外-可见光兼容隐身性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(15): 2087—2090.
- HUANG Xiao-gu, CHEN Jiao, LI Shao-bing, et al. Effects of Heat Treatment Temperature on Infrared and Visible Light Stealth Properties of Bit Bi₂O₃/ATO Mixed Burning Filler [J]. Functional Materials, 2012, 43(15): 2087—2090.
- [10] HU C, XU G, SHEN X. Preparation and Characteristics of Thermal Resistance Polysiloxane/Al Composite Coatings with Low Infrared Emissivity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1): 371—375.
- [11] YU H, XU G, SHEN X, et al. Corrosion Resistance and Infrared Emissivity Properties of EPDM (EPDM-g-MAH) Film on Low Infrared Emissivity PU/Cu Coating [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(5): 1843—1847.
- [12] 余慧娟. 低红外发射率涂层的制备及其耐腐蚀性能的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- YU Hui-juan. Study on Preparation and Corrosion Resistance of Low Emissivity Infrared Coatings [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] HE X, LI Y, WANG L, et al. High Emissivity Coatings for High Temperature Application: Progress and Prospect [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5120—5129.
- [14] 胡晨. 3~5 μm 波段低发射率耐热型涂料研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- HU Chen. Research on Thermal Resistance Coatings with Low Infrared Emissivity in 3~5 μm [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [15] 徐文兰, 罗宁胜, 张珉, 等. 非均匀涂层的热辐射[J]. 红外与毫米波学报, 1990, 9(5): 384—388.
- XU Wen-lan, LUO Ning-sheng, ZHANG Min, et al. The Radiation of Inhomogeneous Coatings [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(5): 384—388.

(上接第48页)

- ZHANG Xiao-feng, WANG Ai-hua, ZHANG Xiang-lin. Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Ni₄₅-CaF₂-WS₂ Self-lubrication Coating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 215—220.
- [12] LIU W G, LIU X B, ZHANG Z G, et al. Development and Characterization of Composite Ni-Cr-C-CaF₂ Laser Cladding on γ-TiAl Intermetallic Alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470: 25—28.
- [13] ZHANG S T, ZHOU J S, GUO B G, et al. Friction and Wear Behavior of Laser Cladding NiAl/hBN Self-lubricating Composite Coating [J]. Advance Tribology, 2010, 3: 442.
- [14] 李敏. Ti-3Al-2V 表面激光熔覆 Ti-BN 涂层的微观组织及反应行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- LI Min. Research on the Microstructure and Reactive Behavior of Ti-BN System by Laser Cladding on Ti-3Al-2V [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [15] 韩文静, 宋进朝. Ti-6Al-4V 合金表面激光熔覆 NiCrBSi-5% BN 涂层组织和性能[J]. 新产品新材料, 2011, 26(4): 51—54.
- HAN Wen-jing, SONG Jin-chao. Microstructure and Properties of Laser Cladding NiCrBSi+5% BN Coating on Ti-6Al-4V Alloy Surface [J]. New Products and New Material, 2011, 26(4): 51—54.