doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.03.003

# hBN 含量对 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层抗热震性能 和氧化性能的影响 \*

# 曹玉霞<sup>1,3</sup>,黄传兵<sup>2</sup>,杜令忠<sup>2</sup>,张伟刚<sup>2</sup>

(1. 唐山学院 环境与化学工程系,河北 唐山 063000; 2. 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 3. 唐山市微纳米材料制备及应用重点实验室,河北 唐山 063000)

**摘** 要:为了提高 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>复合涂层的摩擦性能,在涂层中加入了 hBN 作为固体润滑剂,研究了 hBN 含量对涂层 抗热震性能和氧化性能的影响。采用大气等离子喷涂技术制备了 hBN 含量分别为 0%、2.5%、5%、10%和 20%的 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层,并研究了复合涂层在 700、800和 850 ℃的抗热震性能和在 850 ℃的恒温氧化性能。结果 表明:NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层呈层状结构,各层之间结合良好;所有涂层在 700、800和 850 ℃水淬 10 次均未出现明 显的裂纹和脱落现象,涂层抗热震性能均良好。涂层的氧化增重随着 hBN 含量的增加逐渐增大,96 h 后 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-20% hBN 涂层氧化非常严重。在 850 ℃时,所有涂层的氧化动力学曲线均遵循抛物线规律。

关键词:NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN;复合涂层;大气等离子喷涂;氧化;抗热震

**中图分类号:** TG174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)03-0017-06

# Effects of hBN Content on Thermal Shock Resistance and Oxidation Properties of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN Composite Coatings

#### CAO Yu-xia1.3, HUANG Chuan-bing2, DU Ling-zhong2, ZHANG Wei-gang2

(1. Department of Environmental and Chemical Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, Hebei; 2. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 3. Key Laboratory of Micro-nano Material Preparation and Application of Tangshan, Tangshan 063000, Hebei)

**Abstract**: In order to improve the tribological properties of the NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coatings, the hBN was added into the coatings as lubrication. The effects of hBN content on the thermal shock resistance and oxidation properties of the coatings were investigated. The NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings with 0%, 2.5%, 5%, 10% and 20% of hBN content were prepared by atmospheric plasma spray(APS) technology. The thermal shock resistance at 700, 800, and 850 °C and the oxidation kinetic curve at 850 °C of the APS sprayed NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings were investigated by muffle furnace. The results show that: the NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings consist of elongated lamellae and exhibit excellent tensile strength. The cracks and spallings are not observed after water quenching ten times at 700, 800 and 850 °C. All the composite coatings exhibit excellent thermal shock resistance property at 700, 800 and 850 °C. The weight gain of the coatings increase with the increase of hBN content. The NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-20% hBN coatings are seriously oxidized after 96 h. At 850 °C, the oxidation kinetics curves of the coatings all basically follow the parabola law.

Keywords: NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN; composite coating; atmospheric plasma spray(APS); oxidation; thermal shock resistance

收稿日期: 2015-01-03;修回日期: 2015-04-21;基金项目: \*国家自然科学基金(51471159);河北省自然科学基金(E2015105068); 唐山市科技计划项目(14130286a);唐山学院材料科学与工程重点学科(TSC2013003)

通讯作者:曹玉霞(1980-),女(汉),讲师,博士;研究方向:高温涂层材料;Tel:(0315)2010649;E-mail:caoyuxia\_416@126.com

网络出版日期: 2015-05-07 17:18; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150507.1718.006.html

引文格式:曹玉霞,黄传兵,杜令忠,等.hBN 含量对 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层抗热震性能和氧化性能的影响 [J].中国表面工程, 2015,28(3):17-22. Cao Y X, Huang C B, Du L Z, et al. Effects of hBN content on thermal shock resistance and oxidation properties of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3):17-22.

#### 0 引 言

大气等离子喷涂(Atmospheric plasma spray, APS)NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层由于具有较高的硬 度、热稳定性以及与基体材料良好的结合强度, 作为高温固体耐磨涂层材料,被广泛应用于钢铁 工业和电力工业的高温易磨部件上<sup>[1-4]</sup>。但是大 气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层硬度较高,摩擦 因数较大,对运转设备的磨损较为严重,极大的 限制了涂层的应用领域<sup>[5-6]</sup>。为了改善涂层的摩 擦性能,一般在涂层中加入高温固体润滑剂,常用 的高温固体润滑剂有无机氟化物(CaF<sub>2</sub>、BaF<sub>2</sub>和 CaF<sub>2</sub>•BaF<sub>2</sub>共晶等)、无机单质(Au、Ag等)、金属 硫化物(MoS<sub>2</sub>等)和无机硼化物(hBN等)等<sup>[7-9]</sup>。

六方氮化硼(hBN)由于具有较低的摩擦因 数、良好的热稳定性和抗热震性能等诸多优点, 被广泛应用于高温固体润滑耐磨涂层材料 中<sup>[10-12]</sup>。王常川等人<sup>[13]</sup>研究了Ni-20Cr/hBN涂 层的高温氧化行为,发现Ni-20Cr/hBN涂层在 600℃氧化不明显,而在700℃和800℃氧化明 显,氧化100h后,由于B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的熔融,使得氧化增 重动力学曲线保持不变,甚至出现下降的趋势。 杜令忠等人<sup>[14]</sup>制备了NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-BaF<sub>2</sub>・CaF<sub>2</sub>和NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr/hBN 3种涂层 材料,研究了3种涂层的摩擦磨损性能,发现由 于 hBN先造粒后包覆,在涂层中呈球状分布,且 与NiCr 合金润湿性较差,导致NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr/hBN涂层在高温下的磨损率较高。

作者已经研究了大气等离子喷涂 NiCr/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层的摩擦磨损性能,发现该 涂层在低温下具有很好的润滑性能。因此,文中 以 hBN 为润滑相,采用化学冶金包覆和固相合金 化技术分别在 hBN 和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 细粉颗粒表面包覆 致密的 NiCr 合金层,然后采用喷雾造粒技术制 备复合粉体。采用大气等离子喷涂技术制备 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层,研究了 hBN 含量对 涂层的抗热震性能和氧化性能的影响,并探讨了 涂层的氧化失效机理。

#### 1 试验与方法

#### 1.1 材料制备

将化学纯的 Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 和 hBN 表面采用化学冶 金包覆技术分别包覆致密的 Ni 层,然后在 Ar 保 护下采用固相合金化技术分别进行 NiCr 互渗, 其中 Ni: Cr=80: 20 (w/%),制得 NiCr/Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> (NiCr: Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> = 25: 75, w/%)和 NiCr/hBN (NiCr: hBN = 50: 50, w/%)。将 NiCr/Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 和 NiCr/hBN 分别以(质量分数,w/%)100: 0、 95: 5、90: 10、80: 20和 60: 40混合,得到 hBN 的质量分数分别为 0%、2.5%、5%、10%和 20% 的 5种混合粉体。将 5种混合粉体分别放入球磨 混料装置,球磨混料 4~6 h,将一定量的粘结剂 加入混合好的料浆中,采用 JJ-1 增力电动搅拌器 混合均匀,同时为了除去料浆中的气泡加入少量 消泡剂,采用 LGZ 型高速离心喷雾造粒干燥机分 别对 5种料浆喷雾干燥,即得到 5种复合粉体。

试验选用基体材料为镍基高温合金 (40 mm× 30 mm×3 mm),利用上述 5 种粉体采用 APS-2000 等离子喷涂设备分别在基体表面制备 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - hBN 复合涂层,分别记为: NiCr/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - 2.5% hBN、NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - 5% hBN、NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - 2.5% hBN、NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - 20% hBN。为了获得清洁、活性高的表面,喷涂 之前在基体表面进行喷砂预处理,然后在喷砂表 面喷涂 NiAl 打底层,喷涂厚度为 0.1 mm。制备 涂层的工艺参数如表 1 所示。

表1 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 涂层的工艺参数 Table 1 Parameters of the APS sprayed NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>hBN coatings

Parameters	Values
Voltage/V	65
Current/A	500
Powder feed rate/(g • min <sup>-1</sup> )	30
Spray distance/mm	120
Flow rate of $H_2/(L \cdot min^{-1})$	2.5
Pressure of $H_2/MPa$	0.6
Flow rate of $Ar/(L \cdot min^{-1})$	40
Pressure of Ar/MPa	0.6

#### 1.2 表征与分析

采用 FEI Quanta 200 FEG 电子扫描显微镜 观察粉体和涂层的组织结构;涂层的孔隙率采用 图像分析法进行分析,根据涂层的 SEM 形貌中 颜色相同的气孔面积所占测试总面积的比例来 计算。在 WDW-100E 微机控制电子式万能材料 测试机上采用拉伸法按 CB/T 8642-2002 标准测试涂层的结合强度,拉伸速率为 1 mm/min。

涂层抗热震性能测试:将试样分别置于 700、 800 和 850 ℃的电阻炉内保温 5 min,然后取出迅 速投入水中(室温),观察涂层出现裂纹及脱落时 的热震次数。

采用德国 Linseis Messgeraete GmbH. L75/ 1550 高温热膨胀仪测试涂层热膨胀系数。测试 前将涂层线切割为 20 mm×4 mm×0.5 mm 的试 样,测试介质为空气,测试温度从室温到 900 ℃,升 温速度为 5 ℃/min。采用 SX-5-12 型马弗炉对 粉体进行抗氧化性试验,氧化时间为 96 h。

# 2 结果与分析

# 2.1 粉体和涂层的结构分析

图 1 是大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN



(a) Low magnification

复合粉体的表面形貌。由于所有 hBN 含量的复合粉体颗粒形貌类似,因此仅选择了具有典型代表性的 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10% hBN 复合粉体。从图中可以看出,粉末呈球形或类球形,粒度在 20~80  $\mu$ m 之间。

图 2 是大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN 复合涂层典型的截面组织形貌。图 2(a)从左到右 依次为基体、结合层和涂层,基体与结合层以及 结合层与涂层之间的机械结合良好,未出现大的 裂纹和孔洞等缺陷。涂层呈典型的层状结构,各 层之间结合良好。拉伸试验表明:涂层的结合强 度可达 24 MPa 左右。经灰度法测得涂层的孔隙 率为 8%左右。

图 2(b)中颜色较浅的亮色区域为 NiCr 合金相,颜色较深的灰色区域为 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相,而颜色最深的黑色区域为 hBN 相和气孔。涂层中的气孔



(b) High magnification

图 1 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN 复合粉体的表面形貌 Fig. 1 Surface morphologies of the APS sprayed NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN composite powders



(a) Low magnification

(b) High magnification

图 2 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN 复合涂层的截面组织形貌 Fig. 2 Cross section morphologies of the APS NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN composite coatings

多分布在 hBN 的周围,这主要是因为:一方面 hBN 与 NiCr 及  $Cr_3C_2$  的润湿性能较差,在热喷 涂过程中,hBN 周围少量气体未能排出;另一方面 hBN 与 NiCr 和  $Cr_3C_2$  的热膨胀系数相差较 大,在加热冷却过程中,由于 hBN 与 NiCr 和  $Cr_3C_2$  的结合力较弱,不能抵御因收缩不均造成 的内应力,因而形成气孔。

# 2.2 涂层的抗热震性能

由于 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 涂层用于高温下,因 此涂层的抗热震性能直接影响涂层的使用寿命。 表 2 列出了不同 hBN 含量的复合涂层在 700、 800 和 850 ℃的抗热震性能。从表中可以看出: 当 hBN 含量从 0%增加到 20%时,大气等离子喷 涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - hBN 复合涂层在 700、800 和 850 ℃时,均冷热循环 10 次未出现明显的裂纹和 脱落现象。而一般要求经过 7 次热震试验涂层 仍不开裂、不剥落即为合格。涂层抗热震性能均 良好。

# 表 2 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层的抗 热震性能

Table 2 Thermal shock tests of the APS sprayed NiCr/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings

Coatings -	Thermal shock times		
	700 °C	800 °C	850 °C
$NiCr/Cr_3C_2$	≥10	≥10	≥10
$\operatorname{NiCr}/\operatorname{Cr}_3\operatorname{C}_2$ -2.5% hBN	≥10	≥10	≥10
$NiCr/Cr_{3}C_{2}5\%hBN$	≥10	≥10	≥10
$NiCr/Cr_{3}C_{2}-10\frac{0}{0}hBN$	≥10	≥10	≥10
$NiCr/Cr_3C_2-20\%$ hBN	≥10	≥10	≥10

一般来讲,涂层的抗热震性能与涂层和基体的热膨胀系数的差值及涂层的厚度两个因素有关<sup>[15]</sup>。当涂层的厚度一定时,涂层的抗热震性能 主要取决于涂层与基体的热膨胀系数差值。当 两者差值较大时,在加热和冷却过程中,涂层中 会产生巨大的内应力,随着加热、冷却次数的增 加,涂层中的内应力引起涂层内裂纹的不断产生 和扩展,最后引起涂层的龟裂和脱落。

为了进一步研究涂层与基体热膨胀系数的 相匹配性,以NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN 复合涂层为 例,测试其热膨胀系数,结果见图 3。由图可知: NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10%hBN 复合涂层的热膨胀系数在 室温到 900 °C 较平稳,在 1.04×10<sup>-5</sup>~1.13×10<sup>-5</sup> m·K<sup>-1</sup>之间,由于镍基高温合金的热膨胀系数在 1.4×10<sup>-5</sup>~1.5×10<sup>-5</sup> m/K 之间,两者热膨胀系数相差不是太大,在反复加热和冷却过程中未出现明显的裂纹和剥落现象,因此 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层与 Ni 基高温合金匹配性良好。



图 3 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-10% hBN 复合涂层 的热膨胀系数

Fig. 3 Thermal expansivity of the APS sprayed NiCr/  $Cr_3\,C_2-10\,\%\,hBN$  composite coatings

# 2.3 涂层的抗氧化性能

NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层在 850 ℃时的恒 温氧化动力学曲线及拟合曲线见图 4。由图可 知:NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层在 850 ℃的氧化 动力学曲线基本分为两个阶段,19 h 前为系数较 小的抛物线规律,而 19 h 后则为系数较大的抛物 线规律。同时随着 hBN 含量的增加,涂层的氧化 增重逐渐增大。当 hBN 含量增加到 20%时,氧 化 96 h 后,涂层氧化增重达 40 mg/cm<sup>2</sup> 以上,涂 层氧化严重。这可能是因为 hBN 含量增加,涂层 材料的孔隙率增加,涂层与空气接触的表面积增 加,从而加剧了涂层的氧化。

#### 2.4 涂层的抗氧化形貌

图 5 为大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复 合涂层在 850 ℃恒温氧化 96 h 后的截面形貌。 从图中可以看出:涂层在 850 ℃恒温氧化 96 h 后,所有涂层表面并未出现连续的氧化物层,且 部分氧化物层出现脱落现象,镍铬合金相出现了 二次沉淀,涂层内部的微观结构发生了明显的相 偏析现象,涂层内部组织氧化较为严重,这可能 是因为涂层氧化温度过高且涂层中孔隙率较高 的原因。



图 4 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层 850 ℃的恒温氧化动力学曲线及拟合曲线 Fig. 4 Oxidation kinetics curves and fitting curves of the APS sprayed NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings at 850 ℃



图 5 大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层在 850 ℃下恒温氧化 96 h 后的截面形貌 Fig. 5 Cross section morphologies of the NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN composite coatings after oxidation at 850 ℃ for 96 h

#### 2.5 涂层的氧化机理

第3期

大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂 层主要由 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相、NiCr 合金相以及 hBN 相 3 部分组成。在 850 °C时,3 部分均会发生氧化。 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 发生反应而生成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其反应方程 式如式(1)所示:

$$4Cr_{3}C_{2}+17O_{2}=6Cr_{2}O_{3}+8CO_{2}$$
(1)

NiCr合金的氧化过程为:氧化初期,Ni和Cr

都会发生氧化,在比较短的时间内,形成一层以 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 为主的混合氧化物膜,随着氧化的 进行,金属 Cr 和 NiO 发生置换反应,置换出 NiO 中的 Ni,反应方程式如式(2)所示:

$$3NiO + 2Cr = Cr_2O_3 + 3Ni$$
 (2)

由于涂层与 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层之间结合力较弱, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层逐渐脱落,涂层中的 Cr 向表面逐渐扩 散,使得涂层中的 Cr 含量逐渐降低。当涂层中 的 Cr 浓度很低,不能形成连续的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层时,涂层就会发生剧烈氧化现象。

随着 hBN 含量的增加,大气等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合涂层的孔隙率增大。在氧 化过程中,涂层表面和内部孔隙均可以和 O<sub>2</sub> 接 触而发生氧化,这是涂层氧化失效的主要原因。

# 3 结 论

采用高压氢还原、固相合金化和喷雾造粒方 法制备了 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合粉体,并用大气 等离子喷涂技术制备了 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-hBN 复合 涂层。结果表明:

(1)涂层呈典型的层状结构,涂层与结合层 及结合层与基体间结合良好。

(2)涂层经 700、800 和 850 ℃冷热循环 10 次未 出现明显的裂纹和脱落现象,抗热震性能均良好。

(3)涂层在 850 ℃的氧化动力学曲线基本分 为两个阶段,19 h前呈现出系数较小的抛物线规 律,而 19 h后呈现出系数较大的抛物线规律,涂 层的氧化增重随着 hBN 含量的增加逐渐增大。

(4)涂层表面和内部同时氧化是涂层氧化失效的主要机制。

# 参考文献

- [1] Zhang Z Y, Lu X C, Luo J B. Tribological properties of rare earth oxide added Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings [J]. Applied Surfurce Science, 2007, 253(9): 4377-85.
- Li F J, Ding C X. Improvement in tribological properties of plasma-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating followed by electroless ni-based alloy plating [J]. Wear, 2000, 240(1/2): 180-185.
- [3] Huang C B, Du L Z, Zhang W G. Preparation and characterization of atmospheric plasma sprayed NiCr/Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> BaF<sub>2</sub> CaF<sub>2</sub> composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203 (20/21): 3058-63.
- [4] Ji G C, Li C J, Wang Y Y, et al. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(24): 6749-57.
- [5] 黄传兵,杜令忠,张伟刚.NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-BaF<sub>2</sub> · CaF<sub>2</sub> 高温 自润滑耐磨涂层的制备与摩擦磨损特性[J].摩擦学学报, 2009,29(1):68-74.

Huang C B, Du L Z, Zhang W G. Preparation and tribological properties of  $NiCr/Cr_3C_2-BaF_2 \cdot CaF_2$  high temperature self-lubricating wear-resistant coating [J]. Tribology, 2009, 29(1): 68-74 (in Chinese).

[6] 郭永明,李绪强,王海军,等. 超音速等离子喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Mo 复合涂层的高温摩擦磨损性能 [J]. 中国表面 工程,2012,25(5):31-36.
Guo J M, Li X Q, Wang H J, et al. Tribological behavior of supersonic plasma spraying NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Mo composited

coatings at high temperature [J]. China Surface Engineering, 2012, 25(5): 31-36 (in Chinese).

- [7] Wang A H, Zhang X L, Zhang X F, et al, Ni-based alloy/ submicron WS<sub>2</sub> self-lubricating composite coating synthesized by Nd: YAG laser cladding [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 475(1/2): 312-318.
- [8] Du L Z, Huang C H, Zhang W G, et al. Effect of NiCr clad BaF<sub>2</sub> • CaF<sub>2</sub> addition on wear performance of plasma sprayed chromium carbide-nichrome coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(3): 551-557.
- [9] Du L Z, Zhang W G, Liu W, et al. Preparation and characterization of plasma sprayed Ni<sub>3</sub>Al-hBN composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(7): 2419-24.
- [10] Cao Y X, Du L Z, Huang C B, et al. Wear behavior of sintered hexagonal boron nitride under atmosphere and water vapor ambiences [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (23): 10195-200.
- [11] Eichle J, Lesniak C. Boron nitride (hBN) and hBN composites for high-temperature applications [J]. Journal of European Ceramic Society, 2008, 28(5): 1105-9.
- [12] 刘通,于月光,沈婕,等.进给速率对 AlSi/hBN 封严涂层 可磨耗性的影响 [J]. 热喷涂技术,2014,6(3):43-49. Liu T, Yu Y G, Shen J, et al. The influence of incursion rate on abradability of AlSi-hBN abradable seal coating [J]. Thermal Spray Technology, 2014,6(3):43-49 (in Chinese).
- [13] 王常川,王日初,彭超群,等. Ni-20Cr/hBN 自润滑材料的高温氧化行为 [J]. 中国有色金属学报,2013,23(2): 356-361.

Wang C C, Wang R C, Peng C Q, et al. High temperature oxidation behaviours of Ni – 20Cr/hBN self – lubricating composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 356–361 (in Chinese).

- [14] Du L Z, Huang C B, Zhang W G, et al. Preparation and wear performance of NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - NiCr/hBN plasma sprayed composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(12): 3722-8.
- [15] 曹玉霞. 航空发动机高温固体润滑耐磨涂层的制备与性能研究 [D]. 北京:中国科学院过程工程研究所, 2012.
  Cao Y X. Preparation and performance study on the solid lubricating and wear-resistant coatings in turbo-engine at elevated temperatures [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese).