doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.04.004

自反应电弧喷涂原位合成 Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ 复相陶瓷涂层 *

刘宏伟,朱 胜,孙晓峰,邱 骥

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室,北京 100072)

摘 要:以Ti+B₄C为反应药芯、Al为外皮材料制备反应型喷涂丝材,探讨利用自反应电弧喷涂技术在 45钢基体表面制备复相陶瓷涂层的可行性。以X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪 (EDS)等方法分析、观察了涂层的组织与结构,测试了涂层的主要力学性能。结果表明:利用制备的药芯丝材 进行喷涂试验,可获得由TiB₂、TiB、TiC_{0.3}N_{0.7}、TiN、Al₂O₃、AlN等多相组成的复相陶瓷涂层。涂层呈典型的 层状结构,其连续的基体相内弥散分布着离散的第二、第三相。涂层与基体间的结合强度为18.9 MPa、涂层 的平均显微硬度与弹性模量分别为735.4 HV_{0.2}和461.4 GPa,摩擦因数在0.45~0.50 之间,耐磨性能较基 体材料提高3倍以上。

关键词:自反应电弧喷涂;Ti(C,N)-TiB2-Al2O3;复相陶瓷涂层;力学性能

中图分类号: TG174.442; TG174.453 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2013)04-0032-06

In-situ Synthesized Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ Multi-plased Ceramic Coatings Prepared by Self-reactive Arc Spray Technology

LIU Hong-wei, ZHU Sheng, SUN Xiao-feng, QIU Ji

(Science and Techonolofy on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering,

Beijing 100072)

Abstract: Reactive cored wires were prepared with $Ti+B_{4}C$ as reactive core and Al as strips. The feasibility of preparing multi-phased ceramic coatings on the surface of 45 steel through the self-reactive arc spray technology was discussed. Composition and microstructure of the coatings were analyzed and observed by X-ray diffraction analysis(XRD), scanning electron microscopy(SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The main mechanical properties of the coatings were tested. It was shown that multi-phased ceramic coatings composed of TiB₂, TiB, TiC_{0.3}N_{0.7}, TiN, Al₂O₃, and AlN can be prepared by self-reactive arc spraying with the reactive cored wires. The coatings present the typical layer microstructure. The discrete second and third phases are dispersively distributed in the continuous base phase. The binding strength between the coating and the substrate is 18.9 MPa. The average micro-hardness and elastic modulus of the coatings are 735. 4 HV_{0.2} and 461. 4 GPa respectively. The friction coefficient is about 0. 45–0. 50, and the abrasion resistance increases more than 3 times of the substrate.

Key words: self-reactive arc spray; Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃; multi-phased ceramic coatings; mechanical performance

网络出版日期: 2013-07-01 13:22; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130701.1322.010.html
 引文格式: 刘宏伟,朱胜,孙晓峰,等. 自反应电弧喷涂原位合成 Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ 复相陶瓷涂层 [J]. 中国表面工程, 2013, 26 (4): 32-37.

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2013-06-06; 基金项目: *国家自然科学基金(51001118); 再制造技术重点实验室基金 (9140C850202120C85292)

作者简介:刘宏伟(1978-),男(汉),湖北孝感人,助理研究员,博士;研究方向:自蔓延高温合成材料制备

0 引 言

TiC、TiB₂ 是 2 种高熔点、高硬度、高模量、高 化学稳定性、低热膨胀因数以及导电、导热性能优 良的高性能陶瓷材料。二者形成的复相陶瓷材 料,由于良好的共晶匹配特性,在TiC中加入一 定量 TiB₂ 可产生强烈的高温沉淀强化效果,使 TiC-TiB₂ 复相陶瓷具有极好的综合性能,作为耐 磨、耐腐蚀、耐高温涂层材料而倍受研究者青睐^[1-2]。 另一方面,向 TiC 中固溶入 TiN 形成 Ti(C,N),可在 不大幅降低材料硬度前提下提高其韧性,形成的 Ti(C,N)-TiB₂复相陶瓷材料具有高熔点、高硬 度、耐磨、耐腐蚀等特性,并具有良好的导热、导电 和化学稳定性,是适用于机械、化工、汽车、航空航 天等多个领域的理想涂层材料[3-4]。由于熔点很 高,Ti(C,N)-TiB₂复相陶瓷通常以Ti-B₄C或 Ti-B₄C-C体系为原材料,利用反应喷涂方法制 备[5-8]。在涂层制备过程中,为促进喷涂体系的化 学反应,提高涂层与基体的物理、化学相容性,常 在喷涂体系中加入活性金属 Al,形成 Ti(C,N)- $TiB_2 - Al_2O_3$ 多元复相陶瓷涂层^[6,9]。

王建江^[6]以Ti-B₄C-C-5%Al为原材料,利 用反应火焰喷涂方法制备了Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ 复相陶瓷涂层。但利用反应火焰喷涂方法制备该 复相涂层时,首先须制备粒度范围合适(38~ 61 μm)的喷涂用复合粉^[10],而制粉效率低、工艺复 杂的问题显著推高了该复相涂层的制备成本。这 一问题在大面积喷涂时尤为突出。众知周知,热 喷涂技术中,电弧喷涂具备喷涂效率高(火焰喷涂 的2~6倍)、能源利用率高(可达57%,等离子喷 涂与火焰喷涂分别约为12%与13%)、安全性高、 涂层质量好、可应用于大面积现场施工等优 点^[11]。但电弧喷涂技术通常用于制备金属涂层, 即便粉芯丝材的出现使其能够制备陶瓷颗粒增强 金属基复合涂层,但涂层材料仍以金属为主,而一 般难以制备高性能陶瓷涂层。

除反应火焰喷涂方法外,还可利用反应激光 熔铸方法制备 Ti(C,N) - TiB₂ - Al₂O₃ 复相陶瓷 涂层^[9,12],但目前利用电弧喷涂方法制备该复相 陶瓷涂层的研究尚未见报道。文中将自蔓延高温 合成技术与传统电弧喷涂技术相结合,形成自反 应电弧喷涂技术,并以金属 Al 为外皮材料,以 Ti-B₄C 反应体系为粉芯制备粉芯丝材,利用该技术在 钢基体表面原位合成 Ti(C,N) - TiB₂ - Al₂O₃ 复 相陶瓷涂层。分析复相涂层的组织结构及其成因,探讨利用该方法制备 Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ 复相陶瓷涂层的可行性,为寻求该涂层低成本、大 面积制备方法奠定基础。

1 试验材料与方法

外皮材料选用宽度 10 mm、厚度 0.1 mm 的 Al 带。粉芯材料分别为粒径 38 μ m 以内、纯度 99.9%的 Ti 粉与粒径 5 μ m 以内、纯度 98%的 B₄C 粉。Ti 粉与 B₄C 粉按 3:1 摩尔比配制,粉 芯丝材直径 3 mm。喷涂基体选用 40 mm×40 mm ×5 mm 的 45 钢平板试样,喷涂前经喷砂处理,不 加打底层。采用 CMD-AS-3000 型高速电弧喷 涂设备进行自反应电弧喷涂试验,喷涂电压、电流、 距离分别为 29 V、100 A、300 mm。

将喷涂试样沿横截面切开后制备金相试样, 以 NOVA Nano 450/650 型高分辨率场发射扫描 电子显微镜观察涂层的显微结构与形貌,并进行 微区扫描,以日本理学 D/max2200PC 自动 X 射 线衍射仪分析涂层的组织结构。

涂层与基体的结合强度依据 GB9796-88 在 MTS 810 材料拉伸试验系统上进行,测试试样以 Ni 为打底层。涂层的摩擦因数和耐磨性能在 UMT-2 摩擦磨损试验机上测定,试验参数:载荷 100 N,时间 30 min,频率 10 Hz。涂层的磨损量 利用三维白光干涉表面形貌仪 Phase Shift MicroWAM-3D 观测并计算得出。利用 Nano Indenter XP 型纳米硬度计测定涂层的模量,试验 参数:最大压痕深度 500 μm,最大载荷 600 mN。 利用 Wilson 显微硬度仪测定涂层的显微硬度,试 验载荷 200 g。

2 试验结果与分析

2.1 物相分析

图 1 为涂层的 XRD 的分析结果。图 1 显示, 自反应电弧喷涂涂层由 TiB₂、TiB、TiC_{0.3} N_{0.7}、 TiN、Al₂O₃、AlN 等多种陶瓷相组成,其中,TiB₂ 峰值最高,表明其含量最高。这几种陶瓷相物理、 化学相容性好,其中的 2 种或多种复合,可形成性 能良好的复相陶瓷材料。涂层中没有出现 Ti、 B₄C 及 Al 的衍射峰,表明金属外皮 Al 及粉芯反 应体系 Ti-B₄C 均已在自反应喷涂过程中完全反 应。能经喷涂体系的 SHS 反应原位合成高性能





图 1 自反应电弧喷涂涂层的 XRD 分析 Fig. 1 XRD result of self-reactive arc sprayed coating

对于文中试验而言,除喷涂材料 Ti、B₄C 及 Al 参加反应之外,由于喷涂在大气氛围下进行, 空气中的 O₂ 与 N₂ 亦会参与反应,形成一个复杂 的高温、多元反应体系。自反应电弧喷过程中,粉 芯丝材经送丝到达电弧区时,外皮材料 Al 由于 熔点很低(仅 660 °C),在电弧高温作用下迅速熔 化,并润湿粉芯材料 Ti-B₄C,后者在液态 Al 的传 热、传质作用及雾化气体中 O₂ 与 N₂ 裹挟下,发 生一系列复杂的化学反应,主要包括:

$$3\mathrm{Ti} + \mathrm{B}_{4}\mathrm{C} \rightarrow 2\mathrm{Ti}\mathrm{B}_{2} + \mathrm{Ti}\mathrm{C}$$
(1)

$$4\mathrm{Al} + 3\mathrm{O}_2 \rightarrow 2\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3 \tag{2}$$

$$2Al + N_2 \rightarrow 2AlN \tag{3}$$

$$2\mathrm{Ti} + \mathrm{N}_2 \rightarrow 2\mathrm{TiN} \tag{4}$$

$$Ti + O_2 \rightarrow TiO_2$$
 (5)

$$4Al + 3TiO_2 \rightarrow 2Al_2O_3 + Ti$$
 (6)

此外,还有 TiC 与 TiN 之间的固溶反应:

$$TiC + TiN \rightarrow Ti(C,N)$$
(7)

其中,反应(1)、(2)、(7)为主反应,生成目标 相,其它反应为副反应,生成副产物相。这些反应 在自反应喷涂过程中竞争发生,反应进行的难易 程度由其吉布斯自由能 ΔG 决定,ΔG 负值越大, 则该反应越易自发进行。对于反应:

$$aA+bB=gG+dD$$
 (8)

其在温度 T下的吉布斯自由能函数变 ΔG 的计算公式为:

$$\Delta G_T^{\Phi} = \Delta H_T^{\Phi} - T \Delta S_T^{\Phi} \tag{9}$$

 ΔH 、 ΔS 随温度改变而变化很小,近似计算 中可将其它温度 T 时的 ΔH_T^{ϕ} 与 ΔS_T^{ϕ} 分别以 ΔH_{298}^{ϕ} 与 ΔS_{298}^{ϕ} 代替,即 $\Delta H_T^{\phi} \approx \Delta H_{298}^{\phi}$, $\Delta S_T^{\phi} \approx \Delta S_{298}^{\phi}$,因而式(9)可表示为:

$$\Delta G_T^{\Phi} \approx \Delta H_{298}^{\Phi} - T \Delta S_{298}^{\Phi} \tag{10}$$

其中 ΔH²₂₉₈ 与 ΔS²₂₉₈ 分别是反应的标准焓变 与标准熵变,可分别依据下式计算得出:

$$\Delta H^{\phi}_{298} = \left[g \Delta H^{\phi}_{f,298(G)} + d \Delta H^{\phi}_{f,298(D)} \right] -$$

$$\left[a \Delta H^{\phi}_{f,298(A)} + b \Delta H^{\phi}_{f,298(B)} \right]$$

$$\Delta S^{\phi}_{298} = \left[g \Delta S^{\phi}_{f,298(G)} + d \Delta S^{\phi}_{f,298(D)} \right] -$$

$$\left[a \Delta S^{\phi}_{f,298(A)} + b \Delta S^{\phi}_{f,298(B)} \right]$$
(12)

由于自反应喷涂过程在大气氛围下实施,喷 涂过程中的各反应均在标准大气压下进行,因而 反应在温度 T下的吉布斯自由能函数变 ΔG ⁹ 可 统一表达为 ΔG 。即:

$$\Delta G \approx \Delta H_{298}^{\Phi} - T \Delta S_{298}^{\Phi} \tag{13}$$

给出各物质的标准焓变与标准熵变数据(见表 1),依据式(11)~(13)可得到反应方程式(1)~ (6)的 ΔG 随温度变化的函数表达式,分别为:

$$\Delta G_1 = -760.2 + 0.040T \tag{14}$$

$$\Delta G_2 = -3 \ 350.6 + 0.625T \tag{15}$$

$$\Delta G_3 = -636 + 0.214T \tag{16}$$

$$\Delta G_4 = -675.8 + 0.194T \tag{17}$$

$$\Delta G_5 = -944.7 + 0.165T \tag{18}$$

$$\Delta G_6 = -516.5 + 0.160T \tag{19}$$

表1物质的标准焓变与标准熵变[13]

Table 1 Standard enthalpy change and entropy change^[13]

Substance	$\Delta H^{arphi}_{_{f,298}}$ /	$\Delta\!S^{m{\phi}}_{f,298}$ /			
	$(kJ \cdot mol^{-1})$	$(kJ \bullet K^{-1} \bullet mol^{-1})$			
Ti	0	0.031			
Al	0	0.028			
O_2	0	0.205			
N_2	0	0.192			
B_4C	-71.55	0.027			
TiC	-184.10	0.024			
TiN	-337.90	0.030			
${\rm TiB}_2$	-323.80	0.028			
${\rm TiO}_2$	-944.70	0.050			
AlN	-318.00	0.020			
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	-1 675.30	0.051			

根据文献「14〕,并查询相关热力学参数^[13], 易计算出 Ti-B₄C 反应体系的绝热燃烧温度为 2 920 ℃。由式(14)~(19)可知,在室温至该温度 的范围内,上述各反应的△G均为负值,说明在热 力学上这些反应都能进行。涂层中 TiB₂ 与 Al₂O₃分别是主反应(1)、(2)的生成产物,其中 TiB₂为涂层主相,含量最高。TiC_{0.3}N_{0.7}是两种晶 体结构相同、晶格常数相近、物理化学相容性好的 反应产物 TiC 与 TiN 之间发生固溶反应 (式(7)) 形成的。而 TiN 与 AlN 是喷涂高温环境下,喷涂 体系中的金属组元 Al、Ti 分别与 N₂ 反应生成 (分别对应式(4)和(5))。涂层中出现非平衡过渡 相 TiB,其原因为:①喷涂过程中,喷涂体系经历 各组元快速反应、急速升温与冷却的极端非平衡 反应过程;②喷涂体系在反应过程中受高压雾化 气体作用可能发生分离,使反应未能充分完成。 涂层中不含 TiO₂,是因反应电弧喷涂粉芯丝材外 皮材料为 Al,其在喷涂过程中首先熔化,润湿、包 裹粉芯材料 Ti-B₄C,形成富 Al 的喷涂体系。液态 Al 在喷涂过程中一方面可起到保护 Ti 被氧化的 作用,另一方面,可还原部分被氧化的 Ti(式(6)), 使喷涂涂层中不含 TiO2 相。由于 TiO2 在复相 陶瓷涂层体系中常以疏松态多孔状态存在,对涂 层内聚强度与综合性能具有不利影响,因而对于 制备 Ti(C,N)-TiB₂-Al₂O₃ 复陶瓷涂层而言,避 免其存在具有积极的意义。

2.2 显微组织

图 2 为自反应电弧喷涂复相陶瓷涂层的 SEM照片。从图 2(a)可以看出,自反应喷涂原 位合成的涂层呈典型的层状结构,涂层内部比较 致密,组织结构分布均匀。为减少 XRD 分析时 非涂层物相的影响,涂层制备时未喷涂打底层,因 而图中涂层与基体间的界面较为明显。将图 2(a) 中涂层部分放大观察,如图 2(b)所示。图中显示, 复相陶瓷涂层主要由浅色连续基体相 A、灰色不 连续相 B、深灰色相 C 及少量孔隙相 D 组成。其 明显特征是,连续的基体相(A)内,弥散分布着不 连续的第二、第三相(B、C),并有少量大小不一的 孔隙(D)。

这种连续相中弥散分布其它离散硬质相的组 织结构,可通过弥散强化机制,进一步提高涂层材 料的强度与断裂韧性,对于获得综合性能良好的 复合涂层具有重要意义。另一方面,由于复合涂 层中各相均为喷涂过程中通过喷涂材料的 SHS 反应原位合成,因而各相之间的界面无污染,涂层 层间结合良好,这对于提高复合陶瓷涂层的内聚 强度不无裨益。

对图 2(b)中区域进行元素面扫描,如图 3 所示。图 3(a)(b)(c)分别为元素 Ti、O、N 的分布 图。结合 XRD 分析、能谱分析及元素面扫描结 果可知,图 2(b)中浅色连续基体相 A 为涂层的主 相 TiB₂,灰色不连续相 B 为 Al₂O₃,而深灰色长 条状的 C 相则为 TiC_{0.3} N_{0.7}。其它几种副产物相 TiN、AlN,则由于在涂层中含量较少,在扫描电 镜下难以直接观察到。除上述几种物相外,涂层 中还有少量孔隙相 D。涂层中的孔隙是由于喷涂 粒子在基体上变形、铺展时,部分喷涂过程中产物 的气体不能完全排出,残留在涂层中而形成的。



(a) SEM (b) Enlargement of (a)

图 2 自反应电弧喷涂复相陶瓷涂层形貌 Fig. 2 SEM images of multi-phased ceramic coatings



图 3 复相陶瓷涂层元素面扫描结果 Fig. 3 Element area scanning results of multi-phased ceramic coatings

2.3 力学性能

涂层与基体间的结合强度、涂层显微硬度、弹 性模量测量结果如表 2 所示。测试结果显示,涂 层与基体间的平均结合强度为 18.9 MPa。该结 果低于高速电弧喷涂金属涂层与基体间的结合强 度(20~30 MPa),其原因可能是涂层制备过程中 喷涂距离设定较远,喷涂粒子到达基体表面时速 度已经大大下降,需通过优化工艺参数进一步提 高结合强度。涂层的平均显微硬度与弹性模量分 别为 735.4 HV_{0.2}和 455.1 GPa,分别为相同条件 下基体材料 45 钢的 3.2 和 2.0 倍。可知复相陶 瓷涂层显著提高了基体材料的表面性能。

表 2 涂层的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the coatings

No.	1	2	3	4	5	6	Average
Binding strength/MPa	16.9	20.6	18.1	21.2	17.7		18.9
$Micro-hardness/HV_{\scriptscriptstyle 0.2}$	842.2	680.2	608.5	826.0	645.6	810.1	735.4
Elastic modulus/GPa	457.4	451.6	461.4	450.5	454.1	455.6	455.1

图 4 为基体材料(图 4 中 A 曲线)与 3 个涂层 试样(图 4 中 B、C、D 曲线)的摩擦因数测试曲线。 图 4 显示,两种材料的摩擦因数均经过约 200 s 磨合期后,才进入稳定期。这是由于试验材料表 层存在氧化层(基体)或非稳定的疏松层(涂层), 使图 5 中开始阶段的摩擦因数不稳定。随着磨损 时间的增加,表层氧化皮或疏松层脱落,摩擦因数 趋于稳定。磨损试验显示,涂层的摩擦因数在 0.45~0.50之间,较 45 钢(0.60~0.65)低 25% 左右。材料的强度与硬度越高,塑性变形抗力越 大,越不容易在接触点形成焊合,摩擦因数也越 低,因此复相陶瓷涂层的摩擦因数比基体材料明 显降低。涂层具有良好的摩擦磨损性能。

图 5 为基体材料与涂层的磨损量。由图可见, 在相同试验条件下,复相陶瓷涂层的磨损量远小 于基体材料,涂层的耐磨性能较基体材料提高 3 倍以上,其主要原因是涂层中存在大量硬质相 TiC_{0.3}N_{0.7}和 TiB₂,这些硬质相在涂层中弥散分



图 4 基体与涂层的摩擦因数



布,产生弥散强化作用。性能测试显示,由于喷涂 工艺未经优化,且参数设置未达最优化、未针对陶 瓷涂层与金属基体间大的热膨胀系数差异进行成 分梯度过渡设计,涂层与基体间结合强度相对偏 低,该项性能指标尚需通过进一步研究加以改善。 然而由于组成复相陶瓷涂层的各组分均具有良好 的性能,且涂层组织结构具有多相、均匀、弥散、界 面无污染等优点,使复相陶瓷涂层具有较好的综 合性能。



图 5 基体与涂层的磨损量 Fig. 5 Wear volume of substrate and coatings

3 结 论

(1)利用喷涂材料间的 SHS 反应,以电弧喷 涂设备在 45 钢表面制备了 Ti(C,N) - TiB₂ -Al₂O₃ 复相陶瓷涂层,为复相陶瓷涂层的低成本、 大面积制备提供了新的技术途径。

(2)利用自反应电弧喷涂技术制备的复相陶 瓷涂层由 TiB₂、TiB、TiC_{0.3}N_{0.7}、TiN、Al₂O₃、AlN 等 多相组成,涂层呈典型的层状结构,其连续的基体 相内,弥散分布着离散的第二、第三相的结构特征。

(3)涂层与基体间的结合强度为 18.9 MPa,
涂层的平均显微硬度与弹性模量分别为
735.4 HV_{0.2}、461.4 GPa,摩擦因数在 0.45~
0.50之间,耐磨性能较基体材料提高 3 倍以上。
涂层具有较好的综合性能。

参考文献

- [1] 朱春城,曲伟,张幸红,等.TiC-TiB₂ 复合材料的研究进展[J].材料导报,2003,17(1):48-50.
- [2] Vallauri D, Adrian I C A, Chrysanthou A. TiC-TiB₂ composites: A review of phase relationships, processing and properties [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(8): 1697-713.

- [3] 刘军,卢胜勇,李芳芳. 氩弧熔敷原位合成 TiC 颗粒增强 金属基复合涂层组织及耐磨性能 [J]. 中国表面工程, 2010,23(5):45-48.
- [4] Mitterer C, Mayrhofer P H, Beschliesser M, et al. Microstructure and properties of nanocomposite Ti-B-N and Ti-B-C coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120: 405-411.
- [5] 王引真,李方坡,孙永兴,等. 超音速火焰喷涂 TiC-TiB₂ 增强 Ni 基涂层的研究 [J]. 材料保护,2008,41(6):8 -10.
- [6] 王建江,杜心康,刘宏伟,等. Al 对反应火焰喷涂 TiC-TiB₂ 复相陶瓷涂层制备的影响 [J]. 无机材料学报,2007, 22(5):550-554.
- [7] 王建江,杜心康,付永信,等.Ti-B₄C-C系在火焰喷涂时的SHS过程[J].稀有金属材料与工程,2006,35(8): 1258-62.
- [8] 王建江,杜心康,刘宏伟,等.TiC-TiB₂复相陶瓷涂层的 反应火焰喷涂制备[J].复合材料学报,2006,18(2):100 -105.
- [9] Masanta M, Ganesh P, Kaul R, et al. Microstructure and mechanical properties of TiB₂ - TiC - Al₂O₃ - SiC composite coatings developed by combined SHS, sol - gel and laser technology [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(21/22): 3471-80.
- [10] 刘宏伟,张龙,王建江,等.复合粉制备工艺对自反应喷射 成形 TiC-TiB₂ 复合陶瓷坯件的影响[J].功能材料, 2007,38(Z9):3574-77.
- [11] 张伟, 郭永明, 陈永雄. 热喷涂技术在产品再制造领域的 应用及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 1-10.
- [12] Masanta M, Shariff S M, Choudhury A R. Tribological behavior of TiB₂ - TiC - Al₂O₃ composite coating synthesized by combined SHS and laser technology [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(16/17): 2527-38.
- [13] 叶大伦,胡建华.实用无机物热力学数据手册(第2版)[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- [14] 刘宏伟,张龙,赵忠民,等. 自蔓延高温合成理论研究进展 [J]. 军械工程学院学报,2002,14(2):1-5.

作者地址:北京丰台区杜家坎 21 号 100072 装甲兵工程学院再制造技术重点实验室 Tel: (010) 6671 9214 E-mail:hongwlau@126.com