复合材料学报 第23卷 第4期 8月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 4 August 2006

文章编号: 1000-3851(2006)04-0100-06

TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层的反应火焰喷涂制备

王建江[*1,2], 杜心康[2], 刘宏伟[2], 陆大勤[2], 薛 锦[1], 潘希德[1]
(1. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049; 2. 军械工程学院 先进材料研究所, 石家庄 050003)

摘 要: 基于SHS反应火焰喷涂技术, 采用 Ti-B_4C-C 喷涂体系, 在钢基表面制备了 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层。通过对SHS火焰喷涂陶瓷涂层的电子显微观察和X射线衍射及能谱分析, 探讨了SHS反应火焰喷涂 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层的组织结构及成因。研究发现, 涂层是一种复相非均质、传统热喷涂层状涂层特征不明显的亚稳结构。涂层由占主体的 $TiC_{0.7}N_{0.3}$、$TiC_{0.2}N_{0.8}$、TiB_2 相和少量 TiO_2、Ti_2O、Ti_3O_5 相及气孔组成。涂层中有三类特征各异的组织, 即尺度在微-纳米级呈团簇状分布的组织, 尺寸在1～3 μm之间呈等轴状颗粒分布的组织和呈深黑色的不规则气孔。三类组织是由在喷涂粒子与基材接触之前, 喷涂团聚粉粒经飞行燃烧和反应合成形成的熔融陶瓷液滴(又分为实心和空心两类)和不规则陶瓷颗粒(其形状与原喷涂团聚颗粒一样, 但组织结构已发生转变, 基本成为陶瓷相)与基材碰撞变形、冷却凝固、快速结晶形成的。

关键词: SHS; 火焰喷涂; TiC-TiB_2 陶瓷涂层; 组织结构
中图分类号: TG174.453 **文献标识码**: A

TiC-TiB_2 multiphase ceramic coatings prepared by reactive flame spray

WANG Jianjiang[*1,2], DU Xinkang[2], LIU Hongwei[2], LU Daqin[2], XUE Jin[1], PAN Xide[1]
(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Institute of Advanced Materials, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Based on the reactive fame spray technique, TiC-TiB_2 multiphase coatings were prepared on the steel substrate with Ti-B_4C-C reactants. By electronic microcosmic observation, X-ray diffraction and energy spectrum analysis, the structure and its forming causes of TiC-TiB_2 multiphase coatings were discussed. The results show that the coatings have the multiphase heterogeneous metastable structure, which have no conspicuous layer-shaped structure that the traditional flame spray coatings have. The coatings are composed of the major phases $TiC_{0.7}N_{0.3}$, $TiC_{0.2}N_{0.8}$, TiB_2, a little of TiO_2, Ti_2O, Ti_3O_5 and some pores. There are three kinds of structures with different characteristics in the coatings the cluster-shaped structure in micron-nanometer size, the 1～3 μm structure taking on equiaxed particles distribution, and the deep black pores. Before meeting the substrate the spray particles combust, react, and form molten ceramic beads (in solid and hollow two kinds) or abnormal ceramic granules (having the same figure as the spray particles). After colliding with the substrate, they distort, cool, quickly crystallize and form the three kinds of structures.

Keywords: SHS; flame spray; TiC-TiB_2 ceramic coatings; structure

由于碳化钛与硼化钛独特的金属、共价和离子键型相互作用, 二者均具有高熔点、高硬度、高模量、高化学稳定性、相对低的热膨胀系数及高的导电性和导热性等特性, 被认为是极具潜力的高温结构陶瓷材料[1]。尤其是二者形成的复合陶瓷材料, 由于其良好的共晶匹配特性, 在TiC中加入一定量的 TiB_2 可产生强烈的高温沉淀强化效果, 使复合陶瓷材料具有极好的综合性能, 在复合粉料[2]、涂层及硬质增强相[3,4]等方面具有良好的应用前景。目前, 国内外学者制备 TiC-TiB_2 复相陶瓷的方法主要有自蔓延高温合成技术[5]、热爆技术[6]、反应烧结技术[7]、高能球磨技术[8]以及磁控溅射技术[9]等。由于这两种陶瓷熔点高、硬度高, 不易合成制备, 使引入了化学反应并能充分利用化学能的自蔓

收稿日期: 2005-07-08; **收修改稿日期**: 2006-01-13
基金项目: 国家自然科学基金(50272084)
通讯作者: 王建江, 教授, 博士研究生, 主要从事自蔓延高温合成材料制备技术与应用研究 E-mail: JJWang63@heinfo.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

延燃烧合成技术成为制备该复相陶瓷的主要技术手段[10,11]。

国内外用 SHS 反应火焰喷涂方法制备 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层的研究还鲜见报道。本文作者将自蔓延高温合成技术与传统火焰喷涂技术相结合，以 Ti-B_4C-C 为反应体系，在金属表面制备了高性能、低成本及高可靠性的 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层，研究分析了涂层的组织结构及其成因。

1 实验材料与方法

反应原料选用平均粒径小于 20 μm 化学纯 Ti 粉、工业纯 B_4C 粉和石墨，Ti-B_4C-C 配系按化学反应摩尔比配制。将它们球磨后过筛，制成粒度一定的团聚粉用于反应火焰喷涂实验。喷涂基材选用 40 mm ×40 mm ×5mm 的 45# 钢平板试样，喷涂前打磨去除锈层，表面经粗糙化处理和预热并用 Ni-Al 自熔合金粉打底衬，喷涂距离为 180 mm。

实验采用改制的 CP-D Ⅲ型高能火焰喷枪，氧气和乙炔的压力分别为 0.6 MPa 和 0.11 MPa。采用 Ar_2 作为送粉气和保护气。制备的陶瓷涂层试样沿横断面切割后研磨、抛光。用 D/max-11B 型 X 射线衍射仪进行物相分析，用 Saron-200 超高分辨场发射扫描电镜观察组织，在 OXFORD ISIS300 X 射线射散能谱仪上做涂层微区分析。

2 实验结果与讨论

2.1 涂层的组织与结构

图 1 是按上述工艺制备获得的 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层微观组织。图 1(a) 为涂层的总体形貌，其中白色或灰白色物质为 SHS 反应火焰喷涂所得主产物相，灰黑色不连续无规则状为孔洞。由图 1 可知，传统热喷涂涂层的典型层状结构特征在此表现不很明显，远不如 Al-CuO 喷涂体系层状特征显著[12]，但仍可见。层状结构通常是由于熔融陶瓷液滴与基材碰撞之后发生流动铺展并扁平化而造成的，其扁平化程度在液滴飞行速度、与基材碰撞压力、冷却凝固速度等条件相同的情况下，主要取决于陶瓷液滴的粘度，而影响粘度的最主要因素是温度。

根据文献[13]，粘度 (η) 与温度 (T) 的关系如下：

$$\eta = A\exp[E/(k_B T)] \quad (1)$$

其中：A 为常数；E 为粘流活化能；k_B 玻尔兹曼常数；T 为热力学温度。可知陶瓷熔滴的温度越低，其粘度越大。

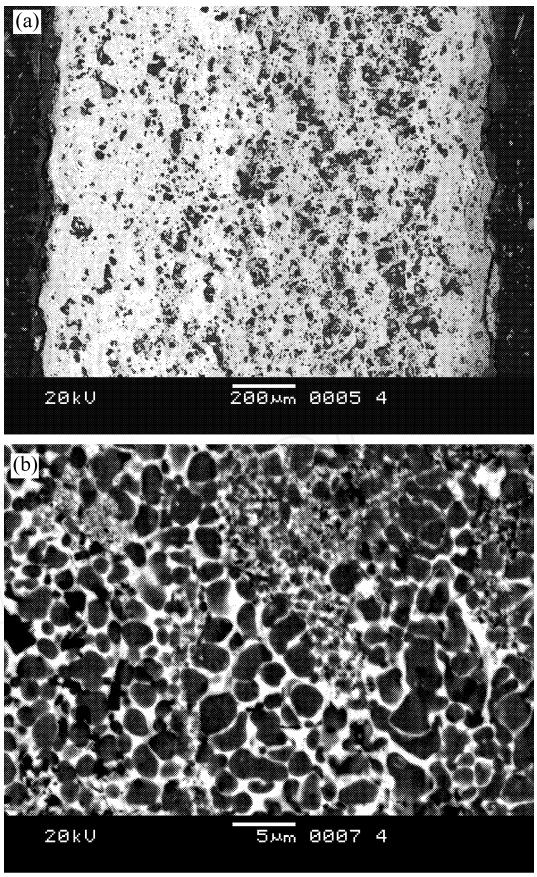


图 1 TiC-TiB_2 复相陶瓷涂层的 SEM 照片

Fig.1 SEM photos of TiC-TiB_2 multiphase coatings

该喷涂体系所发生的化学反应为

$$14Ti + 3B_4C + 5C = 8TiC + 6TiB_2 \quad (2)$$

该喷涂体系的绝热燃烧温度 T_{ad} 可依据下面热平衡条件计算得出[14]：

$$\Delta H^0_{298} + \sum n_i \cdot (H^0_T - H^0_{298})_{i,生成物} = 0 \quad (3)$$

式中：ΔH^0_{298} 为常温下物质的摩尔标准生成热；$(H^0_T - H^0_{298})_{i,生成物}$ 为各生成物在 T 温度下的相对焓；n_i 为反应式中生成物的摩尔系数。

经过计算，该喷涂体系的燃烧绝热温度为 3200 ℃，比 Al-CuO 喷涂体系 4853 ℃的燃烧绝热温度低很多，喷涂效果比后者温度低，粘度大，扁平化程度差。

图 1(a) 左部为喷涂粒子先沉积区，右部为后沉积区，涂层颜色由浅灰色向深灰色变化。经能谱定量分析可知，涂层的深灰色区域碳含量相对较高，而浅灰色区的氮含量及氧含量较高(见表 1)。这是因为在涂层的先沉积区，喷涂粒子先于后续粒子沉

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　涂层的能谱定量分析

Table 1　The EDS quantitative analysis for the coatings

Element	Dark grey zone		Light grey zone	
	Mass fraction/ %	Atomic fraction/ %	Mass fraction/ %	Atomic fraction/ %
B	32.81	57.62	8.09	19.92
C	8.41	13.29	4.65	10.31
N	1.81	2.45	5.93	11.27
O	5.13	6.08	12.03	20.01
Ti	51.84	20.55	69.30	38.50
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

积到基体上，由于受基体表面氧、氮含量较高和后续喷涂粒子反应热传递的影响，使先沉积的粒子发生氧化与氮化的机率较后沉积的粒子大。因此靠近基体的涂层区中的氧化物和氮化物的含量较高，表现为涂层颜色较浅。图 1(a) 中灰黑色区域为孔洞，可知涂层的孔隙率较大，且后沉积区孔隙率较先沉积区孔隙率大，这是由于随涂层厚度增加，作为陶瓷相的粘结相钛的氧化物减少，使涂层气孔率增大的缘故。图 1(b) 为涂层组织放大的照片。结合下面图 3 可观察发现，涂层组织按其特征不同可分为三类：(1) 尺寸在 1～3 μm 之间呈等轴状颗粒分布的组织；(2) 尺寸更加细小呈团簇状分布的组织；(3) 呈深灰黑色不规则状的气孔。

由涂层的 X 射线衍射结果(见图 2)可以看出，该涂层是一种复相非均质的片层状不明显的亚稳结构。反应喷涂产物主要由占主体的 $TiC_{0.7}N_{0.3}$、$TiC_{0.2}N_{0.8}$、TiB_2 相和少量 TiO_2、Ti_2O、Ti_3O_5 相组成，目标产物 TiC 相并未以纯 TiC 相出现，而是以 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 相和 $TiC_{0.2}N_{0.8}$ 相存在。这表明 SHS 反应火焰喷涂涂层组织结构与常规实体材料有较大区别，尤其是在大气喷涂条件下，由于空气中及制备团聚粉过程中滞留其中的 N_2 和 O_2 参与反应使目标产物发生变化，出现 Ti(C,N) 和 Ti 的数种氧化物。Ti_xO_y 的出现，表明反应喷涂制备陶瓷涂层时氧化现象较为严重。喷涂颗粒在喷涂过程中的氧化，与火焰喷涂自身特性及喷涂的大气环境密切相关，因而大气下的 SHS 反应火焰喷涂涂层不似常规 SHS 工艺所得产物那样简单纯净。一般喷涂所得的陶瓷材料中总含有一定量的伴生低熔点化合物[15]。但有时这类化合物的存在并非毫无裨益。对于本实验而言，由于伴生的 Ti_xO_y 熔点较低，润

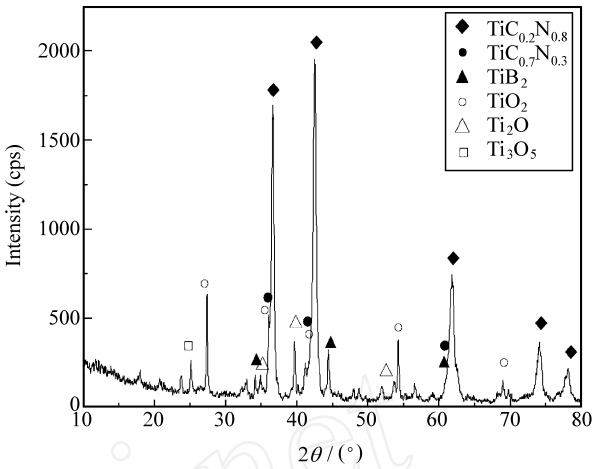


图 2　涂层试样的 X 射线衍射图

Fig. 2　XRD pattern of coatings

湿铺展能力强，容易富集在表面能较高的陶瓷颗粒边界处，成为陶瓷颗粒的良好粘结剂，能提高涂层颗粒的粘结强度，减少涂层气孔率。但因这些 Ti_xO_y 氧化物的密度较小(约为 4 g/cm^3)，又常会使涂层发生膨胀，对涂层产生不利影响。用 Saron-200 超高分辨场发射扫描电子显微镜对涂层做进一步观察，图 3 为 SEM 照片，上面所述的三类组织特征清晰可见。

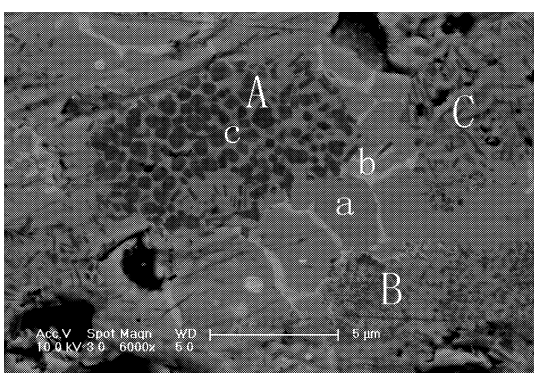


图 3　高放大倍率下涂层的 SEM 形貌

Fig. 3　SEM photo of coatings with high magnification

为深入分析涂层组织，确定各组织特征的相结构，对图 3 中的 a、b、c 三点进行能谱点分析，三点的能谱曲线见图 4。各点能谱曲线和其元素半定量分析结果表明，a 点深灰色等轴状颗粒为富 $TiC_{0.2}N_{0.8}$ 和 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 相，且有与之共生的钛的氧化物相。b 点灰白色断续分布存在于 Ti(C, N) 颗粒之间的主要为钛的氧化物相和由喷涂工艺过程带入的 Fe、Cu、Al、Si 等元素富集的粘结相，这些元素未在其它部位出现，可知它们易偏聚与富集，成为陶

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

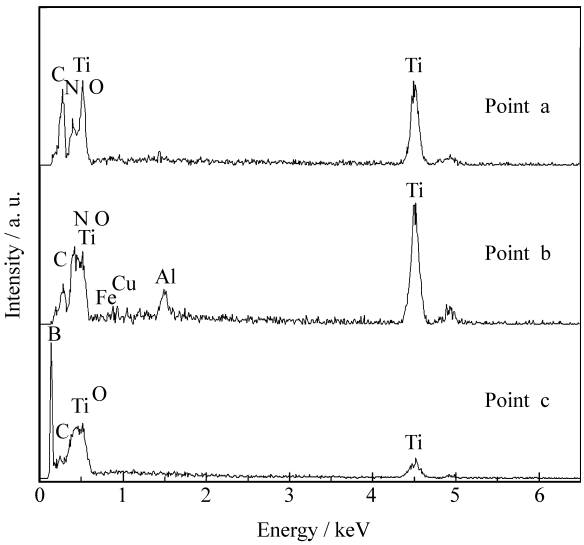


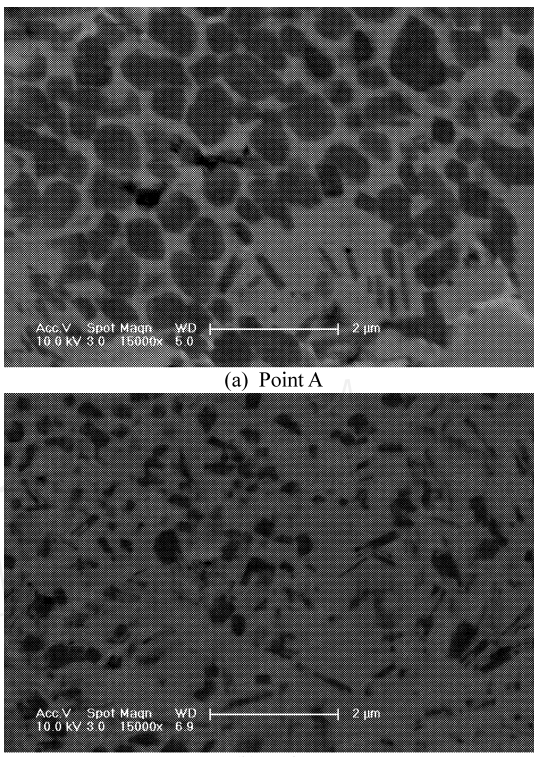
图 4　涂层不同区域的能谱分析图

Fig. 4　EDS maps of different areas in the coatings

瓷颗粒的粘结相，从而使界面的熔点降低，这有利于涂层致密度的提高。将形态与 c 点等同的 A 处和组织更细小的 B 处进一步放大观察，分别见图 5(a)、5(b)，通过对 A 处的能谱面分析可确定，c 点团簇状分布的黑色小颗粒或 B 处的小针片为 TiB_2 相，尺度在微-纳米级。仔细观察图 5(a) 和图 5(b) 可知，TiB_2 晶粒多为短纤维状或细长条状，粒径更小，图 5(b) 中的 TiB_2 相显示出结晶不很完整的形态，更似为镶嵌在 Ti(C, N) 相中的晶内型复合结构。

2.2　涂层组织结构成因分析

涂层组织的获得，是基于前期喷涂团聚粉粒的飞行燃烧、反应合成及与基材的碰撞凝固。研究表明，在喷涂粒子与基材接触之前，喷涂团聚粉粒经飞行燃烧和反应合成表现为两种基本形式：(1) 熔融陶瓷液滴，又分为实心和空心两类；(2) 不规则



(a) Point A

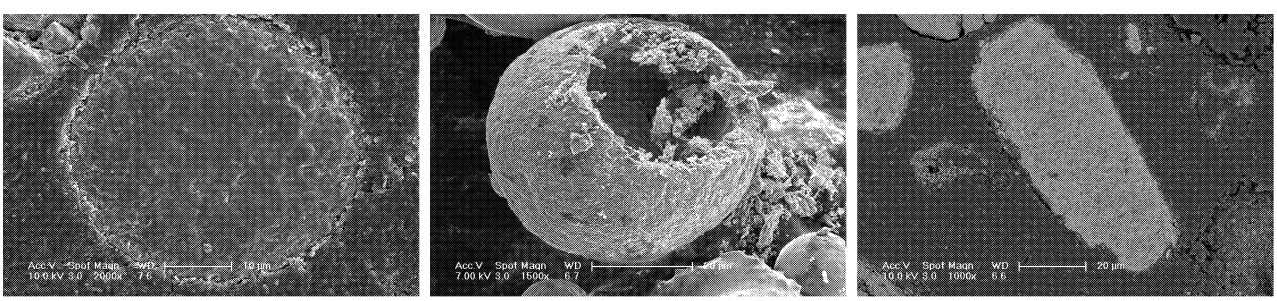
(b) Point B

图 5　图 3 中 A、B 处的 SEM 照片

Fig. 5　SEM photos at the points A and B in Fig. 3

陶瓷颗粒，其形状与原喷涂团聚颗粒一样，但组织结构已发生转变，基本成为陶瓷相，如图 6 所示。

本喷涂体系的绝热燃烧温度 T_{ad} 高达 3200 ℃，尽管反应火焰喷涂为非绝热过程，但在高的反应能量释放与氧乙炔火焰温度场辅助的双重作用下，喷涂产物粒子的温度可超过由 TiC 与 TiB_2 组成的机械混合物的熔点[16]，导致中小尺度的喷涂团聚粉粒在到达基材前成为熔融球形液滴。按照熔渣正规离子溶液理论[17]，该熔融陶瓷液滴，是由阳离子 Ti^{4+}、B^{2+} 等和阴离子 C^{4-}、O^{2-}、N^{4-} 等组成，阴阳



(a) Hollow-center melt ceramic drop　(b) Solid-center melt ceramic drop　(c) Irregular ceramic particle

图 6　飞行粒子的三种形态

Fig. 6　Three configurations of the sprayed particles

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

离子交错地排列在各自的结点上，同号离子不相接触，阴阳离子各在自己的结点上作无序混合。当这种结构的陶瓷液滴到达基材与之相撞时，一方面发生变形铺展，另一方面在大过冷度作用下凝固结晶。根据 TiB_2- TiC 准二元相图可知[16]，按式(2)配制的喷涂体系中共晶成分构成进行结晶，理论产物应为($TiC + TiB_2$)共晶成分，而图 5 所示的组织即表现为一种 Ti(C,N) + TiB_2 共晶体形态。属面心立方晶格结构的 TiC 为高熔点相，在此应为 Ti(C,N)首先结晶长大，而具有简单六方晶格结构的 TiB_2 随后结晶并沿 *c* 轴择优成长[18]，形成短纤维状或细条状，共晶组织如此细密可能是大过冷度下冷却晶粒来不及长大造成的，最终形成尺寸细小呈团簇状分布的组织。

对于尺寸较大的团聚粉颗粒，由于受热速度相对较慢，燃烧反应能够发生，但陶瓷液滴难以形成，其燃烧反应属固-液反应。氧-乙炔火焰高温首先使 Ti 液熔化并迅速填充团聚粉 B_4C、C 颗粒的间隙，使 Ti 液与 B_4C、C 组元表面充分接触，导致 B 和 C 元素向熔融 Ti 液中溶解，形成具有一定厚度的中间相层。液相 Ti/中间相界面处的中间相不断溶解，而固相 B_4C、C/中间相界面处析出更多的中间相，中间相层厚度保持不变。随反应的进行，更多的 B 和 C 元素消耗于中间相的形成，继而又溶入液相 Ti 中。当液相 Ti 中 B 和 C 原子的浓度达到饱和值时，TiC、TiB_2 便结晶析出。这种反应机制使得反应物与生成物间的形态无明显差异。对于大尺寸团聚粉颗粒，燃烧合成是通过高熔点组元与低熔点液相反应形成中间相层，继而中间相再从低熔点液相中析出实现的，即受组元间的溶解析出机制控制。这种基材碰撞前即已基本转变为陶瓷相的粒子到达基材后，主要发生粒子的碰撞变形，而产物的相结构不会发生大的变化。因此，尽管与小尺寸喷涂团聚粉过冷度相同，但组织并不细密，最终形成等轴状颗粒分布的组织。不过该组织中的 TiB_2 相不够明显，可能与 B_4C 在喷涂飞行中易氧化挥发、数量减少和与基材碰撞后飞溅较严重有关。

由熔融陶瓷液滴、未熔陶瓷颗粒对基材的碰撞、变形与堆积，在液滴与液滴、颗粒与颗粒、液滴与颗粒之间存在未被填满的孔隙，形成空洞。空心熔融陶瓷液滴内的气体，溶解在熔滴内的气体在冷却固化过程中因气体的溶解度下降释放出的气体由于未能及时排出，滞留在涂层中也会形成孔洞。

3 结　论

(1) SHS 反应火焰喷涂 TiC- TiB_2 复相陶瓷涂层的组织按特征不同可分为三类：(a) 尺寸非常细小呈团簇状分布的组织，是熔融陶瓷液滴发生共晶反应的产物；(b) 尺寸在 1～3 μm 之间呈等轴状颗粒分布的组织，是由不规则陶瓷颗粒转变而来；(c) 深灰黑色呈不规则状的气孔，是熔融陶瓷液滴、未熔陶瓷颗粒对基材的碰撞、变形与堆积，使部分区域未被填及熔融陶瓷液滴中存在的气体无法逸出等原因造成的。

(2) 涂层为复相非均质且传统热喷涂片层状特征不明显的亚稳结构。涂层主要由占主体的 $TiC_{0.7}N_{0.3}$、$TiC_{0.2}N_{0.8}$、TiB_2 相和少量 TiO_2、Ti_2O、Ti_3O_5 相及气孔组成，目标产物 TiC 相并未以纯 TiC 相出现，而是以 $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 相和 $TiC_{0.2}N_{0.8}$ 相存在。

(3) 涂层组织是由在喷涂粒子与基材接触之前，喷涂团聚粉粒经飞行燃烧和反应合成形成的熔融陶瓷液滴(又分为实心和空心两类)和不规则陶瓷颗粒(其形状与原喷涂团聚颗粒一样，但组织结构已发生转变，基本成为陶瓷相)与基材碰撞变形、冷却凝固、快速结晶形成的。

参考文献：

[1] 朱春城，曲　伟，张幸红，等. TiC- TiB_2 复合材料的研究进展[J]. 材料导报，2003，17(1)：48 - 51.
Zhu Chuncheng, Qu Wei, Zhang Xinhong, et al. Progress in research on TiC- TiB_2 composites [J]. Materials Guide Report, 2003, 17(1): 48 - 51.

[2] Li Jianlin, Li Fei, Hu Keao, et al. TiB_2/ TiC nanocomposite powder fabricated via high energy ball milling [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(2): 2829 - 2833.

[3] Kustas F, Mishra B, Zhou J. Fabrication and characterization of TiB_2/ TiC and tungsten co- sputtered wear coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2002 153: 25 - 30.

[4] Wang H Y, Jiang Q C, Zhao Y Q, et al. Fabrication of TiB_2 and TiB_2- TiC particulates reinforced magnesium matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 2004, 372(3): 109 - 114.

[5] 王业亮，傅正义，王　皓，等. TiB_2- TiC 复合粉的自蔓延高温还原合成[J]. 复合材料学报，2003，20(1)：16 - 21.
Wang Yeliang, Fu Zhengyi, Wang Hao, et al. Synthesis of TiB_2- TiC composite powder by SHS reduction process [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(1): 16 - 21.

[6] Bhaumik S K, Divakar C, Singh A K, et al. Synthesis and sintering of TiB_2 and TiB_2- TiC composite under high pressure

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 279(1): 275 - 281.

[7] Klinger L, Gotman I, Horvitz D. *In situ* processing of TiB_2/TiC ceramic composites by thermal explosion under pressure: Experimental study and modeling [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302(1): 92 - 99.

[8] Lee J W, Munir Z A, Ohyanagi M. Dense nanocrystalline TiB_2- TiC composites formed by field activation from high-energy ball milled reactants [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 325(1/2): 221 - 227.

[9] Lee Kitty W, Chen Yu-Hsia, Chung Yip-Wah, et al. Hardness, internal stress and thermal stability of TiB/TiC multilayer coatings synthesized by magnetron sputtering with and without substrate rotation [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177/178: 591 - 596.

[10] 杜心康, 王建江, 周 珑, 等. SHS 反应喷涂 Al_2O_3- Al_2Cu_3 涂层形成过程与工艺研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(4): 142 - 146.
Du Xinkang, Wang Jianjiang, Zhou Long, et al. Research on procedure and technological parameter of Al_2O_3- Al_2Cu_3 coating produced by SHS reactive spraying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(4): 142 - 146.

[11] 王建江, 杜心康, 王俊英, 等. SHS 火焰喷涂 Al_2O_3 基复相陶瓷涂层机理 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 63 - 68.
Wang Jianjiang, Du Xinkang, Wang Junying, et al. Research on mechanism of SHS reactive flame spraying Al_2O_3- based multi-phase coating [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(3): 63 - 68.

[12] 王建江, 杜心康, 赵忠民, 等. 粉体聚集状态对自蔓延高温合成反应喷涂 Al_2O_3/Al_2Cu_3 涂层的影响 [J]. 金属热处理, 2004, 29(1): 62 - 65.
Wang Jianjiang, Du Xinkang, Zhao Zhongmin, et al. Influence of aggregating state of particle on Al_2O_3- Al_2Cu_3 coating produced by SHS reactive spraying [J]. Heat Treatment for Metals, 2004, 29(1): 62 - 65.

[13] 郭景杰, 傅恒志. 合金熔体及处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 25 - 26.
Guo Jingjie J, Fu Hengzhi. Melt Alloy and Treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 25 - 26.

[14] 刘宏伟, 张 龙, 赵忠民, 等. 自蔓延高温合成基础理论研究进展 [J]. 军械工程学院学报, 2002, 14(2): 1 - 5.
Liu Hongwei, Zhang Long, Zhao Zhongmin, et al. A review of recent progress of spray forming technique [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2002, 14(2): 1 - 5.

[15] 邓世均. 高性能陶瓷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 57 - 69.
Deng Shijun. High Performance Ceramics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 57 - 69.

[16] 斯温 M V. 陶瓷的结构与性能 [M]. 郭景坤, 译. 北京: 科学出版社, 1998: 172.
Swen M V. Ceramics Structure and Performance [M]. Guo Jingkun (translator). Beijing: Science Press, 1998: 172.

[17] 毛裕文. 冶金熔体 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 130 - 135.
Mao Yuwen. Metallurgy Melt [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 130 - 135.

[18] 朱春城, 林 红. TiC- TiB_2 复合陶瓷的自蔓延高温合成 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2003, 19(1): 69 - 72.
Zhu Chuncheng, Lin Hong. Self-propagation high-temperature synthesis of TiC- TiB_2 ceramics [J]. Journal of Harbin Normal University, 2003, 19(1): 69 - 72.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net