

## 溅射技术在 SiC 薄膜沉积中的应用和工艺研究进展

梅芳<sup>1</sup>, 弓满锋<sup>1,2</sup>, 李玲<sup>1</sup>

(1. 湛江师范学院物理系, 广东 湛江 524048;

2. 西北工业大学超高温结构复合材料国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**[摘要]** 近年来, 国内外 SiC 薄膜材料制备工艺研究迅速发展, 由此带来 SiC 薄膜性能方面的研究也获得长足的进步, 新技术、新工艺、新性能不断涌现。溅射 SiC 技术相对于其它沉积技术(CVD、PIP 等)有许多独特的优点: 沉积温度低、结合性和致密性好、表面平整、硬度高、光电性能优异以及工艺安全环保等, 因此越来越受到重视, 且已经成为沉积高性能 SiC 薄膜的重要技术方法。主要论述了几种不同溅射技术, 着重介绍了溅射技术在 SiC 薄膜制备中的研究进展及 SiC 薄膜性能方面的研究进展和应用, 并且展望了溅射技术制备 SiC 薄膜的发展前景和当前热点研究领域。

**[关键词]** 溅射技术; SiC 薄膜; 进展

**[中图分类号]** TG174.444

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)02-0075-04

## Application and Technologic Progress of Sputtering for the SiC Coating

MEI fang<sup>1</sup>, GONG Man-feng<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1</sup>

(1. Institute of Material Physics and Chemistry, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang 524048, China;

2. National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[Abstract]** In recent years, the deposited technologies of SiC coatings have made great progress, which makes great development for the study of the property of SiC coatings, the new technology and the new property emerge continually. Comparing with the other technologies(CVD and PIP), the sputtering technology has many profits: the low deposited temperature, high adhesive strength and compaction, smooth surface, enhanced hardness, enhanced optics and electrics characteristic and soft-environmental, so it has been focused on depositing the SiC coatings more and more. The theory and deposited technology about several sputtering technologies were discussed; the sputtering-technologic progress, characteristic and application of SiC coatings were emphasized; and the developing foreground and the hotspots about the sputtering SiC coating were expected.

**[Key words]** Sputtering; SiC coating; Progress

## 0 引言

碳化硅(Silicon carbide, SiC)薄膜能够有效地延长机械、航空航天等相关领域中零部件的使用寿命,改善材料的硬度、耐磨性和摩擦性能<sup>[1]</sup>,增强材料耐腐蚀和抗氧化性能<sup>[2]</sup>,对需要防护的基体材料提供有效的热障薄膜,降低机器的维修成本和产品的制造成本等等。因此, SiC 薄膜材料广泛地应用于机械、微电子、光学、医疗等领域。常见的制备 SiC 薄膜的方法有:化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)<sup>[3-4]</sup>、物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)<sup>[5]</sup>、聚合物先驱体转化(Precursor Infiltration Pyrolysis, PIP)<sup>[6-7]</sup>等方法。本文主要论述几种溅射技术的原理和制备工艺,着重介绍溅射技术在 SiC 薄膜制

备、性能方面的研究进展和应用,并且展望了溅射技术制备 SiC 薄膜的发展前景和当前热点研究领域。

## 1 溅射技术及其分类

溅射是指具有足够高能量的粒子轰击固体(靶材)表面,通过动量传递使固体(靶材)表面的原子获得足够的能量从表面发射出来的现象。对于溅射技术而言,获得入射荷能离子是至关重要的<sup>[8]</sup>。溅射技术按照电极不同可以分为:直流溅射、射频溅射、磁控溅射、反应溅射等等。因为直流溅射系统通常只能应用于靶材为良导体的场合,故并不常用于制备 SiC 薄膜,而射频溅射、磁控溅射和反应溅射均可实现 SiC 薄膜的制备。在 SiC 薄膜的制备中,通常选用热压烧结粉末压块靶材,它属于绝缘靶,故常用射频溅射(RFS)技术和磁控溅射物理气相沉积(RFMS)技术来制备 SiC 薄膜。

### 1.1 射频溅射

射频溅射(RFS)系统需要在电源与放电室间配备阻抗匹配

**[收稿日期]** 2007-10-17

**[基金项目]** 湛江师范学院重点科研项目(L0507)

**[作者简介]** 梅芳(1972-),女,辽宁大连人,实验师,学士,主要从事无机非金属材料制备、性能测试方面的工作。

网和基片接地,射频溅射频率一般采用 13.56MHz。将射频电势加在位于绝缘靶下面的金属电极上,在射频电势的作用下,在交变电场中振荡的电子具有足够高的能量,使得中性气体分子电离、碰撞,从而放电自持。由于单纯的射频溅射是在 2 个电极之间添加射频场,作为无序碰撞的结果,势必会有从两极间逃逸的电子,这些电子将不会在射频场中振荡,从而不能得到足够高的能量以使气体电离,最终损失在辉光中,所以射频放电效率不高。单纯采用射频溅射技术制备 SiC 薄膜过去有些这方面的报道,近年来已经很少采用<sup>[9]</sup>。

## 1.2 磁控溅射

磁控溅射是在直流溅射和射频溅射的基础上增加磁效应装置,所以也称为射频磁控溅射(RFMS),图 1 为 RFMS 系统示意图。该系统可以描述为通过交叉电磁场增加电子在等离子体中漂移的路程,一般是在阴极靶内装上永磁铁或电磁铁,并使穿出靶阴极的磁力线的路径与电场方向垂直,提供一个环形磁场,在阴极表面附近的磁力线形成一个封闭的环形曲线,以便约束带

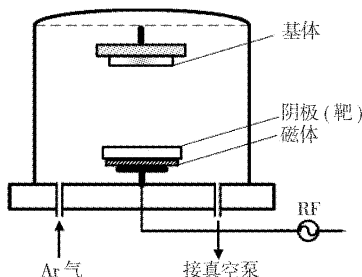


图 1 RFMS 系统示意图

Figure 1 Sketch of the RFMS system

电粒子运动。这样靶表面处的带电粒子不但受到电场作用,也受到靶磁场作用,但在弱磁场中,质量比离子小得多的电子受影响更大。靶表面电子受正交电磁场作用,其运动方向不断改变,绕阴极表面不断作回旋运动,在向阳极方向运动的同时,大大延长了运动的路径,也就使电子与中性气体分子的碰撞次数和其电离的次数显著增加。经多次碰撞的电子到达阳极时,能量显著下降,这不仅提高了溅射效率,又保证不引起基片温升过高,实现了低温和高速的溅射效果。有关 RFMS 制备 SiC 薄膜的报道很多<sup>[10-12]</sup>。

## 1.3 反应溅射

反应溅射是在直流溅射或射频溅射的基础上,利用反应性气体放电,使等离子体中的活性物种与溅射粒子进行化学反应生成化合物薄膜的过程,又称为射频磁控反应溅射(RFRMS)。一般在反应溅射时,是把所需反应气体以一定的比例添加到溅射气体(如 Ar)中,放电产生等离子体。反应气体的比例和分压影响沉积薄膜的成分和结构,应该指出的是反应气体的纯度很重要,真空系统的密封也要好,以减少沉积薄膜中杂质的含量,同时也避免一些有毒气体的泄露。有关 RFRMS 制备 SiC 薄膜的报道也很多<sup>[13-15]</sup>。

# 2 溅射技术对 SiC 薄膜各方面性能的影响

## 2.1 沉积参数对 SiC 薄膜晶体结构方面的影响

有关溅射工艺参数对所沉积的 SiC 薄膜晶体结构影响方面的报道较多,根据文献中报道的内容,现将一些典型的主要沉积工艺参数列出,如表 1 所示。

表 1 RFS 技术制备 SiC 薄膜的典型工艺参数

Table 1 The typical technology parameter of preparing the SiC film by RFS

溅射技术	靶材	溅射功率/W	沉积速率/(nm·min <sup>-1</sup> )	压强/MPa	基片温度/℃
射频溅射	热压烧结 SiC	500 ~ 1 300	10 ~ 30	665	50 ~ 300
磁控溅射	石墨盘、硅片或热压烧结 SiC	50 ~ 300	4 ~ 50	0.7	25 ~ 100
反应溅射	单晶硅片	100 ~ 1 000	20 ~ 60	0.4	25 ~ 300

研究表明,通常在低温( $\theta < 500^\circ\text{C}$ )条件下,所制备的 SiC 薄膜均为无定形结构,但是其硬度完全可以和 SiC 晶体结构相媲美。偏压对 RFMS-SiC 薄膜的晶体结构有很大影响,增大基体偏压可以有效增加薄膜中的  $\beta$ -SiC 相,有利于 SiC 相的成核和晶体生长<sup>[10]</sup>。偏压对 RFMS-SiC 薄膜的表面形貌和生长模型也有影响,在较低的偏压和溅射功率(50 ~ 100W)下,沉积速率和离子动能都较低,且 SiC 薄膜表面活性较低,此时在表面上呈现典型的柱状生长模式,由于这种柱状生长并非在基片法线方向生长,薄膜表面形貌显现为柱状粒子团。通过增加偏压和在高的射频功率(150 ~ 200W)下,离子动能和沉积速率增加,此时 SiC 表现出纤维状生长模式,薄膜表面形貌显现为多孔球状粒子团<sup>[11]</sup>。A. Mahmood<sup>[12]</sup>研究了基片温度、氩气/甲烷气体浓度比以及 RF 功率和沉积薄膜质量之间的关系,优化出合理的沉积工艺,发现在较低的 RF 功率下,沉积速率较低,但是却能够得到致密的、准化学计量的  $\alpha$ -SiC 薄膜,表明在低 RF 功率和高  $\text{CH}_4$  浓度条件下,有利于充足的 C 活性离子形成并参与到化学反应中,从而生成高质量的 SiC 薄膜。文献[13]则研究了退火

工艺对薄膜晶体结构的影响,研究表明,薄膜在 1 000℃退火以前均为无定形结构,在 1 000℃下退火处理 30min 后,C 扩散进入薄膜表面,SiC 无定形结构转变为晶体结构,说明退火温度对薄膜晶体结构影响重大且有利于 SiC 晶体形成。

## 2.2 SiC 薄膜力学性能方面

A. K. Costa<sup>[14]</sup>在 WC 基体上采用 RFMS 技术制备厚度为 5  $\mu\text{m}$  的 SiC 薄膜,薄膜残余应力达 2GPa,显微硬度高达 30GPa,沉积速率大于 40nm/min;在冷热循环试验中,SiC 薄膜表现出了极好的热稳定性;研究了温度对 SiC 薄膜硬度的影响,发现直至 1 100℃,其硬度值没有明显减小。N. Ledermann<sup>[15]</sup>采用 RFMS 技术在硅基片上沉积得到无定形的 SiC 薄膜,通过调节 RF 功率、沉积压力和基体偏压,得到残余应力分布在 -1 400 ~ +100MPa 之间变化的 SiC 薄膜;进一步调节沉积速率和离子轰击方向,得到厚度 2  $\mu\text{m}$  左右、应力为 -100MPa 的低应力薄膜,并且表面平坦、无孔隙、耐化学腐蚀且组成均匀。另外,A. K. Costa<sup>[16]</sup>还在 Si 基片上通过 RFMS 技术制备了 2.3 ~ 3.5  $\mu\text{m}$  厚的 SiC 薄膜,薄膜硬度为 29 ~ 40GPa,高于块体 SiC 材料和高温

CVD-SiC 薄膜的硬度;研究了薄膜硬度和内应力随沉积参数变化而变化的关系。为了保证基片表面高活性,宜采用较低的溅射沉积速率,此时 Si 和 C 溅射原子具有较高的能量。相反,高沉积速率对基片保持高表面活性不利。通过高温退火增加基片温度,可以有效消除残余应力以及有效增加薄膜中结构和化学有序性,但对薄膜硬度并无明显影响。还发现增加基片偏压导致 Ar 原子扩散进入薄膜,从而不利于薄膜力学性能的改善。

### 2.3 SiC 薄膜电学性能方面

S. M. Rajab<sup>[17]</sup>在硅基片上采用 RFMS 技术制备了 SiC 薄膜,分析了退火(1 000℃, 60min)对电容、电导率变化特性的影响,发现退火可以有效减少薄膜表面堆积区域的泄漏电流,增加 RF 功率可以有效增加薄膜中的 Si 含量。J. C. Zhou<sup>[18]</sup>在抛光的玻璃基片上采用 RFMS 技术制备了 SiC 薄膜,研究了退火(200~300℃, 20min)对薄膜表面形貌的影响,表明在文中所述的工艺条件下沉积的 SiC 薄膜表面平滑、密实紧凑且为无定形组织;揭示出随着退火温度增加,电阻系数快速上升,两者之间符合  $\ln R \propto \Delta W / (kT)$  的关系式( $\Delta W$  为薄膜电子激励能量,  $\Delta W$  随着退火温度增加也是增加的);在 25~250℃ 范围内,薄膜中电子跃迁机理在局部范围内属于电子短程迁移机理,电阻系数值分布在  $2.4 \times 10^{-3} \sim 4.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  范围内。

### 2.4 SiC 薄膜掺杂及光学性能方面的研究

A. Mahmood<sup>[19]</sup>在 Ar、CH<sub>4</sub> 混合气体中采用 RFRMS 技术沉积了 SiC 薄膜,发现:沉积参数对 SiC 薄膜的表面元素组成和光学性能影响很大,其表面成分和体积内部的成分也随之大为不同;在制备温度仅为 100℃ 时,仍有大量的氧化物和无定形 C 存在于薄膜表面;增加基体温度和增加甲烷气体浓度有利于强化薄膜表面,靠近大气的 SiC 薄膜表面上主要形成 SiO<sub>2</sub> 和无定形 C,薄膜内部则为 SiC 结构, SiC 的化学计量近似于标准计量关系;在 SiC 薄膜表面上形成无定形 SiC 结构,主要有 Si—O—C, 薄膜中间为 Si—C;增加 RF 功率和降低 CH<sub>4</sub> 浓度有利于减少石墨相,而当薄膜表面氧化后,薄膜对光的折射系数增加。文献[20]研究了氢化多孔 SiC 薄膜中氢气浓度和温度之间的相互影响关系,通过对不同温度下退火处理后薄膜中成键情况的分析,表明在 600~850K 温度下退火处理后的 SiC 薄膜中 Si—H 和 C—H 分别减少,在薄膜中存在 3 种类型的 H 原子结合方式(Si—H、C—H 和游离态 H),且随着氢分压增加,游离态的 H 浓度减少。文献[21]通过优化的工艺在硅基片上制备了 RFRMS-SiCN 薄膜,分析了薄膜结构和特性,表明在薄膜中由 Si、C、N 三种元素形成复杂的网络状结构,存在多种化学键 C—N、Si—C、Si—N,沉积薄膜的元素化学计量基本符合 SiCN 关系式,薄膜表面光滑且为无定形组织。文献[22]、[23]采用复合靶技术,对 SiC 薄膜进行掺杂 Al、Co 等元素,分析表明:Al、Co 元素的掺杂均会导致膜层中 SiC 结晶困难,造成膜层中析出大量的 Si 粒子,Co 原子与 Si 原子易形成 Co—Si 键合(如 CoSi 和 CoSi<sub>2</sub>),这种结构强烈影响 SiC 薄膜的光学吸收性能;试样的光致发光(PL)光谱显示有 2 个峰值,即 370nm 和 412nm,掺杂 Al、Co 等元素后,薄膜的 PL 峰值强度有所增加,这是因为掺杂元素导致薄膜中产生大量缺陷中心的原故。薄膜的光致发光(PL)光谱显示,在可见光光谱范围内,370nm 光谱峰值与薄膜中 Si—O 键形成的缺陷有关,412nm 光谱峰值与薄膜中 6H—SiC 的发光特

性有关。

## 3 结 语

综合 SiC 薄膜溅射制备技术,可以得出以下结论:1)制备时,基体温度相对较低,通常在 300℃ 以下;较低基体温度下制备的 SiC 薄膜组织结构多为无定形结构,通过退火后处理可以有效增加薄膜中的  $\beta$ -SiC 晶相;2)溅射法制备的 SiC 薄膜的结合性较好,薄膜致密性好,表面微裂纹、孔洞等缺陷较少,薄膜表面平整,薄膜的硬度相对于 CVD 技术制备的薄膜要高很多;3)溅射法制备的薄膜材料广泛,理论上只要可以作成靶材,均可实现溅射镀膜,又因为溅射法制备过程中沉积速率较慢,通常适合于制备较薄的薄膜(<15 $\mu\text{m}$ ),制备厚薄膜相对没有优势;4)溅射法制备 SiC 薄膜多采用热压烧结粉末压块靶材,溅射气源多采用高纯 Ar、N<sub>2</sub>/Ar 混合气,无有毒有害气体参与和产生,相对环保;5)溅射技术制备的 SiC 薄膜因为物理、电、光性能普遍优于 CVD-SiC 薄膜,故较多地应用于对性能要求较为严格的微电子系统和光学系统等元器件中,而对于 CVD-SiC、PIP-SiC,更多的是考虑其机械性能优异而应用于耐磨、耐腐蚀、超硬、耐高温等领域;6)溅射技术也并非就是万能的,它也有自身的不足,如能量利用率不高,溅射系统比较复杂和昂贵,导致制备 SiC 薄膜成本较高、沉积速率低等。

目前, SiC 薄膜的改性、改善研究日趋深入,考虑到薄膜和基体材料的晶格匹配性和热膨胀系数的差异,选择缓冲过渡层、薄膜成分梯度变化,制备出低应力、结合力优良、机械和光电性能更为优异的 SiC 薄膜,以便于满足材料应用领域日益增长的需要;考虑到光、磁、微电子等领域的应用以及器件的小型化、集成化,可通过对薄膜进行掺杂赋予材料新的性能。综合以上分析可知,当前研究 SiC 薄膜的热点问题有 3 点:1)采用 RF-MS 复合靶技术对薄膜进行掺杂处理;2)通过 RF-RMS 技术实现功能梯度薄膜的制备;3)对 SiC 薄膜的光、电、磁或它们的耦合性能的研究。

## [参 考 文 献]

- [1] 袁华, 俞宏英, 孙冬柏, 等. 化学镀制备高耐蚀耐磨 Ni-P-SiC 复合镀层[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(9): 16-19
- [2] 赵娟, 王贵, 刘朗, 等. SiC 涂层对不同碳基体氧化防护行为的研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 1-3
- [3] Kaneko T, Hosokawa Y, Suga T, et al. Low-temperature growth of polycrystalline SiC by catalytic CVD from monomethylsilane[J]. Micr. Eng., 2006, (83): 41-45
- [4] Regiani Inacio, Milton F S. Silicon carbide coating of mullite substrates by the CVD technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, (162): 130-135
- [5] Yi Jian, He Xiaodong, Sun Yue, et al. Electron beam-physical vapor deposition of SiC/SiO<sub>2</sub> high emissivity thin film[J]. Applied Surface Science, 2007, (253): 4 361-4 366
- [6] 付志强, 唐春和, 梁彤祥. PCS 先驱体转化法制备 SiC 薄膜的浸渍工艺[J]. 材料工程, 2003, (3): 28-31
- [7] 李春华, 黄可龙, 李效东, 等. 聚碳硅烷先驱体转换法制备 SiC 薄

- 膜研究[J]. 材料科学与工艺, 2003, 13(2): 222-227
- [8] 郑伟涛. 薄膜材料与薄膜技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 69-82
- [9] 刘雪芹, 龚恒翔, 杨映虎, 等. 射频共溅射 SiC 薄膜的制备和特性研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(4): 38-43
- [10] Wang M, Huang A P, Wang B, et al. Bias effects on structure of sputtered SiC films[J]. Materials Science and Engineering, 2001, (385): 25-27
- [11] Tang Huidong, Tan Shouhong, Huang Zhengren, et al. Surface morphology of  $\alpha$ -SiC coatings deposited by RFMS[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, (197): 161-167
- [12] Mahmood A, Muhl S, Sansores U L, et al. Dependency of reactive magnetron sputtered SiC film quality on the deposition parameters[J]. Thin Solid Films, 2000, (373): 180-183
- [13] Sha Z D, Wu X M, Zhuge L J. Structure and photoluminescence properties of SiC films synthesized by the RF-magnetron sputtering technique[J]. Vacuum, 2005, (79): 250-254
- [14] Costa A K, Camargo S S. Amorphous SiC coatings for WC cutting tools[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, (163/164): 176-180
- [15] Ledermann N, Baborowski J, Murali P, et al. Sputtered SiC thin films as protective coating for MEMS applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, (125): 246-250
- [16] Costa A K, Camargo S S, Achete C A, et al. Characterization of ultra-hard SiC coatings deposited by RF magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2000, (377): 243-248
- [17] Rajab S M, Oliveira I C, Massi M, et al. Effect of the thermal annealing on the electrical and physical properties of SiC thin films produced by RF magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2006, (515): 170-175
- [18] Zhou J C, Zhen X Q. Structure and electronic properties of SiC thin-films deposited by RF magnetron sputtering[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2007, (17): 373-377
- [19] Mahmood A, Muhl S, Machorro R, et al. Surface and optical analysis of SiC films prepared by RFRMS technique[J]. Diamond & Related Materials, 2006, (15): 71-79
- [20] Suzuki Y, Shikama T, Yoshioka S, et al. Concentration and thermal release of hydrogen in amorphous SiC films prepared by RF sputtering[J]. Thin Solid Films, 1997, (311): 207-211
- [21] Xiao Xingcheng, Li Yawen, Song Lixin, et al. Structural analysis and microstructural observation of  $\text{SiC}_x\text{N}_y$  films prepared by reactive sputtering of SiC in  $\text{N}_2$  and Ar[J]. Applied Surface Science, 2000, (156): 155-160
- [22] Mishra S K, Shekhar C P, Rupa K P, et al. Effect of pressure and substrate temperature on the deposition of nano-structured Si-C-N superhard coatings by magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2007, (515): 4 738-4 744
- [23] Sundaram K B, Alizadeh Z, Todi R M, et al. Investigations on hardness of RF sputter deposited SiCN thin films[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, (368): 103-108

(上接第 53 页)

表 1 涂层热震性能分析

Table 1 Coating thermal shock performance analysis

涂层	热震温度/℃	热震次数	热震现象
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Al}$	200	40	外观没有任何破损及裂纹。试样四周处的涂层与基体结合良好。
		25	试样边缘涂层与基体略微分离, 心部结合良好。
	300	30	随热震次数增加, 边缘处涂层与基体分离加重。至 30 次时, 涂层完全脱落, 脱落下的涂层完整、无缺损。
		19	边缘与基体开始略微分离, 中心部位结合较好, 无裂纹。
	400	24	涂层全部脱落。
		40	
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{ZnO} + \text{Al}$	200	40	
	300	40	外观没有任何破损、裂纹。试样四周处的涂层与基体结合良好。
	400	40	

瓷涂层结合良好。400℃时, 常用陶瓷涂层在第 24 次热冲击循环后脱落; 经 40 次热冲击循环后, 热化学反应热喷涂陶瓷涂层结合良好, 抗热震性能比常用陶瓷涂层提高近 1 倍。热喷涂法制备的陶瓷涂层与金属基体的结合方式为机械嵌合和物理结合(分子间范德华力), 而热化学反应热喷涂法制备的陶瓷涂层与

金属基体的结合方式是化学、机械、物理 3 种结合相混合, 因此涂层与基体的结合强度优于前者, 表现出较高的抗热震性能和较高的涂层结合强度。

### 3 结 论

- 1) 热化学反应热喷涂陶瓷涂层  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{ZnO} + \text{Al}$  在热喷涂过程中, 有  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  等新相生成。
- 2) 热化学反应热喷涂陶瓷涂层具有较好的抗热震性能, 表明涂层的结合强度较高。

#### [参 考 文 献]

- [1] 武建军, 曹晓明, 温鸣. 现代金属热喷涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 1-2
- [2] 吴子健, 吴朝军, 曾克里, 等. 热喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 9-11
- [3] 叶宏, 张津, 孙智宏, 等. 镁合金表面等离子喷涂纳米陶瓷涂层研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(4): 9-11
- [4] 马壮, 孙方红, 李智超, 等. 热化学反应法制备金属基陶瓷涂层的现状和发展[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(8): 48-50
- [5] 马壮, 孙方红, 李智超, 等. 热化学反应法制备氧化铝基陶瓷涂层及性能研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(12): 1-3
- [6] 邓世均. 高性能陶瓷涂层[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 104-107
- [7] 闫忠琳, 赵玮霖, 叶宏. 镁合金表面热喷涂及扩散处理[J]. 焊接, 2006, (7): 24-26