

C/C 复合材料表面原位生长 SiC_w 的工艺

李 军^{1,2}, 谭周建¹, 廖寄乔^{1,2}, 张 翔¹, 李丙菊¹

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 湖南金博复合材料科技有限公司, 益阳 413000)

摘 要: 以三氯甲基硅烷(CH_3SiCl_3 , MTS)为先驱体原料, 采用化学气相沉积法在 C/C 复合材料基体上原位生长碳化硅晶须, 研究稀释气体流量、催化剂以及沉积温度对碳化硅晶须生长的影响。结果表明: 有催化剂存在时可以制备具有较高长径比的 SiC_w , 无催化剂制备的 SiC 主要以短棒状或球状 SiC 为主; 随着稀释气体流量或者沉积温度的增加, SiC_w 的产率是先增加、后减少, 在 1 100 °C、载气和稀释气体流量均为 100 mL/min 时, 制备的碳化硅晶须的产率最高, 晶须质量最好。

关键词: 碳化硅晶须; C/C 复合材料; 稀释气体流量; 催化剂; 沉积温度

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

Technology of in-situ growing SiC_w on surface of C/C composites

LI Jun^{1,2}, TAN Zhou-jian¹, LIAO Ji-qiao^{1,2}, ZHANG Xiang¹, LI Bing-ju¹

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Kingbo Carbon-carbon Composites Co., Ltd., Yiyang 413000, China)

Abstract: The silicon carbide whiskers were deposited on C/C composites by chemical vapor deposition (CVD) with methyltrichlorosilane (MTS) as the precursor. The effects of dilute gas flow, catalyst and deposition temperature on the growth of silicon carbide whiskers were investigated. The results show that silicon carbide whiskers (SiC_w) with high length-diameter ratio are obtained when there is catalyst, but cosh-like or globular-like silicon carbides are got without catalyst, and with the increase of deposition temperature or the dilute gas flow, the yield of SiC_w firstly increases and then decreases, and the highest yield and high quality of silicon carbide whiskers are obtained under the conditions as: deposition temperature of 1 100 °C and flow of carry gas and dilute gas both for 100 mL/min.

Key words: SiC whiskers; C/C composites; dilute gas flow; catalyst; deposition temperature

碳化硅晶须是一种直径为纳米级至微米级的单晶纤维, 具有高强度、高硬度、高弹性模量及低密度、耐腐蚀、稳定的化学性质、强抗高温氧化能力等优良特性, 在制备高温金属基、陶瓷基复合材料中得到广泛的应用^[1-5]。SiC 晶须增强陶瓷基复合材料始于 20 世纪 90 年代, WANG 等^[3]对 SiC 晶须的氮化硅基复合材料中晶须取向的研究表明, 当晶须方向基本一致且晶须与基体界面弱连接时, 此方向中的断裂韧性具有

极大值, 抗折强度和断裂韧性分别为 1 038 MPa 和 10.7 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; YE 等^[4]用 SiC 晶须增强氧化铝的实验研究表明, 当 SiC 晶须的体积分数为 20% 时, $\text{SiC}_w/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料的弯曲强度达 508 MPa, 断裂韧性为 8.78 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 比纯铝的断裂韧性提高了近一倍。近年来, 为解决碳/碳(C/C)复合材料高温抗氧化涂层容易开裂的问题, 碳化硅晶须被作为增韧材料用于高温抗氧化涂层的制备中^[6-8], 取得了一定的效果, 但是, 由于碳

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA03A207); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB605800); 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(51021063)

收稿日期: 2010-12-24; 修订日期: 2011-04-08

通信作者: 廖寄乔, 教授, 博士; 电话: 0731-88877944; E-mail: liaojiao@126.com

化硅晶须是通过人工的方式掺杂进入涂层体系的,晶须的分散均匀性难以保证,同时,这种掺杂碳化硅晶须增韧涂层只能单方面地提高涂层自身的抗氧化能力,而在改善涂层和 C/C 基体之间的热膨胀性能不匹配方面没有任何作用,而后者往往才是导致涂层破坏的关键。研究表明^[9-12],如果晶须和基体相互交织缠绕在一起,不仅可提高晶须和基体的层间剪切强度,而且可以缓冲或阻止涂层内部裂纹的扩散。因此,有必要系统地研究 C/C 复合材料表面原位生长 SiC_w 的生长工艺,包括稀释气体流量、催化剂以及沉积温度对 CVD SiC_w 的影响。到目前为止尚未见到系统研究 C/C 复合材料表面原位生长 SiC_w 的文献报道。因此,有必要开展相关的研究,同时也为制备 SiC_w 增韧的高温抗氧化涂层工作开展基础性研究。在本研究中,本文作者在 C/C 复合材料基体上原位生长 SiC_w ,目的是在 C/C 基体和碳化硅涂层之间制备一层碳化硅晶须过渡层,使其作为基体和 SiC 涂层之间的缓冲带,一方面提高涂层和基体的结合强度,一方面利用晶须的拔出桥连与裂纹转向机制降低涂层中的裂纹尺寸和数量,从而达到提高涂层的防氧化性能和热震性能目的。

1 实验

1.1 样品制备

所用沉积基体为 C/C 复合材料,由湖南金博复合材料科技有限公司生产,其密度为 1.6 g/cm^3 ,试样尺寸为 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,试样用 600 号碳化硅砂纸打磨,再用超声波清洗后烘干,然后把样品分为两组,一组样品不作处理待用;另一组样品表面加载 Ni-La-Al 催化剂,催化剂的加载方法见文献^[13-15]。 SiC 晶须的制备工艺为以三氯甲基硅烷(CH_3SiCl_3 , MTS)为先驱体原料, H_2 用作载气和稀释气体,采用质量流量控制器(S49-33/MT)控制气体流量,通过鼓泡法把 MTS 带入反应室,载气流量为 100 mL/min ,稀释气体的变化范围为 $50\sim 200 \text{ mL/min}$,沉积温度范围为 $1\ 000\sim 1\ 150\text{ }^\circ\text{C}$,压力为常压。

1.2 性能表征

通过扫描电镜(SEM, JSM-6360LV)观察 SiC_w 的微观形貌, X 射线能谱仪(EDS, EDX-GENESIS 60S 型)分析晶须成分。由于试样尺寸相同,以试样的质量增加率(w)来表征 SiC_w 的产率, w 的计算公式如下:

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 和 m_1 分别为试样沉积前和沉积后的质量,用灵敏度为 $\pm 0.1 \text{ mg}$ 的电子天平称量试样质量。

2 结果与讨论

2.1 稀释气体流量对 CVD SiC_w 的影响

固定载气(H_2)流量为 100 mL/min ,沉积温度为 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$,压力为常压,沉积时间为 3 h ,以 H_2 为稀释气体,气体流量分别为 50 、 100 、 150 和 200 mL/min ,研究不同稀释气体流量对 CVD SiC_w 的影响。

2.1.1 稀释气体流量对 SiC 晶须的产率的影响

图 1 所示为稀释气体流量分别为 50 、 100 、 150 和 200 mL/min 时试样的质量增加率曲线。

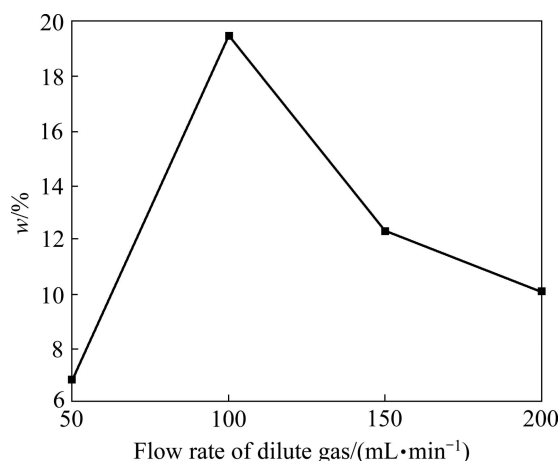


图 1 不同稀释气体流量下 CVD SiC_w 的质量增加率曲线

Fig. 1 Mass gain rate curve of CVD SiC_w at different flow rates of dilute gas

从图 1 中可以得出, SiC_w 产率与稀释气体流量不是成简单的线性关系,而是先增加,后减少。研究认为^[16-17],增大稀释气体流量,会降低反应表面气体的温度,造成沉积速度下降。在 CVD 制备碳化硅时,一般以 Ar 或者 H_2 为稀释气体时,但是 H_2 和 Ar 在作为稀释气体时,两者在 CVD 过程中所起的作用不同。Ar 不参与反应,其作用主要是平衡反应区的温度差,通过调节其流量而使试样沉积更均匀,所以 Ar 的影响比较单一。相对而言, H_2 在 CVD 过程中所起的作用就比较复杂, H_2 参与反应的事实已经被很多研究^[16, 18]证明。当 H_2 流量比较小时, H_2 参与反应对 SiC_w 产率的影响是主要的,对反应表面温度的影响是次要的,所以这个阶段随着 H_2 流量的增加, SiC_w 产率迅速增加,图 1 中 H_2 流量为 100 mL/min 时的质量增加

率几乎是 50 mL/min 时的 3 倍。但是, 随着 H_2 流量的增加, 对反应表面温度的影响逐渐增大, 导致了碳化硅产率下降。总之, 以 H_2 为稀释气体制备 SiC_w 时, 需要考虑 H_2 对反应有利和不利因素。在本研究中, H_2 流量为 100 mL/min 时, SiC_w 的产率最高。

2.1.2 稀释气体流量对 SiC_w 微观形貌的影响

图 2 所示为 H_2 流量分别为 50、100、150 和 200 mL/min 时试样表面碳化硅的微观形貌。从图 2 中可以看出, 当 H_2 流量为 50 mL/min 时, 并不能获得 SiC_w ; 只有当 H_2 流量大于等于 100 mL/min 时, 才能完全获得 SiC_w 。

在 CVD 过程中, H_2/MTS 的分解产物包括 CH_3 、 SiCl_3 、 SiCl_2 、 CH_4 、 HCl 、 SiCl_4 , 其中 CH_3 、 SiCl_3 是 SiC 生成的基础, CH_4 、 SiCl_4 是二次反应的产物, 一般认为不参与表面反应^[9]。 SiCl_2 易于吸附在反应表面, 当有 H_2 时能进一步反应生成 Si 和 HCl 。在本研究中, 当 H_2 流量为 50 mL/min 时, H_2 的流量不足以满足与 SiCl_2 反应的要求, 导致在反应初期生成的碳化硅晶体表面掺杂了部分 SiCl_2 , 阻碍了碳化硅晶体定向生长成为 SiC 晶须。只有增加 H_2 流量, 才有利于满足与 SiCl_2 反应的要求, 碳化硅晶体才能有连续生长成为 SiC_w 的条件。所以当氢气流量大于等于 100 mL/min 时, 均能生成 SiC_w 。

2.2 催化剂对 CVD SiC_w 的影响

根据 2.1 节的分析, 在其它条件不变的情况下, 载气和稀释气体流量均为 100 mL/min 时为 SiC_w 的最佳制备工艺。在此工艺下, 研究催化剂对 CVD 制备 SiC_w 的影响。图 3 所示为表面加载有催化剂的样品和表面未作处理的样品化学气相沉积 1 h 后样品表面的微观形貌和元素分析谱。

从图 3 中可以看出, 有催化剂制备的碳化硅是有较高的长径比的 SiC_w , 相比而言, 无催化剂制备的碳化硅主要以短棒状或球状 SiC 为主。在 CVD SiC_w 的过程中, SiC_w 主要通过气-液-固(V-L-S)机理生成, 催化剂的作用体现在: 一方面, 催化剂可与反应体系中的其它组分(主要 MTS 分解产生的 CH_3 和 SiCl_3)在较低的温度下形成低共熔液相, 这对 CH_3 和 SiCl_3 分解产生的 $\langle\text{C}\rangle$ 和 $\langle\text{Si}\rangle$ 是有利的, 当分解产生的 $\langle\text{C}\rangle$ 和 $\langle\text{Si}\rangle$ 达到一定过饱和度时, 开始形成 SiC 晶核并析出在液体与基体的界面上, 随着原料的持续供给, SiC 晶核沿一维方向连续生长生成 SiC_w 。同时, 这种溶解析出的生长机制相应地减少了无液相催化剂存在部位 SiC 的成核与长大, 从而降低碳化硅颗粒出现的几率; 另一方面, 催化剂的使用能够降低反应的活化能, 加速中间相原料 CH_3 和 SiCl_3 的生成和分解, 从而加快 SiC_w

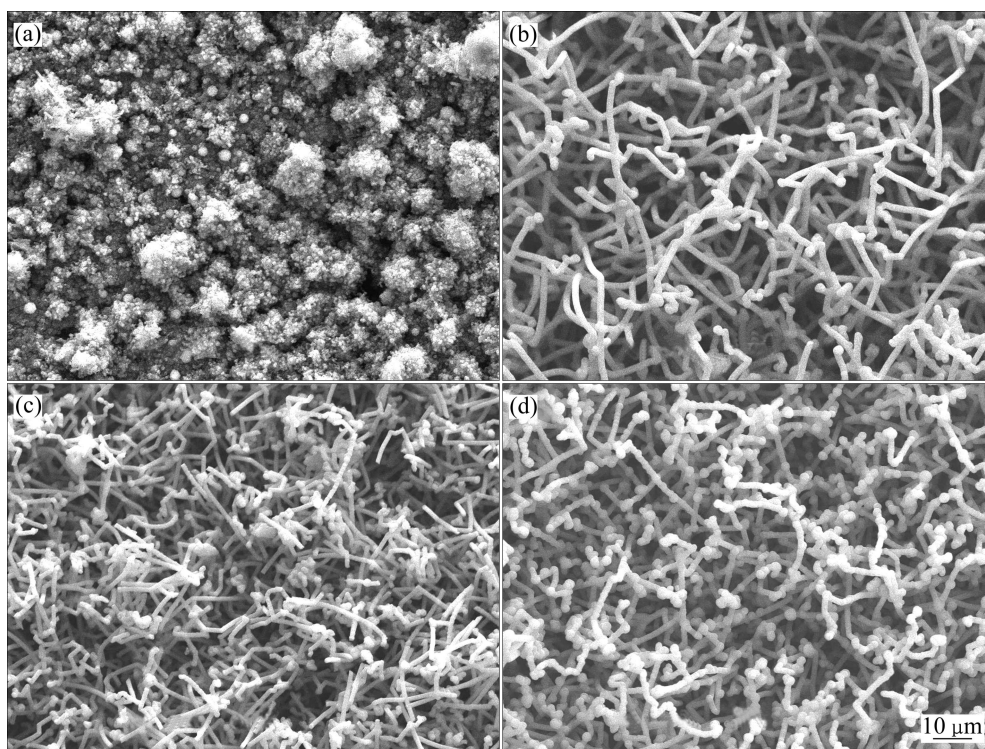


图 2 不同稀释气体流量下 CVD SiC_w 的微观形貌

Fig. 2 Morphologies of CVD SiC_w at different dilute gas flow rates: (a) 50 mL/min; (b) 100 mL/min; (c) 150 mL/min; (d) 200 mL/min

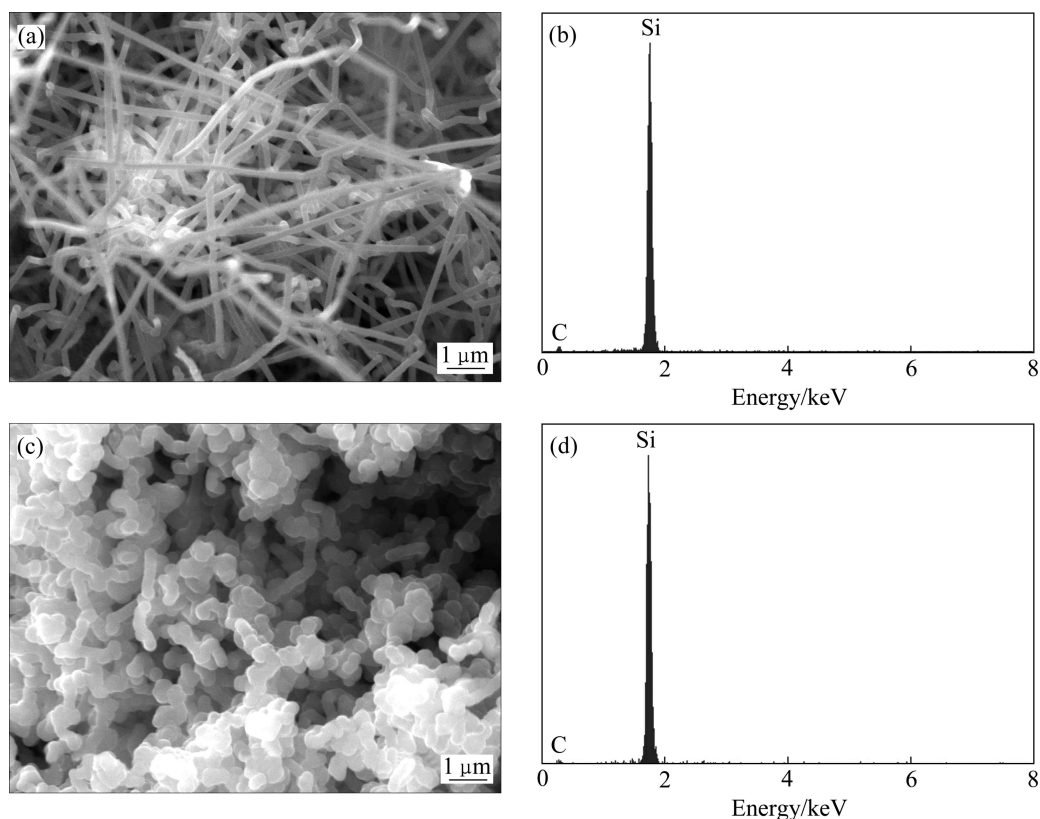


图 3 加催化剂和无催化剂制备的 SiC_w 的微观形貌和元素分析

Fig. 3 Micrographs(a), (c) and surface EDS analyses(b), (d) of SiC_w obtained with((a), (b)) and without ((c), (d)) catalyst

的沉积速率。当 SiC 达到饱和时析出碳化硅晶核，在催化剂的作用下沿着液-固界面的轴向连续、均匀的生长，因此得到的 SiC_w 表面光滑，形貌好。

2.3 沉积温度对 CVD SiC_w 的影响

根据 2.1 节和 2.2 节的研究结果，在固定载气和稀释气体流量均为 100 mL/min、有催化剂存在时，重点研究沉积温度对 CVD SiC_w 的影响。

图 4 所示为沉积温度分别为 1 000、1 050、1 100、1 150 $^{\circ}\text{C}$ 沉积时间为 1 h 时试样的质量增加率的曲线。

从图 4 中可以得出， SiC_w 的产率与沉积温度不是成简单的线性关系，而是先增加、后减少，拐点是 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 。热力学分析表明^[20]：由 MTS 分解沉积 SiC 涂层，一般在 900~1600 $^{\circ}\text{C}$ 进行，在较低的温度，沉积速率受表面反应限制，当温度增高时，表面反应速率以指数升高，所以，物质传递会成为控制因素。图 4 中在 1 000~1 100 $^{\circ}\text{C}$ ，沉积速率与温度之间呈很好的线性关系，说明沉积过程主要受表面反应控制，在 1 100~1 150 $^{\circ}\text{C}$ ，随着沉积温度的升高，沉积速率下降，说明当温度大于等于 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 时，CVD 过程的控制因素发生了变化，刘荣军等^[20-21]的研究表明，在 1 000~

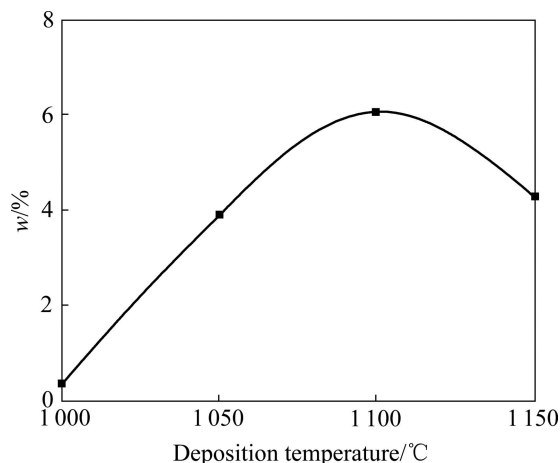


图 4 不同沉积温度 CVD SiC_w 的质量增加率曲线

Fig. 4 Mass gain rate curve of CVD SiC_w at different deposition temperatures

1 300 $^{\circ}\text{C}$ ，随着温度的升高， SiC 的沉积速率是逐渐增大的，且当温度大于等于 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 时， SiC 的沉积速率迅速增大。而在本研究中，1 150 $^{\circ}\text{C}$ 时， SiC 的沉积速率相对 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 是下降的，这可能是催化剂影响造成的，前面催化剂对 CVD SiC_w 的影响的研究结果表明，催化剂能加速中间相原料 CH_3 和 SiCl_3 的生成和分解，

在本研究中, 当温度大于等于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 时, 由于 MTS 分解过快, 造成催化剂被包覆失去活性, 导致 SiC 沉积速率下降, 虽然温度的升高能增大 SiC 的沉积速率, 但是增加作用没有催化剂的作用明显, 所以, $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 时 SiC 沉积速率下降。且实验过程中发现, 随着温度的升高, 基体表面沉积的 SiC 的颜色逐渐由银白色变成黑色。制备的 SiC 的微观形貌差异很大。

图 5~8 所示分别为 $1\ 000$ 、 $1\ 050$ 、 $1\ 100$ 、 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 沉积时间为 $1\ \text{h}$ 制备的 SiC_w 的微观形貌和元素分析结果。

从图 5~8 中可以看出, $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 时只有极少量的 SiC_w 生成, C/C 基体表面分布有许多催化剂颗粒, B 点的 EDS 结果表明催化剂颗粒表面有少量 SiC 生成, 可能因为浓度不足没有定向生成 SiC_w ; $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 及 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 时, C/C 基体表面被浓密的 SiC_w 覆盖; $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 时, C/C 基体表面主要是 SiC 颗粒及少量短棒状的 SiC 。

化学气相沉积法制备 SiC_w 的机理主要是 V-L-S 机理, 且催化剂在整个过程中起着关键的作用。在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 时, 由于温度低, MTS 分解缓慢, 只生成了很少量

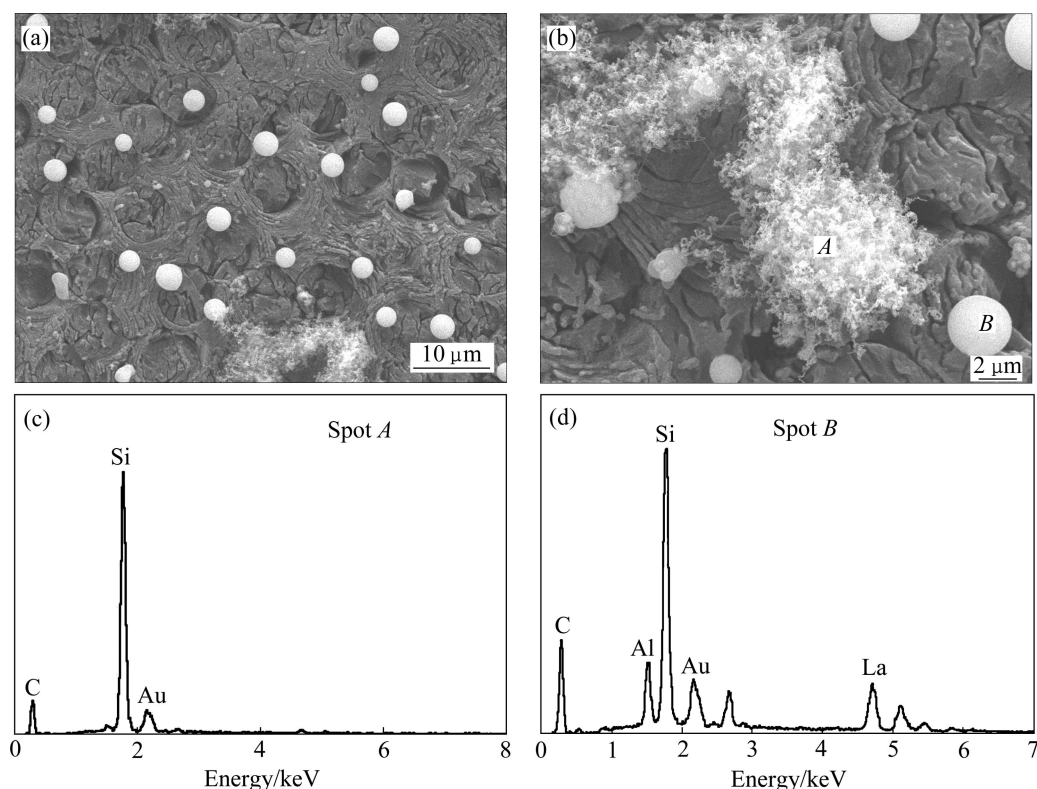


图 5 沉积温度为 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 制备的 SiC_w 的表面形貌和元素分析

Fig. 5 Surface micrographs((a), (b)) and EDS analyses((c), (d)) of SiC_w at deposition temperature of $1\ 000\ ^\circ\text{C}$

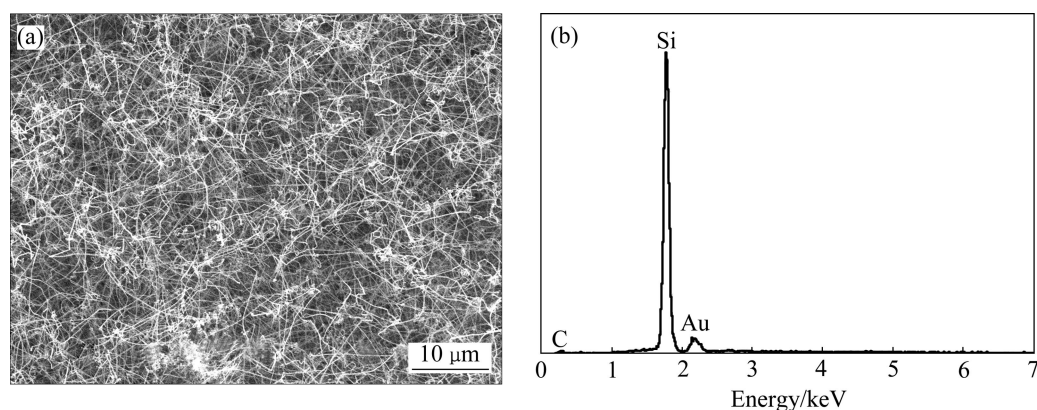


图 6 沉积温度为 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 制备的 SiC_w 的表面形貌和元素分析

Fig. 6 Surface micrograph and surface EDS analyses of SiC_w at deposition temperature of $1\ 050\ ^\circ\text{C}$

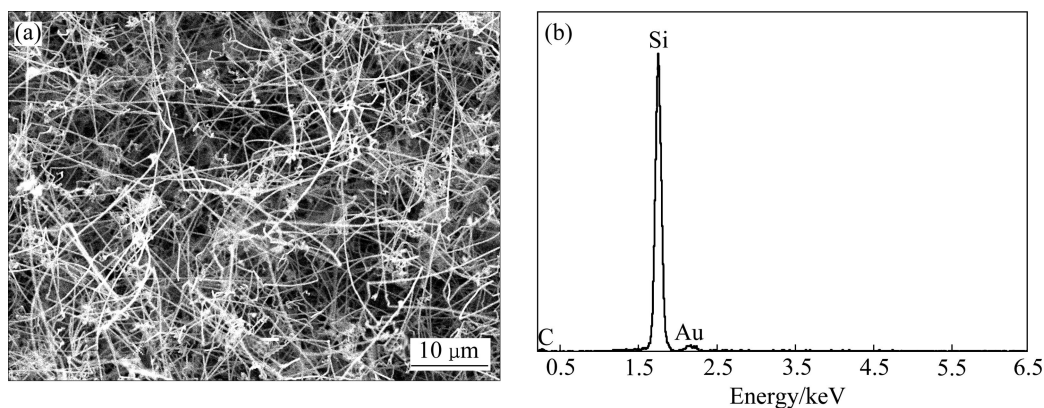


图 7 沉积温度为 1100 °C 制备的 SiC_w 的表面形貌和元素分析

Fig. 7 Surface micrograph and surface EDS analyses of SiC_w at deposition temperature of 1100 °C

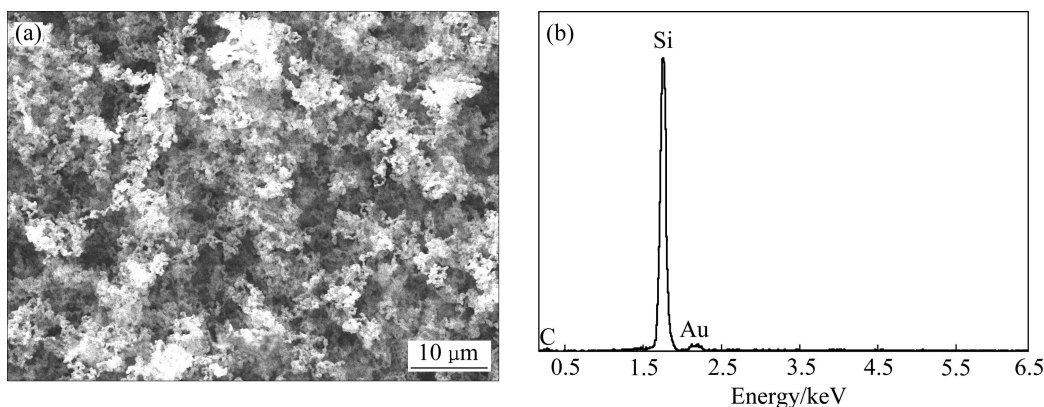


图 8 沉积温度为 1150 °C 制备的 SiC_w 的表面形貌和元素分析

Fig. 8 Surface micrograph and surface EDS analyses of SiC_w at deposition temperature of 1150 °C

的 SiC_w, 当温度升高到 1050 °C 时, 大量的 SiC_w 生成; 在 1100 °C 时, MTS 的分解速度与 SiC_w 的生长速度达到一致, 此时 SiC_w 的产率最高; 随着温度的进一步升高, MTS 分解过剩, 导致催化剂表面被过多的分解产物覆盖, 失去活性, SiC_w 的定向生长受到影响, 形成了颗粒状和短棒状碳化硅。综上所述, 在本研究中, 1100 °C 是制备 SiC_w 的最佳温度。

3 结论

1) SiC_w 的产率随稀释气体流量的增加先增加、后减少, 当稀释气体流量为 100 mL/min 时, SiC_w 的产率最高, 且只有当稀释气体流量大于等于 100 mL/min 时, 才能完全获得 SiC_w。

2) 有催化剂能制备有较高长径比的 SiC_w, 无催化剂制备的 SiC 主要以短棒状或球状 SiC 为主。

3) SiC_w 的产率随沉积温度的增加先增加、后减

少, 拐点是 1100 °C。1000 °C 时, 只有极少量的 SiC_w 生成, C/C 基体表面分布有许多催化剂颗粒; 1050 °C 及 1100 °C 时, C/C 基体表面被浓密的 SiC_w 覆盖; 1150 °C 时, C/C 基体表面主要生成颗粒状和短棒状 SiC, 1100 °C 是制备 SiC_w 的最佳温度。

REFERENCES

- [1] 聂立芳, 张玉军, 魏红康. 碳化硅晶须增韧陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 山东陶瓷, 2006, 29(2): 16-19.
NIE Li-fang, ZHENG Yu-jun, WEI Hong-kang. Recent researches and developments of SiC whisker-reinforced ceramic-matrix composites[J]. Shandong Ceramics, 2006, 29(2): 16-19.
- [2] 宋祖伟, 李旭云, 蒋海燕, 刘希光, 戴长虹. 碳化硅晶须合成工艺的研究[J]. 无机盐工业, 2006, 38(1): 29-31.
SONG Zu-wei, LI Xu-yun, JIANG Hai-yan, LIU Xi-guang, DAI Chang-hong. Study on synthesis technology of silicon carbide whiskers[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2006, 38(1): 29-31.

- [3] WANG Chang-an, HUANG Yong, ZHAI Hong-xiang. The effect of whisker orientation in SiC whisker-reinforced Si₃N₄ ceramic matrix composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1999, 19(10): 1903–1909.
- [4] YE F, LEI T C, ZHOU Y. Interface structure and mechanical properties of Al₂O₃-20vol%SiC_w ceramic matrix composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 281(1/2): 305–309.
- [5] WANG Chang-an, HUANG Yong. Improved sinterability of SiC(w)/Si₃N₄ composites by whisker-oriented alignment[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 390(1/2): 319–325.
- [6] 付前刚. SiC 晶须增韧硅化物及 SiC/玻璃高温防氧化涂层的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- FU Qian-gang. Study on the SiC whisker-toughened silicides and SiC/glass oxidation protective coatings[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [7] LI He-jun, FU Qian-gang, SHI Xiao-hong, LI Ke-zhi, HU Zhi-biao. SiC whisker-toughened SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2006, 44(3): 602–605.
- [8] FU Qian-gang, LI He-jun, SHI Xiao-hong, LI Ke-zhi, ZHANG Wei, HUANG Min. A SiC whisker-toughened SiC-CrSi₂ oxidation protective coating for carbon/carbon composites[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(8): 3757–3760.
- [9] XU J, ZHANG H, JIANG G, ZHANG B, LI W. SiC whisker reinforced MoSi₂ composite prepared by spark plasma sintering from COSHS-ed powder[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S2): s504–s507.
- [10] SUN L, PAN J. Fabrication and characterization of TiC_w/MoSi₂ and SiC_w/MoSi₂ composites[J]. Materials Letters, 2002, 53(1/2): 63–67.
- [11] 周振中, 李铁虎, 艾艳玲, 宋发举. Ni/SiO₂ 催化制备炭/炭复合材料研究[J]. 炭素技术, 2005(5): 1–5.
- ZHOU Zhen-zhong, LI Tie-hu, AI Yan-ling, SONG Fa-ju. Study of catalytic fabrication of C/C composites with Ni/SiO₂ as catalyst[J]. Carbon Techniques, 2005(5): 1–5.
- [12] 李 军, 谭周建, 张 翔, 廖寄乔. 原位生长碳纳米管对化学气相沉积 SiC 涂层的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 418–424.
- LI Jun, TAN Zhou-jian, ZHANG Xiang, LIAO Ji-qiao. Effect of in-situ carbon nanotubes on chemical vapor deposition SiC coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 418–424.
- [13] 周建伟, 廖寄乔, 王占锋. 原位生长碳纳米管对炭/炭复合材料导热性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 383–387.
- ZHOU Jian-wei, LIAO Ji-qiao, WANG Zhan-feng. Effect of in-situ carbon nanotube on thermal conductivity of carbon/carbon composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(3): 383–387.
- [14] 廖寄乔, 王占锋, 周建伟. 采用浸渍-还原法在碳纤维表面制备纳米镍催化剂颗粒[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1033–1038.
- LIAO Ji-qiao, WANG Zhan-feng, ZHOU Jian-wei. Synthesis of nano-nickel particles on carbon fibers by impregnation-reduction method[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2007, 38(6): 1033–1038.
- [15] 李 军, 张 翔, 廖寄乔, 谭周建. SiC 晶须的原位生长及其在 C/C 复合材料抗氧化涂层中的应用[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 15(3): 277–282.
- LI Jun, ZHANG Xiang, LIAO Ji-qiao, TAN Zhou-jian. In-situ growth of SiC whiskers and application in anti-oxidation coating of C/C composite materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2010, 15(3): 277–282.
- [16] 刘荣军, 张长瑞, 周新贵, 曹英斌, 刘晓阳. 稀释气体对化学气相沉积 SiC 涂层生长行为的影响[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(12): 1563–1566.
- LIU Rong-jun, ZHANG Chang-rui, ZHOU Xin-gui, CAO Ying-bin, LIU Xiao-yang. Effect of diluent gases on growth behavior of chemical vapor deposited SiC coatings[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(12): 1563–1566.
- [17] LEE Y J, CHOI D J, KIM S S, LEE H L, KIM H D. Comparison of diluent gas effect on the growth behavior of horizontal CVD SiC with analytical and experimental data[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177/178: 415–419.
- [18] 黄 浩, 陈大明, 仝建峰, 李宝伟. 石墨表面 CVD SiC 涂层微观结构研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(2): 50–54.
- HUANG Hao, CHEN Da-ming, TONG Jian-feng, LI Bao-wei. Microstructure study of the SiC coatings on graphite by CVD[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(2): 50–54.
- [19] LOURNAGNE F, LANGLAIS F, NASLAIN R. Reactional mechanisms of the chemical vapour deposition of SiC-based ceramics from CH₃SiCl₃/H₂ gas precursor[J]. Journal of Crystal Growth, 1995, 155(17): 205–213.
- [20] 刘荣军, 张长瑞, 周新贵, 曹英斌, 刘晓阳, 张 彬. 低温化学气相沉积 SiC 涂层显微结构及晶体结构研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1107–1111.
- LIU Rong-jun, ZHANG Chang-rui, ZHOU Xin-gui, CAO Ying-bin, LIU Xiao-yang, ZHANG Bin. Microstructure and crystal structure of SiC coatings deposited at low temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11): 1107–1111.
- [21] 刘荣军, 张长瑞, 刘晓阳, 周新贵, 曹英斌. CVD 过程中温度对 SiC 涂层沉积速率及组织结构的影响[J]. 航空材料学报, 2004, 24(4): 22–26.
- LIU Rong-jun, ZHANG Chang-rui, LIU Xiao-yang, ZHOU Xin-gui, CAO Ying-bin. The effects of deposition temperature on the deposition rates and structures of CVD SiC coatings[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(4): 22–26.

(编辑 李艳红)