

预制体类型及孔隙结构对化学气相渗透 TaC 的影响

陈招科, 熊 翔, 李国栋

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要 : 在分析和计算机准三维(2.5D)针刺整体炭毡、低密度炭毡孔隙结构的基础上, 研究不同温度和压力下反应气体在上述预制体孔隙中的扩散行为、TaC 的沉积速率及渗透深度。结果表明: 在 800~1000 ℃ 和 60~400 Pa 时, TaCl₅ 气体在低密度炭毡中的有效扩散系数大于其在准三维针刺毡中的有效扩散系数。在 800~950 ℃ 时, TaC 在准三维针刺整体炭毡中的沉积速率大于其在低密度炭毡的沉积速率, 但在 950~1 000 ℃ 则刚好相反; 在 800 ℃ 和不同压力下, TaC 在准三维针刺整体炭毡中的沉积速率均大于其在低密度炭毡中的沉积速率; TaC 在低密度炭毡的沉积过程受表面反应控制和孔隙扩散控制的转变温度为 950 ℃, 而在准三维针刺整体毡中的转变温度则为 900 ℃。在 800 ℃ 和 200 Pa 时, TaC 在不同预制体中的渗透深度均为 100%, 随着沉积温度的升高以及压力的升高(400 Pa)和降低(60 Pa), TaC 在准三维针刺炭毡中的渗透深度显著降低, 且明显小于同条件下其在低密度炭毡中的渗透深度。

关键词 : TaC; 化学气相渗透; 孔隙结构; 扩散; 渗透深度

中图分类号 : TB 332

文献标志码 : A

Influence of preforms and pore structures on chemical vapor infiltration of TaC

CHEN Zhao-ke, XIONG Xiang, LI Guo-dong

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract : The effects of deposition temperature and pressure on the diffusion behavior of TaCl₅ vapor in the perform pores, and the deposition rates, infiltration depths of TaC in the performs were researched on the basis of theoretical analyses of the pore structures of 2.5D needle-punctured felts, low-density carbon felts. The results show that at 800–1 000 ℃ and 60–400 Pa, the effective diffusion coefficient of TaCl₅ vapor in low-density felt is larger than that in 2.5D needle-punctured felt; at 800–950 ℃, the deposition rate of TaC in 2.5D needle-punctured perform is larger than that in the low-density perform, but it is opposite at 950–1 000 ℃. At 800 ℃ and 60–400 Pa, the deposition rate of TaC in 2.5D needle-punctured felt is larger than that in low-density felt. The change temperatures controlled by surface reactive kinetics and diffusion kinetics of pore in TaC-CVI process are 950 ℃ in low-density felts and 900 ℃ in 2.5D needle-punctured felts, respectively; at 800 ℃ and 200 Pa, the infiltration depths of TaC in 2.5D needle-punctured felts and low-density felts are all 100%, but decrease obviously with increasing temperature and variation of pressure. In addition, the infiltration depth of TaC in 2.5D needle-punctured felts is less than that in low-density felts.

Key words : TaC; chemical vapor infiltration; pore structure; diffusion; infiltration depth

TaC 的熔点高达 3 880~4 000 ℃^[1], 且具有硬度高、 还具有优异的高温力学性能、抗高速气流(粒子流)冲刷抗冲刷性能好、耐腐蚀和化学稳定性好等优点;同时, 刷性能、抗烧蚀性能, 并与 C/C 材料具有良好的化学

基金项目: 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(50721003); 国家自然科学基金资助项目(50872154)

收稿日期: 2009-06-09; 修订日期: 2010-06-08

通信作者: 熊 翔, 教授, 博士; 电话: 0731-88836079; E-mail: xiong228@sina.com

相容性及物理相容性^[2]。当将 TaC 渗入碳纤维预制体中,形成 TaC 陶瓷基体^[3]或 TaC 纤维表面涂层^[4]时,该复合材料具有优良的超高温抗氧化性能和抗烧蚀性能。GIBSON 等^[5]利用三步化学反应工艺制备了 Cf/TaC 复合材料,但是其残余孔隙率高。KIM^[6]用两种方法制备出石墨纤维增强 TaC 复合材料,但是其力学性能较差。

与热压烧结等工艺相比,用化学气相渗透(CVI)法制备纤维增强陶瓷基复合材料时所沉积的陶瓷基体不会损伤预制体。因此,CVI 法被广泛用于多孔纤维预制体中沉积炭、SiC、BN 以及其它难熔金属材料,并成为唯一得到实用且商业化生产的方法。法国 Bordeaux 大学、法国 SEP 公司、德国 Karlsruhe 大学、美国 Oak Ridge 国家实验室、西北工业大学、中南大学等均对 CVI 法制备 C/C 复合材料、C/SiC 复合材料开展了深入的研究^[7-13]。目前,关于 CVI 工艺的研究主要集中在复合材料的致密化方面,其目的是为如何缩短 CVI 工艺时间以节约工艺成本;并通过理论分析反应气体在多孔预制体中的扩散传质、对流传质、沉积反应以及反应气体损耗等,建立化学气相渗透过程模型。然而,这些研究均假设预制体的孔隙为细长圆孔且孔隙结构均匀一致。从航空航天实际应用较多的针刺整体炭毡来看,其内部孔隙结构并不均匀一致;因此,这些理论模型与实际情况相差甚远。

为了更好地在预制体中沉积出 TaC 基体,有必要详细研究针刺整体毡的孔隙结构以及其对化学气相渗透 TaC 的影响。本文作者在详细分析针刺整体毡孔隙结构的基础上,探讨反应气体在孔隙中的扩散行为,研究不同沉积温度和压力下 TaC 在多孔预制体中的沉积速率及渗透深度,并探讨 TaC 在多孔预制体中渗透/沉积过程的控制机制,为获得整体密度均匀,致密度较高的含 TaC、SiC/TaC 中间界面的 C/C 材料奠定基础。同时,还以低密度炭毡以及石墨纸为预制体或沉积基底,对比研究预制体类型及孔隙结构对 TaC-CVI 过程的影响。

1 实验

采用针刺整体毡(A, 50 mm×10 mm×10 mm, 0.56 g/cm³)、低密度炭毡(B, 50 mm×10 mm×10 mm, 0.16 g/cm³)及柔性石墨纸(C, 50 mm×10 mm×1 mm)作为预制体或沉积基底。针刺整体毡中碳纤维体积分数为 0.32,其中无纬布层长纤维与网胎层短纤维体积比为 0.85:0.15。低密度炭毡的碳纤维体积分数为 0.09。

在沉积前,将针刺整体毡、低密度炭毡和柔性石墨纸进行超声清洗,然后 110 °C 干燥以去除水分,最后,将 3 种(15 个)预制体或基底悬挂于反应器的保温区中。CVD 反应器及样品装载示意图如图 1 所示。其中,5 个针刺整体毡的放置位置为 A(0°, z=70~320 mm);5 个低密度炭毡的放置位置为 B(120°, z=70~320 mm);5 个柔性石墨纸基底的放置位置为 C(240°, z=70~320 mm)。设定反应器中进气口位置为 z=0 mm (见图 1)。

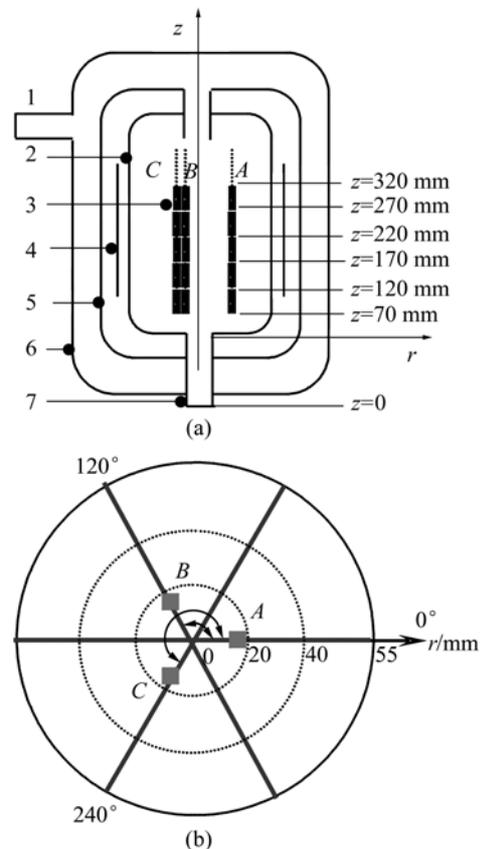


图 1 CVD 反应器及样品装载示意图

Fig.1 Schematic map of CVD reactor (a) and load of samples (b): 1—Gas outlet; 2—Graphite crucible; 3—Samples; 4—Graphite heater; 5—Heat preservation; 6—Stainless steel jacket; 7—Gas inlet

采用 TaCl₅-Ar-C₃H₆ 体系,在预制体中碳纤维表面或基底表面沉积 TaC。工艺参数的研究范围主要设定为 TaC-CVD 过程受表面动力学控制的工艺参数范围^[14]。气体流速、滞留时间分别取沉积受表面反应控制的最大气体流速(40 cm/s)以及最小滞留时间(1.2 s);载气/稀释气体流量比取最小值(1/4);沉积温度及压力的研究范围分别为 800~1 000 °C 和 50~400 Pa。

利用精确度为 0.1 mg 的 AdventureTM 电子天平对

样品进行称量; 并以样品在单位面积和单位时间内的质量增加来表征沉积速率。

$$r = \frac{m_f - m_0}{A \cdot t} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中: r 为沉积速率, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$; m_f 为沉积后基底质量, mg ; m_0 为沉积前基底质量, mg ; Δm 为基底沉积前后的质量变化, mg ; A 为基底的表面积, cm^2 ; t 为沉积时间, h 。

TaC 在纤维表面沉积后会使得碳纤维表面的颜色变成黄色; 在预制体里层, 没有沉积 TaC 的碳纤维则为黑色; 每次实验后, 将样品沿横截面方向切开, 测量横截面中黄色/黑色界面与预制体表层的距离, 将此距离除以预制体厚度的一半获得渗透百分比, 并用此百分比来表征渗透深度。用 JEOL-6360LV 型扫描电子显微镜(SEM)观察预制体的微观孔隙结构以及化学气相渗透后 TaC 的微观沉积形貌。

2 结果与讨论

2.1 预制体孔隙结构

图 2 所示为针刺整体毡的微观结构及孔隙结构。

针刺整体毡的孔隙主要分为三类: 一是纤维束内单丝纤维之间的 I 型束内孔隙; 二是纤维束与纤维束之间的 II 型束间孔隙; 三是网胎层内短纤维与短纤维

之间的 III 型层间孔隙。12 k 碳纤维束的截面为圆形, 单丝的截面也为圆形, 假设碳纤维束内的单丝按开启式排列^[15], 则可计算出束内 I 型孔隙的尺寸为 $4.8 \mu\text{m}$; 而 II 型孔隙的尺寸约为 $246.0 \mu\text{m}$, III 型层间孔隙尺寸则在 $300.0 \sim 400.0 \mu\text{m}$ 。

假设针刺整体毡中的纤维体积分数为 φ_f , 无纺布长纤维体积分数为 φ_{f-w} , 网胎中短纤维体积分数为 φ_{f-d} , 则有:

$$\begin{cases} \varphi_{f-w} + \varphi_{f-d} = \varphi_f = 0.32 \\ \varphi_{f-w} + \varphi_{f-d} = 0.85:0.15 \end{cases} \quad (2)$$

而其 I 型束内孔隙 φ 、II 型束间孔隙 φ 和 III 型层间孔隙 φ 的体积分数则为

$$\begin{cases} \varphi = (1 - \varphi_i) \frac{\varphi_{f-w}}{\varphi_i} \\ \varphi + \varphi = 1 - \frac{\varphi_{f-w}}{\varphi_i} - \varphi_{f-d} = 1 - \left(\frac{1}{\varphi_i} + \frac{3}{17}\right) \varphi_{f-w} \end{cases} \quad (3)$$

式中: φ_{f-w}/φ_i 为纤维束在针刺整体毡中所占体积分数。

经计算, 纤维束内孔隙体积分数 $\varphi = 0.129$ 。短纤维在网胎中所占体积比为 ρ_n/ρ_c (ρ_n 为网胎的密度, ρ_c 为碳纤维的密度), 而短纤维在准三维整体毡中所占体积分数为 φ_{f-d} , 可得网胎在毡体中所占体积比为 $\varphi_{f-d}\rho_c/\rho_n$; 由此得出网胎层间 I 型孔隙的体积分

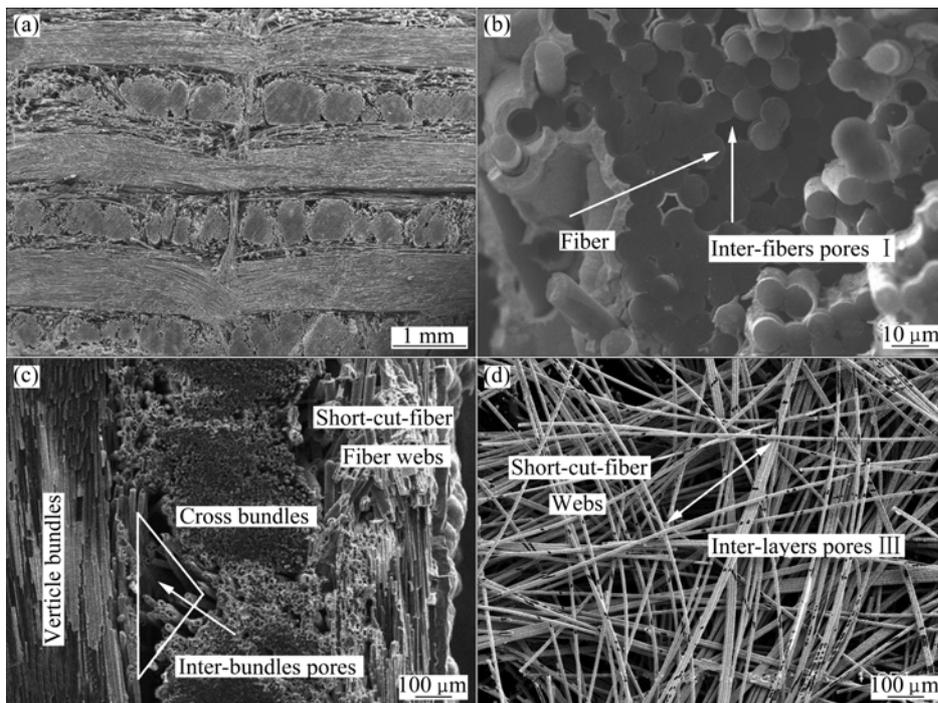


图 2 已渗透 TaC 的准三维针刺整体毡结构及孔隙结构照片

Fig.2 Microstructures of needle-punctured felt (infiltrated with TaC) and pore structure: (a) Microstructure; (b) Inter-fiber pores I; (c) Inter-bundle pores II; (d) Inter-layer pores III

数为

$$\varphi = (1 - n/c) \times \varphi_{f-d} \times \rho_c / \rho_n = 0.426 \quad (4)$$

纤维束间的型孔隙的体积分数为

$$\varphi_{II} = 1 - \varphi_I - \varphi_{III} - \varphi_f = 0.125 \quad (5)$$

低密度炭毡的密度为 0.16 g/cm³，孔隙率为 90.7%，平均孔隙尺寸为 165.0 μm 左右。

2.2 孔隙结构对反应气体在预制体中扩散的影响

经计算，TaCl₅ 气体分子的碰撞直径()为 8~10 Å。根据平均分子速率和分子平均自由程公式可计算得出，在 800 和 200 Pa 时，TaCl₅ 气体分子平均速率 \bar{v} 为 7.96 m/s，平均自由程 λ 为 16~26 μm。根据 Knudsen 公式($K_n = \frac{\lambda}{d}$)(其中 K_n 为 Knudsen 数 d 为孔隙直径)，可知 TaCl₅ 气体分子在针刺整体毡的型孔隙、型孔隙、型孔隙以及低密度炭毡孔隙中的 Knudsen 数分别为 3.33~5.40、0.065~0.106、0.040~0.065 和 0.097~0.158。由此可知，TaCl₅ 气体分子在 4 种孔隙中的扩散均受混合扩散控制。

在充分考虑预制体孔隙尺寸、平均分子速率、平均分子自由程及 K_n 数的情况下，反应气体在孔隙中的有效扩散系数可以写为^[8]

$$D = \frac{\bar{v}\lambda}{3} \frac{\alpha d}{d + \alpha \lambda} = \frac{\bar{v}d}{3} \frac{\alpha K_n}{(1 + \alpha K_n)} \quad (6)$$

式中： α 为扩散系数比值； x_i 为计算气体在混合气体中的体积分数； x_j 为第 j 种气体在混合气体中的体积分数； d_i 为第 i 种气体分子的碰撞直径； M_i, M_j 为第 i, j 种气体分子的相对分子量。

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1 - x_1} \sum_{j=2}^n x_j \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\sigma_1} \right)^2 \times \left(\frac{2M_j}{M_i + M_j} \right)^{1/2} \quad (7)$$

在反应气体体系中，TaCl₅ 和 C₃H₆ 的体积分数非常小，因此，假设 TaCl₅ 和 C₃H₆ 均在 Ar 中无限稀释，在计算 TaCl₅ 在 Ar 中的菲克扩散系数和扩散系数比值 α 时，忽略 C₃H₆ 的作用，只考虑 TaCl₅ 和 Ar 的双元互扩散。因此，式(7)可简单化为

$$\frac{1}{\alpha} = \left(\frac{\sigma_{TaCl_5} + \sigma_{Ar}}{2\sigma_{TaCl_5}} \right)^2 \times \left(\frac{2M_{Ar}}{M_{TaCl_5} + M_{Ar}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

取 Ar 的碰撞直径 d_{Ar} 为 3.6 Å，摩尔质量 M_{Ar} 为 36 g/mol；取 TaCl₅ 的碰撞直径 d_{TaCl_5} 分别为 8 Å 或 10 Å，摩尔质量 M_{TaCl_5} 为 358.5 g/mol，计算出 α 为 4.453 或 5.062。由此可计算出不同温度压力下 TaCl₅ 气体在多孔预制体中的扩散系数，如图 3 所示。

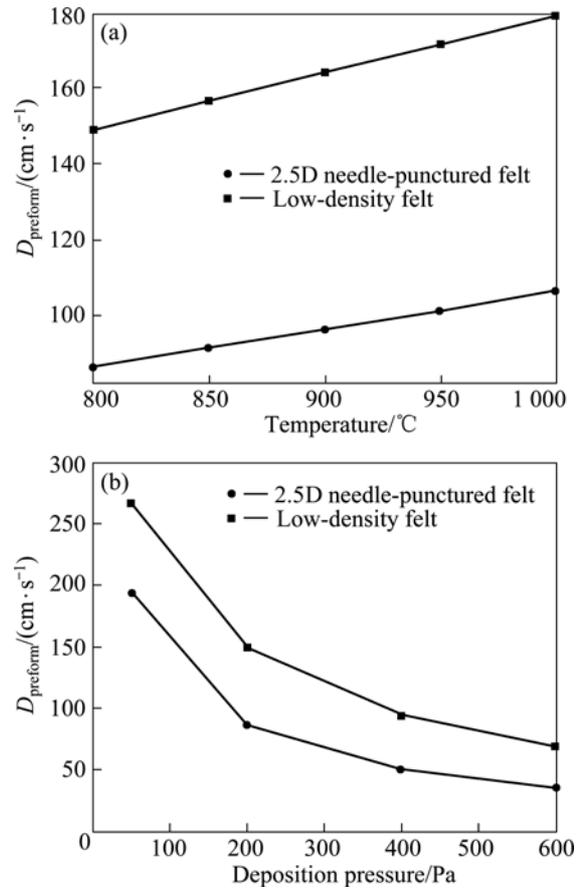


图 3 不同温度和压力下预制体类型与扩散系数的关系
Fig.3 Diffusion coefficients of preforms as functions of deposition temperatures and pressures: (a) At 200 Pa and different temperatures; (b) At 800 Pa and different pressures

由图 3 可知，TaCl₅ 在多孔预制体中的有效扩散系数随温度的升高而增加，随沉积压力的升高而降低。同时，在不同温度和不同压力下，TaCl₅ 在低密度炭毡中的有效扩散系数均大于其在整体毡中的有效扩散系数。

2.3 不同温度下预制体类型及孔隙结构对 TaC 沉积速率及渗透深度的影响

图 4 所示为 200 Pa 时不同温度下预制体类型对沉积速率的影响。

不同温度下预制体类型对沉积速率的影响非常大。在 800~900 °C，TaC 在针刺整体毡中的沉积速率最大；在 950~1000 °C，TaC 在低密度炭毡中的沉积速率最大。同时，在石墨纸基底表面，随着温度的升高，TaC 的沉积速率持续增加；在低密度炭毡中，沉积速率在 800~950 °C 时急剧增加，在 950 °C 时达到最大值，在 1000 °C 时反而减小；在针刺整体毡中，沉

积速率在 800~900 时急剧升高, 在 900 时达到最大值, 在 900 以后沉积速率缓慢下降。

图 5 所示为不同温度下 TaC 在针刺整体毡和低密度炭毡中沉积 20 h 后的微观结构。

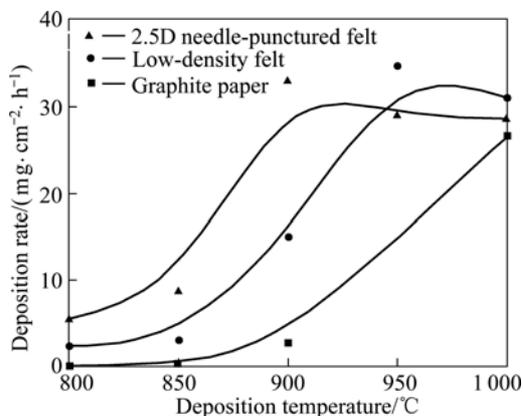


图 4 200 Pa 时不同温度下预制体类型对沉积速率的影响
Fig.4 Deposition rates of preforms or substrates at 200 Pa as functions of deposition temperatures

由图 5(a), (b), (c)可知, 在 800 时, TaC 在针刺整体毡中的沉积比较均匀; 在 850 时, 针刺整体毡表层没有结壳, 但纤维束表层开始结壳; 在 900 时, 针刺整体毡表层开始结壳。由图 5(d), (e)可知, 在 950 时, TaC 在低密度炭毡中的沉积比较均匀; 但在 1000 时, 预制体表层结壳。由此可知, 当沉积温度大于 950 时, TaC 在低密度炭毡的渗透/沉积过程已开始由孔隙扩散所控制。当沉积温度大于 900 时, TaC 在针刺整体毡中的渗透/沉积过程开始由孔隙扩散控制。当 TaC 的渗透过程受孔隙扩散所控制时, 大多数反应物在到达预制体中心前已经在表层孔隙处发生了沉积反应, 并迅速封闭表层孔隙通道, 阻止反应气体进入内部孔隙而沉积。受孔隙扩散控制是沉积速率随沉积温度的升高反而下降的主要原因。

当 TaC 的渗透沉积过程受表面动力学控制时, 沉积速率主要与预制体比表面积有关; 针刺整体毡的比表面积远远大于低密度炭毡以及石墨纸的比表面积, 因此, 在该预制体中沉积的 TaC 量最多, 沉积速率最大。

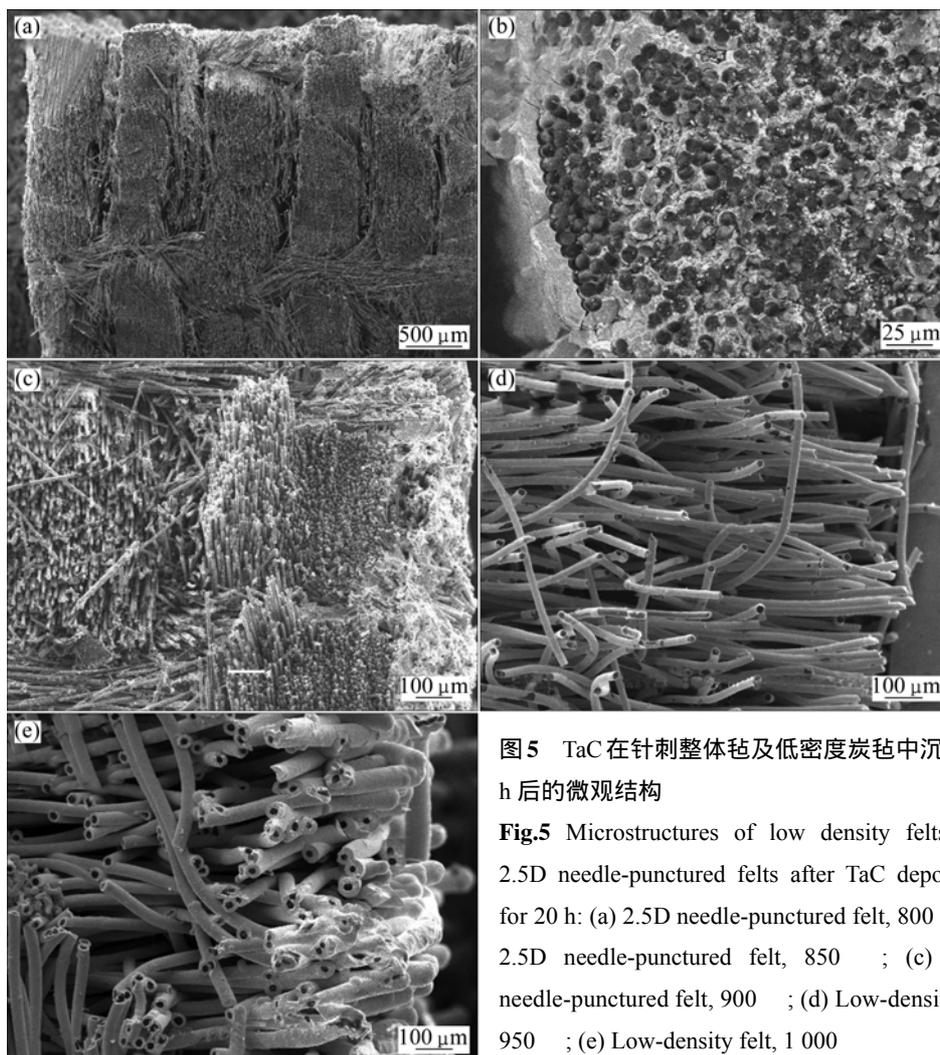


图 5 TaC 在针刺整体毡及低密度炭毡中沉积 20 h 后的微观结构
Fig.5 Microstructures of low density felts and 2.5D needle-punctured felts after TaC deposition for 20 h: (a) 2.5D needle-punctured felt, 800 °C; (b) 2.5D needle-punctured felt, 850 °C; (c) 2.5D needle-punctured felt, 900 °C; (d) Low-density felt, 950 °C; (e) Low-density felt, 1000 °C

在受孔隙扩散控制时, 预制体表层孔隙堵塞, 预制体内反应气体浓度急剧下降, TaC 可沉积的比表面积急剧减少, 沉积速率较小。综合以上分析可知, TaC 在石墨纸基底表面、低密度炭毡以及针刺整体毡中的沉积过程受表面反应控制和扩散(或孔隙扩散)的转变温度分别为 1 000 , 950 和 900 。

不同温度下 TaC 在针刺整体毡及低密度毡中的渗透深度如图 6 所示。TaC 在针刺整体毡中的渗透/沉积深度要比其在低密度炭毡中的渗透/沉积深度小。结合图 3(a)可知, TaCl₅ 气体在针刺整体毡中的有效扩散系数较小, 沉积过程更容易受反应气体在孔隙中的扩散所控制。当沉积温度为 800 时, TaC 在低密度炭毡和针刺整体毡中的渗透深度都为 100 %; 随沉积温度的升高, TaC 在两种预制体中的渗透深度均明显下降。这主要是温度的升高使 TaC 在多孔预制体中的渗透过程由受表面动力学控制逐渐转变为受孔隙扩散控制, 反应气体无法渗入到预制体最里层的孔隙处发生沉积所致。

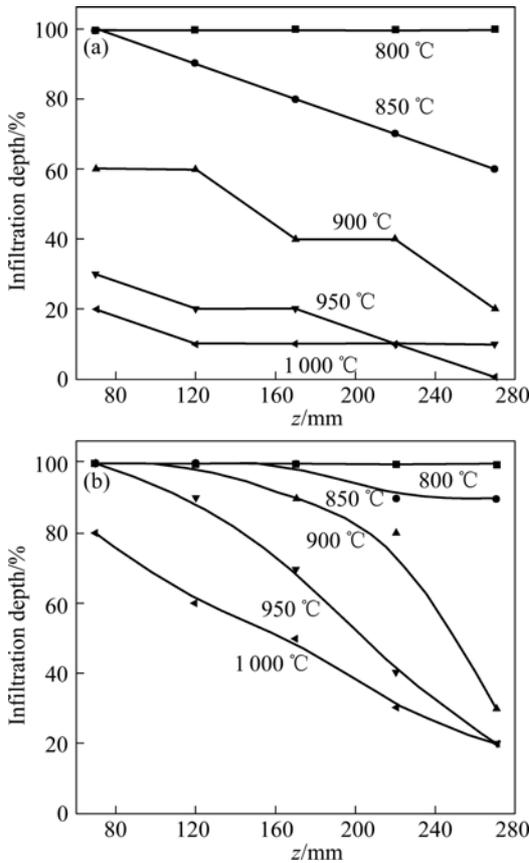


图 6 TaC 在针刺整体毡及低密度炭毡中渗透深度与温度的关系

Fig.6 Infiltration depths of TaC as functions of deposition temperatures in 2.5D needle-punctured felts (a) and low-density felts (b)

2.4 不同压力下预制体类型及孔隙结构对 TaC 沉积速率及渗透深度的影响

图 7 所示为 800 时不同压力(50~400 Pa)下预制体类型对沉积速率的影响。

在 800 时不同压力下预制体孔隙结构对沉积速率的影响较大。由于比表面积的关系, TaC 在针刺整体毡中的沉积速率大于其在低密度炭毡和石墨纸上的沉积速率。同时, TaC 在两种多孔预制体中的沉积速率均随沉积压力的增大而增加。结合图 3(b)可知, 随压力的升高反应气体在多孔预制体中的扩散速率下降; 但图 7 表明, 随压力的升高, 沉积速率反而升高; 表明在 800 时沉积速率受扩散速率的影响不大。

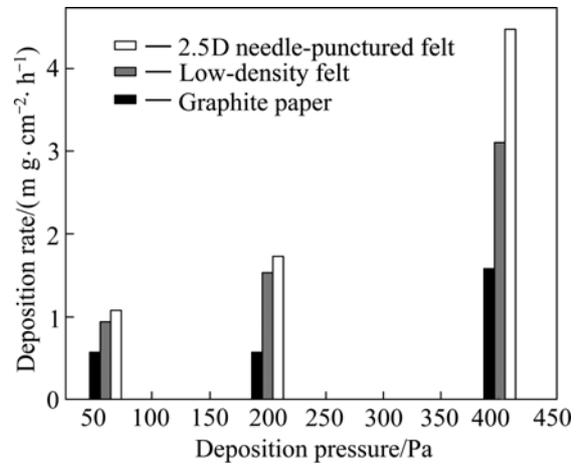


图 7 800 时不同压力下预制体类型对沉积速率的影响

Fig.7 Deposition rates of TaC at 800 as functions of deposition pressures

不同压力下 TaC 在低密度炭毡及针刺整体毡中的渗透深度如图 8 所示。在 800 、 60~400 Pa 下, TaC 在低密度炭毡中的渗透深度要大于其在针刺整体毡中的渗透深度, 这与反应气体在不同预制体中的扩散系数有关(见图 3(b))。在沉积压力为 200 Pa 时, TaC 在两种预制体中的渗透深度大部分均为 100%, 渗透深度较大; 而在压力为 60 Pa 和 400 Pa 时, 渗透深度明显下降。在 60 Pa 时, 反应器中气体流速相对较快, 反应气体来不及渗透到预制体最里层就被系统排出反应器; 也就是说反应气体在 z = 270 mm 处可停留的时间较短(滞留时间较短), 沉积过程较容易转移为受扩散所控制, 渗透深度较小。当沉积压力为 400 Pa 时, 在沉积位置为 z = 70 mm 处渗透深度较小的主要原因是沉积压力的增大使沉积过程转变为受孔隙扩散所控制; 而渗透深度随沉积位置的增加急剧减小则主要是损耗效应的影响。

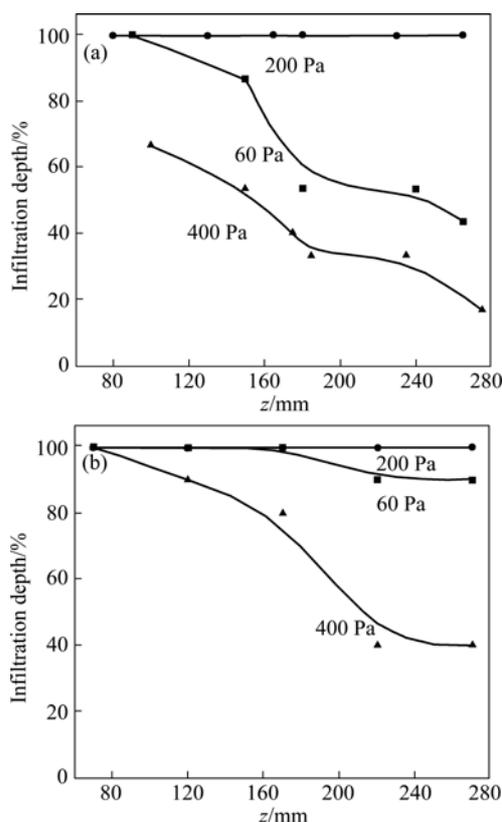


图8 800 °C时不同压力下TaC在多孔预制体中的渗透深度
Fig.8 Infiltration depths of TaC at 800 °C as functions of pressures in 2.5D needle-punctured felt (a) and low-density felt (b)

3 结论

1) 在不同温度和压力下, TaCl_5 气体在低密度炭毡中的有效扩散系数大于其在整体毡中的有效扩散系数。

2) TaC 在石墨纸基底表面、低密度炭毡以及整体毡中的沉积过程受表面反应控制和扩散(或孔隙扩散)控制的转变温度分别为 1 000 °C, 950 °C 和 900 °C; TaC 在整体毡中的渗透深度要比其在低密度炭毡中的渗透深度小;且随着温度和沉积位置的升高,渗透深度明显下降。

3) 在不同压力下, TaC 在整体毡中的沉积速率大于其在低密度炭毡和石墨纸上的沉积速率;在 60 Pa 和 400 Pa 时,渗透深度随着沉积位置的增加而减小;在 200 Pa 时, TaC 在两种预制体中的渗透深度均为 100 %。

REFERENCES

[1] 马福康, 邱向东, 贾厚生, 刘贵才. 钽与钽[M]. 长沙: 中南

工业大学出版社, 1997: 19.

MA Fu-kang, QIU Xiang-dong, JIA Hou-sheng, LIU Gui-cai. Niobium and tantalum[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1997:19.

- [2] 李国栋, 熊翔, 黄伯云. 温度对 CVD-TaC 涂层组成、形貌与结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 565-571.
LI Guo-dong, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun. Effect of temperature on composition, surface morphology and microstructure of CVD-TaC coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 565-571.
- [3] SAYIR A. Carbon fiber reinforced hafnium carbide composite[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(19): 5995-6003.
- [4] US Ultramet. Fiber interface coatings [EB/OL]. http://www.ultramet.com/fiber_interface_coatings.html. 2009-10-22.
- [5] GIBSON J O, GIBSON M G. Production of carbon fiber-tantalum carbide composites: US 4196230[P]. 1980-04-01.
- [6] KIM C, GRUMMON D S, GOTTSTEIN G. Processing and interface characteristics of graphite fiber reinforced tantalum carbide matrix composites[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(10): 2351-2356.
- [7] VISHAK S, SRINIVAS P. Optimization of isothermal-isobaric chemical vapor infiltration[J]. Computers Chem Engng, 1998, 22(Supple): S713-S716.
- [8] GRIFFITHS S K, NILSON R H. Optimum conditions for composites fiber coating by chemical vapor infiltration[J]. J Electrochem Soc, 1998, 145(4): 1263-1272.
- [9] OFORI J Y, SOTIRCHOS S V. Structural model effects on the predictions of chemical vapor infiltration models [J]. J Electrochem Soc, 1996, 143(6): 1962-1973.
- [10] OFORI J Y, SOTIRCHOS S V. Investigation of the potential of forced-flow chemical vapor infiltration[J]. J Electrochem Soc, 1997, 144(1): 274-289.
- [11] CHANG H C, GOTTLIEB D, MARION M, SHELDON B W. Mathematical Analysis and Optimization of Infiltration Processes[J]. Journal of Scientific Computing, 1998, 13(3): 303-321.
- [12] SKAMSER D J. Model of chemical vapor infiltration using temperature gradients[J]. Journal of Materials Research, 1997, 12(3): 724-737.
- [13] TAGO T, KAWASE M, LKUTA Y, HASHIMOTO K. Numerical simulation of the thermal-gradient chemical vapor infiltration process for production of fiber-reinforced ceramic composite[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(6): 2161-2170.
- [14] 陈招科, 熊翔, 李国栋, 肖鹏, 张红波, 尹健, 黄伯云. 工艺参数对 CVI-TaC 沉积速率的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(12): 2047-2053.
CHEN Zhao-ke, XIONG Xiang, LI Guo-dong, XIAO Peng, ZHANG Hong-bo, YIN Jian, HUANG Bai-yun. Influences of process parameters on deposition rate of CVI-TaC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(12): 2047-2053.
- [15] 李爱军. 碳/碳复合材料性能预测与 ICVI 工艺系统虚拟设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
LI Ai-jun. Prediction of C/C composite properties and virtual design of ICVI processes[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.

(编辑 杨华)