

液态铝在纤维预制体中非饱和浸渗的数值模拟

周计明, 齐乐华

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 710072, 西安)

摘要: 为了更加真实地反映液态金属在纤维预制体中的浸渗规律, 基于等温浸渗假设模拟了液态铝在纤维预制体中的非饱和渗流行为, 研究了非饱和浸渗带内具有不同饱和度的浸渗前沿在渗流过程中的演变规律. 模拟结果表明, 饱和预制体与未浸渗预制体之间存在一个非饱和浸渗区, 非饱和浸渗区的宽度随浸渗时间不断变化. 根据预制体中首次达到某饱和度的时间及位置, 研究了具有该饱和度的浸渗前沿的运动规律, 得出浸渗深度与浸渗时间之间存在平方根关系, 这与渗流场分析的理论解是一致的. 此模拟方法克服了饱和浸渗假设中浸渗前沿饱和度突变的缺点, 更加接近实际情况.

关键词: 铝基复合材料; 非饱和浸渗; 数值模拟

中图分类号: TB331; TK245 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0105-05

Numerical Simulation of Isothermal Unsaturated Infiltration of Liquid Aluminum into Fiber Preform

ZHOU Jiming, QI Lehua

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The unsaturated infiltration behavior of melt aluminum into the fiber cake preform under isothermal assumption is investigated numerically, and the evolution of unsaturated infiltration front is explained. The simulation results show that there exists an unsaturated infiltration zone between the saturated and dry performs, and the zone width changes continuously. Although the infiltration front with different saturation moves down in different way, the infiltration depth is proportional to the square root of infiltration time, which coincides well with the theoretical solution reported. This simulation method of unsaturated infiltration overcomes the shortcoming of the saturated infiltration assumption.

Keywords: aluminum matrix composite; unsaturated infiltration; numerical simulation

液态浸渗是一种制备金属基复合材料的新工艺, 具有工艺过程简单、原材料利用率高、成本低和周期短等优点, 应用前景十分广阔^[1-2]. 特别是低压浸渗工艺, 由于浸渗压力较低, 可减少预制体变形及能量消耗, 达到降低制备成本的目的, 所以引起了人们的广泛关注. 利用数值模拟方法研究浸渗工艺, 不仅可以直观地观察浸渗前沿的演变过程, 而且能为

实验研究提供可参考的浸渗参数.

目前, 通常基于饱和浸渗假设模拟液态金属在预制体中的浸渗过程^[3], 以简化涉及渗流、传热及预制体变形的复杂渗流行为. 国内外学者在饱和浸渗模拟方面进行了广泛研究, 得到了许多具有指导意义的研究成果^[3-5]. 饱和浸渗忽略了毛细管力的作用, 能较好地反映熔融金属在预制体中的高压渗流

行为.然而,在低压浸渗时,由于压力较低,孔隙可能无法被完全填充,从而出现非饱和现象,此时基于饱和和浸渗假设得到的模拟结果与实际情况相差较大^[6].为此,有必要开展低压非饱和浸渗的模拟研究.国内外学者在非饱和浸渗模拟方面也已开展了一些研究工作^[7-8],但尚未就非饱和浸渗中不同饱和度和浸渗前沿的运动规律进行系统研究.

为更加真实地反映液态金属在纤维预制体中的浸渗规律,准确预测液态金属浸渗预制体的时间,成功指导工艺实践,本文基于等温非饱和和浸渗原理,对液态浸渗工艺进行模拟,深入研究了非饱和和浸渗带内具有不同饱和度的浸渗前沿在渗流过程中的演变规律.

1 非饱和浸渗动力学模型的建立

1.1 达西渗流定律

流体通过多孔介质时形成由固体骨架、孔隙、湿润相及非湿润相组成的多孔介质流.对于流体在多孔介质中的流动,通常利用达西定律进行描述.达西定律的数学表述为

$$f = -\frac{k_s}{\gamma_w} k \left(\frac{\partial u_w}{\partial x} - \rho_w g \right) \quad (1)$$

式中: f 为流体的有效流速; k_s 为与饱和度相关的比例系数,当饱和度为1时, $k_s=1$; γ_w 为流体重度; u_w 为流体压力; ρ_w 为流体密度; k 为全饱和介质的渗透系数.式(1)表明,流体通过多孔介质时的有效速度与压力梯度成正比,压力梯度越大,则流速越快.

1.2 预制体渗透系数的计算

根据式(1)所示的达西定律,渗流速度与压力梯度之间的比例系数为 $\frac{k_s}{\gamma_w} k$,将其定义为达西渗透系数 κ .通常情况下,将达西渗透系数里的重度 γ_w 并入式(1)右端的压力梯度里,定义预制体的另一个渗透系数 $K_s=k_s k$.实验数据表明^[9],在非饱和介质的稳态渗流中,渗透系数随饱和度的三次方 s^3 的变化而变化,即 $k_s=s^3$.渗透系数 κ 及 K_s 不仅取决于多孔介质本身的性质,而且与渗透流体的物理性质有关,为此提出另一个仅与多孔介质本身性质有关而与渗透流体性质无关的物理量——渗透率 k' .反映渗透性的3个参数及它们之间的相互关系见表1.

依据文献[10-11]计算纤维预制体的渗透率 k' .当液态金属平行于纤维流动时,其渗透率为

表1 渗透性参数的定义

参数	定义	量纲	转换关系
κ	$\frac{k_s}{\gamma_w} k$	$M^{-1} L^3 T$	$\kappa = \frac{K_s}{\gamma_w} = \frac{k'}{\eta}$
K_s	$k_s k$	LT^{-1}	$K_s = k \gamma_w = \frac{k'}{\eta} \gamma_w$
k'	$\kappa \eta$	L^2	$k' = k \eta = \frac{K_s}{\gamma_w} \eta$

$$k'_{\parallel} = \frac{2 \times 2^{1/2} R_f^2}{9(1-\epsilon)} \left[1 - 2 \left(\frac{1-\epsilon}{\pi} \right)^{1/2} \right]^{5/2} \quad (2)$$

当液态金属垂直于纤维流动时,其渗透率为

$$k'_{\perp} = \frac{0.427 R_f^2}{1-\epsilon} \left[1 - \left(\frac{2(1-\epsilon)}{\pi} \right)^{1/2} \right]^4 \left[1 + 0.473 \left(\frac{\pi - 2(1-\epsilon)}{2(1-\epsilon)} \right)^{1/2} \right] \quad (3)$$

式中: R_f 为纤维半径; ϵ 为孔隙率.由于预制体中纤维分布的随机性,所以纤维预制体的渗透率通常取 $k'_{\parallel}$ 与 $k'_{\perp}$ 的平均值.

1.3 非饱和浸渗的吸渗-排泄曲线

当多孔介质处于非饱和状态时,由于毛细管力的作用,多孔介质内的流体处于负压状态,同时由于非湿润流体驱动湿润流体(排泄)时的湿润角不同于湿润流体驱动非湿润流体(吸渗)时的湿润角,从而导致了排泄与吸渗曲线不重合(见图1).在不同孔压作用下,非饱和状态的饱和度应处于图1所示的吸渗-排泄曲线之间.吸渗-排泄曲线之间的转化沿着转化曲线进行,通常以一条直线进行近似(如图1所示).吸渗-排泄曲线的测量是液态金属在预制体中的非饱和渗流行为研究中的一个难点,可以通过对不同浸渗压力下(其他浸渗参数固定)得到的复合材料试样进行微观组织观察,确定出该浸渗压力下的孔隙率,从而确定出其饱和度,再通过一系列浸渗实验得出压力与饱和度之间的关系,即可得到吸渗-排泄曲线^[12].此方法也可用于研究熔融金属在预制体中的浸渗行为及机理^[13].Bahraini等人^[14-15]提出一种类似于用水银测孔隙率的方法,可通过单个实验直接测量熔融金属在高温浸渗过程中的毛细管力及吸渗-排泄曲线,极大地提高了实验效率,降低了实验成本.

可以利用Brooks-Corey模型或Van Genuchten模型,对实验所得的熔融金属在短纤维预制体中浸渗时的吸渗-排泄曲线进行拟合^[6].Brooks-Corey模型的表达式为

$$s = 1 - \left(\frac{p_b}{p} \right)^{\lambda} \quad (4)$$

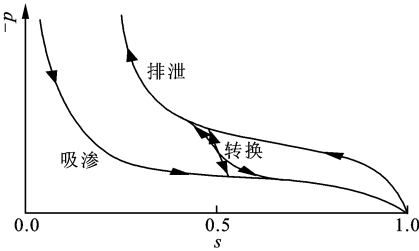


图 1 典型的吸渗-排泄曲线

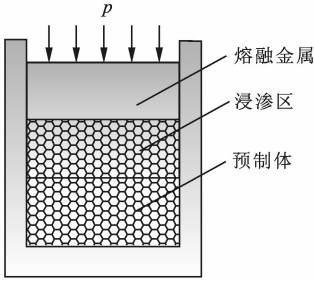


图 3 液态金属浸渗过程简图

Van Genuchten 模型的表达式为

$$s = 1 - [1 + \alpha^2 (p - p_0)^2]^{-1/2} \quad (5)$$

式中: s 为饱和度; p_b 、 p_0 、 λ 、 α 为方程常数; p 为流体压力. 图 2 所示为液态铝在 Alumina 纤维(Saf-fil™)中浸渗时的实验值与 Van Genuchten 模型拟合曲线的比较^[6], 由图可以看出, Van Genuchten 模型可以很好地描述吸渗曲线的变化规律. 本文基于图 2 所示的吸渗曲线来模拟液态铝在 Alumina 纤维中的非饱和和浸渗行为.

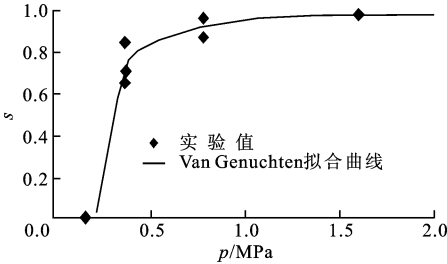


图 2 液态铝的吸渗曲线

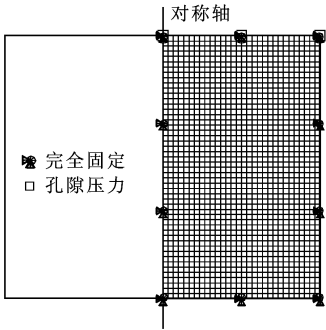


图 4 液态金属浸渗过程的有限元模型

3 渗流场模拟结果与分析

图 5 所示为不同时刻液态金属在预制体中的饱和度分布, 从图中可以看出:完全饱和的预制体与干燥预制体之间存在一个非饱和过渡区, 非饱和过渡区的宽度随浸渗时间的延长而不断地增大;浸渗前沿不再是饱和浸渗模拟中得到的平行推进的浸渗平面,而是具有一定宽度的浸渗带,浸渗带内的饱和度由 0 到 1 连续变化. 为了描述浸渗带在浸渗过程中的演变规律,以某一饱和度所在平面作为代表该浸渗带运动的浸渗前沿,绘制浸渗深度与浸渗时间之间的关系曲线,如图 6 所示. 由图 6 可以看出,具有不同饱和度的浸渗前沿的浸渗速度虽然不一样,但曲线基本符合抛物线规律,这与文献[10-11]采用分析法得出的结论是一致的,即浸渗深度与时间的关系近似为

$$x = \left(\frac{2\kappa' \Delta p_t}{\eta \epsilon} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中: κ' 即为表 1 所示的量纲为 L^2 的渗透系数 k' ; Δp 为浸渗前沿与液态金属入口处的压差; η 为液态金属的黏度; ϵ 为预制体的孔隙率. 由式(6)可以看出,浸渗深度仅与时间及压差有关,压差越大,达到相同浸渗深度所需的时间就越短,浸渗速度就越高,相应地图 6 所示的曲线就越陡峭.

2 渗流分析的有限元模型

液态铝在纤维预制体中的浸渗过程如图 3 所示,有限元模型及边界条件如图 4 所示,预制体尺寸为 $\varnothing 60\text{ mm} \times 50\text{ mm}$. 为节约计算成本,并根据预制体具有对称性的特点,采用八结点轴对称减缩四边形单元(CAX8RP)来建立轴对称的有限元模型. 对预制体施加完全固定约束,即忽略浸渗过程中预制体的变形,进行纯渗流分析. 模拟中所采用的其他参数如下:浸渗压力为 2 MPa;浇注温度为 730 ℃;预制体预热温度为 650 ℃;预制体体积分数为 0.2(即预制体孔隙率为 80%);预制体纤维半径为 2~4 μm ;预制体高度为 52 mm. 由此可以计算出平均渗透率 $k' = 1.56 \times 10^{-12}\text{ m}^2$. 由于计算中采用的渗透系数为 K_s ,所以需要按表 1 进行换算. 根据液态铝的黏度 1.3 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,通过换算可得渗透系数 $K_s = 0.032\text{ 4 mm/s}$.

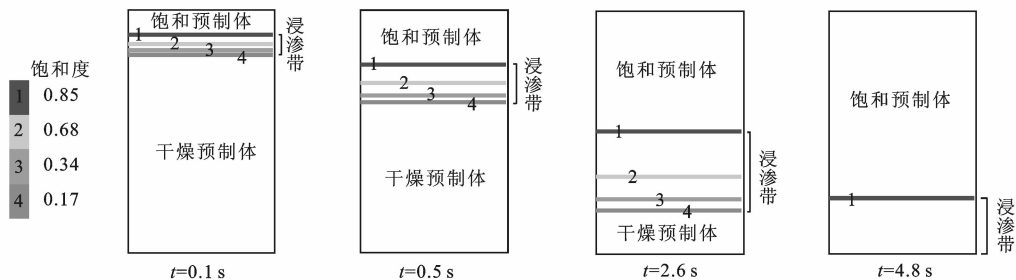


图5 不同时刻液态金属在预制体中的饱和度分布

在饱和浸渗模拟中,浸渗前沿与液态金属入口处的压差是恒定的,因此浸渗前沿的运动规律可通过式(6)惟一确定。浸渗模拟中如果考虑非饱和效果,就会出现图5所示的具有一定宽度的浸渗带。浸渗带内由于毛细管力的作用存在孔隙压力,由图2所示的曲线可知,饱和度越大,孔隙压力就越大,导致该饱和度处的浸渗前沿与液态金属入口处的压差减小,从而减缓液态金属的浸渗速度。由此可知,浸渗前沿的饱和度越大则其浸渗速度越低。另一方面,随着浸渗的不断进行,预制体底部逐渐趋于饱和,该处的孔隙压力也随之增大,此时对浸渗带施加的压力不仅来自于液态金属入口处,而且也来自于预制体底部逐渐增大的孔隙压力,两者叠加使当前浸渗带内的压差增大,根据式(6),此时的浸渗速度相应增加。由图2所示的曲线可以看出,孔隙压力在饱和度超过0.8后才会急剧增大,所以对于饱和度为0.8以下的浸渗前沿,在整个浸渗过程中其浸渗速度不会出现突变。图6中饱和度为0.9的浸渗前沿在浸渗后期浸渗速度急剧增加,正是由预制体底部孔隙压力的急剧增大导致的。

图7所示为不同浸渗时刻、不同深度处的饱和度分布情况。由图7可以看出,浸渗刚开始时,不同预制体深度的饱和度均为0,当浸渗到0.5 s时,距预制体表层5 mm深度处已完全饱和,而此时23 mm深度处的饱和度仍为0,处于5~23 mm之间的预制体即为非饱和过度区,这一区域的饱和度由浅及深逐渐减小。随着浸渗过程的进行,饱和度曲线随浸渗深度的变化越来越平缓,直至最后所有深度的饱和度均接近1,此时表明浸渗过程结束。

本文基于文献报道的液态铝在Alumina纤维中的非饱和吸渗-排泄曲线来模拟液态铝的非饱和浸渗规律,获得了在特定浸渗参数下实现饱和浸渗的时间。本文的模拟方法也可推广至其他合金预制体复合材料的浸渗工艺模拟中,但相关的实验验证还有待进一步深入研究。

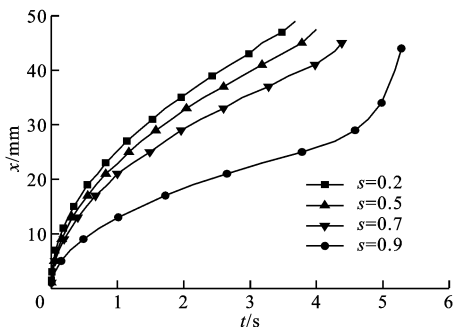


图6 浸渗深度与浸渗时间的关系

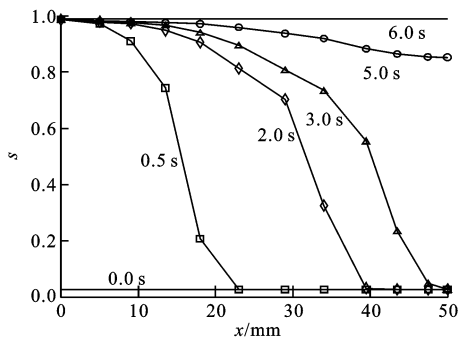


图7 饱和度与浸渗深度的关系

4 结 论

(1)基于等温非饱和浸渗原理模拟了液态铝在纤维预制体中的渗流行为,获得了非饱和浸渗前沿,克服了饱和浸渗模拟中浸渗前沿饱和度突变的缺点,更加真实地反映了液态金属在纤维预制体中的浸渗规律。

(2)以饱和度为0.2、0.5、0.7、0.9的位置作为浸渗前沿,建立了浸渗深度与浸渗时间之间的关系,结果表明两者之间存在平方根关系,这与文献报道中浸渗分析的理论解是一致的。

(3)饱和度为0.9的浸渗前沿在浸渗后期浸渗速度出现突变,是由于预制体底部逐渐趋于饱和、孔隙压力急剧增大从而使浸渗前沿处压差增大、浸渗时间缩短所致。

参考文献:

- [1] QI Lehua, SU Lizheng, JIANG Chunxiao, et al. Research on the numerical simulation of liquid-infiltration-extrusion process for composites based on the rigid-viscoplastic FEM [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 454: 608-613.
- [2] 齐乐华,孙乐民,侯俊杰,等. 高效成形复合材料管、棒材的新工艺研究[J]. *西北工业大学学报*, 1999, 17(4): 629-632.
- QI Lehua, SUN Lemin, HOU Junjie, et al. A new process for forming tube and bar products of composites without second forming [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 1999, 17(4): 629-632.
- [3] CHANG C Y. Numerical simulation of the pressure infiltration of fibrous preforms during MMC processing [J]. *Advanced Composite Materials*, 2006, 15(3): 287-300.
- [4] SAMPATH V, RAMANAN N, PALANINATHAN R. Modeling of liquid metal infiltration of porous fiber preform during squeeze casting [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, 21(5): 495-505.
- [5] 姜春晓,杨方,齐乐华. 复合材料液态浸渗挤压过程浸渗和传热行为的耦合分析[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(10): 10-14.
- JIANG Chunxiao, YANG Fang, QI Lehua. Coupled analysis of infiltration and heat transfer behavior in liquid infiltration extrusion of composites [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(10): 10-14.
- [6] MICHAUD V, MORTENSEN A. Infiltration processing of fibre reinforced composites: governing phenomena [J]. *Composites, A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(8): 981-996.
- [7] DOPLER T, MODARESSI A, MICHAUD V. Simulation of metal-matrix composite isothermal infiltration processing [J]. *Metallurgical and Materials Transactions, B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2000, 31(2): 225-234.
- [8] WOLFRATH J, MICHAUD V, MODARESSI A, et al. Unsaturated flow in compressible fibre preforms [J]. *Composites, A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(6): 881-889.
- [9] 朱以文,蔡元奇,徐晗. ABAQUS 与岩土工程分析 [M]. 香港: 中国图书出版社, 2005.
- [10] BISWAS D K, GATICA J E, TEWARI S N. Dynamic analysis of unidirectional pressure infiltration of porous preforms by pure metals [J]. *Metallurgical and Materials Transactions, A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 1998, 29(1): 377-385.
- [11] MORTENSEN A, MASUR L J, CORNIE J A, et al. Infiltration of fibrous preforms by a pure metal, part I: theory [J]. *Metallurgical and Materials Transactions, A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 1989, 20(11): 2535-2547.
- [12] MOLINA J M, RODRIGUEZ-GUERRERO A, BAHRAINI M, et al. Infiltration of graphite preforms with Al-Si eutectic alloy and mercury [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(11): 991-994.
- [13] 高中涛,龙思远,游国强,等. 铝合金熔体在 SiC 陶瓷颗粒间的流动浸渗行为[J]. *特种铸造及有色合金*, 2007, 27(8): 627-630.
- GAO Zhongtao, LONG Siyuan, YOU Guoqiang, et al. Observation of flow infiltration behavior of aluminum melt in SiC particles [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2007, 27(8): 627-630.
- [14] BAHRAINI M, MOLINA J M, WEBER L, et al. Direct measurement of drainage curves in infiltration of SiC particle preforms [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 495(1/2): 203-207.
- [15] BAHRAINI M, MOKINA J M, KIDA M, et al. Measuring and tailoring capillary forces during liquid metal infiltration [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2005, 9(4/5): 196-201.

(编辑 葛赵青)