

文章编号: 1000-5013(2007)01-0011-04

渗流铸造过程中流场温度场的数值模拟

闫 洁

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究真空差压渗流铸造法制备 SiCp/Al(颗粒碳化硅)复合材料的制备工艺,分析工艺参数对成形的影响.在考虑液态金属的传热和对流的情况下,根据多孔介质的连续介质模型及有限元方法,对多孔介质内的铝液的渗流行为进行流场温度场耦合的数值模拟.采用统计平均的方法描述多孔介质微观结构的影响,使用有限元方法,编写二维的渗流模拟命令流文件,计算渗流和传热耦合的瞬态过程,给出瞬态温度场分布,并且进一步预测不同时刻的渗流有效高度.

关键词: 渗流; 多孔介质; 连续介质模型; 有限元

中图分类号 TG 249.9; TB 115

文献标识码 A

真空渗流铸造法制备颗粒增强金属基复合材料,使金属液在真空环境下渗流,在一定压力下凝固,可改善金属与增强体的界面结合的情况.渗流过程中,液态金属渗流速度极快,并在渗流充型的同时伴有复杂的物理化学过程,采用试验方法研究这一问题较为困难.为了研究金属液在多孔预制体中的渗流过程中工艺参数对成形的影响,本文利用有限元软件 ANSYS/FLOTTRAN 模块,对多孔介质内的铝液的渗流行为进行传热和传质耦合数值模拟.由于颗粒增强预制体中含有相互连通的孔洞,可看作多孔介质,而多孔介质又可看作一种假想无结构的连续介质,是由具有相对稳定的平均孔隙率的表征体积函数单元构成^[1]的.在假想的连续介质中,可对任一数学点规定任意一种性质(介质的性质或充满孔隙空间的流体性质)的数值.根据多孔介质的连续介质模型,通过平均孔隙率、渗透率和相对水力直径的计算,得出压力损失系数.然后,以分布阻力的形式赋予多孔介质,从而避免了对介质精确建模的困难.

1 数值模拟的理论基础

1.1 渗流过程动力学模型

根据熔体在强化相间的流动及其选择性渗流的特征,在大气中熔体单向加压渗入由微观非均匀分布颗粒构成的预制体时,熔体的流动可以用流体动力学模型表征.即

$$P_{inf} = 2\sigma_{ng} \cos \theta / R_{eq, max} + [D \mu V_{ran} / (1 - V_f) R_{eq, max}^2] Z + P_{back}, \tag{1}$$

上式中, P_{inf} 为外界施加的渗流压力, σ_{ng} 为熔体与大气之间的表面张力, θ 为熔体与强化相之间的动力学接触角, μ 为熔体的动力粘度, P_{back} 为截留空气产生的背压, V_f 为预制体中强化相的体积分数, V_{ran} 为渗流时压头移动速度, V_{inf} 为表观浸渗速度, Z 为压头位移, $R_{eq, max}$ 为预制体中最大间隙的等效半径, D 为预制体中间隙的统计平均取向系数.根据模型预测,渗流过程由 3 个阶段组成. (1) 瞬态渗流阶段.当外界渗流压力增加到足以克服预制体最大颗粒间隙的毛细阻力时,铝合金熔体开始渗入预制体.由于加压渗流时熔体渗入预制体的体积流量是恒定的,故最初渗入预制体的熔体流速远高于工艺设定的表观渗流速度,直到绝大部分过流间隙被浸渗,熔体平均流速才等于表观速度.渗流过程初期,熔体微观流动从不稳定状态向稳定状态的过渡过程为瞬态渗流阶段.瞬态渗流阶段形成的渗流深度因间隙饱和度急剧变化而称作渗流前沿,其宽窄主要取决预制体的微观结构特征.与整个渗流过程相比,瞬态渗流阶段是很短暂的. (2) 稳定渗流阶段.瞬态渗流阶段结束后到熔体完全渗透预制体的阶段成为稳定渗流.在该阶

收稿日期: 2006-04-12

作者简介: 闫洁(1975-),女,讲师,主要从事材料成形的研究. E-mail: yanjieer@hqu.edu.cn.

基金项目: 航空基金资助项目(00H56009)

段, 后续渗入的熔体平均流速保持稳定并等于表观渗流速度. 显然, 稳定渗流阶段的长短取决于预制体的高度和渗流速度. (3) 截留空气压缩阶段. 熔体完全渗透预制体时, 由于封闭了铸型中的排气通道, 使预留在未被熔体浸渗间隙的空气被截留下来. 熔体在随后渗透这些间隙时, 不但要克服间隙的毛细阻力, 还必须克服被截留空气的压缩阻力. 因此, 对在大气中进行的渗流过程而言, 在稳定渗流阶段之后总存在一个截留空气压缩阶段. 该阶段一直延续到渗流压力达到其最大值为止. 而本文的物理实验是在真空环境中进行, 故可不考虑第 3 阶段的影响. 最终制品的大小取决于金属液渗流的有效长度. 从传热学角度分析, 加压渗流铸造制备出的复合材料长度包括如下两部分. (1) 当过热存在时的金属液渗流长度. (2) 过热度降为零后, 在结晶潜热释放时(释放的潜热足以熔化渗流前沿已凝固的壳层)的渗流长度^[2]. 由于金属液的结晶潜热是一定的, 因此适当提高金属液的过热度(过热 50~100 °C), 便可得到理想的复合材料. 当释放出的潜热不足以熔化掉已凝固壳层, 或液相中的固相量太多导致流动通道被堵塞后, 流动(即渗流过程)停止. 通过对金属预制体组成的系统进行传热分析, 可得关系^[3]为

$$\Delta l = k(T_1 - T_E) / [V_f \cdot \rho_p \cdot C_p^* \cdot v(T_E - T_0)]. \quad (2)$$

在式(2)中, ρ_p 和 C_p^* 分别为预制体颗粒密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)和比热($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$); V_f 为预制体的体积分数, T_0 为预制体预热温度(K), T_E 为金属熔点(K), T_1 为液态金属的浇注温度(K); k 为热传导系数($\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})^{-1}$), v 为金属液的渗流速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), Δl 为金属液在预制体中的渗流长度(m). 由式(2)可知, Δl 与 T_1 成正比, 与 T_0 也成正比关系. 当浇注温度 T_1 愈高时, 渗流长度 Δl 愈长; 预热温度 T_0 愈低, 渗流长度 Δl 愈短. 为了获得尺寸较大的多孔金属, 可以适当提高金属液浇注温度及预制体的预热温度. 当金属液存在过热度时, 尽管在金属液与预制体之间发生换热, 即使渗流前端出现已凝固相潜热的释放, 在渗流前端凝固壳层不够厚时, 金属液仍可以向前渗流一段距离. 随着进一步换热的发生, 渗流前沿的凝固壳层加厚, 阻碍了金属液进一步充型, 造成流动停止. 如果预制体预热温度过低, 金属液与其热交换剧烈, 热量迅速散失造成金属液很快凝固, 无法得到合格的渗流制品.

1.2 有限元处理

借助 ANSYS/FLOTRAN 模块对多孔介质的宏观力学影响进行分析, 引入了连续介质模型和孔隙率的统计概念. 考虑到多孔介质内部复杂孔隙结构对流动影响仍然是客观存在, 为了模拟不同的流场特征对于流动的影响, ANSYS/FLOTRAN 模块提供了分布阻力的概念. 即不依赖精确的几何特征, 而是模拟问题域几何特征对流体产生的压降. 分布阻力作为源项加在动量方程中, 通过实常数 R_i 作为单元量施加. 则有

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i + R_i, \quad (3)$$

$$R_i = K \rho u_i |V| + \frac{f}{D_h} \rho u_i |V| + C \mu u_j. \quad (4)$$

上两式中, K 为局部压头损失, f 为摩擦因素, C 为渗透率, 而总压力梯度是这 3 个因素的综合, 表示为

$$\frac{\partial P}{\partial u_r} = - \{ K \rho u_i |V| + \frac{f}{D_h} \rho u_i |V| + C \mu u_j \}. \quad (5)$$

其中, f 是摩擦系数($f = a Re^{-b}$), Re 为局部雷诺数, K 为 Darcy 法则渗透系数(局部压头损失), 与流体和多孔介质的材料性质相关, C 作为 ANSYS/FLOTRAN 的渗透率, 其值等于多孔介质的渗透系数 K 的倒数. 多孔介质的渗透系数 K 表示为透气性, 或者是在多孔介质层和充填层内流动的难易程度, 仅与多孔介质中孔隙的形状和尺寸有关.

按照 Kozeny 的管束模型^[3], 把多孔介质看成一些平行管束的集合体, 其表面积、体积等均假定相等^[6], 从而可以求出多孔介质渗透系数, 即 $K = \varepsilon^3 / 2\alpha_p^2$. 其中, ε 为孔隙率, α_p 为多孔介质的比表面积(表面积与体积的比值). 由于实际的多孔介质中, 孔隙是复杂、曲折的连通, 而不是所谓的平行管束, 引入弯曲系数(或称曲折度) C_1 , 通常该值取为 2, 故 $K = \varepsilon^3 / 2C_1 \alpha_p^2$. 其中, 比表面积为 $\alpha_p = 6(1 - \varepsilon) / \varphi_s D_p$, φ_s 为多孔介质的孔隙的形状系数, D_p 为组成多孔介质的颗粒的体积等价直径. φ_s 也可以根据颗粒形状查表求得, 即是和颗粒体积相同的球的表面积与颗粒表面积之比. 通过引入分布阻力的概念, 模拟流动过程中渗透造成的压力损失, 可以近似实现在多孔介质微观结构对流动影响的情况下的数值模拟, 同时避免了对多孔介质精确建模的困难.

2 数值模拟的计算过程

渗流过程及凝固伴随着金属液的热量损失和凝固, 是一个流动与传热互相耦合的过程. 一方面, 流动导致热量传递, 从而影响温度分布; 另一方面, 随着金属液温度的降低和凝固, 影响着物性参数和可流动区域的变化, 从而影响流动. 为了实现耦合计算, 在模拟过程中同时耦合求解流动方程和温度求解方程, 并考虑了流体的热物性参数随着温度变化对流动产生的影响. 为了节省计算时间, 提高计算速度, 在计算中以流场时间步长为主, 在流场时间步长内将温度场循环多次, 直到其总时间与流场时间步长相等. 此外, 假定金属液在孔隙中的渗流时间可分为两个阶段. (1) 金属液从浇注温度冷却至液相线温度时所需的时间. (2) 金属液从液相线温度冷却至合金液停止流动的时间.

本文采用通用的热传导系数和换热系数进行处理, 选择 ANSYS/FLOTRAN 的 FLUID 141 单元作为基本单元, 按照二维的类似于管内流动进行有限元分析, 编制批处理命令流执行文件^[4]. 经过 7 次重新启动分析, 总体方程经历 0.331 s 收敛. 同时, 采用拉格朗自由方程处理自由表面的流动区域的变化. 在靠近模具的外壁上施加无滑移边界文件(即所有速度分量都为零), 轴对称边界上的沿 x 轴方向的流体速度为零, 流动区域的初始温度为预制体的预热温度, 入口处施加压力梯度和浇注温度. 假定流体不可压缩, 流动前沿朝顶部平行推进.

根据雷诺数可以判定渗流流场为层流, 较低雷诺数($Re_{max} = 0.081$) 说明渗流的流速平稳, 按照层流模式瞬态分析. 为了简化运算, 鉴于常用铸造铝合金的热物性参数中密度和热传导系数在固相、固-液两相区及液相区变化比较缓慢, 而运动粘度随温度变化剧烈. 假定固相、固-液两相区及液相区的密度和热传导系数均为常量, 而设运动粘度随温度存在固相、固-液两相区、液相 3 种变化^[5].

3 模拟结果与分析

ANSYS 提供了两种后处理方式. 第 1 种为 POST 1, 可以对整个模型在某一载荷步(时间点)的结果进行后处理; 第 2 种为 POST26, 可以对模型中特定点在所有载荷步(整个瞬态过程)的结果进行后处理. 不同时刻的温度(θ) 分布变化反映了不同时刻的渗流的进程变化情况, 如图 1 所示. 随着渗流不断的

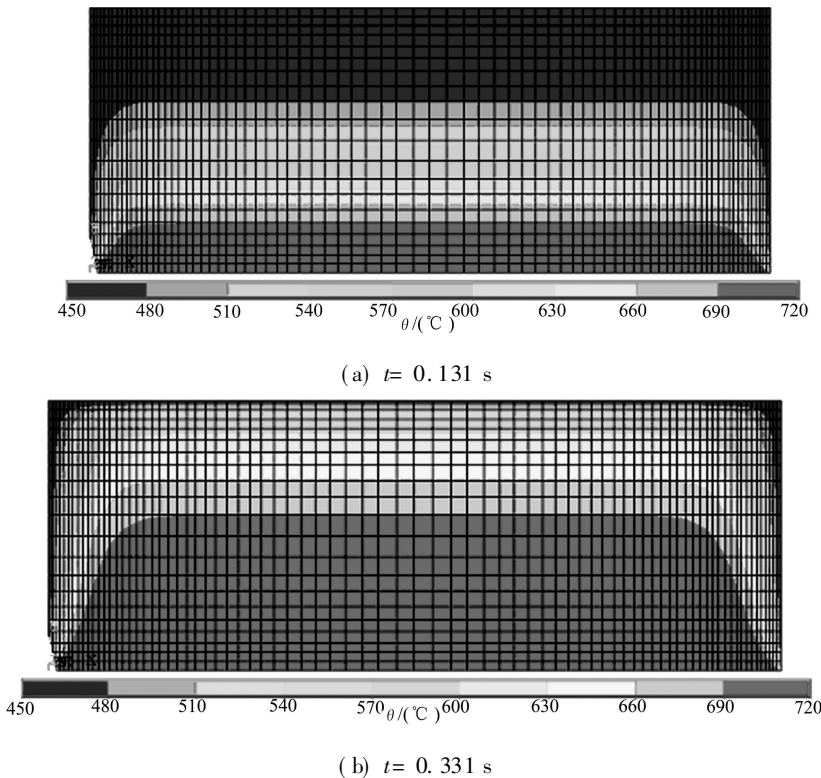


图 1 温度等值线分布图

Fig. 1 Temperature contour lines distribution

向上发展,分析区域的温度逐渐由下至上不断升高,等值线呈现“平台”状分布,如图2所示.从图可看出,在第1.231 s时,整个预制体中渗流已基本完成,由于靠近外表面的区域散热较快,对流换热强烈,温度显著降低,存在少量渗透不足的现象.由此可初步预测有效高度.

4 结 束 语

从上述分析可得到以下 2 个结论. (1) 运用上述有限元方法处理多孔介质中金属液的流动与传热,可有效解决渗流过程中的流动与传热耦合问题. (2) 通过跟踪不同时刻温度场分布情况,实现对真空渗流铸造瞬态过程的近似描述,从而预测现有工艺方案可能出现的铸造缺陷.

参考文献:

[1] BELL J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生,等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 45 100
[2] 许庆彦. 多孔 Al+12% Si 合金的加压渗流铸造及其力学和物理性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999: 20- 23.
[3] CLYRE T W, WRITHERS P J. An introduction to metal matrix composite [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 42 45
[4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 45- 60
[5] 柳百成, 荆 涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 50 65

Numerical Simulation of the Flow Thermal Field
in the Process of Penetration Casting

YAN Jie

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract: The partide reinforced aluminum matrix composites was fabricated by using vacuum differential penetrating casting. The fabrication process and the influences of technical parameters upon the forming of partide reinforced aluminum matrix composites were discussed. Taking the convection and heat conduction of liquid metal into account, based on the continuous media model and the finite element method, the flow-thermal field of the penetration of liquid aluminum through porous media was numerically simulated. The statistical method was used to state the effects of porous media on the liquid metal, and finite element method was used for the transient thermal analysis of the temperature field and the forecast of the valid length of composites.

Keywords: penetration; porous media; the continuous media model; the finite element

(责任编辑: 黄仲一)

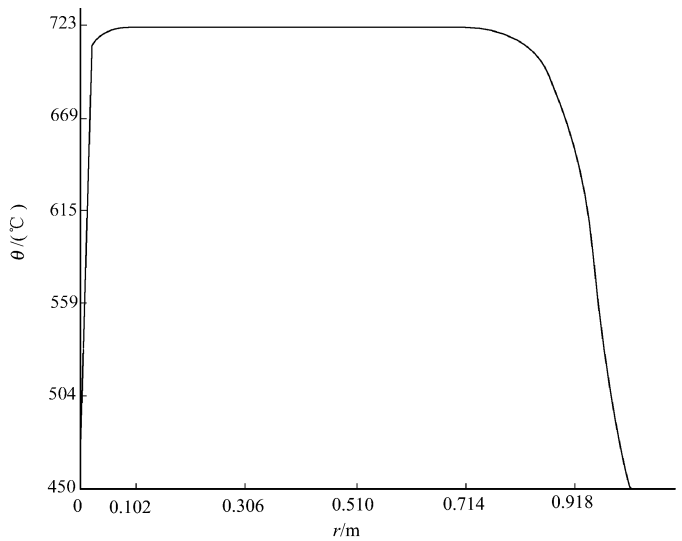


图 2 预制体顶部沿径向温度分布

Fig. 2 Temperature contour lines distribution of radial direction in the top of prefabricated volume