

文章编号: 1004- 0609(2000) 01- 0085- 04

铝液负压渗流过程的模拟试验^①

程桂萍^{1, 2}, 陈宏灯¹, 闻德荪², 舒光冀²

(1. 郑州大学 物理工程学院, 郑州 450052; 2. 东南大学 材料系, 南京 210018)

摘 要: 根据相似原理, 采用模拟试验的方法研究了与铝液相似的模拟液在负压作用下的渗流动力学规律。实验得到控制铝液渗流过程的相似准则为: 对直径 1.5~ 3.5 mm 的颗粒介质为 Froude 准则, 对直径 0.5 mm 的颗粒介质为 Reynolds 准则。在相似准则指导下, 原型铝液和模型中模拟液的渗流过程是相似的。

关键词: 负压渗流; 相似原理; 模拟试验; 铝液

中图分类号: O357.3; TH142.3

文献标识码: A

液态金属在多孔介质中的渗流过程决定了以渗流法制备的多孔金属和金属基复合材料的外观尺寸和内部结构。近十几年来, 以渗流法制备微米级颗粒或纤维增强的金属基复合材料为目的, 对实际金属液渗流过程的研究已成为材料领域的研究热点之一^[1~ 5], 但它与制备多孔金属的渗流过程有本质的区别: 组成多孔介质的骨架(性质、尺寸)不同、金属液与介质间的关系不同、外加渗流压力不同等, 不能用于指导多孔金属的制备过程。且前述研究以金属液为对象, 尚无法回答控制渗流过程的关键问题: 压力的变化和分布、渗流前沿的推移情况等。

本文采用模拟试验, 在相似原理的指导下用常温模拟液代替高温铝液, 研究目前尚无法采用高温铝液进行研究的复杂问题。有人在几何相似比尺 $\lambda_L = 1$ 的情况下, 对低压渗流过程进行了初步的模拟, 但很多问题被简化了^[6]。本文以负压渗流制备多孔铝为对象, 在 $\lambda_L = 1$ 和 0.5 时, 采用模拟试验和少量的实验验证, 系统研究了铝液在 0.5~ 3.5 mm 颗粒中的渗流规律。

1 实验装置及参数

对铝液渗流过程进行分析^[7], 得到控制铝液渗流的相似准则为 Reynolds 准则和 Froude 准则, 即

$$\frac{\lambda_u^2}{\lambda_g \lambda_L} = 1, \quad \frac{\lambda_L \lambda_g}{\lambda_g} = 1 \quad (1)$$

式中 $\lambda_u (= u_p u_m^{-1})$, $\lambda_g (= g_p g_m^{-1})$, $\lambda_L (=$

$L_p L_m^{-1})$, $\lambda_g (= u_p u_m^{-1})$ 分别为速度比尺, 重力加速度比尺, 几何相似比尺和粘度比尺。其中 p 表示原型, 本文为铝液的渗流; m 表示模型, 为 15 °C 水渗流; u , g , L 和 ν 分别为渗流速度, 重力加速度, 几何尺寸和流体粘度。渗流过程中究竟是 Reynolds 准则还是 Froude 准则起主导作用, 亦或同时起作用, 需通过实验结果来判断。

1.1 实验装置

根据几何相似的要求, 在相似比尺为 0.5 和 1 时, 模型尺寸为 $d 50 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 和 $d 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。设计的模拟渗流装置示意图如图 1 所示, 与原型装置^[7]符合几何相似条件。模型用有机玻璃制成, 以便对渗流过程进行观察, 并在模壁安放动态压力传感器, 在其等同位置安放测量时间的铜触点, 以测量流体渗流压力和位移曲线。

1.2 模拟液及多孔介质的选择

由于制备多孔铝时完成渗流过程所需的时间很短(通常小于 1 s), 可认为铝液是在浇注温度下渗流。本文以 720 °C 铝液渗流为例, 其粘度为 $\nu = 1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[8]。在 $\lambda_g = 1$ 时, 选 15 °C 水为模拟液体($\nu = 1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[9], 如图 2 所示)。

由于制备多孔铝时填料颗粒会溶于水, 因此, 模拟试验选择氧化铝中空球为颗粒组成多孔介质。

2 实验结果与分析

2.1 渗流动力学规律

实验模拟了数组不同条件下的渗流情况, 都获

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 19472020

收稿日期: 1998- 10- 17; 修订日期: 1999- 09- 02

作者简介: 程桂萍(1969-), 女, 博士

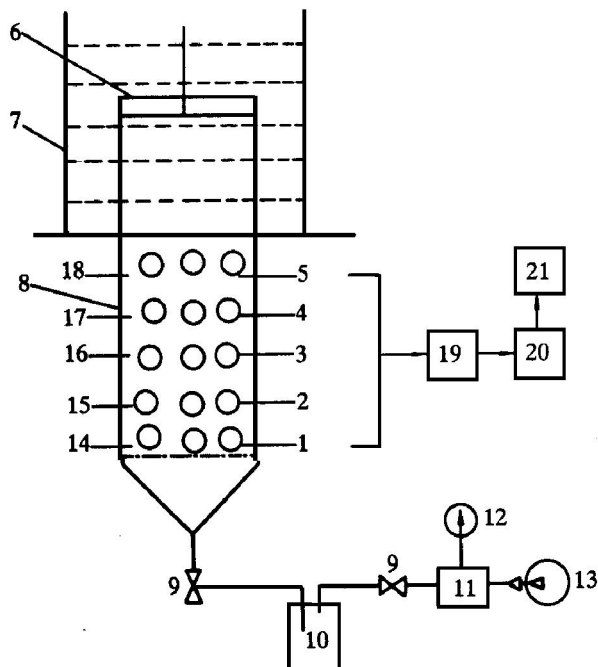


图 1 负压渗流模拟试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of negative infiltrating

1~5—Pressure sensor; 6—Plug; 7—Water trough;
8—Mold; 9—Valve; 10—Container; 11—Barostat;
12—Barometer; 13—Vacuum pump; 14~18—Time
sensor; 19—Resistance strainometer;
20—Storage of waveform; 21—Computer

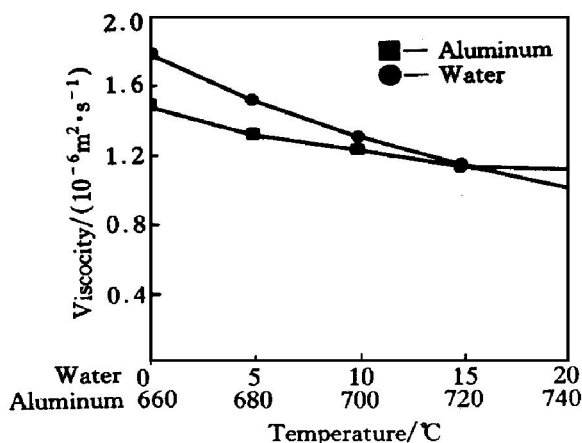


图 2 铝液和水的粘度随温度变化曲线

Fig. 2 Viscosity of aluminum and water
vs temperature

得了相似的规律。取一组条件来描述渗流动力学规律,即颗粒直径为 1.5 mm,外加压力为 -0.02 MPa 时,15 °C 水在 $d=50$ mm 模型中的渗流。

渗流前沿的位移 L 与时间 t 的关系(如图 3)为
$$L = -3.2625 + 3.2552t^{1/8}$$

一般表达式为

$$L = a_1 + b_1 t^{1/8} \quad (2)$$

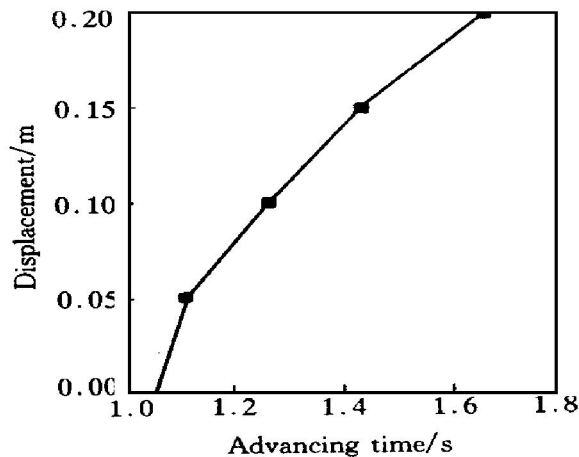


图 3 渗流前沿的位移与时间的关系

Fig. 3 Displacement of infiltration front vs
infiltration time

式中 a_1 和 b_1 为常数。

从式(2)和图 3 可以看出,渗流过程是非恒定、非线性的,渗流前沿的位移速度随其位移的增长而变化(见图 4)。

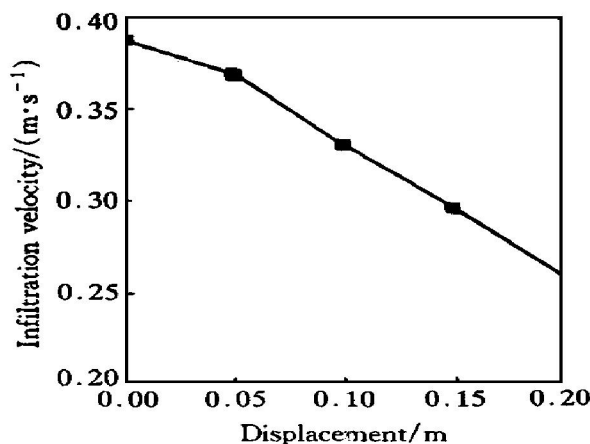


图 4 渗流前沿的位移速度与位移量的关系

Fig. 4 Infiltration velocity vs displacement of
infiltration front

渗流压强在渗流长度 L 上的分布曲线(见图 5)为

$$p = -0.0016 - 0.09902L;$$

一般表达式为

$$p = a_2 + b_2 L \quad (3)$$

式中 a_2 和 b_2 为常数。

这说明在渗流方向上,流体的压强值呈梯度分布,自上而下增大。渗流前沿与已渗流区存在压力差,正是这个压力差造成多孔铝的孔隙率从上至下分布不均匀。

2.2 渗流前沿的推移情况

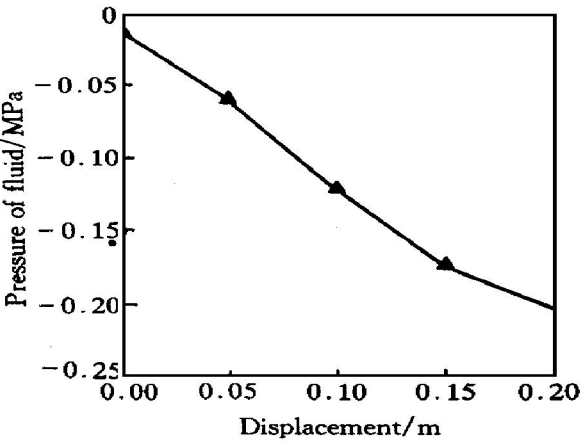


图 5 渗流压强在渗流长度上的分布

Fig. 5 Fluid pressure vs infiltration length

用着色水进行渗流, 表明渗流前沿基本上以平直界面向前推移, 说明渗流前沿的流体在各处的压强相等, 本实验测量的压强和位移时间能代表渗流前沿流体的压强和位移时间。

2.3 渗流时间与外加压力的关系

在制备多孔铝时, 为保证铝液在填料颗粒中渗流得到所需长度和孔结构的多孔铝, 外加压力的选择至关重要。压力太小, 渗不满; 压力过大, 导致渗漏, 同时铝液进入颗粒间的尖角处, 使颗粒的去除困难。

本文用渗流时间与外加压力的关系曲线找出最佳压力。渗流时间与外加压力的曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 当颗粒直径大于 1.5 mm 时, 外加压力负于 - 0.01 MPa 后对渗流时间的影响一般已经很小, 在本实验条件下我们取渗流压力为

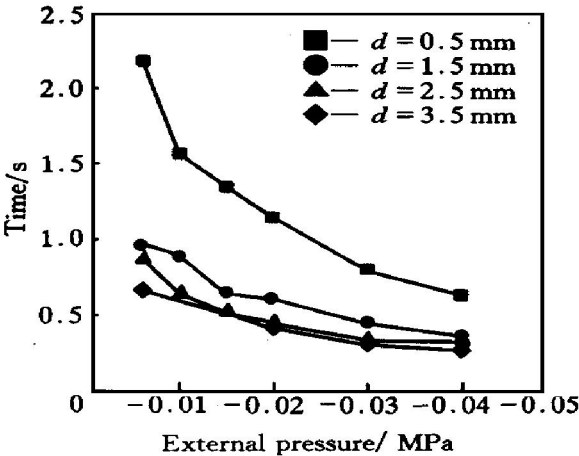


图 6 渗流时间与外加压力的关系

Fig. 6 Time of completing infiltration vs external pressure

- 0.01 MPa; 对于直径 0.5 mm 的颗粒来说, 外加压力负于 - 0.015 MPa 后渗流时间才明显减小, 负于 - 0.020 MPa 后渗流时间的变化更不大; 试验时取渗流压力为 - 0.015 ~ - 0.020 MPa。

3 模拟试验结果在原型中的检验

根据相似原理, 只有模型与原型的实验结果符合相似准则中的比尺要求时, 才能把模型的结果和规律用于指导原型的实验。

按照式 (1) 的要求, 若渗流满足 Froude 准则, 则渗流时间的比尺为 $\lambda_t = \lambda_L^{1/2}$, 压力比尺为 $\lambda_p = \lambda_\rho \lambda_L$; 若满足 Reynolds 准则, 则渗流时间比尺为 $\lambda_t = \lambda_L^2 / \lambda_\nu$, 压力比尺为 $\lambda_p = \lambda_\rho \lambda_L^2 / \lambda_\nu^2$ 。

实验主要检验了原型和模型中的渗流时间比尺和压力比尺。以外加压强代表渗流前沿流体的压强, 分别以 d 50 mm 和 d 100 mm 模型中模拟液渗流 50 mm 和 100 mm 的时间与 d 50 mm 原型中铝液渗流长度为 50 mm 所需的时间对比。实验测得各种条件下的渗流压强和时间如表 1 所示。

表 1 实验测得的模拟液和铝液的渗流压强与时间

Table 1 Parameters for simulant liquid and molten aluminum					
Particle diameter / mm	3.5	2.5	1.5	0.5	0.5
Prototype external pressure/ MPa	- 0.048	- 0.024	- 0.024	- 0.048	- 0.096
d 50 mm infiltration time/ s	0.14	0.21	0.29	0.38	0.24
Model external pressure/ MPa	- 0.02	- 0.01	- 0.01	- 0.02	- 0.04
d 50 mm infiltration time/ s	0.14	0.205	0.275	0.365	0.225
Model external pressure/ MPa	- 0.04	- 0.02	- 0.02	- 0.04	- 0.01
d 100 mm infiltration time/ s	0.22	0.31	0.39	0.4	0.95

在原型实验中, 氧化铝中空球的预热温度为 600 ℃, 铝液浇注温度为 720 ℃, 其密度为 2.4 g/ cm³[10]。

分析表中的数据, 对于粒径为 0.5 ~ 3.5 mm 的颗粒, 在几何相似比尺 $\lambda_L = 1$ 时, 压力比尺 $\lambda_p = 2.4$, 渗流时间比尺都符合 $\lambda_t = 1 = \lambda_L$, 既符合 Reynolds 准则又符合 Froude 准则, 说明在 $\lambda_L = 1$ 时很多问题都可以简化。

在 $\lambda_L = 0.5$ 时, 压力比尺 $\lambda_p = 1.2$, 对粒径 1.5 ~ 3.5 mm 的颗粒, 渗流时间比尺 $\lambda_t = 0.64 \sim 0.74 \approx \lambda_L^{1/2}$, 而粒径 0.5 mm 颗粒的渗流时间比尺 $\lambda_t =$

$0.95 \neq \lambda_L^{1/2}$, 但在压力比尺 $\lambda_p = 9.6$ 时, 渗流时间比尺 $\lambda_t = 0.25 = \lambda_L^2$ 。证明在本实验条件下, 粒径为 1.5~3.5 mm 的颗粒间流体流动相似遵循 Froude 准则, 而 0.5 mm 颗粒中的渗流相似遵循 Reynolds 准则; 可以按照相似准则把相似条件下模拟试验的结果和规律用于指导原型中多孔铝的制备。

4 结论

1) 在制备多孔铝时, 铝液在多孔介质中的渗流动力学规律为: 渗流前沿的位移与渗流进行时间的关系为 $L = a_1 + b_1 t^{1/8}$, 渗流压强在渗流长度上的分布曲线为 $p = a_2 + b_2 L$, 其中 a_i 和 b_i ($i = 1, 2$) 为在不同的条件下的不同常数; 渗流前沿以平直界面向前推移。

2) 对粒径 0.5 mm 的颗粒, 渗流所需的外加压力小于 0.02 MPa, 对粒径 1.5~3.5 mm 的颗粒, 外加压力值小于 0.01 MPa 为宜。

3) 控制铝液渗流过程的相似准则: 对粒径 0.5 mm 的颗粒为 Reynolds 准则, 对粒径 1.5~3.5 mm 的颗粒为 Froude 准则。在相似准则的指导下, 可以把模拟试验的结果推广到多孔铝的制备中, 以指导实际生产。

REFERENCES

- [1] Mortensen A, Masur L J, *et al.* Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: part I, Theory [J]. Metall Trans, 1989, 20A(11): 2535~2541.
- [2] Masur L J, *et al.* Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: part II, Experiment [J]. Metall Trans, 1989, 20A(11): 2549~2557.
- [3] Muscat D, *et al.* Modeling the infiltration kinetics of molten aluminum into porous titanium carbide [J]. Metall and Mat Trans, 1994, 25A(11): 2357~2370.
- [4] HU Lianxi (胡连喜), *et al.* 铝/氧化铝纤维预制体的液态浸渗动力学 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1998, 8(suppl. 1): 75~79.
- [5] HU Lianxi, *et al.* Determination of threshold pressure for infiltration of liquid aluminum into short alumina fiber preform [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1996, 6(4): 133~137.
- [6] ZHANG Yong (张勇), *et al.* 粘度不同的液态铝低压渗流过程的模拟试验研究 [J]. Engineering Mechanics (工程力学), 1994, 11(4): 115~121.
- [7] CHENG Guiping (程桂萍). 多孔金属的制备及液态金属渗流动力学研究 [D]. PhD Dissertation. Nanjing: Southeast University, 1997.
- [8] Yao T P, *et al.* The viscosity of tin, lead, zinc, aluminum and their alloys [J]. J Ins Met, 1952/1953, 81: 17~21.
- [9] WEN Desun (闻德荪), *et al.* Engineering Mechanics of Fluids (工程流体力学) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 3~10.
- [10] Mondolfo L F, Aluminum Alloys: Structure and Properties [M]. Butterworth & Co Ltd, 1976. 180~200.

An experimental investigation on simulation of negative pressure infiltration process of molten aluminium

CHENG Guiping^{1, 2}, CHEN Hong-deng¹, WEN De-sun², SHU Guang-ji²

1. School of Applied Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, P. R. China;

2. Department of Materials Science, Southeast University, Nanjing 210018, P. R. China

Abstract: The infiltration dynamics of simulant liquid under negative pressure was studied by simulation test in accordance with the laws of similitude. It showed that the criterion of similarity which controls the infiltration of fluids is Reynolds criterion for fillers of diameter 0.5 mm, Froude criterion for fillers of diameter 1.5~3.5 mm. On the basis of similarity criterion, the infiltration process of molten aluminum in the prototype is similar to that of simulant liquid in the model.

Key words: negative pressure infiltration; laws of similarity; simulation test; molten aluminum

(编辑 袁赛前)