

液态铝低压渗流过程的模拟试验研究¹⁾

张 勇

(山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘要 根据相似原理对黏度不同的液态铝在多孔介质中的低压向上渗流过程进行了模拟试验研究. 试验表明, 渗流液面以平面沿铅垂方向推进, 并满足次方根规律; 某时刻 t 的雷诺数、阻力系数和沿程损失可用相应的公式计算; 液态铝的黏度在一定范围 (5%) 的变化对渗流速度的影响不大. 模拟与原型的充填时间有良好的 consistency.

关键词 模拟实验, 黏度, 低压渗流

在金属材料领域, 用渗流法生产金属基复合材料及泡沫金属的过程中^[1], 会遇到液态金属在多孔介质中渗流的问题. 在实际过程中, 金属液的渗流细节不易观察到, 而用模拟试验进行研究则比较简易直观. 本文选择低压渗流法制备泡沫金属的工艺过程作为模拟对象^[1], 根据相似原理, 在有机玻璃模型中用液体作为流体, 对不同黏度的液态铝的低压渗流过程进行了模拟试验研究, 揭示了在渗流过程中的力学变化规律, 并将模拟结果与原型进行了比较, 两者的一致性良好.

1 试验设备及试验方法

实际的低压渗流装置见文献 [1] 中的装置图, 本文采用如图 1 所示的渗流模拟装置, 两者的几何尺寸满足 1:1. 模拟装置由渗流机构、外加渗流气压控

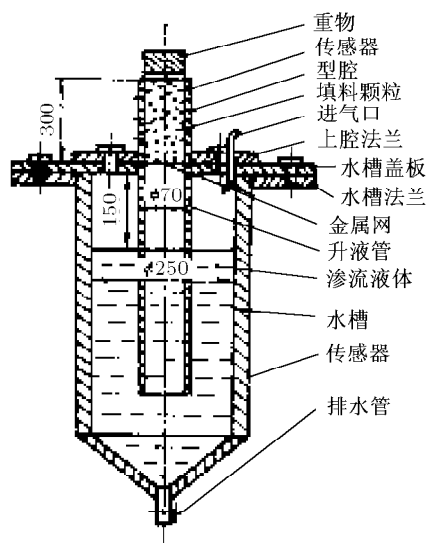


图 1 模拟装置图

制系统和渗流过程瞬时压强测量系统组成. 外加渗流气压是指进气管另一端储气罐内的气压值, 可以在 0~0.05 MPa 变动. 渗流瞬时压强的测量采用 $\phi 3$ mm 的高精度传感器, 传感器 ①~⑤ 的位置如图 2 所示.

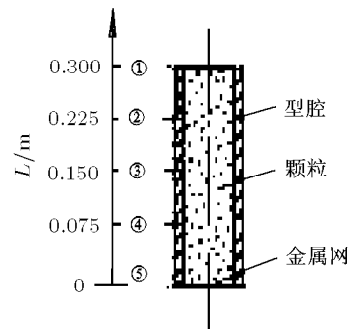


图 2 传感器位置图

原型中液态铝的渗流是非恒定渗流, 所受作用力有重力、黏滞力和压力. 只有当弗劳德准则, 雷诺准则同时满足才能保证模型和原型的运动相似, 即

$$\frac{\lambda_v^2}{\lambda_g \lambda_l} = \frac{\lambda_\gamma \lambda_l}{\lambda_\gamma} = 1 \quad (1)$$

本试验取 $\lambda_l = 1$, 而 $\lambda_g = 1$ 则由式 (1) 知, 当 $\lambda_v = 1$ 即模型和原型渗流液体的黏度比尺为 1 时, 在初始条件和边界条件相似的情况下, 即可满足模型与原型的流动相似.

本试验将液态铝的渗流过程从两个角度出发进行模拟, 分别称方案 1 和方案 2. 方案 1 不考虑液态铝与颗粒之间的热交换, 因为渗流过程很短 (一般只有几秒钟), 所以可简化为液态铝黏度为常数的渗流过程来研究. 取液态铝的黏度值为 $\mu_{700^\circ\text{C}} =$

2005-03-16 收到第 1 稿, 2005-04-01 收到修改稿.

1) 山东省自然科学基金项目资助 (2003zx14).

$2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{S}^{[2]}$. 方案 2 考虑到液态铝与颗粒之间的热交换, 假设液态铝是在接近凝固点 (600°C) 的温度下进行渗流的, 所以黏度相应地选取接近凝固温度的值 $\mu_{600^\circ\text{C}} = 3.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{S}^{[2]}$.

方案 1 选取 20°C 的水作为相似液体, 则

$$\lambda\gamma = \frac{v_{ZL104}(700^\circ\text{C})}{v_{\text{水}}(20^\circ\text{C})} = \frac{2.7 \times 10^{-3} / 2.64 \times 10^3}{1.003 \times 10^{-6}} = 1$$

方案 2 选取 20°C , 5.5% 的甘油水溶液作为相似液体, 则

$$\lambda\gamma = \frac{v_{ZL104}(600^\circ\text{C})}{v_{\text{甘油水溶液}}(5.5\%, 20^\circ\text{C})} = \frac{3.0 \times 10^{-3} / 2.64 \times 10^3}{1.159 \times 10^{-6} / 1.0113 \times 10^3} = 1$$

2 试验结果及分析

2.1 渗流的位移 - 时间曲线及渗流速度表达式

试验测得外加渗流气压为 0.04 MPa 条件下, 方案 1 和方案 2 的渗流位移时间曲线如图 3, 图 4 所示, 经拟合得到渗流的位移 $L(t)$ - 时间 t 及速度 $u(t)$ - 时间 t 表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \text{方案 1} \quad L(t) &= 1.2502\sqrt[4]{t} - 1.0609 \\ u(t) &= L'(t) = 0.3126/\sqrt[4]{t^3} \end{aligned} \right\}, t \in [0.88, 2.20] \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{方案 2} \quad L(t) &= 1.2340\sqrt[4]{t} - 1.0500 \\ u(t) &= L'(t) = 0.3085/\sqrt[4]{t^3} \end{aligned} \right\}, t \in [0.88, 2.20] \quad (3)$$

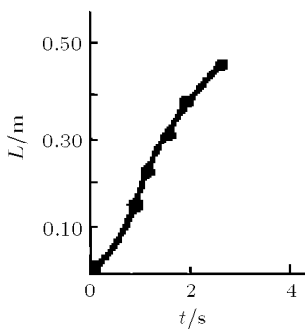


图 3 方案 1 的 $L(t)$ - t 曲线

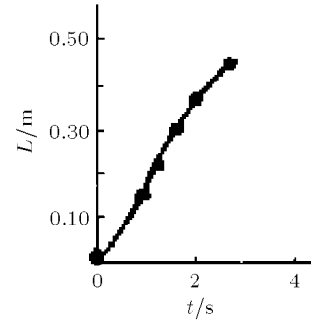


图 4 方案 2 的 $L(t)$ - t 曲线

2.2 渗流的瞬时压强变化曲线

通过传感器测量可得外加渗流气压为 0.04 MPa 条件下, 方案 1, 2 型腔内渗流压强随时间的变化曲线如图 5, 图 6 所示. 图中曲线①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥分别表示型腔内断面①, ②, ③, ④, ⑤和外断面⑥处的情况.

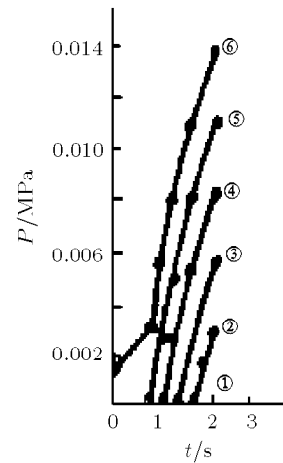


图 5 方案 1 的 $P(t)$ - t 曲线

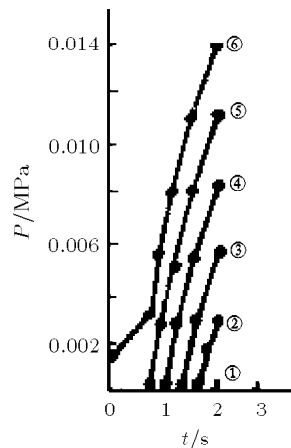


图 6 方案 2 的 $P(t)$ - t 曲线

2.3 渗流的雷诺数和阻力系数的分析

多孔介质中液体的恒定流动, 其考虑因素分别为 p/l (多孔介质单位长度压强差), ρ (液体密度), μ (液体

动力黏度), l (液流特征线性长度), u (特征流速) 等, 一般关系式为

$$\frac{p}{L} = f(u, p, l, \mu) \quad (4)$$

根据 π 定理可得

$$\frac{p}{u^2 \rho} \cdot l = f_1\left(\frac{\mu}{\rho u l}\right) \quad (5)$$

式(5)等号右边项为雷诺数的倒数, 左边项为多孔介质对流动的阻力系数 λ , 式中 l 通常以水力半径 R 表示, 即 $l = R = A_v/x$ (A_v 为液流过流断面面积, x 为湿周长度), 在多孔介质中, 液流过流断面面积 $A_v = nA$, (A 为横断面面积, n 为孔隙率), 湿周 $x = \omega A$, (ω 为颗粒层单位体积中孔隙通道壁总面积), 因此

$$l = \frac{A_v}{x} = \frac{n}{\omega} \quad (6)$$

每个填料颗粒的体积为 $\pi d_e^3/6$, (d_e 为其等效粒径). 在颗粒层的单位体积中, 全部颗粒的体积等于 $(1-n)$, 单位体积中颗粒的数目 $N = 6(1-n)/\pi d_e^3$. 每个颗粒的表面积为 πd_e^2 , 单位体积中 N 个颗粒的总表面积为

$$\omega = \pi d_e^2 \cdot N = \frac{6(1-n)}{d} \quad (7)$$

本试验研究的渗流过程是非恒定的, 这里对其作了准恒定处理, 即将过程简化为无数个瞬时恒定的过程来处理. 对应于不同的时刻, 雷诺数和阻力系数有以下的表达式

$$Re(t) = \frac{u(t) \cdot l}{\nu} = \frac{\rho u(t) d_e \cdot n}{6(1-n)\mu} \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \frac{p(t) \cdot l}{L(t) \rho u^2(t)} = \frac{p(t) n d_e}{6(1-n) L(t) \rho u^2(t)} \quad (9)$$

试验测得多孔介质的干密度为 0.3982 g/cm^3 , 填料颗粒的密度为 0.59 g/cm^3 , 从而得到孔隙率 $n = 1 - 0.3982/0.59 = 0.325$, 取 $\rho = 9.982 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$, 取 $d_e = 0.0025 \text{ m}$.

在图 2 所示的坐标系中, 将有关的数据代入式(8), 式(9), 得到两种方案在外加渗流气压为 0.04 MPa 时, 不同时刻的 $Re(t)$ 和 $\lambda(t)$ 值, 如表 1 所示.

由表 1 中的 $Re(t)$ 和 $\lambda(t)$ 的值作 $\lg[100\lambda(t)] - \lg Re(t)$ 的曲线如图 7 所示.

表 1 两种方案不同时刻的 $Re(t)$ 和 $\lambda(t)$ 值

$L(t)/\text{m}$	方案 1			方案 2		
	t/s	$Re(t)$	$\lambda(t)$	t/s	$Re(t)$	$\lambda(t)$
0	0	68.770	0	0	59.429	0
0.075	0.27	56.259	0.0663	0.26	48.944	0.080
0.150	0.55	47.766	0.1057	0.56	41.722	0.112
0.225	0.86	41.230	0.1501	0.87	35.500	0.164
0.300	1.32	34.595	0.2257	1.32	29.899	0.244

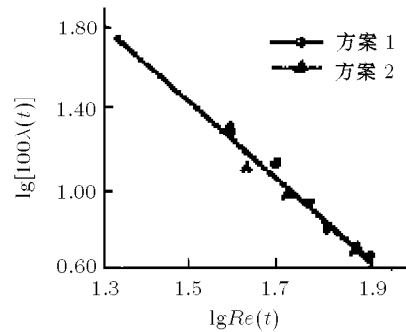


图 7 $\lg[100\lambda(t)] - \lg Re(t)$ 关系曲线

可见这些数据落在一条直线附近, 经拟合得到 $\lambda(t)$ 和 $Re(t)$ 的关系

$$\lambda(t) = 114.62 [Re(t)]^{-1.827} \quad (10)$$

2.4 瞬时恒定渗流的沿程损失分析

将式(10)代入沿程损失公式得

$$hf(t) = \frac{\lambda g L(t) u^2(t)}{D \cdot 2g \cdot n^2} = 114.62 \frac{L(t) u^2(t)}{D \cdot 2g \cdot n^2} [Re(t)]^{-1.827} \quad (11)$$

式(11)中 $\frac{u(t)}{n} = v(t)$ 是表示“渗透流速”或称“达西流速”.

将有关数据代入式(11)算得 $hf(t)$ (实测), 并将其代入式(11)求得 D 值, 取 D 的平均值 $\bar{D} = 1.5103 \times 10^{-3}$, 此值与时间无关, 本文称其为“等效渗流通道直径”, 将 \bar{D} 代入式(11)算得 $hf(t)$ (计算), 如表 2 所示.

表 2 两种方案的 $D, hf(t)$ (实测) 及 $hf(t)$ (计算)
(单位: m)

$L(t)$	方案 1		方案 2	
	$D(\times 10^3)$	$hf(t)$	$hf(t)$	$hf(t)$
		(实测)	(计算)	(实测) (计算)
0	0	0	0	0
0.075	1.523	0.125	0.126	1.386 0.163 0.149
0.150	1.411	0.310	0.290	1.373 0.335 0.305
0.225	1.375	0.505	0.460	1.389 0.547 0.503
0.300	1.382	0.730	0.668	1.389 0.789 0.726

2.5 原型的检验及原型渗流过程的描述

选取与模型试验相同的外加渗流气压及初始渗流速度, 可得到原型中液态铝渗满高度为 150 mm 的填料颗粒层所需时间; 同时利用式 (2), 式 (4) 可得模型中的对应时间, 所得的原型和模型的时间如表 3 所示。可见模拟结果基本符合实际的充型过程。

表 3 原型与模型的充满时间比较

方案	原型充满时间 /s	模型充满时间 /s
1	1.45	1.445
2	1.45	1.432

从图 5, 图 6 可知, 型腔的渗流压强是逐渐增大的, 且各曲线彼此间的间隔近于相同, 可知渗流压强是呈线性分布的。因为 $\lambda_v = 1$, $\lambda_p = 2.64$, 所以图 3, 图 4 是充填 150 mm 高填料颗粒层的过程即是此种外加渗流气压下原型的渗流位移 - 时间曲线, 图 5, 图 6 中的数据乘以 2.64 即为该种外加条件下, 原型的型腔内渗流压强随时间变化的曲线, 并且从模型中观察到渗流液面与型腔壁面相垂直, 并沿铅垂方向向上前方推进, 这说明与壁面垂直的同一个断面上各点的压强是相同的。

3 讨 论

3.1 液态铝黏度变化即温度变化对渗流过程的影响

从表 1 的数据可知, 随着流体黏度的增大, 充型的速度略有降低, 但并不明显, 只在误差范围 (5%) 内变动, 而 $Re(t)$ 明显降低, $\lambda(t)$ 相应增大, 渗流压强也略有增加, 这些变化主要是由于流体黏度的

增大所致。

3.2 误差分析

从表 2 知, 实测值与计算值稍有偏差, 这是因为位移曲线经过了一次拟合, $\lambda(t)$ 和 $Re(t)$ 的关系又经过了一次拟合, 传感器本身又有误差存在。另外, 铝 - 颗粒及水 - 颗粒之间润湿性的差异也是造成原型和模型之间的偏差的重要原因。所以误差是多种误差累加的结果。

4 结 论

(1) 渗流过程中, 液面与型腔壁面相垂直, 并沿铅垂方向向上前方推进, 液面的位移 - 时间关系符合 4 次方根规律。

(2) 对 $\phi 2.5$ mm 的球状颗粒来讲, 若将渗流过程视为无数个瞬时恒定过程来处理, 则对应于某一时刻 t 的雷诺数 $Re(t)$, 阻力系数 $\lambda(t)$ 和沿程损失 $hf(t)$ 均可用相应的公式来计算。

(3) 液态铝黏度在一定范围的变化, 使渗流速度略微降低, 但变动幅度小于误差范围 (5%)。

参 考 文 献

- 1 Yong Zhang, et al. Production of foam aluminium alloy by lowpressure infiltration method. *Acta Metallurgica Sinica* (English Letters), 1999, 12(5): 473~476
- 2 《铸造有色合金及其熔炼》联合编写组. 铸造有色合金及其熔炼. 北京: 国际工业出版社, 1981. 86 (“Foundry Colored Alloys and Their Smelting” combine compiling group. Foundry COLOred Alloys and Their Smelting. Beijing: The National Defence Industry Press, 1981. 86 (in Chinese))

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SIMULATION OF LOW-PRESSURE INFILTRATION PROCESS OF MOLTEN ALUMINIUM

ZHANG Yong

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract The process of molten aluminium infiltration with different viscosity in a porous medium under low-pressure is investigated through organic transport material simulation based on the principle of similarity. Experiments indicate that the plane surface of infiltrating liquid advances perpendicularly and conforms to the law of fourth root. At a certain time t , the Reynold's number $Re(t)$, the resistance coefficient $\lambda(t)$ and the pressure loss can be calculated by corresponding formulas. It is found that the viscosity changes of molten aluminum in a certain range (5%) have little influence on the infiltration velocity. The filling time in the simulation is compared with that for prototype, and a good agreement is found.

Key words simulation tests, viscosity, low-pressure infiltration