

离心铸造钛合金熔体补缩过程渗流流量及相似准则

隋艳伟¹, 李邦盛¹, 刘爱辉², 郭景杰¹, 傅恒志¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223003)

摘要: 对离心力场下钛合金熔体补缩过程中渗流流量公式进行理论推导, 并对渗流流动机制进行分析, 同时依据渗流流量公式和相似物理模拟理论, 提出离心力场下物理模拟钛合金熔体补缩渗流流动时的相似准则。研究表明: 离心力场下钛合金熔体补缩过程中的渗流流量公式, 可根据雷诺数分为 4 个阶段进行推导: 低速渗流、达西渗流、过渡区渗流以及高速区渗流, 4 个阶段的补缩渗流流量均随着旋转速度和离心半径的增加而增大, 并且模拟流体粘度与钛合金熔体粘度之比为 0.365。

关键词: 离心铸造; 钛合金; 补缩; 流量; 相似准则

中图分类号: TG 249.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)04-0594-05

钛合金具有比强度高、生物相容性好、耐腐蚀和耐高温等诸多优点。在航空、航天、船舶、石化、医疗和体育等领域得到了广泛应用^[1-3]。然而钛合金熔体熔点高、化学反应性强、流动性差, 在常规条件下难以成形, 故此需要采用外加力场下的近净成形制造技术。在众多的外加力场近净成形制造技术中, 采用离心浇注钛合金铸件, 不仅成本低、周期短, 还可以显著增加合金熔体凝固时的充型补缩压力, 减少收缩缺陷, 获得高致密度的健全铸件。目前高性能的大型复杂钛合金铸件大多数都是采用离心铸造技术生产的^[4-7]。

离心力场下, 钛合金熔体凝固成形过程中, 合金熔体经由冒口、浇道, 通过枝晶间隙对铸件进行补缩, 补缩的合金熔体流量通常由传统线性达西定律计算得出^[8,9]。然而, 传统线性达西定律的应用范围是在较低雷诺数情况下, 当雷诺数超出了传统线性达西定律的使用范围, 则计算合金熔体补缩过程中渗流流量公式不再适用^[10], 应该对合金熔体补缩过程中渗流流量的传统计算公式进一步完善。因此, 本研究依据渗流流体力学理论, 推导了广义达西定律公式, 把使用条件推广到所有雷诺数的情况, 以适用于不同旋转速度下离心铸造钛合金补缩渗流流动过程, 同时依据所给出的渗流流量公式推导物理模拟钛合金熔体补缩渗流流动时的相似准则。

1 钛合金熔体补缩过程渗流流量公式推导

传统线性达西定律的适用范围是雷诺数 (Re) 在 1~10 之间, 当 $Re < 1$ 时为低速非达西渗流流动, 此时合金熔体的压力梯度较小, 运动缓慢; 当 Re 在 10~100 之间时为过渡区; $Re \geq 100$ 时, 称之为高速非达西渗流流动^[10-13]。在实际浇铸钛合金过程中, 当离心力较大时 ($Re > 10$), 合金熔体的渗流流动不再遵循传统线性达西流动, 而处于过渡区或者高速非达西流区; 随着合金熔体温度逐渐降低, 熔体的粘度随之增大, 雷诺数逐渐减小, 当 $Re < 1$ 时, 补缩渗流流动进入低速非达西流区, 此时传统线性达西定律也已不再适用。因此, 有必要对传统线性达西定律进行完善, 得到雷诺数在小于 1 和大于 10 情况下的广义达西定律公式。下面对计算离心力场下钛合金熔体补缩渗流流量的广义达西定律公式进行推导。

在低速非达西渗流规律研究中发现, 渗流曲线呈非线性并且不通过零点(如图 1 所示), 而是存在一个启动压力梯度 a 。当压力梯度 $\Delta P_1/L$ 大于 a 时, 合金熔体开始发生低速渗流; 当 $\Delta P_1/L$ 增加到 b 时, 合金熔体发生线性达西渗流流动($b-d$); 随着 $\Delta P_1/L$ 的进一步增大, 合金熔体进入过渡区($d-e$), 以及 e 之后的高速流区域^[11-13]。

收稿日期: 2008-04-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50434030)

作者简介: 隋艳伟, 男, 1981 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86412198, E-mail: suiyawei@tom.com

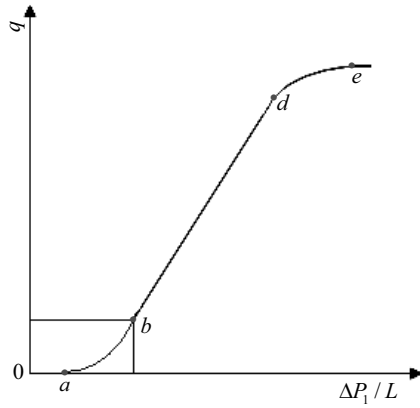


图 1 广义达西流动特征曲线

Fig.1 Characteristic curve of general Darcy flow

在重力场下，传统线性达西定律为^[14]：

$$q = \frac{K_1 A \Delta P_1}{\eta L} \quad (1)$$

式中： q ——补缩渗流流量， K_1 ——渗透率， A ——渗流枝晶截面积， ΔP_1 ——补缩截面间的压差， η ——动力学粘度， L ——补缩截面间的距离。

在离心力场下， ΔP_1 可以表示为^[10,15]：

$$\Delta P_1 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) + 2\rho v_r \omega (r_j - r_i) + \rho g (h_j - h_i) \quad (2)$$

式中： ρ ——钛合金熔体密度， ω ——旋转角速度， r_j ——单元 j 处的离心旋转半径， r_i ——单元 i 处的离心半径， v_r ——熔体质点在位置 i 、 j 处的速度， g ——重力加速度， h_j ——单元 j 的高度， h_i ——单元 i 的高度。

式(2)包含 3 部分：第 1 部分是离心压力；第 2 部分是科氏力；第 3 部分是重力。把公式(2)代入到(1)式可得：

$$q = \frac{K_1 A \left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) + 2\rho v_r \omega (r_j - r_i) + \rho g (h_j - h_i) \right]}{\eta L} \quad (3)$$

当 $Re < 1$ 时，合金熔体处于低速补缩渗流流动阶段，此时当 $\Delta P_1/L \leq a$ 时流量为零，而当 $a < \Delta P_1/L < b$ 时，渗流流量公式为^[13,16]：

$$q = C \frac{K_1 A}{\eta} \left(\frac{\Delta P_1}{L} - a \right)^n \quad (n > 1) \quad (4)$$

式中： C ——代表单位换算系数，值为 1，单位为 $(\text{Pa/m})^{1-n}$ 。

把式(2)代入上式得：

$$q = C \frac{K_1 A}{\eta} \left(\frac{\left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) + 2\rho v_r (r_j - r_i) + \rho g (h_j - h_i) \right]}{L} - a \right)^n \quad (n > 1) \quad (5)$$

其中启动压力梯度 a 由下面的表达式给出^[13]：

$$a = b_1 \eta^2 / \rho \left(\frac{K_1 b_1}{\phi} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

式中： b_1 ——表示常数； ϕ ——孔隙度。

把式(6)代入式(4)并简化得到：

$$q = C \frac{K_1 A}{\eta} \left(\frac{\Delta P_1}{L} - \frac{\eta^2 \phi^{3/2}}{\rho K_1^{3/2} b_1^{1/2}} \right)^n \quad (n > 1) \quad (7)$$

根据文献[10,17]和离心力场的特点得到雷诺数大于 10 时的广义达西定律。当 $10 < Re < 100$ 时，合金熔体处于过渡区，渗流流量公式为：

$$q = C \frac{K_1 A}{\eta} \left(\frac{\left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) + 2\rho v_r (r_j - r_i) + \rho g (h_j - h_i) \right]}{L} \right)^n \quad \left(\frac{1}{2} < n < 1 \right) \quad (8)$$

根据文献[18]可以得到式(8)中 n 的取值与雷诺数之间的对应关系，示于表 1 中。

当 $Re \geq 100$ 时，合金熔体在高速流区的渗流流量可由下式得到，即：

$$q = C_1 \frac{K_1 A}{\eta} \left(\frac{\left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) + 2\rho v_r (r_j - r_i) + \rho g (h_j - h_i) \right]}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \left(n = \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

式中： C_1 ——单位换算系数，数值为 1，单位为 $(\text{Pa/m})^{1/2}$ 。

根据上面对离心力场下广义达西定律公式的推导，可以看出，首先在离心铸造钛合金熔体凝固成形过程中，由于离心力、科氏力以及重力的综合作用，使得离心力场下合金熔体受到的补缩压力远远大于重力场下，因此与重力场下相比，离心力场下合金熔体的补缩渗流流量增加，有利于减小收缩缺陷体积，使组织更致密；其次，在离心力场下，在不考虑其它因素影响的情况下，4 个阶段的补缩渗流流量均随着离

表 1 指数 n 与雷诺数 Re 对照表

Table 1 The parallel table of exponent (n) and Reynolds number (Re)

Re	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100
n	0.91	0.83	0.77	0.71	0.67	0.63	0.59	0.56	0.53

心旋转速度和离心半径的增加而增大，离心补缩能力增强。

在前面推导的广义达西定律基础上，对钛合金熔体补缩渗流时，雷诺数与旋转速度之间的关系式进行推导。

由文献[17]可知，渗流流动雷诺数的定义式为：

$$Re = \frac{v\sqrt{K_1\rho}}{17.5\eta\phi^{3/2}} \quad (10)$$

式中： v ——表示渗流速度。

当 $1 \leq Re \leq 10$ 时，处于传统线性达西流动区间的合金熔体补缩渗流速度为：

$$v = \frac{K_1\Delta P_1}{\eta L} \quad (11)$$

由于离心力场下式(2)中的科氏力和重力的作用可以忽略不计，因此上式可以表示为：

$$v = \frac{K_1\rho\omega^2(r_j^2 - r_i^2)}{2\eta L} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)得到了雷诺数与旋转速度的关系式：

$$Re = \frac{K_1^{3/2}\rho^2\omega^2(r_j^2 - r_i^2)}{35\eta^2\phi^{3/2}L} \quad (13)$$

同理，得到了过渡区和高速流区雷诺数和旋转速度之间的关系式：

$$\text{过渡区: } Re = \frac{K_1^{3/2}\rho^{1+n}\omega^{2n}(r_j^2 - r_i^2)^n}{17.5\eta^2\phi^{3/2}L^n 2^n} \quad (14)$$

$$\text{高速流区: } Re = \frac{K_1^{3/2}\rho^{3/2}\omega(r_j^2 - r_i^2)^{1/2}}{24.75\eta^2\phi^{3/2}L^{1/2}} \quad (15)$$

钛合金熔体的密度选取为 4.5 g/cm^3 ，合金熔体的动力学粘度为 $5.3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，孔隙率为 0.785 ，枝晶间距为 $140 \mu\text{m}$ ^[19]，渗透率可由文献[20]和枝晶间距计算得出，其它参数由实验得到。根据式(13)、(14)和(15)计算得到了雷诺数与旋转速度的对应值，列于表 2 中。

表 2 钛合金熔体补缩渗流时雷诺数与旋转速度对照表

Table 2 The parallel table of Reynolds number and rotation speed during titanium alloy melt feeding infiltration

Feeding infiltration zone	Reynolds number	Rotation speed/r·min ⁻¹
Darcy flow zone	1~10	30~96
Transition zone	10~20	96~250
	20~30	250~430
	30~40	430~636
	40~50	636~855
	50~60	855~1112
	60~70	1112~1395
	70~80	1395~1768
	80~90	1768~2180
	90~100	2180~3003
	High-flow zone	≥ 100

通常离心铸造钛合金时，选取的旋转速度在过渡区区间。

2 钛合金熔体补缩渗流机制分析

当钛合金熔体渗流流动的压力梯度小于等于启动压力梯度时，由于钛合金熔体与枝晶臂之间有摩擦力，摩擦力的作用引起压力损耗，所以压力梯度必须达到一定的数值(即启动压力梯度)才能克服这种摩擦力作用，产生低速渗流流动；在低速渗流和线性达西渗流阶段，虽然流体渗流克服的阻力都是钛合金熔体与枝晶构成的多孔介质之间的直接摩擦而引起的压力损耗，此压力损耗与速度的一次方有关，但由于摩擦系数与雷诺数有关，因此导致低速渗流和达西渗流区的补缩渗流流量与压力梯度的关系曲线不同；当钛合金熔体的雷诺数达到过渡区以上时，流体在渗流过程中则需要克服渗流流体绕过组成多孔介质的无规则间隙因收缩、扩大和转弯等而引起的压力损耗，即微观局部阻力。此阻力与速度的二次方有关，它是由渗流流动时产生了涡流所致。因此与低速和达西流动时相比，在过渡区以上，渗流流体所受的阻力显著增大。雷诺数在 $10\sim 100$ 之间时，在钛合金熔体与多孔介质的直接摩擦以及微观局部阻力的共同作用下，渗流流量的增加趋势减缓，从而产生过渡区渗流阶段；当雷诺数大于等于 100 时，微观局部阻力起主导作用，此时直接摩擦引起的压力损耗可以忽略，渗流流动进入高速补缩渗流阶段。

3 物理模拟钛合金熔体补缩时的相似准则

钛合金由于熔点高、化学反应性强，使得其熔炼和浇铸都是在真空或者保护气体条件下完成，因此在离心铸造钛合金时，无法对合金熔体收缩缺陷的补缩过程以及各种工艺参数对补缩渗流过程的影响进行适时观察和确定。但由于合金熔体的补缩过程对铸件质量有很大影响，同时物理模拟技术可以可视化地研究熔体补缩渗流动力学、减少成本、降低消耗，因此采用物理模拟方法研究钛合金熔体补缩渗流过程具有重要意义。为了使模型中发生的现象与原型中发生的现象相似，根据相似模拟理论，物理模拟钛合金熔体补缩渗流流动过程不仅需要满足力学相似(力学相似包括几何相似、运动相似和动力相似)而且还需要满足一定的相似准则。下面对物理模拟离心力场下钛合金熔体补缩渗流流动过程中的相似准则进行推导。

当补缩渗流流动处于传统线性达西流动区域时，由式(13)以及相似物理模拟理论得到了雷诺数相似准

则, 满足下式:

$$\frac{\text{Re} K_{1p}^{3/2} \rho_p^2 \omega_p^2 (r_{jp}^2 - r_{ip}^2)}{35 \eta_p^2 \phi_p^{3/2} L_p} = \frac{\text{Re} K_{1m}^{3/2} \rho_m^2 \omega_m^2 (r_{jm}^2 - r_{im}^2)}{35 \eta_m^2 \phi_m^{3/2} L_m} \quad (16)$$

式中, 下角标 p 代表原型中的物理量, m 表示模型中的物理量。

当选取相同的雷诺数、离心半径和孔隙率, 并且两个截面之间的距离相等时, 则式(16)可以简化为:

$$\frac{K_{1p}^{3/2} \rho_p^2 \omega_p^2}{\eta_p^2} = \frac{K_{1m}^{3/2} \rho_m^2 \omega_m^2}{\eta_m^2} \quad (17)$$

对式(17)变换得到:

$$\frac{\omega_p^2}{\omega_m^2} = \frac{\eta_p^2 K_{1m}^{3/2} \rho_m^2}{\eta_m^2 K_{1p}^{3/2} \rho_p^2} \quad (18)$$

由渗流流体力学^[17]可知, 基本渗流力学微分方程为:

$$\frac{\partial \left(-\rho \frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(-\rho \frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(-\rho \frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial z} \right)}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

在 3 个坐标轴方向上的速度运动方程分别为:

$$v_x = -\frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial x}, v_y = -\frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial y}, v_z = -\frac{K_1 \partial P_1}{\eta \partial z} \quad (20)$$

根据相似物理模拟理论, 可以由渗流流动运动方程推导出补缩渗流运动相似准则:

$$\frac{v_p K_{1p} \Delta P_{1p}}{\eta_p L_p} = \frac{v_m K_{1m} \Delta P_{1m}}{\eta_m L_m} \quad (21)$$

上式中的补缩渗流速度可以由式(11)给出, 而压力项则由式(2)得到。由于科氏力和重力与离心压力相比可以忽略, 所以式(2)中的压力项只包括离心压力。在实验中由于离心半径和两个截面之间的距离相同, 因此式(21)变为:

$$\frac{K_{1p}^2 \rho_p^2 \omega_p^4}{\eta_p^2} = \frac{K_{1m}^2 \rho_m^2 \omega_m^4}{\eta_m^2} \quad (22)$$

由上面公式变换得到:

$$\frac{\omega_p^4}{\omega_m^4} = \frac{\eta_p^2 K_{1m}^2 \rho_m^2}{\eta_m^2 K_{1p}^2 \rho_p^2} \quad (23)$$

由式(18)和(23)有:

$$\frac{\eta_p^2 K_{1m} \rho_m^2}{\eta_m^2 K_{1p} \rho_p^2} = 1 \quad (24)$$

变换式(24)可以得到:

$$\eta_m = \frac{K_{1m}^{1/2} \rho_m \eta_p}{K_{1p}^{1/2} \rho_p} \quad (25)$$

钛合金熔体的物理参数如前所述, 物理模拟实验中选择加入增稠剂的水作为模拟流体, 模拟枝晶的孔隙直径为 230 μm , 密度为 1 g/cm^3 。由此得出模拟流体粘度与钛合金熔体粘度之比为:

$$\eta_m = 0.365 \eta_p \quad (26)$$

当物理模拟的模拟流体粘度与钛合金熔体粘度满足上式时, 就满足雷诺数准则和运动准则。

采用上面推导传统线性达西渗流相似准则的方法, 得到了补缩渗流模拟流体在过渡区以及高速流区的相似准则, 这两个区的相似准则与线性达西流区的相似准则即式(26)完全相同。

由式(13)、(14)、(15)得到物理模拟离心力场下钛合金熔体补缩渗流流动时, 雷诺数与旋转速度的对照表(模拟枝晶的孔隙率为 0.785), 示于表 3 中。

表 3 模拟流体渗流流动时雷诺数与旋转速度对照表

Table 3 The parallel table of Reynolds number and rotation speed during model fluid feeding infiltration			
Feeding infiltration zones	Reynolds number	Rotation speed/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	
Darcy flow zone	1~10	24~74	
	10~20	74~163	
	20~30	163~267	
	30~40	267~386	
	40~50	386~513	
	Transition zone	50~60	513~661
		60~70	661~825
		70~80	825~1040
		80~90	1040~1278
		90~100	1278~1754
High-flow zone	≥ 100	≥ 1754	

4 结 论

1) 离心力场下钛合金熔体补缩渗流流量计算公式可根据 Re 分为 4 个阶段进行推导, 4 个阶段补缩渗流流量均随着离心旋转速度和离心半径的增加而增大。

2) 离心力场下物理模拟钛合金熔体补缩渗流流动时, 在满足几何相似、运动相似和动力相似条件下, 还需要满足相似准则, 即模型中的流体粘度与钛合金熔体粘度之比为 0.365。

参考文献 References

- [1] Sen Indrani, Tamirisakandals S *et al.* *Acta Materialia*[J], 2007, 55(15): 4983
- [2] Lee H, Shankar M *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 420(1~2): 72
- [3] Li Liang(李 梁), Sun Jianke(孙健科) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2004, 21(5): 19
- [4] Wu Shiping, Liu Dongrong *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 426: 240
- [5] Wu Shiping(吴士平), Li Changyun(历长云) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 612

- [6] Liang Zuojian(梁作俭), Xu Qingyan(许庆彦) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(5): 353
- [7] Suzuki Ken-ichiro, Nishikawa Koji *et al.* *Materials Transactions, JIM*[J], 1996, 37(12): 1793
- [8] Liang Zuojian(梁作俭), Xu Qingyan(许庆彦) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(3): 164
- [9] Li Changyun(历长云). *Research on the Filling and Solidification of Titanium Alloy during the Vertical Centrifugal Casting*(钛合金立式离心铸造充填及凝固过程研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007
- [10] Jacob Bear, Translated by Li Jingsheng *et al*(李竞生等译). *Dynamics of Fluids in Porous Media*(多孔介质流体动力学)[M]. Beijing: China Architecture Building Press, 1982: 95
- [11] Wang Yifei(王一飞). *Theory and Application of Non-Darcy Flow in the Reservoir with Low Permeability*(低渗透非达西渗流理论及应用)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006: 30
- [12] Hu Qihua(胡其华). *Low-Permeability Reservoir Non-Darcy Flow Moving-Boundary Problem with Stefan Condition*(低渗透非达西渗流带 Stefan 条件动边界模型研究)[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005: 5
- [13] Zhu Changjun(朱长军). *Experimental Study and Mathematical Description of Non-Darcy Flow in Porous Media*(非达西渗流实验研究及数学描述)[D]. Langfang: Chinese Academy of Sciences, 2002: 13
- [14] Zhai Yunfang(翟云芳). *Infiltration Mechanics*(渗流力学)[M]. Chengdu: Petroleum Press, 1999: 9
- [15] Wannasin J, Flemings M C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 169: 143
- [16] Huang Yanzhang(黄延章). *Special Oil and Gas Reservoirs*(特种油气藏)[J], 1997, 4(1): 9
- [17] Liu Ning(刘宁). *Fundamentals of Infiltration Mechanics*(渗流力学基础)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 10
- [18] Liu Guangyao(刘光尧). *Geotechnical Investigation Surveying*(勘察科学技术)[J], 1997, 2: 34
- [19] Bai Yunfeng(白云峰). *Coupled Modeling and Numerical Calculation for Transport Phenomena in Electromagnetic Directional Solidification of Titanium Alloy in Cold Crucible*(钛合金冷坩埚电磁定向凝固传输过程耦合模型与数值计算)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 151
- [20] Wang Enzhi(王恩志), Han Xiaomei(韩小妹), Huang Yuanzhi(黄远智) *et al.* *Rock and Soil Mechanics*(岩土力学)[J], 2003, 24(S2): 120

Infiltration Flux and Similarity Criterion during Centrifugal Casting Titanium Alloy Melts Feeding

Sui Yanwei¹, Li Bangsheng¹, Liu Aihui², Guo Jingjie¹, Fu Hengzhi¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Huai'yin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: The quantitative formula of infiltration flux during titanium alloy melt feeding in centrifugal field was deduced. The infiltration flow mechanism in centrifugal field was analyzed. Based on the formula of infiltration flux and the similar physical simulation theory, the similarity criterion was presented. The results show that, the deduction of the formula of infiltration flux during titanium alloy melt feeding in centrifugal field can be divided into four stages in terms of Reynolds number, that is low-speed infiltration, Darcy infiltration, transient zone infiltration and high-speed infiltration. The feeding infiltration fluxes at four stages increase with increasing of rotation speed and centrifugal radius. The viscosity ratio of the model fluid to the titanium alloy melt is 0.365.

Key words: centrifugal casting; titanium alloy; feeding; flux; similarity criterion

Biography: Sui Yanwei, Candidate for Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86412198, E-mail: suiyanwei@tom.com