

# 离心铸造钛合金熔体补缩过程渗流流动物理模拟

隋艳伟<sup>1,2</sup>, 李邦盛<sup>2</sup>, 刘爱辉<sup>3</sup>, 郭景杰<sup>2</sup>, 傅恒志<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(3. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223003)

**摘要:** 采用相似物理模拟法, 研究了离心力场下钛合金熔体补缩过程中渗流流体体积的变化规律, 并与大断面充型流动进行了对比。结果表明: 随着补缩时间和旋转速度的增加, 补缩过程中渗流流体体积增大; 同时随着流体粘度和多孔介质孔眼数的减小, 补缩过程中渗流流体体积也相应增大; 当铸型顺时针旋转时, 浇道左侧相对于右侧, 先进行补缩渗流; 补缩过程中渗流流动与大断面宏观充型流动相比, 在相同时间内, 渗流流体体积减少。

**关键词:** 离心铸造; 钛合金; 补缩; 物理模拟

中图分类号: TG249.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)09-1537-05

钛合金具有密度小、比强度高、抗腐蚀性强以及生物相容性好等众多优点, 因而广泛应用于航空、航天、船舶等领域<sup>[1~4]</sup>。然而, 由于钛合金制造和加工费用高, 限制了其在各个领域的大规模应用, 目前主要采取研发新型钛合金或减小加工费用来降低成本<sup>[5]</sup>。离心力场下的近净成形铸造技术不仅可以减少加工费用, 同时还具有提高合金熔体的充填补缩效果, 使铸件组织更致密, 进而能够显著提高铸件质量, 满足生产要求<sup>[6~8]</sup>。因此, 一般采用离心铸造技术来生产钛合金铸件<sup>[1,3,8~10]</sup>。

钛合金铸件中易于出现收缩缺陷, 收缩缺陷的存在严重影响了铸件的使用性能。迄今, 对于离心力场下收缩缺陷已经进行了相应研究, 其中, 梁作俭<sup>[11]</sup>推导了离心压力下钛合金凝固收缩和补缩过程的数学模型, 得出离心力场的存在可以减小收缩缺陷; 历长云<sup>[12]</sup>通过数值模拟和实验研究的方法, 考察了离心力场对钛合金收缩缺陷的影响, 认为通过提高旋转速度可以减小收缩缺陷的体积。但已有研究主要集中在数值模拟和实验研究上, 关于合金熔体通过枝晶搭成的骨架对收缩缺陷进行补缩过程中, 渗流流动规律的研究还未见报道。因此, 本研究采用物理模拟的方法, 依据文献<sup>[13]</sup>推导的物理模拟钛合金熔体补缩渗流流动过程的相似准则, 借助高速摄像机可视化研究了离心力场下钛合金熔体补缩过程中的渗流流动规律, 以期研究钛合金收缩缺陷提供依据。

## 1 实验

制备孔眼分别为 175, 160, 150 和 135  $\mu\text{m}$  的模拟钛合金枝晶的多孔介质, 多孔介质的孔眼杂乱排列, 但每 25.4 mm 长孔眼数一定。把多孔介质放置在透明铸型的位置 b 处, 其透明铸型如图 1 所示。将放有多孔介质的透明铸型固定在离心高速转台上, 用高速数字式摄像机, 拍摄模拟流体在离心力场下渗过多孔介质的整个补缩渗流流动过程, 所用装置示意图如图 2 所示。为了便于拍摄后更准确计算补缩渗流液体的体积, 将铸型底面衬成白色, 相似物理模拟流体调为黑色。模拟流体的粘度、密度等物性参数, 是依据文献<sup>[13]</sup>相似模拟理论推导的离心力场下模拟钛合金熔体渗流流动的相似准则来选取的。选用水作为模拟流体, 为了达到文献<sup>[13]</sup>所要求的粘度, 向水中加入了增粘剂。为了研究流体粘度对渗流的影响, 还制备了比文献<sup>[13]</sup>中所要求的模拟流体粘度小一半的流体; 无多孔介质时, 模拟流体的粘度由文献<sup>[14]</sup>决定。离心机调速范围为 0~2000 r/min, 选用不同的旋转速度, 顺时针旋转, 具体方案列于表 1。当铸型旋转平稳后, 将模拟流体浇注到旋转铸型中, 同时启动高速摄像机对补缩渗流流动过程进行拍摄。应用图像分析软件量取透过多孔介质的模拟流体的体积(包含图 1 中位置 b 右侧铸型中模拟流体的体积), 并对数据进行分析处理。

收稿日期: 2008-09-19

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, 中国矿业大学材料科学与工程学院, 江苏 徐州 221116, 电话: 0516-83591876, E-mail:suiyanwei@tom.com

表 1 物理模拟渗流流动实验方案

Table1 Experimental scheme of infiltration flow of model fluid

Rotation speed/r·min <sup>-1</sup>	Viscosity/mPa·s					
	1.18		1.9345		0.967 25	
	No porous medium	175 μm	160 μm	150 μm	135 μm	135 μm
50					1	
100	1	1	1	1	1	1
300	1	1	1	1	1	1
400					1	
500		1	1	1	1	1

Note: the digits in table denote pouring times

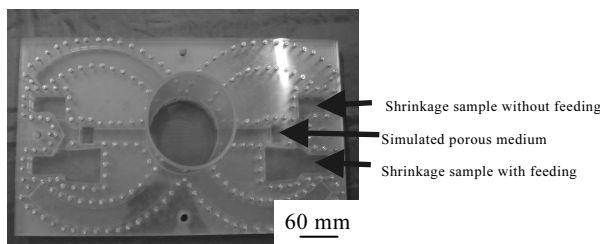


图 1 物理模拟渗流流动实验所用透明铸型  
Fig.1 Transparency mould used in this study

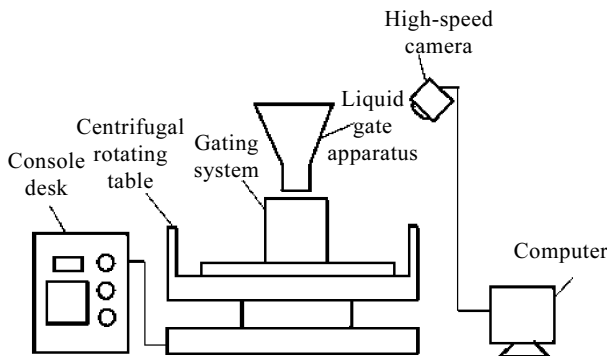


图 2 物理模拟渗流流动实验装置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of infiltration flow of model fluid

## 2 结果及分析

图 3 给出了物理模拟离心力场下钛合金熔体补缩渗流流动过程中，孔眼 135 μm，旋转速度为 300 r/min 时，不同旋转时间补缩渗流的照片。从图中可以看出，随着补缩时间的延长，通过多孔介质的补缩渗流流体体积逐渐增加。为了更详细地了解工艺参数对渗流流动的影响，从以下 6 个方面进行深入研究。

### 2.1 旋转时间对补缩渗流流动的影响

图 4 给出了物理模拟离心力场下钛合金熔体补缩

过程中，当孔眼为 135 μm 时，渗流流体体积与旋转时间的关系曲线。从图中可以看出，在相同旋转速度下，补缩渗流流体的体积随着渗流时间的增加而增大，而渗流流量则基本不变。这是由于随着旋转时间的延长，通过多孔介质对铸型进行补缩的模拟流体不断增多，使得渗流流体体积相应增大；渗流流量随着时间几乎不变的实验结果与文献[13]中所给出的渗流流量理论分析相吻合，由于相似物理模拟补缩渗流流动是在相同实验参数下进行的，因此补缩渗流流量随补缩时间变化不大。但在实际钛合金熔体凝固补缩过程时，由于合金熔体温度随着补缩时间的延长逐渐降低，导致合金熔体粘度增大，流动性减弱，使熔体补缩渗流流体体积增加的趋势减缓，补缩渗流流量随着补缩时间的增加逐渐减小，当补缩停止时渗流流体的体积和流量均为零。

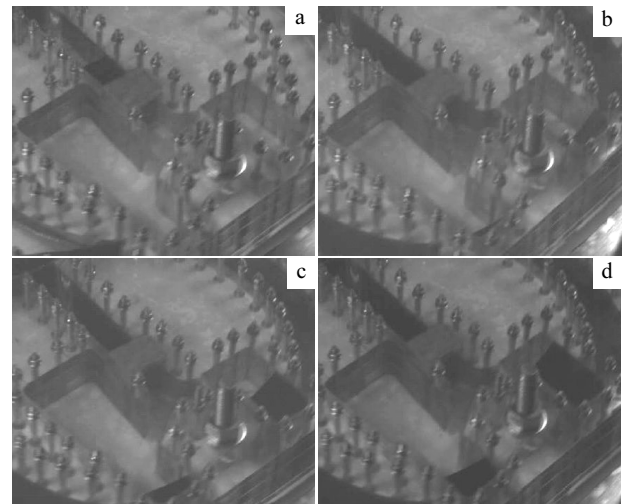


图 3 孔眼 135 μm 旋转速度为 300 r/min 时不同旋转时间液体补缩过程照片

Fig.3 Photographs of liquid feeding for different time at 135 μm, 300 r/min: (a) 1 s, (b) 2.2 s, (c) 3.4 s, and (d) 4.6 s

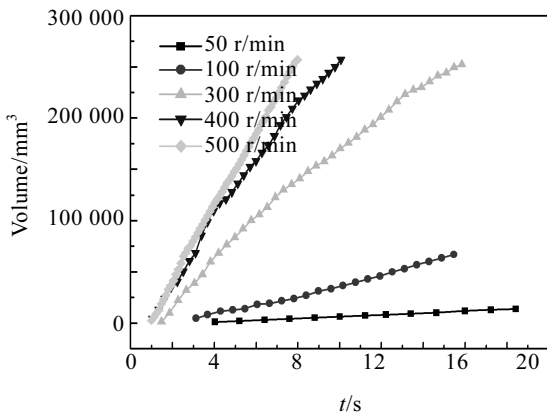


图 4 孔眼为 135 μm 时渗流流体体积与时间的关系

Fig.4 Relationship between the infiltration volume and time at 135 μm

### 2.2 旋转速度对补缩渗流流动的影响

由图 4 可知，当补缩时间相同时，随着旋转速度的增加，补缩渗流流体体积增大，渗流流量也相应增大，这与文献[13]中理论分析认为旋转速度的增加，补缩渗流流量增大，相同的时间内，渗流流体体积增大的结果相一致。由图 4 中还可以看出，旋转速度越大，补缩渗流流动的启动时间越少，这是由于旋转速度增加使补缩渗流速度增大的缘故。在实际钛合金浇注过程中，也是通过提高旋转速度来增强补缩。

设  $\Delta P/L = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_j^2 - r_i^2) / L$ ，公式中各物理量所代

表的含义与文献[13]中一致。图 5 给出了孔眼为 135 μm、补缩时间 5 s 时，渗流流体体积与  $\Delta P/L$  的关系曲线。从图中可以看出，渗流流体体积随着  $\Delta P/L$  的增加而增大，但增加的趋势逐渐减缓。根据文献[13]可知，当旋转速度为 50 r/min 时，流体处于达西流区域，而旋转速度为 100、300、400 以及 500 r/min 时，流体则处于过渡区。按照传统线性达西定律的观点，忽略科氏力以及重力对补缩的影响，只考虑离心压力对补缩的作用，并且不考虑渗流横截面面积的变化影响时，此时图 5 中的曲线应为直线 AB 形式；考虑离心力和科氏力对横截面面积的影响时，由离心力场下熔体受力分析可知，在离心力和科氏力共同作用下，渗流流动熔体横截面面积将随着旋转速度和离心半径的增加而变小，并且与熔体充型时相似，在本实验条件下，横截面面积随旋转速度减小的趋势逐渐减缓<sup>[15]</sup>，按照传统线性达西定律，依据 300 r/min 时熔体横截面面积，得到的旋转速度为 400 r/min 时渗流体积与

实验所得 400 r/min 时真实渗流体积之差为  $\Delta q_1$ ，根据旋转速度 400 r/min 时熔体截面面积给出 500 r/min 时渗流体积与实验 500 r/min 体积之差为  $\Delta q_2$ ， $\Delta q_2/\Delta q_1$  按照实验计算最大比值为 1.56，但是实验结果却大于 1.56，这说明传统线性达西定律不再适用；而且图中曲线变化趋势与文献[13]中的广义达西定律曲线变化趋势一致，也从侧面说明文献[13]所推导的广义达西定律的正确性。同时根据文献[13]可知，在其它物理量给定时，补缩渗流流量是由截面面积和旋转速度的乘积决定，当旋转速度增大到一定数值时，截面面积减小(科氏力增大造成的)对渗流流量的影响相对于旋转速度增大的影响占主导作用<sup>[12]</sup>，此时渗流流动的流量和渗流流体的体积都相应减小，这对于补缩不利。

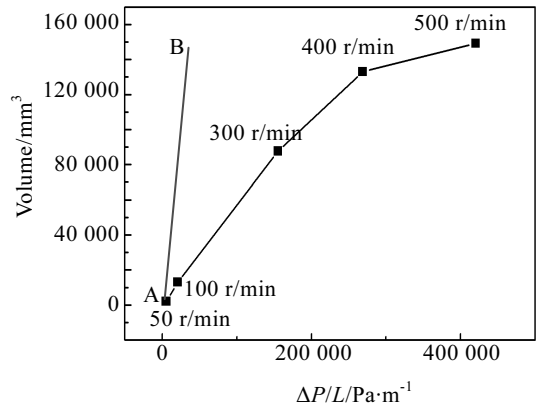


图 5 孔眼为 135 μm、补缩时间 5 s 时渗流流体体积与  $\Delta P/L$  的关系

Fig.5 Relationship between infiltration volume and  $\Delta P/L$  at 135 μm, feeding time 5 s

### 2.3 流体粘度对补缩渗流流动的影响

在钛合金实际浇注过程中，由于合金熔体的粘度随着熔体温度的降低而显著增大，因此选取两种粘度的模拟流体研究渗流流体体积随粘度的变化规律。多孔介质的孔眼为 135 μm，补缩渗流时间为 3 s 时，不同旋转速度下渗流流体体积与粘度值如表 2 所示。从表中可以看出，物理模拟钛合金熔体补缩过程中，渗流流体体积和流量均随着粘度的增加而减小，这是由于合金熔体粘度增加，使补缩渗流时需要克服的阻力增大，导致模拟流体渗流的体积和流量均减小，这与文献[13]的理论分析相一致。随着旋转速度的增加，同一旋转速度不同粘度渗流流体体积之差以及流量之差均增大，根据文献[13]可知，这是因为当流体的粘度差相等时，旋转速度越大，渗流流体的体积以及流量均增大的缘故。

表 2 孔眼为 135 μm、补缩时间 3 s 时渗流体积与粘度值  
Table 2 Relationship between the infiltration volume and viscosity at 135 μm and feeding time 3 s

Viscosity/mPa·s	Rotation speed/r·min <sup>-1</sup>	Volume/mm <sup>3</sup>
0.96725	100	12 900
	300	128 900
	500	223 600
1.9345	100	4 000
	300	39 000
	500	80 600

2.4 孔眼对补缩渗流流动的影响

在钛合金实际浇注过程中，补缩收缩缺陷的合金熔体通过枝晶搭成的骨架渗流流动，随着温度的降低，合金熔体逐渐凝固，补缩通道的孔径逐渐变小。为了物理模拟补缩通道孔径变小的情况，选取孔眼分别为 175、160、150、135 μm 的多孔介质，在同一旋转速度下，得出了补缩时间 3 s 时渗流流体体积随孔眼的变化规律(如图 6 所示)。由图中可以看出，渗流流体体积随着孔眼数的增加而减小；同一旋转速度下，孔眼数之间补缩渗流流体体积之差基本不变。由文献[13]可知，这是由于孔眼数越大，孔隙直径越小，渗透率越小，使得模拟流体的渗流量减小，渗流体积也相应减小，但是孔眼数之间渗流流体体积的差值相差不大。在旋转速度相同和孔眼数之差相等时，随着旋转速度的增加，渗流流体体积之差相应增大，这与流体粘度时的解释一致，也可以由文献[13]的理论给予解释。

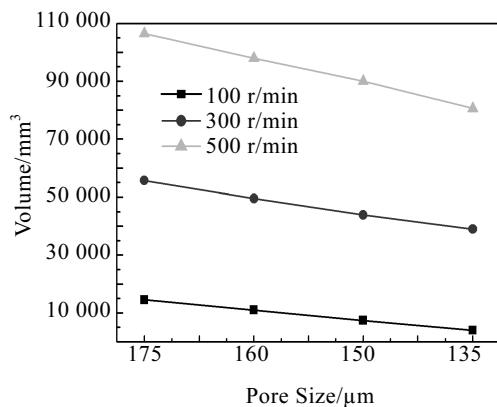


图 6 补缩时间 3 s 时渗流流体体积随孔眼的变化关系

Fig.6 Change curves of the infiltration volume with pore size ber at feeding time 3 s

2.5 铸件设置位置对补缩渗流流动的影响

计算了补缩时间为 3 s 时，图 1 中浇道左侧铸型(部位 a)和右侧铸型(部位 c)处的渗流流体体积，根据计算结果给出了部位 a 和部位 c 在补缩过程中，不同浇

道位置下渗流流体体积值如表 3 所示，表中 L 表示浇道左侧，R 表示浇道右侧。由表 3 可以看出，R 在旋转速度 100 r/min 时渗流体积为零，部位 a 处的渗流流体体积大于部位 c 处的渗流流体体积，部位 a 与 c 处补缩渗流流体体积之差随着旋转速度的增加而增大，但此差值占补缩渗流总体积的百分比相应减小。这是由于铸型顺时针旋转时，在科氏力的作用下，流入部位 a 处的补缩渗流流体体积较多，旋转速度增加的同时，总渗流流体体积增大，使左右部位渗流流体体积之差也相应增大；同时由于旋转速度越大，惯性力的作用也越大，流体进入到部位 c 处的量增加幅度显著增大，因此左右部位渗流流体体积之差在总流体体积中所占的比例逐渐减小。故此当铸型顺时针旋转时，钛合金铸型应设置在浇道的左侧，这样易于得到致密的铸件，反之亦然。

2.6 补缩渗流流动与大断面充型流动的对比如

研究了孔眼为 135 μm，补缩时间为 3 s 时，补缩渗流流体体积和大断面充型流动流体体积值(如表 4 所示)。从表中可以看出，补缩渗流流动的体积远远小于大断面充型流动的体积，300 与 100 r/min 之间的渗流流体体积差值与充型流体体积差值基本相等。这是因为补缩渗流流体流动时，直接摩擦引起的压力损耗和无规则的间隙因收缩、扩大和转弯等引起的局部压力损耗的综合作用所致；此外由于充型流动对横截面面积的敏感性<sup>[12]</sup>，以及充型流动流体体积远大于补缩渗流流体体积。因此，300 与 100 r/min 时的渗流流体体积之差与充型流体体积之差相差不大。

表 3 孔眼为 135 μm 补缩时间 3 s 时不同旋转速度下浇道位置及渗流流体体积值

Table 3 Relationship between the infiltration volume and position of running channel at 135 μm and feeding time 3 s

Position	Rotation speed/ r·min <sup>-1</sup>	Volume/mm <sup>3</sup>
L	100	4 000
	300	25 000
	500	46 100
R	100	0
	300	14 000
	500	34 500

表 4 补缩渗流流动与充型流动值

Table 4 Relationship between feeding infiltration and filling flow

Type	Rotation speed/r·min <sup>-1</sup>	Volume/mm <sup>3</sup>
Infiltration	100	4 000
	300	39 000
Filling	100	123 100
	300	158 000

### 3 结 论

1) 随着补缩时间、旋转速度的增加, 补缩过程中渗流流体的体积逐渐增大; 当模拟流体粘度以及模拟枝晶的多孔介质孔眼增大时, 补缩过程中渗流流体的体积也相应增加; 随着旋转速度的增加, 相同旋转速度不同粘度渗流流体体积之差和流量之差均增大。

2) 当离心转盘顺时针旋转时, 浇道左侧铸型的补缩渗流流体体积大于浇道右侧铸型的补缩渗流流体体积; 随着旋转速度的增加, 浇道左侧与右侧补缩渗流流体体积之差增大, 但此差值占补缩渗流总体积的百分比却逐渐减小; 因此为了得到致密的钛合金铸件, 当转盘顺时针旋转时应将铸型放在浇道左侧, 反之亦然。

3) 在相同时间内, 补缩过程中渗流流动的流体体积小于大断面充型流动的流体体积。

#### 参考文献 References

- [1] Suzuki Ken-ichiro *et al.* *Materials Transactions, JIM*[J], 1996, 37(12): 1793
- [2] Lee H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 420: 72
- [3] Liu K *et al.* *Intermetallics*[J], 2005, 13(9): 925
- [4] Liu Aihui(刘爱辉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(11): 1975
- [5] Boyer R R. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 213: 103
- [6] Mesquita R A *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007(452~453): 161
- [7] Halvae A *et al.* *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001, 118(1~3): 123
- [8] Wu Shiping *et al.* *Materials Science and Engineering A* [J], 2006, 426: 240
- [9] Watanabe K *et al.* *Biomaterials*[J], 2003, 24(10): 1737
- [10] Wu Shiping(吴士平) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 612
- [11] Liang Zuojian(梁作俭) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(3): 164
- [12] 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: 48
- [13] Sui Yanwei(隋艳伟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(4): 594
- [14] Yuan Fang(袁芳). *Study on Mold Filing and Defect of Casting of Titanium Alloys under Centrifugal Force Field*(离心力场下钛合金充型流动及铸造缺陷的研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 20
- [15] Wu Shiping(吴士平) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2006, 16(9): 1517

## Physical Simulation of Infiltration Flow during Centrifugal Casting Titanium Alloy Melts Feeding

Sui Yanwei<sup>1,2</sup>, Li Bangsheng<sup>2</sup>, Liu Aihui<sup>3</sup>, Guo Jingjie<sup>2</sup>, Fu Hengzhi<sup>2</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

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

(3. Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

**Abstract:** By means of similar physical simulation method, the variation of infiltration volume is thoroughly studied during titanium alloy melt feeding in centrifugal field, and compared with the big cross-section filling process. The results show that the infiltration volume in feeding process increases with increasing the feeding time and velocity or decreasing the fluid viscosity and eyelet number of porous medium. When the mould rotates clockwise, the left part relative to the right part in running channel starts feeding and infiltration firstly. The infiltration volume decreases against the big cross-section macro-filling flow in the same time.

**Key words:** centrifugal casting; titanium alloy; feeding; physical simulation

Biography: Sui Yanwei, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P. R. China, Tel: 0086-516-83591876, E-mail: suiyanwei@tom.com