

文章编号:1671-6833(2009)01-0061-04

钛合金离心铸造缩孔缺陷物理模拟研究

隋艳伟¹, 刘爱辉², 李邦盛¹, 郭景杰¹, 傅恒志¹

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 淮阴工学院 机械工程系, 江苏 淮安 223003)

摘要: 为了深入研究钛合金离心铸造缩孔缺陷, 采用微晶蜡作为物理模拟介质, 按照相似准则, 模拟了离心力场下钛合金凝固过程中缩孔缺陷, 研究了旋转速度和离心保持时间对离心铸造缩孔缺陷的影响规律。实验结果表明: 随着旋转速度的增加, 微晶蜡凝固件冒口处缩孔缺陷体积增大; 与离心保持时间 900 s 时相比, 保持时间 30 s 时冒口处的缩孔缺陷体积相应减小, 冒口补缩效果减弱。同时实际浇注了钛合金铸件, 试验结果和物理模拟结果相吻合, 验证了物理模拟试验结果的正确性。

关键词: 钛合金; 离心铸造; 缩孔; 物理模拟

中图分类号: TG 249.4 **文献标识码:** A

0 引言

钛合金不仅具有低密度, 高的比强度和比模量, 而且还有高抗氧化和抗蠕变能力, 因而广泛应用于航空、航天、舰船等各个领域^[1-2]。由于钛合金充型能力差、熔点高, 所以对于大型复杂薄壁钛合金铸件, 通常采用精密铸造结合离心浇注技术生产的^[3-7]。

钛合金铸件中易于出现缩孔缺陷, 由于缩孔缺陷的存在, 铸件的应用受到限制, 因此离心铸造钛合金缩孔缺陷的研究至关重要。目前对于钛合金铸件缩孔缺陷进行了相应研究^[8-10], 然而这些研究主要集中在实验研究和数值模拟上, 缩孔缺陷物理模拟研究还未见报道, 同时物理模拟技术可以节省大量人力、物力, 缩短产品的生产周期。作者采用微晶蜡, 物理模拟研究了钛合金离心铸造缩孔缺陷演化规律, 并进行了实验验证, 为扩大铸件应用领域奠定了基础。

1 实验方法

笔者所模拟的合金为钛合金, 微晶蜡熔化时的温度可以通过下面的相似准则公式计算得到

$$\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{\Delta T_2}{T_2} \quad (1)$$

式中: ΔT_1 为微晶蜡熔化时的过热度; T_1 为微晶

蜡的熔化温度; ΔT_2 为钛合金熔化时的过热度; T_2 为钛合金的熔化温度。

钛合金的熔化温度选取 1 640 °C, 钛合金熔化时的温度为 1 710 °C, 微晶蜡的熔化温度为 70 °C, 由公式(1)计算得到了微晶蜡熔化时的温度为 73 °C。

把微晶蜡放入石墨坩埚内, 采用电阻炉进行熔化, 当温度达到 73 °C 时, 保温 5 min 后进行浇注, 浇注到有机玻璃铸型中, 有机玻璃铸型如图 1 所示。在离心转盘旋转稳定后, 开始浇注, 旋转方向为顺时针, 实验方案列于表 1 中。离心力场保持时间从开始浇注时记录, 待微晶蜡自然冷却后, 对图 1 中的 1、2 和 3 处所得凝固件进行剖分, 采用液滴法量取缩孔体积。

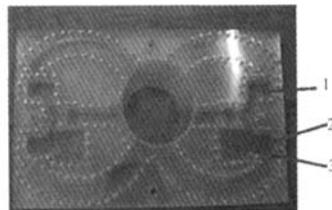


图 1 物理模拟实验所用透明铸型

Fig. 1 Transparency mould used in this study

2 实验结果及分析

图 2 是缩孔凝固件的宏观照片, 图 2(b) 中 1

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(50434030)

作者简介: 隋艳伟(1981-), 男, 辽宁阜新, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要从事钛合金研究, E-mail: suiyanwei@

tom.com

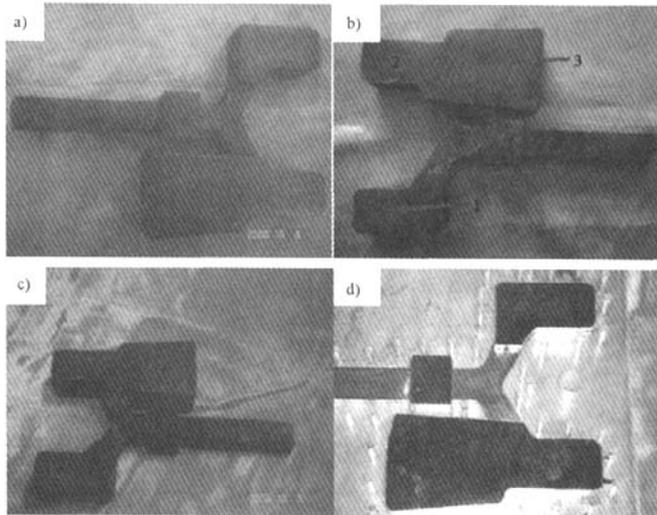
代表无冒口的缩孔试样,2代表有冒口的缩孔试样,3代表补缩冒口。

表1 微晶蜡物理模拟缩孔缺陷实验方案
Tab.1 Testing scheme for physical simulation shrinkage defects with microcrystalline wax

实验次数	旋转速度 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	离心旋转保持 时间/s
1	0	900
2	100	900
3	200	30
4	200	900

把缩孔凝固件中1、2和3处进行剖分,如图3所示,从图中看出离心力场下的凝固件,没有冒

口的缩孔凝固件1处没有缩孔缺陷,有冒口的缩孔凝固件2处也没有缩孔缺陷,缩孔出现在冒口3处;重力场条件下没有出现缩孔缺陷.这是因为微晶蜡的收缩较小以及补缩性能较好的缘故,没有冒口时浇道对缩孔凝固件1处进行补缩,没有产生缩孔缺陷,对于有冒口的缩孔凝固件2处,当位置2和冒口处都充满液态微晶蜡后,冒口和浇道中的液态微晶蜡对凝固件位置2处进行补缩,没有产生缩孔缺陷,同时由于在离心力场下冒口对凝固件2处的补缩作用增强,使冒口处产生了缩孔缺陷;在重力场下,冒口对凝固件位置2处的补缩作用相对于离心力场时小,冒口处没有出现因液体收缩产生的缩孔缺陷。



a) $0 r \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s; b) $100 r \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s;
c) $200 r \cdot \text{min}^{-1}$, 30 s; d) $200 r \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s

图2 实验获得的凝固件宏观图

Fig.2 Macrographs of microcrystalline wax castings

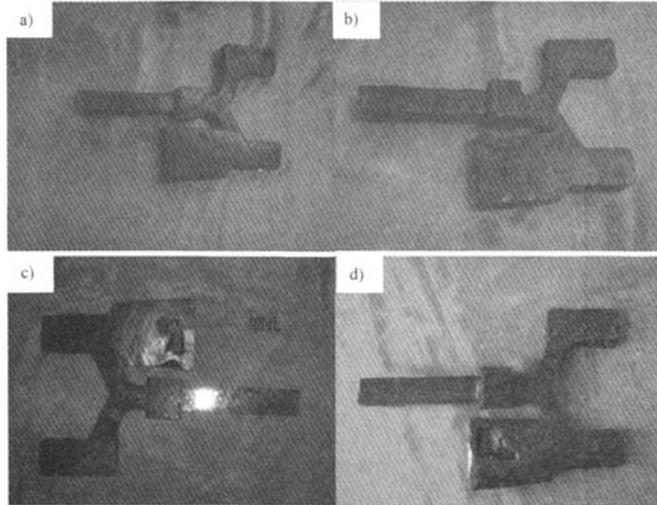
微晶蜡凝固件整个缩孔的体积数据列于表2中,从表中可以看出,随着旋转速度的增加,产生的缩孔缺陷体积增大.转速增加时,液态微晶蜡通过枝晶之间对试样补缩增大,使冒口处的缩孔缺陷体积增大。

对比离心力场保持时间的影响,可以看出离心力场保持时间900 s相对于保持时间30 s时,产生的缩孔缺陷体积要大,由实验计算可以知道离心力场保持时间为900 s时,本试验中的微晶蜡已经完全凝固,离心力场保持时间30 s时,微晶蜡还未完全凝固,如果此时离心转盘停止转动,离心作用效果消失,冒口对凝固件2处的补缩效果减弱,出现了离心力场保持时间30 s相对于

900 s时产生的冒口处缩孔缺陷较小的结果,但显微缩松增多^[8].由图2(a)看出,虽然重力场下没有缩孔缺陷产生,但是缩孔凝固件表面出现了凹陷,这是由于液体充填和收缩造成重力场下成形不佳的缘故。

表2 实验所得微晶蜡凝固件整个缩孔体积
Tab.2 The volume of shrinkage cavity for microcrystalline wax castings

旋转速度/ $(r \cdot \text{min}^{-1})$	保持时间/s	缩孔体积/mL
0	900	0
100	900	3.0
200	30	4.0
200	900	6.0



(a) $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s; (b) $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s;
(c) $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 30 s; (d) $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 900 s

图3 实验所得缩孔凝固件剖分图

Fig.3 Cross-section macrographs of microcrystalline wax castings with shrinkage cavity

3 实验验证

对于钛合金 TC4 进行实验,采用水冷铜坩埚真空感应熔炼技术,熔炼在 0.1 Pa 的真空度下进行,功率为 350 kW ,浇注到预热温度大约为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 T5 石墨铸型中.在离心转盘顺时针旋转稳定后,开始浇注.高温合金熔体对型腔进行充填,离心旋转速度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,离心力场保持时间从开始浇注时记录,保持时间分别为 90 s 和 900 s .图 4 中给出了离心力场保持时间为 900 s 时得到的缩孔铸件剖面图,从图中可以看出在铸件的 3 个部位都产生了缩孔缺陷.

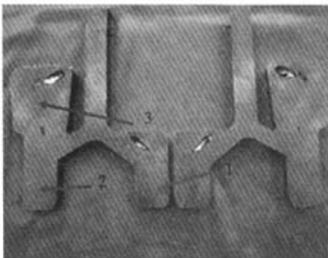


图4 离心铸造钛合金缩孔铸件剖分图
(离心力场保持时间 900 s)

Fig.4 Cross-section macrographs of centrifugal casting titanium alloy for 900 s in the centrifugal field

采用量取微晶蜡凝固件整个缩孔体积的方法,量取了离心力场保持时间分别为 90 s 以及

900 s 时合金件的整个缩孔体积,列于表 3 中,从表中可以看出,无论保持时间长短,有冒口补缩作用下得到的铸件位置 2 处缩孔体积相对于无冒口得到的铸件位置 1 处缩孔体积要小,这是由于冒口模数大于铸件处的模数,冒口处的合金熔体晚于铸件位置 2 处凝固,这样未凝固的合金熔体通过枝晶间对铸件进行补缩渗流造成;对比离心力场保持时间形成的缩孔体积,可以看出保持时间 90 s 相对于保持时间 900 s ,冒口处的缩孔体积、有冒口铸件位置 2 处缩孔体积以及无冒口铸件位置 1 处缩孔体积要小.由计算可以知道离心力场保持时间为 900 s 时,本试验中的合金已经完全凝固,离心力场保持时间 90 s 时,合金还未完全凝固,如果此时离心转盘停止转动,离心作用效果消失,冒口处的集中缩孔体积减小;对比有补缩冒口的铸件位置 2 以及无冒口补缩的铸件位置 1 处,保持时间 90 s 时,离心转盘停止旋转,离心效果消失,此时未凝固的合金熔体在重力场下凝固,根据文献[8]可知此时集中缩孔体积减小,显微缩松增多,故此出现了保持时间 90 s 时,有补缩冒口的铸件位置 2 以及无冒口试样位置 1 处缩孔体积较小的现象.

文献[8]指出随着旋转速度的增加钛合金铸件缩孔体积逐渐减小;在重力场下钛合金无法完全成形,在铸件外部形成很大的凹陷,这与微晶蜡重力场是具有相同之处.上面对钛合金离心铸造

缩孔形成规律的研究与采用微晶蜡物理模拟缩孔缺陷得出的结论相吻合,这很好地说明了缩孔物理模拟试验结果的正确性。

表3 钛合金铸件所有缩孔体积数据表

Tab.3 Volume of shrinkage cavity in centrifugal-cast titanium alloys

保持时间 /s	冒口处缩孔体积		无冒口铸件处缩孔体积
	/mL	/mL	/mL
90	1.3	无	0.26
900	1.42	0.007	0.45

4 结论

用微晶蜡物理模拟钛合金缩孔缺陷时,在冒口处产生了缩孔缺陷;随着旋转速度的增加,缩孔缺陷体积逐渐增大;旋转时间30 s相对于900 s而言,缩孔体积减小,补缩减弱。实际浇注的钛合金铸件试验结果与物理模拟结果相一致,证明了物理模拟试验结果的正确性。

参考文献:

- [1] TAN F X, LI M Z, CAI Z Y. Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188(12): 453-457.
- [2] ZHANG P Z, XU Z, ZHANG G H, et al. Surface plasma chromized burn-resistant titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(9-

- 11): 4884-4887.
- [3] SUI Y W, LI B S, LIU A H, et al. Microstructures and hardness of Ti-6Al-4V alloy staging castings under centrifugal field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(2): 291-296.
- [4] WU S P, LIU D R, GUO J J, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in vertical centrifugal casting[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 426: 240-249.
- [5] 吴士平,郭景杰,苏彦庆,等. TiAl基金排气阀离心铸造充型过程数值模拟的试验验证[J]. 铸造, 2001, 50(9): 560-563.
- [6] SUZUKI K, NISHIKAWA K, WATAKABE S. Mold filling and solidification during centrifugal precision casting of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Transactions, JIM, 1996, 37(12): 1793-1801.
- [7] 贾丽敏. 钛合金离心精密铸造凝固组织与力学性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院学位论文, 2006.
- [8] 历长云. 钛合金立式离心铸造充填及凝固过程研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院学位论文, 2007.
- [9] 梁作俭,许庆彦,李俊涛,等. γ -TiAl增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 164-169.
- [10] WU M, DLICH-STUBENRAUCH J R S, AUGTHUN M. Computer aided prediction and control of shrinkage porosity in titanium dental casting[J]. Dent Mater, 1998, 14(5): 321-328.

Physical Simulation of Shrinkage Cavity in Centrifugal-cast Titanium Alloys

SUI Yan-wei¹, LIU Ai-hui², LI Bang-sheng¹, GUO Jing-jie¹, FU Heng-zhi¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Huai'yin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: In order to investigate the shrinkage cavity of titanium alloy castings in centrifugal field, the effects of rotation speed and centrifugal holding time on the shrinkage cavity are studied. The results show that with the increase of the rotation speed, the volume of shrinkage cavity of microcrystalline wax castings when riser increases. As the centrifugal holding time decreases from 900s to 30s, the volume of shrinkage cavity greatly decreases, and the feeding effect of the riser decreases. Physical simulation of shrinkage cavity correlates well with experimental observations under the centrifugal conditions.

Key words: titanium alloy; centrifugal casting; shrinkage cavity; physical simulation