

# TiAl 基合金熔体离心铸造过程中溢出临界值分析

Analysis of Overflow Critical Value for TiAl Base Alloy

Melt during Centrifugal Casting Process

盛文斌, 杨 锐, 刘羽寅, 徐东生, 李 东 (中科院金属研究所钛合金研究室, 沈阳 110016)

SHENG Wen-bin, YANG Rui, LIU Yu-yin, XU Dong-sheng, LI Dong

(Titanium Alloy Laboratory, Institute of Metal Research,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**摘要:** 采用理论分析和实验验证相结合的方法, 分析了金属型离心浇注 TiAl 合金排气阀过程中中心浇道内压力分布情形, 得出了离心浇注过程中产生的附加压力项  $P$  的表达式以及最大转动角速度  $\omega_{\max}$  (r/min) 与金属液高度  $H$  和中心浇道直径  $D_0$  之间的关系。实验结果表明, 离心浇注过程中, 作用在型腔上的压力由静态压力和附加压力两部分组成, 静态压力由金属液高度决定, 而附加压力主要由金属液密度以及旋转角速度来决定。中心浇道高度和直径之间应满足一定的函数关系, 金属液高度为中心浇道高度的一半时较为理想。最大允许旋转角速度值随金属液高度和中心浇道直径的增大而减小。

**关键词:** 感应凝壳熔炼; TiAl 基合金; 压力分布; 离心铸造

中图分类号: TG249.3; TG146.2+3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 11-0009-04

**Abstract:** The method combining theoretical analysis with experimental verification was adopted, and pressure distribution of TiAl based alloy poured in permanent mould during the process of centrifugal casting was analyzed. The expression of extra pressure item and the relations between maximum angular velocity  $\omega_{\max}$  (r/min) and melt high  $H$ , pouring basin diameter  $D_0$  were concluded. It provided theoretical guiding for actual casting process. Experimental results show that the pressure acting on cavity consisted of static pressure and extra pressure during the process of centrifugal casting. The static pressure was determined by melt height, while the extra pressure was controlled by metal liquid density and rotating angular velocity. Pouring basin height and diameter should follow certain functional relation, and it was ideal when metal liquid was as high as half of pouring basin height. Also, it showed that the value of maximum angular velocity increased with the increasing of metal liquid height and pouring basin diameter.

**Key words:** induction solidified melt; TiAl based alloy; pressure distribution; centrifugal casting

TiAl 有序合金具有高的比强度和比模量, 而且该合金在高温时依然可维持足够高的比强度和比模量, 并具有良好的抗蠕变、抗氧化和抗氢脆能力<sup>[1-5]</sup>, 是一种最具潜力的轻型高温结构材料, 受到了人们的普遍关注。从 20 世纪 80 年代初, 国际上出现该类合金研究和开发的热潮, 其特征是作为结构材料的金属间化合物的迅速崛起和作为功能材料的金属间化合物的广泛应用。

从 TiAl 合金的成型方面来看, 国外研究者作了一些尝试。F. H. Froes<sup>[6]</sup>等人就 TiAl 合金的性能、应用和成型方面进行了系统的阐述, 总结了目前应用于 TiAl 合金的各种成型方法, 如粉末冶金 (PM) 和快速凝固 (RS) 等。P. E. Jones<sup>[7]</sup>等人在金属型中浇注了 Ti-47Al-2Cr-2Nb (at %) 合金汽车排气阀, 并对静态

浇注、压铸、喷射和离心浇注进行了实验比较。认为, 综合来看, 金属型离心铸造最有可能成为将来批量生产 TiAl 合金铸件的成型方法。

在国内, 中南大学在粉末冶金方面作了大量工作<sup>[8,9]</sup>。

TiAl 合金熔炼过程中, 由于离心转速选择不当, 可能产生 TiAl 基合金液从中心浇道中溢出及铸型型腔内 TiAl 基合金液静压力的丧失等问题。金属液的溢出不仅造成原材料的浪费, 还会损坏真空系统, 降低设备的使用寿命。型腔内 TiAl 基合金液静压力的丧失将对凝固组织产生不良影响, 导致缺陷的产生。本文利用从德国引进的大型水冷铜坩埚真空感应炉, 针对离心过程中的金属型铸造, 对其成型过程中的压

力分布进行了分析。

## 1 过程分析

本文采用感应凝壳熔炼 (ISM) 方法, 在金属型中离心浇注了 Ti-48Al-2Cr-2Nb (at%) 合金, 浇注过程中的真空度为 1.08MPa。离心浇注过程中, 转台及合金液沿中心轴以角速度  $\omega$  (rad/s) 进行旋转。简化浇注系统浇道形状为圆柱体, 高度和直径分别为  $H$  和  $D_0$ , 铸件采用侧注方式, 如图 1 所示。旋转开始时, TiAl 合金液借离心惯性力向外运动, 但很快金属就会成为一个整体随铸型一起旋转形成金属液对铸型的相对平衡。

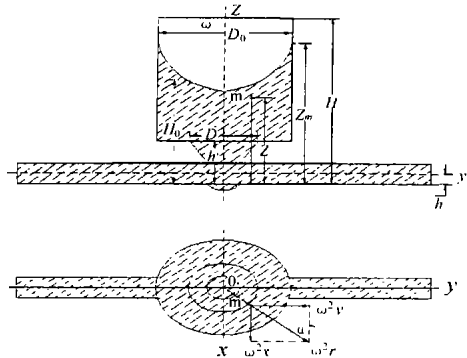


图 1 压力分析示意图

Fig. 1 The schematic diagram of pressure analyzing

假设 TiAl 合金离心铸造过程中, 液态时完全充满铸型, 则静态流体中的压力分布规律可用欧拉平衡微分方程<sup>[10]</sup>式 (1) 来描述:

$$dP = \rho(Xdx + Ydy + ZdZ) \quad (1)$$

式中  $X, Y, Z$  分别为单位质量的质量力在  $x, y, z$  坐标轴上的投影, 也可看作  $x, y, z$  三个方向上重力加速度  $g$  的投影。流体中存在着压力相等的点所组成的等压面, 在等压情况下,  $P$  为常数, 故  $dP = 0$ 。流体密度  $\rho$  不等于零, 于是可得出等压面微分方程式 (2):

$$Xdx + Ydy + ZdZ = 0 \quad (2)$$

在金属液内选取质点  $m$  对其进行受力分析可知, 质点  $m$  除受重力外, 还要加上一个离心惯性力, 其大小等于质点质量  $m$  与向心加速度的乘积, 方向与向心加速度相反。作用在单位质量金属液上的各分力为:

$$X = \omega^2 r \cos \theta = \omega^2 x$$

$$Y = \omega^2 r \sin \theta = \omega^2 y$$

$$Z = -g$$

式中:  $r$  - 质点  $m$  到旋转轴的距离, 即质点所在半径;  $x, y$  -  $r$  在坐标轴上的投影。

将上述各分力代入到式 (2) 中, 可得等压面方程:

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy + \omega^2 z dz = 0$$

$$\text{积分后, 得 } \frac{\omega^2 r^2}{2} - gz = C_1$$

可见, 等压面是一簇围绕  $z$  轴的旋转抛物面。在金属液不外溢情况下, 等压面簇中自由表面与底面所围成的封闭区域体积与金属液静态时的体积相等, 即

$$\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 H_0 = \int_0^{D_0/2} \int_0^H r \left( \frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{C_1}{g} \right) dr dz$$

解得  $C_1 = \frac{\omega^2 D_0^2}{16} - H_0 g$ , 则自由表面方程为

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{D_0^2}{16g} + H_0 \quad (3)$$

当  $r = 0$  时, 自由表面最低点在坐标系中的坐标  $z = H_0 - \frac{\omega^2 D_0^2}{16g}$ 。

将各分力代入到式 (1) 中, 得

$$dP = \rho(\omega^2 X dx + \omega^2 Y dy - g dz)$$

积分后

$$P = \rho \left( \frac{\omega^2 r^2}{2} - gz \right) + C_2 \quad (4)$$

根据边界条件  $r = 0, z = H_0 - \frac{\omega^2 D_0^2}{16g}$  时,  $P = P_0$  ( $P_0$  为外界压强), 代入上式, 得

$$P_0 = \rho \left[ -g \left( H_0 - \frac{\omega^2 D_0^2}{16g} \right) \right] + C_2$$

解得  $C_2 = P_0 + \rho g H_0 - \frac{\omega^2 D_0^2}{16}$ , 代入到式 (4), 得

$$P = \frac{\omega^2 r^2}{2} - gz + P_0 + \rho g H_0 - \frac{\omega^2 D_0^2}{16} \quad (5)$$

式 (5) 即为等角速度旋转系统的浇道内金属的压强分布公式。从理论上讲  $r = D_0/2, z = 0$  时,  $\omega$  越大, 在铸件处产生的压强值就越大。但受浇道高度  $H$  的限制, 若自由表面方程中  $r = D_0/2$  时,  $z > H$ , 金属液将从浇道中甩出, 造成材料的浪费。在金属液与铸型界面处,  $z$  取得最大值  $z_m$ , 由式 (3) 得

$$z_m = \frac{\omega^2 D_0^2}{16g} + H_0 \quad (6)$$

可见, 在铸型尺寸确定情况下,  $z_m$  只与  $\omega$  有关。根据极值条件  $r = D_0/2$  时,  $z_m = H$ , 且  $r = 0$  时,  $z = 0$ , 可得金属液高度和浇道直径与浇道高度之间的关系式  $H_0 = \frac{H}{2}$  和  $\frac{H}{D_0^2} = \frac{\omega^2}{8g}$ 。

为保证金属液不溢出,  $z_m \leq H$ , 即

$$\frac{\omega^2 D_0^2}{16g} + H_0 \leq H$$

于是, 可得出为防止金属液溢出而应采取的最大角速度 (即  $z_m = H$ )  $\omega_{\max}$  为

$$\omega_{\max} = \frac{4}{D_0} \sqrt{H - H_0} \quad (7)$$

可知, 最大允许转速  $\omega_{\max}$  与浇道顶部和静态时金

属液面高度差  $(H - H_0)$  的平方根成正比, 而与底部直径  $D_0$  成反比。

考虑到实际浇注过程中铸件的位置, 旋转角速度为  $\omega$ , 金属液/铸型界面处液面高度为  $z_m$  时, 作用在铸件中心轴线处 ( $r = D_0/2$ , 距液面深度为  $z = h$ ,  $h$  为铸件中心线到浇道底部的距离) 的压强  $P_m$  为

$$P_m = \frac{\rho \omega^2 D_0^2}{16} + \rho g (H_0 - h) + P_0 \quad (8)$$

可见,  $P_m$  与  $z_m$  相似, 在铸型尺寸确定的情况下, 也只与旋转角速度  $\omega$  有关。当  $z_m = H$ , 即  $\omega = \omega_{\max}$  时,  $P_m$  取得最大值  $P_{\max}$

$$P_{\max} = \rho g (H - h) + P_0$$

与静态浇注相比, 离心浇注情况下在侧壁处所产生的压强  $P_m$  与静态浇注时的压强  $P_s$  之间存在压强差  $P$ ,  $P_s$  由浇道内液态金属与铸件中心轴线之间的高度差来决定, 即

$$P_s = \rho g (H_0 - h) + P_0$$

于是, 可求得压强差  $P$  为

$$P = P_m - P_s = \frac{\rho \omega^2 D_0^2}{16} \quad (9)$$

可以看出, 离心条件下在侧壁所产生的压强  $P_m$  由两部分组成, 一是静态条件下的静压强  $P_s$ , 一是由于离心而产生的附加压强项  $P$ 。

## 2 结果与讨论

由上述推导结果可知, TiAl 合金离心浇注过程中, 金属液表面呈抛物面形状。图 2 所示为  $H =$

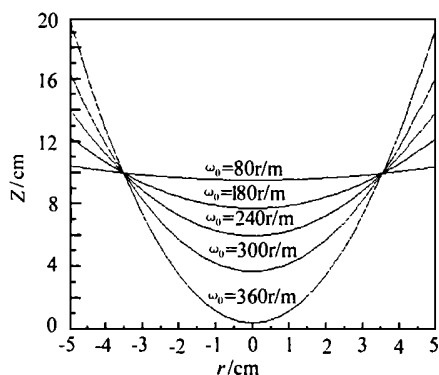


图 2 不同转速下的自由表面截面

Fig. 2 Cross-section of free-surfaces under different rotating speeds

20cm,  $H_0 = 10\text{cm}$  和  $D_0 = 10\text{cm}$  条件下, 转台以不同的角速度旋转时合金熔体自由表面的形状。转台以某一角速度旋转时, 在离心力的作用下, 增大了金属液作用在内壁上的压力, 使金属液在更大的压力作用下填充到铸件内腔中。浇道内壁处的金属液向上移动,

而中心处的金属液补充到内壁。角速度增大时, 这种现象变得尤为明显。随着转动角速度的提高, 金属/铸型截面处的金属液高度也明显升高, 作用在铸件上的静压力将随金属液高度的升高而增大, 增加量与角速度之间亦符合抛物线规律, 角速度足够大时, 金属液可从浇道中溢出, 浇道底部也可能显露出来。

实际浇注过程中, 限制旋转角速度的因素主要是浇道高度  $H$  和浇道直径  $D_0$ , 以及金属液面高度  $H_0$ 。在上述条件确定的情况下, 自由表面形状由旋转角速度决定。ISM 方法熔炼 TiAl 合金时, 浇注室内真空度约 1.08Pa, 因此可略去不计。可以看出, 在同一高度上, 压强分布以轴线为中心, 向浇道壁两侧呈抛物线规律递增。随着旋转角速度的提高, 中心轴线处首先出现压强值等于外界压强的区域, 且该区域随旋转角速度的提高而增大。

浇注时, 浇注系统尺寸与金属液用量的正确搭配是十分重要的。合理的工艺设计, 不仅可使铸件在离心过程中获得最大的有效压力, 还可以避免材料的浪费。离心转台转动前, 浇入的金属液高度为其静态高度  $H_0$ , 随着旋转角速度的提高, 内壁处金属液高度  $z_m$  呈抛物线规律递增, 从  $H_0$  逐渐变至浇道高度  $H$ 。相应地, 金属液作用在侧壁处铸件上压强  $P_m$  的值也相应地由从静态压强增至其最大值。此时, 离心浇注所具有的压强与静态压强之差  $P$  也呈抛物线规律递增, 且与  $P_m$  平行, 三者关系如图 3 所示。

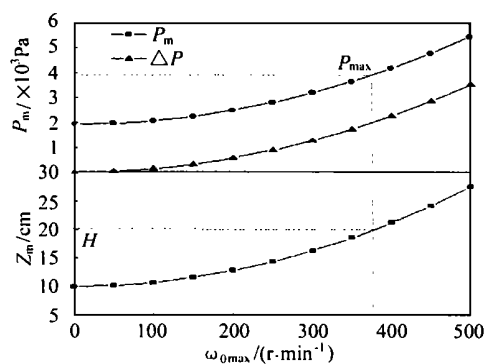


图 3  $\omega_{\max}$  与  $Z_m$ ,  $P_m$  之间的关系

Fig. 3 Relations between  $\omega_{\max}$  and  $Z_m$ , as well as  $P_m$

图中所示条件 ( $H = 20\text{cm}$ ,  $H_0 = 10\text{cm}$  和  $D_0 = 10\text{cm}$ ) 的  $\omega_{\max}$  和  $P_{\max}$  值分别约为 375r/min 和  $7 \times 10^{-3}\text{Pa}$ , 与实验结果基本吻合。可以根据图中所示关系来求取系统所允许的最大旋转角速度  $\omega_{\max}$  及此时所产生的最大压强  $P_{\max}$ 。图中虚线所示, 曲线  $z_m$  与中间坐标轴的交点即为浇道高度  $H$ , 由此点引出的平行于纵轴的直线与横轴交点即为最大允许旋转角速度  $\omega_{\max}$ , 与曲线  $P_m$  的交点对应的纵轴坐标即最大

旋转角速度时所产生的最大侧壁压强  $P_{\max}$ 。

在合金成形过程中, 浇道尺寸的合理与否, 转台转动角速度大小, 对于最大压强值的获得及避免金属液的浪费有很大影响。图 4 所示分别为浇道高度  $H = 20\text{cm}$  时, 转台的最大允许转动角速度  $\omega_{\max}$  与金属液面高度  $H_0$  和浇道直径  $D_0$  之间的关系曲线。当金属液面高度不变时, 随着浇道直径的增大, 所允许的最大旋转角速度减小; 而当浇道直径一定时, 随着金属液面高度的增大, 最大旋转角速度也减小。

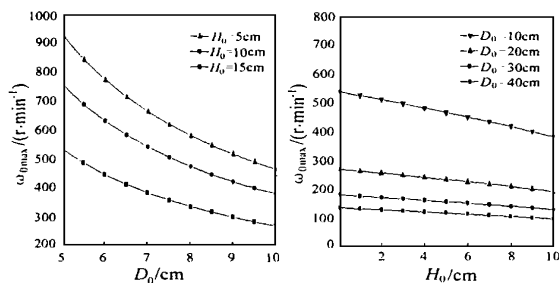


图 4 最大旋转角速度  $\omega_{\max}$  与冒口直径  $D_0$ , 熔体高度  $H_0$  之间的关系,  $H = 20\text{cm}$

Fig. 4 Relation between maximum rotating speed  $\omega_{\max}$  and basin diameter  $D_0$ , as well as melt height  $H_0$

### 3 结论

(1) TiAl 合金离心浇注过程中的所产生的压强由两部分组成, 一是金属液静态压强  $P_s$ , 二是由于离心力作用而产生的附加压强  $P$ 。

(2) 离心浇注过程中, 应满足条件:  $\frac{2}{14400g} \frac{D_0^2}{H_0} + \frac{H - H_0}{D_0}$ ; 转台的最大旋转角速度为  $\omega_{\max} = \frac{4}{D_0} \frac{H - H_0}{H_0}$ 。

(3) 浇道直径增大或金属液面高度增大时, 转台的最大旋转角速度均减小。

#### 参考文献

- [1] D M Dimiduk, D B Miracle, and C H Ward. Development of Intermetallic Materials for Aerospace Systems [J]. Materials Science and Technology. 1992, 8 (3): 367—375.
- [2] F H Froes. Structure Intermetallics [J]. JOM. 1989, 41 (9): 6—7.
- [3] C T Liu, H Inouye. Control of Ordered Structure and Ductility of (Fe, Co, Ni) 3 Alloys [J]. Metal Trans A, 1979, 10A (10): 1515—1525.
- [4] Y W Kim. Intermetallic Alloys Based on Gamma Titanium Aluminides [J]. JOM. 1989, 41 (7): 24—30.
- [5] V R Parameswaran. High-Temperature Aluminides and Inter-

metallics [J]. JOM. 1992, 44 (6): 41—43.

- [6] F H Froes, C Suryanarayana, D Eliezer. Synthesis, properties and applications of titanium aluminides [J]. Journal of Materials Science. 1992, 27: 5113—5140.
- [7] P E Jones, W J Porter III, D Eylon, and G Colvin. Development of a Low Cost Permanent Mold Casting Process for TiAl Automotive Valves [J]. Gamma Titanium Aluminides. 1995, 53—62.
- [8] 贺跃辉, 黄伯云等. Sb 对改善 TiAl 基合金高温抗氧化性的影响 [J]. 材料科学与工艺. 1995, 3 (1): 10—13.
- [9] 曲选辉, 黄伯云, 吕海波等. TiAl 有序合金研究综述 [J]. 稀有金属材料与工程. 1991, 20 (4): 3—14.
- [10] 陈卓如. 工程流体力学 [M]. 高等教育出版社, 1992.

收稿日期: 2000-10-08; 修订日期: 2001-04-18

作者简介: 盛文斌 (1973—), 男, 博士, 主要从事钛合金成型方面的研究, 联系地址: 沈阳市沈河区文化路 72 号金属所 10 室 (110015)。

\* \* \* \* \*

(上接第 5 页)

### 3 结论

在金属熔体凝固过程中, 旋转电磁力引起的动量对流对促进金属熔体补缩的作用不大; 但旋转电磁力改变了熔体的温度分布, 使心部熔体的温度分布更为均匀。在凝固末期, 熔体更趋一致且在短时间内熔体的固相率增至特征固相分数, 且凝固组织为等轴晶。这种心部熔体凝固的“同时性”, 避免了中心疏松、缩孔的形成。

#### 参考文献

- [1] 竹内英磨, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾. 电磁搅拌钢连铸  $r$  品质改善 [J]. 铁 钢, 1977, (8): 59—68.
- [2] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982, 124.
- [3] 朱丽娟, 王冬. 特种铸造及有色合金, 1997, 34 (6): 34—38.
- [4] 日本金属学会. 金属 — [M]. 丸善株式会社. 1993.
- [5] 李庆春. 铸件形成理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1982.
- [6] J Szekeley, J W Evans, J K Brimacombe. The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations [M]. 1988.
- [7] 王晓东, 李廷举, 金俊泽. 电磁场对连铸末端凝固过程影响的研究 [J]. 金属学报. 2000, 9: 15—18

基金项目: 国家重大基础研究资助项目 (G1998061500); 国家自然科学基金面向 (50071015) 和重大 (59995442) 项目; 教育部跨世纪人才基金资助项目。

收稿日期: 2001-05-22; 修订日期: 2001-08-10

作者简介: 王晓东 (1972—), 男, 博士生, 从事磁流体力学在冶金中的应用研究工作, 主要研究内容有低频和永磁体磁场对金属凝固的影响, Lorentz 力在金属熔体中形成的流速场等, 联系地址: 大连理工大学材料系铸造工程研究中心 (116024)。