

大尺寸薄壁钛合金筒体结构的离心精密铸造

杨 锐 崔玉友 贾 清 刘荣华 李 伟

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

文摘 采用离心精密铸造方法,初步研究了铸造大尺寸薄壁钛合金筒体(直径660 mm,高750 mm,壁厚4 mm)的可行性。结果表明:离心转速较小时,Ti-6Al-4V筒体无法完整充型,而较大的转速可实现完整充型。对于完整充型的筒体,其内部疏松缺陷数量随转速提高而减少。对于给定转速和具有均匀温度场的型壳,筒体中疏松缺陷数量随熔液路径增长而增加。采用 Y_2O_3 面层型壳可获得无 α 壳层的表面质量良好的精密铸件,其内部疏松可通过热等静压消除。铸件的晶粒度随铸件截面厚度变化改变较大,需通过微合金化和后续热处理等措施加以调整。

关键词 钛合金,离心铸造,熔模铸造,薄壁筒体结构

Centrifugal Casting of Large Thin-Wall Cylindrical Structure of Titanium Alloys

Yang Rui Cui Yuyou Jia Qing Liu Ronghua Li Wei

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract Centrifugal investment casting of large thin-wall titanium alloy cylinders (with diameter of 660 mm, height of 750 mm and thickness of 4 mm) has been studied. The results show that small centrifugal force (or low rotation speed) leads to incomplete fill of the cylinder mould by Ti-6Al-4V melt, while complete fill of the mould cavity is achieved at large centrifugal force. For properly filled cylinders, the quantity of internal pores decreases with increasing centrifugal force. For a given rotation speed and shell mould with uniform temperature field, the density of porosity increases with the length of melt path. By using shell moulds with an yttria face coat, precision cast parts with high surface quality free of α case can be obtained, and the internal porosity can be eliminated by HIPing. Grain size of the castings tends to vary significantly with cross-section thickness, and needs to be adjusted through measures such as post-casting heat treatment and composition modification.

Key words Titanium alloys, Centrifugal casting, Lost-wax casting, Thin-wall cylindrical structure

0 引言

作为一种近净成型技术,精密铸造特别适用于成型因复杂形状限制而无法加工和焊接的结构件,或者虽然可以加工和焊接,但因加工量太大经济上难以承受的结构件。钛合金广泛应用于航空航天领域,材料和加工两方面成本均高于合金钢和铝合金等常用金属材料,因此发展钛合金的精密铸造技术具有重要意义。

钛合金在熔融状态下具有较高的化学活性,几乎与所有氧化物耐火材料发生化学反应。还原出的氧

在凝固过程中向铸件内部扩散,在铸件表面形成反应层,使铸件性能恶化,影响铸件尺寸精度,甚至导致铸件报废。很多研究表明, Y_2O_3 的化学稳定性好,是最适于制作钛合金精密铸造型壳的面层材料^[1-2]。

钛合金熔液的化学活性要求采用较特殊的熔炼方法,通常要求采用水冷金属坩埚,以避免因熔液与坩埚材料的化学反应而污染合金熔液。冷却水带走大量热量,导致熔液过热度较小,影响铸造充型能力。对于大尺寸铸件,特别是由大面积薄壁组成的结构

收稿日期:2013-03-28

基金项目:欧盟第七框架中欧合作项目 COLTS(2011-2013)

作者简介:杨锐,1965年出生,研究员,主要从事钛合金研究工作。E-mail:ryang@imr.ac.cn

件,铸造充型具有特殊难度。离心力可加速浇注过程中熔液流动,是改善铸造充型的有效措施;同时,离心力显著减小铸件中的缩孔和气孔等缺陷尺寸,大幅度提高铸件表观密度和铸件质量^[2]。

本文报道采用离心精密铸造方法成型大尺寸薄壁钛合金筒形结构件的初步结果,包括型壳制备、尺寸精度控制、表面质量和内部冶金缺陷检测等方面,探讨影响铸件力学性能的主要因素及解决思路。

1 型壳制备及尺寸控制

目标铸件是欧洲航天局设计的模型筒体结构件,图1为该筒体结构及其剖面图,分为大面积薄壁区(厚度4 mm),上颌区和下颌区,上颌区带有内卷唇口。

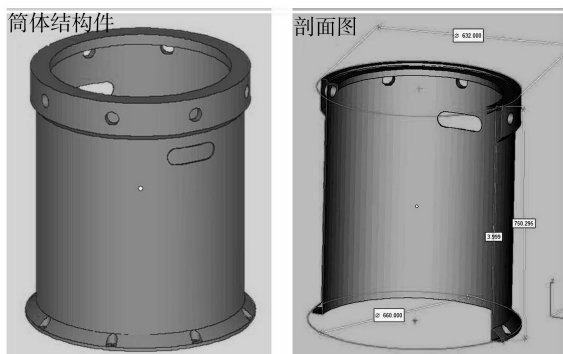


图1 薄壁筒体结构件及剖面图

Fig. 1 Thin-wall cylinder and its cut-up view

筒体直径660 mm,高度750 mm。大面积薄壁区域使精确控制型壳尺寸的难度增加,前期研究结果表明,采用选择性激光烧结方法快速成型的聚苯乙烯蜡型尺寸偏差较大。通过模具制备出蜡型组件,并采用组合胎具组合出筒形件完整蜡型(图2)。在此基础上,制备出筒体型壳及浇道系统(图3)。由于蜡的强度有限,大面积薄壁区域的蜡型在制作、组装、搬运过程中极易变形,需要采取特殊措施以减少变形。表征筒体结构尺寸精度的两个简单参量是截面圆度和圆柱度,前者为一定横截面上最大半径与最小半径之差,后者为筒体高度方向多个横截面轮廓重叠的最大偏差。

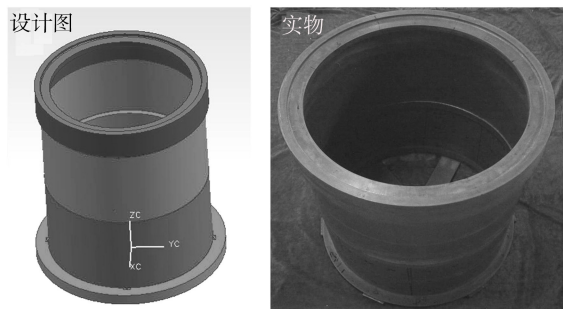


图2 组合胎具设计图和制备的筒体蜡型实物

Fig. 2 Assembled support tooling and the wax pattern



图3 制备的筒体型壳及底注浇道

Fig. 3 Shell mould of the cylinder and bottom-pouring design

对于图2的筒体蜡型,其薄壁区的圆度为0.86 mm,较为理想,而高度方向由5个截面获得的圆柱度为1.95 mm,尚需进一步改进。

2 离心精铸成型

在离心浇注条件下,顶注方式控制熔液流动的难度更大,湍流更易在大面积薄壁区域形成铸造缺陷,而采用底注方式可以获得更稳定的液流。由于冷壁金属坍塌造成熔液过热度低,通常仅约50 K,这对于大尺寸结构件的充型极为不利。提高离心转速是实现完整充型的必要措施,图4对比了高低两种转速条件下的铸造充型结果。显然,离心转速越高,熔液到达充型路径终点的时间就越短,当转速高于某一临界值时,熔液到达最长充型路径终点时仍未凝固,实现完好充型。

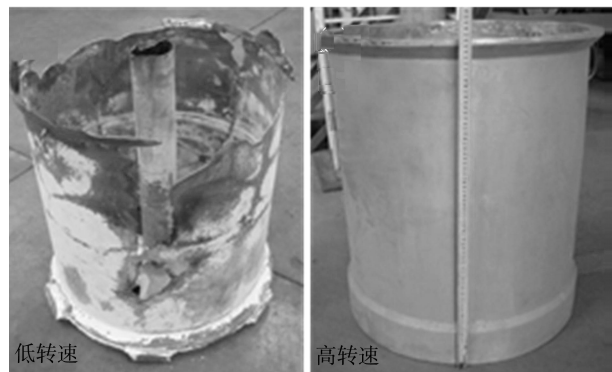


图4 低转速和高转速时筒形件的充型结果

Fig. 4 Filling results at low rotation speed and high rotation speed

离心浇注时施加于熔液上的压力有利于凝固时的补缩,可以有效抑制铸造缺陷。研究表明^[2],与静态重力铸造相比,20 g的离心力可以使190 μm的气孔减小到27 μm,使32 μm的凝固缩孔减小到21 μm。对于图1所示的筒体而言,在本文实验条件下,转速100 r/s和200 r/s均可实现筒体外观的完整充型,转速100 r/s时筒体的内部冶金缺陷要明显多于转速200 r/s的筒体铸件。图5给出了转速100 r/s铸造的筒体薄壁区上半部同一区域自上而下的3张

X-射线透视图。图中黑斑均为凝固疏松,黑斑密度自下而上逐渐增大,这显然是不同熔液路径区域的补缩能力差异所致。

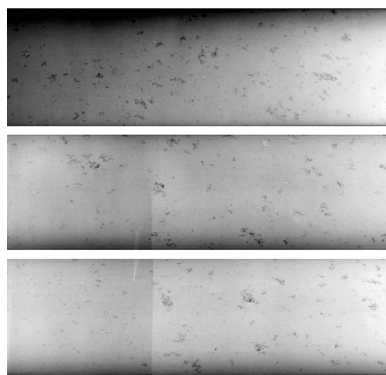


图5 筒体薄壁区上半部某区域的 X-射线照片

Fig. 5 X-ray photos of an area on the upper part of the thin-wall region

3 冶金缺陷控制

铸件解剖分析结果表明,图5所示的凝固疏松处于薄壁区内部,不与表面相连通,其形貌如图6所示,这类疏松可通过后续热等静压完全压实,不影响铸件的力学性能。由于铸件壁薄,热等静压后会在被压实的原疏松处看到明显的凹痕,图7给出了X-射线检测观察到的内部疏松与热等静压后在铸件表面观察到的凹痕的一一对应的实例。对于薄壁筒体而言,精密铸件的尺寸精度除与前述蜡型尺寸、型壳尺寸及凝固收缩等因素有关外,还与型壳面层稳定性决定的铸件表面质量有关。型壳制备是钛合金精密铸造的关键技术,被广泛研究^[3-8],除放射性的 ThO_2 外, Y_2O_3 是最佳面层材料。其他氧化物面层材料易被Ti还原,氧向铸件内扩散,因其对 α 相的稳定作用而在铸件表面形成所谓 α 壳层^[9],使表面显微硬度升高,恶化韧性相关的力学性能,并对铸件尺寸精度造成影响。对于离心精密铸造,离心力加剧熔液对面层的冲

蚀,对面层质量要求更高。

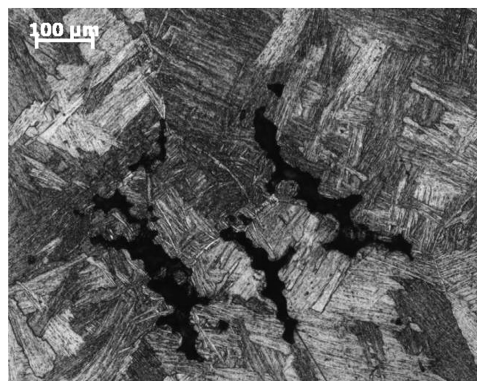
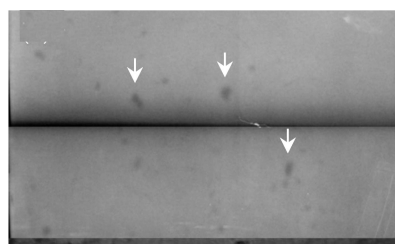
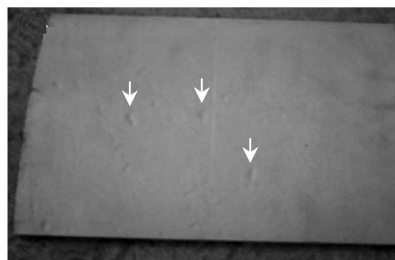


图6 筒体薄壁区内部疏松的剖面金相照片

Fig. 6 Cross-sectional metallograph showing internal porosity in the thin-wall region



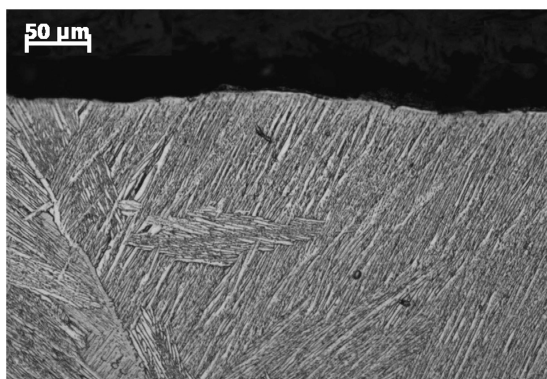
(a) 热等静压前



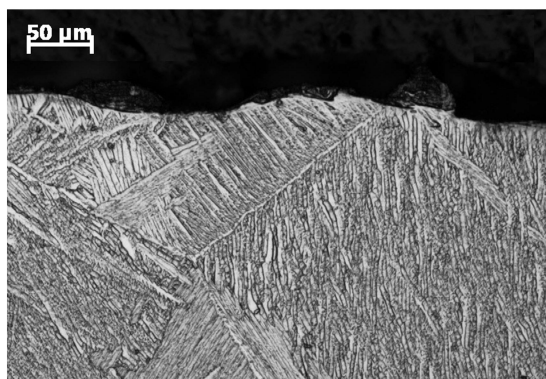
(b) 热等静压后

图7 筒体薄壁某区 X-射线图和热等静压后同一区表面的照片

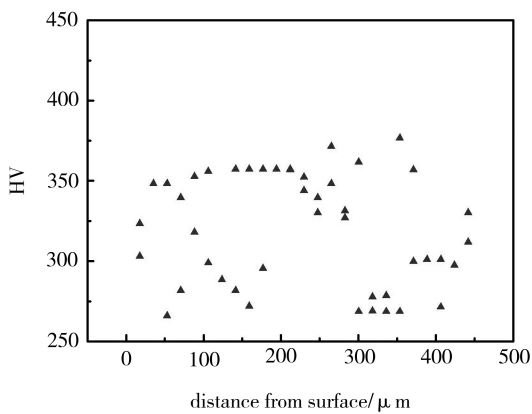
Fig. 7 X-ray photo and a photo of the corresponding part after HIPing



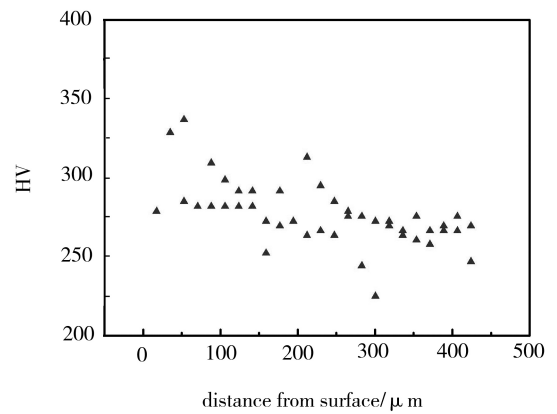
(a) 上颈区剖面



(b) 下颈区剖面



(c) 上颌区剖面显微硬度



(d) 下颌区剖面显微硬度

图 8 上颌区和下颌区剖面金相照片及相应区对应的显微硬度沿厚度方向的分布

Fig. 8 Cross-sectional metallographs of (a) top collar and (b) bottom collar regions. (c) and (d) are microhardness distribution along thickness direction corresponding to (a) and (b), respectively

从图 8 可以看出,采用 Y_2O_3 面层制备的筒体铸件表面显微组织与铸件内部无任何差别,显微硬度一致,不存在 α 壳层,表面质量优异。从图 8(a)、(b) 可以看出,上颌区和下颌区因为较厚,导致晶粒尺寸粗大,是薄壁区的数倍。晶粒尺寸不均匀是钛合金精密铸件面临的普遍问题,导致力学性能的不均匀。目前尚无彻底的解决办法,通过后续热处理或添加少量晶粒细化组元的微合金化方法,可以对微观组织进行一定程度的调整,改善铸件性能的一致性。

4 结论

(1) 离心转速较低时, Ti-6Al-4V 筒体无法完整充型,而较大的转速可实现完整充型。

(2) 对于完整充型的筒体,其内部疏松缺陷数量随转速提高而减少。

(3) 对于给定转速和具有均匀温度场的型壳,筒体中疏松缺陷数量随熔液路径增长而增加。

(4) 采用 Y_2O_3 面层型壳可获得无 α 壳层的表面质量良好的精密铸件,其内部疏松可通过热等静压消除。

致谢 感谢工信部装备司提供研究与交流经费。相关研究结果与欧洲航天局 David Jarvis 和 Francois Tang, 瑞士 ESL/Calcom 公司 Ole Koeser 和 Gael Couturier, 英国伯明翰大学 Michael Loretto 教授以及澳大利亚 Monash 大学 Xinhua Wu 教授进行了有益的讨论。

参考文献

[1] Saha R L, Nandy T K, Misra R D K, et al. On the evaluation of stability of rare earth oxides as face coats for invest-

ment casting of titanium[J]. Metall. Trans. B, 1990, 21: 559-566

[2] Suzuki K. The high-quality precision casting of titanium alloys[M]. JOM September, 1998:20-23

[3] Jia Q, Cui YY, Yang R. Interfacial reactions between gamma TiAl and CaO stabilized ZrO_2 shell mould during casting [J]. Mater. Sci. Forum., 2003, 426-432:1643-1648

[4] Jia Q, Cui Y Y, Yang R. Investigation into interfacial reactions between gamma titanium aluminide and CaO stabilized ZrO_2 shell mould[J]. Int. J. Cast. Metals Res., 2004, 17:23-27

[5] Jia Q, Cui Y Y, Yang R. A study of two refractories as mould materials for investment casting TiAl based alloys[J]. J. Mater. Sci., 2006, 41: 3045-3049

[6] Jia Q, Cui Y Y, Yang R. Refractories as mould face coatings for investment casting TiAl-based alloys[R].//Kim Y W, Morris D, Yang R, eds. Structural Aluminides for Elevated Temperatures. TMS, Metals Park, Ohio, 2008:23-30

[7] Duarte T P, Neto R J, Félix R, et al. Optimization of ceramic shells for contact with reactive alloys[J]. Mater. Sci. Forum., 2008, 587/588:157-161

[8] Karwinski A, Lesniewski W, Pysz S, et al. The technology of precision casting of titanium alloys by centrifugal process [J]. Archives Foundry Eng., 2011(11):73-80

[9] Boettinger W J, Williams M E, Coriell S R, et al. Alpha case thickness modeling in investment castings[J]. Metall. Mater. Trans. B, 2000, 31:1419-1427

(编辑 李洪泉)