

离心铸造钛合金件的力学性能变化规律

隋艳伟, 李邦盛, 刘爱辉, 郭景杰, 傅恒志

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用水冷铜坩埚真空感应凝壳熔炼设备, 制备离心力场下不同旋转时间的钛合金铸件, 研究离心半径、补缩冒口以及旋转时间对钛合金铸件的抗拉强度、屈服强度、延伸率和显微硬度的影响规律。结果表明: 离心旋转时间相同时, 钛合金铸件的力学性能随着离心半径的增加而改善, 有补缩冒口时可以获得力学性能优异的铸件。旋转时间 15 与 1.5 min 相比, 获得的铸件力学性能更优异, 这是由于铸件显微组织细化, 导致晶界强化, 位错滑移的阻力增大所造成的。

关键词: 离心力场; 钛合金; 力学性能

中图分类号: TG 249.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0251-04

钛合金具有高的比模量和比强度, 同时又具有很高的抗氧化和抗蠕变能力, 是一种轻质高温结构材料^[1-5], 因而广泛应用于航天、航空、汽车、海洋工程以及生物医学等需求特殊结构件的领域。这些特殊结构件不但结构形状复杂, 而且对使用性能要求苛刻。然而钛合金熔体化学反应性极高, 加之流动性差, 易产生气孔。为了能够显著地增加液态金属凝固时的充型和补缩压力, 减少缩孔缩松和气孔, 获得高致密度的铸件, 提高凝固速度, 使铸件获得在常规重力场下, 无法获得的优异性能, 需在离心力场下浇注凝固成形^[6-9]。

力学性能的研究是关系到钛合金实用化的重要基础, 然而目前对力学性能的研究主要集中在重力场下, 如 Kubiak 等^[10], Filip 等^[11]曾对 Ti-6Al-4V 和 Ti-6Al-2Mo-2Cr 两相钛合金的疲劳性能、拉伸性能和断裂韧性的关系进行了研究, Lutjering G^[12]研究了($\alpha+\beta$)两相钛合金的力学性能。然而对于离心力场下钛合金的力学性能研究却很少报道。且对于大型复杂钛合金铸件在离心力场下凝固成形时, 各个部位的离心半径相差较大, 那么力学性能是否有差异, 有多大差异, 这些问题目前还未见报道。本实验从这一基本问题出发, 研究离心力场下钛合金力学性能随旋转离心半径的变化规律, 同时探讨补缩冒口以及离心力场保持时间对钛合金铸件力学性能的影响规律, 旨在给出离心力场下钛合金的力学性能变化规律, 为合金工艺优化以及提高钛合金应用提供参考。

1 实验方法

Ti-6Al-4V 合金熔炼时, 其中 V 由 Al-V 中间合金 (含 V60%、Al40%, 质量分数) 加入, Al 为金属纯料(99.9%), Ti 用一级海绵纯钛(99%), 按照 Ti-6Al-4V 合金的名义成分进行配料。采用水冷铜坩埚真空感应熔炼技术, 设备从德国 ALD 公司引进, 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 °C 的 T5 石墨铸型中。在离心转盘旋转稳定后, 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 r/min, 离心力场保持时间从开始浇注时记录, 保持时间分别为 1.5 和 15 min, 所得铸件结构示意图如图 1 所示。

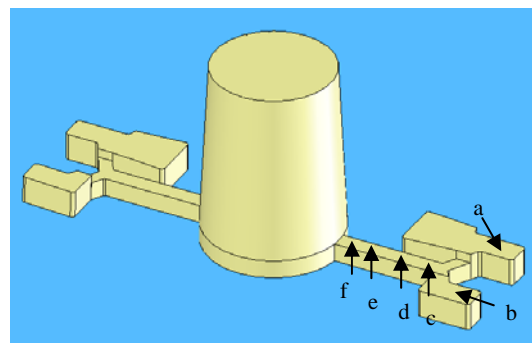


图 1 钛合金铸件结构尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of titanium alloy castings

收稿日期: 2008-01-23

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: suiyanwei@tom.com

每个铸件按照图 1 中的 a~e 5 个部位垂直于铸件表面选取片状拉伸试样, 对于同一部位每隔 2 mm 选取一个拉伸试样, 共取 5 个试样, 最后取其平均值作为此部位的拉伸数据。片状拉伸试样尺寸如图 2 所示。在 INSTRON-5569 万能电子材料试验机上进行拉伸试验, 标距为 10 mm, 加载速度为 1 mm/min, 拉伸温度为室温。用 HV120 型显微硬度计测定图 1 中所示 a~f 6 个部位的显微硬度, 每个部位测量 10 个不同位置, 取其平均值作为该部位的试验硬度值, 试验用载荷 100 g, 加载时间 15 s。6 个部位的试验参数列于表 1 中。

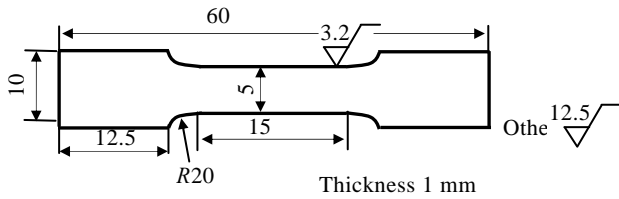


图 2 钛合金片状拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimensions of titanium alloy sample for tensile test

表 1 钛合金铸件试样选取部位试验参数

Table 1 Test parameters of titanium alloy castings at different positions

Position	Riser	Modulus, M/cm	Centrifugal radius, r/m
a	Y	0.63	0.24
b	N	0.63	0.24
c	N	0.5	0.18
d	N	0.5	0.15
e	N	0.5	0.12
f	N	0.5	0.105

2 结果与分析

2.1 离心半径对力学性能的影响

铸件中的 c、d 与 e 部位具有同样的模数($M=0.5$)和不同的离心半径 r , c 处的离心半径 $r=0.18$ m, d 处的离心半径 $r=0.15$ m, e 处的离心半径 $r=0.12$ m。图 3 给出了离心旋转半径对钛合金铸件拉伸力学性能的影响。从图 3 中可以看出: 同一旋转时间下, 抗拉强度、屈服强度以及延伸率都随着离心旋转半径的增加而增大, 并且增大的趋势逐渐变缓。离心半径越大时, 试样的拉伸力学性能越优异。

根据实验所得的 c、d、e、f 部位的显微硬度平均值, 以及这 4 个部位所在的离心半径数值, 绘制了离心力场下显微硬度随着离心旋转半径的变化曲线, 结

果示于图 4。可以看出, 显微硬度 HV 随离心旋转半径的变化趋势, 在同一离心力场保持时间条件下, 这种变化趋势随着离心旋转半径的增加而增大。利用 origin 软件对显微硬度和离心旋转半径的关系进行拟合, 得到维氏硬度与离心旋转半径之间的关系式:

离心力场保持时间 1.5 min 时:

$$HV = 370.042 02 - \frac{182.954 62}{1 + 0.682 2e^{26.688r}} \quad (1)$$

离心力场保持时间 15 min 时:

$$HV = 397.822 3 - \frac{243.819 96}{1 + 0.732 7e^{22.173r}} \quad (2)$$

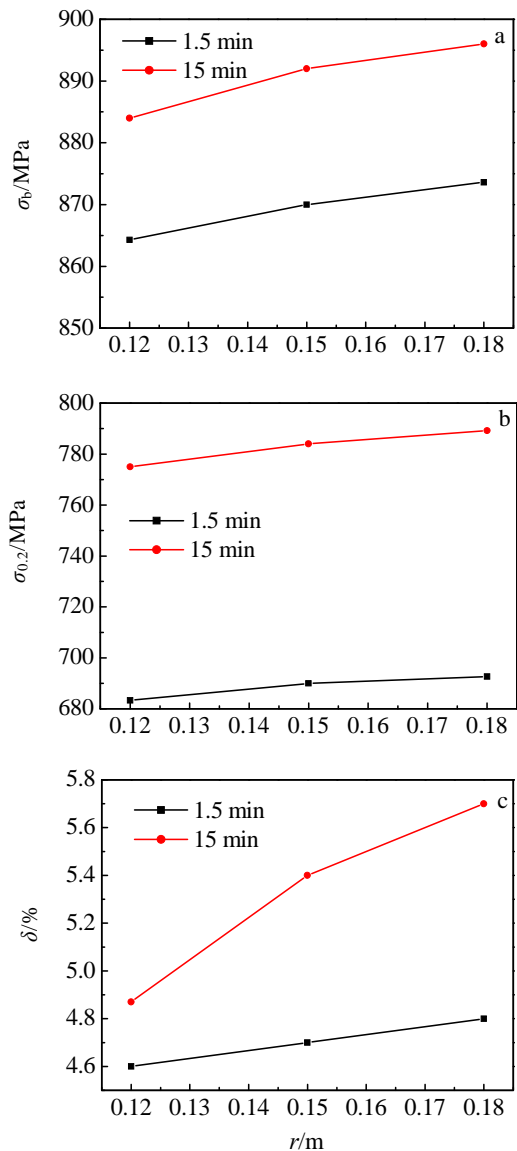


图 3 离心半径对钛合金铸件拉伸性能的影响

Fig.3 Effects of centrifugal radius on the tensile property of titanium alloy castings: (a) tensile strength; (b) yield strength; and (c) specific elongation

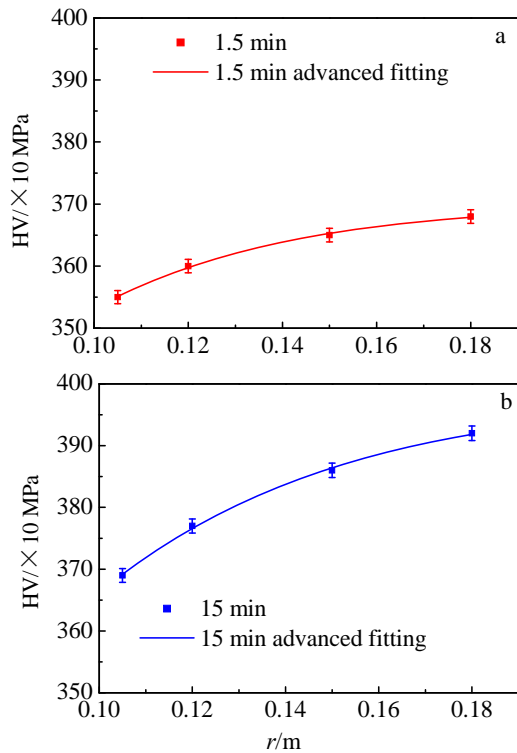


图 4 钛合金铸件的显微硬度与离心旋转半径的关系

Fig.4 Relationship between microhardness and centrifugal radius for the titanium alloy castings: (a) holding for 1.5 min and (b) holding for 15 min

2.2 补缩冒口对力学性能的影响

铸件中的部位 a 与 b 具有同样的模数 $M=0.63$ 和离心半径 $r=0.24$ m, 但是 a 处有补缩冒口, 而 b 处没有补缩冒口, 对比两处的拉伸力学性能, 其结果列于表 2 中。从中可以看出, 同一旋转时间, 部位 a 相对于 b, 存在补缩冒口, 旋转时间 1.5 min 时, 抗拉强度提高 1.4%, 屈服强度提高 1.7%, 延伸率提高 4.2%; 当旋转时间 15 min 时, 抗拉强度提高 2.3%, 屈服强度提高 2.2%, 延伸率提高 4.9%。由此可见, 相对于无补缩冒口的部位而言, 有冒口补缩时得到的拉伸性能更好, 故此应该在铸件浇注过程中, 设计的铸型应保证补缩通道畅通。

表 2 补缩冒口对钛合金铸件拉伸性能的影响

Table 2 Effects of riser on the tensile property of titanium alloy castings

Rotation time/min	Position	Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	Specific elongation, δ /%
1.5	a	885.6	705.6	5
	b	873.6	692.7	4.8
15	a	912	798.2	5.98
	b	891.5	781.4	5.7

表 3 给出了补缩冒口对钛合金铸件显微硬度的影响。同一旋转时间时, 部位 a 相对于 b, 存在补缩冒口, 得到的显微硬度值较大; 旋转时间 1.5 min 时, 显微硬度数值提高 2.3%; 旋转时间 15 min 时, 显微硬度数值提高 3.5%。

表 3 补缩冒口对钛合金铸件显微硬度的影响

Table 3 Effects of riser on the microhardness of titanium alloy castings

Rotation time/min	Position	HV/×10 MPa
1.5	a	375.4
	b	367
15	a	403.5
	b	390

2.3 离心力场保持时间对力学性能的影响

比较离心力场保持时间 1.5 和 15 min。从图 3、图 4、表 2 和表 3 中可以看出, 离心力场保持时间 15 min 时, 相同部位的抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度较大; 由图 3 和图 4 可知, 离心力场保持时间 15 min 时, 抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度随离心旋转半径的变化改变幅度较大。

3 讨论

由以上实验结果可知, 抗拉强度、屈服强度和延伸率随着离心旋转半径的增加而增大, 且变化趋势趋于稳定, 当存在补缩冒口时, 得到的拉伸性能优异。

众所周知, 材料的塑性变形是位错通过晶体密堆滑移面密堆方向上的剪切变化引起的, 当在此方向上的切应力达到临界值时, 开始发生塑性变形, 塑性变形时位错进行滑移和攀移, 障碍物对这种滑移和攀移起阻碍作用, 构成位错塞积, 位错塞积能引起很高的内应力, 阻止变形的进一步进行, 提高抗力。晶粒尺寸越小, 晶界密度越大, 使形变强化作用增强。当滑移由一个晶粒向另一个晶粒扩展时, 受到高应力状态晶界的阻碍, 使位错塞积, 阻碍滑移, 晶粒越小这种应力值增加得越大。对于粗大晶粒, 晶界比较平直阻碍作用小, 利于裂纹的传播, 而晶粒细小时, 晶粒数目相对较多, 容易通过晶粒之间的晶界相互协调而缓解在晶界处的应力集中, 使裂纹不易形核。另外, 对于组织来说, 晶粒细小的同时, 析出相也比较细小, 较小的析出相也能阻碍位错的滑移。并且细小晶界的阻碍作用, 使塑性变形不易从一个晶粒传递到另一个晶粒, 使变形局限于小范围, 整个铸件表现出塑性变形均匀, 塑性得到提高。同时离心半径越大、有补缩冒口时, 获得的铸件组织致密, 组织缺陷减少。致使拉伸性能得到增强。而合金的显微硬度与合金的强度呈正增长关系, 所以离心力场下钛合金铸件的

显微硬度呈现上述变化规律。

本研究在离心力场下钛合金铸造过程没有新相的生成,同时相的百分含量变化不大^[13],故此对钛合金铸件的力学性能影响不大,区别于文献[14]所给出的由于新相的生成导致力学性能变化。对钛合金铸件的各部位做能谱分析^[13]发现,没有文献[15]中所给出的成分偏析,这样对力学性能影响不大,可能是由于离心转速度较低缘故。

由文献[16]计算可以知道,离心力场保持时间为 15 min 时,本实验中的合金已经完全凝固,离心力场保持时间 1.5 min 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,导致钛合金铸件的抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度出现上述差异。因此在实际离心铸造过程中,铸件的旋转时间应大于金属液体在铸型中的完全凝固时间。

4 结 论

1) 离心力场下 Ti-6Al-4V 合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度随着离心半径的增加而增大,且趋势减缓。

2) 离心力场下 Ti-6Al-4V 合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度由于补缩冒口的存在而增大。

3) 离心力场保持时间 1.5 和 15 min 相比较,离心力场保持时间 15 min 时,相同部位的抗拉强度、屈服强度、延伸率以及显微硬度增加。

参考文献 References

- [1] Loria E A. *Intermetallics*[J], 2000, 8: 1339
 [2] Wu Shiping(吴士平) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2001, 50(9): 560
 [3] Lee D G et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J],

2005, 36A: 741

- [4] Lee H et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 420(1~2): 72
 [5] Shukla A K et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2005, 389(1~2): 144
 [6] Suzuki Ken-Ichiro et al. *Materials Transactions JIM*[J], 1996, 37(12): 1793
 [7] Liu K et al. *Intermetallics*[J], 2005, 13(9): 925
 [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] Kubiak K et al. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 1998, 78: 117
 [11] Filip R et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 133: 84
 [12] Lutjering G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243: 32
 [13] Ye Xicong(叶喜葱). *Study on the Thermodynamics and Dynamicsof Alloy Structure Forming and Evolution under Centrifugal Pressure*(离心压力下合金凝固组织形成与演化热力学与动力学分析)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006
 [14] Mesquita R A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 452~453: 161
 [15] Halvae A et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 118(1~3): 123
 [16] Jia Limin(贾丽敏). *Experimental Analyses on Solidified Structures and Mechanical Properties of Centrifugal Precision Titanium Casting*(钛合金离心精密铸造凝固组织与力学性能分析)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006

Mechanical Properties of Centrifugal Casting Titanium Alloys

Sui Yanwei, Li Bangsheng, Liu Aihui, Guo Jingjie, Fu Hengzhi

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;)

Abstract: Titanium alloy castings are obtained with different rotation time in the ISM apparatus. The effects of rotation radius, riser and rotation time on the tensile strength, yield strength, specific elongation, and microhardness are investigated. The results show that the mechanical properties increase with the increase of rotation radius for the same rotation time. Excellent mechanical properties can be obtained for the casting with riser. As the rotation time is increased from 1.5 min to 15 min, the mechanical properties are greatly improved due to the finer microstructure and the strengthened grain boundary and then resulting in the increase of the resistance to dislocation slipping.

Key words: centrifugal field; titanium alloy; mechanical properties

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