

# 钛合金精密铸造型壳力学参数与应力模拟

崔新鹏<sup>1</sup>, 刘建伟<sup>2</sup>, 王红<sup>2</sup>, 南海<sup>1</sup>, 张爱斌<sup>1</sup>

(1. 北京航空材料研究院, 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095;

2. 北京百慕航材高科技有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 为提升钛合金在型壳内冷却成形模拟的准确率, 对铝矾土-硅溶胶型壳的抗弯弹性模量和平均线膨胀系数进行了测量, 并基于ProCAST对钛合金骨架进行了应力模拟。受试样内部孔隙率的影响, 弹性模量的测量结果差异较大, 而热膨胀系数受此影响较小。模拟预测了铸造残余应力, 并显示在铸件外围发生了铸造变形。测量结果验证了模拟的准确性。

**关键词:** 熔模铸造; 陶瓷型壳; 力学参数; 应力模拟

精密铸造是利用蜡质材料制备特定形状 of 型腔, 随后浇注液态金属进行成形的方 法<sup>[1]</sup>。液态金属在型壳内凝固并受阻收缩, 导致铸件成形时受到应力并发生尺寸变 化<sup>[2-3]</sup>。随着产品复杂度的提升, 工艺人员仅凭经验已很难对铸件的尺寸和应力进行 控制<sup>[4]</sup>。随着计算机软硬件的提升, 数值模拟技术在铸造行业中兴起, 成为工艺优化 的有效工具<sup>[5-6]</sup>。然而, 模拟结果的准确性常常受到质疑, 缺少必要的型壳材料参数 是其中一个重要原因<sup>[7]</sup>。研究掌握型壳变化规律对于提升模拟准确率、提高铸件尺寸 精度等有重要意义<sup>[8]</sup>。目前关于型壳强度、荷重、透气性等性能的数据较多, 而缺乏 力学参数的测量数据<sup>[9-10]</sup>, 对熔模铸造应力模拟的发展造成阻碍。

本研究借助相关的仪器及试验, 测量了铝矾土-硅溶胶型壳在不同温度下的弹 性模量及热膨胀系数, 基于上述数据对钛合金骨架铸造过程的应力和变形进行了预 测。

## 1 研究方法

### 1.1 制备型壳

选用SiO<sub>2</sub>质量分数为30%、 $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$ 的硅溶胶, 与铝矾土粉料混合制成浆 料, 流杯粘度控制在6~8 s<sup>[11]</sup>。砂料为铝矾土。制壳在恒温恒湿环境下进行, 通过向 蜡模表面反复进行挂浆-撒砂-干燥操作, 得到一定厚度的型壳, 再经过脱蜡、高温焙 烧完成制备。

### 1.2 试样测试

用制备的陶瓷型壳加工出10根试样, 试样尺寸为5 mm × 6 mm × 50 mm。利用 DMA 242E型动态热机械分析仪测量弹性模量, 测量模式为三点弯曲, 测量温度范围 为25~600 °C, 升温速度为10 °C/min, 测试数量5根。利用DIL 402PC型热膨胀分析 仪测量平均线膨胀系数, 测量温度范围为25~850 °C, 升温速度为10 °C/min, 基准温度 为25 °C, 测试数量5根。

## 2 模拟前处理

应力模拟对象为某钛合金骨架铸件, 其主体部分的轮廓尺寸为1 172 mm × 400 mm × 50 mm, 上下端各有3处厚大的焊接夹头凸台。浇注系统采用底注式, 由直浇道、横

作者简介:

崔新鹏(1988-), 男, 工 程师, 硕士, 主要研究 方向为钛合金铸造工艺 及数值模拟。E-mail: cuixinpeng123@126.com

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

05-0506-04

收稿日期:

2019-10-17 收到初稿,

2020-02-26 收到修订稿。

浇道和6个内浇口组成,如图1所示。

在ProCAST软件中划分四面体网格,网格尺寸设置4 mm。然后对模型进行包壳操作,型壳厚度设置为15 mm,网格创建完毕后体网格数量共约84万。金属材料为Ti6Al4V合金,材料属性设置为弹塑性,材料参数见表1。型壳材料的比热容为1 380 J/(kg·K),导热系数为1.06 W/(m·K),假设陶瓷型壳在浇注过程中不发生塑性变形,将其材料属性设置为弹性。设置工艺参数:重力方向为垂直浇口向下,浇注温度1 720 °C,型壳预热温度150 °C,浇注时间5 s,铸件型壳内冷却100 min,脱壳后继续冷却20 min。

### 3 结果及分析

#### 3.1 抗弯弹性模量

图2展示了5组试样弹性模量的测试结果。在开始升温阶段,弹性模量略有下降,最低值大致出现在100~200 °C之间,数值约为3 900~4 900 MPa。随着温度升高,弹性模量随温度缓慢波动上升,600 °C时达到最大值,最大值在4 600~6 000 MPa之间。不同试样的弹性模量数值差异较大,在相同温度下可达1 500 MPa,原因是型壳挂浆和撒砂过程随机性大,不同试样的孔隙率差异较大,影响P-ε测试曲线。计算5组试样每个温度点的弹性模量的平均值,如图2中“T6”曲线所示,具有与单个试样相同的变化趋势,其数值在4 490~5 223 MPa之间。

表1 Ti6Al4V合金材料参数  
Table 1 Properties of Ti6Al4V alloy

温度/°C	密度 (kg·m <sup>-3</sup> )	热焓/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	弹性模量 (GPa)	屈服强度 (MPa)	平均线膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
25	4 450	0	7	103	827	8.64
800	4 222	489	17.8	65	67	10.3
1 500	3 991	1 028	25.8	15	18	12.1
1 650	3 812	1 466	33.4	0.3	8	12.6

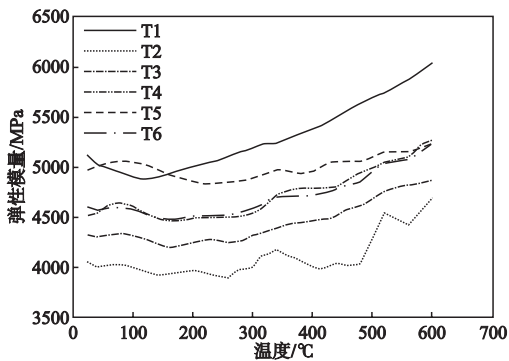


图2 弹性模量测量曲线

Fig. 2 Measurement curves of elastic modulus



图1 钛合金骨架及浇注系统模型

Fig. 1 Model of titanium alloy skeleton and pouring system

#### 3.2 平均线热膨胀系数

图3展示了5组试样平均线膨胀系数(CTE)的测试结果。在开始升温阶段,CTE有所下降,最低值约出现在50~100 °C之间,数值约为(3.5~5.0)×10<sup>-6</sup>/K。随着温度升高,CTE迅速上升,在200 °C左右出现峰值,约为(7.3~7.8)×10<sup>-6</sup>/K,随后有所下降,约在400 °C左右时其数值不再发生剧烈变化,稳定在(6.7~7.2)×10<sup>-6</sup>/K之间。不同试样的测试数据一致性较好,原因是热膨胀系数测量试样外部尺寸,试样内部的孔隙率差异对结果影响有限。计算5组试样平均线膨胀系数的平均值,如图3中“T6”曲线所示,其数值在(5.09~7.51)×10<sup>-6</sup>/K之间变化。

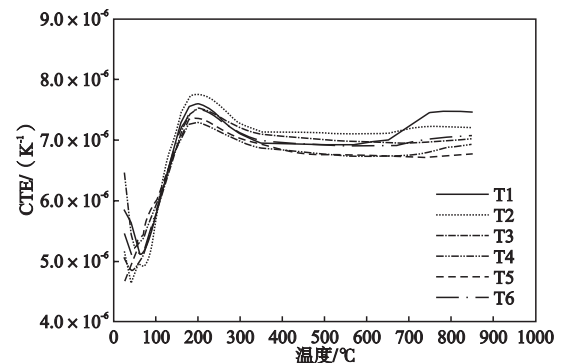


图3 平均线热膨胀系数测量曲线

Fig. 3 Measurement curves of CTE

### 3.3 应力模拟结果

液态金属浇注到型壳内之后会冷却凝固并发生收缩, 由于金属与型壳的温度和膨胀系数的差距, 金属在收缩过程中受到型壳的阻碍, 从而产生机械应力<sup>[12]</sup>。同时铸件各部位的冷却速率不同, 不同结构之间存在温度差, 会导致热应力<sup>[13]</sup>。图4为钛合金骨架在型壳内冷却结束时的等效应力模拟云图, 图中显示焊接夹头等厚大结构刚性较大, 型壳阻碍收缩产生的力被厚大结构分散承担, 承受的等效应力最小, 低于100 MPa。铸件外围骨架由于收缩倾向最大, 同时壁厚相对较小, 夹角处受阻收缩所产生的等效应力最大, 可达500 MPa。

当去除型壳并冷却完毕后, 一部分弹性范围内的应力得到释放, 但仍有内应力保留了下来形成残余应力, 如图5所示。图中显示框架拐角处存在浇道残余应力, 最大值490 MPa位于底端的外围转角, 表明此处的应力在脱壳后并未得到释放。除此之外, 铸件大部



图4 型壳内冷却结束时的等效应力分布

Fig. 4 Equivalent stress distribution at the end of cooling in the shell

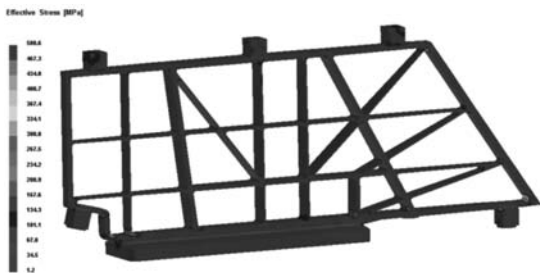


图5 脱壳后的等效应力分布

Fig. 5 Equivalent stress distribution after shell removal

分区域的应力都得到有效释放, 残余应力值普遍在20~50 MPa, 远低于钛合金的屈服极限。

综上所述, 铸件在型壳内冷却时会产生应力, 脱壳后应力不会完全消除, 从而形成残余应力。铸件外围转角处由于自身收缩和型壳的阻碍, 是残余应力值最大的位置, 应警惕此处应力开裂的风险, 必要时可适当增加此处的铸造圆角。

### 3.4 收缩变形模拟结果

铸件在凝固过程中伴随着收缩和变形。图6展示了脱壳后铸件各部位位移的模拟结果, 为方便观察, 将各部位的位移值放大10倍。铸件整体尺寸发生收缩, 左上角部位和底部厚大法兰左侧收缩值最大, 约5 mm。由于受到内部筋条的拉扯作用, 外围骨架在“T”字形交接处向内凹陷约0.3 mm。右侧尖角位置受到厚大焊接接头和浇道牵引, 发生向下翘曲变形, 变形量约1 mm。根据模拟结果, 可以在外围骨架“T”字形交接位置增加反补贴量以减轻凹陷缺陷, 并去除右侧尖角位置的浇道, 以减轻由此带来的翘曲变形。

## 4 试验验证

采用与模拟相一致的工艺方案开展试验验证, 经过蜡模制备、涂料撒砂、脱蜡焙烧过程制备出陶瓷型壳, 在100 kg真空自耗凝壳炉内进行浇注, 使用EV4030型激光影像仪对铸件进行扫描测量, 结果见图7。实际铸件的外围骨架同样有0.3~0.5 mm的凹陷, 与模拟结

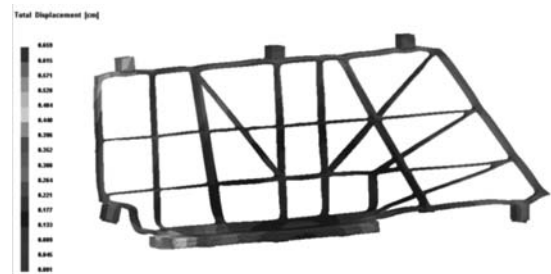
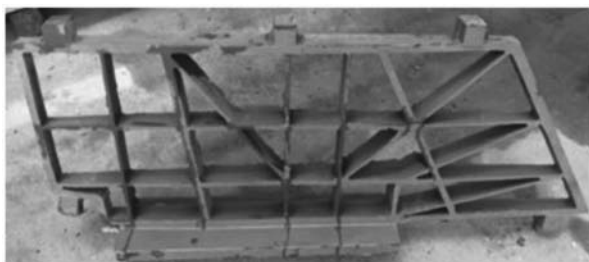
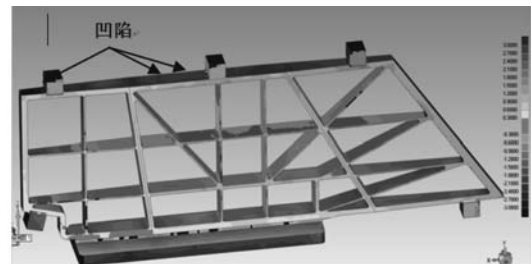


图6 脱壳后的位移云图

Fig. 6 Displacement distribution after shell removal



(a) 铸件



(b) 模拟结果

图7 铸件及其扫描结果

Fig. 7 Real casting and its dimension scan results

果相吻合。为评价收缩变形模拟的准确率,对比铸件长、宽、高三个方向收缩的模拟和实际值,如表2所示。模拟收缩量略小于实际值,但三个方向的吻合度均达到88%以上,满足工程应用需求。由于网格质量、模型假设、工艺波动等原因,模拟与实际存在差异难以避免,可进一步根据试验结果优化模拟参数。

## 5 结论

(1) 弹性模量随温度的升高先下降后上升,测试结果受试样孔隙率的影响较大,平均线热膨胀系数在200℃时达到峰值,随后有所下降,约在400℃左右数值不再剧烈变化。

(2) 应力模拟显示铸件在型壳内冷却时会产生应

表2 铸件收缩模拟与验证  
Table 2 Simulation and verification of casting contraction

方向	理论值/mm	模拟收缩量/mm	实际收缩量/mm	吻合度/%
长	1 180.1	7.22	7.9	91.4
宽	165.2	2.88	3.20	90
高	444.1	2.76	3.13	88.2

力,脱壳后形成残余应力。铸件外围转角处由于自身收缩和型壳的阻碍,是残余应力值最大的位置。

(3) 变形模拟显示外围骨架在“T”字形交接处向内凹陷变形,右侧尖角位置在焊接接头的牵引下发生翘曲变形。

(4) 铸件长、宽、高三个方向收缩的模拟值略小于实际值,但吻合度均达到88%以上。

### 参考文献:

- [1] 贾清,崔玉友,杨锐,等.钛合金精密铸造用陶瓷模壳研究[J].金属学报,2004,40(11):1170-1174.
- [2] LU J P, CHEN J B, FANG Q H. Finite element simulation for Ti-6Al-4V alloy deformation near the exit of orthogonal cutting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016(85):2377-2388.
- [3] 苏鹏,刘鸿羽,赵军,等.钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J].铸造,2012,61(12):1401-1404.
- [4] SABAUA S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process [J]. Metallurgical And Materials Transactions B, 2006, 31B(2):131-140.
- [5] 柳百成.建模与仿真在装备制造中的作用与前景[J].航空制造技术,2008(3):26-27.
- [6] 黄建民.有限元技术的发展及其在装备制造中的应用[J].上海电机学院学报,2010(3):177-178.
- [7] BAZHENOV V E, KOLTYGIN A V, FADEEV A V. The use of the ProCast software to simulate the process of investment casting of alloy based on titanium aluminide TNM\_B1 into ceramic molds [J]. Russian Journal of Non Ferrous Metals, 2014, 55(1):15-19.
- [8] 邵珩,李岩,南海.熔模铸造条件下Ti6Al4V合金铸件与陶瓷型界面换热系数研究[J].金属学报,2015,51(8):976-984.
- [9] 罗宁,张锡平,阎双景,等.熔模铸造型壳的现状[J].特种铸造及有色合金,2002(5):30-31.
- [10] 贾清,崔玉友,杨锐,等.钛合金精密铸造用陶瓷模壳研究[J].金属学报,2004,40(11):1170-1174.
- [11] 赵恒义.熔模铸造型壳抗弯弹性模量的研究[J].铸造技术,2004,25(6):443-444.
- [12] 崔兰芳,李洪,周洪涛,等.压铸铝合金变速箱壳体应力热裂分析[J].铸造,2016,65(8):795-797.
- [13] 滕子浩,廖敦明,吴棣,等.轧辊铸件成形过程热裂纹萌生与扩展数值模拟[J].铸造,2019,68(9):1042-1047.

## Shell Mechanical Parameters and Stress Simulation of Titanium Alloy Investment Casting

CUI Xin-peng<sup>1</sup>, LIU Jian-wei<sup>2</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>, NAN Hai<sup>1</sup>, ZHANG Ai-bin<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing Engineering Research Center of Advanced Precise Forming of Titanium Alloys, Beijing 100095, China; 2. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China)

### Abstract:

To improve the accuracy of the cooling forming simulation of titanium alloy in the shell, the flexural elastic modulus and average linear expansion coefficient of the bauxite-silica sol shell were measured, and the stress simulation of the titanium alloy skeleton was performed based on ProCAST. Affected by the internal porosity of the sample, the measurement results of the elastic modulus are quite different, and the thermal expansion coefficient is less affected by this. The simulation predicted the casting residual stress and showed that casting deformation occurred at the periphery of the casting. The experimental measurement results verify the accuracy of the simulation.

### Key words:

investment casting; ceramic shell; mechanical property; stress simulation