

大型复杂 ZTC4 合金铸件充型凝固过程的模拟

王晓林¹, 赵志龙², 马余选¹, 张延生¹, 马海印³, 马敏团⁴

- (1. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014;
2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;
3. 中船总陕西柴油机厂, 兴平 713105;
4. 中船总 12 研究所, 兴平 713102)

摘要:以 ZTC4 合金框形铸件为对象, 采用 Solidworks 建模, 以 Meshcast 软件进行网格剖分, 解决三维模型与网格分析软件之间的接口问题, 采用 Pro-cast 软件分析了铸件充型过程中液体流动及温度场分布规律, 预测铸件中缩孔、铁豆易出现的位置, 预测结果与铸件实际情况相吻合。将分析结论应用于同类型更大更复杂的框形铸件的工艺优化中, 避免同类缺陷的发生。

关键词:钛合金铸件; 充型; 凝固过程; 模拟

中图分类号: TG294

文献标志码: A

Simulation of filling and solidification processing of large complex ZTC4 castings

WANG Xiao-lin¹, ZHAO Zhi-long², MA Yu-xuan¹, ZHANG Yan-sheng¹, MA Hai-yin³, MA Min-tuan⁴

- (1. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China;
2. Institute of Mechanical, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. CSIC Shaanxi Diesel Engine Co., Ltd., Xingping 713105, China;
4. CSIC No. 12 Research Institute, Xingping 713102, China)

Abstract: The frame-shaped ZTC4 alloy castings were investigated. Solidworks was used to build the model. Meshcast was used to subdivide the grid. The interface problem between the three-dimensional model and the software used to subdivide the grid was resolved. The orderliness of the liquid flowing and the distribution of the temperature field were analyzed by using Pro-cast during the filling processing. The locations of the shrinkage cavity and the cold-shots were forecasted. The forecasted results agree with the forecasting. The same defect could be avoided through using the analysis results to optimize the technique of the same type castings with larger size and more complex structure.

Key words: titanium alloy casting; filling; solidification process; simulation

钛合金因其优异的性能^[1]而广泛应用于航空航天领域^[1-2]。对于结构复杂的构件, 铸造作为近终成形技术, 可同时解决钛合金构件成形难度大和成本高的难题^[1]。

铸造过程模拟仿真方法是近几十年来逐渐发展成熟起来的一种探索铸造过程充型及凝固规律经济快捷的一种新方法^[3]。将其应用于钛合金铸件, 尤其是大

型复杂件的离心浇注工艺研究中尚未见成功先例^[4]。本文作者以 ZTC4 钛合金框形铸件为对象进行充型和凝固过程模拟, 计算得到的模拟结果与铸件实物的表面、内部质量检查结果基本吻合, 将结论用于同类型更大、更复杂的框形铸件的工艺优化中, 取得了很好的效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验对象为采用石墨机加型离心铸造工艺在真空自耗凝壳炉铸造的某大型复杂 ZTC4(GB/T15073)合金铸件。该铸件框内由多条缘板与 6 个承力螺母相连,缘板与底板之间由 7 mm 厚的腹板相连,上下法兰之间设有加强筋,为一复杂框形铸件。铸件直径超过 1 m,理论计算质量为 220 kg,对钛合金铸件而言属大型钛合金铸件。

1.2 工作流程^[5-10]

1) 三维建模接口:用 SolidWorks 软件进行三维建模,以 STEP 格式保存;2) 前处理:用 Pro-cast 前处理模块 Meshcast 进行网格生成及优化;3) 中间计算:用 Pro-cast 热分析模块、流动分析模块、应力分析模块进行计算分析;4) 后处理:将模拟结果以图形和动画等形式提供。

1.3 模拟结果输出

1) 铸件三维造型图;2) 铸件充型过程矢量图;3) 铸件凝固过程色温图;4) 铸件凝固后期独立液相区分布图。

2 结果

SolidWorks 软件所建模型见图 1。Meshcast 网格生成及优化结果见图 2。

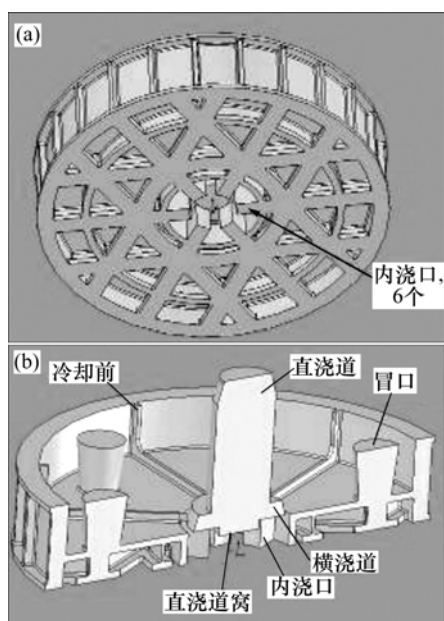


图 1 三维模型

Fig.1 Three-dimensional model: (a) Ingate; (b) Cutaway view

充型过程流场模拟结果见图 3。铸件上的铁豆缺陷见图 4。凝固过程温度场模拟结果见图 5。独立液相区预测结果见图 6。铸件上与独立液相区相对应缩孔缺陷见图 7~9。工艺优化后的更大框形铸件实物(直径 1 500 mm,高度 400 mm,质量 290 kg)见图 10。

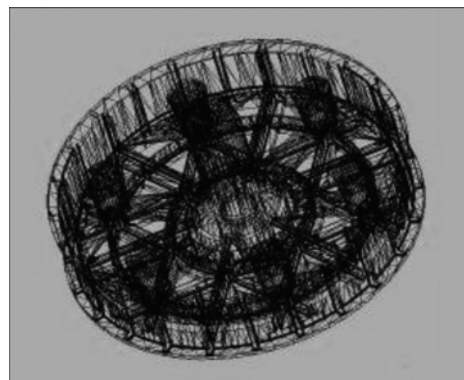


图 2 网格剖分

Fig.2 Grid subdividing

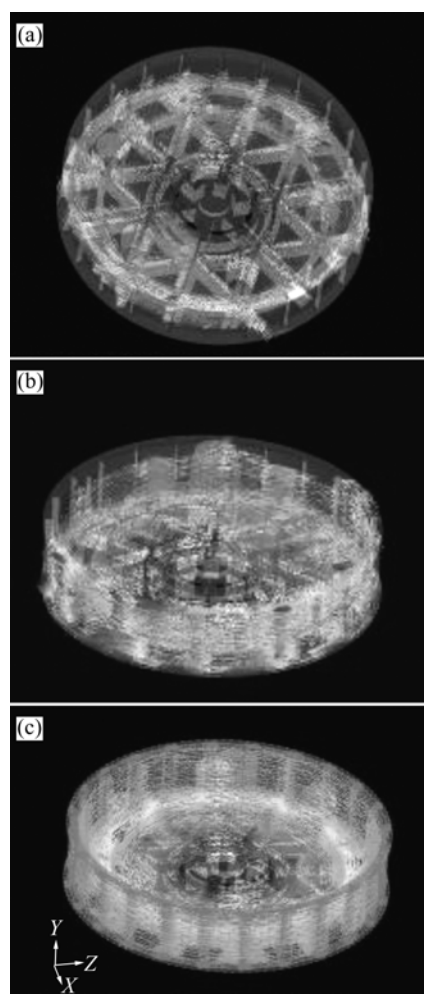


图 3 流速分布图

Fig.3 Velocity profiles with different filling time: (a) 3 s; (b) 3.9 s; (c) 4.86 s

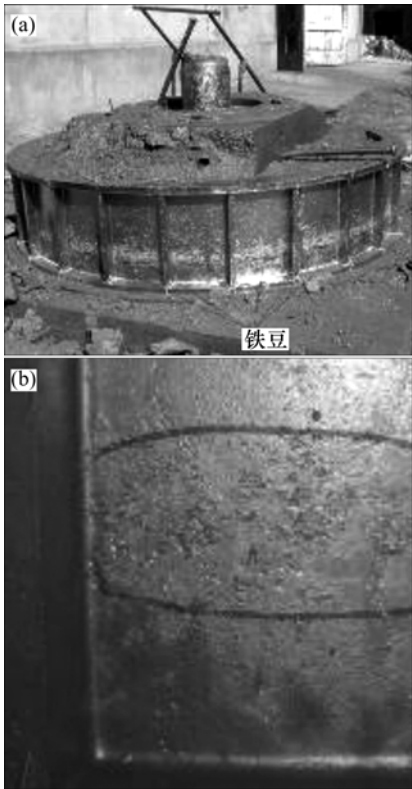


图 4 铸件上的铁豆缺陷
Fig.4 Cold-shots defects on casting: (a) Cold-shots; (b) Partial enlarged drawing

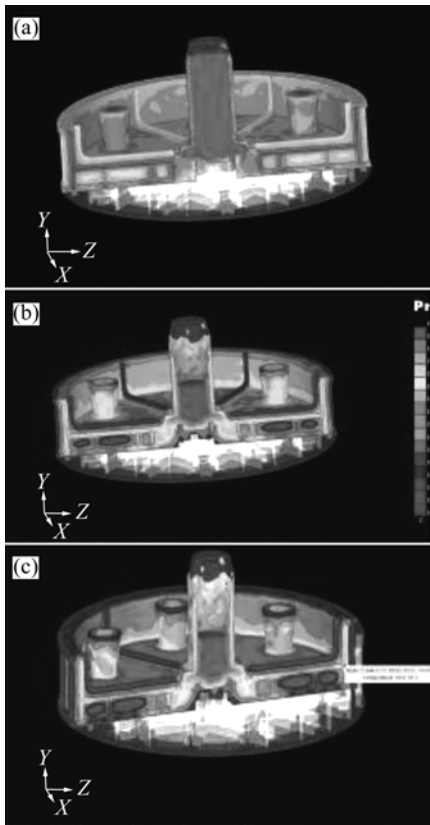


图 5 温度场分布图
Fig.5 Scattergram of temperature at different solidifying times: (a) 7.36 s; (b) 35 s; (c) 43 s

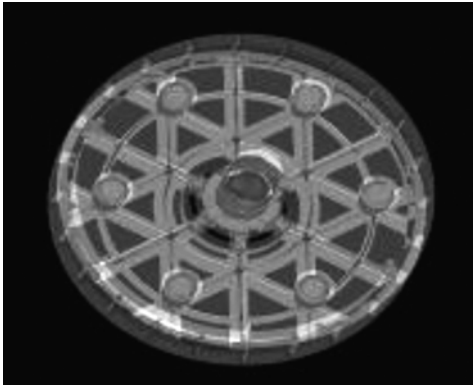


图 6 独立液相区
Fig.6 Individual liquid-phase field

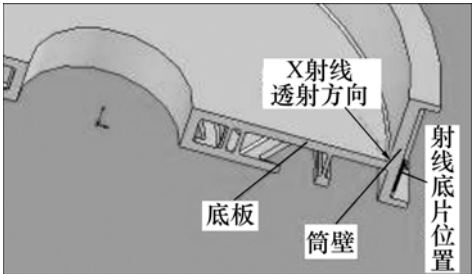


图 7 X 射线检验布片示意图
Fig.7 Schematic diagram of shooting tested by X-ray

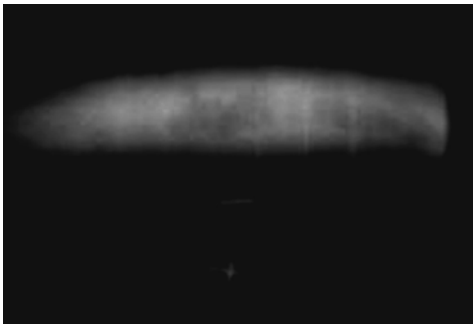


图 8 X 射线显示的独立液相区对应的缩孔
Fig.8 Shrinkage cavity of individual liquid-phase field tested by X-ray

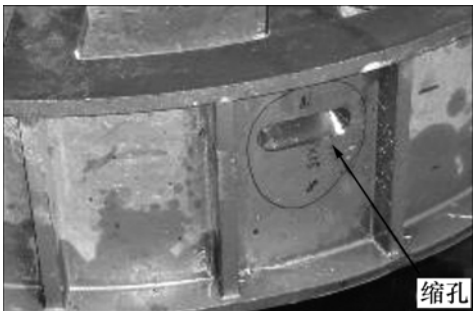


图 9 独立液相区对应的缩孔去除后
Fig.9 Shrinkage cavity of individual liquid-phase field removed



图10 工艺优化后的铸件

Fig.10 Casting after technology optimized

3 讨论

由图3(a)和(b)可见,金属液在从内向外、从下而上的充型过程中,与回转中心距离相同的地方金属液基本上能同步到达,这说明速度分布比较稳定,充型过程比较平稳,同时说明浇注位置的选择,浇注系统的设置是比较合理的。

由图3(a)还可见,金属液流大角度改变流向发生在底板、缘板和筒壁相接处。因此,这一区域的铁豆、流痕将比较严重,上法兰处最后充满,因此也会存在一定的流痕。

对比实物可以发现,在底板和筒壁相接处外壁的铁豆比较严重,缺陷的分布情况与模拟结果比较吻合。

图5温度场分布图显示43 s时腹板、缘板、筋板、法兰、冷却筋底板的大部、筒壁的小部已凝固,铸件已经成形;但此时底板与筒壁相交处局部仍处于液相温度,虽然冒口、浇道中心还处于液相温度,但它们与该处之间没有补缩通道,这意味着该处凝固收缩后将由于得不到金属液的补充而有可能出现集中缩孔。图6所示为根据温度场分布预测的铸件独立液相区分布图。图6更清晰的描述了这一状况。由图6可以看出,独立液相区存在于冒口内和底板与筒壁相交处,这意味着这两处有出现缩孔的可能。

图7所示为X射线检验底板与筒壁相交处缩孔缺陷的布片示意图。图8所示为筒壁与底板相交处的X射线检验结果之一。该部位共拍片24张,发现集中缩孔11处,图8所示为缩孔最严重一处。缺陷破开后(见图9)发现,缩孔并不位于热节几何中心部位,而是偏向回转中心一侧,这一现象可以用补缩动力来解释:

排除温度场的作用之外,金属液总是从势能高的地方流向势能低的地方,所以缩孔最终出现在势能较高的部位;重力场中,热节的上部势能高;离心力场中,回转中心处势能高,离心浇注时,离心力场作用远大于重力场,起主导作用,因此缩孔会出现在热节几何中心偏回转中心一侧。

根据这类框形铸件充型和凝固过程的特点,在工艺设计上可作如下优化:将内浇口高度降低,增加由腹板向上充型的金属液量,减少由底板水平向外流入筒壁的金属液量,使金属液流从下法兰向筒壁填充,减弱底板水平向外垂直型壁的金属液流冲击,从而减少该处的铁豆缺陷;在上法兰处设置溢流冒口,使液流的前端汇聚于溢流冒口;在筒壁与底板相交处设环形冒口,消除此处的缩孔。工艺优化后的更大框形铸件实物(直径1500 mm,高度400 mm,质量290 kg)见图10,经表面、内部无损检测,相似部位的铁豆、缩孔缺陷得以消除。

4 结论

1) 用SolidWorks软件进行三维建模,以Step格式保存,然后用Pro-cast前处理模块Meshcast进行网格生成及优化,再用Pro-cast热分析模块、流动分析模块进行计算分析,成功地分析了框形铸件的充型和凝固过程,与实际检测结果非常吻合。这种方法也可以应用于其他大型复杂钛铸件的铸造充型凝固过程模拟仿真研究。

2) 大型、复杂钛合金铸件容易形成缩孔和浇不足的缺陷,离心浇注可以使金属液迅速充填。由于离心力场和重力场的综合作用,离心浇注时缩孔的分布规律是向上、向回转中心方向,因此,冒口设计时应考虑这一特点。

3) 离心浇注充型速度快,金属液容易不平稳,因此浇注系统设计时应采用底注、开放式浇注系统,使金属液由内向外、由下向上充填铸型,这时充型比较平稳,由喷溅产生的铁豆缺陷少。

REFERENCES

- [1] C. 莱茵斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 25-26.
LYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN Zhen-hua, transl. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005:

- 25-26.
- [2] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 15-16.
- ZHOU Yan-bang. The panorama of titanium alloy casting[M]. Beijing: Aeronautical Industry Press, 2000: 15-16.
- [3] 熊守美. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 8-9.
- XIONG Shou-mei. Simulation technology in casting process[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 8-9.
- [4] 徐达鸣, 李 鑫, 安阁英. 钛合金离心精密铸造充型过程计算机模拟[J]. 铸造, 2002(1): 39-40.
- XU Da-ming, LI Xin, AN Ge-yin. Numerical simulation of titanium alloy in centrifugal casting filling process[J]. Foundry, 2001(1): 39-40.
- [5] 侯击波, 程 军. 铸件充型过程的数值模拟技术[J]. 华北工学院学报, 1997, 18(1): 35-36.
- HOU Ji-bo, CHENG Jun. Technology of numerical simulation in casting filling process[J]. Journal of North China Institute of Technology, 1997, 18(1): 35-36.
- [6] 杨 全, 张 真. 金属凝固与铸造过程数值模拟[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996: 127-129.
- YANG Quan, ZHANG Zhen. Numerical simulation of metal solidifying and casting[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996: 127-129.
- [7] 黄引平. 复杂柴油机缸盖研制过程中 CAD/CAE 工程优化[J]. 铸造技术, 2007(8): 1095-1097.
- HUANG Yin-pin. CAD/CAE engineering optimized in cylinder cover of complex diesel engine manufactured process[J]. Foundry Technology, 2007(8): 1095-1097.
- [8] 庞盛永. “锯齿”平滑技术在凝固模拟中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2006(6): 335-336.
- PANG Sheng-yong. Application of smoothing technology to alias-smoothing in solidification simulation[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006(6): 335-336.
- [9] 李敏华. 挤压铸造舵面的液流充型过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2006(12): 772-774.
- LI Min-hua. Numerical simulation of filling process for the rudder in squeezing casting[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006(12): 772-774.
- [10] 代学蕊. 铝合金阀盖压铸充型流场的模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2006(12): 775-776.
- DAI Xue-rui. Simulation of filling process for aluminum alloy valve-cover in die casting[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006(12): 775-776.

(编辑 杨幼平)