

中介机匣流道与支板转接圆角数值模拟

刘珍君¹ 张荣强¹ 朱小平¹ 杨 草² 薄 煜¹ 崔婧钰¹ 陈正阳³

(1.河北钢研德凯科技有限公司; 2.中国航发贵州黎阳航空动力有限公司; 3.北京钢研高纳科技股份有限公司)

摘 要 以 ZTC-4 钛合金中介机匣为研究对象,利用 ProCAST 有限元软件对圆角值分别为 3、5 和 7 mm 的流道与支板转接进行了数值模拟分析。结果表明,不同流道与支板转接处的圆角值温度场变化与热裂倾向结果基本一致;在分流环应力分布中,流道与支板转接圆角值为 5 mm 与 7 mm 所形成的应力场分布均优于 3 mm 的;随后利用小孔法对中介机匣表面的残余应力进行了测量,结果与模拟结果基本吻合,验证了模拟的准确性。

关键词 精密铸造;中介机匣;数值模拟

中图分类号 TG249.5;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Transition Fillet between Runner and Support Plate of Intermediate Casing

Liu Zhenjun¹, Zhang Rongqiang¹, Zhu Xiaoping¹, Yang Cao², Bo Yu¹, Cui Jingyu¹, Chen Zhengyang³

(1.Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd.; 2.China Aviation Development Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd.;3.Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd.)

Abstract: The finite element software ProCAST was adopted to numerically simulate the transition between the runner and the support plate with rounded corners of 3, 5 and 7 mm of ZTC-4 titanium alloy intermediate casing, respectively. The results indicate that variation of fillet temperature field between different runners and support plate are basically consistent with the results of hot crack tendency. In the stress distribution of shunt ring, the stress field distribution formed by rounded angle value of 5 mm and 7 mm is superior to that of 3 mm. The residual stress on the surface of casing was measured by small hole method, and results basically coincide with simulated ones, verifying the simulation feasibility.

Key Words: Investment Casting, Intermediate Casing, Numerical Simulation

钛合金因具有密度小、比强度高、回弹能力强和耐腐蚀等特点,被广泛应用于航空、航天、医疗和化工等领域^[1-3]。精密铸造作为钛合金近净成形工艺,能够制造出尺寸精准、形状复杂的构件,并节约成本^[4-5]。钛合金中介机匣作为航空发动机重要的承力结构,直接影响着航空发动机的性能^[6-7]。研究表明,SAM-146 中介机匣尺寸为 500~800 mm,支板与流道位置的圆角值为 4~6 mm。国内军用发动机用中介机匣普遍尺寸为 800~1 200 mm,支板与流道位置的圆角值为 3 mm,PD35 中介机匣尺寸为 1 200~1 500 mm,支板与流道位置的圆角值为 8~10 mm。在铸造过程中流道与支板圆角位置存在应力集中的现象,支板位置处圆角过大时,铸件易产生热节,过小时铸件在浇注后易产生应力缩松,导致铸件整体性能降低。因此,对中介机匣不同流道与支

板转接圆角处的温度场和应力场进行数值模拟分析十分重要。

数值模拟技术能通过少量的试验达到优化和完善铸造工艺的目的,进而缩短产品设计和试制周期,提高产品的合格率,降低工程技术成本^[8-10]。近年来,利用数值模拟技术对铸造过程中铸件的流场、温度场和应力场等展开了大量研究。FUNK G 等^[11]采用 FDM、FEM 模型模拟连铸过程的应力场,采用 ADINA 进行热应力分析,得到在相同条件下耦合模型的可行性。徐达鸣等^[12]采用自行研制的三维铸件充型/凝固模拟软件 CASM-3D 对钛合金进行了重力铸造和离心铸造模拟。结果表明,在离心力场下金属液的薄壁充型能力较强。李丽丽^[13]运用 ProCAST 软件对 ZTC-4 钛合金进行了铸件/铸型热应力/应变的数值模拟。结果表明,数

收稿日期:2023-04-24;修改稿收到日期:2023-08-17

第一作者简介:刘珍君,女,1989 年出生,工程师,河北保定(072750),E-mail:zjliu@hotmail.com

通信作者:朱小平,男,1981 年出生,高级工程师,河北保定(072750),E-mail:905014177@qq.com

引用格式:刘珍君,张荣强,朱小平,等. 中介机匣流道与支板转接圆角数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 710-1 713.

LIU Z J, ZHANG R Q, ZHU X P, et al. Numerical simulation of transition fillet between runner and support plate of intermediate casing [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 710-1 713.

值模拟得到应力集中的部位与试验中铸型发生破坏的部位相符。李辉等^[14]采用 ProCAST 有限元软件对 HT250 应力框铸件的铸造应力场进行了数值模拟。结果表明,落砂温度越高,铸件变形越大但残余应力越小,铸件变形随浇注温度越高变形越大。崔新鹏等^[15]运用 ProCAST 软件对框架钛合金铸件应力场进行了数值仿真,得到铸件在内部转角处出现应力集中。殷建锋等^[16]利用 ProCAST 软件对异形薄壁钛合金进气管铸件进行了数值模拟,并利用试验验证了数值模拟的可行性和准确性。目前对中介机匣流道与支板转接不同圆角处的温度场和应力场数值模拟的研究报道很少。因此,本研究以不同钛合金中介机匣流道与支板转接圆角

为对象,利用 ProCAST 软件对其进行数值模拟分析,研究圆角处温度场、热裂倾向及应力分布情况,以期减少铸件流道与支板转接圆角位置因应力集中而产生的缩松和裂纹,旨在为其应用提供参考。

1 数值仿真模型建立与前处理

1.1 数值模拟参数及模型建立

表 1 为 ZTC4 钛合金中介机匣主要工艺参数。建立较为适宜的假设条件(型壳厚度均匀、外部环境稳定等),利用 UG 三维软件对铸件进行简化处理,最

表 1 ZTC4 钛合金中介机匣主要工艺参数

Tab.1 Main process parameters of ZTC-4 titanium alloy intermediate casing

浇注温度/ K	浇注截面积/ mm	型壳厚度/ mm	型壳预热温度/ ℃	真空度/ Pa	随炉冷却时长/ h	炉膛尺寸/ m	冷却方式	模拟变量 R/ mm
1 973	φ70	12	300	0.8	2	φ2.4×2.8	空冷	3、5、7

后借助 ProCAST 软件建立有限元模型,结果见图 1。模型由铸件与型壳两部分组成,其中 1、2、3 号流道与支板转接圆角值 R 分别为 7、3 和 5 mm,网格类型均为四面体,总网格数约为 2 053 万。

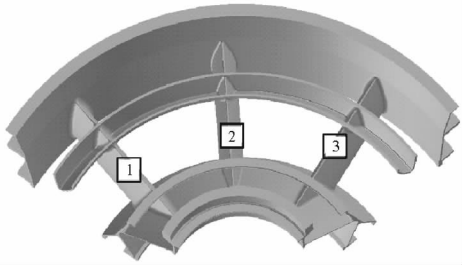


图 1 模型微元化结果

Fig.1 Micro-elementization results of model

在铸造过程中,铸件的凝固传热方式为非稳态传热且凝固传热过程较为复杂。因此,传热模型利用傅立叶导热微分方程进行表征,其数学表达式为:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$
 (1)

式中, ρ 为合金密度, kg/m³; c_p 为定压热容, kJ/(kg · K); T 为热力学温度, K; t 为时间, s; λ 为热导率, W/(m · K); Q 为热源项, W/m³; x、y、z 为三维坐标。

在铸件凝固过程中,热源项 Q 为铸件凝固潜热释放的热量,假设单位时间、单位体积内固相率为 $\frac{\partial f_s}{\partial t}$,则在凝固过程中铸件释放出的热量 Q 为:

$$Q = H \frac{\partial(\rho f_s)}{\partial t}$$
 (2)

式中, H 为凝固潜热, J/g; f_s 为固相率, %。

将式(2)代入式(1)可得:

$$\left(c_p - H \frac{\partial f_s}{\partial t} \right) \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$
 (3)

式中, c_p - H $\frac{\partial f_s}{\partial t}$ 为等价比热容。

1.2 模型参数设置

在铸造过程中,铸件与型壳分别为两种不同的目标材料,且两者在同一界面处存在温度降,为确保数值模拟结果的准确性与区别界面两端的温度,先将铸件与型壳的界面节点进行双重化处理,再分别设置初始温度与冷却边界条件,界面双重化处理见图 2。

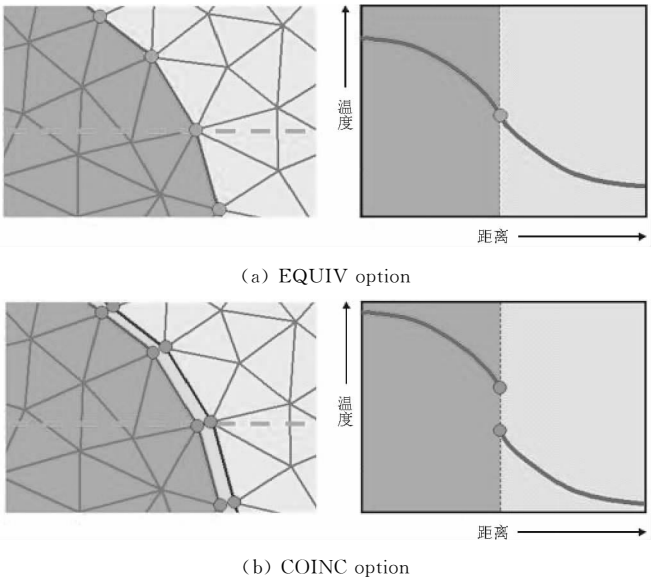


图 2 铸件与型壳相连界面节点的双重化处理

Fig.2 Dual processing of interface joint of castings and mold shells

基于钛合金与型壳材料的化学成分,利用 ProCAST 软件中 Scheil-模型、线-弹模型及数据库对其不同温度条件下的热物性参数(密度、热焓等)与力学性能参数(杨氏模量、泊松比等)进行计算,最后将所得结果耦合到钛合金中介机匣模型中。

1.3 数值求解

借助 ProCAST 软件与有限元方法对钛合金中介机匣模型进行数值模拟迭代求解。其中,因仅考虑 R 角值对铸件应力的影响,因此关闭流动模块,添加应力模块,将初始时间步长设定为 1×10^{-3} s,计算停止条件为最大计算步数 100 000,收敛精度为 1×10^{-4} ,见图 3。

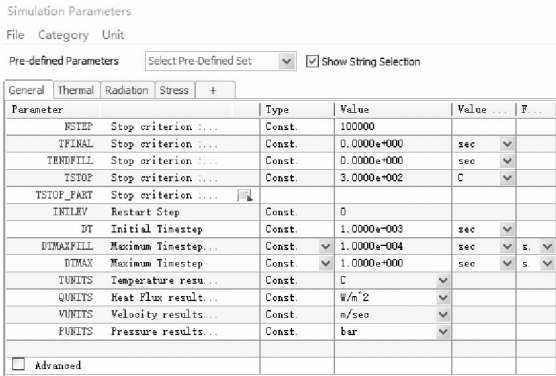


图 3 运行参数设置
Fig.3 Running parameter settings

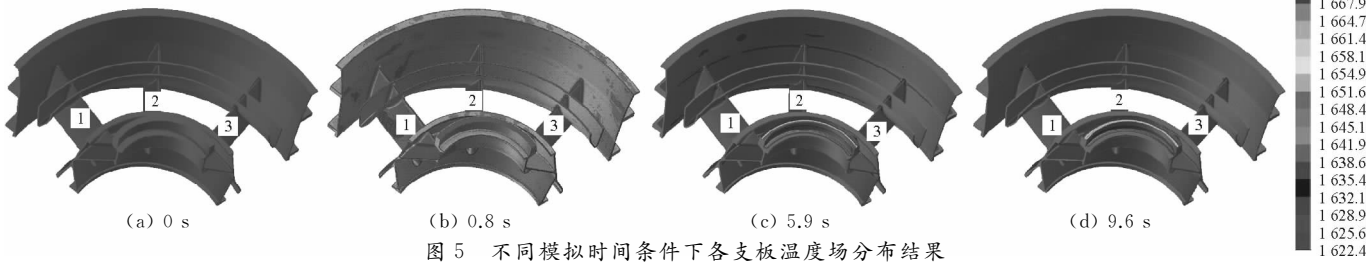


图 5 不同模拟时间条件下各支板温度场分布结果
Fig.5 Temperature field distribution of each support plate under different simulation conditions

到液相线温度以下,并向固相线温度进一步降低;当模拟时间为 5.9 s 时,1~3 号支板所处内涵道、分流环及外涵道部分区域熔体温度已低于合金固相线温度,仅存部分区域仍高于固相线温度,但不同流道与支板转接圆角处的高温区面积相差不大;当模拟时间为 9.6 s 时,各支板与外环连接处的部分区域仍未完全低于合金固相线

2 数值模拟结果与分析

2.1 中介机匣支板 R 角应力分布结果

图 4 为钛合金中介机匣支板 R 角处的应力分布。可以看出,3 个支板 R 角与铸件连接处的平均应力值分别为 251.2、250.6 和 253.1 MPa。模拟结果表明,支板 R 角处是应力集中的主要区域,且应力值基本一致。

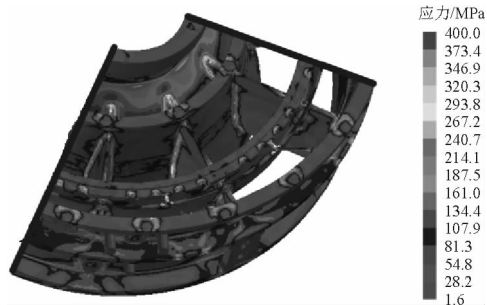
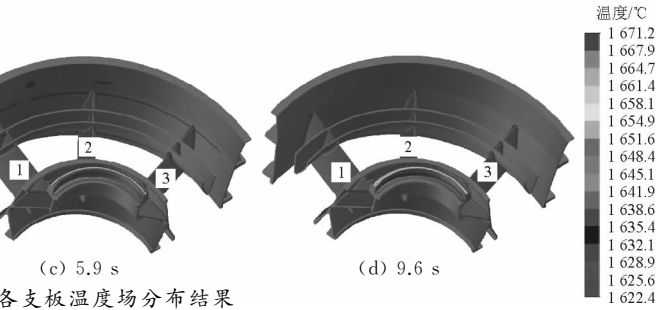


图 4 中介机匣支板 R 角处应力分布情况
Fig.4 Stress distribution at R corner of intermediate casing

2.2 温度场分布结果与分析

图 5 为不同模拟时间下各流道与支板转接圆角处的温度场分布。可以看出,当模拟时间为 0 时,合金液温度均在液相线温度以上(合金液初始温度);当模拟时间为 0.8 s 时,1~3 号支板均已由合金初始温度降低



温度,但不同流道与支板转接圆角处所剩未凝固区域面积相差不大,温度场变化基本相似。

2.3 应力场分布结果与分析

结合拟采用钛合金中介机匣的工艺参数,统计了铸件在模拟步长为 650~700 条件下的应力场分布情况,见图 6。可以看出,1~3 号支板在与外环、分流环、内环

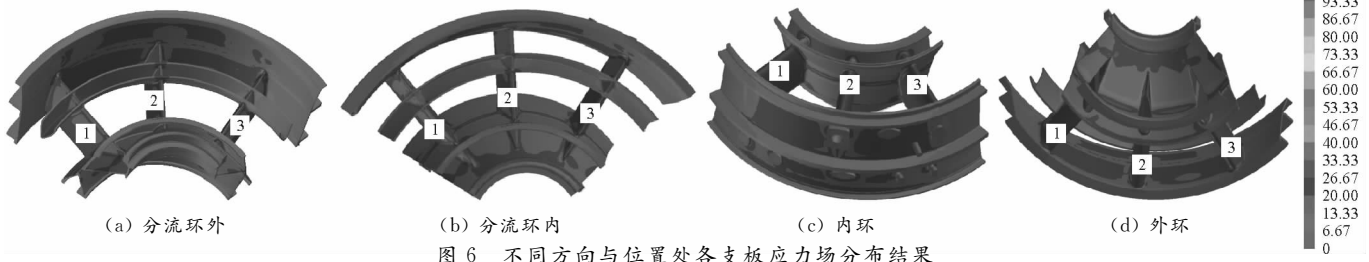


图 6 不同方向与位置处各支板应力场分布结果
Fig.6 Stress field distribution of each support plate at different directions and positions

接触部分均产生了一定的应力。其中,1 号和 3 号支板在外环与内环接触部分所产生的应力值高于分流环接触区域,而 2 号支板在分流环处所产生的应力高于 1 号和 3 号支板。

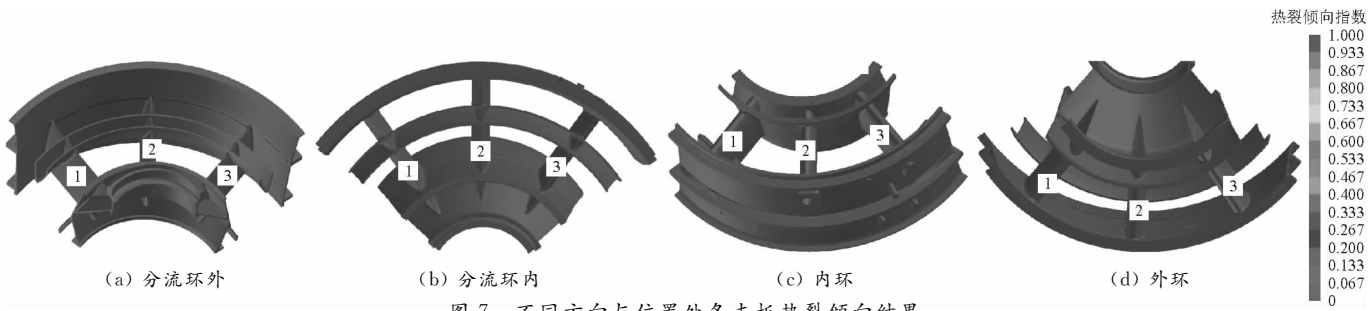


图 7 不同方向与位置处各支板热裂倾向结果

3 试验验证

利用小孔法测量得到中介机匣表面的残余应力,测量位置见图 8。将模拟得到的中介机匣表面的残余应力结果与试验进行对比分析,结果见表 2。

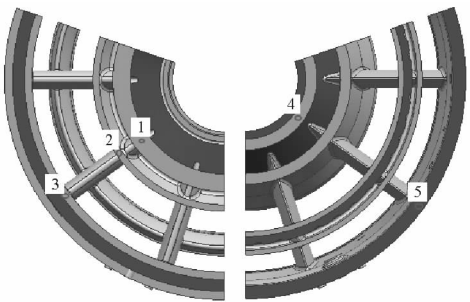


图 8 测量位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of measurement position

表 2 试验与模拟结果对比

Tab.2 Comparison of experimental and simulation results MPa			
位置	试验结果	模拟结果	误差/%
1	291.7	268.5	7.9
2	194.1	157.1	19.1
3	316.2	279.2	11.7
4	86.9	73.6	15.3
5	153.8	127.4	17.2

从表 2 可以看出,残余应力的模拟值均小于实际值,但两者误差均在 20% 以内,验证了模拟的可行性和准确性。

4 结 论

(1)不同流道与支板转接圆角处温度场变化与热裂倾向结果基本一致。

(2)在分流环应力分布中,1 号与 3 号支板所形成的应力分布优于 2 号支板。

(3)试验与模拟得到的结果基本吻合,验证了模拟的可行性及准确性。

2.4 热裂倾向结果与分析

图 7 为不同方向与位置处各支板热裂倾向结果。可以看出,1~3 号支板在与外环、分流环、内环接触部分均产生了一定的热裂倾向,但热裂区域体积相差不大。

参 考 文 献

[1] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213: 103-114.

[2] JAMES C, WILLIA M S, EDGAR A, et al. Progress in structural-materials for aerospace systems[J]. Acta Material, 2003, 51: 5 775-5 799.

[3] 楚玉东,常辉,黄东. ZTC4 钛合金机匣构件离心铸造过程的数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2012, 32(2): 133-136.

[4] ATWOOD R C, LEEPCURTIS R V. Modeling the surface contamination of dental titanium investment castings[J]. Dental Materials, 2005, 21: 178-186.

[5] 鲍芳芳,高威,冯新,等.基于专利数据的钛合金精密铸造技术研究概况[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1 370-1 376.

[6] 刘建明,郝晟淳,武卉,等.大落差长度比中介机匣气动性能试验及数值模拟[J].航空动力学报, 2022, 37(7): 1 560-1 568.

[7] 赵磊,刘锁韬,高丽敏,等.压气机中介机匣全流量工况特性的数值研究[J].推进技术, 2021, 42(11): 2 438-2 444.

[8] 吴士平,张军,徐琴,等.钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究[J].中国体视学与图像分析, 2010(2): 134-140.

[9] 郭宇航,金云学,张丽华.金属电子背散射衍射试样的制备技术[J].理化检验-物理分册, 2007, 43(8): 399-403.

[10] 孟利,杨平,李志超,等.电子背散射衍射分析中的伪对称性误标及其克服[J].中国体视学与图像分析, 2007, 12(4): 282-285.

[11] FUNK G, BOEHMER J R, NFETT F. Coupled FDM/FEM model for the continuous casting process[J]. International Journal of Computer Application in Technology, 1997, 7(3-6): 214-228.

[12] 徐达鸣,李鑫,安阁英,等.钛合金离心精密铸造充型过程计算机模拟[J].铸造, 2002(1): 39-43.

[13] 李丽丽.钛合金铸造热应力有限元分析及实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.

[14] 李辉,时建松,张爱琴.应力框热应力数值模拟及变形分析[J].铸造, 2010, 59(1): 38-41.

[15] 崔新鹏,张晨,范世玺,等.钛合金框架铸件铸造变形和应力的数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2015, 35(3): 257-259.

[16] 殷建锋,李峰,南海.异形薄壁钛合金铸件熔模铸造成形数值模拟及验证[J].铸造, 2022, 71(1): 71-76.

(编辑:彭瑾)