

熔模铸造钛合金中介机匣应力数值模拟

刘珍君¹ 朱小平¹ 栗尼娜² 徐永涛³ 孙瑛聪² 张荣强¹ 陈正阳⁴
(1.河北钢研德凯科技有限公司;2.中国航发贵州航空发动机设计研究所;
3.中国航发贵州黎阳航空动力有限公司;4.北京钢研高纳科技股份有限公司)

摘 要 利用 ProCAST 软件对熔模铸造 ZTC4 钛合金中介机匣应力进行数值模拟,分析铸件在真空冷却、室温冷却、型壳处理和浇注系统处理铸造工艺流程中的应力分布情况。模拟结果表明,在真空冷却和室温冷却阶段,铸件充型过程较为平缓稳定,随温度降低应力值增大;当铸件冷却至室温时,型壳对铸件的应力分布影响较小,且铸件应力分布的变化趋势与规律不再发生改变;在浇注过程中,前后端面正常区域的应力分布比浇口和冒口处稳定,支板圆角处是应力集中的主要区域。

关键词 中介机匣;数值模拟;应力分布;熔模铸造

中图分类号 TG249.5;TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Stress in Investment Casting Titanium Alloy
Intermediate Casing

Liu Zhenjun¹, Zhu Xiaoping¹, Li Nina², Xu Yongtao³, Sun Yingcong², Zhang Rongqiang¹, Chen Zhengyang⁴
(1. Hebei Gangyan Dekai Technology Co., Ltd.; 2. China Aviation Development Guizhou Aero-Engine
Design Institute; 3. China Aviation Development Guizhou Liyang Aviation Power Co.,
Ltd.; 4. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd.)

Abstract: The numerical simulation of the stress of investment casting titanium alloy intermediate casing was carried out by the ProCAST software, and the stress distribution of the castings during the process of vacuum cooling, room temperature cooling, mold shell treatment and gating system treatment was analyzed. The simulation results indicate that in the vacuum cooling and room temperature cooling stages, the filling process of the casting is relatively smooth and stable, and the stress value is increased as the temperature decreases. When the castings were cooled to room temperature, the effect of the shell on the stress distribution of the casting could be neglected, and the variation trend and law of the stress distribution of the casting has no more change. In the gating stage, the stress distribution in the normal area of the front and rear end is more stable than that at the gate and riser, and the round corner of the support plate suffers the main stress concentration.

Key Words: Intermediate Casing, Numerical Simulation, Stress Distribution, Investment Casting

中介机匣位于航空发动机中部、风扇机匣和高压压气机之间,是发动机的连接和过渡通道,属于航空发动机最重要的承力结构,直接影响着航空发动机的性能,需具有高可靠性和长寿命。中介机匣需在高温、高压下工作,工况条件极其恶劣,而在铸造过程中其往往存在着铸造裂纹和应力集中。这些缺陷会导致其力学性能急速下降,在残余应力和外部环境共同作用下容易产生裂纹,甚至导致开裂。因此对中介机匣进行应力分析十分重要。

数值模拟技术能够辅助工艺人员在铸造过程中对铸件生产工艺的设计过程进行分析,结合已有的经验,经过优化工艺,缩短设计和试制周期,降低产品成本^[1~3]。FUNK G 等^[4]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可行性的结论,但计算过程极为复杂。朱慧等^[5,6]采用 ANSYS 对柴油机发动机缸体铸件进行了热应力场数值模拟,发现将气缸处砂芯考虑为部分刚体的应力和变形远大于将砂芯考虑为完全退让性

收稿日期:2022-04-08;修改稿收到日期:2022-09-02
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,朱小平,栗尼娜,等. 熔模铸造钛合金中介机匣应力数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 129-134.
LIU Z J, ZHU X P, LI N N, et al. Numerical simulation of stress in investment casting titanium alloy intermediate casing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 129-134.

条件的结论,进一步对热应力场有了更加深刻的认识。马维策^[7]采用 ProCAST 软件对大圆锭半连铸凝固过程进行了应力数值模拟,得到降低铸造速度、浇注温度和冷却强度,都将使铸锭的纵向应力减小的结论。时建松等^[8]利用 ProCAST 软件对发动机缸体在不同工艺参数下残余应力进行了数值模拟,发现铸件残余应力随落砂温度增加而减小,且浇注温度越高,铸件变形越大。洪耀武等^[9]采用 ProCAST 软件对熔模铸造过程中调节片的应力进行了模拟,发现铸件在裂纹缺陷处的凝固速度较慢和应力较大。楚玉东等^[10]采用 ProCAST 软件对不同条件下 ZTC4 钛合金机匣应力场进行模拟,发现铸型预热温度对铸件的残余应力影响最大。崔新鹏等^[11]运用 ProCAST 软件对框架钛合金铸件应力场进行模拟,发现铸件在内部转角处出现应力集中;基于 ProCAST 软件对钛合金骨架进行了应力模拟,发现在铸件外围发生变形,并进行了验证^[12]。虽然研究者们用 ProCAST 软件对钛合金铸件的应力进行了大量的研究,但其研究方向过于单一。由于钛合金在高温条件下的力学性能尤其是糊状区力学性能很难预知,目前对钛合金熔模铸造工序过程中应力模拟研究的报道较少。因此,本课题以钛合金中介机匣为研究对象,利用 ProCAST 软件对铸件在真空冷却、室温冷却、型壳处理、浇注系统等工艺流程的应力分布进行模拟,研究在不同阶段下铸件应力的分布情况,以期减少铸件裂纹提供参考。

1 试验材料及方法

选用 ZTC4 钛合金中介机匣进行应力模拟,利用 UG 三维造型软件对钛合金中介机匣进行几何建模,三维模型见图 1。机匣尺寸为 $\phi 760\text{ mm}\times 320\text{ mm}$,铸件支板和流道位置壁厚为 3~5 mm,法兰颈部壁厚为 10~15 mm,其化学成分见表 1。型壳材料选用莫来砂,型壳厚度为 10 mm,浇注温度为 1 750 ℃,型壳预热温度为 300 ℃。利用 JmatPro 软件和 ProCAST 软件数据库,计算 ZTC4 合金在不同温度条件下的热物性参数和力学性能。

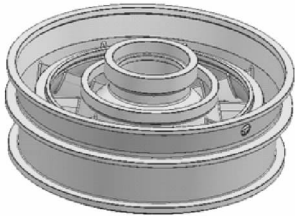


图 1 中介机匣三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D model of intermediate casing

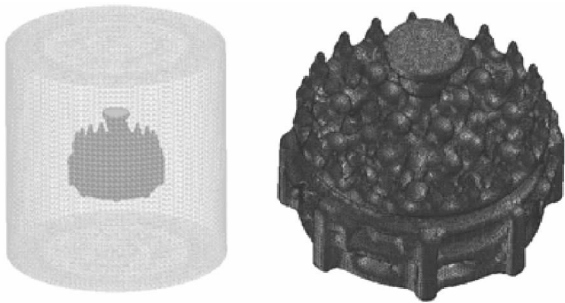
表 1 ZTC4 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZTC4 alloy %										
ω_B										
Al	V	Si	N	O	Fe	Zr	Mo	C	其他 微晶元素	Ti
6.1	3.9	0.016	0.04	0.11	0.15	2.02	1.22	0.01	0.1	余量

2 中介机匣数学模型搭建

基于钛合金中介机匣的尺寸、结构与铸造特性等因素,建立适宜的假设条件(型壳厚度均匀、外部环境稳定等),然后利用 UG 软件对铸件和浇注系统进行模型处理,借助 ProCAST 软件建立有限元模型,其模型的网格剖分处理结果见图 2。

模型由 3 部分组成,第 1 部分为铸件与浇注系统,第 2 部分为型壳,第 3 部分为真空环境,网格类型均为四面体,剖分总网格数约为 881 万。



(a) 整个模型的网格剖分 (b) 铸件及浇注系统网格剖分

图 2 几何模型的微元化结果

Fig.2 Micro-elementalization result of the geometric model

铸件的传热较为复杂且属于非稳态传热方式。因此,利用傅立叶导热微分方程表征其传热模型,其傅立叶导热微分方程的数学如下:

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

式中, ρ 为合金的密度, kg/m^3 ; c_p 为比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为传热温度, K ; t 为时间, s ; λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Q 为热源项, W/m^3 ; x, y, z 为传热方向的三维坐标。

对于热源项 Q ,在铸件凝固过程中表示为凝固潜热放出的热量,假定单位体积、单位时间内固相率为 $\frac{\partial f_s}{\partial t}$,则铸件凝固过程中释放出的热量 Q 为:

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

式中, H 为凝固潜热, W/m^3 ; f_s 为固相率;将式(2)代入式(1)得:

$$\lambda = \frac{\partial T}{\partial z} \tag{3}$$

在表征整体铸件的应力分布情况时,一般采用等效应力计算模型,其数学表达式与应力分布计算原理分别如下:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (4)$$

式中, σ_e 为等效应力,Pa; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一主应力、第二主应力、第三主应力,Pa; τ_{ij} 为剪切应力,Pa。

3 数值模拟结果与讨论

3.1 铸件在浇注-真空冷却阶段的数值模拟

图 3 为不同浇注时长下钛合金中介机匣的充型过程。可以看出,当浇注 3 s 时,浇注系统中的底浇盘部分基本被合金液充满,且各处合金液的上升速率较为平缓稳定。当浇注 6 s 时,铸件内环与外环仍处于充型阶段,而中间环形区域冒口已经开始充填,此时浇注

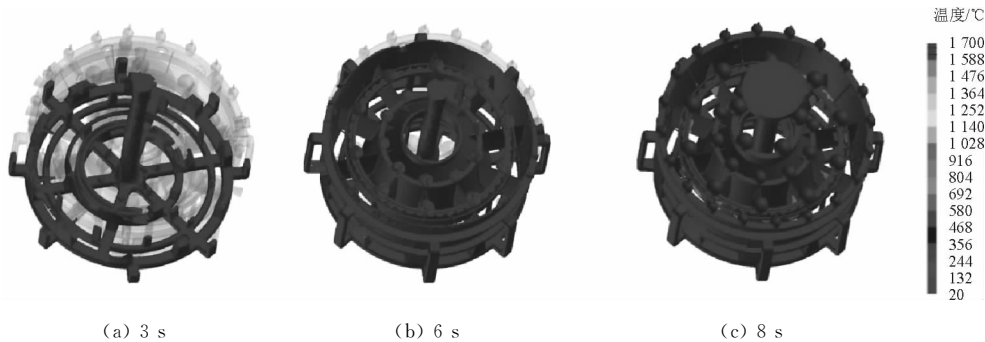


图 3 不同浇注时长时钛合金中介机匣充型过程

系统内的各处液面高度基本保持一致。当浇注 8 s 时,浇注系统已完全充满,此时充型过程结束,整体浇注系统开始逐渐凝固。由此可见,本次的充型过程较为平缓稳定。

图 4 为钛合金中介机匣凝固过程的应力分布。可以看出,当凝固时间为 3 000 s 时,凝固过程结束,此时浇注系统内部先凝固的区域已经产生应力,其值均小于 140 MPa。当 10 000 s 时,铸件产生一定的应力,且在

不考虑冒口应力的条件下,铸件外环应力最大,为 300~500 MPa,内圈应力最小,为 150~300 MPa。当 17 000 s 时,铸件各处的应力相较于 10 000 s 时的增幅显著,此时在不考虑冒口应力的条件下,铸件外圈应力仍为最大,为 550~650 MPa,铸件内环凸台区域处的应力最小,为 370~500 MPa,铸件各处应力分布规律已经凸显。由此可见,随铸件的温度逐渐降低,其应力逐渐增大,且应力分布规律明显。

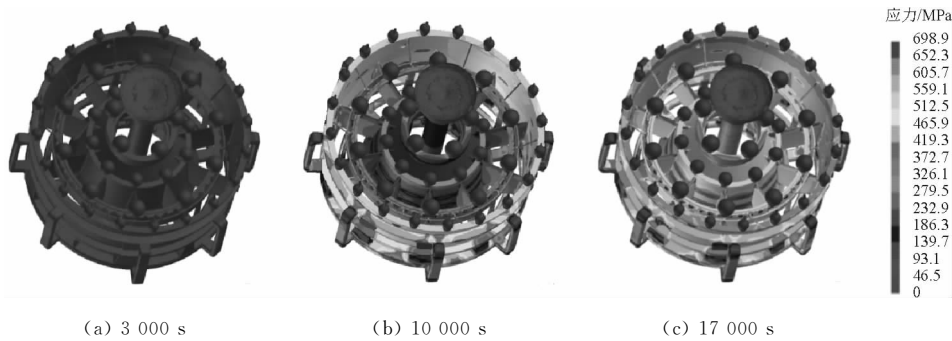


图 4 不同时间步长钛合金中介机匣应力分布情况

3.2 铸件在室温空冷阶段的数值模拟

图 5 为钛合金中介机匣铸件在室温空冷下的初始温度场。表 2 为铸件各区域初始温度的统计结果。通过图 5 和表 2 可知,铸件 A~F 区域处的平均温度分别为 416.6、473.6、438.5、372.8、279.3、333.3 °C,平均温度为 385.6 °C。结合实际铸件的散热过程与条件可知,铸件外环的温度场覆盖范围低于铸件内环,且实际铸件破

真空处理后,其温度为 300~500 °C,表明本阶段所选取铸件温度场的初始值进行迭代计算符合实际铸造工艺流程。

图 6 为在室温空冷阶段钛合金中介机匣的最终温度场。可以看出,铸件整体的温度区间为 25~35 °C,表明铸件整体已由破真空处理时的温度冷却到了室温空冷时的温度。

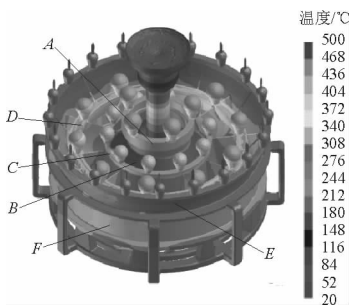


图 5 室温空冷阶段中介机匣的初始温度场
Fig.5 Initial temperature field of the intermediate casing in the air-cooling stage at room temperature

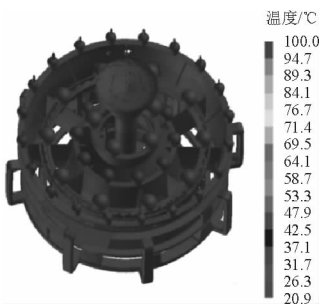


图 6 室温空冷阶段中介机匣的最终温度场
Fig.6 Final temperature field of intermediate casing in the air-cooling stage at room temperature

表 2 铸件各区域初始温度统计

Tab.2 Statistics of initial temperatures in each area of the casting						
位置	点 A	点 B	点 C	点 D	点 E	平均值
A	413.9	414.2	415.2	418.5	421.4	416.6
B	473.2	471.5	473.7	474.3	475.5	473.6
C	425.4	455.1	428.3	449.4	434.7	438.5
D	373.9	382.5	359.2	375.8	372.6	372.8
E	265.7	279.8	294.1	280.4	276.4	279.3
F	331.3	325.5	328.3	344.1	337.3	333.3

图 7 为钛合金中介机匣铸件在室温空冷阶段不同时间的应力分布。可以看出,在时间步长为 3 000 s 时,且不考虑冒口应力的条件下,铸件外环区域应力最大,为 550~600 MPa,铸件内环凸台区域应力为 300~400 MPa;铸件中间环形区域外壁处存有应力最小区域,为 200~230 MPa。在时间步长为 10 000 s 和 17 000 s 时,铸件各处的应力值均在原有基础上明显的增长,但应力分布规律并未发生明显的改变。由此可见,铸件各处的应力分布随温度的降低而增大,且应力分布规律更

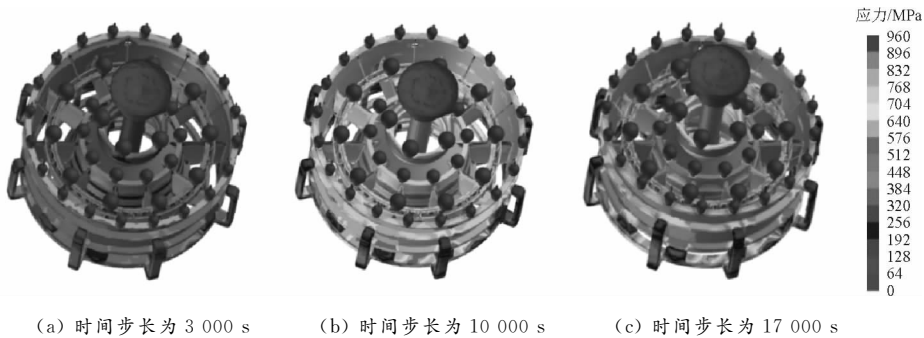


图 7 室温空冷阶段不同时间步长下中介机匣应力分布
Fig.7 Stress distribution of the intermediate casing at different time in the air-cooling stage at room temperature

为明显。

3.3 铸件在型壳处理后的数值模拟

图 8 为去型壳后不同时间的钛合金中介机匣的应力分布。可以看出,当铸件去型壳后,且不考虑冒口应力条件下,铸件在时间步长为 3 000、10 000、17 000 s

时,3 个阶段的应力分布基本相似。其中,铸件内环凸台处的应力为 520~670 MPa;铸件中间环形区域外壁处存在应力最小区域,为 310~480 MPa;铸件外环区域应力最大,为 700~830 MPa。由此可见,当铸件冷却到室温时,型壳对于铸件应力分布的影响非常小,且铸件

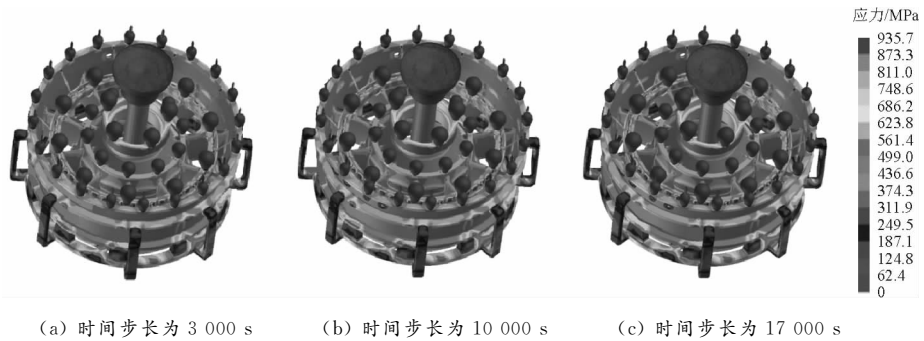


图 8 模壳处理后不同时间步长下中介机匣应力分布情况
Fig.8 Stress distribution of intermediate casing at different steps after mold shell treatment

应力分布的变化趋势与规律基本不变。

3.4 铸件在浇注系统处理后的数值模拟

图 9 为钛合金中介机匣的前端面应力分布。表 3 为钛合金中介机匣的前端面应力分布统计结果。结合图 9 与表 3 可知,在铸件前端面 G~K 部分正常区域的平均应力值分别为 68.5、22.6、32.6、37.4、25.7 MPa,平均为 20~70 MPa。然而,铸件前端面 1~5 部分浇口区域(浇口与铸件连接处)的平均应力为 150~340 MPa。可见浇口区域的平均值大于正常区域,表明正常区域的应力分布较为稳定,浇口处的应力分布较为紊乱。

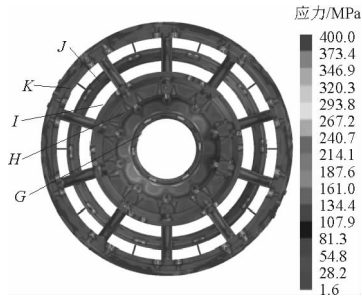


图 9 中介机匣前端面应力分布

Fig.9 Stress distribution of intermediate casing on the front-end surface

表 3 钛合金中介机匣的前端面应力分布情况
Tab.3 Stress distribution statistics of titanium alloy intermediate casing on front-end surface MPa

位置	区域	点 G	点 H	点 I	点 J	点 K	平均值
G	正常区域	77.9	69.2	57.9	65.2	72.5	68.5
	浇口区域	196.2	282.9	264.3	296.6	302.4	268.5
H	正常区域	27.1	23.7	19.4	20.3	22.6	22.6
	浇口区域	178.1	221.5	87.2	143.8	154.8	157.1
I	正常区域	26.1	48.7	26.8	37.5	23.9	32.6
	浇口区域	388.5	312.9	336.1	383.8	268.3	337.9
J	正常区域	40.5	43.9	33.7	30.5	38.4	37.4
	浇口区域	320.4	238.4	392.7	314.5	268.6	306.9
K	正常区域	21.9	26.4	34.1	27.4	18.5	25.7
	浇口区域	229.3	384.7	366.2	150.7	265.3	279.2

图 10 为钛合金中介机匣的后端面应力分布。表 4 为钛合金中介机匣的后端面应力分布统计结果。结合图 10 与表 4 可知,在铸件后端面 L~P 部分正常区域的平均值为 8.4、26.1、43.2、74.1、27.4 MPa,其平均值为 8~75 MPa。然而,统计得到铸件后端面 6~10 部分冒口区域(冒口与铸件连接处)的平均为 70~315 MPa。铸件后端面 6~10 部分冒口区域的平均值大于正常区域,表明正常区域的应力分布较为稳定,冒口处的应力分布较为紊乱。

由图 9、图 10 和表 3、表 4 进一步对比可得,造成前后端面正常区域应力分布比浇口和冒口处稳定的原因可是由于浇口和冒口区域内的合金液较正常区域所需凝固时间长、浇口和冒口与铸件连接处 R 角值、接触面

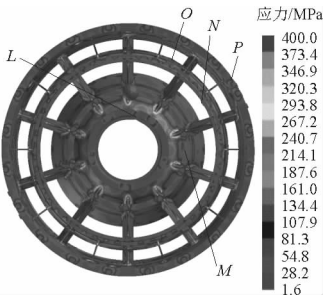


图 10 中介机匣后端面应力分布情况

Fig.10 Stress distribution of intermediate casing on the rear face

表 4 钛合金中介机匣的后端面应力分布情况
Tab.4 Stress distribution statistics of titanium alloy intermediate casing on the rear surface MPa

位置	区域	点 L	点 M	点 N	点 O	点 P	平均值
L	正常区域	8.7	8.9	9.3	7.2	7.7	8.4
	冒口区域	75.6	94.8	34.3	66.8	96.4	73.6
M	正常区域	27.1	19.5	24.7	31.7	27.6	26.1
	冒口区域	155.4	54.6	82.4	93.4	188.1	114.8
N	正常区域	41.2	37.6	62.5	39.3	35.6	43.2
	冒口区域	77.1	95.4	86.8	67.7	49.7	75.3
O	正常区域	89.8	64.5	92.9	68.4	54.7	74.1
	冒口区域	237.9	349.2	281.2	300.2	385.6	310.8
P	正常区域	32.2	17.8	26.1	38.8	22.1	27.4
	冒口区域	212.2	96.6	63.3	157.4	107.4	127.4

积大小和合金液流动速率等因素的耦合影响导致。

图 11 为钛合金中介机匣支板 R 圆角处与外环内外壁的应力分布。表 5 为钛合金中介机匣支板 R 圆角处与外环内外壁的应力分布统计结果。结合图 11 与表 5 可知,从内环到外环的支板 R 圆角与铸件连接处的平均应力值分别 253.2、155.6、243.1、223.7 MPa,平均值远大于表 3 和表 4 所统计铸件正常区域,表明支板圆角处是应力集中的主要区域。铸件外环的中部区域(即位置 15 和位置 16)内外壁的平均应力值分别为 159.6、113.1 MPa,其内壁处的平均应力约为外壁处的 1.4 倍。

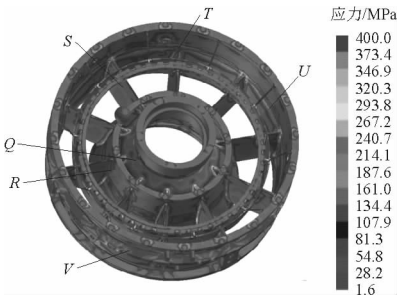


图 11 中介机匣支板 R 圆角处与外环内外壁的应力分布情况

Fig.11 Stress distribution at R corner of intermediate casing support plate as well as the inner and outer walls of the outer ring

对图 11 与表 5 进一步分析可知,支板与铸件连接部分的 R 圆角处的应力值普遍较高,其直接影响周围区域内的应力分布,结合铸件自身的结构特性,发现在

支板 R 圆角处附近区域的应力值较高。

表 5 中介机匣支板 R 圆角处与外环内外壁的应力分布

Tab.5 Stress distribution statistics of the titanium alloy intermediate casing support plate at R corner as well as the inner and outer walls of the outer ring						MPa
位置	点 R	点 S	点 T	点 U	点 V	平均值
Q	312.5	135.7	163.6	394.2	260.1	253.2
R	226.5	205.3	138.6	83.4	124.3	155.6
S	188.9	397.9	279.6	100.9	248.1	243.1
T	285.3	307.4	160.5	148.1	217.1	223.7
U	240.2	215.6	179.6	56.3	106.1	159.6
V	97.9	112.3	84.9	148.8	121.6	113.1

4 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 12。将模拟得到的结果与试验进行对比分析，其结果见表 6。

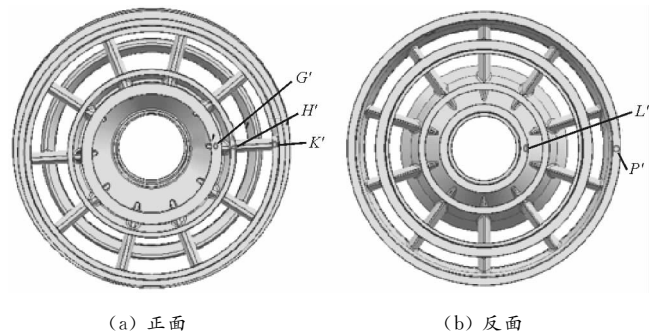


图 12 测量位置示意图

Fig.12 Schematic diagram of measuring point

表 6 试验与模拟结果对比

Tab.6 Comparison of experimental and simulation results			
位置	应力试验结果/MPa	应力模拟结果/MPa	误差/%
G'	291.7	268.5	7.9
H'	194.1	157.1	19.1
K'	316.2	279.2	11.7
L'	86.9	73.6	15.3
P'	153.8	127.4	17.2

从表 6 可知，小孔法测量的残余应力值均大于模拟得到残余应力的值，但两者误差均在 20% 以下，进而表明模拟的可行性。

5 结 论

(1)熔模铸造 ZTC4 钛合金中介机匣在浇注-真空冷却和室温冷却两个阶段，铸件充型过程平缓稳定，应力值随温度降低而增大。

(2)在型壳处理阶段，当铸件温度达到室温时，铸件的应力分布情况几乎不受型壳的影响，且铸件应力分布的变化趋势与规律不变。

(3)钛合金中介机匣在浇注系统处理阶段，前后端面浇口和冒口处应力分布较其他区域紊乱，支板的 R 角处为应力集中的主要区域。

(4)试验与模拟结果基本符合，误差在 20% 以内，验证了模拟的可靠性。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 朱慧,黄天佑,康进武.两种不同约束条件下发动机缸体铸件热应力场的数值模拟[J].铸造, 2006, 55(6): 604-607.

[6] 朱慧,康进武,黄天佑.基于有限差分网格的发动机缸体铸件热应力模拟[J].铸造技术, 2005, 26(7): 618-621.

[7] 马维策.7050 铝合金大圆锭半连铸凝固过程数值模拟及裂纹倾向性分析[D]. 长沙:中南大学, 2008.

[8] 时建松.发动机缸体残余应力的数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010.

[9] 洪耀武,王铁军,韩大平,等.调节片熔模铸造过程的应力数值模拟[J].中国有色金属学报, 2012, 22(7): 1 897-1 903.

[10] 楚玉东,常辉,黄东,等.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.

[11] 崔新鹏,刘建伟,王红,等.钛合金精密铸造型壳力学参数与应力模拟[J].铸造, 2020, 69(5): 506-509.

[12] 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.

(编辑:刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号

- 微官网
- 微商城
- 本刊会议
- 收录动态
- 稿件系统

- 行业动态
- 铸造前沿
- 经典案例
- 铸造学堂
- 专利与发明

- 联系我们
- 免费推广
- 铸造职场
- 产品库
- 企业库