

高温合金机匣精密铸造工艺研究

张家东¹ 王安国² 张峻槐² 郭建辉² 宿纯文² 高云保¹ 王增睿¹

(1. 中国机械研究总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 沈阳 110022; 2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘要 以K4169材质机匣的熔模铸造工艺为对象, 探究采用莫来石型壳材料(型壳厚度约为15 mm)双底环式浇注系统时, 不同浇注温度、型壳预热温度和充型时间下生产该类铸件的可行性。使用ProCAST、Solidworks软件建模仿真, 得到了一种较为可行的工艺, 并验证了熔模铸造生产该类铸件的可行性。结果表明, 在熔模铸造过程中, 当浇注温度低而型壳温度较高时, 金属液充型稳定性下降; 浇注温度高会导致金属液在充型过程中出现紊流。经过多组数据模拟发现, 当浇注温度为1 500 ℃, 型壳预热温度为1 000 ℃, 浇注时间为30.75 s时, 可生产出合格的机匣铸件。

关键词 高温合金; 熔模铸造; 航空机匣; 铸造工艺

中图分类号 TG249.5; TG146.1⁺5; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240386

Investment Casting Process of Superalloy Engine Casing

ZHANG Jiadong¹, WANG Anguo², ZHANG Junhui², GUO Jianhui², SU Chunwen², GAO Yunbao¹,
WANG Zengrui¹

(1. National Key Laboratory of High-end Equipment Casting Technology, Shenyang Research Institute of Foundry, CAM, Shenyang 110022; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang 110136)

Abstract: Aiming at the investment casting process of K4169 engine casing, the feasibility of producing such castings under different pouring temperatures, mold preheating temperatures, and filling durations were explored taking mullite as mold shell, with a mold shell thickness of 15 mm and double bottom ring casting system. A feasible process was obtained through simulation by ProCAST and Solidworks software, and the feasibility of producing such castings through investment casting was verified. The results indicate that the lifting stability of metal liquid level is decreased with lower pouring temperature and higher mold shell temperature during investment casting process, while high pouring temperature leads to turbulent flow in metal liquid during filling process. After multiple groups of simulation data, it is found that the qualified casing can be produced with pouring temperature of 1 500 ℃, mold preheating temperature of 1 000 ℃, and pouring duration of 30.75 s.

Key Words: Superalloy, Investment Casting, Aircraft Engine Casing, Casting Process

高温合金机匣类铸件(如燃烧室机匣、扩压器及涡轮后机匣等)作为航空发动机、燃气轮机等装备的关键热端部件, 其结构和性能对于发动机性能的提升极为关键^[1-2]。机匣材料根据工作环境, 要求具有足够的高温强度、良好的比强度、比刚度, 因此目前航空发动机、燃气轮机的机匣材料以高温合金为主^[3-5]。随着熔模铸造技术的不断发展, 其应用也从最初的航空、军工等行业逐步扩展到了其他行业, 是用于生产高温合金铸件

的重要方式之一^[6-9]。

本研究针对K4169高温合金铸造过程中的关键技术问题, 提出采用熔模铸造技术来制造一种具有最大直径为 $\phi 794$ mm, 最小壁厚为10.4 mm的锥形后机匣的适宜性方法。通过分析该铸件的结构, 初步制定该铸件的熔模铸造工艺, 使用ProCAST软件对铸造过程进行模拟, 同时利用正交试验, 分析浇注温度、型壳预热温度和充型时间对金属液充型过程和铸件中缺陷分

收稿日期: 2024-09-24; 修订日期: 2024-11-18

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2025ZD1607200); 辽宁省教育厅基金资助项目(LJKMZ20220542)

第一作者: 张家东, 男, 1978年出生, 高级工程师, E-mail: zjd_1978@163.com

通信作者: 王安国, 男, 1979年出生, 教授, E-mail: 13604188303@163.com

引用格式: 张家东, 王安国, 张峻槐, 等. 高温合金机匣精密铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 795-800.

ZHANG J D, WANG A G, ZHANG J H, et al. Investment casting process of high temperature alloy engine casing[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2026, 46(5): 795-800.

布的影响,旨在为相关生产提供参考。

1 机匣铸造工艺设计

1.1 高温合金机匣几何参数

航空发动机涡轮后机匣材质为 K4169 合金,其质量为 300.1 kg,最大直径为 $\phi 794$ mm,最薄壁厚为 10.4 mm。机匣锥壁为大面积薄壁结构,锥壁顶端和中间位置各有一圈环形法兰。机匣本体由内外环以及中间的 6 处空心薄壁支板组成,内环壁为圆柱形,外环壁存在一定锥度,外环壁进排气侧各有一厚壁环形法兰。机匣共有 6 个支板,其中 5 个支板内部分别有 4 个空心管相连内环和外环;1 个支板在内部有两个空心管,分别为 1 个圆柱形空心管和一个半圆柱式空心管,无任何其他附属结构。铸件形状见图 1。

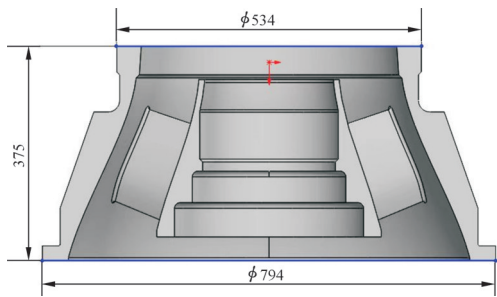


图 1 高温合金机匣三维模型剖面图
Fig.1 3D profile of superalloy casing

1.2 浇注方式

铸件整体为回转体,质量和尺寸较大且存在多处薄壁,壁厚突变显著且变化情况复杂,考虑到型壳的强度有限且生产困难,为保证顺序凝固、平稳充型,需要

采用合理的浇注系统,以防止出现浇不足、缩孔等问题。为保证铸件质量,设计了两种浇注系统,见图 2。方案 1 为普通底注式浇注系统(见图 2a),特点是耗材少、结构简单、使用方便;缺点为叶片会承受较大高度差,且各处型壳厚度难以保证一致,导致叶片质量下降。方案 2 为双环底注式浇注系统(见图 2b),由直浇道和上下两组横浇道与内浇道组成,此种浇注系统虽然设置比较复杂,但其具备液面上升平稳性高、叶片压力小,应变和对型壳的冲击力小等特点。此外,锥形后机匣铸件往往具有几何热节偏中上部、气体难排出的特点。综合考虑后,决定用小锥形朝上的双环底注式浇注系统。

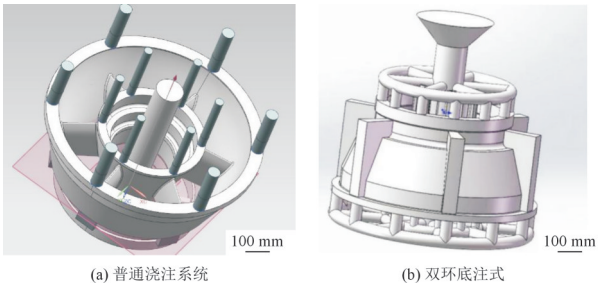


图 2 两种浇注系统三维图
Fig.2 3D diagram of different gating systems

1.3 机匣模拟边界条件设计

采用 K4169 高强镍基高温合金,其主强化相为 γ'' ,副强化相为 γ' 相。K4169 合金因其在 $-253\sim 650$ $^{\circ}\text{C}$ 温区有高强塑性、优异的耐腐蚀、耐辐射、可焊接、可成形、抗应变时效开裂等特性而被广泛用于航空发动机的叶片、机匣等部件。K4169 合金的化学成分见表 1,热物性参数见表 2^[10-14]。

表 1 K4169 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of K4169 alloy %

w_B											
Ni	Mo	Nb	Cr	Si	S	Co	Al	C	Mn	P	Fe
50~55	2.8~3.3	4.4~5.4	17~21	≤ 0.35	≤ 0.015	≤ 1.0	0.3~0.7	0.02~0.08	≤ 0.35	≤ 0.015	余量

表 2 K4169 合金的热物性参数
Tab.2 Thermophysical parameters of K4169 alloy

液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	溶质初始浓度/%	溶质再分配系数	液相线等效斜率	共晶点等效浓度/%	液相扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	固相扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	吉布斯汤姆逊系数	界面传热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1 339	1 269	47.5	0.762	-3.374	0.545	2.0×10^{-9}	5.0×10^{-10}	1.9×10^{-7}	1 000

从化学组成及物性分析可知,K4169 高温合金在铸态时存在明显的偏析趋势。为此,需对该工艺进行优化计算,以寻找适当的浇注温度及凝固冷却速度来降低合金元素偏析。在此基础上,通过对浇注体系的优化,实现连续凝固,保证浇注体系的高效补缩,使可能出现的缩松组织尽量细化、分散,提高其冶金品质,保

障其力学性能。在选择浇注温度时,应综合考虑材料的物理化学特性和铸坯的结构。在浇注温度下,要保证金属液的流动性好,并有利于铸件中的杂质上浮,以及尽量减少诸如气孔、夹杂物之类的缺陷,在凝固前使熔体填满型腔。但在铸造过程中,铸造温度越高,铸件的冷却速率越慢,凝固时间也就越长。根据 K4169 合

金的理化性能,选用浇注温度为 $(1\,500\pm 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了防止铸造过程中产生的各种缺陷如冷缝、开裂等,浇注前应先对型壳进行预热,预热温度为 $(1\,000\pm 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

铸造过程涉及材料热物性参数和边界条件变化较多,特别是界面传热系数无法直观得到,因此通过铸造或凝固过程中的实际高温数值来反算界面传热系数。将建好的机匣三维模型导入ProCAST中进行网格划分、设置模拟参数等处理。由于传统砂型重力铸造工艺无法保证机匣生产所要求的精度和表面质量,而生产实际中常用的熔模铸造工艺又因为型壳强度不足难以生产高密度的中型铸件,本研究采用莫来石作为型壳材料,由于该铸件质量远超传统熔模铸造所生产的铸件,为防止铸件在凝固和冷却过程中收缩致使型壳开裂,将型壳厚度设为15 mm。根据有关研究^[15-20],设定金属液与铸型、铸型与大气的传热系数分别为1 000、20 W/(m²·K),模具冷却方式为室温空冷。

1.4 浇注时间和液面上升速度的确认

机匣的内环、外环、支板壁和锥壁等都是大面积的薄壁结构,且质量较大,浇注温度较高,浇注系统复杂,需要在保证充型的同时,通过快速浇注以确保金属液能够在最短的时间内被填充到型腔中,从而能够有效地控制型腔的温度,防止出现浇不足、夹杂等问题。一般情况下,对壁厚为10 mm以上、复杂结构的铸件,其浇注时间 t 应该满足^[4,12]:

$$t=S\times\sqrt[3]{\delta}m\tag{1}$$

式中, S 为经验系数; δ 为平均壁厚,mm; m 为浇注质量,kg。

该铸件为薄壁件,最小壁厚为10.4 mm,根据设计经验及环套环涡轮类承力结构件的结构特点,经验系数 S 取1.63,由此计算的浇注时间为28.75 s。

金属液在型腔中的上升速度 v 为:

$$v=h/t\tag{2}$$

式中, h 为铸件的浇注高度,mm。

根据统计经验,对于大型铸件推荐的浇注速度见表3。机匣铸件本体高度为375 mm,直浇道及直浇道窝高度为850 mm,则浇注总高度约为850 mm,按浇注时间为28.75 s计算,液面上升速度为29.57 mm/s。对于机匣大面积壁厚 $\delta>4\text{ mm}$ 的结构特征,该浇注液面

表3 金属液推荐上升速度

Tab.3 Lifting rate of liquid metal

壁厚/mm	速度/(mm·s ⁻¹)
<4	30~100
4~10	20~30
10~40	10~20
>40	8~10

上升速度符合表3的推荐速度。考虑到浇注时间的波动和铸件的质量,预设时间控制在26.75~30.75 s,由此计算的金属液上升速度为27.64~31.78 mm/s,该速度范围也符合表3的推荐速度^[4]。

2 模拟方案设计

模拟过程以正交试验为基础、最小试验次数为目标,通过对试验结果分析,来判断各因素对最终目标值的影响,从而得到最优的工艺参数组合。具体试验因素水平及仿真数据参数见表4^[18-19,21]。

表4 模拟试验方案

Tab.4 Simulation test schemes

方案编号	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇注时间/s	型壳预热温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	1 450	26.75	950
2	1 450	28.75	1 050
3	1 450	30.75	1 000
4	1 500	26.75	1 050
5	1 500	28.75	1 000
6	1 500	30.75	950
7	1 550	26.75	1 000
8	1 550	28.75	950
9	1 550	30.75	1 050

3 ProCAST 模拟结果及分析

图3为方案1~3温度场模拟结果,图4为方案1~3缩松缩孔率模拟结果。分析可知,方案2铸件的凝固时间明显晚于方案1和方案3,且方案1和方案3的铸件中缺陷十分明显且靠近铸件中心,方案1和方案3中金属液的温度分布出现了明显的不均匀。在1 450 $^{\circ}\text{C}$ 下,随着型壳的预热温度升高,金属液的液面上升不再平稳,使得金属液凝固时间不均匀,导致铸件质量的稳定性下降。当型壳预热温度为1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时,由于金属液凝固的固液前沿温度梯度过大,枝晶生长速度加快,导致铸件本体的孔隙率增加,而在型壳预热温度为1 050 $^{\circ}\text{C}$ 时金属液温度梯度较小、冷却速度适当,故而缩松缩孔率更低,可见在浇注温度为1 400 $^{\circ}\text{C}$ 时随着型壳预热温度的升高,铸件本体中的缺陷出现的概率降低,但是铸件质量的均匀性和稳定性下降,可见方案2、方案3不适用于本工艺。

图5为方案4~6温度场模拟结果,图6为方案4~6缩松缩孔模拟结果。可以看出,在浇注温度为1 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,铸件本体和冒口中的金属液凝固顺序差距不大,方案4和方案5中的缺陷较为明显且接近铸件表面,区别不大,没有出现方案1~3中不均匀的情况,方案6相对缺陷体积较小,但距离铸件表面的距离更远。在铸件

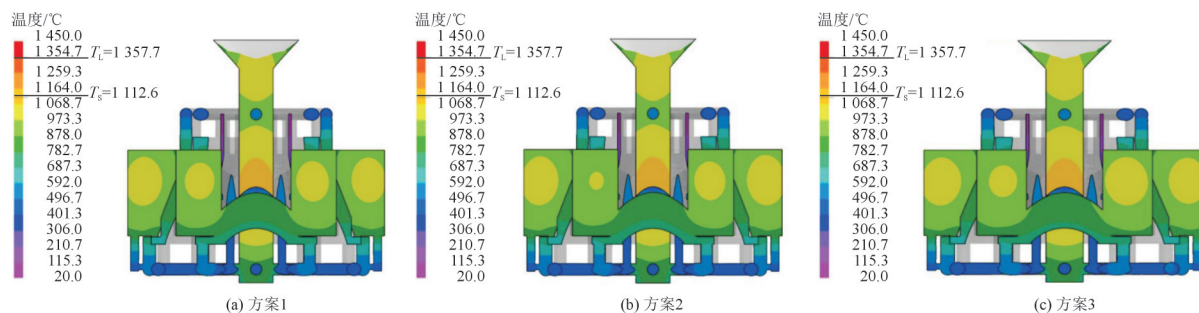


图3 方案1~3温度场模拟结果

Fig.3 Simulation results of temperature field for scheme 1

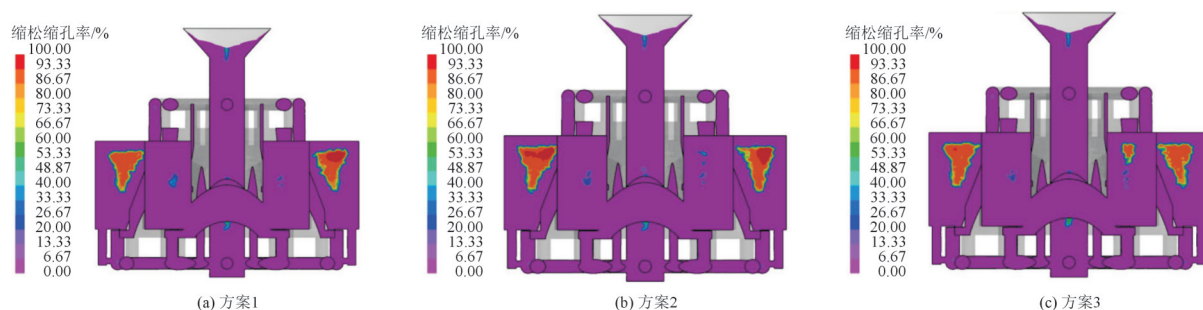


图4 方案1~3缩孔缩松率模拟

Fig.4 Shrinkage rate of scheme 1~3

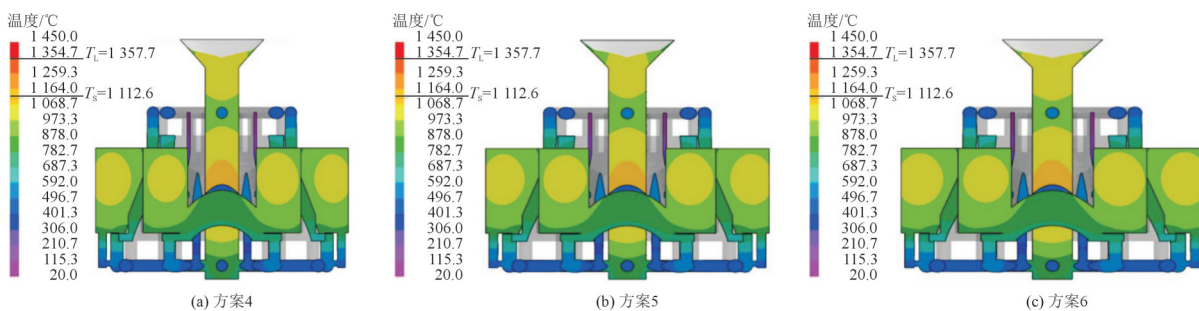


图5 方案4~6温度场模拟结果

Fig.5 Simulation results of temperature field for scheme 4~6

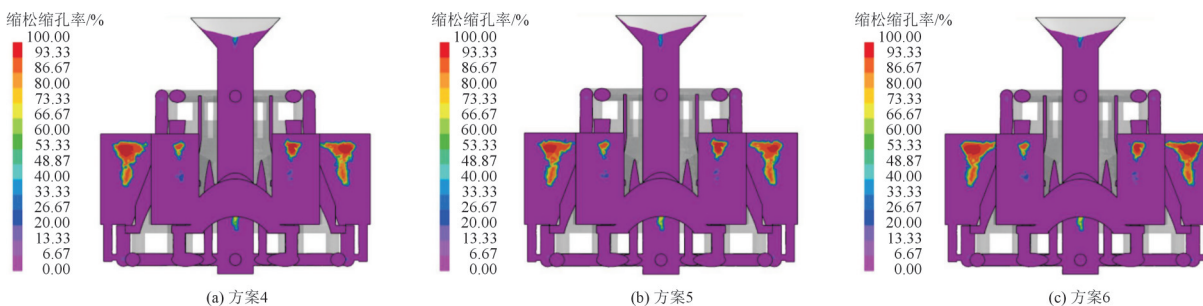


图6 方案4~6缩孔缩松率模拟

Fig.6 Shrinkage rate of scheme 4~6

充型时间较短的情况下,由于金属液表面接触型壳时间更早,所以金属液表面温度更低,铸件中缺陷距离铸件表面更近,但是不利于铸件的顺序凝固,所以铸件中出现缺陷的体积更大。由于型壳中金属液上升速度足够快,型壳很快被充分加热,所以型壳的预热温度对铸件充型和冷却过程的影响不明显,充型过程中也没有出现同方案1~3条件下的紊流导致铸件质量不均匀。

出于成本考虑,方案4不适用于本工艺。

图7为方案7~9温度场模拟结果,图8为方案7~9缩孔缩松率。可以看出,当浇注温度为1550℃时,铸件内的金属液温度场分布仍然呈现出不均匀的形态,方案7和方案8的金属液完全凝固时间要早于方案9,3种方案都出现了明显的收缩缺陷并且靠近铸件中心,整体分布差别不大。由于浇注温度较高,金属液固液

界面前沿的温度梯度过大,使得铸件内产生缩孔和缩松的概率增大,并且由于金属液温度较高,金属液在充型过程中出现紊流导致了铸件内部质量的不均匀,所生产铸件质量的可靠性下降,且缩松缩孔率分布未

随着充型时间的增大而变化,所以3种方案在金属液完成充型时金属液温度区别不大,充型时间对铸件质量的影响不明显,可见1 550 ℃的浇注温度不适用于本工艺。

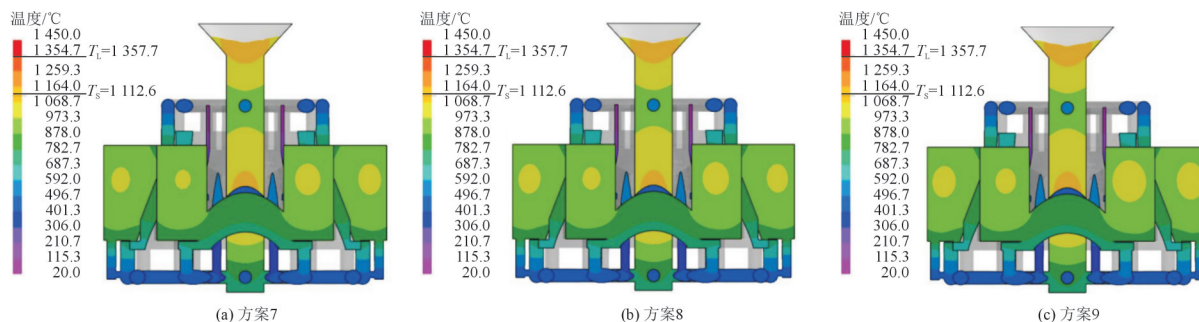


图7 方案7~9温度场模拟结果

Fig.7 Simulation results of temperature field for scheme 7~9

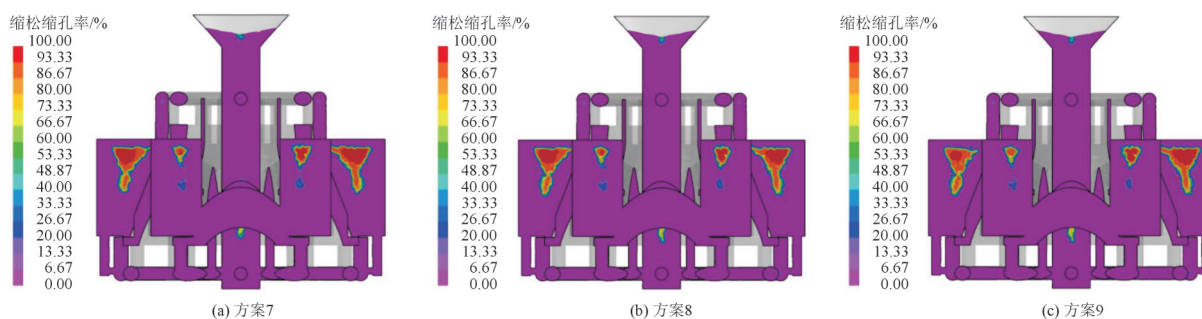


图8 方案7~9缩松缩孔率

Fig.8 Shrinkage rate of scheme 7~9

4 生产验证

选用模拟分析效果较好的方案5进行生产验证,即浇注温度为1 500 ℃,浇注时间为28.75 s,型壳预热温度为1 000 ℃。按照此参数进行生产,获得的铸件毛坯见图9。经后续检验,产品无超标的缩松、缩孔类缺陷,符合产品使用要求。相较砂型铸造,铸件质量稳定性和生产效率有明显提升。



图9 铸件毛坯
Fig.9 Casting blank

综上所述,在不考虑排气性和型壳厚度的情况下,相较于砂型铸造,本工艺能够明显提升铸件的尺寸精度和成品率,生产效率和产品质量有所提升,符合生产

要求。由于熔模铸造一般用于生产形状复杂、质量不超过25 kg的小型铸件,本研究应用其生产超过300 kg的铸件,通过改良浇注温度、浇注时间和型壳预热温度等方式控制了收缩类缺陷的位置,获得了良好效果,也为同类铸件生产提供参考。

5 结论

(1)仿真及生产表明,使用小锥形朝上、可限制机匣铸件变形的环形冒口的双环底注式熔模铸造工艺,采用浇注温度为1 500 ℃、浇注时间为28.75 s、型壳预热温度为1 000 ℃的优化方案,生产的直径为 $\phi 794$ mm锥形后机匣铸件中未出现缩孔、开裂等缺陷,各项指标合格。

(2)通过对直径为 $\phi 794$ mm锥形后机匣双环底注式熔模铸造工艺模拟结果分析表明,当浇注温度为1 500 ℃,浇注时间为28.75 s,型壳预热温度为1 000 ℃时,其实时流场及温度场分布合理;当浇注温度较低而型壳预热温度较高时,金属液液面上升过程的稳定性下降;当浇注温度较高时,金属液在充型过程中会出现紊流,且该情况不会随着型壳预热温度和充型时间发生明显变化。

(3)在浇注时间为26.75~30.75 s、金属液上升速度为27.64~31.78 mm/s条件下,缩孔缺陷倾向于分布在锥形后机匣铸件外沿的顶部,而非回转体的中心位置,故该工艺所设计的浇冒口系统可以很好地抑制缺陷在锥形后机匣铸件中的形成。

参 考 文 献

- [1] 黄乾尧,李汉康,陈国良,等. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [2] 郑博远,吴一栋,陈晶阳,等. K439B高温合金薄壁机匣试验件熔模精铸缺陷预测与工艺优化研究[J]. 铸造技术,2023,44:起止页码.
- [3] 杨浩,王方军,李采,等. 镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J]. 特殊钢,2023,44(3):1-9.
- [4] 于志涌. 复合加工技术在薄壁机匣加工中的应用[J]. 科技创新与应用,2013(16):116.
- [5] 姜不居. 熔模精密铸造[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [6] ALLEN S M, PELLOUX R M, WIDMER R, et al. Advanced High-Temperature Alloys: Processing and Properties [M]. Ohio: ASM,1985.
- [7] 孙逊,王英阁. 铸件充型凝固过程模拟发展现状[J]. 铸造,2000(2):84-88.
- [8] 刘金城. 铸造计算机凝固模拟的现状、发展与前景[J]. 现代铸铁,2003(6):17-22.
- [9] 郭钊,秦蓉,马鑫,等. 不同铸造工艺下K4169高温合金涡轮机匣凝固组织模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 459-1 462.
- [10] 刘贞露,肖文丰,孟祥炜,等. 基于ProCAST的K4169高温合金铸件离心铸造工艺数值模拟[J]. 热加工工艺,2017,46(9):104-107.
- [11] SPENCER S, DIETER S. Numerical simulation of film casting using an updated lagrangian finite element algorithm [J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43(5): 1 105-1 121.
- [12] 鄢宇,隋大山,麻晋源. K439B高温合金变截面铸件缩孔缩松数值模拟与试验[J]. 铸造,2023,72(12):1 560-1 567.
- [13] 李卫平,钱国钢,季克进,等. 40CrNiMo钢35 t多边形铸锭凝固过程的数值模拟[J]. 特殊钢,2014, 35(5):26-29.
- [14] 费晶. 浇、冒系统设计在大型复杂薄壁环型结构件上的应用[C]//2010年中国铸造活动周论文集. 无锡,中国机械工程学会铸造分会,2010.
- [15] 邵珩,李岩,南海,等. 熔模铸造条件下Ti-6Al-4V合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究[J]. 金属学报,2015,51(8):976-984.
- [16] 殷亚军,涂志新,田桥,等. 基于反热传导法的消失模铸件/铸型界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金,2018,38(4):391-394.
- [17] 马岚波,税国彦,关洋,等. K4169合金-陶瓷型壳间界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021, 41(8):1 048-1 052.
- [18] 姚雷,谢秋峰,李杨,等. K4169合金涡轮壳熔模铸造工艺试验[J]. 铸造,2016,65(1):45-48.
- [19] 贾士艳,王安国,张峻槐,等. 铝合金叶轮铸造工艺研究[J]. 铸造,2022,71(12):1 585-1 591.
- [20] 唐郑磊,许少普,王福明,等. 新型水冷模铸生产抗层状撕裂特厚板的浇注参数模拟优化[J]. 特殊钢,2023,44(4):22-27.
- [21] 肖尧,黄珍媛,傅洁琼,等. 基于Taguchi正交试验的超薄笔记本外壳注射工艺优化[J]. 模具工业,2018,44(2):10-14.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司
地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼
邮编:430019
电话:027-85358206,85486024,85358127
投稿网址:www.special-cast.com
邮箱:tzzz@special-cast.com

