

熔模铸造高温合金圆角尺寸偏差与传递规律

余童¹ 汪东红^{2,4,5} 吴文云¹ 雷四雄³ 谭诗薪³ 郝新³ 周建新⁶ 计效园⁶ 疏达²

(1.上海工程技术大学材料工程学院; 2.上海交通大学材料科学与工程学院上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室; 3.中国航发南方工业有限公司; 4.浙江工业大学化学工程学院; 5.嘉善鑫海精密铸件有限公司; 6.华中科技大学材料成型与模具技术国家重点实验室)

摘要 熔模铸造过程的蜡模制备、型壳制备与铸件凝固等过程中易发生圆角尺寸偏差,是影响铸件尺寸精度的重要因素。设计具有5个内倒角与1个外倒角的圆角模型,采用KC3898NRR蜡料填充蜡模,进行陶瓷型壳制备,并浇注K423、K424、K438高温合金铸件;用Geomagic Control三维比对软件进行圆角半径尺寸偏差分析。结果发现,圆角半径尺寸在蜡模制备中偏差范围在3%~30%,陶瓷型壳的受热膨胀修正范围为2%~8%,其中K438高温合金浇注的铸件圆角半径尺寸偏差最小。

关键词 熔模铸造;圆角半径;高温合金;尺寸偏差

中图分类号 TG249.5;TG146.1⁺5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Radius Dimension Deviation and Transfer Law of Fillet in Investment Casting Superalloy

Yu Tong¹, Wang Donghong^{2,4,5}, Wu Wenyun¹, Lei Sixiong³, Tan Shixin³,
Hao Xin³, Zhou Jianxin⁶, Ji Xiaoyuan⁶, Shu Da²

(1.School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science;
2.Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, School of
Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 3.China Aircraft Southern Industry
Co., Ltd.; 4.College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology; 5.Jiashan Xinhai
Precision Casting Co., Ltd.; 6.State Key Laboratory of Materials Processing and Die &
Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology)

Abstract: Dimensional deviation of fillet is an important factor in wax mold preparation, shell preparation and casting solidification in investment casting, which affects the dimensional accuracy of castings. A fillet model with 5 inner chamfers and 1 outer chamfer was designed, and KC3898NRR wax was used to fill the wax mold and prepare ceramic shells. The K423, K424, K438 superalloy castings were poured, and Geomagic Control software was conducted for deviation analysis of fillet radius dimension. The deviation of the fillet radius dimension during the preparation of wax molds is in range of 3% to 30%, and the thermal expansion correction range of the ceramic shell is 2%~8%. Among the three alloys, castings poured by K438 superalloy exhibit the smallest fillet radius dimension deviation.

Key Words: Investment Casting, Fillet Radius, Superalloy, Dimensional Deviation

收稿日期:2021-01-14;修改稿收到日期:2021-03-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1710101,2020YFB1710102);国家科技重大专项资助项目(2017-Ⅷ-0008-0102,J2019-VI-0004-0117);国家自然科学基金资助项目(51821001,52090042);浙江省重点研发计划资助项目(2020C01056,2021C01157);浙江省博士后项目择优资助项目(zj2019035);中国博士后科学基金资助项目(2020M671787);先进高温结构材料重点实验室开放课题资助项目;材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金资助项目(P2021-006)
第一作者简介:余童,男,1996年出生,硕士研究生,上海(201600),E-mail:1814317017@qq.com
通信作者:汪东红,男,1984年出生,助理研究员,上海(202400),E-mail:wangdh2009@sytu.edu.cn
引用格式:余童,汪东红,吴文云,等.熔模铸造高温合金圆角尺寸偏差与传递规律[J].特种铸造及有色合金,2021,41(6):786-789.
YU T, WANG D H, WU W Y, et al. Radius dimension deviation and transfer law of fillet in investment casting superalloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):786-789.

况进行相应设计,这样既可以延长抽芯机构寿命,节省
生产维修时间,又提高了机构的稳定性。

参考文献

[1] 王金华.铸件结构设计[M].北京:机械工业出版社,1983.

[2] 李传斌.铸造技术数据手册[M].北京:机械工业出版社,1993.

[3] 李德群.现代模具设计方法[M].北京:机械工业出版社,2001.

[4] 潘宪曾.压铸模设计手册[M].北京:机械工业出版社,1998.

(编辑:张正贺)

熔模铸造是一种近净成形工艺,具有铸件表面粗糙度低、复杂件成形快捷、原料利用率高等特点^[1],但熔模铸造的制备过程较为复杂,由蜡模的模具制造、注蜡成形、型壳制备以及脱蜡、焙烧、浇注、铸件凝固等过程所组成^[2],在这些工序生产中尺寸的偏差不断传递并累积,导致最后铸件成形尺寸偏差。铸件的尺寸变形主要与蜡模制备、型壳制备、铸件凝固过程等有关^[3~6]。

蜡模的尺寸精度直接影响铸件的尺寸精度^[7],蜡模的尺寸偏差占铸件尺寸偏差的 40% 以上^[8];型壳在焙烧过程中的变形对铸件的尺寸稳定性有着重要的影响,升温速率、壁厚尺寸、铸件结构都会对变形产生影响^[9];在合金收缩过程中,浇注合金的种类以及化学成分的变化也会影响铸件的尺寸^[10,11]。

复杂铸件表面常常有不同的圆角尺寸,为研究铸件成形过程中圆角尺寸误差的传递规律,设计了一种圆角模型,并采用不同牌号的镍基高温合金进行浇注,对蜡模制备、型壳制备、铸件凝固等 3 大工艺流程进行圆角半径尺寸偏差传递分析,为后续提高熔模铸造产品的圆角尺寸精度提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 铸件结构特征

图 1 为厚壁圆角铸件。圆角半径尺寸标注见图 2。

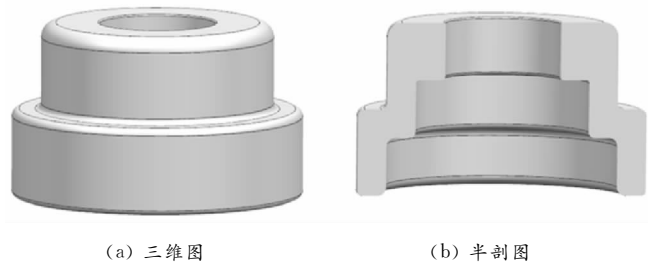


图 1 圆角模型三维结构

Fig.1 Three-dimensional structure of fillet model

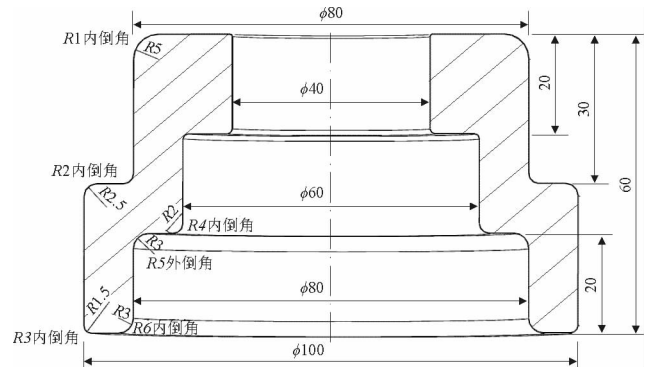


图 2 圆角半径尺寸标注

Fig.2 Marking of fillet radius dimension

1.2 材料选择及工艺设置

在蜡模制备过程中,采用 KC3898NRR 中温蜡料

进行注蜡,注蜡的工艺参数设置如下:注蜡流量为 50 cm³/s、注蜡温度为 62 ℃、保压压力为 3 MPa、保压时间为 10 s,为防止模具温度的变化对蜡模成形产生影响,先对模具进行多次压蜡,热模之后再生产得到所需厚壁圆角件蜡模;型壳材料选择熔融莫来石砂,型壳焙烧温度设置为 900 ℃;采用 K423、K424 以及 K438 镍基高温合金,浇注温度为 1 550 ℃,为保证铸件冷却时均匀受热,将浇注结束后的型壳连同铸件放入填满砂子的扣箱进行均匀空冷。

对制备完毕的圆角蜡模以及 3 种合金浇注的铸件采用 ATOS Triple Scan 高分辨率三维蓝光扫描仪采集点云数据,在 Geomagic Control 三维对比软件中进行圆角半径尺寸偏差分析,陶瓷型壳则采用 CT 断层扫描测量其圆角半径尺寸的变化。

2 试验结果及分析

2.1 蜡模制备

图 3 为生产中圆角蜡模的模型。蜡料在正常的注蜡过程中都会发生收缩,生产中注入的蜡料由于模具温度、模型结构、注蜡口位置等因素的影响,会导致蜡模收缩变形不均匀。图 4 为蜡模的圆角半径标注。表 1 为蜡模实际测试尺寸与 CAD 模型的圆角半径尺寸的偏差比较,可以看出厚壁圆角件蜡模的圆角半径尺寸发生变化,R2 内倒角处圆角半径尺寸变化严重,偏差在 29.74% 左右,这是由于注蜡口位置设置靠近 R2 内倒

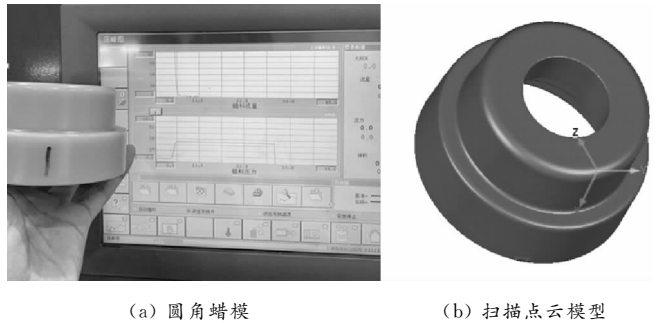


图 3 圆角蜡模模型

Fig.3 Wax pattern of fillet

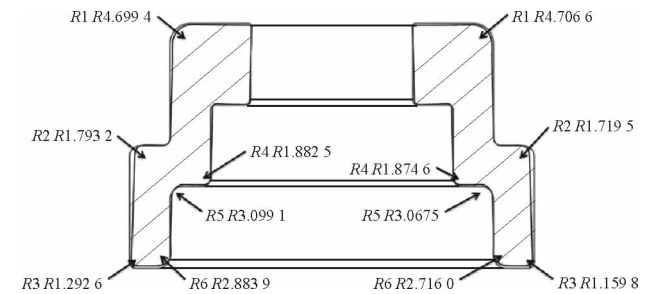


图 4 蜡模圆角半径及尺寸标注

Fig.4 Marking of fillet radius dimension of the wax pattern

角,并且蜡模壁厚较厚,散热较慢所导致;R5 由于是外倒角,注蜡过程中蜡料向内收缩,将会导致其圆角半径尺寸增大。

表 1 蜡模圆角半径尺寸偏差

Tab.1 Fillet radius dimension deviation of wax pattern mm						
圆角名称	R1	R2	R3	R4	R5	R6
均值	4.703 0	1.756 4	1.226 2	1.878 6	3.083 3	2.799 9
偏差	-0.297 0	-0.743 6	-0.273 8	-0.121 4	0.083 3	-0.200 1

2.2 型壳制备

图 5 为圆角件陶瓷型壳模型。型壳厚度约为 6 mm,采用顶注式浇注方式,一次可以浇注 2 个铸件,通过一个弧形的浇口将金属液引入壁厚圆角件内。图 5 中的线条部分为在 CT 断层扫描下测量的圆角件内部的圆角半径尺寸,见图 6。取该截面原因是避免浇口处对圆角半径尺寸的影响,表 2 为陶瓷型壳尺寸与 CAD 模型尺寸的圆角偏差对比。陶瓷型壳在干燥、脱蜡、焙烧过程中沿型壳厚度方向上具有不同的温度梯度,型壳不可避免地发生变形,虽然型壳的测试数据在常温下测得,但经过高温焙烧,陶瓷型壳具有一定的抗变形能力,并且在型壳冷却阶段将型壳放入填满砂子的扣箱进行空冷散热,减少冷却收缩产生的误差,使采集的型壳数据更接近于焙烧结束后的型壳变形。陶瓷型壳的变形是由于受热膨胀所导致的,在尺寸上表现为一种正方向上的尺寸超差,可以看出,陶瓷型壳圆角半径尺寸大部分发生了膨胀,超过了CAD模型的圆角半径尺寸,与



图 5 厚壁圆角陶瓷型壳

Fig.5 Ceramic shell of thick-walled fillet

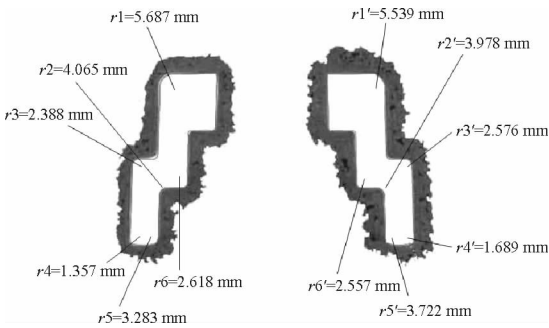


图 6 陶瓷型壳圆角 CT 断层扫描尺寸

Fig.6 CT tomography dimension of ceramic shell fillets

上述蜡模制备所造成的偏差相比,在一定程度上弥补了注蜡过程中由于蜡料收缩所导致的圆角半径偏小的问题。

表 2 陶瓷型壳圆角半径尺寸偏差

Tab.2 Radius dimension deviation of ceramic shell fillet mm						
圆角名称	r1	r2	r3	r4	r5	r6
均值	5.613	2.482	1.523	2.587	3.971	3.502
偏差	0.613	-0.018	0.023	0.087	1.021	0.502

2.3 铸件凝固

图 7 为浇注的 K423 高温合金铸件。将铸件扫描并进行比对得到圆角铸件的圆角半径尺寸标注图,见图 8。表 3 为铸件与 CAD 模型的圆角半径尺寸偏差,在铸件的凝固过程中,会发生合金收缩,导致尺寸产生偏差。从图 8 看出,黑线条所代表的铸件截面曲线与虚线条的 CAD 模型曲线不仅在尺寸上有了一定的偏差,位置度也发生了较大改变,这些偏差主要来自于蜡模内倒角负方向的收缩、外倒角正方向上的收缩、陶瓷型壳受热膨胀变形、铸件凝固过程中的合金收缩。



图 7 K423 高温合金浇注圆角铸件

Fig.7 K423 superalloy poured fillet castings

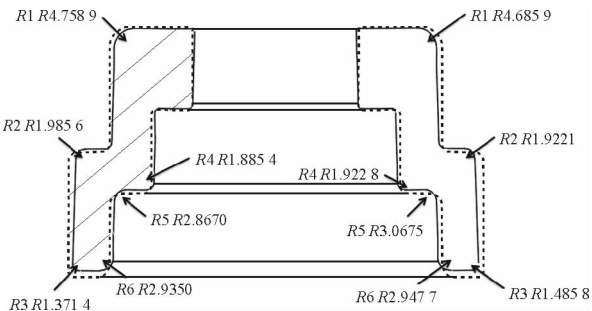


图 8 K423 高温合金浇注圆角铸件半径尺寸标注

Fig.8 Radius dimension mark of K423 superalloy poured fillet casting

表 3 K423 高温合金浇注圆角铸件半径及尺寸偏差

Tab.3 Radius and dimension deviation of K423 super alloy poured fillet castings mm						
圆角名称	R1	R2	R3	R4	R5	R6
均值	4.722 4	1.953 8	1.428 6	1.904 1	2.869 2	2.941 3
偏差	-0.277 6	-0.546 1	-0.071 4	-0.095 9	0.130 8	-0.058 6

2.4 全流程分析

将 3 个工艺流程的圆角尺寸偏差进行统计,见图

9. 可以看出,圆角铸件的圆角半径 $R1\sim R6$ 的尺寸是基于蜡模尺寸变形上进行变化,蜡模圆角半径尺寸偏差在 $3\%\sim 30\%$ 范围内,因此,蜡模制备是熔模铸造最重要的阶段。对于内倒角来说,陶瓷型壳的受热膨胀在一定程度上改变了蜡模所传递的误差,对于外倒角 $R5$ 的圆角半径尺寸来说,蜡模的尺寸收缩和型壳受热膨胀以及铸件凝固中的合金收缩三者都会使外倒角尺寸半径增大,陶瓷型壳的受热膨胀造成的尺寸偏差看似很大,但对于厚壁圆角铸件成形的圆角半径尺寸偏差修正范围为 $2\%\sim 8\%$,仅在一定程度上进行了修正。

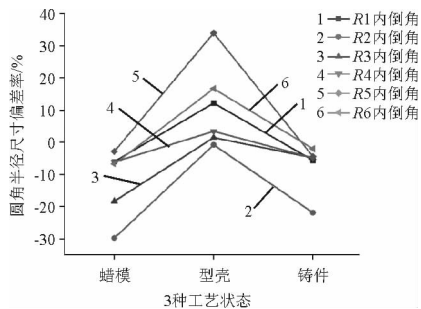


图 9 3 种工艺状态流程圆角半径尺寸偏差传递
Fig.9 Fillet radius dimension deviation transmission in major technological processes

图 10 为 3 种高温合金铸件圆角半径偏差率。图中圆角半径偏差率均为负值,为方便观察将尺寸偏差率取绝对值。可以看出,采用不同合金进行浇注对最后铸件成形圆角半径尺寸也有一定程度影响,采取不同合金浇注圆角半径的尺寸偏差在 $0.5\%\sim 4\%$ 。K438 高温合金圆角铸件,为 3 种合金圆角半径尺寸精度最高的,高温合金浇注圆角半径尺寸精度排序为: $K438>K424>K423$ 。尽管均是高温合金,但由于其成分不同也会对铸件圆角精度产生影响。

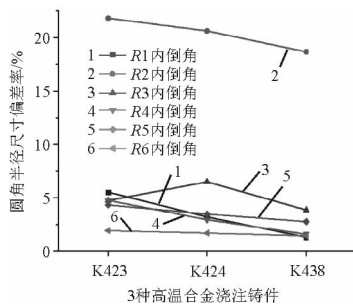


图 10 3 种金属液浇注铸件圆角半径尺寸偏差率
Fig.10 The deviation rate of the fillet radius of molten metal castings

3 结 论

(1)由熔模铸造的 3 种工艺状态圆角半径尺寸偏差传递分析可知,蜡模制备是铸件最终成形产生圆角尺寸

偏差的主要原因,产生偏差范围在 $3\%\sim 30\%$;型壳制备由于受热膨胀,在一定程度上修复圆角半径尺寸偏差,修正偏差范围在 $2\%\sim 8\%$;采用合适的高温合金浇注能适当减少圆角半径尺寸偏差,采用 K438 高温合金相较于采用 K423 高温合金减小尺寸偏差范围在 $0.5\%\sim 4\%$ 。

(2)K423、K424、K4383 高温合金浇注圆角铸件所造成圆角半径尺寸偏差排序: $K423>K424>K438$ 。

(3)对于实际熔模铸造生产过程中带有圆角的铸件,蜡模制备阶段是重中之重,可以根据不同圆角大小及位置在蜡模的模具中设置不同的收缩率补偿。经过型壳的受热膨胀修正和采用恰当的合金进行浇注能够有效地减小尺寸偏差,改善铸件圆角变形情况。

参 考 文 献

[1] 沈昀,郑功,冯辰铭.熔模精密铸造技术研究进展[J].精密成形工程, 2019, 11(1): 54-62.

[2] 陈建华,杨彬,李冰,等.熔模精密铸造蜡模质量控制[J].铸造技术, 2012, 33(3): 370-372.

[3] 张振宇,梁补女.制模过程中影响铸件尺寸精度的因素[J].机械研究与应用, 2002, 15(2): 15-16.

[4] 刘畅辉.复杂薄壁件熔模铸造误差建模与稳健控制方法研究[D].上海:上海交通大学, 2016.

[5] 佟天夫,陈冰,姜不居,等.熔模铸造工艺[M].北京:机械工业出版社, 1991.

[6] 肖良,沈旭,殷亚军,等.基于 PTV 的钛合金离心铸造物理模拟流速表征[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 404-408.

[7] WANG DH, HE B, LI F, et al.Cavity pressure and dimensional accuracy analysis of wax patterns for investment casting[J].Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(6): 637-642.

[8] WANG D H, HE B, LI F, et al.Numerical simulation of the wax injection process for investment casting[J].Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(2): 220-224.

[9] 王玉莲.熔模铸造型壳焙烧变形仿真与工艺优化方法研究[D].上海:上海交通大学, 2014.

[10] 陈晶阳,吴文津,李青,等.采用低温度梯度 HRS 工艺制备的镍基单晶高温合金雀斑组织[J].中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2 494-2 498.

[11] 张雷雷,陈晶阳,蒋磊,等.浇注温度对 K439B 合金显微组织和力学性能的影响[J].材料热处理学报, 2019, 40(9): 57-63.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com