

某型燃机双联实心导向叶片精密铸造过程尺寸控制

丁盼 杨海青 李青 张丽辉 张明军

(中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室)

摘要 采用三维光学扫描技术分析了大尺寸双联实心等轴晶叶片生产阶段的变形和收缩数据以及蜡模不同放置方式对其尺寸的影响,最终获得了叶片合适的收缩率和尺寸控制方法。结果表明,叶片沿主轴方向(Z向)收缩率从进气边往排气边逐渐增大,盆背方向(Y向)收缩率从进气边向排气边逐渐减小,盆背方向及进排气方向(X向)收缩率均是大缘板显著小于小缘板。叶型变形主要是由于蜡模及浇注过程引起,而在控制蜡模变形的方式上,蜡模侧放-叶背朝下的放置方式最有利于减小尺寸变形。

关键词 燃机叶片;精密铸造;收缩率;变形控制

中图分类号 TG259;TG249.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dimension Control of Gas Turbine Solid Guide-vane during Investment Casting

Ding Pan, Yang Haiqing, Li Qing, Zhang Lihui, Zhang Mingjun

(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,
AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials)

Abstract: The deformation and shrinkage data of large-scale double solid equiaxed crystal vanes were analyzed by 3D optical scanning technology, and influence of different wax placement ways on the dimension were investigated to obtain the appropriate control method of vane shrinkage and dimension. The results reveal that the shrinkage factor along spindle direction(Z) is increased from the leading edge to the exhaust edge, while that along basin-back direction(Y) is decreased from the leading edge to the exhaust edge. The shrinkage factors of large flange are much smaller than small flange along both inlet-outlet(X) and basin-back direction. Blade deformation is mainly induced by wax making and pouring process. In view of wax pattern deformation, placing wax laterally with the backside of vane downward is the most conducive to reducing deformation.

Key Words: Gas Turbine Vane, Investment Casting, Shrinkage Factor, Dimension Control

与传统的柴油机、蒸汽轮机等动力装置相比,工业燃气轮机具有体积小、效率高、污染低、功率范围广等优点,广泛用于工业发电、舰船、石油及天然气管路输送、供热、矿井通风等领域的动力装置^[1~3]。燃机叶片通常具有尺寸大、质量大、叶片结构及尺寸精度方面要求高,

所以生产过程中容易产生变形,且尺寸难以控制^[4],尤其叶型及通道轮廓度难以保证完全合格。目前关于叶片尺寸控制主要集中在使用冷蜡芯控制蜡模变形以及采用反变形^[4~6]。本课题以某燃机双联实心导向叶片为研究对象,采用三维光学扫描方法^[7]分析了铸件不同

收稿日期:2021-09-19;**修改稿收到日期:**2021-10-11

第一作者简介:丁盼,男,1990年出生,工程师,北京(100095),E-mail:gold2008knight@126.com

引用格式:丁盼,杨海青,李青,等.某型燃机双联实心导向叶片精密铸造过程尺寸控制[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):525-528.

DING P, YANG H Q, LI Q, et al. Dimension control of gas turbine solid guide-vane during investment casting[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2022, 42(4):525-528.

[10] YU W B, YUAN Z H, GUO Z P, et al. Characterization of A390 aluminum alloy produced at different slow shot speeds using vacuum assisted high pressure die casting[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2017, 27(11): 2 529-2 538.

[11] JIAO X Y, WANG J, LIU C F, et al. Influence of slow-shot speed on PSPs and porosity of AlSi17Cu2.5 Alloy during high pressure die casting[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2019, 268: 63-69.

[12] 徐秋湘,赵占西.工艺参数对铝合金梯级铸件压铸过程的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5):57-60.

[13] Simone Franke. 铸造实用手册(中文版)[M].北京:冶金工业出版社,2014.

[14] 江昌勇.压铸成形工艺与模具设计[M].北京:北京大学出版社,2012.

[15] PALIANI P. Thermoelastic Deformation of Cold Chamber Die Casting Machine Shot Sleeves [D]. US: Ohio State University, 1993.

[16] 秦新宇,朱锐祥.汽车壳体零件压铸工艺的优化设计[J].材料研究与应用,2018,12(4):297-302.

(编辑:张正贺)

方向的收缩率,叶型变形的主要来源以及不同蜡模放置方式对叶型轮廓的影响,从而为大尺寸双联实心等轴晶叶片尺寸控制提供参考。

1 试验材料与方

1.1 试验材料

选择的某型燃机双联实心导向叶片(见图 1),长 350 mm,质量为 4.7 kg,最大弦长为 90 mm,材质为 K438 合金,其化学成分见表 1,通道轮廓度要求为±0.35 mm,叶型轮廓度要求±0.4 mm。叶片采用全硅溶胶型壳铸造,型壳预热温度为 1 000 ℃,浇注温度为 1 560 ℃,浇注后静置 20 min 后在空气中冷却。

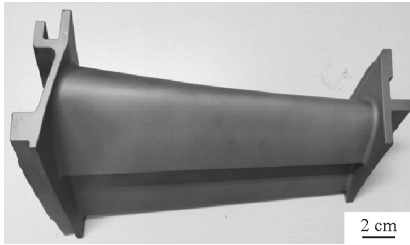


图 1 某型燃机导向叶片铸件实物
Fig.1 The entity of gas turbine guide-vane casting

表 1 K438 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of K438 alloy %

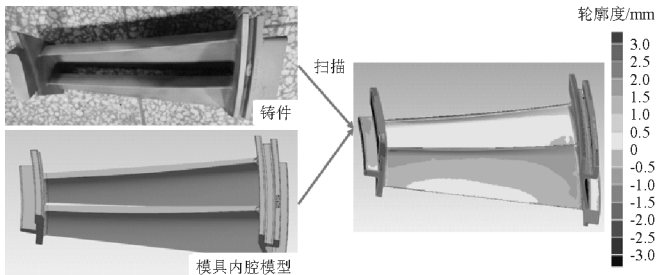
ω_B											
C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Ta	B	Zr	Ni
0.169	16.08	8.50	2.58	1.70	3.52	3.25	0.86	1.74	0.012	0.098	余量

1.2 收缩率计算方法

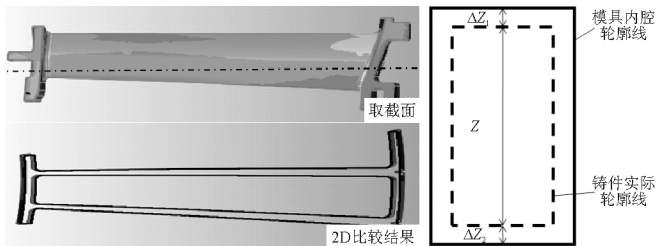
铸件及蜡模尺寸数据通过高精度 GOM 扫描机测量,在计算铸件收缩率时,分步计算从模具型腔到蜡模收缩率,然后计算蜡模到铸件的收缩率,从而得到从模具到铸件的收缩率。也可以把从模具到铸件的过程封

装成一个黑匣子,使用端到端的方法直接计算从模具到铸件的收缩率。试验采用第 2 种计算方法,以减少中间过程引入的计算误差。

图 2 为铸件收缩率计算模具到铸件收缩率可以分为 3 步:①扫描铸件,获得点云数据,与模具内腔模型进行对比,见图 2a;②在不同高度作截面,获取该截面上 2D 比较结果,见图 2b;③在 2D 比较结果中取点偏差,通过上下截面点偏差 ΔZ_1 、 ΔZ_2 、铸件实际尺寸 Z ,计算该截面内高度方向收缩率: $\delta=(\Delta Z_1+\Delta Z_2)/Z$ 。



(a) 铸件扫描点云与模具型腔对比



(b) 不同高度取截面作 2D 比较 (c) 铸件收缩率计算方法

图 2 铸件收缩率计算

Fig.2 Calculation of casting shrinkage factor

1.3 不同放置方式蜡模变形情况

对于大尺寸双联实心导向叶片,铸件叶型尺寸超差很大一部分源自于蜡模变形,蜡模的 7 种放置方式见图 3。对于蜡模变形控制方法主要分为 3 种:①调整压蜡

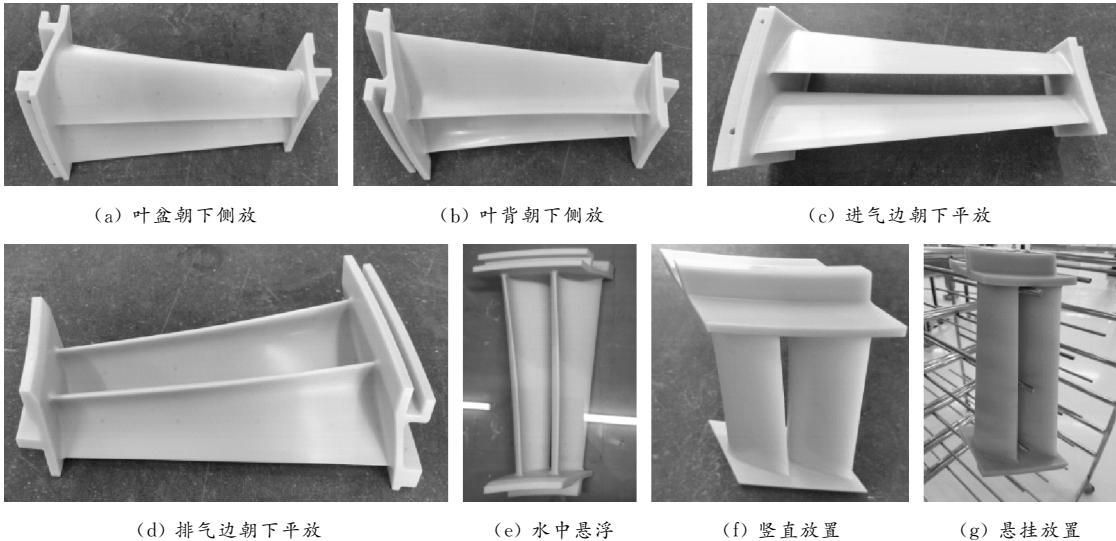


图 3 蜡模不同放置方式

Fig.3 Different placement ways of wax patterns

参数,减少蜡模变形;②设计防变形工装,防止蜡模变形;③优化蜡模冷却中的放置方式,减少蜡模变形。对于该叶片来说,受限于充型完整性等要求,压蜡参数调整空间不大,同时采用防变形工装会显著降低蜡模生产效率,因此试验中主要研究通过优化蜡模放置方式来减少蜡模变形。

2 铸件尺寸精度控制

2.1 铸件收缩率分析

为了分析叶片在进排气方向(X向)、盆背方向(Y向)、主轴方向(Z向)不同位置收缩率变化,在叶片缘板位置每隔10 mm取一个截面,得到A~G 7个截面,同时在其垂直方向取H~L 5个截面,见图4。经过取值分析,不同位置收缩率见图5。可以看出,①Z方向收缩率从进气边往排气边逐渐增大,平均收缩率为2.24%;②Y方向收缩率从进气边向排气边逐渐减小,大缘板收缩率(平均为2.17%)显著小于小缘板(平均为3.00%);③X方向收缩率从叶盆到叶背方向无明显差

异,但是大缘板收缩率(平均为2.51%)显著小于小缘板的(平均2.91%)。

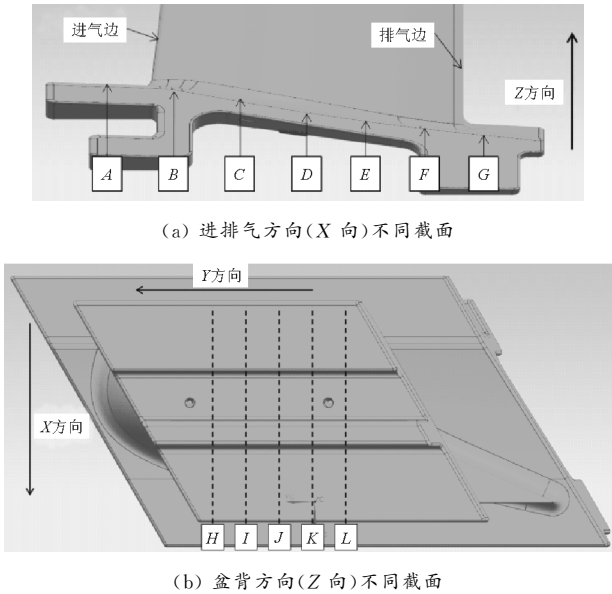


图4 叶片不同截面位置

Fig.4 Different section positions of guide-vane

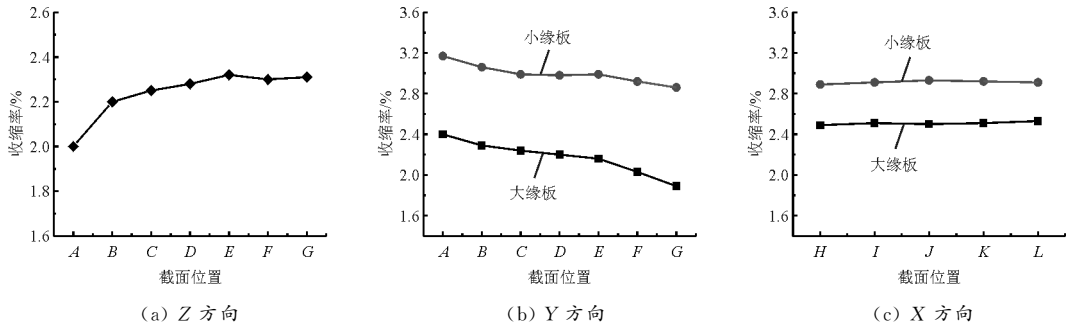


图5 叶片不同方向收缩率

Fig.5 Shrinkage rate of the vane along different direction

铸件的收缩主要是由蜡模冷却、型壳预热膨胀、金属液凝固收缩3个过程共同作用而成。WANG D H等^[8]发现,铸件凝固收缩是造成铸件收缩的主要因素,而蜡模收缩和型壳预热膨胀作用很小。金属凝固收缩本质来说是由于液态下无序状态的原子转变成固态下有序状态,从而反映在宏观上的体积缩小^[9]。金属材料的线收缩率一定,但不同类型叶片,甚至同一叶片的不同方向收缩率往往都存在较大差异,主要影响因素是铸件结构,表现在铸件受阻时收缩部位的收缩率显著小于自由收缩部位。在研究中,铸件主轴(Z)方向,进气边空间狭窄,制壳后两叶片之间完全封死,经过烧结后,两联之间的陶瓷型壳在金属收缩过程起到强烈的阻碍作用,而排气边两联叶片间空间开阔,刷涂料后也未完全封住,型壳阻碍作用明显变小。加上铸件从进气边到排气边厚度逐渐减薄,在凝固过程中远离缘板限制的叶身中部排气边有向叶盆方向卷曲的现象,这也进一步加剧了铸件收缩率从进气边到排气边逐渐增加。铸件大

缘板在进气边两个安装边之间及进排气边之间形成了两个垂直的U型结构,结构复杂性显著大于小缘板的简单T型结构,在进排气方向(X向)、盆背方向(Y向),大缘板在金属凝固时为受阻收缩,而小缘板更接近于自由收缩,因而大缘板的收缩率显著小于小缘板。这说明在设计模具时应该对不同方向、不同位置设计不同的收缩率,同时大小缘板也应该设计不同的收缩率,或通过两联叶片预张一定角度来补偿后期两侧缘板收缩不一致带来的叶片轴线角度偏差。

2.2 不同阶段铸件变形情况分析

为了分析叶片在不同阶段(蜡模、浇注后、热等静压+热处理后)叶型变形情况,试验中选择了8个叶片在蜡模、浇注后、热等静压+热处理后分别进行蓝光扫描,分析其叶型偏差,结果见图6。可以看出,在整个铸件生产周期内,叶片在蜡模阶段变形导致的轮廓度偏差为±0.29 mm,经制壳、浇注等工序后叶型偏差增加到

平均为±0.46 mm,随后经过热等静压和热处理后,叶型偏差平均为±0.44 mm。该结果表明,这种大尺寸实心叶片叶型变形主要发生在蜡模冷却及浇注后金属液冷却过程中。由于在熔模精密铸造过程中,金属液冷却造成收缩变形难以完全控制但规律一致,可以通过模具反变形予以解决,但是变形占比更大的蜡模冷却过程可以通过不同放置方式或定型工装加以控制。

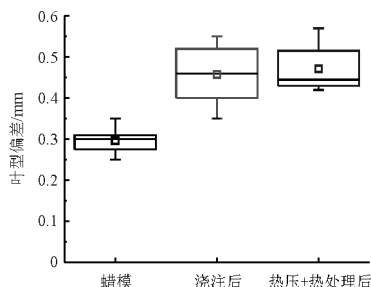


图 6 叶片不同阶段叶型轮廓度偏差

Fig.6 Deviation of vane profile at different stages

2.3 不同放置方式蜡模变形情况分析

为了有效控制叶片蜡模阶段的变形,试验中对比了 7 种不同放置方式对叶型的影响,结果见表 2。可以看出,侧放-叶背朝下放置的蜡模叶型偏差仅-0.36 mm/+0.31 mm,是所有放置方式中变形最小的,可能是此双联叶片中叶盆侧一联叶片的进气边均有向叶盆侧扭转的趋势,而侧放-叶背朝下正好通过重力作用部分抵消了这种变形,因此在后续试制中均选用侧放-叶背朝下的方式。

表 2 不同放置方式叶型轮廓度

Tab.2 Vane profile under different placements mm						
侧放-叶盆朝下	侧放-叶背朝下	平放-进气边朝下	平放-排气边朝下	水中悬浮	竖直放置	悬挂放置
-0.61/ +0.60	-0.36/ +0.31	-0.45/ +0.44	-0.53/ +0.56	-0.54/ +0.51	-0.42/ +0.45	-0.46/ +0.47

2.4 铸件尺寸测量与验证

在前述研究的基础上,通过设计合适的收缩率,蜡模阶段选择侧放-叶盆朝下的放置方式,同时通过适当的模具修理,生产出的铸件经过热等静压和热处理后,铸件尺寸蓝光扫描结果见图7。可以看出,通道轮廓度

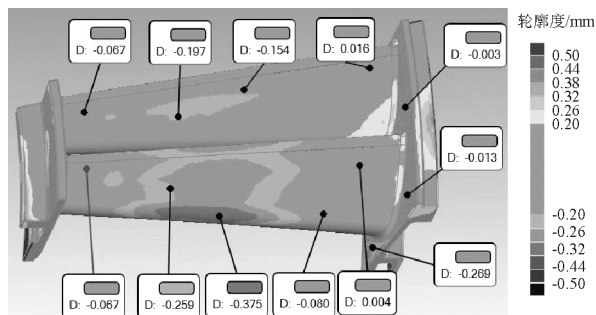


图 7 铸件尺寸验证

Fig.7 Dimension verification of casting

实测值为±0.27 mm,符合图纸±0.35 mm 的要求;叶片型面轮廓度实测值为±0.375 mm,满足轮廓度±0.4 mm 的要求。

3 结 论

(1)熔模铸造双联实心导向叶片时,Z 向收缩率从进气边往排气边逐渐增大,平均收缩率为 2.24%,Y 方向收缩率从进气边向排气边逐渐减小,大缘板收缩率(平均为 2.17%)显著小于小缘板(平均为 3.00%),X 方向收缩率从叶盆到叶背方向无明显差异,但是大缘板收缩率(平均为 2.51%)显著小于小缘板(平均为 2.91%)。

(2)熔模铸造双联实心导向叶片时,叶片叶型变形主要是由于蜡模及浇注过程引起。

(3)熔模铸造双联实心导向叶片时,叶片蜡模侧放-叶背朝下的放置方式最有利于减小蜡模阶段的尺寸变形。

参 考 文 献

- [1] 罗亮,肖程波,陈晶阳,等.工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J].材料工程,2019,47(6):34-41.
- [2] 蒋洪德,任静,李雪英,等.重型燃气轮机现状与发展趋势[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5 096-5 102.
- [3] KONTER M, THUMANN M. Materials and manufacturing of advanced industrial gas turbine components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 386-390.
- [4] 赵代银,杨照宏,杨功显,等.某型重型燃机实心动叶片的精密铸造过程尺寸控制[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1 265-1 268.
- [5] 韩伟,于望生,孔胜国,等.大型涡轮叶片精密铸造尺寸精度控制研究-反变形技术[J].铸造,2009,58(11):1 108-1 111.
- [6] 韩伟,于望生,孔胜国,等.大型涡轮叶片无余量精密铸造尺寸精度控制研究-蜡模尺寸稳定性[J].铸造,2009,58(4):330-332.
- [7] 陈俊宇,殷鸣,殷国富,等.燃机叶片型面三维光学扫描检测方法研究[J].中国测试,2015,41(11):7-11
- [8] WANG D H, DONG A P, ZHU G L, et al. The propagation and accumulation of dimensional shrinkage for ring-to-ring structure in investment casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 623-629.
- [9] 卜昆,张雅莉,于茜,等.精铸件收缩率分布规律研究进展[J].航空制造技术,2019,62(20):37-42.

(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