DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3039

基于空心熔模结构的 K648 高温合金铸件熔模铸造工艺研究

张继聪[1,2],武继礼[1,2],李小军[1,2],黄　旗[1,2],张利军[1,2]

(1. 西安超晶科技股份有限公司，陕西 西安 710299; 2. 陕西省先进金属结构材料精确热成型重点实验室，陕西 西安 710299)

摘　要:熔模铸件的尺寸精度受熔模线收缩率影响较大,通过降低熔模的线收缩率是提高铸件尺寸精度的有效措施。本文研究了某 K648 高温合金铸件空心熔模结构对铸件尺寸精度的影响。结果表明,将熔模局部截面按 4.5~5 mm 进行空心化设计,可以缓解熔模平面缩陷和局部变形的问题。162 全新模料制备的空心熔模平均线收缩率由 1.16%降低至 0.54%,铸件尺寸精度可由 CT7 级提高至 CT5 级,铸件实际线收缩率由 2.70%降至 2.41%。为高精度、厚大铸件的熔模铸造工艺设计提供了参考依据。

关键词:熔模铸造;空心结构;线收缩率;尺寸精度

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)12-1157-06

Investment Casting Technology of K648 Superalloy Casting Based on Hollow Wax Mold

ZHANG Jicong[1,2], WU Jili[1,2], LI Xiaojun[1,2], HUANG Qi[1,2], ZHANG Lijun[1,2]

(1. Xi'an Chaojing Technology Co., Ltd., Xi' an 710299, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Metal Structural Materials Precision Thermoforming, Xi' an 710299, China)

Abstract: The dimensional accuracy of investment castings is greatly affected by the linear shrinkage rate of the wax mold. Reducing the linear shrinkage rate of the wax mold is an effective measure to improve the dimensional accuracy of castings. The influence of a hollow wax mold on the dimensional accuracy of a K648 superalloy casting was studied. The results show that a hollow wax mold can alleviate the problems of plane shrinkage and local deformation of the investment mold. The average linear shrinkage of the wax mold is reduced from 1.16% to 0.54%, the dimensional accuracy of the casting can be improved from CT7 to CT5, and the shrinkage of the casting is reduced from 2.70% to 2.41%. The present research can provide a reference basis for improving the dimensional accuracy of thick and large investment castings.

Key words: investment casting; hollow structure; linear shrinkage; dimensional accuracy

熔模铸造广泛应用于航空、航天、燃气轮机等领域核心部件的制造[1],对铸件的尺寸精度要求较高。高温合金铸件常采用中温蜡料、全硅溶胶型壳工艺，所生产的铸件尺寸精度可达到 CT4~CT7 级[2]。研究发现影响熔模铸件尺寸精度的因素主要有铸件结构、金属凝固过程的收缩、温度变化引起的型壳尺寸变化、熔模尺寸精度等,而熔模尺寸精度对铸件尺寸的影响可达 50%以上[3-5]。

1　影响熔模尺寸精度的因素

1.1　模料种类

中、高端熔模铸件普遍采用非填充料蜡料和填充料蜡料制作熔模，非填充料蜡料的线收缩率约为 1%左右、填充料蜡料的线收缩率约为 0.5%左右[6]。研究表明，降低线收缩率是提高熔模尺寸精度的重要方式。本研究采用的是 162 牌号非填充料蜡料,其

收稿日期:2023-02-24

基金项目:陕西省技术创新引导专项(2022SSPY-08)

作者简介:张继聪,1983 年生,工程师.主要从事高温合金、不锈钢铸件熔模铸造工艺研究工作.Email: z18709183189@163.com

引用格式:张继聪,武继礼,李小军,等.基于空心熔模结构的 K648 高温合金铸件熔模铸造工艺研究[J].铸造技术,2023,44(12):1157-1162.

ZHANG J C, WU J L, LI X J, et al. Investment casting technology of K648 superalloy casting based on hollow wax mold[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1157-1162.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

线收缩率为0.9%~1.0%,具有良好的成型性,收缩稳定,良好的挠性及柔韧性,适应于薄壁及中小件的熔模制作。

1.2 制模工艺

北京航空航天大学陈冰[7]研究发现压蜡温度越高、注射压力越大、蜡液流动速度越快、冷却时间越短、模具温度越高熔模的线收缩率越大、铸件尺寸精度越差,反之铸件尺寸精度越高。随着压蜡设备制造能力的逐步提高,这些制模工艺参数均可稳定控制,经过多次压制试验,结合大数据智能管理系统所获取的经验数据可以有效降低制模工艺对熔模尺寸精度的影响[8]。

1.3 模具制作精度

近些年随着机械加工行业的飞速发展,传统的精密加工已经不能满足尖端科技的发展需求,在此基础上衍生出了超精密度加工技术,其最高加工尺寸精度已达到10 nm,表面粗糙度可达到1 nm,加工的最小尺寸达1 μm[9]。目前,越来越多的智能制造技术、网络技术应用到机械加工领域,同时随着光学和电子技术的发展,使得机械加工精度大幅度提高[10]。近年,一些国外专业化模具设备进入国内,使我国模具制造更加高速化、精密化、复合化、智能化,模具制作精度对熔模尺寸精度的影响越来越小[11-13]。

1.4 熔模结构

研究发现,熔模截面厚度超过13 mm时建议采用冷蜡块来减小壁厚,从而降低熔模线收缩率[7]。但采用冷蜡块技术通常会面临以下问题:①增加了模具数量,从而增加了生产成本;②因冷蜡块需提前预制,从而降低了产品的生产效率;③冷蜡块结构设计不合理时会导致熔模收缩不均,出现尺寸波动,通常需经过多次试制和调整,才能确定最终冷蜡块结构;④冷蜡块易出现包裹不到位或支撑点外露的情况,从而增加熔模修复的工作量,并降低熔模表面质量。

综上所述,影响熔模尺寸精度的主要因素集中在模料和熔模结构上。在无法改变模料和铸件结构的情况下,合理设计熔模结构是提高熔模尺寸精度的最佳方案。本文设计了一种空心熔模结构,来降低熔模部分截面厚度,以此获得较均匀的熔模壁厚,实现降低熔模线收缩的目的,通过降低熔模线收缩率来提高熔模尺寸精度可有效提高铸件的尺寸精度。空心熔模结构只需适当增加模具抽芯结构,无需延长熔模的生产周期,适用于壁厚差异大、尺寸精度要求高、批量较大的熔模铸件。

2 实验材料与方法

2.1 熔模结构分析

某高温合金铸件(图1),材料牌号为K648,化学成分为(质量分数,%)0.05 C,34 Cr,3 Mo,0.85 Ti,4.45 W,0.98 Nb,1.0 Al,余量为Ni。该铸件属于典型的结构性熔模铸件(图1),除1处“C”型盲孔结构外,虽铸件壁厚差较小,但关键部位壁厚均超过了13 mm,熔模压制后与模具型腔接触面的冷却速度最快,最先形成一层3~5 mm的固态蜡壳,熔模芯部的热量很难散去,当熔模从模具中取出后,芯部热量逐渐向外传导至熔模表面,导致熔模表面再次“回软”,易导致熔模弯曲变形。厚大部位的芯部热量在向外传递过程中也会产生较大应力,导致传统熔模结构(图2)产生较大线收缩,造成最终铸件尺寸波动偏大。

2.2 熔模结构设计

熔模铸造工艺的特点是通过复刻易熔模表面形状来制备铸件,熔模内部结构对铸件结构没有影响[14-15]。考虑冷蜡块方案存在的问题,故将试验铸件的熔模结构按空心设计。HB 5350规定了熔模铸造模料线收缩测试试样厚度为4 mm、模料室温抗弯强度试样厚度为6 mm。为有效收集熔模的线收缩率数据,同时确保熔模具备足够的室温强度,故将熔模空心部

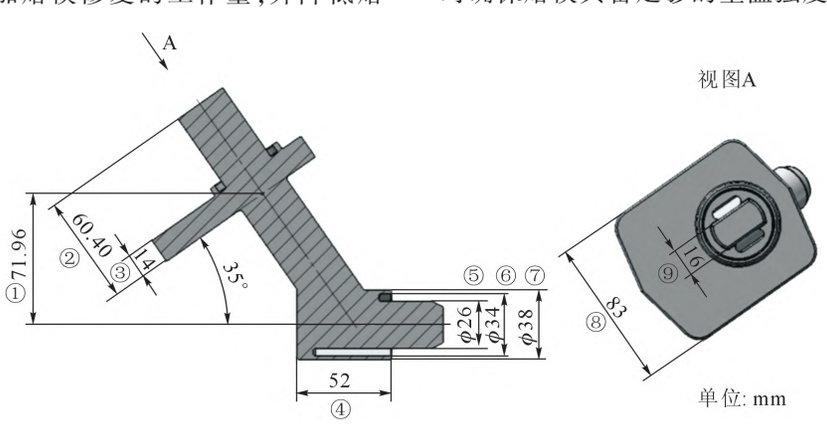


图1 铸件结构及关键尺寸

Fig.1 Structure and key dimensions of casting

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

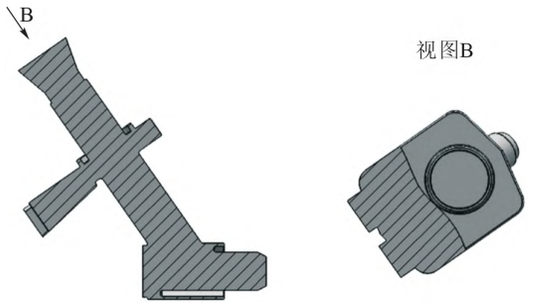


图 2 传统熔模实心结构

Fig.2 Solid structure of the wax mold

位截面壁厚设计为 4.5~5.0 mm，也便于蜡液流动以及蜡料热量的传递。熔模空心结构需通过金属模具抽芯形成，抽芯困难、不易采用等壁厚结构的位置采用了锥形空心结构，即口部单侧壁厚 4.5 mm，向内增设 5°拔模斜度，便于模具抽芯(图 3)。将所有空心结构的开放端均设置在浇口面，在熔模组合时将开放端封闭，最终形成内部为“空腔”的熔模结构。

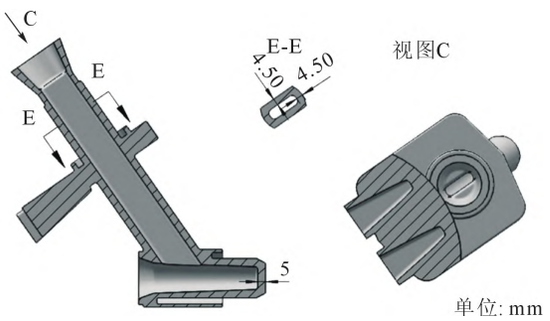


图 3 熔模空心结构

Fig.3 Hollow structure of the wax mold

2.3 模具准备

实心结构的熔模关键部位壁厚均超过 13 mm，且属于自由收缩，按 HB 5350.1 试验方法测定 162 蜡料由模具到熔模的线收缩率为 0.5%~1.0%[7]；根据生产实践，中小型 K648 高温合金铸件，由熔模到铸件的综合收缩率为 1.6%~2.0%。故初步预设试验铸件模具型腔的综合收缩率为 2.6%，并分别以图 2~3 两种结构制作金属模具。

2.4 熔模制备

全新 162 中温蜡料的灰分一般小于 0.05%(质量分数)，随着回收次数和添加比例的增加蜡料灰分会增加至 0.10%(质量分数)以上，最终影响铸件的冶金质量[16]。同时，回收使用的蜡料线收缩率也会增加到 1.0%以上，从而降低熔模的尺寸精度。故本研究采用 100%全新 162 蜡料，使用 16 t 双工位液压射蜡机，制备熔模(表 1)。熔模从金属模具取出后放置在矫形平台上，并用压铁矫形 2 h 以上(图 4)，减少熔模的变形量。

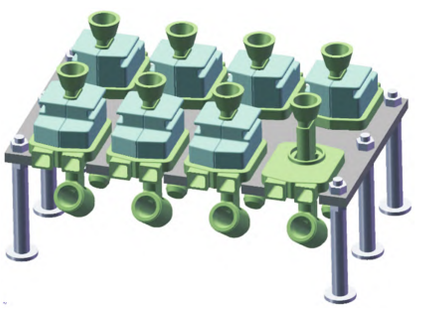


图 4 熔模矫形示意图

Fig.4 Schematic diagram of the wax mold correction

2.5 型壳制作

按表 2 工艺制作全硅溶胶型壳，并采用高温蒸汽脱蜡釜脱蜡后获得试验用型壳。

2.6 铸件浇注及后处理

采用箱式电阻焙烧炉对试验型壳进行预热，采用 25 kg 三室真空感应电炉重熔 K648 合金锭进行浇注(表 3)。浇注后经过冷却、清壳、去除浇注系统、热处理、喷砂等处理后获得铸件。

3 实验结果与分析

3.1 熔模轮廓尺寸分析

采用 Geomagic Control 蓝光扫描仪对两种结构熔模分别进行扫描[17]，并与 3D 理论模型进行比对分析(图 5)。

结果显示，实心熔模表面偏移量为 -0.695~+0.735 mm，空心熔模表面偏移量为 -0.44~+0.475 mm。同时，由于截面壁厚较大，实心熔模远端收缩后出现明显弯曲，且中间平面缩陷程度明显高于空心熔模

表1 熔模制备工艺参数

Tab.1 Process parameters of wax mold preparation

射蜡压力/(kg·cm^{-2})	射蜡流量/%	射蜡时间/s	蜡缸温度/℃	冷却缸温度/℃	冷却时间/s	射嘴保压时间/s	熔模冷却方式
10~20	20	20~30	58±5	58±5	40~60	20~30	空冷

表2 型壳制备工艺参数

Tab.2 Process parameters of shell preparation

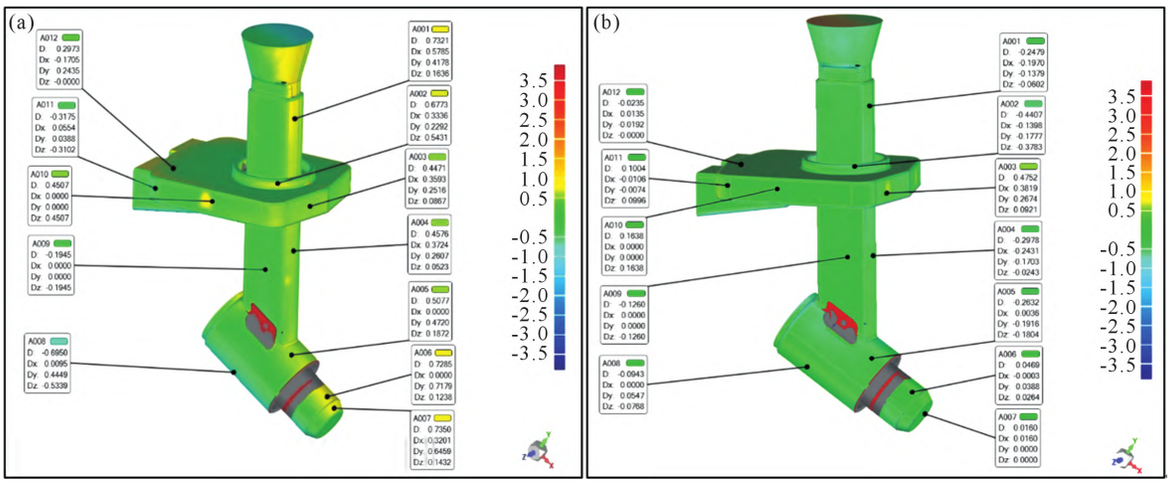
层次	料浆类型	料浆黏度	耐火材料	耐火材料粒度
第 1 层	锆英粉-硅溶胶	30~45 s	锆英砂	80~120 目
第 2 层	上店粉-硅溶胶	15~25 s	上店砂	30~60 目
第 3~7 层	上店粉-硅溶胶	8~15 s	上店砂	16~30 目
第 8 层	上店粉-硅溶胶	5~10 s	-	-

表 3 铸件浇注工艺参数

Tab.3 Process parameters of pouring

型壳预热温度/℃	保温时间/h	浇注温度/℃	浇注速度/s	真空度/Pa
1 050	2	1 450	10	0.05

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



注：图中模型表面颜色为熔模表面相对理论模型的偏移量(单位：mm)，即绿色表示偏移量为 -0.50~+0.50 mm，绿色至红色渐变表示熔模表面正偏移(多肉)，绿色至蓝色渐变表示熔模表面负偏移(缺肉)。灰色表示扫描盲区，即因结构限制，无法准确扫描到熔模表面

图 5 熔模蓝光扫描结果：(a) 实心熔模，(b) 空心熔模

Fig.5 Scanning results of the wax mold: (a) solid structure, (b) hollow structure

(图 5 位置 A009)，这是由于空心熔模平均壁厚的降低减少了熔模压制过程聚集的热量，降低了熔模冷却收缩时产生的内应力。同时由于熔模与金属模具接触面积的增加，使得熔模冷却更平稳、均匀[18-19]。可见，将熔模大于 13 mm 的壁厚降低至 4.5~5.0 mm 后，熔模远端易弯曲变形部位的形变量得到了有效缓解，平面芯部的缩陷也得到了缓解，这对提高熔模尺寸精度意义重大。

3.2 熔模线性尺寸分析

对两种结构熔模的关键尺寸进行检测，并按式(1)计算实际线收缩率(表 4)。结果显示，实心熔模平均线收缩率为 1.16%，空心熔模平均线收缩率为 0.54%(图 6)。

$$\alpha=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中，α 为熔模线收缩率；A_0 为模具型腔尺寸；A_1 为熔模尺寸。

可见，空心熔模的所有关键尺寸的线收缩率均小于实心熔模，其中熔模冷却过程中收缩距离越大的尺寸其线收缩率降低越明显，原熔模壁厚小于空心设计的最小壁厚 4.5 mm 部位的尺寸其线收缩率变化较小，这是由于这些部位热量低，冷却收缩应力小，在熔模从模具内取出之前，已经充分冷却凝固，

表 4 熔模关键尺寸实际线收缩计算

Tab.4 Linear shrinkage of key dimensions of wax mold

序号	模具型腔尺寸 A_0/mm	实心熔模		空心熔模	
		实测尺寸 $A_{1实}$/mm	线收缩率 $\alpha_{实}$/%	实测尺寸 $A_{1空}$/mm	线收缩率 $\alpha_{空}$/%
1	73.83	72.50	1.80	73.09	1.00
2	61.97	60.98	1.60	61.88	0.15
3	14.36	14.30	0.45	14.32	0.31
4	53.35	52.80	1.03	52.88	0.88
5	26.68	26.42	0.97	26.48	0.75
6	34.89	34.71	0.52	34.79	0.29
7	38.99	38.24	1.92	38.58	1.05
8	85.16	84.42	0.87	84.88	0.33
9	16.42	16.20	1.32	16.40	0.10

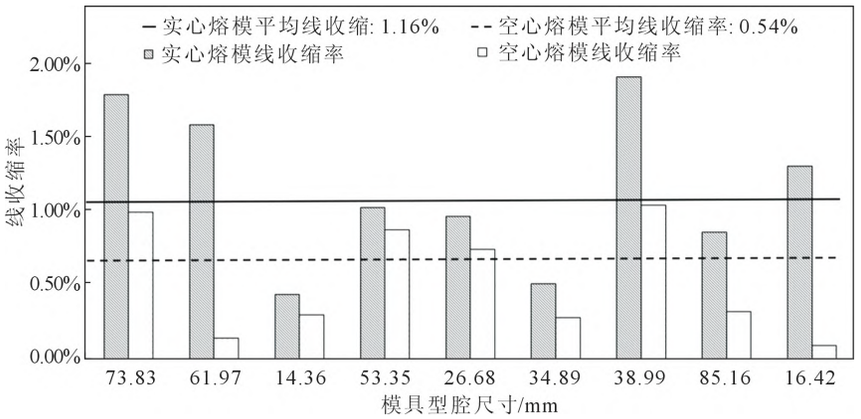


图 6 熔模关键尺寸线收缩率

Fig.6 Linear shrinkage of key dimensions of wax mold

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

熔模取出后也不会出现“回软”。

3.3 铸件尺寸分析

根据 HB 6103 对铸件尺寸检测结果进行分析(表 5)。结果显示，实心熔模制备的铸件尺寸精度满足 CT7 级，按式(2)计算平均线收缩率为 2.70%；空心熔模制备的铸件尺寸精度满足 CT5 级，按式(2)计算平均线收缩率为 2.41%(图 7~8)[20]。

$$\beta=\frac{A_0-A_2}{A_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中，β 为铸件实际收缩率；A_0 为模具型腔尺寸；A_2 为铸件尺寸。

分析可知，试验铸件的实心熔模在冷却收缩过程中，除与矫形工装接触的部位外均属于自由收缩，收缩受壁厚影响较大，壁厚越大的位置收缩应力越大，造成整个熔模不同位置的收缩差异较大，导致铸件尺寸波动偏大。将熔模进行空心设计后，人为降低了熔模的壁厚，降低了不同位置的收缩差，且空心部位有金属型芯支撑，在熔模从模具取出之前，这些部位均属于受阻收缩，因此熔模和铸件的尺寸波动较小。

表 5 铸件尺寸检测结果

Tab.5 Key dimensions of castings

序号	模具型腔尺寸 A_0/mm	铸件(实心熔模)		铸件(空心熔模)	
		实测尺寸 $A_{2实}$/mm	线收缩率 $\beta_{实}$/%	实测尺寸 $A_{2空}$/mm	线收缩率 $\beta_{空}$/%
1	73.83	72.45	1.87	72.17	2.25
2	61.97	59.97	3.23	60.24	2.79
3	14.36	14.07	2.07	14.04	2.26
4	53.35	52.33	1.91	52.19	2.17
5	26.68	25.71	3.62	26.15	1.97
6	34.89	34.15	2.11	34.08	2.31
7	38.99	37.98	2.60	37.98	2.58
8	85.16	82.47	3.15	82.69	2.89
9	16.42	15.80	3.73	16.01	2.49

4 结论

(1)通过将实心熔模的截面厚度按4.5~5.0 mm进行局部空心化设计，并对熔模进行 2 h 以上矫形，可缓解熔模较大平面的中心缩陷和远端弯曲，且熔模的整体线收缩由 1.16%降低至 0.54%。

(2)熔模铸件尺寸精度由 CT7 级提高至 CT5

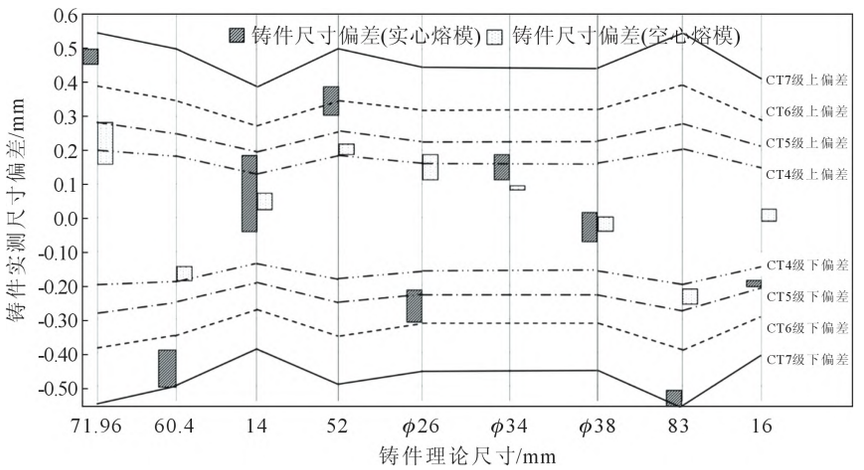


图 7 铸件尺寸公差带及精度等级示意图

Fig.7 Dimensional tolerance zone and dimensional accuracy grade of castings

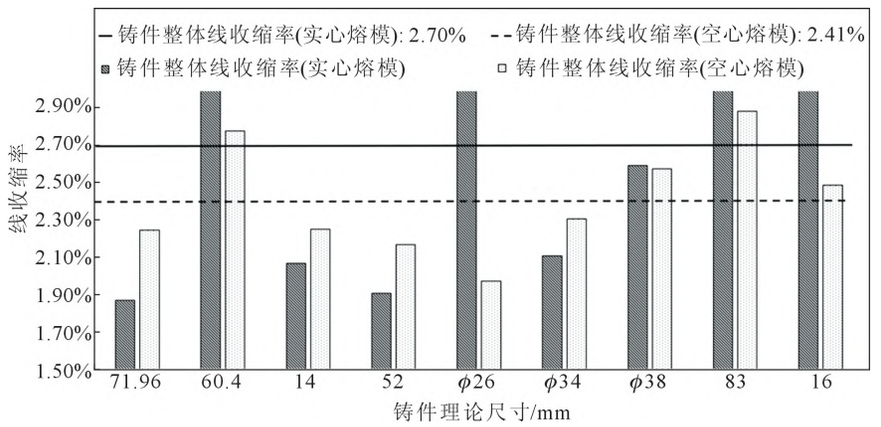


图 8 铸件关键尺寸整体线收缩率

Fig.8 Linear shrinkage of key dimensions of castings

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

级，铸件实际线收缩率由 2.70%降至 2.41%，该结果可为厚大熔模铸件的铸造工艺设计提供参考依据。

参考文献：

[1] 刘鸣，张继聪，郭文刚，等. 重型燃气轮机空心导向叶片精密铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金，2017, 37(1): 49-52.
LIU M，ZHANG J C, GUO W G, et al. Investment casting process of the heavy gas turbine blade [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(1): 49-52.

[2] 孙敏，梁宝桢. 熔模铸造[M]. 北京：北京理工大学出版社，2015.
SUN M, LIANG B Z. Investment casting [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.

[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.
ZHANG Z Y, LIANG B N. The factors influencing the casting's dimension precision of molten mould during the process of making mould [J]. Mechanical Research & Application, 2002, 15 (2): 15-16.

[4] 佟天夫，陈冰，姜不居. 熔模铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，1991.
TONG T F, CHEN B, JIANG B J. Investment casting process[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.

[5] 甘玉生，田军山. 用填料提高熔模铸件尺寸精度的研究[J]. 中国铸造装备与技术，2002(3): 18-19.
GAN Y S, TIAN J S. Research on improving the dimensional accuracy of investment castings with fillers [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2002(3): 18-19.

[6] 史杨. 精铸中温模料配方及工艺参数优化[D]. 合肥：合肥工业大学，2013.
SHI Y. Optional design for the mid temperature patten wax and technological parameters in the investment casting[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

[7] 陈冰. 熔模铸件的尺寸稳定性和精度[J]. 特种铸造及有色合金，2003(1): 53-56.
CHEN B. Dimensional stability and accuracy of investment castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003(1): 53-56.

[8] 刘鸣，张继聪，陈博文. 精铸行业智能制造信息化之路——TSES 智能制造管理系统在熔模精密铸造行业中的应用[A]. 中国铸造行业系列会议(384 次)——第十五届中国精密铸造年会论文集[C]. 北京：中国铸造协会，2017. 65-73.
LIU M, ZHANG J C, CHEN B W. The Road of intelligent manu facturing informatization in precision casting industry [A]. China Foundry Association Series Conference (384 times) - Proceedings of the 15th China Precision Casting Annual Conference [C]. Beijing: China Foundry Association, 2017. 65-73.

[9] 王晓平. 关于现代机械制造工艺与精密加工技术问题探讨[J]. 科技视界，2018(8): 142-143, 126.
WANG X P. Discussion on the problems of modern machinery manufacturing process and precision machining technology [J]. Science & Technology Vision, 2018(8): 142-143, 126.

[10] 雷彬，王力丹. 现代机械制造工艺及精密加工技术的应用分析[J]. 河北农机，2023(2): 75-77.
LEI B, WANG L D. Application analysis of modern mechanical manufacturing technology and precision machining technology[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2023(2): 75-77.

[11] 叶军，林建平，朱宁，等. 第十六届中国国际模具技术和设备展览会现代模具制造技术及设备评述[J]. 电加工与模具，2016(6): 1-8, 22.
YE J, LIN J P, ZHU N, et al. The reviews for technology and equipment of modern mould manufacturing in DMC 2016[J]. Electromachining & Mould, 2016(6): 1-8, 22.

[12] HOANG K T，YANG S H. Kerf analysis and control in dry micro-wire electrical discharge machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78: 1803-1812.

[13] ZHANG Q H, ZHANG J H, ZHANG Q B, et al. Experimental research on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining (UEDM) in gas [J]. Key Engineering Materials, 2006, 315-316: 81-84.

[14] 姜不居. 实用熔模铸造技术[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2008.
JIANG B J. Practical investment casting technology[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2008.

[15] 包颜堃，陈才金，朱锦伦. 熔模精密铸造技术[M]. 杭州：浙江大学出版社，2011.
BAO Y K, CHEN C J, ZHU J L. Investment casting technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011.

[16] 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.
CHEN J H, YANG B, LI B, et al. Quality control of wax pattern for investment casting [J]. Foundry Technology, 2012, 33(3): 370-372.

[17] 赵晓青. 无标记蓝光面扫描三维测量技术在铸件尺寸鉴定中的应用[A]. 2016 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆：重庆铸造行业协会，重庆市机械工程学会铸造分会，2016. 385-387.
ZHAO X Q. Application of unmarked blue light surface scanning 3D measurement technology in size identification of castings [A]. Proceedings of the chongqing foundry annual meeting [C]. Chongqing: Chongqing Foundry Industry Association, Foundry Institution of Chongqing Mechanical Engineering Society, 2016. 385-387.

[18] 鲁蕊，包玉秋，许云祥. 防止精密铸造蜡模变形的几种措施[J]. 特种铸造及有色合金，2008, 28(2): 135-136.
LU R, BAO Y Q, XU Y X. Some countermeasures of preventing the deformation of investment castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(2): 135-136.

[19] 杨铭，廖敦明，陈宇豪，等. 基于 Projection VOF 方法的熔模铸造蜡模充型过程数值模拟[J]. 铸造，2023, 72(2): 107-114.
YANG M, LIAO D M, CHEN Y H, et al. Numerical simulation of mold filling process of investment casting wax pattern based on projection VOF method[J]. Foundry, 2023, 72(2): 107-114.

[20] 刘杰，卜昆，李永毅，等. 涡轮叶片铸件收缩率计算与分析[J]. 现代制造工程，2008(3): 9-11, 87.
LIU J, BU K, LI Y Y, et al. Casting shrinkage analysis of turbine blade[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(3): 9-11, 87.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net