DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.04.012

精密铸造用水溶性蜡芯制取的蜡模尺寸精度控制研究

孙　冰,常化强,董振江,李　帅,乔海滨,王　哲,李渤渤
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000)

摘　要:研究了水溶芯与蜡模外模复合制蜡过程中的水溶芯及蜡模在不同尺寸、不同收缩状态下的收缩规律。设计并采用回字形阶梯模型,开展了水溶芯与中温蜡外模复合制蜡工艺实验,分析了水溶芯压蜡对蜡模外模自由收缩尺寸及限制收缩尺寸的影响。结果表明,蜡模内腔基础尺寸 5~40 mm 时,蜡模与水溶芯接触部分受阻收缩的线收缩率为 0.34%~0.77%,比自由收缩低 50%左右;随着基础尺寸的增加,受阻线收缩量增大,收缩率逐渐降低;同时,在冷却阶段,水溶芯阻碍蜡模凹缩变形,更好地保证了蜡模尺寸及表面质量。试制蜡模内腔尺寸波动控制在 0.1 mm 以内,较传统工艺尺寸精度提高了 70%,蜡模表面质量得到了很大的提高。

关键词:水溶芯;复合蜡模;尺寸精度;收缩率

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)04-0299-04

Study on Dimension Precision Control of Wax Pattern Using Water Soluble Wax Core in Investment Casting

SUN Bing, CHANG Huaqiang, DONG Zhenjiang, LI Shuai, QIAO Haibin, WANG Zhe, LI Bobo
(LuoYang Shuang Rui Precision Casting Titanium Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: The shrinkage law of water-soluble core and wax mold under different size and different shrinkage state in the process of compound wax making with water-soluble core and wax mold was studied. A zigzag step model was designed and used to carry out the compound wax making process experiment of water-soluble core and medium-temperature wax outer mold. The influence of water-soluble core pressing wax on the free shrinkage size and limited shrinkage size of wax outer mold was analyzed. The results show that when the base size of wax mold is 5~40 mm, the linear shrinkage of the contact part between wax mold and water-soluble core is 0.34%~0.77%, which is about 50% lower than that of free shrinkage. With the increase of foundation size, the amount of constricted line shrinkage increases and the shrinkage rate decreases gradually. At the same time, in the cooling stage, the water-soluble core prevents the wax mold from concave deformation, which better ensures the size and surface quality of the wax mold. The size fluctuation of the inner cavity of the wax mold is controlled within 0.1 mm, which is 70% higher than that of the traditional process. The surface quality of the wax mold is greatly improved.

Key words: water-soluble core; compound wax pattern; dimensional accuracy; contraction

熔模精密铸造是一种精度高且后续加工少、无切削的特种铸造方法,主要用于生产各种复杂结构且本身结构难以机加工的零部件[1-4]。水溶芯复合蜡模作为熔模铸造复杂型腔空心结构的重要转接件,其外形轮廓及尺寸精度是影响铸件成形质量的重要因素。有数据显示,国外某著名的航空发动机制造公司通过采用水溶芯优化模具结构以及提高匹配精度实现了净成形复杂空心叶片,产品合格率达 70%,而我国铸造毛坯尚达不到这个水平[5-11]。目前国内对复杂型腔空心结构产品在内腔精确控形方面主要通过优化蜡料性能及压蜡工艺参数来提高蜡模的外形精度,而未见有在使用水溶芯成型蜡模过程中外形尺寸及表面质量的传递性方面的研究报道[12-19]。本文作者研究水溶芯成型蜡模内腔的收缩规律,为无余量精铸件蜡模尺寸控制提供基础性的参考数据,以达到实现优质、先进铸造技术的目的。

收稿日期:2022-02-23
基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB2008300,2020YFB2008301)
作者简介:孙　冰(1988—),硕士,工程师.主要从事钛及钛合金精密铸造方面的工作.电话:15236667166,Email:ice211sun@163.com

1　试验方案

1.1　蜡模设计

为了研究不同尺寸下的线收缩数据,对典型铸

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

件产品内腔进行结构特征提取，设计采用了回字形阶梯结构蜡模，如图 1 所示，其中蜡模的尺寸类型及规格：自由收缩的外围尺寸长度 L 方向为：L_1、L2、L_3、L_4，高度 H 方向为：H_1、H_2、$H3$、H_4；受限收缩的阶梯内腔尺寸高度 h 方向为：h_1、h_2、h_3、h_4、h_5、h_6、h_7、h_8。试验一共制作了 4 组蜡模，各组蜡模理论尺寸如表 1 所示。

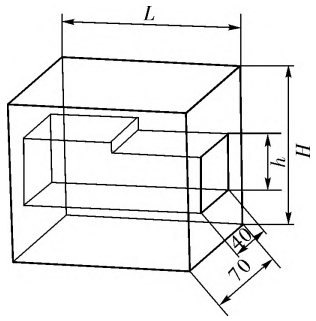


图 1 回字形蜡模结构
Fig.1 Structure of "回"-shaped wax pattern

表 1 蜡模尺寸/mm
Tab.1 Dimension of wax pattern

蜡模	蜡模 1	蜡模 2	蜡模 3	蜡模 4
L	L_1 50	L_2 60	L_3 70	L_4 80
H	H_1 50	H_2 60	H_3 70	H_4 80
h	h_1 5 h_2 10	h_3 15 h_4 20	h_5 25 h_6 30	h_7 35 h_8 40

1.2 蜡模材料及射蜡工艺

实验所用蜡模模料为本公司正常生产用 K512 中温模料蜡，物理性能见表 2。射蜡机采用带蜡缸的双工位射蜡机，先将水溶蜡芯放入到射蜡模具中，水溶芯蜡芯芯头定位到模具定位槽内，合模射蜡，射蜡压力为 20~23 kg，射蜡温度为 55~60 ℃，射蜡时间为 90±5 s。将已经完成压蜡、包含有水溶芯的蜡模从模具中小心取出，放置于一定浓度的柠檬酸溶液中静置一定时间，水溶蜡逐渐溶解溃散，完全溶解后得到蜡模。蜡模用清水冲洗干净即得到待测蜡模。

2 实验结果及分析

采用水溶芯成型蜡模内腔的试样，其内腔尺寸涉及到两个收缩阶段，模具、水溶芯、蜡模，过程中蜡模冷却会出现收缩，利用三座标、蓝光扫描、游标卡尺对水溶芯模具、水溶芯、蜡件尺寸测量。水溶蜡阶梯试样及射蜡后蜡模试样见图 2 和图 3，对回形体试样尺寸测量，按照公式(1)和公式(2)进行蜡件收缩量和线收缩率的计算，获得表 3、表 4 及图 4 的线收缩数据。

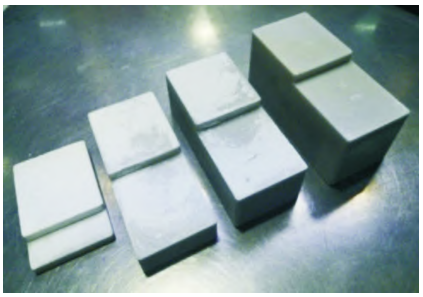


图 2 水溶蜡阶梯试样
Fig.2 Stepped test specimens of water-soluble wax

表2 K512模型蜡的物理性能
Tab.2 Physical properties of K512 wax

模料	软化点 /℃	针入度 /mm	灰分 /%	线收缩率 /%	颜色
K512	79	6×10^{-1}	＜0.05	＜1.5	黄绿色

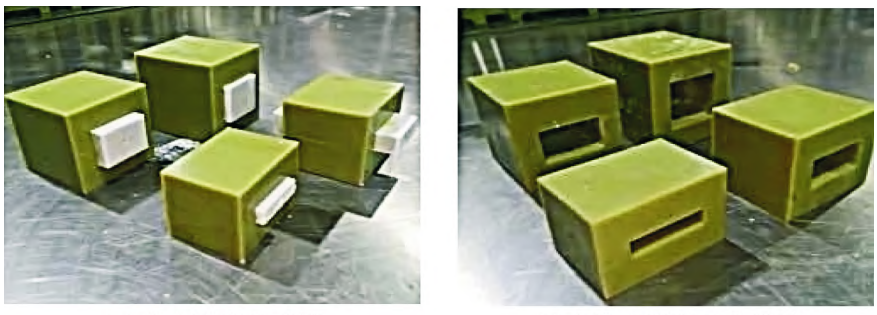
$$\Delta L=L_0-L \tag{1}$$

$$\delta=\frac{L_0-L}{L_0} \tag{2}$$

式中，ΔL 为收缩量；δ 为收缩率。

水溶蜡阶梯试样的线收缩数据如表 3，水溶蜡芯在 20~40 mm，收缩率在 0~1.8‰，水溶蜡收缩率随阶梯试样的截面尺寸的增大先减小后增大；当截面厚度＜20 mm 时，线收缩量表现为负值，推断原因可能跟蜡芯表面吸潮返膨有关，而随着蜡芯厚度的增加其内部收缩起主要作用，使蜡芯收缩量表现正值且随厚度增加收缩量增大。

从图 4 回字形蜡模试样内腔的线收缩数据可见，在相同壁厚下，5~40 mm 内腔尺寸的蜡模与水溶芯接触部分线收缩量在 0.04~0.14 mm，收缩率 0.34%~0.77%；收缩规律显示，相同壁厚下，内腔基础尺寸增加，线收缩量增大，线收缩率变化量减小。



(a) 带水溶芯的蜡模　　(b) 去除水溶芯后的蜡模

图 3 压蜡后的回字形蜡模
Fig.3 "回"-shaped wax patterns

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 阶梯型水溶性蜡芯的收缩数据
Tab.3 Linear shrinkage data of step water-soluble wax cores

	水溶蜡阶梯试样							
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
理论尺寸 L_0/mm	5	10	15	20	25	30	35	40
线收缩量 ΔL/mm	-0.04	-0.05	-0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.07
线收缩率 δ/%	-0.80	-0.47	-0.27	0.12	0	0.02	0.10	0.18

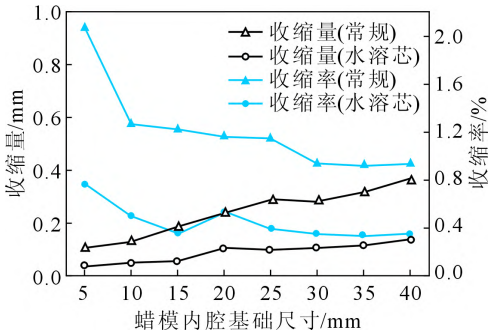


图 4 蜡模内腔收缩量和收缩率随基础尺寸的变化
Fig.4 The shrinkage of wax mold cavity varies with the base size

与常规金属抽芯取模的方式相比，使用水溶芯的蜡模起模后在水溶芯的持续限制收缩作用下，内腔收缩量更小，尺寸稳定性更好。

由表 4 蜡模外围自由收缩随基础尺寸的变化数据所示，在 50~80 mm，收缩量在 0.19~0.85 mm，收缩率在 0.38%~1.07%。收缩规律显示，随着蜡模外围基础尺寸的增加，蜡模收缩量增大，收缩率增大。综合图 4，使用水溶芯的蜡模内腔在冷却过程中受到内置水溶芯的阻碍，不能自由收缩，收缩较外围尺寸小，此现象将导致蜡模壁厚变薄，在模具设计时应注意考虑。

表4 蜡模外围自由收缩数据
Tab.4 Free linear contraction data of wax pattern

	L_1	L_2	L_3	L_4
理论尺寸 L_0/mm	50	60	70	80
线收缩量 ΔL/mm	0.19	0.43	0.57	0.85
线收缩率 δ/%	0.38	0.72	0.81	1.07

实际生产过程中，为了不使取模发生困难以及提高生产效率，蜡模在压制完成后很短的时间内就从模具中取出并未完全冷却定型，易引起厚大区域的凹缩、变形。表 5 为不同除芯工艺下浸泡时间(取模后蜡模空冷后完全浸没于溶液中) 及内外腔厚大区域凹陷情况对比，其中 1~4、(1)~(4)分别代指蜡模外围及内腔的 4 个平面。蜡模外围尺寸在非限制收缩过程中易引起凹缩变形，随着浸泡(水冷)时间的延长，凹缩变形程度增大，当浸泡时间超过 8 h 后，凹缩变形基本稳定。而蜡模内腔在水溶芯的持续限制收缩作用下凹缩程度较小。可见，采

表 5 不同溶芯工艺下浸泡时间(取模后蜡模空冷后完全浸没于溶液中)及内外腔厚大区域凹陷情况对比
Tab.5 Comparison of the soaking time under different core-removing process (the dark die is completely immersed on solution after air cooling) and the depression in the thick and large areas of inner and outer cavities

除芯	蜡模外围尺寸凹陷量 /mm				蜡模内腔尺寸凹陷量 /mm			
时间	1	2	3	4	(1)	(2)	(3)	(4)
20 h	0.28	0.28	0.38	0.42	0.04	0.04	0.13	0.13
8 h	0.28	0.25	0.33	0.41	0.08	0.08	0.06	0.06
70 min	0.12	0.10	0.16	0.15	0.05	0.05	0.11	0.11
47 min	0.10	0.11	0.16	0.17	0.09	0.09	0.12	0.12
30 min	0.09	0.11	0.12	0.17	0.07	0.07	0.09	0.09
25 min	0.11	0.10	0.13	0.12	0.06	0.06	0.08	0.08

用水溶芯是提高蜡模内腔尺寸精度及质量的一种方法。但蜡模外表面的凹缩区域仍需要增加正量补偿修复。

3　生产应用结果对比

生产应用测试件如图 5 所示，该产品结构中空内凹，肚大口小，常规采用分块抽芯取模及分体蜡焊组合工艺成型蜡模。根据检验要求，先将常规工艺压制的蜡模(WP-1 和 WP-2)和水溶芯复合蜡模工艺制作的蜡模(CP-1 和 CP-2)进行了部分尺寸检测，测量结果如表 6；蜡模外观质量如图 6。根据数据显示，采用常规工艺制作的蜡模内腔尺寸波动约 0.5 mm，蜡模表面有明显的补修痕迹，而采用水溶芯压蜡，蜡模内腔尺寸波动控制在了 0.1 mm 以内，且蜡模内腔表面光滑，内流道表面无需修补，既保证了蜡模尺寸精度，又大大减少了蜡模表面修整量，使

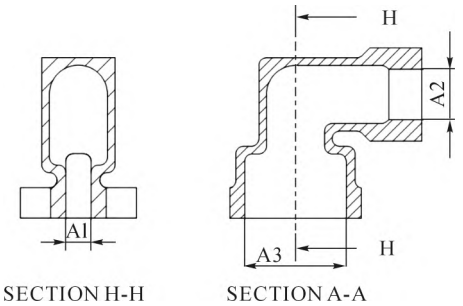


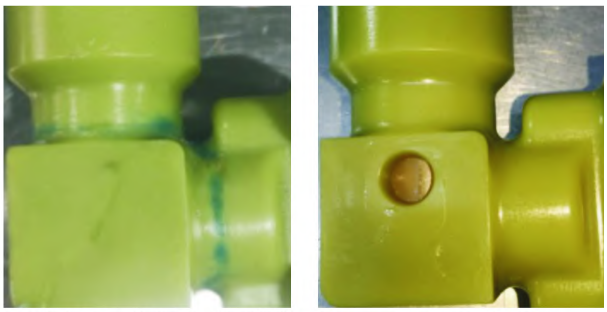
图 5 生产用蜡模的测量尺寸示意图
Fig.5 Schematic of dimensions measured for the wax pattern used in production

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 6 生产用蜡模的尺寸测量结果

Tab.6 Measured dimensions for the wax pattern used in production

项目尺寸	理论数值 /mm	-	常规工艺		改进后工艺	
		-	WP-1	WP-2	CP-1	CP-2
A1	10.04±0.11	压型	10.06	10.06	10.05	10.05
		蜡模	9.78	9.69	9.99	10.02
A2	ϕ20.08±0.26	压型	20.08	20.08	20.10	20.10
		蜡模	ϕ19.82	ϕ19.73	ϕ20.08	ϕ20.09
A3	40.36±0.30	压型	40.37	40.37	40.40	40.40
		蜡模	39.90	39.86	40.29	40.26



(a) 常规工艺制取的蜡模　(b) 采用水溶蜡芯制取的蜡模

图 6 常规工艺、采用水溶蜡芯制取的蜡模

Fig.6 Wax pattern made by conventional method and with using water soluble wax core

蜡模制作效率提升了近 1 倍。

4 结论

(1)对于水溶蜡芯，当蜡模内腔基础尺寸为 5~40 mm 时，其自由线收缩率在 0~1.8‰；蜡模与水溶蜡接触的内腔部分，线收缩率为 0.34%~0.77%，比常规的金属抽芯取模低 50%左右，线收缩率小，尺寸可控；此外，随着基础尺寸的增加，蜡模外围自由线收缩量增加，线收缩率增大，此现象将导致蜡模壁厚变薄，在模具设计时应注意考虑。

(2)采用水溶芯复合蜡模制备蜡模，限制蜡模内腔收缩，减小蜡模冷却过程中内腔的表面缩陷，保证蜡模的尺寸稳定。

(3)基于实验进行生产测试，采用水溶芯制备蜡模，可将蜡模内腔尺寸波动控制在 0.1 mm 以内，更好地保证蜡模几何结构及尺寸精度，提高了蜡模表面质量及生产效率。

参考文献：

[1] 冉兴，吕志刚，曹建，等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术[J]. 铸造，2021，70(2): 137-146.

[2] 董一巍. 净成形空心涡轮叶片精铸模具型腔优化设计方法研究[D]. 西安：西北工业大学，2012.

[3] 曹腊梅，薛明. 高温合金涡轮叶片近净形熔模精密铸造技术研发趋势[J]. 铸造，2021, 70(2): 147-154.

[4] Eliška Adámková, Petr Jelínek, Jaroslav Beňo, et al. Water-soluble cores verifying development trends[J]. Materiali in Tehnologije / Materials and Technology 2015, 49(1): 61-67.

[5] 刘晓光. 复杂空心定向涡轮叶片高强度型芯技术研究[J]. 铸造，2015, 64(1): 1-4.

[6] 郭国谊. 高温合金薄壁复杂铸件的失蜡铸造工艺优化 [J]. 铸造技术，2015, 36(10): 2607-2609.

[7] 刘鸿羽，柴皓，娄延春，等. ZTA15 大型钛合金熔模精密铸件界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020，49(3): 890-896.

[8] 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.

[9] 谭培松. 水溶蜡型芯在精密铸造中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 57-59.

[10] 王国祥，雷四雄，李建中，等. 复杂内腔紧凑型精铸件整体蜡模模具研究[J]. 模具技术，2021(6): 43-47.

[11] 熊聪.钛合金叶轮快速熔模铸造工艺研究[D].西安：西安科技大学，2019.

[12] 肖克. 影响熔模铸件尺寸精度和表面粗糙度的因素分析[J]. 铸造技术，2005, 26(8): 712-713.

[13] 司永超，黄东，魏战雷，等. 一种镂空薄壁 ZTC4 框架的熔模铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2016, 36(12): 1302-1304.

[14] 朱梦秀，钱巍. 基于 GD&T 的钛合金铸件尺寸系统分析[J]. 铸造，2021, 70(5): 577-581.

[15] 彭恒元. ZL205A 合金复杂铸件收缩尺寸精确控制[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.

[16] 黄西西，吴士平，戴贵鑫，等. 基于局部包络密度的铸件收缩尺寸的精确设计[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(5): 543-546.

[17] 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): 1265-1268.

[18] 刘金虎，丁贤飞，冯新，等. 基于正交试验的铸造高 Nb-TiAl 合金收缩率研究[J]. 航空制造技术，2019, 62(21): 72-78, 100.

[19] 余童，汪东红，吴文云，等. 导向器蜡模工艺参数优化与尺寸精度检测[J]. 铸造，2021, 70(11): 1329-1334.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net