

基于脱蜡前存放温度调控的型壳脱蜡裂纹防治

李亚芳¹ 孔小青¹ 刘俊朋¹ 李 健² 王君武¹ 贾敬惠¹ 郑兴林¹ 姚建省³

(1.贵阳航发精密铸造有限公司; 2.江苏大学材料科学与工程学院;
3.北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室)

摘 要 精密铸造过程中,型壳湿态强度不足时在脱蜡过程容易发生开裂从而引起浇注漏钢问题。提出通过控制脱蜡前型壳存放温度来实现脱蜡裂纹的防治,并对控制存放温度后的型壳脱蜡裂纹进行研究。结果表明,低于制壳温度的存放温度有利于控制型壳脱蜡裂纹发生,低存放温度使蜡模体积收缩,与型壳内腔形成一定的间隙,为后续的脱蜡过程提供蜡模膨胀裕度,降低其开裂倾向。脱蜡前采用温度低于制壳温度 4 K 的环境存放型壳,能有效防治脱蜡裂纹。

关键词 精密铸造;型壳;存放温度;脱蜡开裂

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Crack Prevention for Ceramic Mould Based on Controlling Storage Temperature before Dewaxing

Li Yafang¹, Kong Xiaoqing¹, Liu Junpeng¹, Li Jian², Wang Junwu¹, Jia Jinghui¹,
Zheng Xinglin¹, Yao Jansheng³

(1.Guiyang AECC Power Precision Casting Co., Ltd.; 2.School of Materials Science and Engineering,
Jiangsu University; 3.Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,
Beijing Institute of Aeronautical Materials.)

Abstract: The dewaxing crack commonly occurs in the pattern with low wet strength during investment casting, which subsequently leads to steel leakage. A strategy of preventing dewaxing crack was proposed based on controlling the storage temperature of pattern before dewaxing, and dewaxing crack of shell after controlling the storage temperature was investigated. The results indicate that the storage temperature below the shell-making temperature is beneficial to controlling the occurrence of dewaxing crack, and low storage temperature is helpful for the volume shrinkage of the wax pattern to form a certain gap between the wax pattern and the inner surface of the mould, providing expansion margin for the subsequent dewaxing process and thus reducing the cracking tendency. The dewaxing crack can be effectively prevented and controlled by using the storage environment with a temperature lower than 4 K, which is the shell-making temperature.

Key Words: Investment Casting, Shell, Storage Temperature, Dewaxing Crack

在精密铸造中,影响铸件品质的关键技术之一是制壳工艺,其中评价型壳品质的首要指标是型壳的强度^[1]。为了实现较高的型壳强度,广泛采用硅溶胶作为粘结剂来制备型壳,但这类型壳湿态强度较低,易受脱蜡高压蒸气对硅溶胶的溶解影响而降低^[2-3],型壳在受到拉应力作用时容易发生开裂^[4],从而引起后续的浇注漏钢问题。因此,探索硅溶胶型壳的开裂控制途径是精密铸造中亟待解决的问题。

为了控制硅溶胶型壳的开裂,需要改善硅溶胶型壳的湿态强度。YUAN C 等^[3]和 WANG F 等^[5]提出在制壳料浆中添加聚合物或纤维材料来提升型壳湿态强度,有效降低了型壳脱蜡开裂的风险。然而,该方法增加了原材料及工艺成本,同时,由于聚合物或纤维材料影响粘结剂的流动性,使得蜡模上的尺寸精细的孔、槽等特征难以复制到型壳上。近年,曾洪等^[6]报道了在型壳薄弱部位贴蜡片的方法可以有效防止脱蜡开裂,但作

收稿日期:2022-12-16;修改稿收到日期:2023-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775248)

第一作者简介:李亚芳,女,1990 年出生,工程师,贵阳(550000),E-mail:lyf090812@163.com

通信作者:姚建省,男,1982 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:tju-yjs@163.com

引用格式:李亚芳,孔小青,刘俊朋,等. 基于脱蜡前存放温度调控的型壳脱蜡裂纹防治[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 282-1 286.

LI Y F, KONG X Q, LIU J P, et al. Crack prevention for ceramic mould based on controlling storage temperature before dewaxing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 282-1 286.

用有限,且操作繁琐,不利于大规模生产。型壳开裂取决于型壳的应力状态和湿态强度,而目前研究局限于湿态强度的提升,对型壳的应力状态及其变化报道很少。

在工程应用领域,型壳需要经历复杂的热过程和力学过程,尤其是精密铸造车间中脱蜡区域与制壳区域分离的布局下,型壳所经历的过程会对其应力状态产生较大影响。此时若对脱蜡区域的温度疏于控制,温度的波动将影响蜡模膨胀,进而影响型壳的应力状态。本研究通过改变脱蜡前的型壳存放环境温度,揭示了型壳脱蜡前温度波动对型壳脱蜡开裂的影响,并探索通过控制环境温度缓解型壳脱蜡开裂的可行性。

1 试验材料及方法

1.1 材料与工艺

所用的浆料配制材料为 JN30 硅溶胶和 320 目的电熔白刚玉粉,撒砂材料为电熔白刚玉砂。将尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的棒状蜡模和 $10\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的块状蜡模组合成“T”字型,见图 1。设置 5 个试验组,每个试验组制备 6 个型壳试样。

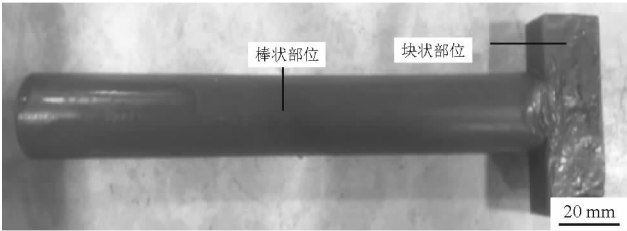


图 1 蜡模试样
Fig.1 Wax pattern specimen

所有试样均采用完全相同的制壳工艺,参数见表 1。将蜡模试样浸入面层料浆中,上下移动 2~3 次,并使其在料浆中保持 30 s 后,取出进行控浆、淋砂、干燥,重复上述步骤以完成第 2~5 层壳的制备。对试样进行封浆、干燥,即可得到试验所需的型壳。制备的型壳厚度为 5~6 mm,湿态强度为 1.5~2.0 MPa。

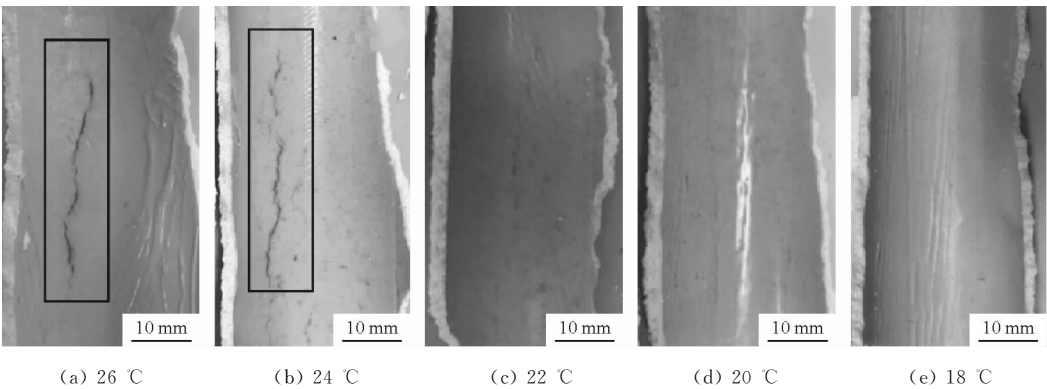


图 2 型壳脱蜡前不同存放温度保温 2 h 后棒状部位的脱蜡裂纹形貌
Fig.2 Dewaxing crack of shells at the rod part with different storage temperatures for 2 h before dewaxing

表 1 制壳参数

Tab.1 Paramerers of shell making process								
层数	浆料粉液比	浆料粘度(涂-4 杯)/s	撒砂	粒度/目	干燥温度/℃	干燥湿度/%	干燥时间/h	风速/(m·s ⁻¹)
1	3 : 1	60~80	电熔白刚玉	80	22±1	55±5	5	<0.5
2	2 : 1	20~30	电熔白刚玉	80	22±1	45±5	3	3.5
3~5	2.5 : 1	30~40	电熔白刚玉	46	22±1	45±5	3	3.5
6	2.5 : 1	30~40	—	—	22±1	45±5	24	3.5

所用脱蜡设备为高压蒸气脱蜡釜,脱蜡温度为 150~180 ℃,外胆压力为 0.7~1.0 MPa,保压时间为 8.0 min。

1.2 试验方法

(1)标准环境 将制壳环境作为对照试验的标准环境,温度为 22 ℃,波动<±1 ℃,用以模拟型壳在脱蜡前始终处于恒温状态,即 $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)高温环境 选取 2 个密闭环境,将温度分别设置为 24 ℃和 26 ℃,波动<±1 ℃,用以模拟型壳在脱蜡前经历不同程度的温度升高,即 $\Delta T>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)低温环境 选取 2 个密闭环境,将温度分别设置为 20 ℃和 18 ℃,波动<±1 ℃,用以模拟型壳在脱蜡前经历不同程度的温度降低,即 $\Delta T<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

制壳结束后,将型壳试样按组分别置于上述环境中,保温 2 h。结束后立即脱蜡、焙烧,将型壳用次甲基蓝浸泡 5 min,观察裂纹产生情况。

2 试验结果及讨论

2.1 脱蜡前温度波动对型壳脱蜡开裂的影响

图 2 为脱蜡前不同存放温度保温 2 h 后“T”字型试样棒状部位的脱蜡裂纹。可以看出,脱蜡前在高温环境保温 2 h 的试样,型壳内腔均发现长度约 40 mm 的裂纹(见图 2a 和图 2b),裂纹未穿透至型壳外表面,在两个温度下保温的试样,裂纹程度并未表现出明显差异。在标准环境和低温环境保温 2h 的试样,脱蜡后型壳内

腔均未观察到有裂纹出现(见图 2c~图 2e)。

图 3 为脱蜡前不同存放温度保温 2 h 后“T”字型的块状部位的脱蜡裂纹。可以看出,脱蜡前在高温环境保温 2 h 的试样,脱蜡后型壳出现较为严重的开裂。其中,环境温度为 26 ℃($\Delta T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,型壳外表面出现明显的次甲基蓝渗出,说明裂纹已穿透至型壳外表面,形成穿透性裂纹(见图 3a);环境温度为 24 ℃($\Delta T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,型壳内腔出现肉眼可见的清晰裂纹(见图 3b),但裂纹未穿透至型壳外表面,说明与 26 ℃环境相比,型壳脱蜡前在 24 ℃保温造成的脱蜡开裂程度有所降低。

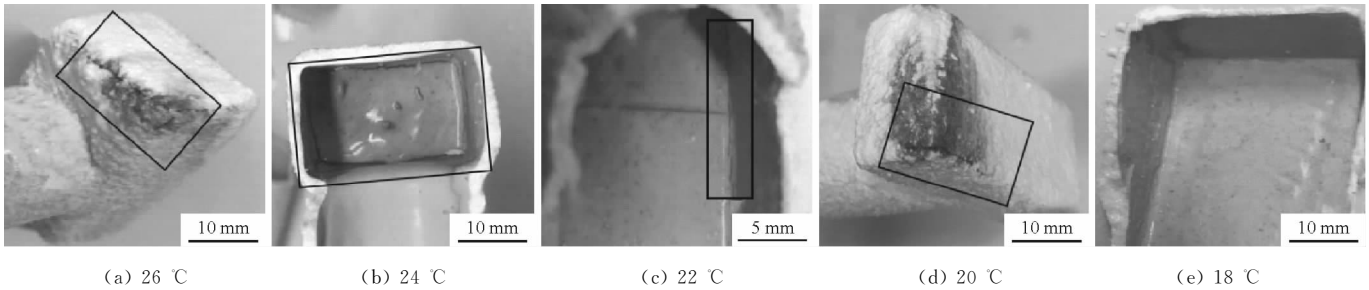


图 3 型壳脱蜡前不同存放温度保温 2 h 后块状部位的脱蜡裂纹形貌

Fig.3 Dewaxing crack of shells at quadrate part with different storage temperatures for 2 h before dewaxing

表 2 为型壳脱蜡前在不同存放温度保温 2 h 对应的脱蜡裂纹情况。可以看出,在制壳温度为 22 ℃的条件下,型壳脱蜡前在高温环境存放时,棒状部位和块状部位的开裂率均为 100%;在标准环境存放时,棒状部位开裂率为 0,块状部位开裂率为 100%;在低温环境存放时,型壳脱蜡开裂率明显下降,其中,存放温度为 20 ℃($\Delta T=-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,棒状部位开裂率为 0,块状部位开裂率为 17%,随着温度进一步降低至 18 ℃($\Delta T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,棒状部位和块状部位开裂率均为 0。

表 2 裂纹情况统计表

Tab.2 Statistics of crack formation

组别	制壳温度/ ℃	存放温度/ ℃	ΔT / ℃	裂纹发生率 (棒部)	是否 穿透	裂纹发生率 (块部)	是否 穿透
1	22±1	26	4	100%	否	100%	是
2	22±1	24	2	100%	否	100%	否
3	22±1	22	0	0	—	100%	否
4	22±1	20	-2	0	—	17%	—
5	22±1	18	-4	0	—	0	—

可以看出,脱蜡前型壳始终处于恒温状态的条件 下,仍存在一定的脱蜡开裂倾向,脱蜡前型壳经历温度的 上升将加剧其脱蜡开裂倾向,增加脱蜡开裂风险,而 脱蜡前型壳经历温度下降,将有效降低其脱蜡开裂倾 向,使其脱蜡开裂风险降低。同等条件下,块状部位脱 蜡开裂现象较棒状部位更为明显,且开裂均发生在边角 位置,说明与棒状部位相比,块状部位边角位置具有更 大的脱蜡开裂倾向。

综上,型壳在脱蜡前经历温度波动会影响脱蜡后型

脱蜡前在标准环境保温 2 h 的试样,脱蜡后型壳内腔仍然发现轻微裂纹存在(见图 3c)。脱蜡前在低温环境保温 2 h 的试样,型壳开裂程度得到显著缓解。其中,在 20 ℃($\Delta T=-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)保温 2 h 的所有试样中,除发现 1 个试样出现开裂外(见图 3d,裂纹穿透至型壳外表面),其他试样内腔均未发现裂纹,说明在该温度下存放,型壳仍存在一定的脱蜡开裂倾向,但开裂倾向较小,仅少数湿态强度过于薄弱的位置发生开裂;在 18 ℃($\Delta T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$)保温 2 h 的所有试样内腔均无裂纹出现(见图 3e)。

壳裂纹的出现,而裂纹的出现将大幅降低型壳强度。在 工程领域往往依据型壳外表面来判断型壳品质,如果裂 纹程度较轻,未穿透至型壳外表面,将此类型壳判为合 格型壳用于后续生产,将引发大量的浇注漏钢问题。

2.2 环境温度对型壳脱蜡裂纹的影响机制

环境温度对型壳脱蜡裂纹的影响与型壳所受的热 应力相关,其中涉及到型壳在脱蜡前存放的过程中所受 的热应力和脱蜡过程中产生的热应力。型壳在脱蜡前 存放的过程中,蜡模受热膨胀和冷却收缩将引起型壳的 应变和应力,当受到拉应力作用,且拉应力超过限度时 型壳将产生裂纹。在室温条件下,蜡料的线膨胀系数 α 约为 $2.5\times10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,因此,较小的温度波动即可引发其 产生明显的体积变化。对于半径为 R 的圆筒状型壳 (见图 4),当温度上升时($\Delta T>0\text{ }^{\circ}\text{C}$),其圆柱状蜡模的 周长将发生膨胀,约 $2\pi R\alpha\Delta T$,由于型壳贴附于蜡模表 面,型壳将随之产生 $\alpha\Delta T$ 的应变。此时,为抵抗应变的 进一步发生,型壳将产生沿周向的拉应力 $\sigma=E\alpha\Delta T$ (E 为型壳的弹性模量)。若拉应力 σ 超过湿态型壳能够承 受的最大拉应力 $\sigma_{\max}$,型壳将发生开裂。由于拉应力 σ 与温度变化呈正相关,即: $\sigma\propto\Delta T$,说明存放温度上升越 大,型壳受到的拉应力越大。因此,当型壳在脱蜡前的 存放温度过高时,型壳容易产生裂纹。

脱蜡过程中由蜡模膨胀产生的热应力对型壳脱蜡 开裂的影响原理见图 5。脱蜡初期,高压蒸气($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$)迅速进入脱蜡釜内胆,蜡模快速吸热并发生迅速膨

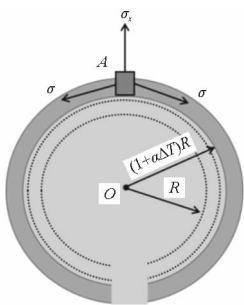


图4 温度上升引发型壳受力原理图

Fig.4 Stress diagram of shell induced by temperature rising

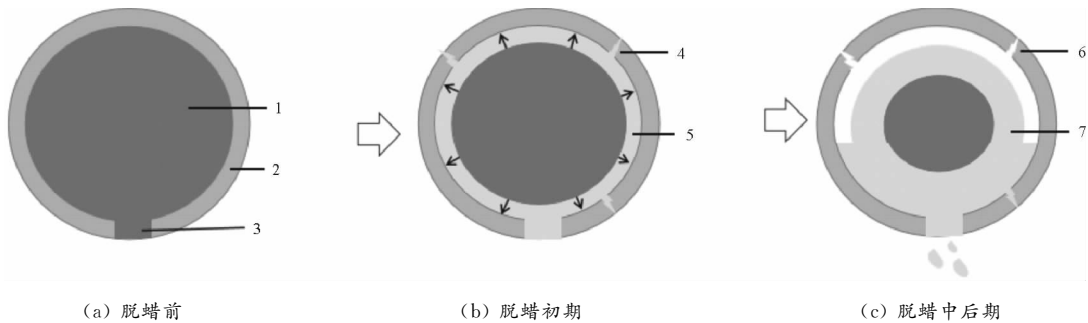


图5 脱蜡过程引发型壳开裂原理图

Fig.5 Crack mechanism of shell during dewaxing process

1.蜡模 2.型壳 3.排蜡口 4、6.裂纹 5.表层吸热区 7.吸热区

的存放环境温度则可缓解蜡模膨胀给型壳带来的拉应力,避免型壳脱蜡裂纹发生。因此,当脱蜡前型壳存放的环境温度低于制壳温度($\Delta T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$),存放温度的下降将使蜡模发生体积收缩,使其与型壳内腔产生一定的

胀,向外挤压型壳(图 5a~图 5b)也可能诱导型壳脱蜡裂纹,存放环境温度与制壳温度一致时试样的块状部位仍然会发生脱蜡裂纹。由于蜡模导热能力较差,吸热主要集中在蜡模表层^[7],蜡模表层进一步吸热将使其快速熔化并排出(图 5c),应力逐步得到释放,型壳开裂倾向得以消除,所以脱蜡过程中的蜡模膨胀的影响有限。前述结果中($\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)只有块状部位发生裂纹而棒状部分无裂纹也证实了这一结论。

由于蜡模膨胀受到型壳在脱蜡前的存放环境温度

和脱蜡初期蜡模吸热影响,若能通过控制型壳在脱蜡前

间隙 $x = -\alpha R \Delta T$,见图 6。间隙 x 的存在将在一定程度抵消脱蜡初期的蜡模膨胀量,降低蜡模对型壳内腔垂直向外的挤压作用,从而减小型壳受到的拉应力,降低其开裂倾向。

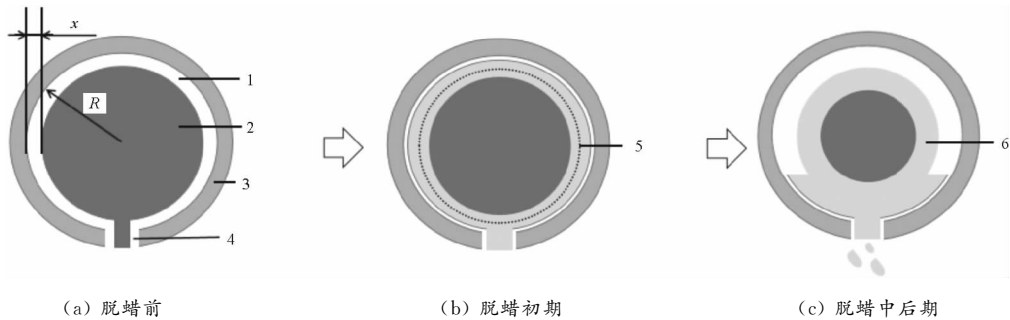


图6 降低存放温度缓解型壳开裂倾向原理图

Fig.6 Schematic diagram of cracking tendency reduction of shell by decreasing storage temperature

1.间隙 2.蜡模 3.型壳 4.排蜡口 5.表层吸热区 6.吸热区

图 7 为脱蜡前型壳存放温度对其开裂倾向的影响,假设 $\sigma_{\max}$ 为湿态型壳的强度。脱蜡初期,蜡模表层吸热区在熔化排出前能够达到的最高温度为 ΔT_0 ,型壳受到的最大拉应力 σ_0 为:

$$\sigma_0 = nE\alpha\Delta T_0 \quad (1)$$

式中, n 为修正系数,用以修正蜡模由整体膨胀变为表层膨胀的膨胀量。若 $\sigma_0 > \sigma_{\max}$,型壳将发生开裂。

脱蜡前,若型壳经历 ΔT_1 的温度上升,蜡模整体将发生膨胀,使型壳受到拉应力 σ_1 作用:

$$\sigma_1 = E\alpha\Delta T_1 \quad (2)$$

脱蜡初期型壳受到的最大拉应力 $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1$,因 $\Delta T_1 > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则有 $\sigma_1 > 0$, $\sigma_0 + \sigma_1 > \sigma_0$,因此, $\sigma > \sigma_0$,型壳的脱蜡开裂倾向增大。

脱蜡前,若型壳经历 ΔT_2 的温度下降,蜡模整体将发生体积收缩,相当于型壳受到应力 σ_2 作用:

$$\sigma_2 = E\alpha\Delta T_2 \quad (3)$$

脱蜡初期型壳受到的最大拉应力 $\sigma = \sigma_0 + \sigma_2$,因 $\Delta T_2 > 0$,则有 $\sigma_2 < 0$, $\sigma_0 + \sigma_2 < \sigma_0$,因此, $\sigma < \sigma_0$,型壳的脱蜡开裂倾向减小。温度的进一步下降将使 ΔT_2 进一步减小, σ_2 随之减小,当 σ_2 减小至使 $\sigma_0 + \sigma_2 < \sigma_{\max}$ 时,型

壳脱蜡开裂将完全消除。

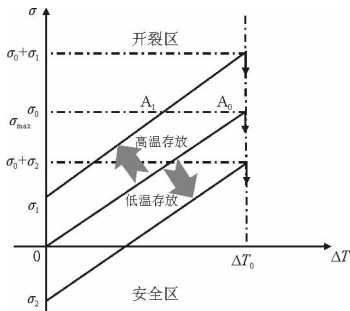


图 7 脱蜡前型壳存放温度对其开裂倾向的影响
Fig.7 The effect of shell storage temperature on dewaxing crack tendency before dewaxing

因 $\sigma_2 \propto \Delta T_2$, 由此推测, 脱蜡前型壳存放的温度越低, 脱蜡初期受到的拉应力 $\sigma_0 + \sigma_2$ 将越小, 越有利于降低其脱蜡开裂倾向。试验证明, 将脱蜡前型壳存放温度降低至制壳温度以下 4 K, 即可有效消除型壳的脱蜡开裂问题。

2.3 型壳结构对脱蜡裂纹影响分析

研究显示, 型壳边角位置在受力过程中存在一定的应力集中, 应力集中程度符合^[8]:

$$\sigma = \lambda \frac{20Fd \cos(\theta - \beta) r^{-0.16}}{Wb^2} \quad (4)$$

式中, σ 为型壳边角位置所受应力; λ 为型壳孔隙度修正值; r 为边角位置的半径; β 为边角位置的 1/2 张角; θ 为用于测试应力集中度的楔形块的 1/2 角; F 为载荷; d 为加载距离; W 为型壳宽度; b 为型壳厚度。式(4)表明, $\sigma \propto r^{-1} \cdot \beta^{-1}$, 即边角位置半径 r 和 1/2 张角 β 减小, 均会导致相应位置的应力集中增大。

与棒状部位相比, 块状部位存在半径 r 和 1/2 张角 β 均较小的边角位置, 因而在该类位置应力集中较大。应力集中的存在使型壳的开裂曲线向低温区移动, 见图 8。对于棒状部位, 当脱蜡前 $\Delta T \geq 2^\circ\text{C}$ 时, 型壳脱蜡开裂率为 100%, ΔT 降至 0°C 时开裂率随之降至 0; 而对于块状部位边角位置, 当脱蜡前 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 时, 型壳脱蜡开裂率仍为 100%, 直至温度降低至 $\Delta T = -4^\circ\text{C}$ 时,

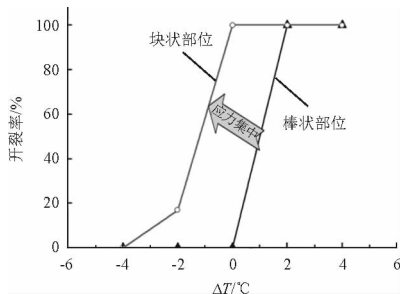


图 8 应力集中对开裂倾向的影响
Fig.8 The effect of stress concentration on dewaxing crack tendency

开裂率才降低至 0。应力集中增大了型壳脱蜡开裂倾向, 使得型壳在脱蜡前需要采用更低的存放温度, 才能有效避免脱蜡开裂问题。

3 结 论

(1) 脱蜡过程使型壳具有开裂倾向, 当型壳在脱蜡前的存放温度高于制壳温度 ($\Delta T > 0^\circ\text{C}$) 时, 蜡模将发生体积膨胀, 型壳受到拉应力作用, 加剧其脱蜡开裂倾向; 当存放温度低于制壳温度 ($\Delta T < 0^\circ\text{C}$) 时, 蜡模将发生体积收缩, 与型壳内腔形成一定的间隙, 为后续脱蜡过程中提供蜡模膨胀裕度, 降低其开裂倾向。

(2) 脱蜡前采用温度低于制壳温度 4°C 的环境存放型壳, 能够有效消除脱蜡开裂问题。该方法简单易行, 在有效保证型壳品质的基础上, 无需增加生产成本, 适宜在精密铸造工程实践中推广使用。

参 考 文 献

- [1] TAMTA K, KARUNAKAR D B. Enhancing mechanical properties and permeability of ceramic shell in investment casting process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 34(6): 1 726-1 736.
- [2] JONES S, JOLLY M R, BLACKBURN S, et al. Effect of moisture upon mechanical properties of ceramic moulds during high pressure steam dewaxing[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19(7): 5 663-5 670.
- [3] YUAN C, JONES S, BLACKBURN S. The influence of autoclave steam on polymer and organic fibre modified ceramic shells[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25(7): 1 081-1 087.
- [4] JONES S. Improved Sol Based Ceramic Moulds for Use in Investment Casting[D]. UK: University of Birmingham, 1993.
- [5] WANG F, LIN F, HE B, et al. Microstructure and strength of needle coke modified ceramic casting molds[J]. Ceramics International, 2014, 40: 479-486.
- [6] 曾洪, 伍林, 张松泉. 熔模精密铸造用陶瓷型壳脱蜡开裂研究及解决方法[J]. 东方汽轮机, 2017(4): 57-59.
- [7] LEE K, BLACKBURN S, WELCH S T. Adhesion tension force between mould and pattern wax in investment castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 369-374.
- [8] EVERHART W, LEKAKH S, RICHARDS V, et al. Corner strength of investment casting shells[J]. International Journal of Metalcasting, 2013, 7(1): 21-27.

(编辑: 彭瑾)

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