

光固化立体造型熔模铸造工艺的研究

宗学文¹, 刘亚雄¹, 魏罡², 王伊卿¹, 卢秉恒¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 天津一汽夏利汽车股份有限公司产品开发中心, 300190, 天津)

摘要: 为了解决快速熔模铸造中型壳开裂问题,对树脂模型与型壳材料在消失过程中的热变形机理和型壳开裂条件进行了有限元分析,建立了原型-型壳热变形数学模型,并应用于新型燃气涡轮导向器的快速铸造. 实验中当升温幅度较低时,涂挂厚度很小,型壳也不会破裂;当树脂模型在一个方向上的尺寸很小时,即使不抽壳,型壳也能保持完整而不破裂. 研究表明:采用树脂制备方法,不仅可以简化传统制作蜡模的工艺步骤,而且大大缩短了制作周期;树脂模型精度、粗糙度对复杂铸件的传递特性,已成为该方法被广泛应用的一个重要的前提条件.

关键词: 快速铸造;树脂模型;型壳开裂;涡轮导向器

中图分类号: TG249 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0087-04

Investment Casting Processing Based on Stereolithography Pattern

Zong Xuewen¹, Liu Yaxiong¹, Wei Gang², Wang Yiqing¹, Lu Bingheng¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Products R&D Centre, Tianjin Faw Xiali Automotive Co. Ltd., Tianjin 300190, China)

Abstract: In order to avoid the shell cracking during baking process of quick investment casting based on stereolithography(SL) pattern, an expanding model of SL pattern-ceramic shell is proposed via analyzing the interaction between investment shell and SL pattern, then the cracking condition of investment shell is given. This model has been applied in quick casting of the new engine turbine nozzle vane. The experimental results show that if such technology parameters as the baking speed, wall thickness, and SL pattern thickness are suitable, or the size of SL pattern in one direction gets very small, shell can be prevented from cracking during baking process.

Keywords: quick investment casting; stereolithography pattern; shell cracking; engine turbine nozzle vane

快速成型(RP)具有快速、准确以及适合制造复杂实体的特点,并且在铸造工艺中具有重要的应用背景^[1]. 将快速成型和铸造技术相结合产生的新铸造方法称为快速铸造技术(RC),它具有快速敏捷制造的特征^[1-2]. RC在单件小批量熔模铸造中具有独特的优势,能加快产品开发和定型的速度^[3]. 目前,各种RP技术均可用于熔模铸造中,其中光固化立体造型(SL)具有表面光洁、尺寸精度高的特点,经熔模铸造得到的铸件表面质量和尺寸精度一般优于其他的RP方法^[4-5]. 基于SL的熔模铸造技术是通

过在SL树脂模型表面浸涂数层耐火材料(浆料),经过逐层撒砂、干燥和硬化,通过高温焙烧的办法将其中的树脂模型充分燃烧气化,然后进行浇注而获得的铸件. 但是,由于固化后的光敏树脂在燃烧气化消失过程中具有较大的热胀变形,比型壳材料的变形量大1~2个数量级,因此容易引起型壳胀裂. 此外,还伴随着一定的树脂发气和少量残留物,容易降低铸件质量^[6]. 为了减小光敏树脂在燃烧气化前对型壳的热变形张力,一般在设计树脂模型时,需进行抽壳处理,尺寸较大的铸件则需在内部添加蜂窝状

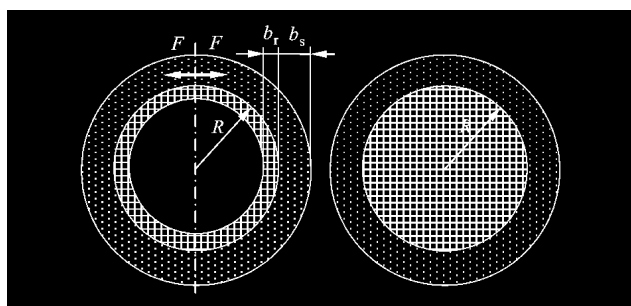
支撑,以减小涂挂过程中由型壳浆料的质量而产生的变形^[7-8].本文针对光固化模型的热变形和焙烧消失工艺进行了理论分析和工艺实验研究,并结合新型燃气涡轮二级导向器的快速开发,给出了相应的快速铸件实例.

1 快速熔模铸造的热变形分析

1.1 型壳热胀受力分析

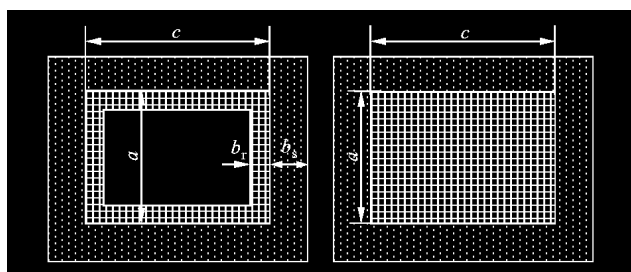
不同熔模工艺的型壳材料均具有透气性,再加上原型涂挂前气孔的设置,使树脂发气对型壳的张力作用较小^[2],而导致型壳破裂的主要原因是树脂热膨胀对型壳产生的张力^[2].

1.1.1 型壳不破裂条件 由于复杂实体是由简单实体组合而成的,因此选择典型的简单实体作为研究对象(见图1).以抽壳圆柱体为例,树脂试样和型



(a)抽壳圆柱体

(b)实心圆柱体



(c)抽壳长方体

(d)实心长方体

b_s :型壳厚度; b_r :树脂模型抽壳厚度; R :实心圆柱体半径;

F :型壳和树脂模型的张力; a, c :长方体树脂试样的边长

图1 不同类型的型壳横断面

壳都从同一温度 T_1 开始升温到某一个温度值 T_2 , 则 $\Delta T = T_2 - T_1$. 在型壳与树脂模型的膨胀过程中, 不仅有热胀变形, 还有弹性变形. 树脂模型产生压缩变形, 而型壳产生拉伸变形, 但二者的热变形和弹性变形总量相等, 据此可列出以下关系

$$2\pi R\alpha_r\Delta T - 2\pi R\sigma_r/E_r = 2\pi R\alpha_s + 2\pi R\sigma_s/E_s \quad (1)$$

$$\sigma_r = F/b_rL \quad (2)$$

$$\sigma_s = F/b_sL \quad (3)$$

式中: L 为圆柱体长度; σ_r, σ_s 分别是树脂模型和型壳内部对应 F 的应力; E_r, E_s 为型壳树脂的弹性模

量; α_r, α_s 分别为型壳和树脂的热膨胀系数. 设 σ_{slim} 为型壳材料的极限应力, 根据式(1)~式(3)得到抽壳圆柱体型壳不破裂的条件为

$$\sigma_s = \frac{b_r E_r E_s (\alpha_r - \alpha_s) \Delta T}{b_r E_r + b_s E_s} \leq \sigma_{slim} \quad (4)$$

1.1.2 熔模模型抽壳的作用 由式(4)可知, 树脂模型壁厚越小, 对型壳的张力亦更小. 当模型抽壳厚度增大时, 型壳内部应力也增大, 但当原型厚度足够大时, 抽壳与否对型壳内部应力的作用却无大的区别. 由式(4)可进一步得到实心圆柱体树脂模型涂挂后的型壳不破裂条件

$$\sigma_s = \frac{R E_r E_s (\alpha_r - \alpha_s) \Delta T}{R E_r + b_s E_s} \leq \sigma_{slim} \quad (5)$$

由式(5)进一步推导得到型壳不破裂的最小涂挂厚度

$$b_{smin} = \left[\frac{b_r E_r E_s (\alpha_r - \alpha_s) \Delta T - b_r E_r \sigma_{slim}}{E_s \sigma_{slim}} \right] \quad (6)$$

令 $b_s = 0$ 时, 得到

$$\sigma_{slim} = E_s (\alpha_r - \alpha_s) \Delta T \quad (7)$$

表明当升温幅度较低时, 即便挂壳厚度很小, 型壳也不会破裂, 这一温差为临界温升, 即

$$\Delta T_{lj} = \frac{\sigma_{slim}}{E_s (\alpha_r - \alpha_s)} \quad (8)$$

1.1.3 实心长方体型壳的不破裂条件 由式(4)得到的结果同样适用于抽壳长方体型壳, 并可进一步得到实心长方体的型壳不破裂条件

$$\sigma_s = \frac{c E_r E_s (\alpha_r - \alpha_s) \Delta T}{c E_r + 2b_s E_s} \leq \sigma_{slim} \quad (9)$$

从式(5)和式(8)可知, 当 $R=0$ 或 $c=0$ 时, $\sigma_s=0$, 表明当消失模只要在一个方向上的尺寸很小时, 即使不抽壳, 型壳也能保持完整且不破裂.

1.2 型壳热胀有限元分析

式(1)~式(9)只能为型壳热胀提供一种定性的受力分析, 由于应力集中的原因, 使实际的应力分布很不均匀, 因此需通过有限元分析, 来了解型壳不同部位的应力分布状况.

1.2.1 计算条件

树脂模型的结构如图2所示, 右侧为流道, 树脂选 LPR3001 光敏树脂, 考虑浇铸高温合金型壳材料应选择全稳定的氧化锆, 因此所选

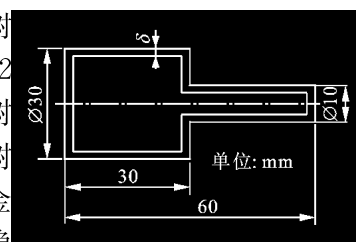


图2 试样的几何尺寸

粘接剂为醋酸锆. 表1为型壳材料在不同温度(θ)的比热容(c_s), 树脂材料和型壳材料的热物性参数(导热系数 λ 、密度 ρ 、泊松比 μ)见表2.

型壳在焙烧至 300 ℃时装炉,其初始温度均可视为室温 20 ℃,因此选择参考温度为 20 ℃.由于树

表 1 型壳材料的比热容

$\theta/^\circ\text{C}$	60	70	80	90	100	120	140	160	180
$c_s/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	62	84	107	130	154	200	242	281	316
$\theta/^\circ\text{C}$	200	220	240	260	280	300	400	500	600
$c_s/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	347	375	399	421	440	454	518	550	571

表 2 树脂、型壳材料的热物性参数表

材料	$\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$c_s/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E/MPa	μ	$\alpha/(\text{K})^{-1}$	σ/MPa
树脂	0.132	1 050	1 207	4 517	0.35	12.5×10^{-7}	66.6
型壳	*	* *	5 600	2 510	0.36	10^{-7}	15.0

* : $\theta=100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\lambda=19.51$, $\theta=1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\lambda=2.29$; * *:见表 1

1.2.2 计算结果 如图 3 所示,当树脂模型厚度为 1.5 mm、型壳厚度为 7 mm 时,型壳流道处的温度

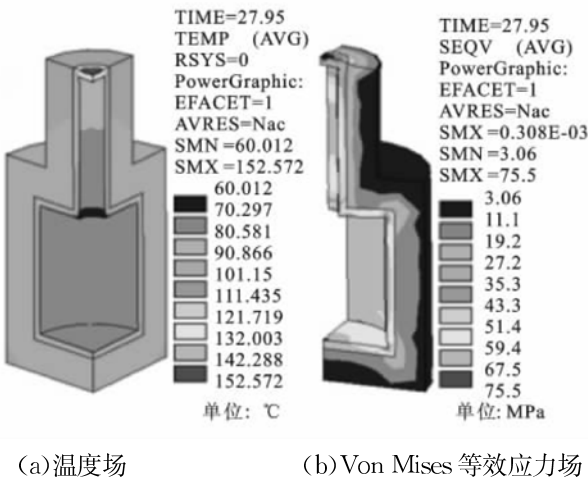


图 3 有限元计算结果

较高,这是由于树脂模型内部是一个密闭的空间,具有一定的绝热作用,因此导致基体内部温度低于流道处的温度.从应力场分布来看,型壳靠近模型区域的应力较大,这主要是因为型壳的内表面受到模型膨胀的挤压产生一定的接触应力所致.此外,各转角处的应力明显大于表面平坦处的应力,这正是转角结构导致应力集中的缘故.因此,在设计流道时,应尽可能使流道与铸件表面能够光滑过渡,这样可有效地减小应力的集中.

2 实验研究

2.1 树脂燃烧性能

为了检验光固化树脂 Somos 14120 的燃烧性能,给型壳的焙烧提供参考,选质量为 10 g 的树脂试样在不同温度下保温 30 min 后,测树脂燃烧残留

脂模型内部是一个密闭空间,而且树脂材料的导热系数较小,因此树脂模型内部按绝热边界条件处理.型壳外面和树脂模型裸露部分和周围空气为对流换热,取第 3 类边界条件,即给定型壳外表面与周围环境的换热系数和周围环境的温度.对于型壳和空气的对流换热系数一般取 $41.86\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,并采用 ANSYS 作为计算软件.

物的质量^[2]G,然后在 800 ℃下保温 1~6 h 后测量 G,得到了树脂试样在 2 种情况下的热重分析曲线(见图 4、图 5).

实验表明,光固化树脂具有良好的燃烧性能,在 800 ℃时保温焙烧 30 min,G 为 0.048 g,可以认为是完全烧失.

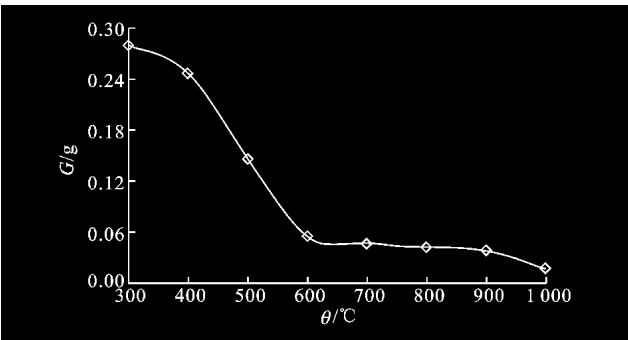


图 4 树脂的热重分析曲线(保温 30 min)

如图 5 所示,在保温 4 h 后,残留物的质量基本不变,表明在 800 ℃下且保温超过 4 h 后,树脂的燃烧基本上结束,G 为 0.022 g,此种状态可以认为是完全烧失.因此,本文选择型壳在 1 000 ℃入炉,待燃烧完全后保温 40 min.

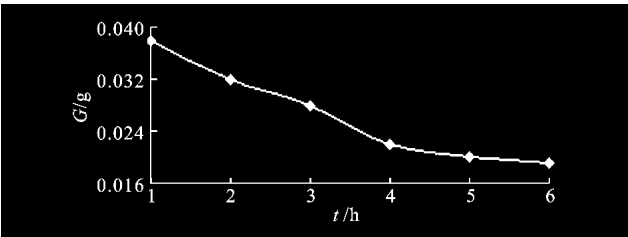


图 5 树脂热重分析曲线($\theta=800\text{ }^\circ\text{C}$)

2.2 燃气涡轮导向器熔模铸造实验

燃气涡轮导向器铸件设计图如图 6 所示,在实

际生产中材质多为高温合金,几何参数见表3。采用树脂模型代替蜡模直接制壳,需考虑浇铸系统的选材,本实验采用石蜡制作浇铸系统,用蜂蜡将浇铸系统和树脂模型粘接。在树脂模型的原型表面喷脱模剂后,按硅溶胶工艺的要求进行涂挂、制壳,浇铸 ZL101 合金以降低实验成本,验证实验方案的可行性。

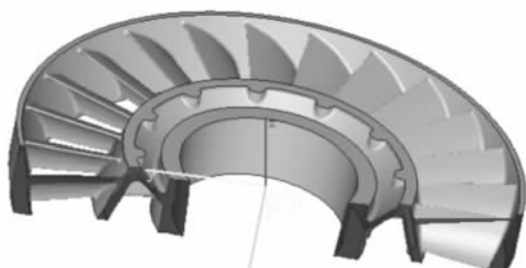


图6 铸件设计图(中空结构)

表3 二级燃气涡轮导向器的几何参数

外径/mm	内径/mm	厚度/mm	叶片数	宽径比
270	95	42	24	0.156

2.2.1 铸件三维数据处理 如果直接用实体树脂模型代替蜡模进行精密铸造,其实体空间形状是由3个抽壳圆柱体加上24个实心翼形组成。翼形表面法向尺寸较小,不易导致破裂,但会传递中环与外环间的热膨胀,结合式(4)的分析:①可计算出 b_s 较大,由于现有有色金属硅溶胶工艺的涂挂层数一般为5~6层,过大会增加涂挂层厚,因此必须考虑浇铸零件的合金、型壳材质、零件的结构特点以及清理的难易程度;②采用常规涂层厚度,树脂发气总量较大,精铸模壳可能会由于树脂模型的热膨胀而被胀裂。因此,将树脂模型抽壳,成为中空(或设计为蜂窝状^[1])结构,使加热过程中产生于型壳上的应力通过中空原型的内部坍塌得到释放,同时也提供了树脂气化的空间,利用气体的可压缩性,降低对型壳材料的应力。根据热变形定性分析,最终选取的抽壳厚度为1 mm。

2.2.2 SLA 原型的制作 采用西安交通大学 RP&M 工程研究中心研制开发的 SPS600B 型快速成型机制作出 RP 原型,并与相关技术人员协商,来确定地浇注系统(见图7)。

2.2.3 制壳和差压浇铸 用蜂蜡将原型和石蜡制作的浇铸系统粘接为一体,反复撒砂干燥7层厚,置

入脱蜡釜脱蜡后,参照前面的实验数据,800℃左右投炉,保温4 h,获得不开裂的型壳。浇铸时,叶片排气边最小圆角半径为0.3 mm,型壳在400℃出炉,浇铸 ZL101 合金温度为720℃,压差为48 kPa。清理好的铸件如图8所示。

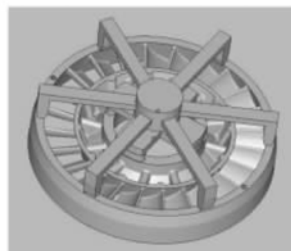


图7 浇注系统图



图8 清理好的铸件

3 结 论

本文通过对树脂模型型壳的热变形分析、有限元计算,结合树脂的热重曲线及烧失工艺实验,将相关结论用于新型燃气涡轮二级导向器的快速铸造,研究结果如下。

(1)当升温幅度较低时,即便挂壳厚度很小,型壳也不会破裂;当消失模只要有一个方向上的尺寸很小时,即使不抽壳,型壳也能保持完整而不破裂。

(2)尽管树脂型壳高温烧制的因素复杂,除热胀受力分析因素外,还存在高温下树脂与型壳间复杂的物理化学过程,以及树脂气化过程封闭型壳受压开裂的现象。通过对实心圆柱体和长方体的简化分析得知,由于复杂型壳存在着不开裂条件及最小涂挂壁厚,因此避开实心树脂件制壳,并利用浇铸系统使型壳具备开放腔,是和现有熔模工艺对接,提高型壳制备成功率的有效手段。

(3)复杂型壳采用树脂的制备方法,完全可以简化传统制蜡模需要制作模具、压蜡、拼装等环节,可直接获得零件树脂模型制壳,因此大大缩短了制作周期,降低了单件精铸时间成本,提升了企业的竞争力。

(4)实验表明,更进一步地研究树脂模型的精度、粗糙度对复杂铸件的传递特性,已成为该方法大规模应用的重要前提条件之一。

参考文献:

- [1] Hague R, Costa G D, Dickens P M. Structural design and resin drainage characteristics of quick cast 2.0[J]. Rapid Prototyping J, 2001, 7(2): 66-72.
- [2] 丁浩,袁镇沪,卢秉恒. 基于光固化成型的功能零件

- 无模具快速精密铸造工艺[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(12): 55-58.
- Ding Hao, Yuan Zenhu, Lu Bingheng. Precision casting of functional metallic part by stereolithography[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(12): 55-58.
- [3] Pham D T, Dimov S S. Rapid manufacturing [M]. London: Berlin Heidelberg British Library Cataloguing in Publication Data, 2001: 135-159.
- [4] Paul F J. Stereolithography and other RP&M technologies (from rapid prototyping to rapid tooling) [M]. New York: Society of Manufacturing Engineers in Cooperation with the Rapid Prototyping Association of SME Press, 1996: 209-271.
- [5] Yao W L., Leu M C. Analysis and of internal web structure of laser sterolithography patterns for investment casting [J]. Material & Design, 2000, 21(41): 101-109.
- [6] Tang Dachao. Ring nozzle in investment Casting [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2006, 26(1): 53-54.
- [7] Barnett S. Automation in the investment casting industry from wax room to finishing [J]. Foundry International, 1993, 16(3): 226-228.
- [8] Blayson Olefines Ltd. Review of investment casting wax [J]. Foundry Trade Journal, 2004, 178(3): 82-86.

(编辑 管咏梅)