

基于光固化成形技术的复杂航空零件快速制造方法^{*}

Rapid Fabrication Method of Complicated Aircraft Part Based on Stereolithography

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 鲁中良 周江平 李涤尘
西安瑞特快速制造工程研究有限公司 杨东升
西安中航动力精密铸造有限公司 董茵

[摘要] 提出一种基于光固化成型技术的复杂航空零件快速制造方法。根据零件结构设计模具,采用光固化成形技术制造压蜡模具型壳,填充金属树脂复合材料,经过固化、去应力等工序实现压蜡模具制造;并基于蜡模制造复杂 AISI316L 航空零件。该制造方法周期短、精度高、成本低,能够快速响应市场的需求。

关键词: 光固化成形 压蜡模具 金属树脂 冷却水道 制造精度

[ABSTRACT] A fabrication method of complicated aircraft parts is proposed based on SLA (Stereolithography). The tool is designed based on the part's structure characteristics. The shell of SL tool is filled with the composites, and the wax injection mold is obtained after solidification and sand-papering, etc. The tool is applied to fabricate wax pattern, and AISI316L stainless steel castings are rapidly casted. The method has characteristics of short cycle, high precision and low cost, etc. It can quickly respond to the market's requirements of new product..

Keywords: Stereolithography Wax injection mold Metal resin Cooling channel Manufacturing accuracy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.097

中国模具行业技术协会在模具行业“十二五”发展规划中指出:模具发展的一个目标是要进一步缩短模具制备周期和使用稳定性,重点发展新型快速经济模具。因此,在中小批量生产条件下,如何缩短模具制造时间和降低成本是快速制造必须解决的问题。目前精铸蜡模的制造方法主要有间接制造方法和直接制造方法^[1]。前者^[2]即将熔融的蜡料压入金属母模,冷却后得到蜡模。母模从设计到制造过程工艺复杂、成本高、制造周期长,直接决定着最终复杂零件的制造成本和制造

周期。而后者可以直接制造蜡模^[3],目前主要包括选择性激光烧结、熔融沉积成形技术等,但蜡模强度较低、挂砂成壳难度大且精度差^[4]。

采用光固化快速成形技术(Stereolithography, SLA)实现复杂结构压蜡模具是一种新的快速制造方法。Evans等^[5]对光固化模具和传统机加工模具的制造成本和制造周期进行了比较,发现两者的制造成本相近,但是光固化模具的制造周期大大缩短;Hopkinson等^[6]比较了光固化模具和铝制模具在制造小批量产品中的差别,发现光固化模具在制造500件以内零件时不会出现损坏,在较小注蜡力条件下与铝模具相近;宗学文等^[7]研究了在光固化模具中加入冷却水道加速模具冷却。但是,由于光固化成形技术采用高分子材料,其强度和导热性能较差,直接影响模具的寿命和蜡膜质量。将金属与树脂混合制备的金属树脂复合材料可大幅度提高树脂材料导热性能和强度,适合于压蜡模具的制造。Chung等^[8]通过对环氧树脂和不同粒度铝粉制备的复合材料的微观形貌进行分析,并比较它们的硬度、尺寸精度和热导率,发现金属树脂复合材料的上述性能均比树脂材料要好;Ma等^[9]比较了不同配比的环氧树脂和金属粉末,得到了最佳的比例配方,并证实可以应用于压蜡和注塑的快速模具中。另外,西安交通大学郭永娜^[10]和山东大学孙金平等^[11-12]也进行了材料配方和相关试验研究。Hsu等^[13]将金属树脂成功应用于石膏模具,结合数控加工技术,获得了精度较高的压蜡模具。

本文基于SLA技术,借鉴注塑模具中冷却水道可以加速零件冷却的思想,在设计光固化模具时引入了冷却通道,并采用金属树脂材料提高材料的导热性和强度,实现高强度、高导热的压蜡模具;然后,基于光固化压蜡模具,成形出复杂航空零件的蜡膜,最终实现金属零件的制造。

1 复杂零件模具设计

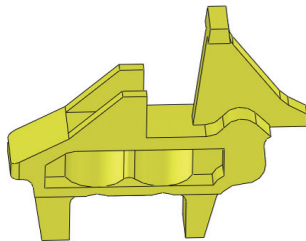
1.1 模具结构设计

本文的研究对象为某型号航空零件,其三维结构如

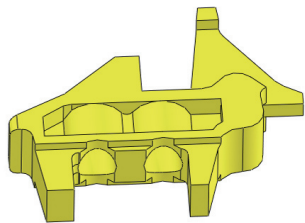
^{*} 国家重大专项(2012ZX04007021),中央高校基本科研业务费专项资金项目资助。

图 1 所示。该零件在实际生产中一直采用熔模铸造制造,采用的压蜡模具为金属模具;零件最大外形尺寸为 114mm × 92mm × 25mm,虽尺寸较小但结构较为复杂,零件中间有两个盲孔和槽,模具制造非常复杂,需要多个抽芯结构,金属压蜡模具制造成本很高。

针对零件的结构特点,设计光固化模具主要分为以



(a) 零件主视图



(b) 零件侧视图

图1 某型号航空零件结构

Fig.1 Structure of a aircraft part

下几个步骤。

(1) 零件分型。首先根据零件结构特点确定分型面位置,一般在零件断面最大投影面积处,然后在垂直于分模面方向设置拔模斜度。对于不能直接拔模的部分,设计侧向或者斜向抽芯的活块,上下模与活块装配构成组合模具。同时为了便于后面外界铜管的组装布置,在模具上下模的侧面设置外接管道连通的圆孔。

(2) 注蜡孔和定位结构确定。根据模具的特点和注蜡机的特点选择合适的注蜡孔位置,本文使用立式注蜡机,因此选择将注蜡孔布置在模具的侧面中央位置。根据零件结构特点确定定位结构,上下模之间增加定位凸台结构,在上下模合模时能够保证确定模具在水平方向的两个自由度。同时为了便于抽芯结构的定位,加入 4 个定位销孔结构。由于模具在使用中需要内部的铜质冷却管道与外接水管连接,在模具设计时,需在上下模侧面上增加定位孔的结构。

(3) 模具型壳的确定。由于模具含有较多小倒角,直接在三维 CAD 软件中抽壳困难,因此将前面设计的模具的上下模零件导入快速成形前处理软件 Magics 中进行不等距抽壳处理,抽壳厚度在 2~4mm 之间,获得模具上下模结构的型壳零件,如图 2 所示。

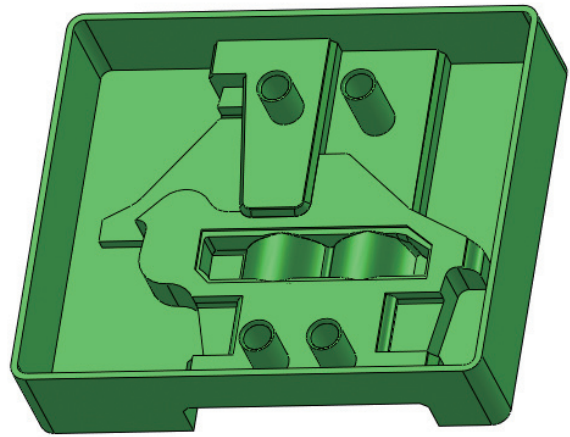


图2 上模抽壳后的型壳结构

Fig.2 Structure of upper die shell

1.2 模具冷却的计算

本文内部模具热量散失通过圆管内水的对流换热和外表面的空气对流换热进行,其中圆管内对流换热和金属树脂的热传导是主要途径。

在圆管内部通冷却水,利用水的强制对流换热对模具内部实现模具的换热:

$$\int_0^{\tau} hA (t_m(t) - t_w(t)) dt \geq cm(T_{初} - T_{终}),$$

上式^[14]左边为对流换热热量,右边为蜡模需要释放的热量总和,其中 h 为对流换热系数, $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$; A 为总对流换热面积, m^2 ; T_m 为时刻模具水道壁温度, $^\circ C$; T_w 为时刻冷却介质温度, $^\circ C$; c 为蜡模材料的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; m 为蜡模的总质量, kg ; $T_{初}$ 为初始的注蜡温度, $^\circ C$; $T_{终}$ 为蜡模的固化温度, $^\circ C$ 。

由于冷却水循环较快,冷却水温近似不变,可得到模具冷却的快慢与水道壁温度直接相关。冷却水道壁附近的热量可以在模具内部通过热传导分散到模具外表面,通过空气对流散失,因此提高模具材料的导热性可以提高模具的冷却效率。

1.3 仿真与分析

在实际注蜡过程中,蜡模的注蜡时间和冷却时间分布都与蜡模和模具的结构相关。使用 Moldflow 软件对零件进行注塑过程分析,得到蜡模各部分的充填时间分布如图 3 所示,冷却时间分布如图 4 所示。

由分析可知,此零件在模具中的充满时间为 10.54s,因此在实际注蜡过程中设置的注蜡时间为 15s;得到蜡模整体的冷却时间约为 227.9s,因此在实际注蜡过程中设置冷却时间为 4~5min。

使用 ANSYS 热分析工具,将传统的金属模具与含

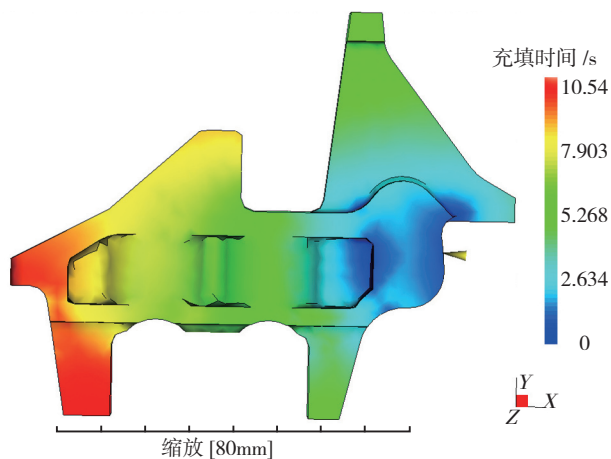


图3 注蜡充填时间分布

Fig.3 Filling time distribution of injecting wax

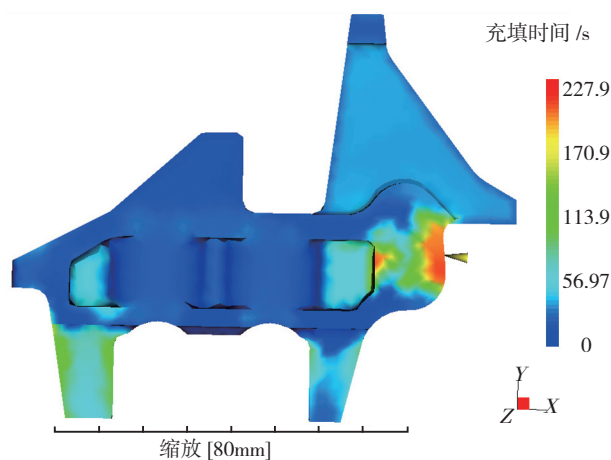


图4 蜡模的冷却时间分布

Fig.4 Cooling time distribution of wax pattern

有金属树脂复合材料和强制换热通道的光固化模具进行冷却效果比较。分析蜡温 57°C 、注蜡时间 15s、保压时间 20s 条件下,比较两种模具冷却 5min 后模具内蜡模的温度分布及沿中分面剖开后得到的内部温度分布。可知,钢质模具的蜡模在冷却 5min 后的最高温度约 17.0°C ,含冷却管道的金属树脂模具中蜡模的最高温度越 18.9°C ,最高温度相近。但是金属树脂模具制造的蜡模温度分布更为均匀,平均温度更低,更好地保证了蜡模在整体冷却过程中不会因局部温差过大而导致收缩缺陷,更好地保证了蜡模的质量。钢质模具外表面温度很低,内部中心区域温度很高,各部分温度差较大,不利于蜡模的整体均匀冷却。因此,使用含冷却水道的金属树脂模具可以制造出满足需求的高质量精密铸造蜡模。

2 光固化模具制造

为了提高模具的导热性能和强度,在模具制备过程中加入铜管,并填充金属树脂填料,快速固化后得到高

强度的压蜡模具。在使用模具制备蜡模的同时在铜管中通冷却水,强制模具内部对流换热,使得模具能够快速冷却,最大化提高蜡模制备效率。含有铜冷却管道的光固化模具的制造工艺过程如图 5 所示。对前文设计的光固化模具进行快速成形前处理,加上支撑,使用西安恒通智能机器有限公司设计生产的 SPS450 型快速成形机制造模具的树脂零件。为了消除光固化制造型壳过程中树脂件的内应力,对获得的光固化树脂件进行装配后施加一定的外应力,并保持外应力 6~12h。

类似于注塑模中冷却管道加强模具内表面的强制换热,对消除内应力后的光固化模具装上预先折弯的铜管进行组装,在后续压蜡试验时铜质管道外接冷却水,使得模具强制换热,促进蜡模的快速冷却。

光固化树脂的导热系数很低,只有 $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,为了提高模具的强度和内部导热性能,按一定比例(表 1)配置环氧树脂和铝粉混合的金属树脂浆料作为填充型壳的材料。将配置的金属树脂浆料制成标样固化,使用 LFA 447 型闪光导热仪测量标样的导热系数,测得此复合材料的导热系数达到 $2.2\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,将原来的导热系数提高了近 10 倍。同时由于本配方中铝粉的质量比例达到 66% 左右,因此材料强度比纯树脂材料有较大提高。

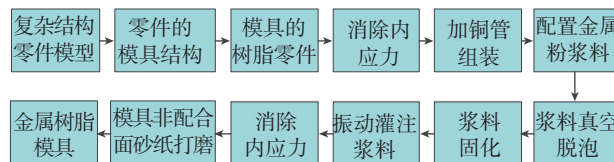


图5 光固化金属树脂模具制造工艺过程

Fig.5 Manufacturing process of SLA metal resin dies

表1 金属树脂浆料配方

配方成分	材料名称	配比/g
基体树脂	E-51	100
固化剂	T31	24
金属粉	Al 粉	300
偶联剂	KH550	1
促进剂	DMP-30	1

将配置的金属树脂浆料(表 1)放入真空环境下进行脱泡处理,对脱泡后的浆料加入固化剂后在振动环境下灌注,灌注金属树脂浆料后在常温下固化 12~24h 即可。

由于树脂在固化过程中会放热,而光固化树脂的玻璃化温度较低,仅为 $45\sim 70^{\circ}\text{C}$,所以金属树脂固化放热过程也会使模具产生一定的内应力。为了消除金属树脂固化中模具内部产生的内应力,试验中将固化后的模具装配,并施加外部压应力,保持压应力 12~24h 即可消

表2 蜡模关键尺寸参数测试

	连接槽宽度	总长度	最小厚度	肩台厚度	总厚度	盲孔直径	总高度
标准值	44.35	112.86	6.73	15.84	24.75	14.85	91.20
实际值	44.41	113.21	6.76	15.68	24.53	14.67	90.95

mm 社,2001.

除模具内应力。对消除内应力后的金属树脂模具表面进行砂纸打磨,即可得到最终模具。

3 压蜡与精密铸造

将制造的光固化金属树脂模具应用于压蜡试验中,将模具外接冷却水管道,采用 SMZ09-5LB-Y 立式双工位液压免缸注蜡机进行压蜡中小批量压蜡实例。压蜡实验参数为:压蜡材料 162 型石蜡,注蜡温度 57℃,注蜡压力 2MPa,保压时间 15s,冷却水温 5℃,冷却时间 5min。

使用以上参数进行试验,制造了约 60 个蜡模,蜡模各个特征完整,关键尺寸保证较好。后续的铸造过程使用传统的熔模铸造工艺,将得到的蜡模涂挂多层耐火材料,待涂层固化后采用高温蒸汽除去蜡模,浇筑 AISI316L 不锈钢,得到不锈钢铸件,对不锈钢零件采用喷砂处理接口得到最终铸件。

采用 Tailo Surtronic25 便携式表面粗糙度仪测量铸件表面粗糙度,得到表面粗糙度为 4.97 μm,表面粗糙度较低。

在压蜡试验前后,模具没有出现明显缺陷,采用蜡模进行不锈钢浇铸,零件尺寸精度达到 CT4~CT6,最终获得符合要求的高精度复杂航空零件(见表 2)。

4 结论

本文将 SLA 技术与模具制造技术相结合,提出了一种新型压蜡模具制造方法。

使用光固化型壳填充金属树脂材料可以实现模具的高强度、高导热性能,同时将注塑模具中的冷却水道引入压蜡模具中,进一步加强了模具内部的强制换热,缩短了蜡模制造周期。在填充金属树脂材料过程中,采用真空脱泡、固化、消除内应力等措施,保证了模具的精度。

采用上述方法,整个模具的制造周期 6~8 天,制造成本 1500~2000 元,同时制造的光固化模具能够在较短时间内实现蜡模,因此特别适用于复杂铸件的单件、小批量的快速制造。

参考文献

[1] 汪文虎,张琳,雋英昌,等.航空复杂件精铸蜡模数控成型新工艺研究.机床与液压,2007,35(8):57-58.
[2] 司乃钧,许德珠.热加工工艺基础.北京:高等教育出版

[3] 罗新华.快速原型制造技术的应用及进展.机械制造,1998(3):7-9.

[4] 赵万华,李涤尘,洪军,等.光固化快速成型技术中的精度研究.机械工程学报,1997,8(5):35-36.

[5] Evans M A, Campbell R I. A comparative evaluation of industrial design models produced using rapid prototyping and workshop-based fabrication techniques. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5): 344-351.

[6] Hopkinson N, Dickens P. A comparison between stereolithography and aluminum injection moulding tooling. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5):344-351.

[7] 宗学文,李涤尘,孙野,等.一种光固化模具及其制作精密铸造用蜡质模样的方法:中国,101954446[P].2011-01-26.

[8] Chung S, Im Y, Kim H, et al. Evaluation for micro scale structures fabricated using epoxy-aluminum particle composite and its application. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2):168-173.

[9] Ma S, Gibson I, Balaji G, et al. Development of epoxy matrix composites for rapid tooling applications. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193:75-82.

[10] 郭永娜.基于 SL 原型的金属树脂模具制造试验研究[D].西安:西安交通大学,2008.

[11] 孙金平.金属树脂模具材料配方与制模工艺实验研究[D].济南:山东大学,2005.

[12] 孙金平,王延庆,韩飞,等.金属树脂快速模具若干关键技术问题研究.模具工业,2007,33(6):65-69.

[13] Hsu C Y, Huang C K, Tzou G J. Using metallic resin and aluminum alloy molds to manufacture propellers with RP/RT technique. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(2):102-107.

[14] 唐志玉,李德群,徐佩弦.塑料模具设计师指南.北京:国防工业出版社,1999.

(责编 谷雨)

(上接第 96 页)

模型配准方法.中国机械工程,2011,22(14):1699-1703.

[8] 郭慧,林大钧,潘家祯.基于遗传算法和最近点迭代法的多视角数据配准.东华大学学报,2007,33(3):347-349.

[9] 王蕊,李俊山,刘玲霞,等.基于几何特征的点云配准算法.华东理工大学学报,2009,35(5):768-773.

[10] 刘晶.叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究[D].西安:西北工业大学,2006.

[11] 周丽敏,卜昆,董一巍,等.基于简化点云带动的涡轮叶片快速配准技术研究.计算机集成制造系统,2012,18(5):988-992.

[12] 刘朋成,张新全.在三坐标测量机上叶片检测坐标系的建立方法//中国航空学会.中国航空学会青年科技论坛文集.北京:航空工业出版社,2004:521-524.

[13] Hsu T H, Lai J Y, Ueng W D, et al. An iterative coordinate setup, algorithm for airfoil blades inspection. Int J Adv Manuf Technol, 2005(26): 797-807.

(责编 深蓝)