

# 光敏树脂原型用于失蜡铸造工艺的研究及优化

李 弘<sup>1, 2</sup>, 丁方政<sup>3</sup>, 刘云超<sup>1, 2</sup>, 高雨龙<sup>1, 2</sup>, 刘珍君<sup>1, 2</sup>, 孟晓东<sup>1, 2</sup>

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定072750;

2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081;

3. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100071)

**摘要:** 针对采用光敏树脂模型的熔模精铸钛合金产品在圆角区域易出现多肉、橘皮等铸造缺陷的问题, 通过分析现有工艺的原理和特点, 采用增大圆角或在关键位置添加低温蜡隔离层等方式, 有效消除了铸造用陶瓷型壳脱蜡时面层脱落, 导致浇注后铸件圆角易出现表面缺陷的现象, 显著改善了钛合金铸件的表面质量。

**关键词:** 光敏树脂; 面层涂料; 熔模铸造; 低温蜡; 多肉缺陷; 橘皮缺陷

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0093-05

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0014

## 作者简介:

李弘 (1976-), 男, 硕士生, 主要研究方向为钛及钛合金铸造, 包括钛合金和高温钛合金材料研发、产品设计与开发、工艺研究与应用等方面。电话: 13521923696, E-mail: sevenholly@163.com

## 通信作者:

刘云超, 男, 高级工程师。电话: 15545056702, E-mail: 15104605670@126.com

## 基金项目:

高温钛合金 Ti65 大型复杂中介机匣铸件研制 (DK2401Z)。

## 收稿日期:

2025-07-28 收到初稿,  
2025-09-01 收到修订稿。

## 引用格式:

李弘, 丁方政, 刘云超, 等. 光敏树脂原型用于失蜡铸造工艺的研究及优化 [J]. 铸造, 2026, 75(1): 93-97.

LI Hong, DING Fangzheng, LIU Yunchao, et al. Research and optimization of lost-wax casting process using photosensitive resin prototypes [J]. Foundry, 2026, 75(1): 93-97.

钛及钛合金因其优良的比强度、耐腐蚀性、高温抗氧化性和疲劳强度, 在航空航天领域中的应用越加广泛, 随着新产品的不断创新与发展, 业内对钛合金结构件的整体性和复杂性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。熔模精密铸造是钛合金复杂结构件主要的成形手段, 该工艺包括蜡模制备、修蜡、组焊、挂浆、脱蜡、浇注和后处理等诸多环节, 因此影响其最终产品质量的因素较多, 型壳材料的种类、质量以及制备工艺均会对钛合金铸件的表面质量产生显著影响。质量好的型壳材料能够降低铸件表面气孔、裂纹等缺陷的产生, 使铸件表面更加光滑平整; 相反, 质量不佳的型壳材料则可能导致铸件表面出现多种铸造缺陷, 对铸件的整体质量和使用性能造成不利影响。另外, 在熔模精密铸造钛合金过程中, 模料对产品质量的影响尤其明显<sup>[2]</sup>。

熔模精密铸造当前应用最为广泛的模料有三种, 分别是松香-蜡基、光敏树脂原料和聚苯乙烯-石蜡模料<sup>[3-4]</sup>。三种模料各有优劣, 在变形程度方面, 光敏树脂模料尺寸变化最小, 外形结构最为稳定, 中温蜡模次之, 但也能使80%以上区域的尺寸误差达到 $\pm 0.2$  mm以内。在涂覆性方面, 水性涂料在粗糙度最高的聚苯乙烯模料上润湿效果最优, 蜡模次之, 光敏树脂模料最差。在经济方面, 由于产品的尺寸、结构复杂度和投产数量的不同, 三种材质蜡模的造价也有明显的区别<sup>[5]</sup>。

制备光敏树脂模料需用到光固化快速成型法 (Stereo Lithography Appearance, SLA), 该方法的原理是: 用特定波长与强度的激光聚焦到光固化材料表面 (光敏树脂), 使之由点到线, 由线到面顺序凝固, 完成一个层面的绘图作业; 然后升降台在垂直方向移动一个层片的高度, 再固化另一个层面, 这样层层叠加构成一个三维实体<sup>[6]</sup>。使用光敏树脂模料实施精密铸造的工艺流程与常规熔模铸造相似, 不同之处在于树脂模料需在型壳焙烧阶段去除, 温度约为950 °C。这种工艺不需要制作金属模具压制蜡模, 成本低, 生产周期短, 在生产单件小批量产品、新产品的开发和生产中大型复杂结构件 (制作压蜡模料较困难) 时较为合适<sup>[7-9]</sup>。3D打印技术或者快速成形与传统铸造技术相结合形成快速铸造技术, 并进而与传统失蜡铸造工艺结合形成快速熔模铸造技术, 已成为当前技术发展的趋势<sup>[10]</sup>。

光敏树脂原料因其强度高、重量轻和尺寸精度高等明显优势, 在钛合金熔模精密铸造的蜡模制备阶段应用广泛。但其缺点也较为突出, 一是该材料造价昂贵, 二

是光敏树脂模料与传统蜡料的脱蜡工艺不同，光敏树脂模料须进行闪烧脱塑，使其燃烧气化，若未合理布设脱塑排气口，则闪烧过程中光敏树脂中的气体受热膨胀会引起型壳的破裂。另外光敏树脂表面与面层的结合强度较高，特别是产品圆角处，这会导致在脱塑过程中，光敏树脂受热收缩将型壳的面层扒掉，从而降低铸件的表面质量。

本研究通过分析现有工艺的原理和特点，结合生产现场并经反复设计与试验，最终采用增大圆角或在关键位置添加低温蜡隔离层等方式，有效消除了光敏树脂模料在铸造用陶瓷型壳脱蜡时面层脱落，导致浇注后铸件圆角存在多肉、橘皮等缺陷的现象，显著改善了钛合金铸件的表面质量。

## 1 试验材料与方法

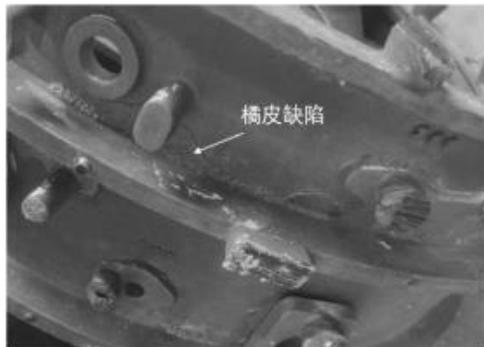
### 1.1 钛合金铸件缺陷分析

以某型中介机匣新品研发为例，采用熔模精密铸造工艺对其进行研制，通过3D打印光敏树脂制备蜡模原型，型壳制备完成后进行熔炼浇注。钛合金铸件一般采用真空凝壳炉浇注，浇注过程中操作人员和观弧

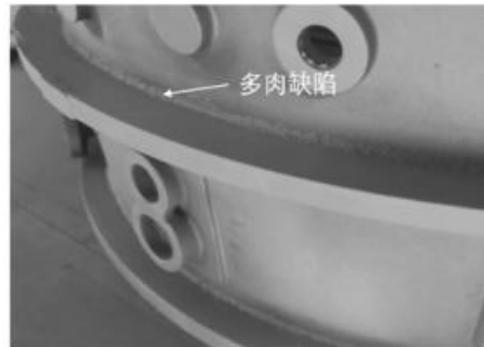
人员并未见异常，但清壳切割后铸件表面呈现的状态如图1所示。

图1(a)显示铸件表面存在明显的多肉缺陷，表面异常粗糙(橘皮)，这是由于制壳焙烧过程中，面层大面积脱落导致的。该现象发生在铸件较平坦、结构较简单的位置较少，多发生在铸件的圆角处、壁的厚薄转接处和凸台处等结构复杂的位置，如图1(b)所示，铸件圆角处几乎都存在面层脱落后导致的表面缺陷。缺陷的具体形态如图2所示。

图2(a)和(b)分别为图1(a)和(b)位置缺陷的放大形态。经分析此类缺陷形成的原因如下：型壳在闪烧光敏树脂时，第一阶段光敏树脂模料在高温环境下受热变形收缩，由于圆角处的面层和光敏树脂结合强度过高，导致树脂在收缩时易将该处的面层扒掉，从而导致浇注过程中在此处形成多肉缺陷。此外，脱落的面层在闪烧过程中从型壳内排出比较困难，因此其有较大概率残留在型壳的某个角落，这也会导致浇注后铸件的内部产生缺陷，该缺陷底片上显示为高密夹杂。闪烧过程光敏树脂受热收缩扒掉圆角处面层的示意图如图3所示。



(a) 橘皮缺陷位置



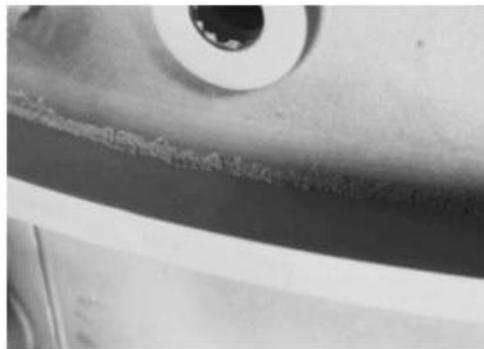
(b) 多肉缺陷位置

图1 铸件表面缺陷位置

Fig. 1 The surface defect locations of casting



(a) 橘皮缺陷形态



(b) 多肉缺陷形态

图2 铸件表面缺陷形态

Fig. 2 The surface defect morphologies of casting

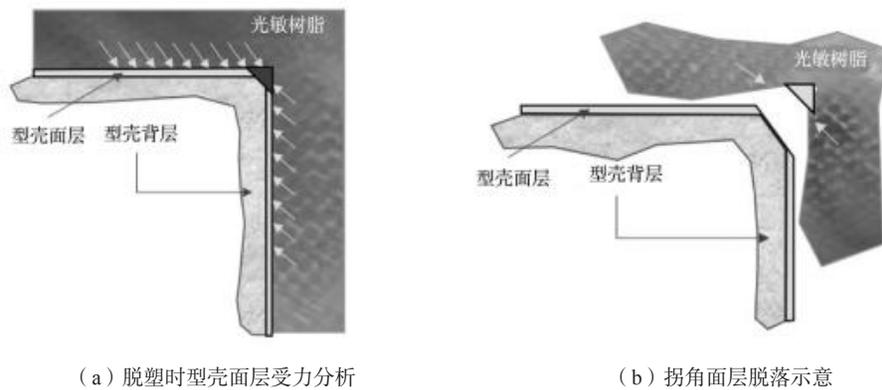


图3 拐角处面层易脱落原因分析示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the reason analysis for the face coat at the corner being easily fallen off

图3 (a) 为闪烧脱塑时型壳圆角位置面层受力示意图。光敏树脂蜡件在闪烧刚开始时受热收缩变形, 此时型壳圆角处受力如上图红色箭头所示。由图3 (a) 可知越靠近圆角位置, 面层所受的剪切应力越大, 而且在前序的制壳过程中, 圆角等结构复杂位置的面层浆料易出现涂挂不均匀、不充分等现象, 因此该处比大平面区域的面层质量较低。所以, 此处的面层易在闪烧脱塑过程中, 被受热收缩的树脂扒掉, 如图3 (b) 所示。型壳大平面等结构简单的区域在制壳过程中面层涂挂较均匀充分, 且在闪烧脱塑过程中所受应力方向垂直于面层表面, 几乎不受树脂收缩造成的剪切应力, 因此产生类似缺陷的可能较小。综上所述可知, 由闪烧过程中树脂收缩使面层脱落而导致铸件表面出现多肉等缺陷, 多发生在圆角等铸件结构复杂处。除多肉外, 若脱落的涂层较厚, 使浇注过程中金属液直接接触了型壳背层, 则惰性较差的背层材料易与金属液发生反应生成气体, 从而导致铸件表面出现密集型气孔、针孔等铸造缺陷。

## 1.2 铸造工艺优化及试验方案

经过分析总结“使用光敏树脂模料进行熔模精铸

钛合金结构件易产生表面缺陷”的机理, 决定从如下两个方向对精铸工艺进行优化: ①调整铸件圆角等复杂位置的结构; ②在光敏树脂和面层之间添加低温蜡料缓冲层。具体实施方案如下。

### 1.2.1 调整铸件圆角等复杂位置的结构

图4为调整铸件圆角位置结构前后, 该处背层、面层和光敏树脂模料的形状示意图。使用角度较平缓的弧面结构 (图4 (b)) 代替原铸件中角度较大的突变结构 (图4 (a))。这种增大圆角, 避免结构突变的改变, 能够有效避免闪烧过程中光敏树脂受热收缩对此处的挤压现象, 使应力分布状态由集中在圆角处的剪切应力 (图3 (a)) 改变为垂直于弧面的正应力, 以此来减小闪烧过程中光敏树脂收缩时扒掉圆角面层的几率。

### 1.2.2 低温蜡隔离层工艺

该方法的原理为在型壳面层与光敏树脂模料中间再加入一个缓冲层, 以此阻断闪烧过程中光敏树脂受热收缩对面层的应力作用, 达到改善焙烧后面层质量, 进而达到改善浇注后铸件质量的目的。

操作方法: 将低温蜡加热至液态状, 使用纱布棉签浸入液态低温蜡, 然后将低温蜡均匀涂抹在光敏树

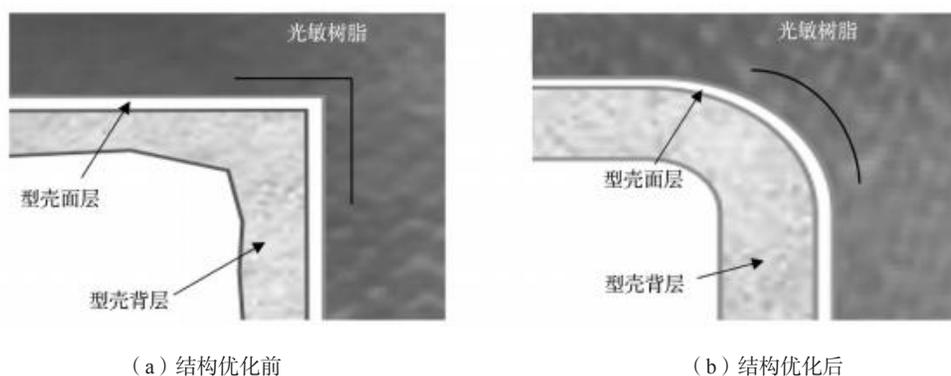


图4 调整圆角结构示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of adjusting rounded corner structure

脂模料的圆角等结构复杂处,使光敏树脂件的圆角处附着了一层厚度大概在0.3~0.5 mm的低温蜡,具体刷蜡形态如图5所示。

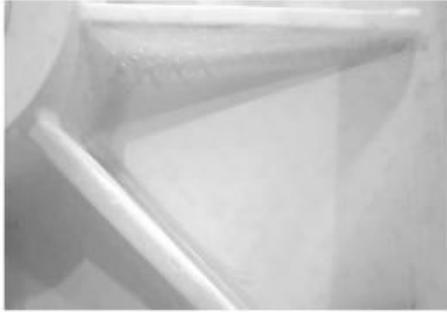


图5 低温蜡隔离层示意图

Fig. 5 Schematic diagram of low-temperature wax isolation layer

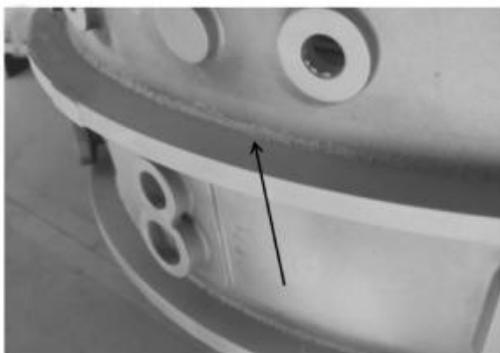
## 2 试验结果及讨论

通过改变圆角处结构的工艺优化方式可以在一定程度上改善面层脱落的现象,但无法完全避免该现象的产生。分析原因因为此种方法虽能改善闪烧过程中光敏树脂受热收缩对型壳圆角处的挤压,但将此处剪切应力调整为正应力的程度受新结构弧面的半径影响,半径过小时无法有效削弱剪切应力,半径过大时对铸

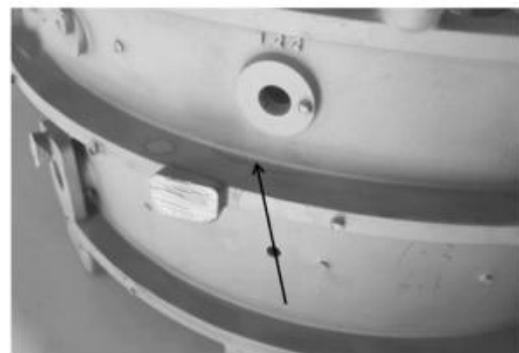
件的结构改变过大,虽有助于减小剪切应力但对铸件本身结构影响过大。经多次实际生产验证,圆角处最佳半径约为3~5 mm,该范围下能有效缓解光敏树脂闪烧过程中对圆角结构的挤压,且对铸件该位置结构的影响较小,不增加后处理工作量。

背层-面层-低温蜡隔离层-光敏树脂件的结构,使陶瓷型壳在闪烧脱塑过程中,熔点低的低温蜡隔离层首先熔化,从而在圆角等位置的光敏树脂和型壳面层中间形成一个不到一毫米的隔离层。该隔离层不仅隔绝了光敏树脂件和面层的直接接触,增大了闪烧脱塑过程中光敏件和面层之间的润滑度,防止了光敏树脂受热收缩时其应力直接作用于面层上,更为光敏树脂受热变形提供了一定的空间,因此能非常有效地保护闪烧脱塑过程中面层的完整度和变形度,从而对浇注后铸件的质量产生显而易见的提升。试验验证结果如图6所示。经多次生产试验验证,低温蜡隔离层的厚度最佳为0.3~0.5 mm,该范围适用于平面结构和圆角等突变结构,能有效减少采用光敏树脂模的熔模铸造铸件表面产生的多肉或橘皮等表面缺陷。

由图6可以明显看出,采用低温蜡隔离层工艺优化方案后,铸件圆角处的多肉等表面缺陷几乎被完全消除,证明该工艺优化方案效果显著。



(a) 未采用低温蜡隔离层工艺的铸件



(b) 采用低温蜡隔离层工艺的铸件

图6 工艺优化前后铸件表面形态的对比

Fig. 6 Comparison of casting surface morphologies before and after process optimization

## 3 结论

经过实际生产与多次试验,有关“使用光敏树脂模料进行熔模精铸钛合金结构件,易在圆角等结构复杂处产生多肉等表面缺陷”的问题,初步得出如下结论。

(1) 产生表面缺陷的原因是,在闪烧过程中光敏树脂件受热变形阶段对圆角处型壳面层的应力作用使

面层局部脱落。

(2) 通过调整铸件圆角结构,增大圆角使弧面结构代替突变结构的优化方案,能在一定程度上改善该类缺陷,但无法使该缺陷完全消除,并对后续处理增大打磨难度。

(3) 低温蜡隔离层优化工艺可以有效消除闪烧过程中面层脱落的现象,从而改善铸件圆角等结构复杂处的表面质量,最终显著改善铸件表面质量。

**参考文献:**

- [1] 朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [2] 谈耀文, 王永信, 程永利. 光固化快速成型树脂模具在铸造工业中的应用 [J]. 模具工业, 2013, 39 (4): 69-72.
- [3] 姜不居, 吕志刚. 铸造技术应用手册: 第六卷 特种铸造 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 孙忠良, 洪军, 卢秉恒, 等. 基于SLA的快速精铸技术研究现状 [J]. 铸造技术, 2008 (6): 814-817.
- [5] 程姣姣. 模料特性对钛合金铸造质量的影响及配方优化 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2022.
- [6] 陈冰. 快速成型技术在熔模铸造中的应用——国外精铸技术进展评述 (12) [J]. 特种铸造及有色合金, 2005 (12): 732-734.
- [7] WATANABE I, WOLDU M, WATANABE K. Effect of casting method on castability of titanium and dental alloys [J]. J Mater Sci Mater, 2000, 11 (9): 547-553
- [8] 潘港元, 伍志勇, 杨桂珍, 等. 光固化3D打印用光敏树脂的研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48 (4): 116-120.
- [9] 齐俊梅, 姚雪丽, 陈辉辉, 等. 3D打印聚合物材料的研究进展 [J]. 热固性树脂, 2019, 34 (2): 60-63.
- [10] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳, 等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造技术研究现状及发展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (5): 678-681.

---

## Research and Optimization of Lost-Wax Casting Process Using Photosensitive Resin Prototypes

LI Hong<sup>1,2</sup>, DING Fang-zheng<sup>3</sup>, LIU Yun-chao<sup>1,2</sup>, GAO Yu-long<sup>1,2</sup>, LIU Zhen-jun<sup>1,2</sup>, MENG Xiao-dong<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Steel Research Dekai Technnology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China; 2. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. No. 6 Military Representative Office in Beijing region, Beijing 100071, China)

**Abstract:**

To address the problems of casting defects such as metallic projection, orange peel, and other defects in the rounded corner areas of the investment casting titanium alloy products using photosensitive resin patterns, through analyzing the principles and features of the existing process, and applying the methods of increasing the rounded corners or adding low-temperature wax isolation layers at key positions, the phenomenon, the face coat falling off when dewaxing of ceramic mold shell used for casting being carried out, leading to appear surface defects on the rounded corners of the castings, was effectively eliminated, and the surface quality of titanium alloy castings had been significantly improved.

**Key words:**

photosensitive resin; investment precoat; investment casting; low-temperature wax; metallic projection; orange peel defect