

# 钛合金精铸熔模材料及其成形脱除技术

程姣姣<sup>1</sup>, 赵 军<sup>1</sup>, 徐时晶<sup>2</sup>, 刘时兵<sup>1</sup>, 史 昆<sup>1</sup>, 刘鸿羽<sup>1</sup>, 严建强<sup>1</sup>, 李 欣<sup>1</sup>, 李重阳<sup>1</sup>

(1. 沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 空军装备部驻沈阳地区军事代表局驻辽阳地区军事代表室, 辽宁辽阳 110034)

**摘要:** 系统阐述了常见钛合金精密铸造熔模材料: 光敏树脂 (SLA)、高分子聚合物、蜡基及树脂基模料其组元、性能、成形及脱除工艺对熔模质量及灰分残留的影响, 并就未来模料研发和脱模工艺的研究进行了展望。为钛合金精密铸造的发展提供有益参考。

**关键词:** 钛合金; 精密铸造; 中温蜡; 光敏树脂; PS粉

自20世纪50年代起, 钛合金作为工业新金属材料在世界范围内出现后, 航空工业钛材用量现已占据世界钛材市场的一半以上<sup>[1]</sup>。熔模铸造技术凭借其近净成形的优势克服了钛合金因高化学活性、低热导率及低塑性等难以采用锻造、焊接、机械加工等方式成形的问题, 成为生产钛合金结构件的主流方法之一。

当前, 熔模铸造主要由熔模制造、壳型制造及随后的干燥、焙烧、浇注、凝固等工序组成。熔模制备作为整个精铸环节为首的一步, 决定了钛合金铸件的原始成形完整度、表面质量及尺寸精度。因此, 优质熔模制备已成为钛合金行业发展的命脉关键。纵观三类钛合金精铸熔模的发展, 蜡模作为发展最为悠久的一种, 至今占据主导地位。光敏树脂模及聚合物熔模则是随3D打印技术的发展而成熟起来的, 这种以CAD数模为依据, 实现材料逐层累加成形<sup>[2]</sup>的技术不但突破了模具难以成形复杂型腔的局限, 还极大提升了生产效率, 在复杂结构件的制备中展现出极大优势, 有望在未来占据更大市场份额。

基于钛合金熔模铸造大型、复杂、薄壁化<sup>[3]</sup>的发展趋势, 铸件外部成形完整度、局部尺寸精度、变形程度及内部杂质控制是钛合金保持其强竞争力的重要手段。本研究基于压注成形的蜡类模料和3D打印的聚合物模料, 从模料自身属性和成形脱除工艺参数方面出发, 为熔模质量的进一步提高提供有益参考。

## 1 压注成形及蜡基、树脂基熔模

目前国内钛合金熔模铸造大都采用蜡质熔模, 但由于蜡模尺寸在压注过程中存在一定波动, 进而造成铸件尺寸波动。研究表明, 大体上, 蜡模尺寸波动占铸件尺寸波动量的10%~70%<sup>[4]</sup>。对长度25 mm的铸件而言, 熔模偏差占铸件偏差的50%以上<sup>[5]</sup>, 随尺寸增大, 熔模尺寸对铸件尺寸的影响进一步增大。此外, 铸件质量还受蜡模涂挂性、灰分含量及力学性能的影响。

为尽可能提高蜡模成形质量, 用于钛合金精密铸造的蜡料应满足以下性能要求: ①良好的涂挂性, 有助于粘结剂完全浸润熔模; ②流动性 $S_{58\text{℃}} \geq 42\text{ mm}$ , 便于完整清晰地复制蜡模; ③良好的热物理性能, 使熔化及凝固温度区间在5~10℃范围内; ④收缩率小于0.7%, 减小熔模各向收缩不均匀性; ⑤抗弯强度高于2.0 MPa; ⑥足够的表面硬度; ⑦灰分含量低于0.05%, 防止钛合金液与灰分反应<sup>[6]</sup>。

但单一蜡质或松香质及其衍生物均难以满足钛合金精铸用蜡模性能要求, 目前常通过蜡质、松香及其衍生物及微量助剂等不同组分的调和, 对石蜡进行物理改

作者简介:

程姣姣(1995-), 女, 硕士生, 研究方向为钛合金铸造。电话: 15524223098, E-mail: 18679121897@163.com

中图分类号: TG27

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)05-0556-07

基金项目:

国家重点研发计划(2020YFB2008300, 2020YFB2008303); 沈阳市科技计划(Z19-1-003)。

收稿日期:

2021-09-15 收到初稿, 2021-12-21 收到修订稿。

性,达到改善熔模硬度、软化点、韧塑性等目的。与此同时,优化蜡模压注工艺参数也可进一步提升熔模质量。

## 1.1 蜡基及树脂基组元对熔模质量的影响

### 1.1.1 石蜡、微晶蜡、聚乙烯蜡

石蜡是碳原子数在18~30之间的正构烷烃,可作为模料中的晶质组元从而有效减少蜡模中的裂纹。通常情况下,模料中晶质组元的比例应达到1/2~2/3才能保证熔融模料具有较小的粘度、较好的流动性,固态具有较好的塑性。同时,石蜡稳定性和收缩性较差,需通过添加形核剂、树脂、聚合物等组元改善其不足,从而满足精铸熔模的使用要求。

微晶蜡同石蜡一样属于石油产品,但相比石蜡,微晶蜡的馏程和分子碳分布更宽,异构烃含量更高,组成更复杂<sup>[7-9]</sup>。研究表明,微晶蜡调和比与微晶蜡中轻组分的含量对石蜡改性影响较大。沈大建等<sup>[10]</sup>分析了三种均符合70号微晶蜡一级品标准的样品,发现分子组成影响使用性能。较低碳数分子数和正构烷烃含量的增加会提高粘度对温度的敏感度,表现为粘度在使用温度下降低。王林等<sup>[11]</sup>研究了一系列温度下不同石蜡及75号微晶蜡配比的改性蜡的滴熔点、硬度、粘度的变化,发现随微晶蜡含量升高,滴熔点、粘度、硬度均呈上升趋势,其中硬度在较高温度下提升效果尤为显著。

聚乙烯蜡对石蜡硬度、熔点和软化点的改善同微晶蜡相似,且其较低的熔融粘度还有利于模料粘附性和韧性的改进<sup>[12-13]</sup>。宋宇翔等<sup>[14]</sup>在聚乙烯蜡加入量的改性研究基础上进一步考察了改性工艺对石蜡性能的影响,发现在加热温度150℃、搅拌速率600 r/min的工艺条件下,经4 h改性,石蜡性能最优。还有部分学者采用数学模型描述聚乙烯蜡与石蜡滴熔点/粘度方面的相互作用,即方程曲线在局部加和曲线上方时,两者呈协同作用;方程曲线在下时,为对抗作用;两者重合则为加和效应<sup>[15]</sup>。综合考虑不同作用影响,确定聚乙烯蜡的加入量为3%时,滴熔点及粘度配合较好,可获得适宜的性能。

### 1.1.2 硬脂酸、树脂类组元及其他助剂

硬脂酸作为石蜡调和剂是为提高蜡模热稳定性、耐寒性和表面光洁度。图1所示,40%~60%的添加量可以保证改性石蜡体系的熔化/凝固温度区间点稳定维持在5~10℃范围内<sup>[13]</sup>。

树脂类组元的添加是为了提高模料的强硬度、降低模料收缩率,同时也作为非晶质溶剂,增强模料的均质性。其中松香是石蜡改性中最为常用的树脂之

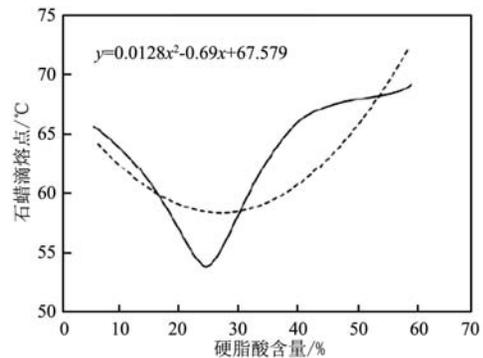


图1 硬脂酸-聚乙烯蜡-石蜡滴熔点数学模型

Fig. 1 Drop melting mathematical model of Stearic acid-polyethylene wax-paraffin

一,熔点在89~93℃之间,强度高且收缩小。石蜡体系中加入松香可以提高蜡料的强度、硬度、熔点和软化点,降低蜡模的收缩率。

另外,由于钛合金精密铸造的快速发展,对模料的强度、韧性、耐热耐寒、抗静电、涂挂等性能提出了更高的要求,由此推动了各种改性助剂的发展。例如向基底模料中加入质量分数2%~3%的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(简称EVA)可以提高模料的强度、韧性和耐热性;还可以通过某些成核剂<sup>[15]</sup>的加入提高或改善蜡料结晶率及结晶形态,达到性能优化的目的。

## 1.2 蜡模成形过程对熔模质量的影响

当前生产上蜡模制备大都采用模具压注法,所涉及的工艺参数如压注温度、模具温度、注射压力、保温时间和蜡料流量均不同程度地影响了蜡模质量<sup>[17-20]</sup>。此外,还有因蜡模自身区域性不均匀收缩导致的蜡模变形开裂,这是因为模具存在区域厚度梯度区,冷却时薄壁区降温较厚区快,使得薄区收缩小于厚区,生产上应适当调整保压时间以避免这种由应力造成的扭曲变形。周李明等<sup>[21]</sup>采用自制的网格状射蜡模具研究了影响蜡模充型性能的因素,证明各工艺参数中射蜡温度对充型程度影响最大。

总体上,蜡模中存在的主要缺陷可分为尺寸差别过大、含有杂质、裂纹等几类。为规避生产中由于不当操作造成蜡模质量下降,表1<sup>[20, 22-23]</sup>整理了几种缺陷的成因及防止措施,为高质量铸件的生产提供有益参考。

## 2 立体光固化成形及光敏树脂熔模

光固化增材制造是一种较早出现的增材制造工艺,相比其他快速铸造方法,光固化增材制造技术可以获得形状更复杂、精度更高、表面质量更好、机械强度更高的树脂熔模<sup>[24]</sup>。发展至今,光固化增材制造

表1 精密铸造熔模生产中的常见缺陷、产生原因及预防方法  
Table 1 Common defects, causes and prevention in investment production

缺陷类型	形成原因	预防方法
尺寸差别过大	模料温度过高或者过低	控制模料温度
	保压时间过长或者过短	控制保压时间
	压型磨损未修正	检验压型尺寸并进行修正
含有杂质	压型不清洁	压型清理干净
	制模工作时不清洁	保持制模时干净整洁
表面裂纹	融化模料使用工具不干净	保持工具干净
	压型温度过低	适当提高压型温度
	模料冷却水温太低	适当提高冷却水温
表面凹陷	制模环境温度太低	提高室温
	保压时间太长, 取模太迟	缩短保压时间, 提早取模
	取模方法不合理	改进取模方法和装置
模料压注温度或压型温度过高	模料压注温度或压型温度	降低模料压注温度或压型温度
	压注压力低, 保压时间	提高压注压力, 延长保压时间
注射口设计不当	短	间
	注射口设计不当	调整注射口大小和位置
	模料壁厚差过大	采用冷模料或制成空心压型

技术已趋于成熟, 在钛合金熔模铸造行业发挥着愈来愈重要的作用。

但是在实际生产中, 熔模铸造用光敏树脂熔模仍面临以下问题: ①树脂热膨胀系数较大, 据统计, 树脂模变形量比型壳材料的变形量大1~2个数量级<sup>[25]</sup>, 在高温焙烧脱模过程中容易造成型壳胀裂<sup>[24]</sup>。②树脂的粘度较大, 型壳内腔中的树脂难以排尽。③树脂的固化收缩率大, 在SLA分层打印过程中累积的收缩应力会导致熔模变形。④树脂的吸湿性也会对熔模的尺寸稳定性产生影响<sup>[26]</sup>。

为生产出尺寸稳定性更高且匹配生产用型壳膨胀性的光敏树脂模, 需开发具有更优性能的光敏树脂并制定新的成形工艺及脱模工艺。

## 2.1 光敏树脂成分组元对熔模质量的影响

光敏树脂主要成分包括预聚物、活性单体、紫外光引发剂三种。根据光固化机理的差异, 可分为自由基固化型、阳离子固化型和自由基-阳离子混合固化型三类<sup>[27]</sup>。早期使用的自由基固化型光敏树脂中不饱和键会在固化过程中发生聚合, 使之前分子中部分范德华力距离变成间距更小的共价键距离, 致使自由基型光敏树脂在固化时体积收缩率达到6%, 所得结构件易发生翘曲变形。研究发现, 添加环氧化物可显著降低自由基型光敏树脂体系的收缩率, 这是因为环氧化物在激光照射下发生阳离子开环聚合反应, 开

环后的结构单元尺寸大于未开环的结构单元尺寸, 补偿了自由基型光敏树脂体系中分子间距的缩小。基于该固化原理, 刘甜等<sup>[28]</sup>以二缩水甘油醚和丙烯酸为主要原料, 制备了一系列二缩水甘油醚二丙烯酸酯光敏预聚物, 获得的光敏树脂体积收缩率在5%左右, 且柔韧性良好。段玉刚等<sup>[29]</sup>也研制出一种低翘曲混合型光敏树脂, 可生产出精度达2%的构件, 极大扩展了SLA技术的应用范围。

由于自由基-阳离子混合固化型光敏树脂兼具自由基型光敏树脂固化速率快和阳离子型光敏树脂收缩率低的优点, 现已成为研究热点。未来, 开发兼具耐热性和韧性的低收缩率光敏树脂成为SLA技术的研究方向<sup>[30]</sup>。

## 2.2 成形工艺对熔模质量的影响

虽然立体光固化成形(SLA)技术制造出的造型物兼具高精度和高透明度<sup>[31]</sup>。但是仍存在变形、发气和膨胀问题。

图2总结了光固化成形过程中致使成形件产生质量问题的所有原因<sup>[32]</sup>, 以此为研究前提, 不少学者对前期数据处理及成形工艺参数<sup>[32-34]</sup>进行了深入研究并提出如下建议: 弦高值( $ch$ )的设置应参考尺寸允许误差,  $ch$ 值越小, STL文件与成形件的三维逼近程度越高, 数据处理运算量越大, 需通过允许误差来平衡图形精度与数据处理的取舍; 分层过程中, 应尽量使切层方向某一尺寸能与分层厚度整除从而减少分层对相邻面层关联性的破坏, 其次还应注意“阶梯效应”对曲面成形的影响; 成形时, 应保证分层厚度小于紫外光最大固化深度、扫描间距小于最大固化线幅, 扫描速度和扫描间距合理匹配, 再者还应补偿光斑直径, 使得最终成形树脂件变形较小、内部应力较少且具有足够结合强度。

为解决光敏树脂模存在的胀壳及发气问题, 美国3D System公司于20世纪90年代初期开发了QuickCast软

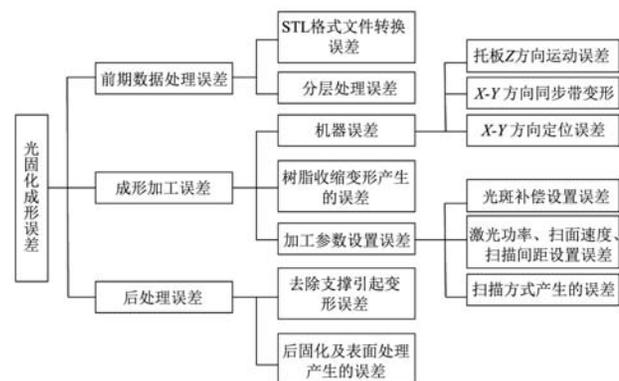


图2 光固化成形误差

Fig. 2 Error of stereolithography

件,结合该软件实现了内部呈六边形结构而表面连续光滑的树脂熔模。这项技术使得树脂熔模在焙烧时首先向内坍塌,解决了型壳胀裂的问题,还能节省90%的光敏树脂制模材料<sup>[35-36]</sup>。宗学文等结合型壳热胀受力模型和有限元分析,总结并推导了树脂膜消除过程中的热变形机理和型壳开裂条件,由抽壳圆柱体型壳不破裂条件可知,树脂模型壁厚越小时,型壳所受张力也会相应越小,该研究进一步证明了中空型树脂模在防止型壳胀裂方面有极大潜力。针对树脂模发气问题,可以通过在熔模上预留排气孔导出气体。

### 3 选择性激光烧结快速成形高聚物熔模

选择性激光烧结快速成形技术(简称SLS技术)1989年由美国CRDeard申请专利<sup>[37]</sup>,是一种利用激光加热选定区域粉材,使微粒在软化/熔融温度下相互结合的成形方法。因其成形材料种类多、应用领域广的优点而迅速发展。目前,SLS技术所用的烧结材料已经开发出十余种<sup>[38-40]</sup>,其中聚苯乙烯(PS)粉因其低吸水性、高成品光洁度成为钛合金精密铸造中较常使用的熔模原料,但纯PS粉末存在烧结件变形大、成形件强度低、脱模困难且污染环境等缺点,各大高校及科研院所基于PS粉掺杂改性和成形工艺参数优化两种途径积极探索了改善熔模质量的方法。

#### 3.1 高聚物熔模研究现状

目前,用于SLS的热塑性高分子及其复合材料属大分子量、玻璃体材料。按结晶性可分为聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、高抗冲聚乙烯(HIPS)等非结晶性高分子材料和尼龙(PA)、聚丙烯(PP)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚醚醚酮(PEEK)等结晶性高分子材料<sup>[42]</sup>。由于该类热塑性高分子材料的烧结速率普遍与粘度呈反比<sup>[43]</sup>,因而结晶性不同的两种高分子材料的SLS烧结特性也不尽相同。

非结晶高分子材料熔融粘度高,使得SLS烧结速率低,成形件呈多孔状且致密度、强度较低<sup>[43]</sup>,表面光洁度也低于蜡质熔模。在提升非结晶性高分子材料成形致密度及强度的种种途径中,复合法凭借其简便高效性脱颖而出。郑海忠等人<sup>[44-46]</sup>和张坚<sup>[47]</sup>等通过乳液聚合法制备了核-壳式纳米聚苯乙烯(PS)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合颗粒,发现利用该种颗粒掺杂的PS粉所得SLS成形件的致密度、强度均明显提高,且纳米粒子在聚合物基体中分散性良好。

结晶性高分子材料则有固定熔点,且粘度在熔点附近急剧降低,使得SLS烧结速率及成形致密性均优于前者。因而近年来该类模料的发展方向主要集中于模

料力学及耐热性能提升。华中科技大学杨劲松<sup>[48]</sup>向尼龙12中添加钛酸钾晶须有效提高了SLS成形件的强度。英国Liverpool大学的Gill和Hon<sup>[49]</sup>研究了碳化硅粉末对尼龙材料SLS成形件性能的影响。美国的Baumann<sup>[50]</sup>通过向尼龙中掺杂二氧化钛粉制备了复合材料。上述研究表明,虽然微米级填料有助于成形件强度、硬度的提高,却削弱了制件韧性。由此推动了高分子纳米复合材料的广泛研究,如累托石、纳米二氧化硅、碳纳米管等纳米级填料极大提升了SLS成形件的力学性能、热性能及耐磨性。未来,兼具强韧性的纳米复合材料定会成为SLS高分子聚合物的发展方向。

#### 3.2 SLS 烧结成形过程对熔模质量的影响

结合高分子模料特性及SLS成形技术特点可知,SLS成形过程中预热温度、激光功率、扫描速度、铺粉厚度是影响成形件质量的主要因素。成形过程中应注意各工艺参数之间的协调。

预热温度方面,由于非结晶高分子材料大分子链段在玻璃转化温度( $T_g$ )下运动增强,表现为粉末颗粒相互粘结结块,致使流动性下降,为增加流动性并减小温度场不均匀造成的结构件翘曲变形,粉末预热温度应低于 $T_g$ 。

工艺参数方面,现有研究均表明参数设置对成形件Z轴方向尺寸影响远大于X、Y方向。Z向尺寸控制既是提高PS粉烧结件精度的首要考虑因素,也是SLS烧结工艺参数控制的主要目标<sup>[51]</sup>。杨来侠等<sup>[51]</sup>采用单因素法,在70℃预热条件下,确定了激光功率、分层厚度、扫描速度的合理范围,进一步佐以正交实验,在激光功率25 W、分层厚度0.25 mm、扫描速度2 000 mm/s、扫描间隔0.32 mm时获得弯曲强度为3.191 MPa、尺寸相对误差为1.85%的优质烧制品。

## 4 模料脱除

#### 4.1 蜡模脱除

蜡模脱除指蜡料从型壳中溶失的过程。根据脱蜡原理的不同,目前国内外钛精铸行业采取的常规脱蜡工艺主要有溶剂脱蜡、热水脱蜡、高压蒸汽脱蜡、电磁波脱蜡和燃烧脱蜡等几种<sup>[52]</sup>。早期我国钛合金精密铸造采用的溶剂脱蜡因使用具有毒副性的有机溶剂(三氯乙烯)已被淘汰。热水/高压蒸汽脱蜡两种方法不适用于水溶性粘结剂/回溶性耐火骨料的型壳(会造成型壳材料的回溶),使用局限性大。电磁波脱蜡则利用微波/红外波加热中温蜡料至熔点附近,使蜡料凭借其优良的流动性与型腔分离,不仅无毒且对型壳及模料材料无特殊要求,得到了广泛应用。

但仍需注意的是,蜡模脱除仍存在热膨胀及灰

分残留问题，前者常造成型壳开裂或变形，后者则易与钛合金液反应产生厚大污染层及气孔。因而生产中常通过脱蜡口倒置和增加外部冒口的方法减轻上述影响，但并未完全解决以上问题，目前仍需开发新的脱蜡方法。

#### 4.2 光敏树脂模脱除

光敏树脂材料普遍熔点较高，为保证模料脱除干净，常采用高温焙烧的方法进行脱除。由于光敏树脂焙烧过程中伴随有发气现象，并生成少量难以清除的残留物，容易降低铸件质量<sup>[53]</sup>。应合理把控焙烧工艺及焙烧后处理，从而减小对铸件质量的损伤。

图3为SLA模的热重分析曲线，乔海滨等<sup>[54]</sup>记录了300~500℃区间内每间隔50℃SLA模的状态变化，结合热重分析曲线将SLA模的脱除划分为100℃缓慢分解、300℃时剧烈分解及600℃时分解基本结束共三个阶段。由于光敏树脂热固性塑料属性，整个焙烧过程中模料不会熔化流失，因而作用于型壳上的膨胀力持续时间较长，增大了型壳胀裂的可能性，同时型腔内灰分残留较多，增大了铸件质量的损伤可能性。

因此，建议生产中初始阶段焙烧温度应迅速升高至300℃以上，同时增加排气孔数量和空气流通速度，促进光敏树脂燃烧，焙烧后实施型壳清灰等措施消除灰分残留的不利影响。

#### 4.3 聚合物模脱除

SLS模料为高分子化合物，熔化温度远高于蜡类模料，且熔程长，无固定熔点。在模料脱除过程中应密切关注其流动及分解情况。这类高分子化合物具有较高粘度及温度敏感性，且流动困难，在温度接近230℃时粘度仅达到100 Pa·s<sup>[55]</sup>。因此，该类模料的脱除应基于其流动特性设定合理的脱模温度，在尽可能获得干净内腔型壳的同时达到降低型壳胀裂、破损的目的。

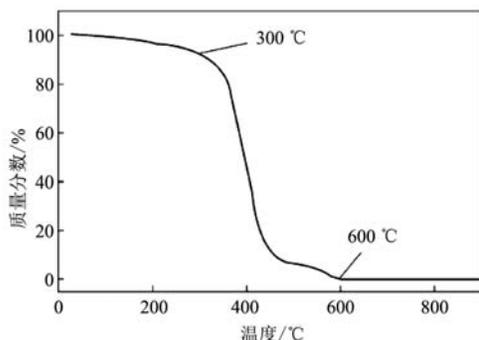


图3 SLA模热重分析曲线

Fig. 3 TGA curve of SLA pattern

乔海滨等人通过对PS粉模燃烧特征的研究，结合热重分析曲线<sup>[54]</sup>发现，400~460℃是PS粉模的快速燃烧温度区间，此时模样膨胀力作用在型壳上的时间大大缩短。杨劲松等<sup>[55]</sup>通过逐步升温试验，探究了SLS高分子聚合物模料升温过程中模料的流动及分解情况，发现分阶段升温脱除法在PS粉模消失过程中显示出极大优势，可以有效实现PS粉模的完全脱除，获得合格型壳。

同时，由于SLS模料是以聚苯乙烯为主的高分子模料，燃烧过程中若含氧量不足，会在模料表面沉积一层致密的碳化物层阻碍燃烧进行，从而应确保模型上预留有足够多的气孔为燃烧提供充足的氧气。

## 5 结语

钛合金作为21世纪最具发展潜力的合金，其构件制备水平的先进性标志着国家航空航天、精、尖工业的先进度。为提升我国钛合金构件的成形质量，第一步是确保所用熔模的成形完整度和尺寸精确度。因此，把控模料性能及熔模脱除过程是行之有效的方法，鉴于目前国内对于优质模料进口的依赖性，亟需提升国内自主研发能力，以下就未来模料研发和脱模工艺的研究提出以下建议：

(1) 蜡质模料目前常用物理改性的方式生产具有目标性能的模料，石蜡作为模料的主要组元，其优良的流动性确保了熔模的完整度，但其强硬度、收缩性、光洁度、稳定性等方面仍有欠缺，需调和其他组元以弥补不足。例如松香质组元的加入有效改善了石蜡硬度的不足，并使得收缩减小；微晶蜡及聚乙烯蜡的加入可改善滴熔点、粘度、硬度及光洁度，并细化结晶度。

(2) 3D打印用模料方面，控制光敏树脂及聚合物在成形时的翘曲变形及收缩是重中之重，例如光敏树脂中开环化合物的开环聚合反应可以补充烧结时的尺寸收缩。因此开发具有低粘度、低收缩率及适宜球形度的3D打印模料是未来发展方向。

(3) 对于熔模成形工艺，蜡质熔模质量受射蜡温度、压注压力、保压时间及保温温度的影响；3D熔模质量则受预热温度、激光功率、铺粉厚度、扫描速度的影响，应在生产过程合理调整总结出具有针对性的工艺参数规范，减少熔模的翘曲变形，生产出高质量熔模。

(4) 熔模在脱除过程中会因其灰分残留而对铸件质量产生不利影响，针对具体熔模应从目前常用的脱除工艺中进行合理选择，并按模料特性制定相匹配的工艺参数。

## 参考文献:

- [1] 何蕾. 钛合金在航空领域的市场展望 [J]. 金属世界, 2015 (5): 4-7.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 石英蕊, 李云飞. 模料对钛精铸件尺寸稳定性的影响 [J]. 中国钛业, 2014 (2): 43-45.
- [5] 姜不居. 熔模精密铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 王新英, 谢成木. 钛合金精铸模料及其制备工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000, 6 (7): 40-42.
- [7] 黎生元. 石蜡产品手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2009: 54-56.
- [8] 周云琪. 高熔点蜡中正、异构烷烃碳数分布的高温气相色谱法 [J]. 色谱, 1996: 14 (5): 403-404.
- [9] 赵天波. 柱头进样气相色谱法测定石蜡、微晶蜡的组成 [J]. 石油化工, 1996: 25 (9): 646-650.
- [10] 沈大建. 分子碳数分布对微晶蜡物理性质的影响 [J]. 当代化工, 2010, 6 (3): 293-294.
- [11] 王林, 金秀英, 吴伟, 等. 微晶蜡和聚乙烯蜡对石蜡性能改进研究 [J]. 当代化工, 2018, 47 (7): 1383-1386.
- [12] 张旭之, 王松汉, 戚以政. 乙烯衍生物化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [13] 李玉庆, 陈文艺, 崔蕊, 等. 复合添加剂对石蜡性能影响的研究 [J]. 当代化工, 2012, 41 (4): 342-344.
- [14] 宋宇翔, 杨藏军, 吴亮, 等. 添加剂对石蜡物理性能影响的研究 [J]. 应用化工, 2014, 43 (4): 636-638.
- [15] YANG Q C, TONG Y. To study the penetration nature of the law with two additives [J]. Journal of prtrochemical universities, 2004, 17 (3): 11-13.
- [16] 吴振豪, 张龙. 成核剂对聚乙烯蜡结晶形态及熔点的影响 [J]. 塑料工业, 2011, 39 (3): 92-95.
- [17] 周李明, 王峰, 王东, 等. 工艺参数对蜡模成型性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (2): 173-175.
- [18] 阚精诚, 刘继广, 杨友文, 等. 熔模铸造柱状蜡模充型工艺参数优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (8): 877-880.
- [19] 余瑾, 史杨, 纪小虎, 等. EVA改性中温模料配方优化设计 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (5): 35-36.
- [20] 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 (3): 370-372.
- [21] 周李明, 王峰, 王东, 等. 工艺参数对蜡模成型性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (2): 173-175.
- [22] 陈亚辉, 段继东. 熔模铸造蜡模尺寸稳定性分析改善 [C]//第十届中国铸造协会年会, 北京: 2012.
- [23] 陈冰. 熔模铸件尺寸稳定性和精度 [J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (1): 53-56.
- [24] 姜耀林, 邵中魁. 3D打印在快速熔模精密铸造技术中的应用 [J]. 机电工程, 2017 (1): 48-51.
- [25] 崇学文, 刘亚雄, 魏罡, 等. 光固化立体造型熔模铸造工艺的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (1): 87-90.
- [26] 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.
- [27] 闵玉勤, 王浩仁, 黄伟, 等. 适应3D打印技术的聚合物材料研究进展 [J]. 粘接, 2016, 37 (1): 36-41.
- [28] 刘甜, 胡晓玲, 方淦, 等. 用于3D打印光固化树脂的制备和性能测试 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42 (10): 20-23.
- [29] 段玉刚, 王学让, 王素琴, 等. 一种用于激光固化快速成型的低翘曲光敏树脂的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (11): 1155-1158, 1174.
- [30] 萩原恒夫. 3Dプリンタ材料の最新動向と今後の展望 [J]. 日本画像学会誌, 2015, 54 (4): 293-300.
- [31] 齐俊梅, 姚雪丽, 陈辉辉, 刘川. 3D打印聚合物材料的研究进展 [J]. 2019, 34 (2): 60-63.
- [32] 陈杰. 光固化快速成型工艺及成型质量控制措施研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [33] 袁慧玲. 光固化快速成型工艺的精度研究与控制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [34] 朱超, 宋莉莉, 孙万麟. 光固化快速成型精度分析及实验研究 [J]. 机械, 2015 (9): 20-23.
- [35] CURTIS W, SURESH J, TOM M. Dimensional issues with investment casting patterns made by stereolithography [C]//Proceedings of The 48th Annual Technical Meeting on Investment Casting, USA, 2000.
- [36] CHARLES K. Investment casting trial studies examine significant new developments in stereolithography resins [J]. Incast, 2002 (11): 112-115.
- [37] 白培康. 选择性激光烧结快速成型技术研究及应用现状 [J]. 航空制造技术, 2009 (3): 51-53.
- [38] DIETMAR D, KATRIN W, FLORIAN K, et al. Polymer blends for selective laser sintering: material and process requirements [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 509-517.
- [39] ALESSAMDRO F, MICHELE L, LUCA R. Experimental analysis of sselective laser sintering of polyamide powders: an energy perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 30 (18): 1722-1730.
- [40] HO H C H, CHEUNG W L, GIBSON L, et al. Morphology and properties of selective laser sintered bisphenol a polycarbonate [J]. Ing. Eng. Chem. Res., 2003, 42: 1850-1863.
- [41] SHI Y. Study of the selective laser sintering of polycarbonate and postprocess for parts reinforcement [J]. Journal of Materials, 2006, 37: 37-42.
- [42] 史玉升, 闫春泽, 魏青松, 等. 选择性激光烧结3D打印用高分子复合材料 [J]. 中国科学, 2015, 45 (2): 203-211.

- [43] YAN C Z, SHI Y S, HAO L. Investigation into the differences in the selective laser sintering between amorphous and semi-crystalline polymers [J]. *Int Polym Process*, 2011, 4: 416-423.
- [44] ZHENG H Z, ZHANG J, LU S Q, et al. Effect of core-shell composite particles on the sintering behavior and properties of Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ /polystyrene composite prepared by SLS. *Mater Lett*, 2006, 60: 1219-1223.
- [45] 郑海忠, 张坚, 徐志锋. 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PS复合材料选区激光烧结成形域及力学性能 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43: 194-198.
- [46] 郑海忠, 张坚, 鲁世强, 等. 核壳式纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PS复合粒子改性聚苯乙烯的选区激光烧结实验研究 [J]. *复合材料学报*, 2006, 23: 63-68.
- [47] 张坚, 郑海忠, 徐志锋, 等. 核壳式纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PS复合粒子的表征及增韧选区激光烧结聚苯乙烯的研究 [J]. *材料工程*, 2007, 3: 24-27.
- [48] YANG J S, SHI Y S, YAN C Z, et al. Selective laser sintering of nylon-12/PTW composites [J]. *Appl Polym Sci*, 2010, 117: 2196-2204.
- [49] GILL T J, HON K K B. Experimental investigation into the selective laser sintering of silicon carbide polyamide composites [J]. *P Inst Mech Eng*, 2004, 218: 1249-1255.
- [50] BAUMANN F E, CHRISTOPH W, GREBE M, et al. Laser-sintering powder containing Titanium dioxide particles, process for its preparation, and moldings produced therefrom: 7148286 B2 [P]. 2006-12-12.
- [51] 杨来侠, 刘旭. PS粉的选择性激光烧结成型工艺实验 [J]. *塑料*, 2016, 45 (1): 100-103.
- [52] 谢华生, 刘时兵, 赵军, 等. 我国钛合金熔模精密铸造型壳制备技术的发展现状 [C]//2013中国铸造活动周论文集, 合肥: 2013.
- [53] 张中武, 周敬恩, 席生岐, 等. 机械合金化W-Ni-Fe纳米复合粉的制备及结构研究 [J]. *材料热处理学报*, 2004, 25 (1): 1-5.
- [54] 乔海滨, 袁兵兵, 孙宏喆, 等. 3D打印熔模精密铸造模样燃烧特性对比研究 [J]. *铸造技术*, 2020, 6 (41): 544-547.
- [55] 杨劲松, 沈其文, 史玉生, 等. SLS模料特性及熔模铸造工艺研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2007, 27 (1): 53-56.

## Titanium Alloy Investment Casting Investment Material and Its Forming and Removal Technology

CHENG Jiao-jiao<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, XU Shi-jing<sup>2</sup>, LIU Shi-bing<sup>1</sup>, SHI Kun<sup>1</sup>, LIU Hong-yu<sup>1</sup>, YAN Jian-qiang<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, LI Chong-yang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-end Equipment, Shenyang Research Institute of Foundry, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Liaoyang 110034, Liaoning, China)

### Abstract:

The effects of components, properties, forming and removal process of common titanium alloy precision casting investment mold materials, such as photosensitive resin (SLA), polymer, wax based and resin based mold materials on investment mold quality and ash residue are systematically described. The future research and development of mold materials and demoulding process are prospected. It will provide a useful reference for the development of titanium alloy precision casting.

### Key words:

titanium alloy; investment casting; medium-temperature wax; photosensitive resin; PS powder