

# 复杂形状 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料的光固化增材制造<sup>①</sup>

乔聪卓, 刘子瑞, 徐麒凯, 王日初, 彭超群, 王小锋

(中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 采用光固化技术增材制造  $\text{SiC}_p/\text{Al6061}$ , 研究了树脂单体和固相体积分数对  $\text{SiC}_p/\text{Al6061}$  浆料稳定性、流变性能、光固化性能以及烧结体致密度与微观组织的影响。结果表明, 适宜的浆料体系为混合光敏树脂体系 PEG200DA/PEG400DA (1:1); 采用该光敏树脂体系制备固含量为 52.5% 的浆料, 黏度为  $5.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (剪切速率  $10 \text{ s}^{-1}$ )、单层固化厚度为  $100.3 \mu\text{m}$ , 满足光固化增材制造的要求。光固化增材制造的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件坯体形状完整、层间结合好, 烧结体无开裂现象, 烧结颈明显, 致密度较高 (94.07%)。

**关键词:** 浆料; 6061 铝合金; 碳化硅颗粒; 增材制造; 光固化; 立体光刻

中图分类号: TB333

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.031

文章编号: 0253-6099(2025)04-0168-07

## Additive Manufacturing of Complex Shaped $\text{SiC}_p/\text{Al}$ Composite by Photocuring Process

QIAO Congzhuo, LIU Zirui, XU Qikai, WANG Richu, PENG Chaoqun, WANG Xiaofeng

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** The additive manufacturing of  $\text{SiC}_p/\text{Al6061}$  by photocuring process was studied, and the effects of resin monomer and solid volume fraction on the stability, rheological properties and photocuring performance of  $\text{SiC}_p/\text{Al6061}$  slurry, as well as the compactness and microstructure of sintered product were explored. The results show that as photosensitive resins of PEG200DA and PEG400DA mixed at an appropriate ratio of 1:1, the prepared slurry with content of 52.5%, viscosity of  $5.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (shear rate of  $10 \text{ s}^{-1}$ ) and single-layer curing thickness of  $100.3 \mu\text{m}$  can meet the requirements for photocuring in additive manufacturing. The  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  component manufactured by photocuring process can have a complete structure and good interlayer bonding, and the sintered product with no cracks and obvious necking presents relatively high compactness (94.07%).

**Key words:** slurry; 6061 aluminum alloy; silicon carbide particle; additive manufacturing; photocuring; stereolithography

碳化硅颗粒增强铝基复合材料 ( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ) 因其高比强度、高比刚度、优异的热物理性能、良好的尺寸稳定性和气密性、耐摩擦磨损性能<sup>[1]</sup>, 广泛应用于航空航天、电子封装、汽车、医疗、核电等领域<sup>[2-3]</sup>。然而, 传统制备方法如搅拌铸造法、挤压铸造法和粉末冶金法等均难以实现复杂形状  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件的近净成形<sup>[4]</sup>。

增材制造技术因其独特的逐层叠加制造原理, 具有制备复杂形状零部件的优势。目前, 用于  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  的增材制造成形技术主要为粉末床熔融 (powder based fusion, PBF) 和直接能量沉积 (direct energy deposition,

DED)。文献[5]采用选择性激光熔化技术成功制备了质量分数 15% 的  $\text{SiC}_p/\text{AlSi10Mg}$  零件。文献[6]采用激光熔覆技术成功制备了  $\text{SiC}_p/\text{Al-12Si}$  零件。文献[7]采用激光沉积技术成功制备了  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  (6061) 零件。上述粉末床熔融和直接能量沉积技术制备  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件的方法具有制备零件致密度高、可制备复杂形状零件、制备零件性能优异的优点, 但是仍存在局限, 例如设备成本高<sup>[5]</sup>、碳化硅颗粒与 Al 基体反应剧烈<sup>[6]</sup>、 $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件表面粗糙<sup>[7]</sup>。相较于上述增材制造技术, 光固化增材制造技术具有能耗低、设备成本低

① 收稿日期: 2025-02-02

基金项目: 福建省重大科技专项 (2023HZ021005)

作者简介: 乔聪卓 (1999—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为铝基复合材料增材制造。E-mail: qiao1151989420@163.com

通信作者: 王小锋 (1980—), 男, 湖北天门人, 博士, 教授, 主要从事增材制造和金属基复合材料等方面的研究。E-mail: wangxiaofeng@csu.edu.cn

的优点,可制造尺寸精度高、表面质量好的零部件<sup>[8]</sup>。然而,采用光固化增材制造技术制备 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的研究鲜见报道。本文采用光固化增材制造技术制备复杂形状 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,研究了光敏树脂单体对浆料稳定性、黏度、光固化性能的影响,制备了 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料,探讨了光敏树脂种类和固相体积分数对浆料黏度、光固化性能以及烧结体微观组织结构和致密度的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与试剂

实验原料 6061 铝合金粉末  $D_{50} = 1.78 \mu\text{m}$ ,化学组成如表 1 所示;SiC 粉末  $D_{50} = 17.17 \mu\text{m}$ ,纯度大于 99.5%。

表 1 6061 铝合金粉末化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Al 6061 alloy powder %

Mg	Si	Cu	Zn	Mn	Ti	Fe	Cr	Al
1.0	0.6	0.2	0.25	0.15	0.15	0.7	0.1	余量

光敏树脂单体 HDDA(1,6-己二醇二丙烯酸酯)、TMPTA(三羟甲基丙烷三丙烯酸酯)均购自上海佑季化学材料有限公司。光敏树脂单体 PEG200DA(聚乙二醇 200 二丙烯酸酯)、PEG400DA(聚乙二醇 400 二丙烯酸酯)均购自沙多玛(广州)化学有限公司。光敏树脂单体 PS-PCL 为课题组自制单体。光引发剂 TPO(2,4,6-三甲基苯甲酰基二苯基氧化膦)购自阿拉丁试剂(上海)有限公司。上述化学试剂均为分析纯。

### 1.2 实验方法

将光敏树脂单体、光引发剂和 6061 铝合金粉末、SiC 粉末混合制备浆料,采用立体光刻技术(stereo lithography,SLA)光固化成形 SiC<sub>p</sub>/Al 坯体,坯体经过脱脂和烧结后获得 SiC<sub>p</sub>/Al 零件。具体操作如下:首先将 6061 铝合金粉末与 SiC 粉末以球磨方式均匀混合,球磨时间 48 h,球磨速度 800 r/min。之后将光敏树脂单体与光引发剂 TPO(用量为光敏树脂单体质量的 1.5%)加入球磨机中,在真空条件下以 800 r/min 转速搅拌 6 h 得到均匀稳定的光敏树脂。之后将光敏树脂与 SiC<sub>p</sub>/Al 复合粉末加入球磨机中,在真空条件下以 1 200 r/min 转速搅拌 3 h,获得成分均匀的 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料。采用自制的 SLA 设备成形坯体,所用设备配置了波长 355 nm、功率 3 W 的高分辨率紫外光发射器,坯体的单层打印厚度设置为 30  $\mu\text{m}$ 。

将成形坯体放入高温气氛管式炉中进行脱脂和烧结,具体工艺为:脱脂过程中升温速率为 1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,分

别在 180、400、490  $^{\circ}\text{C}$  下保温 2 h 进行脱脂。脱脂完成后以 1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速率从 490  $^{\circ}\text{C}$  升温至 630  $^{\circ}\text{C}$  并保温 2 h 进行烧结。最后以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率冷却至室温。整个烧结过程以 500 mL/min 的流速向炉内通入高纯氮气作为保护气体。

### 1.3 性能表征

通过沉降实验对浆料稳定性进行表征<sup>[9-10]</sup>。采用 STA-449C 型同步热分析仪分析光敏树脂单体的热分解规律,树脂单体在氮气气氛下进行热分解,升温速率为 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,测试温度范围为 20~700  $^{\circ}\text{C}$ 。坯体脱脂与烧结在 KJ-T1600-L6010LB1 高温气氛管式炉中进行。使用安东帕流变仪测量浆料在 0.1~1 000  $\text{s}^{-1}$  剪切速率下的黏度。根据阿基米德排水法原理测量 SiC<sub>p</sub>/Al 烧结完成后零件的密度,并计算零件的致密度。使用 DM4M 金相显微镜观察烧结样品金相组织。使用 Sirion-200 场发射扫描电子显微镜观察生坯和烧结试样的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光敏树脂优选

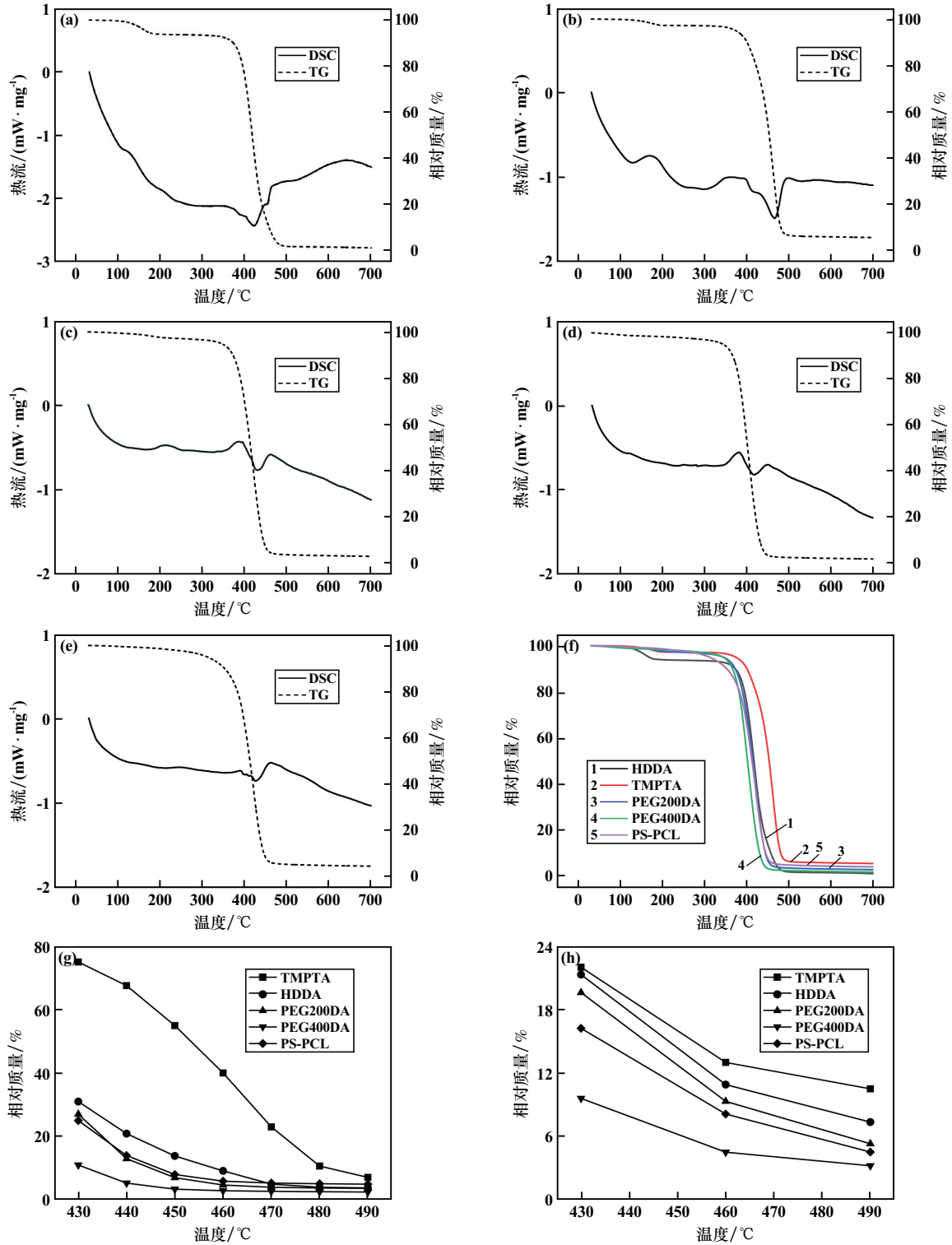
SLA 技术成形所得 SiC<sub>p</sub>/Al 坯体中的有机物难以在脱脂过程中完全去除,其热分解残余物会阻碍零件的烧结致密化,因此应选择热分解后残留物较少的光敏树脂单体制备 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料。

本文通过 TG-DSC 实验探究 5 种光敏树脂单体(TMPTA、HDDA、PEG200DA、PEG400DA、PS-PCL)的热分解规律。图 1 为 5 种光敏树脂单体的热分析曲线和纯树脂固化坯体的热分解结果。

由图 1(a)~(f)可知,HDDA 在氮气气氛下热分解存在 2 个弱吸热峰,说明 HDDA 热分解分为 2 步进行,当升温至热分解温度时,HDDA 通过随机链端断裂机制发生分解并生成挥发性降解产物<sup>[11]</sup>,第 1 步热分解发生在 150~200  $^{\circ}\text{C}$ ,主要为低分子量聚合物的热解;第 2 步发生在 350~480  $^{\circ}\text{C}$ ,对应大分子有机物碳链的热解过程,该过程有机物质量失重比例达到 80%~90%<sup>[12]</sup>。TMPTA 的热分析曲线与 HDDA 的相似,分解过程中有机物的失重主要集中在 380~510  $^{\circ}\text{C}$ ,对应交联丙烯酸酯有机部分的热分解<sup>[13]</sup>。PEG200DA、PEG400DA 的 DSC 曲线峰形相似,有机物的失重主要集中在 350~460  $^{\circ}\text{C}$ ,且曲线的峰形较宽,即分解温度跨度大<sup>[14]</sup>。由于 PS-PCL 合成成分含 PEG200DA,PS-PCL 的 DSC 曲线峰形位置和分解规律与 PEG200DA 相似<sup>[8]</sup>。PS-PCL、PEG200DA、PEG400DA、HDDA 的 TG

曲线有机物失重主要阶段基本重合,而 TMPTA 的失重阶段温度明显高于其他单体。由图 1(g)可知, TMPTA 有机物残留量明显高于其他光敏树脂单体。由图 1(h)可知, TMPTA 坯体热分解残留物明显多于

其他树脂坯体; PEG200DA、PS-PCL 与 PEG400DA 坯体的热分解残留物较少。在热分解温度为 490 °C 时, PEG400DA 坯体的热分解残留物最少, 约为 TMPTA 残留物质量的 1/3、HDDA 残留物质量的 1/2。



(a) HDDA, DSC-TG 曲线; (b) TMPTA, DSC-TG 曲线; (c) PEG200DA, DSC-TG 曲线; (d) PEG400DA, DSC-TG 曲线; (e) PS-PCL, DSC-TG 曲线; (f) 光敏树脂单体 TG 曲线; (g) 光敏树脂单体 TG 曲线(430~490 °C); (h) 光敏树脂坯体氮气气氛下热分解曲线(430~490 °C)

图 1 光敏树脂单体的热分析曲线和纯树脂固化坯体的热分解结果

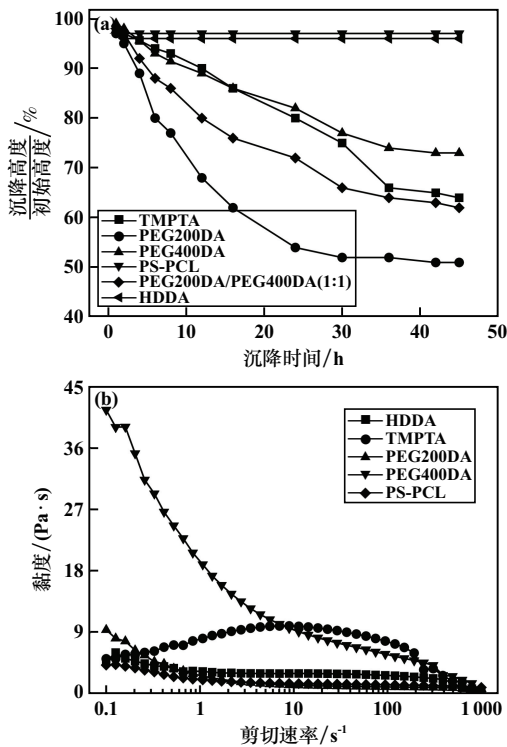
Fig.1 Thermal analysis curves of photosensitive resin monomer and thermal decomposition of pure resin solidified substrate

综上所述,光敏树脂单体 PEG400DA、PEG200DA 和 PS-PCL 比 TMPTA 和 HDDA 更适合制备 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料。

根据 Stokes 公式,不同光敏树脂单体形成的网络结构对粉体颗粒的支撑力不同<sup>[15]</sup>,导致浆料沉降存在明显差异<sup>[16]</sup>,且浆料的沉降速率与其黏度成反比<sup>[17]</sup>。

浆料沉降实验结果及黏度曲线见图 2。图 2(a) 结果显示,光敏树脂单体 HDDA 配制的浆料以及光敏树脂单体 PS-PCL 配制的浆料沉降高度基本不变。光敏树脂单体 HDDA 制备所得 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料在配制完成后 10 min 内发生交联聚合反应,因而没有明显的沉降现象,浆料稳定性最差。光敏树脂单体 PS-PCL 制备所得 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料呈半固态,使得粉体颗粒不易沉降<sup>[8]</sup>。两种浆料沉降规律均不符合 Stokes 公式。其余浆料的沉降规律则符合 Stokes 公式,其中光敏树脂单体 PEG200DA 配制的浆料沉降速率最快,PEG400DA 配制的浆料沉降速率最慢。

浆料黏度对打印坯体的形状完整性有着重要影响,浆料黏度过高会导致打印坯体形状出现残缺<sup>[8]</sup>。由图 2(b)可知,光敏树脂单体 HDDA、PEG200DA、PS-PCL 配制的 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料在剪切速率为 10 s<sup>-1</sup>时黏度小于 5 Pa·s;PEG400DA、TMPTA 配制的 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料黏度相对较高,在剪切速率为 10 s<sup>-1</sup>时黏度在 10 Pa·s 左右。



(a) 沉降实验结果(固相体积分数 20%);

(b) 黏度曲线(固相体积分数 50%)

图 2 浆料沉降实验结果及黏度曲线

Fig.2 Slurry settling test result and viscosity curve

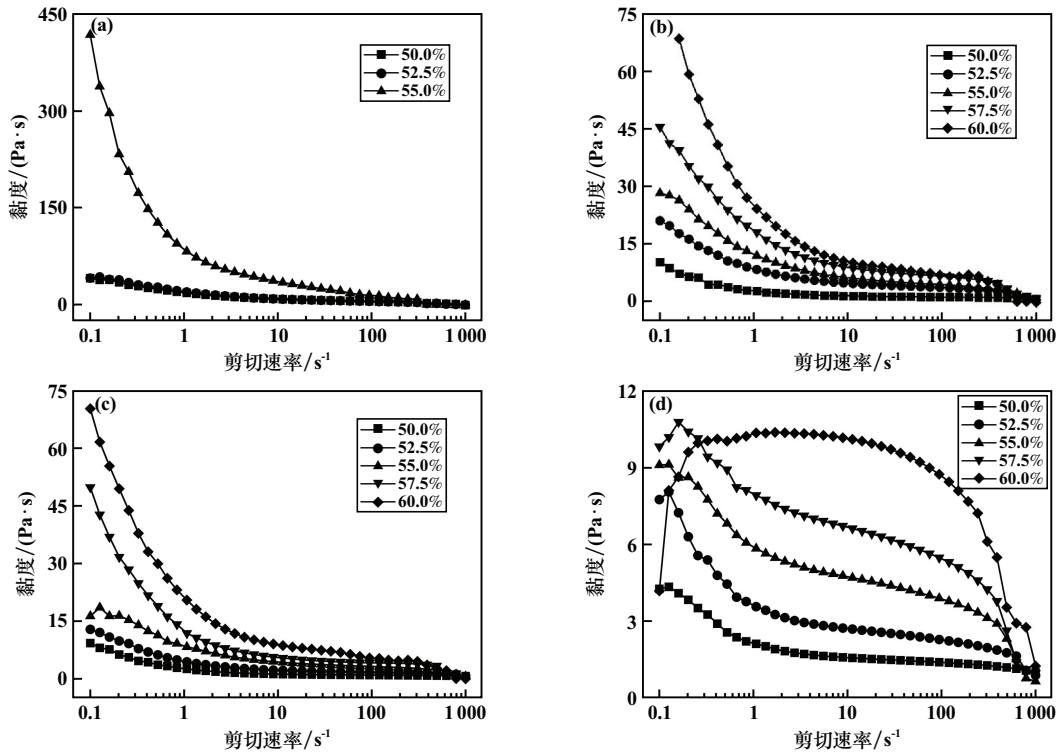
综上所述,光敏树脂单体 TMPTA 脱脂完成后残留物较多;光敏树脂 HDDA 制备的浆料稳定性较差;因此宜选用 PEG200DA、PEG400DA 以及 PS-PCL 这 3 种性能优异的光敏树脂单体制备 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料。

## 2.2 固相体积分数对浆料黏度和固化效果的影响

设置浆料固相体积分数分别为 50.0%、52.5%、55.0%、57.5%、60.0%,探究 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料固相体积分数对浆料黏度和固化效果的影响,黏度测试结果如图 3 所示。PEG400DA 体系浆料黏度过高,因此固相体积分数设定值最高为 55.0%,并用黏度较低的 PEG200DA 与其混合得到混合树脂体系 PEG200DA/PEG400DA (1:1)。由图 3 可知,随着浆料固相体积分数升高,浆料黏度呈现快速上升趋势。这是因为浆料固相体积分数升高,浆料体系中粉体颗粒之间的间隙减小,粉体颗粒移动受到阻碍,导致浆料黏度上升<sup>[18]</sup>。

PEG200DA、PEG400DA、PEG200DA/PEG400DA (1:1) 体系浆料黏度随着剪切速率升高而降低。初始阶段(剪切速率小于 10 s<sup>-1</sup>),浆料中颗粒由于布朗运动呈现随机分布,且保持热力学平衡状态,颗粒有一定的聚集,使得浆料黏度较高;随着剪切运动的出现,粉体颗粒脱絮凝并形成分层,使得浆料黏度快速降低<sup>[19]</sup>。剪切速率 10~100 s<sup>-1</sup>时,浆料中流动的粉体颗粒逐渐形成最佳分层排列,浆料黏度趋向稳定。PS-PCL 体系浆料黏度随着剪切速率升高整体呈降低趋势,PS-PCL 为实验室自制光敏树脂单体,其纯度低于分析纯,初始阶段随着剪切速率升高,不同分子链长的有机物相互交错缠绕使得浆料黏度产生波动。剪切速率 10 s<sup>-1</sup>时,黏度较低的浆料体系分别为:PEG200DA-50.0% (黏度 1.34 Pa·s)、PEG200DA-52.5% (黏度 2.34 Pa·s)、PEG200DA/PEG400DA (1:1)-50.0% (黏度 1.76 Pa·s)、PEG200DA/PEG400DA (1:1)-52.5% (黏度 5.05 Pa·s)、PS-PCL-50.0% (黏度 1.59 Pa·s)、PS-PCL-52.5% (黏度 2.72 Pa·s)。

浆料固相体积分数对固化厚度的影响如图 4 所示。SiC<sub>p</sub>/Al 浆料的固化厚度随着固相体积分数升高而降低。这是由于 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料中复合粉体颗粒越多,吸收和散射的 UV 光越强,UV 光在浆料中的穿透深度降低<sup>[20]</sup>,浆料固化厚度随之降低。PEG200DA、PEG200DA/PEG400DA (1:1) 配制的 SiC<sub>p</sub>/Al 浆料光固化能力强,在固相体积分数为 52.5%时,单层的固化厚度分别为 114.3、100.3 μm。光敏树脂 PS-PCL 配制的浆料光固化能力较差,固相体积分数 52.5%时,单层的固化厚度小于 80 μm。



(a) PEG400DA; (b) PEG200DA/PEG400DA(1:1); (c) PEG200DA; (d) PS-PCL

图3 浆料黏度曲线与固相体积分数的关系

Fig.3 Relationship between slurry viscosity and solid volume fraction

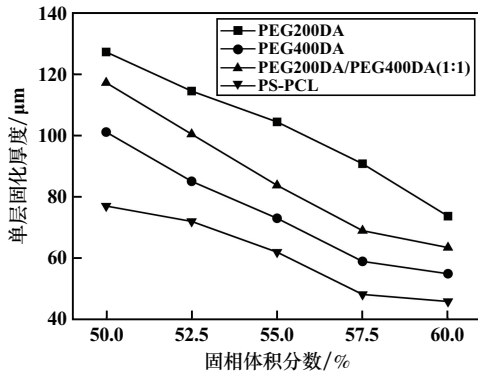


图4 浆料固相体积分数与单层固化厚度的关系

Fig.4 Relationship between solid volume fraction and single-layer curing thickness of slurry

2.3 脱脂烧结

图5为4种光敏树脂体系不同固相体积分数的坯体脱脂烧结零件的致密度。PEG400DA体系坯体脱脂烧结后SiC<sub>p</sub>/Al零件致密度最低,PEG200DA/PEG400DA(1:1)体系SiC<sub>p</sub>/Al零件致密度最高,因此,PEG200DA/PEG400DA(1:1)浆料体系为4种体系中的最优体系。

PEG200DA体系所得零件致密度随着浆料固相体积分数升高呈现先升高再降低的趋势。固相体积分数

50.0%~52.5%时,零件致密度随着浆料固相体积分数升高而升高,这是因为此时浆料的黏度小于5 Pa·s(剪切速率为10 s<sup>-1</sup>),坯体打印过程中浆料可以完全铺平,单层固化没有残缺。随着浆料固相体积分数升高,所得坯体中粉体颗粒间隙减小,有利于烧结阶段零件的致密化<sup>[21]</sup>。固相体积分数55.0%~60.0%时,随着固相体积分数升高,浆料黏度快速升高导致浆料流动性变差,打印过程中浆料难以铺平,会引入大量孔洞缺陷。同时随着固相体积分数升高,浆料单层固化厚度降低,层与层之间结合变差,坯体在烧结阶段层间难以完全闭合,导致烧结完成后零件致密度降低。PS-PCL

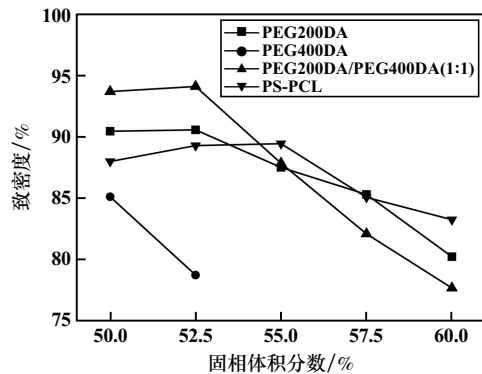


图5 烧结完成后零件的致密度

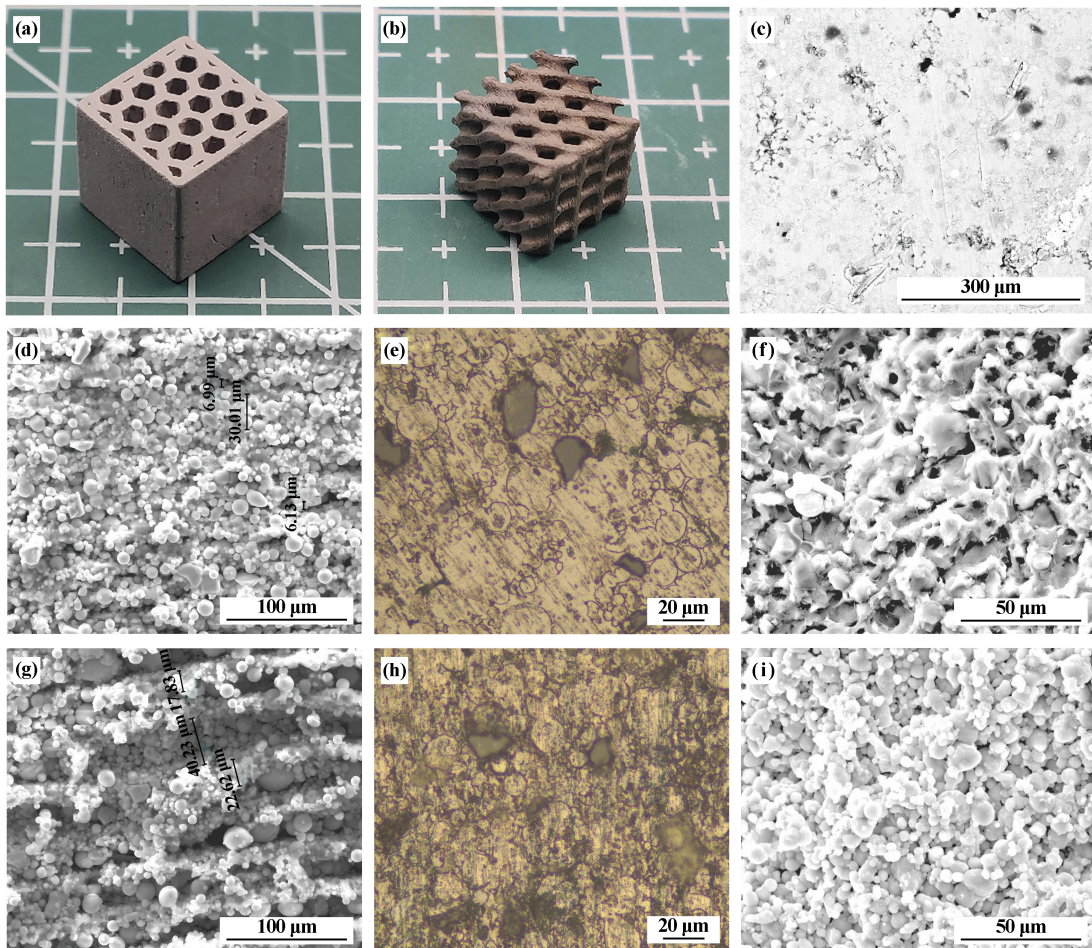
Fig.5 Compactness of sintered parts

体系零件致密度随着浆料固相体积分数升高呈现先升高再降低趋势,固相体积分数 50.0%~55.0%时,PS-PCL 体系的浆料单层固化厚度大于 60  $\mu\text{m}$ ,坯体层间结合较好;固相体积分数 57.5%~60.0%时,PS-PCL 体系的浆料单层固化厚度为 40  $\mu\text{m}$  左右,坯体层间结合较差,导致烧结后零件的致密度较低。

混合体系 PEG200DA/PEG400DA(1:1)零件的致密度随着浆料固相体积分数升高呈现先升高再降低的趋势,浆料固相体积分数 52.5%时,零件致密度最高,为 94.07%。PEG200DA 与 PEG400DA 的分子链长不同,在固化时会交错形成复杂网状结构,从而提高层间结合。PEG400DA 体系零件致密度随着浆料固相体积分数升高而降低,因为随着固相体积分数升高,体系浆料黏度增大,浆料在打印过程中的铺平能力变差,光固化成形所得坯体形状容易出现残缺,烧结所得零件致密度较低。

## 2.4 形貌表征

部分坯体、零件的表面形貌、断口形貌及金相组织见图 6。由图 6(a)、(b)可知,采用 SLA 技术可以制备形状复杂且精度较高的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件。由图 6(c)可知,  $\text{SiC}$  颗粒在铝基体中分布均匀,没有出现团聚现象;  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件表面存在一些细小孔洞。由图 6(d)、(g)可知,PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系制备的坯体层间结合较好,层间距小于 7  $\mu\text{m}$ ;PEG400DA-52.5%体系制备的坯体层间结合较差,层间距达到 40  $\mu\text{m}$  以上。由图 6(e)可知,PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系零件孔隙较少。由图 6(h)可知,PEG400DA-52.5%体系零件孔隙较多,增强相  $\text{SiC}$  颗粒周围存在一些细小孔隙,这是由于烧结过程中  $\text{SiC}$  颗粒与  $\text{Al}$  基体之间润湿性差以及热膨胀系数差异较大形成的缺陷<sup>[21]</sup>。零件表面存在的一些连续分布的孔隙是由于打印过程中浆料黏度过高,单层没有铺平形成的缺陷<sup>[22]</sup>。由图 6(f)、(i)



(a) 复杂蜂窝方块坯体; (b) 复杂形状  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件; (c)  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  零件表面形貌; (d) 坯体,PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%层间距; (e) PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系零件金相组织; (f) PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系零件断口形貌; (g) 坯体,PEG400DA-52.5%层间距; (h) PEG400DA-52.5%体系零件金相组织; (i) PEG400DA-52.5%体系零件断口形貌

图 6 部分坯体、零件的表面形貌、断口形貌及金相组织

Fig. 6 Surface morphology, fracture morphology and metallographic structure of some substrates and parts

可知,PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系零件中粉体颗粒之间存在明显烧结颈<sup>[23]</sup>;而PEG400DA-52.5%体系零件断口处粉体颗粒仍保持球状,粉体颗粒之间没有明显的烧结颈。

综上所述,PEG200DA/PEG400DA(1:1)-52.5%体系制备的零件烧结致密度高于其他烧结样品,微观形貌分析结果也印证了PEG200DA/PEG400DA(1:1)混合体系在SiC<sub>p</sub>/Al光固化成形和脱脂烧结过程中的优势。

### 3 结论

1) 6种光敏树脂体系中:TMPTA热分解残留量明显高于其他光敏树脂;HDDA配制的SiC<sub>p</sub>/Al浆料稳定性差,易发生反应;PEG400DA的浆料黏度较高,成形坯体易缺损;PEG200DA的浆料稳定性相对较差,易发生沉降;PS-PCL的浆料光固化性能较差,单层固化厚度低;PEG200DA/PEG400DA(1:1)为最优树脂体系,采用其制备的SiC<sub>p</sub>/Al浆料,稳定性好、光固化性能优异且热分解有机物残留量低。

2) 采用PEG200DA/PEG400DA(1:1)体系制备SiC<sub>p</sub>/Al浆料,适宜的固相体积分数为52.5%。该浆料黏度低,剪切速率 $10\text{ s}^{-1}$ 时黏度为 $5.05\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;且其单层固化厚度较高,达到 $100.3\text{ }\mu\text{m}$ 。采用该浆料光固化增材制造的SiC<sub>p</sub>/Al坯体层间结合良好,层间距宽度小于 $7\text{ }\mu\text{m}$ ;SiC<sub>p</sub>/Al烧结体组织均匀、孔隙较少,致密度达到94.07%。

### 参考文献(References):

[1] 吕品回,王小锋,董翠鸽,等. 增强体表面镀钛对SiC<sub>p</sub>/Al2014复合材料组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):156-160.  
LYU Pinhui, WANG Xiaofeng, DONG Cuige, et al. Effect of titanium-plated reinforcements on microstructure and properties of SiC<sub>p</sub>/Al2014 composites[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4):156-160.

[2] 李红英,欧阳勋,赵守鑫. 放电等离子烧结制备纳米SiC<sub>p</sub>/Al复合材料及组织性能研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(4):113-116.  
LI Hongying, OUYANG Xun, ZHAO Shouxin. Microstructure and properties of nano-Si/Al composites fabricated by SPS[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(4):113-116.

[3] FLOM Y, ARSENAULT R J. Effect of particle size on fracture toughness of SiC/Al composite material[J]. Acta Metallurgica, 1989,37(9):2413-2423.

[4] 董翠鸽,王日初,彭超群,等. SiC<sub>p</sub>/Al复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(11):3161-3181.  
DONG Cuige, WANG Richu, PENG Chaoqun, et al. Research progress in SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3161-3181.

[5] XUE G, KE L D, ZHU H H, et al. Influence of processing parameters on selective laser melted SiC<sub>p</sub>/AlSi10Mg composites: densification, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019,764:138155.

[6] ANANDKUMAR R, ALMEIDA A, VILAR R, et al. Influence of powder particle injection velocity on the microstructure of Al-12Si/SiC<sub>p</sub> coatings produced by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2009,204(3):285-290.

[7] XU B A, JIANG P, GENG S N, et al. In-situ reactions and mechanical properties of 6061 aluminum alloy weld joint with SiC<sub>p</sub> by laser melting injection[J]. Materials & Design, 2021,203:109538.

[8] 刘明信,乔聪卓,彭超群,等. 单体种类对光固化增材制造5052铝合金的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):145-152.  
LIU Mingxin, QIAO Congzhuo, PENG Chaoqun, et al. Effects of monomer types on additive manufacturing of 5052 aluminum alloy with light-curing strategy [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):145-152.

[9] 茅芝亮. SiC陶瓷的直写式3D打印成型工艺研究[D]. 沈阳:东北大学, 2019.  
MAO Zhiliang. Study on direct-write 3D printing technology of SiC ceramics[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.

[10] TANG J, GUO X T, CHANG H T, et al. The preparation of SiC ceramic photosensitive slurry for rapid stereolithography[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021,41(15):7516-7524.

[11] GOSWAMI A, UMARJI A M, MADRAS G. Degradation kinetics of poly(HDDA-co-MMA)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010,117(4):2444-2453.

[12] MAHMOUDI M, KIM S, ARIFUZZAMAN A M, et al. Processing and 3D printing of SiCN polymer-derived ceramics[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2022,19(2):939-948.

[13] PAN Z X, WANG D, GUO X, et al. High strength and microwave-absorbing polymer-derived SiCN honeycomb ceramic prepared by 3D printing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022,42(4):1322-1331.

[14] LI Y B, WU W Q, LIN F, et al. The interaction between poly(vinyl alcohol) and low-molar-mass poly(ethylene oxide)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012,126(1):162-168.

[15] LI S, LI Y F, WANG Q W, et al. Fabrication of 3D-SiC/aluminum alloy interpenetrating composites by DIW and pressureless infiltration[J]. Ceramics International, 2021,47(17):24340-24347.

[16] LU Z L, XIA Y L, MIAO K, et al. Microstructure control of highly oriented short carbon fibres in SiC matrix composites fabricated by direct ink writing[J]. Ceramics International, 2019,45(14):17262-17267.

[17] LUBE T, STAUDACHER M, HOFER A K, et al. Stereolithographic 3D printing of ceramics: Challenges and opportunities for structural integrity[J]. Advanced Engineering Materials, 2023,25(7):2200520.

[18] ZAKERI S, VIPPOLA M, LEVÄNEN E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography[J]. Additive Manufacturing, 2020,35:101177.

(下转第179页)

辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗对表面破碎松散的氧化鳞皮起到了清理作用,表面氧含量从 SED 除鳞+高压冲洗后的 25.76%降低至 14.28%,能有效去除表面残留氧化鳞皮。经 SED 除鳞+辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗处理后,试样表面色泽均匀,表面粗糙度和氧含量明显降低,能有效提高汽车用第三代 AHSS 钢板清理后的表面质量。

#### 参考文献(References):

- [1] 王永恒. 冷轧高强度汽车板工艺及设备优化探讨[J]. 山西冶金, 2023,46(12):264-265.  
WANG Yongheng. Discussion on the process and equipment optimization of cold rolled high strength automotive plate[J]. Shanxi Metallurgy, 2023,46(12):264-265.
- [2] 余铁峰,王俊海. 国内主要家电用钢板生产企业专利及研发情况综述[J]. 四川冶金, 2019,41(3):11-14.  
YU Yifeng, WANG Junhai. Patents and R & D of major domestic manufacturing enterprise steel plate for household appliances[J]. Sichuan Metallurgy, 2019,41(3):11-14.
- [3] 王耀东. 浅析汽车板的开发与应用[J]. 山西冶金, 2015,38(2):1-2.  
WANG Yaodong. On the development and application of automobile panels[J]. Shanxi Metallurgy, 2015,38(2):1-2.
- [4] 柯熠. 高压磨料水射流磨蚀分布及除鳞机理研究[D]. 长沙:长沙矿冶研究院, 2017.  
KE Yi. Study on abrasion distribution and descaling mechanism of high-pressure abrasive waterjet [D]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, 2017.
- [5] 徐言东,顾洋,马树森,等. 几种钢材表面的少酸化除鳞设备[J]. 轧钢, 2019,36(4):54-57.  
XU Yandong, GU Yang, MA Shusen, et al. Introduction of several

- acid-reducing descaling equipment for steel products[J]. Steel Rolling, 2019,36(4):54-57.
- [6] 于邦超. 带钢无酸除鳞技术应用进展[J]. 金属世界, 2019(3):6-8.  
YU Bangchao. Application progress of acid-free descaling technology for steel strip[J]. Metal World, 2019(3):6-8.
- [7] 雷武军. 无酸除鳞技术在冷轧宽带应用的探索与实践[J]. 中国金属通报, 2021(1):81-82.  
LEI Wujun. Exploration and practice of acid-free descaling technology in cold rolled wide strip[J]. China Metal Bulletin, 2021(1):81-82.
- [8] 刘斌. 汽车涂装前处理过程中的铁类杂质消除工艺研究[J]. 汽车维修技师, 2022(9):128.  
LIU Bin. Study on iron impurities elimination process in automobile painting pretreatment process[J]. Auto Maintenance, 2022(9):128.
- [9] 日产 Rogue 使用 AHSS 和铝制车身面板以减轻重量[J]. 铝加工, 2022(4):9.  
Nissan Rogue uses AHSS and aluminum body panels to reduce weight[J]. Aluminium Fabrication, 2022(4):9.
- [10] 罗茜. 第三代 AHSS 钢的组织调控及其抗氢脆性能研究[D]. 南京:东南大学, 2023.  
LUO Qian. The third generation of advanced high strength steel organization control and hydrogen brittleness resistance study [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [11] 孙荣生,王静,刘仁东,等. 1 200 MPa 级冷轧先进高强钢轧制稳定性的分析及控制[J]. 轧钢, 2020,37(6):40-43.  
SUN Rongsheng, WANG Jing, LIU Rendong, et al. Analysis and control on the cold rolling stability of 1 200 MPa grade AHSS [J]. Steel Rolling, 2020,37(6):40-43.

- 引用本文:黄海花,柯熠,毛桂庭,等. 高端板材表面除鳞清理工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):175-179.  
HUANG Haihua, KE Yi, MAO Guiting, et al. Surface descaling and cleaning process for high-end plates [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):175-179.

(上接第 174 页)

- [19] YU Y, ZOU B, WANG X F, et al. Rheological behavior and curing deformation of paste containing 85 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic during SLA-3D printing [J]. Ceramics International, 2022, 8(17):24560-24570.
- [20] KOMISSARENKO D A, SOKOLOV P S, EVSTIGNEVA A D, et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021,41(1):684-690.
- [21] 张报清,孙应,李亚东,等. 钛粉烧结工艺参数控制研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):134-138.  
ZHANG Baoqing, SUN Ying, LI Yadong, et al. Experimental study on sintering parameters control of titanium powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):134-138.
- [22] HU K H, WEI Y M, LU Z G, et al. Design of a shaping system for

- stereolithography with high solid loading ceramic suspensions[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018,5(4):311-318.
- [23] 杜智渊,吴茂,邱婷婷,等. Al-Cu-Mg-Si 系铝合金的注射成形[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(11):2471-2480.  
DU Zhiyuan, WU Mao, QIU Tingting, et al. Metal injection molding of Al-Cu-Mg-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019,29(11):2471-2480.

- 引用本文:乔聪卓,刘子瑞,徐麒凯,等. 复杂形状 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的光固化增材制造[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):168-174.  
QIAO Congzhuo, LIU Zirui, XU Qikai, et al. Additive manufacturing of complex shaped SiC<sub>p</sub>/Al composite by photocuring process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):168-174.