

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.017

# 增减材制造PA6/CF复合材料模具的结构优化与温度均匀性

包啟臣<sup>1,2</sup>, 茅健<sup>1,2,3</sup>, 王大志<sup>4</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 机械工业大型复杂构件智能制造技术重点实验室, 上海 201620;  
3. 上海交通大学四川研究院, 成都 610213; 4. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

**摘要:** 基于五轴联动增减材一体化制造技术, 对短切碳纤维(SCF)/聚酰胺6 (PA6)复合材料模具的结构优化与温度均匀性展开系统性研究。通过融合熔融沉积(FDM)增材制造与数控铣削减材技术, 突破传统模压/注塑成型易产生缺陷及FDM制造精度不足的瓶颈, 实现高效率、高精度的模具制造。选用SCF质量分数为10%的SCF/PA6复合材料, 依托自主研发的大尺寸增减材一体机制造模具。通过ANSYS热-流-固耦合仿真, 深入分析热压罐固化过程中模具的温度场分布与应力变形。对比V型与N型支撑结构发现, V型结构因流体通道设计更优, 模具型面最大温差降至72 K, 较N型的80 K降低10%, 有效提升温度均匀性, 但其热变形量略高于N型结构。进一步采用田口实验法优化关键参数, 结果表明, 模具到热压罐进口风速对温度均匀性影响最显著, 最优参数组合为风速3 m/s、型面厚度18 mm、距进口750 mm, 该方案可最大化提高模具的温度均匀性, 同时控制变形在许可范围内。

**关键词:** 增减材制造; 短切碳纤维; 聚酰胺6; 复合材料模具; 热压罐; 参数优化

**中图分类号:** TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0132-09

## Structural optimization and temperature uniformity of composite mould manufactured by additive and subtractive methods with PA6/CF

BAO Qichen<sup>1,2</sup>, MAO Jian<sup>1,2,3</sup>, WANG Dazhi<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Large Complex Thin-Walled Components of Aviation in Machinery Industry, Shanghai 201620, China;  
3. Shanghai Jiao Tong University Sichuan Research Institute, Chengdu 610213, China; 4. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** Based on five-axis integrated additive and subtractive manufacturing technology, the structural optimization and temperature uniformity of the composite mould prepared from short-cut carbon fibers (SCF) and polyamide 6 (PA6) were systematically studied. By integrating fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing and computer numerical control subtractive technology, the bottlenecks of traditional compression or molding injection molding prone to defects and the insufficient manufacturing accuracy of FDM were broken, achieving high-efficiency and high-precision mould manufacturing. By selecting SCF/PA6 composites with SCF mass fraction of 10%, the mould was manufactured using a self-developed large-scale additive and subtractive integrated machine. Through ANSYS, a thermal-fluid-solid coupling simulation was conducted to deeply analyze the temperature field distribution and stress deformation of the mould during the curing process of heat press tank. By comparing the V and N support structures, it is found that the V structure, due to its superior fluid channel design, reduces the maximum temperature difference on the mould surface to 72 K, a 10% decrease from 80 K of the N structure, effectively improving temperature uniformity, although its thermal deformation is slightly higher than that of the N structure. Further, the Taguchi experimental method was used to optimize the key parameters. The results show that the wind speed from the mould to the autoclave inlet has the most significant impact on temperature uniformity. The optimal parameter combination is a wind speed of 3 m/s, a mould surface thickness of 18

**基金项目:** 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0366)

**通信作者:** 茅健, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为碳纤维复材增材制造等

**收稿日期:** 2025-10-21

**引用格式:** 包啟臣, 茅健, 王大志. 增减材制造PA6/CF复合材料模具的结构优化与温度均匀性[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 132-140.

BAO Qichen, MAO Jian, WANG Dazhi. Structural optimization and temperature uniformity of composite mould manufactured by additive and subtractive methods with PA6/CF[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 132-140.

mm, and a distance of 750 mm from the air inlet. This scheme can maximize the temperature uniformity of the mould while keeping the deformation within the allowable range.

**Keywords:** additive-subtractive manufacture ; short-cut carbon fiber ; polyamide 6 ; composite mould ; autoclave ; parameter optimization

复合材料模具作为现代工业制造的核心功能部件,其性能直接影响产品成型精度与生产效率。传统制造工艺多采用模压成型或注塑成型<sup>[1-2]</sup>,前者通过将预设比例的复合材料铺层置于密闭模腔,在温度场与压力场的协同作用下实现材料流动充模、界面融合及三维固化成型;后者则借助螺杆挤出机构实现热塑性材料的完全塑化,经高压注入模腔并冷却定型获取目标构件<sup>[3]</sup>。由于传统制造工艺涉及模具结构设计、制造、原材料特性调控、成型参数优化及注塑机操作等多方面因素,且与加工环境条件、制品冷却时间、后处理工艺密切相关,因此成型制品出现缺陷在所难免<sup>[4]</sup>,这些缺陷严重制约模具的寿命与可靠性。

基于熔融沉积成型(FDM)的增材制造技术虽为复合材料模具快速成型提供了新途径,但其受限于三自由度运动模式,存在打印精度不足、设备尺寸约束及需添加支撑结构等固有缺陷<sup>[5-6]</sup>,难以满足高精度模具制造需求。而基于多自由度五轴联动的增材制造技术因突破上述瓶颈,近年来工业界与学术界纷纷将目光投向于此。基于五轴联动平台集成增材与减材工艺,可实现复杂结构件的增减材混合制造,推动制造技术革新。该技术通过增材制造实现零件近净成形,结合数控铣削保障加工精度与表面质量,并能自由切换增减材加工模式,满足复杂零件制造及修复再制造需求,因此基于该技术制造复合材料模具既可提高效率,减少模具界面缺陷,也能保障模具的加工精度。该技术广泛应用于航空航天、汽车、石油机械等领域<sup>[7-9]</sup>。

目前也有不少学者将熔融沉积与铣削减材相结合,研究增减材复合加工技术。Guo等<sup>[10]</sup>通过干磨削后处理提升FDM 3D打印聚醚醚酮(PEEK)/碳纤维(CF)零件的表面质量,发现打印参数(+45°/-45°栅格角、小层厚)和磨削参数(避免过大切深和进给)是关键,并揭示了“涂抹效应”的积极作用,最终验证了该方法可获得满足要求的高质量表面。Xu等<sup>[11]</sup>通过钻削实验对比发现,相较于碳/聚酰亚胺(PI)复合材料,碳/PEEK具有更高的钻削力和温度、更严重的分层与刀具磨损,整体可加工性较差,但

得益于其延展性,其钻孔表面质量和精度更好;切削参数对两者均有显著影响,且刀具磨损机制差异明显。Liu等<sup>[12]</sup>针对五轴加减混合制造(增材与减材结合)中高精度复杂件的序列规划问题,提出了一种新方法。该方法通过迭代搜索确定打印方向并结合体积分解生成初始制造序列,有效解决了打印方向与加工性耦合的难题;进而在工具可达性约束下,利用贪心算法完成整体序列规划。此方法显著减少了混合制造过程中的工具更换次数,为实现高效制造奠定了基础。Xu等<sup>[13]</sup>提出了一种针对混合增减材制造(HASM)的结构拓扑优化新方法,克服了传统依赖专家设计、缺乏算法支持的局限。该方法能同时优化结构几何形状和制造工艺域,并通过灵敏度分析和案例研究验证了其有效性,特别考察了刀具方向、HASM阶段划分及特定刀具形状的影响。这些学者分别从表面处理、加工性能、工艺规划和结构优化维度,系统推进了复合材料与增减材制造技术的结合应用。

基于此,笔者聚焦短纤维增强复合材料模具的增减材一体化制造技术,系统阐述其结构组成及制造工艺。并研究该技术制造的模具在热压罐中工作的温度均匀性,该研究为短纤维复合材料模具的高效精密制造提供了工艺优化依据。

## 1 设备、原理及材料

### 1.1 设备简介

设计了一台大尺寸增减材一体化制造设备,该设备主要用于非金属材料如:丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚乳酸(PLA)、聚丙烯(PP)、聚碳酸酯(PC)、尼龙6(PA6)等树脂基复合材料(增强材料为CF、玻璃纤维等)的加工,实物图如图1所示。并且工件在不移动条件下,可以完成工件的全工序的加工制造,设备采用具有真空吸附功能的铸铁平台,具有全工作空间的热风循环加热保温功能;并且还具有封闭防尘、除尘、自动排屑、自动换刀等功能。

### 1.2 设备结构

设备主结构采用高架桥式双横梁龙门结构,其工作台固定,仅双横梁移动。长度方向为移动横梁X1、X2,宽度方向为移动拖板Y1、Y2,高度方向移动



图1 增减材一体化制造设备实物图

Fig. 1 Physical image of additive and subtractive integrated manufacturing equipment

滑枕Z1、Z2。双横梁共用X向直线导轨和齿条。其中横梁1为增材梁,配置四轴联动系统(X1/Y1/Z1/E1-E2),双打印头采用气缸驱动切换机构,可支持直径6~12 mm丝材的连续挤出;横梁2为减材加工梁,搭载AC双摆头五轴铣削系统(X2/Y2/Z2/A/C),配备18 kW水冷电主轴,最高转速为24 000 r/min,定位精度可达 $\pm 0.1$  mm。

X轴采用双排四列直线导轨、Y轴采用分别置于滑枕前侧和上侧三根直线导轨、Z轴采用4支直线导轨。Z轴采用高刚性箱体式结构,并经回火处理消除应力,保证Z轴的刚性和多曲面高速加工时的稳定性。

横梁1运动形式及结构预留接口:横梁1的Z1轴提供两个打印头接口,共用Z1轴上下运动,大小打印头在前左布置,小打印头在工作时由气缸推动到工作位置,大打印头工作时,小打印头复位。大小打印头、拍打结构安装位置均符合安装要求。

该设备的传动形式为X(X1/X2)轴采用直线导轨+齿轮齿条的双驱消隙传动,其重复定位精度为 $\pm 0.05$  mm,Y、Z(Y1/Y2,Z1/Z2)采用直线导轨+滚珠丝杠传动,可满足高速高精加工需求。

### 1.3 熔融沉积-铣削加工工艺原理

FDM在零件成形精度与表面质量控制方面存在显著局限,难以直接实现高精度打印;而基于减材制造的数控铣削则在精度与质量调控上表现优异。通过融合两种工艺形成的增减材混合制造技术,既可发挥增材制造周期短、材料利用率高的优势,又能结合铣削加工高精度、高表面质量的特性,从而实现零件高效、高精度、高性能的成形制造。该技术为复杂结构件的高精度加工提供了新路径:在增材制造过程中,通过适时对已打印部分进行铣削加工,可规避刀具碰撞干涉风险。这种动态干预

策略既保障了零件精度,又消除了碰撞隐患,显著提升制造安全性与可靠性。

熔融沉积-铣削复合制造技术是在FDM基础上集成数控铣削的工艺升级。图2展现了增减材一体化制造流程图,其工作原理如下<sup>[14-15]</sup>:

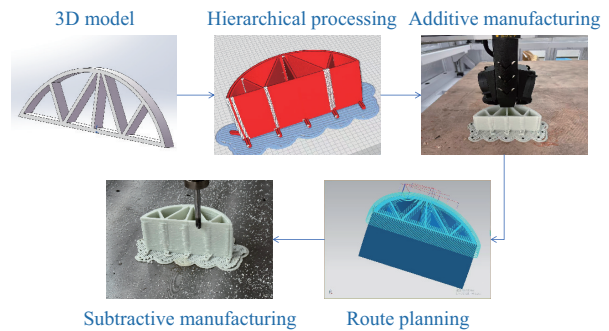


图2 增减材一体化制造流程图

Fig. 2 Flow diagram of additive and subtractive integrated manufacturing

#### 1.3.1 模型预处理

基于三维模型数据输入,系统首先进行特征识别与几何修正,随后对需增材制造的区域进行离散化处理,并通过切片技术将三维轮廓转化为分层二维几何信息。

#### 1.3.2 增材制造阶段

结合轮廓几何信息与增材工艺参数,系统规划材料堆积路径并生成G代码,经可行性验证优化后,控制热源按轨迹运动并同步挤出树脂材料,实现材料逐层堆积成形。

#### 1.3.3 减材精修阶段

基于模具三维轮廓生成数控铣削的G代码,驱动铣刀对已成形表面进行精密加工,直至达到预设尺寸精度与表面质量要求。

### 1.4 PA6/CF复合材料力学性能

表1为不同CF质量分数下PA6/CF复合材料的力学性能。其中CF为日本东丽株式会社的T700SC 12K,其长度为5 mm;PA6粒料为德国巴斯夫有限公司的B3EG7。表1数据显示拉伸强度与拉伸弹性模量随CF含量增加呈先升后降趋势,在CF质量分数为10%左右时达到最大值,分别为213.05 MPa和3.15 GPa,比纯PA6样条相比,分别提高了108.4%和183.8%,而断裂伸长率随CF含量的增加持续降低。这是因为CF作为刚性体承担载荷,PA6作为基体传递载荷,并且CF经硝酸氧化及硅烷偶联剂处理后,显著提升CF/PA6界面黏合力。但是随着CF含量的继续添加会导致分散均匀性变差,引

发团聚现象,而团聚体会诱发应力集中,削弱材料整体力学性能<sup>[16]</sup>。

表1 CF不同质量分数时CF/PA6复合材料的力学性能<sup>[16]</sup>

$\omega/\%$	$R_m/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\delta/\%$
0	102.24±6.24	1.11±0.02	291.58±23.82
2.5	111.51±4.02	1.28±0.25	10.07±0.37
5	130.61±9.11	2.05±0.54	9.64±2.10
7.5	185.36±5.05	2.30±0.28	8.86±0.75
10	213.05±3.50	3.15±0.52	8.51±0.83
15	146.81±6.41	1.71±0.37	6.64±0.37
20	144.05±7.65	1.19±0.16	5.58±0.13

Notes:  $\omega$  is mass fraction of CF;  $R_m$  is tensile strength;  $E$  is tensile modulus;  $\delta$  is elongation at break.

考虑到所需制造的复合材料模具以及设备的特点,选取质量分数为10%的短切碳纤维(SCF)增强材料以及PA6作为基体材料来制备SCF/PA6复合材料,并用该材料通过增减材一体化技术来制造复合材料模具,相关工艺参数见表2。

表2 SCF/PA6复合材料模具制造工艺参数

Parameters	Numerical value
Printing speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	100
Printing temperature/°C	260
Story height/mm	4
Trace width/mm	8
Nozzle diameter/mm	8
Milling cutter diameter/mm	16
Milling cutter speed/(r·min <sup>-1</sup> )	10 000

## 2 复材模具数值模拟

### 2.1 基本方程

在热压罐工作环境中,SCF/PA6复合材料模具内部的气体流动与热交换过程均遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒三大基本物理定律。其中质量守恒的连续性方程见式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: $v_x, v_y, v_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向上的速度分量,单位m/s; $\rho$ 为密度,单位kg/m<sup>3</sup>; $x, y, z$ 为笛卡尔坐标,单位mm; $t$ 为时间,单位s。该方程表示:单位时间内流体微元质量的增加量等于同一时间内净流入该微元的质量。

动量守恒(牛顿运动定律)方程见式(2)。

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \text{div}(\rho v_x V) = \text{div}[\mu_e \cdot \text{grad}(v_x)] + S_x - \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \text{div}(\rho v_y V) = \text{div}[\mu_e \cdot \text{grad}(v_y)] + S_y - \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \text{div}(\rho v_z V) = \text{div}[\mu_e \cdot \text{grad}(v_z)] + S_z - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2)$$

式中: $V$ 为流体速度,单位m/s; $\mu_e$ 为有效黏度,单位Pa·s; $S_x, S_y, S_z$ 为广义源项,单位N/m<sup>3</sup>; $P$ 为流体压力,单位Pa。该方程表示:微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在微元体上的各种力之和。

能量守恒(热力学第一定律)方程见式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T_0) + \text{div}(\rho C_p T_0) = \frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}[K \text{grad}(T_0)] + W^V + E^k + Q_v + \Phi \quad (3)$$

式中: $C_p$ 为比热,单位J/(kg·°C); $T_0$ 为总温度(停滞温度),单位°C; $K$ 为导热系数,单位W/(m·°C); $W^V$ 为黏性功,单位J/m<sup>2</sup>; $Q_v$ 为体积热源,单位W/m<sup>3</sup>; $\Phi$ 为黏性生热项,单位W/m<sup>3</sup>; $E^k$ 为动能,单位J。该方程表示:微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所做的功。

考虑到热压罐中的空气是可压缩流体,故还加上理想气体状态方程,见式(4)。

$$\rho = f(P, T) \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,单位kg/m<sup>3</sup>; $T$ 为流体温度,单位°C。该方程表示:流体的密度随压力和温度的变化而变化。

对于复材模具区域,其能量方程见式(5)。

$$\frac{\partial \rho_s C_s T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j}) + Q_i \quad (5)$$

式中: $\rho_s$ 为固体密度,单位kg/m<sup>3</sup>; $C_s$ 为固体比热,单位J/(kg·°C); $T_s$ 为固体温度,单位°C; $\lambda_s$ 为导热系数,单位W/(m·°C); $Q_i$ 为内部热源项,单位W/m<sup>3</sup>; $x_j$ 为复合材料的空间坐标。

### 2.2 问题描述及简化

图2中三维模型为热压罐成型工艺的典型框架式模具,尺寸为1 000 mm×500 mm×350 mm,在航空航天制造业中,通常用于制造复杂的大型结构件,如飞机蒙皮等。模具材料为SCF/PA6,其为热塑性材料,而构件为热固性材料。二者均为树脂基复合材料,具有相似的热膨胀系数,因此在设计阶段可忽略模具受热膨胀对复材制件的影响。并且该框架式模具还需满足以下性能要求:在构件成型温度与压力工况下长期使用不变形,并保持良好的气密性。其结构通常由顶部型面与底部支撑框格组成,

该结构既能保证模具的刚度与强度,也能起到高效的传热作用。

由于成型过程中预成型体直接接触模具表面,模具性能将直接影响固化后复合材料构件的质量与尺寸精度。对于大尺寸模具,固化时易出现型面温度场分布不均,导致固化不均匀,进而诱发构件内应力。

因此通过有限元仿真软件对复材模具的温度场均布分析是非常有必要的。通过修改模具的型面厚度、热压罐的进口风速、模具的结构来分析模具的温度场、应力变形等性质,从而得到最佳的优化参数。

考虑到问题比较复杂,在进行有限元仿真前需要简化模型,在保证计算结果误差较小的情况下以减少仿真的时间。将热压罐简化成一个尺寸为 $\varnothing 1.5\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的圆柱体,罐内流体为空气,模具材料和空气的热性能见表3,研究复合材料模具在热压罐中随温度变化的温度场分布及应力应变。

表3 材料性能参数

Tab. 3 Properties parameters of materials

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Air	1.237	1 006.43	0.024 2
SCF/PA6	1 200	1 560	0.7

Notes:  $\rho$  is density;  $C$  is specific heat;  $\lambda$  is heat conductivity coefficient.

同时,工艺曲线的设定同样是影响框架式模具型面温度的关键因素。鉴于本文核心研究目标在于探究模具结构参数对温度场的影响,为节省计算资源并便于结果分析,本研究将固化工艺曲线简化为单次升温、保温及降温过程的简化模型。如图3所示,升温速率(1/30 K/s)、降温速率(1/40 K/s)恒定,固化过程总时间 14 400 s。根据该图像在 Visual Studio 中编写温度时间变化的 C 语言程序,导入 UDF 中并在进口温度模块调用。

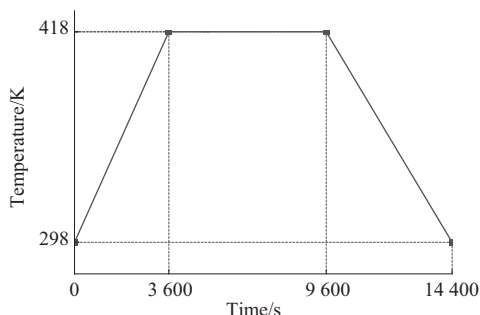


图3 复材模具工作工艺曲线

Fig. 3 Composite mould working process curve

图4为在 fluent 软件中网格划分的一般步骤,先给简化的模型生成面网格,其中最小单元为 2.9 mm,最大单元为 75 mm,生成的面网格数量为 71 475 个。接着分别设置进口和出口并进行封堵,然后抽取流体运动区域,最后生成体网格。其中节点数共 1 441 604 个,面网格 1 717 610 个,体网格 282 394 个。在进行模具温度场的空间网格划分时,需特别关注流体-固体界面处的边界层处理。由于边界层内流体在极小厚度范围内朝法向方向剧烈变化,采用六面体网格时应重点加密界面邻近的流体域网格。该区域的网格分辨率直接决定温度场模拟精度。一般沿界面法向方向,在流体域侧采用渐进式加密策略,逐步提高接触面附近的网格密度。如图5所示,固体与流体交界处,网格明显由密变疏,这可以使后续仿真结果更可靠。

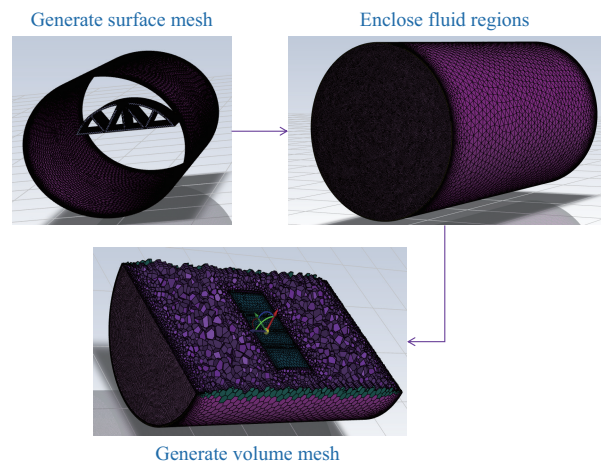


图4 网格划分

Fig. 4 Division of mesh

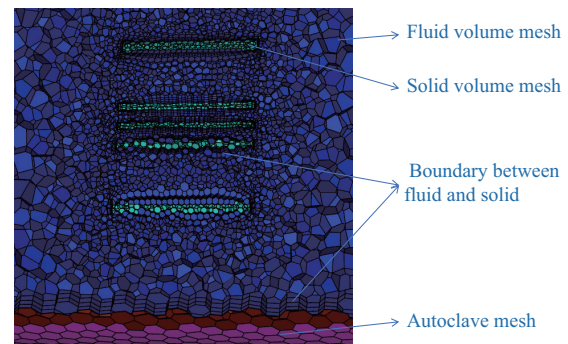


图5 关键网格划分

Fig. 5 Division of key mesh

### 2.3 参数设置

热压罐内模具的升温方式主要是强制热对流,因此需要先分析罐中流体的流动类型。流体的流动类型分为层流和湍流,一般用雷诺数  $R_e$  的大小来

判断流体的流动类型<sup>[17]</sup>。

(1)当  $R_e \leq 2\ 300$  时,管内流体流动状态一定为层流;

(2)当  $2\ 300 < R_e < 8\ 000$  时,罐内流体流动状态处于层流与湍流的过渡态;

(3)当  $R_e \geq 8\ 000$  时,管内流体流动状态一定为湍流。

雷诺数  $R_e$  的计算公式见式(6)。

$$R_e = \frac{\rho ul}{\mu} \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$ 为流体的速度,单位  $\text{m}/\text{s}$ ;  $l$ 为热压罐的宽度,单位  $\text{m}$ ;  $\mu$ 为流体的动力黏度,单位  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。该参数广泛应用于判断流动是层流或湍流:当  $R_e$  较小时,黏性力占优,流动平稳;当  $R_e$  较大时,惯性力主导,易形成湍流。

本文使用的加热流体为空气,密度为  $1.237\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,流体流速分别为  $1、1.5、2、3、4\ \text{m}/\text{s}$ ,热压罐直径为  $1.5\ \text{m}$ ,空气的动力黏度为  $1.79 \times 10^{-5}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 。代入式(6),可得式(7)。

$$R_e = \frac{\rho ul}{\mu} = \frac{1.237 \times 1 \times 1.5}{1.79 \times 10^{-5}} \approx 103\ 659 > 12\ 000 \quad (7)$$

$R_e$ 随流速增加而增加,故只需要计算最小流速,根据计算结果表明,空气在罐内流动的类型为湍流。

因此,由上所述,设置相关边界条件。

(1)设置模型的一端面为速度进口,其速度值分别为  $1、1.5、2、3、4\ \text{m}/\text{s}$ ,同时调用上文进口气体温度随时间变化的UDF,即图3复材模具工作工艺曲线。

(2)设置模型的另一端面为压力出口,模拟模具在热压罐中热空气从进口到出口对模具温度的影响。

(3)设置热压罐模型的壁面为Wall,减少壁面对仿真结果的影响。

### 3 结论与分析

#### 3.1 模具结构对温度场分布的影响

为提升框架式成型模具的型面结构强度、减轻支撑晶格质量并改善模具底部流体流动性,避免其在铺贴与加压固化过程中产生过大变形,本研究针对V型与N型复合材料支撑晶格(结构见图6)对模具型面温度分布均匀性的影响进行了分析。其中V型结构模具体积约为  $3.51 \times 10^7\ \text{mm}^3$ ,N型结构模具体积约为  $3.86 \times 10^7\ \text{mm}^3$ ,因此在增减材制造过程中,N型较V型需多使用约10%的材料。

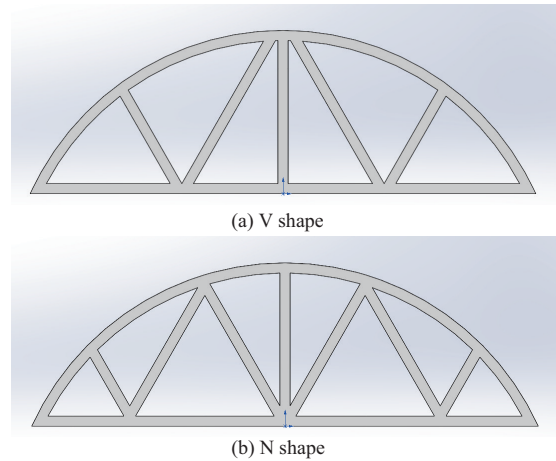


图6 V型和N型模具结构

Fig. 6 V shape and N shape mould structures

图7展现了不同类型支撑晶格条件下模具型面温度分布和等效应力-应变分布云图。不同类型的支撑晶格条件下模具型面的最大温差、温度方差( $\sigma^2$ )、型面最大变形量及最大受力量见表4。

由图7和表4可知,在同等工况下,V型模具的温差较N型更低,因为V型结构支撑更少,其通风面积更大,底部空气流道空间也更大,使得模具型面散热更快,温度也更均匀。但相应地,V型模具因为支撑结构不如N型,其等效应变大于N型,受到的等效应力也大于N型。由图7可知,V型、N型结构模具受到的较大的等效应力及变形都位于支撑与型面相连部位,在使用过程中,应力过于集中,会影响模具的寿命,不利于制件的成型,相比之下,V型只有3处支撑与型面连接,少于N型的5处,而且两者在该工况下产生的等效应变分别为  $0.01\ \text{mm}$  和  $0.005\ \text{mm}$ ,产生的变形微乎其微,等效应力分别为  $32.573\ \text{MPa}$  和  $15.414\ \text{MPa}$ ,受到的等效应力也远小于自身所能承受的应力。因此,在保证模具强度的前提下,同步提升模具使用寿命与制件成型质量,优先选用V型结构复合材料模具。同时,可基于田口法对进口风速、型面厚度及距进风口距离等关键参数进行优化,以有效降低模具型面最大温差,提升温度均匀性。

#### 3.2 其他因素对温度场分布的影响

为探究其他因素对于复材模具温度场分布的影响,考虑到因素种类较多,且各种因素的参数选取也较多,本文采取田口法探究其他因素对温度场分布的影响。在田口法中,信噪比被用作衡量产品质量特性的重要标准。根据评价指标的特性,信噪比被细分为三种类型:首先是望目特性信噪比,它

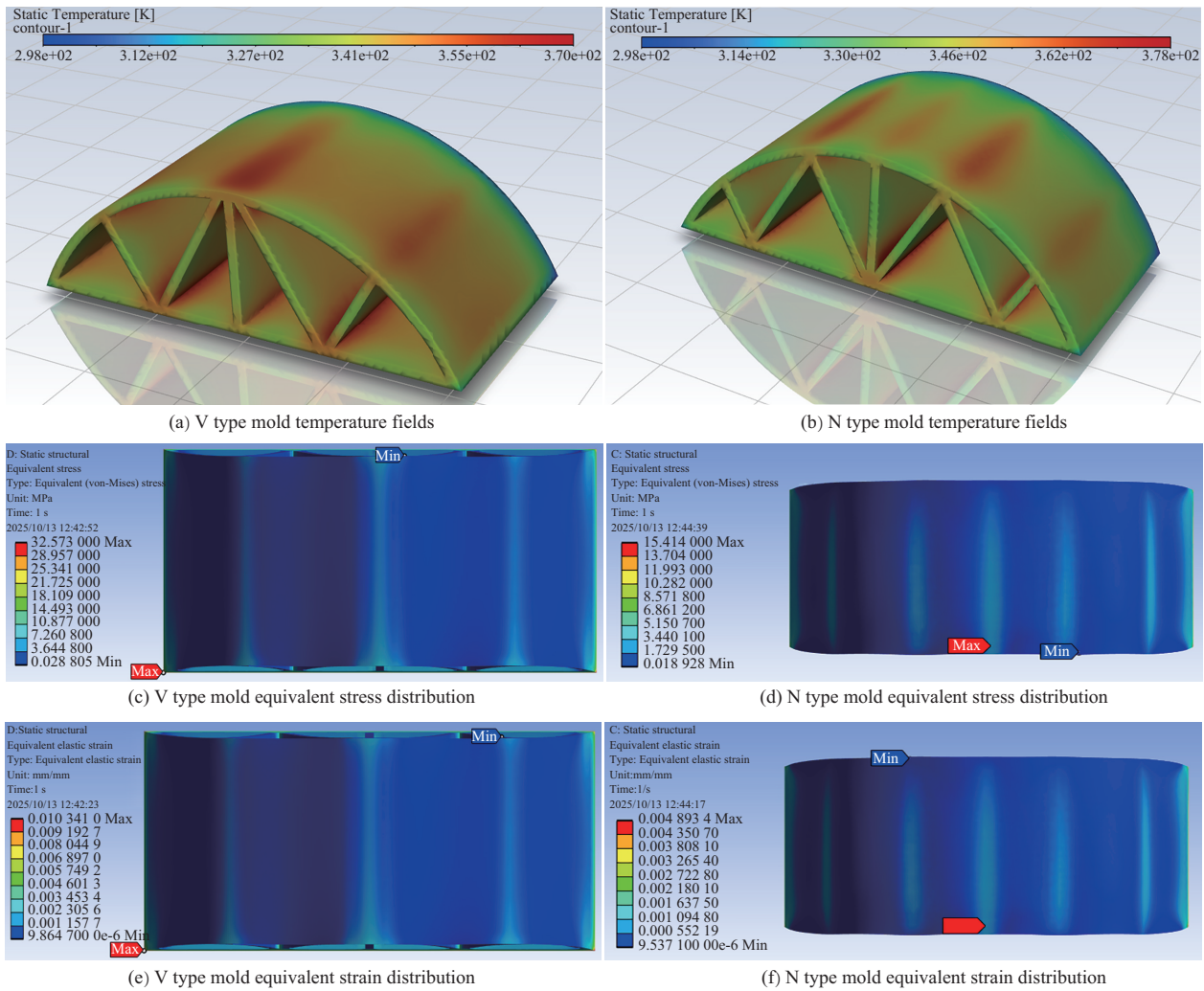


图7 V型和N型模具温度场及等效应力-应变分布

Fig. 7 V type and N type mould temperature fields, equivalent stress-strain distribution

表4 V型和N型模具相关参数

Tab. 4 Parameters related to V type and N type moulds

Supporting lattice	$\Delta T/K$	$\sigma^2$	$\epsilon_e/mm$	$\sigma_e/MPa$
V type	72	124.95	0.01	32.573
N type	80	67.85	0.005	15.414

Notes:  $\Delta T$  is the maximum temperature difference;  $\sigma^2$  is temperature variance;  $\epsilon_e$  is equivalent strain;  $\sigma_e$  is equivalent stress.

强调评价指标越接近设定的目标值,其质量表现越优;其次是望小特性信噪比,这种类型中,评价指标的值越小,代表产品质量越高;最后是望大特性信噪比,意味着评价指标的值越大,产品质量表现越出色<sup>[18]</sup>。

田口玄一博士由损失函数引出信号噪声比( $S/N$ ),其定义为: $S/N=信号能量/噪声能量$ <sup>[19]</sup>。从定义看出, $S/N$ 的大小表示了模具在热压罐实验过程中,模具温度场受噪声因素干扰的程度。因此, $S/N$ 值越大,模具温度场受噪声因素干扰越小,模具的温

度分布就越好。本文是通过对模具相关参数的优化,得到最小的温度方差,确保模具型面温度的均匀性。因此,本文用的指标特性为望小特征。望小特征的 $S/N$ 的计算公式见式(8)。

$$S/N = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (8)$$

式中: $y_i$ 为某因素组合的试验值; $n$ 为该因素组合的试验次数。

设计正交实验,进口风速(因素A)、型面厚度(因素B)和距进风口距离(因素C)每种取三个水平,选用三因素三水平的正交表 $L_9(3^3)$ 进行九次实验,见表5。评价指标为温度方差,温度方差反映了模具温度场的变化情况,温度方差越低说明模具内部温度更均匀,能有效减少模具因温度不均导致加工的构件产生相应的缺陷。

表6为工艺参数正交实验表。由表6可知,利

表5 因素水平表  
Tab. 5 Factor level table

Level	Factor		
	$A/(m \cdot s^{-1})$	$B/mm$	$C/mm$
1	1	18	750
2	2	20	1 250
3	3	22	1 750

表6 工艺参数正交实验表

Tab. 6 Orthogonal experimental table for process parameters

No.	$A/(m \cdot s^{-1})$	$B/mm$	$C/mm$	$\sigma^2$	$S/N$
1	1	18	750	144.30	-43.18
2	1	20	1 250	206.78	-46.31
3	1	22	1 750	276.30	-48.83
4	2	18	1 250	26.26	-28.39
5	2	20	1 750	76.92	-37.72
6	2	22	750	103.32	-40.28
7	3	18	1 750	6.64	-16.45
8	3	20	750	26.76	-28.55
9	3	22	1 250	41.63	-32.39

用所求得的实验数据,根据公式(7)计算出相应的信噪比,可初步看出当进口风速为3 m/s,型面厚度为18 mm,距进风口距离为1 750 mm时,模具的温度方差最小,意味着在该工艺下模具经过升温、保温、降温后温度更均匀。

在表6的基础上整理出三个因素的温度方差( $\sigma^2$ )极差表(见表7)和信噪比极差表(见表8)。

表7 温度方差极差表

Tab. 7 Temperature variance range table

Level	$A$	$B$	$C$
1	209.13	59.07	91.46
2	68.83	103.49	91.56
3	25.01	140.42	119.96
Delta	184.12	81.35	28.49
Rank	1	2	3

表8 信噪比极差表

Tab. 8 Signal-to-noise ratio range table

Level	$A$	$B$	$C$
1	-46.11	-29.34	-37.34
2	-35.46	-37.53	-35.70
3	-25.80	-40.50	-34.33
Delta	20.31	11.16	3.01
Rank	1	2	3

在表7和表8的基础上绘制出温度方差的因素-效果图和信噪比的因素-效果图,分别如图8和图9所示。

由图8、图9、表6至表8可知,最佳参数组合为A3B1C1,即当进口风速为3 m/s,型面厚度为18 mm,距进风口的距离为750 mm时,此时模具的温度均匀性最好。因为当进口风速越大,热压罐中流体的

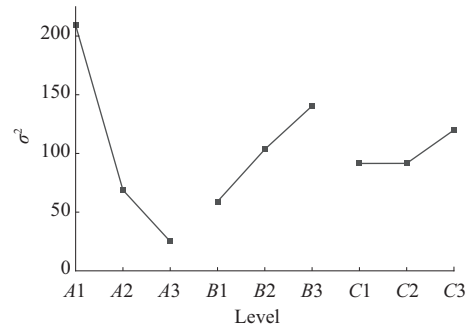


图8 温度方差的因素-效果图

Fig. 8 Cause-effect diagram of temperature variance

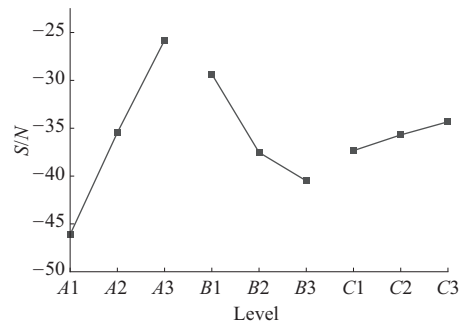


图9 信噪比因素-效果图

Fig. 9 Cause-effect diagram of  $S/N$

流速也更大,更容易带走模具的热量;并且模具的型面厚度越小,其散热性越好,这是因为 SCF/PA6 复合材料热导率远低于金属,其内部的热量难以被热压罐中的空气带走,故型面厚度越小其内部热量堆积也更少;同样地,模具距进口的距离越近,其受到的风速也更大,流体流动带走的热量也就更多。但是,增加进口风速、减小型面厚度、减小模具距进风口的距离都会导致模具受到的力增加。因此,在考虑模具强度足够的情况下,尽可能优化相关参数,可使模具温度的均匀性更好,能生产出更好的制品。

#### 4 结论

(1)基于五轴联动增减材制造技术制造出 SCF/PA6 复合材料模具,该方法可提升模具制造效率、界面质量及尺寸精度。

(2)通过 ANSYS 进行仿真分析,探究出模具内部结构 V 型支撑较 N 型通风更优、温差更小。其次,通过田口法探究出进口风速对模具温度均匀性影响最为显著;增大进口风速、减小模具型面厚度、缩短模具距进风口距离可优化模具的温度场分布。

(3)在后续研究中,将系统开展实验验证工作:通过仿真模拟与分段实验相结合的方式,持续探究关键参数对模具温度场分布的影响机制;同时,应

拓展研究维度,考察更多影响温度均匀性的潜在因素。在此基础上,可进一步开展多参数协同优化,在确保模具结构强度的前提下,探究最佳工艺参数组合以提升温度场均匀性。

#### 参考文献

- [1] 胡恩源,张学文,陈俊,等. 热塑性聚氨酯模压成型工艺优化[J]. 工程塑料应用,2022,50(4):70-75.  
HU Enyuan, ZHANG Xuewen, CHEN Jun, et al. Optimization of thermoplastic polyurethane compression molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):70-75.
- [2] 王先衬,张娟娟,魏海旭,等. 自然老化对CF/PA66复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2025,53(1):125-132.  
WANG Xianchen, ZHANG Juanjuan, WEI Haixu, et al. Effect of natural aging on mechanical properties of CF/PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1):125-132.
- [3] 高利珍,贾志欣,刘立君,等. 复合材料热压-注塑一体成型技术综述[J]. 塑料,2024,53(4):67-72,89.  
GAO Lizhen, JIA Zhixin, LIU Lijun, et al. Review of composite hot-pressing-injection molding technology[J]. Plastics, 2024, 53(4):67-72, 89.
- [4] 刘朝福. 先进注塑成型工艺及产品缺陷解析[M]. 北京:化学工业出版社,2022.  
LIU Chaofu. Advanced injection molding process and analysis of product defects[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2022.
- [5] 关博文,张代军,王成博,等. 基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术研究进展[J]. 复合材料科学与工程,2025(11):145-152.  
GUAN Bowen, ZHANG Daijun, WANG Chengbo, et al. Research progress on 3D printing technology of continuous fiber reinforced composites based on FDM[J]. Composites Science and Engineering, 2025(11):145-152.
- [6] 储浩,苏永生,刘剑,等. 基于FDM的3D打印连续纤维增强树脂基复合材料力学性能研究进展[J]. 复合材料学报,2025,42(9):4 903-4 927.  
CHU Hao, SU Yongsheng, LIU Jian, et al. Research progress on mechanical properties of continuous fiber reinforced polymer composites manufactured by FDM 3D printing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9):4 903-4 927.
- [7] 胡凯翔. 五轴联动增减材混合加工序列规划方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.  
HU Kaixiang. Research on sequence planning method of five-axis linkage material adding and reducing hybrid machining[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [8] 洪福,田印仟,卫洋,等. 五轴增减材复合制造设备设计[J]. 自动化与信息工程,2023,44(3):40-45.  
HONG Fu, TIAN Yinqian, WEI Yang, et al. Design of five axis additive-subtractive hybrid manufacturing equipment[J]. Automation & Information Engineering, 2023, 44(3):40-45.
- [9] LI L, HAGHIGHI A, YANG Y R. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33:150-160.
- [10] GUO C, LIU X H, LIU G. Surface finishing of FDM-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling[J]. Polymers, 2021, 13(13). DOI: 10.3390/polym13132175.
- [11] XU J Y, HUANG X H, DAVIM J P, et al. On the machining behavior of carbon fiber reinforced polyimide and PEEK thermoplastic composites[J]. Polymer Composites, 2020, 41(9): 3 649-3 663.
- [12] LIU C Q, LI Y G, JIANG S, et al. A sequence planning method for five-axis hybrid manufacturing of complex structural parts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 234(3):421-430.
- [13] XU S Z, LIU J K, YAJI K, et al. Topology optimization for hybrid additive-subtractive manufacturing incorporating dynamic process planning[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 431. DOI:10.1016/j.cma.2024.117270.
- [14] 刘彪强,李旭鹏,钱波,等. 增减材复合加工工艺研究进展[J]. 工具技术,2025,59(1):1-14.  
LIU Biaoqiang, LI Xupeng, QIAN Bo, et al. Research progress on composite processing of additive and subtractive manufacturing [J]. Tool Engineering, 2025, 59(1):1-14.
- [15] PRANIEWICZ M, KURFESS T, SALDANA C. Adaptive geometry transformation and repair for hybrid manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26:228-236.
- [16] 田银彩,胡凌霄. 聚酰胺6/短切碳纤维复合材料制备及力学性能[J]. 工程塑料应用,2022,50(10):30-35.  
TIAN Yincui, HU Lingxiao. Preparation and mechanical properties of polyamide 6/short carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):30-35.
- [17] 方伟. 热塑性复合材料模具3D打印成型技术及性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.  
FANG Wei. Research on 3D printing technology and properties of thermoplastic composite mold[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2022.
- [18] 黄可,邹华杰,许喆,等. 新能源汽车用防擦条翘曲量田口试验及验证[J]. 工程塑料应用,2025,53(3):127-132,159.  
HUANG Ke, ZOU Huajie, XU Zhe, et al. Taguchi test and verification of warpage of anti-scratch strip for new energy vehicles[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3):127-132, 159.
- [19] 文周,薛美贵,王旭红. 基于田口试验法的熔融沉积成型PLA制品工艺优化[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):58-62.  
WEN Zhou, XUE Meigui, WANG Xuhong. Optimization of PLA product process by melt deposition based on taguchi test[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):58-62.