

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.013

## 复合材料构件热压罐成型模具温度均匀性分析

花蕾蕾 安鲁陵 匡海华 鲍益东 赵一鸣

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

**摘要:**热压罐固化中成型模具的温度分布对复合材料固化质量有显著影响,提高与构件直接接触的模具型面温度均匀性有利于改善内部温度梯度,减小固化变形,提高成型精度。本文以复合材料构件热压罐框架式成型模具为对象,应用有限元方法,分析模具温度的分布,研究模具支撑结构对型板表面温度均匀性的影响。研究表明,支撑板厚度越薄,温度均匀性越好,与进气风口平行方向的支撑板对温度均匀性的影响更为显著,因此可优先考虑增加与进气风口垂直方向支撑板厚度来增加模具刚度。在保持面积不变的前提下,改变散热孔的形状,发现菱形与圆形散热孔具有较强的抗变形能力,而方形散热孔使得型板表面温度分布更加均匀。通过控制散热孔的布局改变风道时,发现T型风道对于改善温度均匀性的效果最佳。

**关键词:**复合材料;温度场;热压罐;模具

**中图分类号:**TG501.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2019)03-0357-09

### Analysis of Temperature Field Uniformity of Composite Mold in Autoclave

HUA Leilei, AN Luling, KUANG Haihua, BAO Yidong, ZHAO Yiming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:**In the autoclave curing, the temperature distribution of the molding die has a significant effect on the curing quality of the composite. Increasing the temperature uniformity of the mold profile in direct contact with the component is beneficial to improve the internal temperature gradient, reduce the curing deformation, and improve the molding precision. Taking the composite component frame of the autoclave frame as the object, the finite element method is applied to analyze the distribution of the mold temperature, and the influence of the mold support structure on the surface temperature uniformity of the form is studied. Studies have shown that the thinner the thickness of the support plate, the better the temperature uniformity, and the influence of the support plate which is parallel to on the inlet air vent on the temperature uniformity is more significant. Therefore, it is preferred to increase the thickness of the support plate in the vertical direction of the inlet vent to increase die stiffness. Under the premise of keeping the area constant, the shape of the heat dissipation hole is changed, and it is found that the diamond shape and the circular heat dissipation hole have strong deformation resistance, and the square heat dissipation hole makes the surface temperature distribution of the template more uniform. When the airduct is changed by controlling the layout of the heat dissipation holes, it is found that the T-shaped air passage is the best for improving the temperature uniformity.

**Key words:** composite material; temperature field; autoclave; mold

**基金项目:**研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20180506)资助项目;航空科学基金(20161852018)资助项目。

**收稿日期:**2019-02-27;**修订日期:**2019-05-20

**通信作者:**安鲁陵,男,教授,博士生导师,E-mail:anllme@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**花蕾蕾,安鲁陵,匡海华,等.复合材料构件热压罐成型模具温度均匀性分析[J].南京航空航天大学学报,2019,51(3):357-365. HUA Leilei, AN Luling, KUANG Haihua, et al. Analysis of Temperature Field Uniformity of Composite Mold in Autoclave[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 357-365.

随着复合材料在航空航天领域的用量占比逐渐增加,已成为与钛合金、铝合金、合金钢并驾齐驱的四大航空结构材料之一<sup>[1]</sup>。而热压罐成型技术依旧是现阶段制造复合材料构件的主要方法<sup>[2]</sup>,成型面的温度场分布是影响构件成型质量的重要因素。研究表明,成型过程中温度场的分布不均匀将会导致复合材料固化后产生残余应力,导致材料力学性能降低,材料受到损坏,最终影响构件成型质量<sup>[3]</sup>。成型模具一般为金属模具,具有良好的热传导性,成型模具对复合材料构件温度场的影响远远大于辅助材料对构件温度场的影响<sup>[4]</sup>。因此,成型模具在复合材料固化成型中具有重要影响,研究与复合材料构件直接接触的成型模具型板表面温度均匀性对最终成型质量至关重要。

国内外学者针对改善型面温度均匀性及模具结构优化进行了研究。改善成型面温度均匀性一般有两种途径:(1)从工艺出发,通过改善工艺环境因素,如风速、升温/降温速率以及摆放位置等;(2)从模具本身结构出发,如加筋及型板厚度、模具横/纵向宽度以及通风孔的尺寸大小等。Gniatczyk等<sup>[5]</sup>论证了框架式模具其底部“鸡蛋格子”的支撑结构不仅可以减重同时提高了模具的导热性,有效改善了成型模具表面温度均匀性。Park等<sup>[6]</sup>对复合材料构件固化过程进行仿真分析,计算出了任一节点的温度及其固化度。国内的岳广全等<sup>[7]</sup>介绍了分析了模具的热传导性能、膨胀系数及模具结构对残余应力及变形的影响。张旭生等<sup>[8]</sup>应用Fluent软件对热压罐及其模具进行仿真分析,通过改变风道,分别研究了一字形、十字形和T字形等3种不同的风道对温度均匀性的影响。赵一鸣等<sup>[9]</sup>根据热阻与材料厚度成正比,通过改变成型模具的型板厚度,采用非均匀型板来改善模具表面的温度均匀性。

本文将以前述框架式模具为例。本文采用有限元方法模拟复合材料构件热压罐成型模具温度的分布情况,分析了支撑板厚度及散热孔形状对温度均匀性的影响。在此基础上,提出了改变支撑板厚度及散热孔形状的思路与具体方法,以改善热压罐内模具周围流场及表面温度分布均匀性。

## 1 数值模拟分析

### 1.1 基本方程

复合材料在热压罐固化成型过程中往往伴随着复杂的热量交换和化学反应<sup>[10]</sup>,其中模具型面温度分布的均匀性在成型过程中起到非常关键的作用。热压罐内主要包括的换热方式为热对流和热传导。物体在高温情况下常伴随热辐射现象,而热压罐成型期间罐内温度一般低于200℃,因此不予

考虑。成型模具置于热压罐中,其成型面在风力驱动下与流体的传热方式为热对流换热;而模具型面与构件直接接触,通过热传导直接传递热量,复合材料构件不直接与罐内空气接触。为了模拟模具换热和传热的影响因素,用流体流动与热交换中的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程作为模拟的基本控制方程构建模拟方法。

#### (1) 流体对流换热

根据连续介质假设,3个基本方程的微分形式为质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

动量守恒(牛顿运动定律)方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \text{div}(\eta \cdot \text{grad}(u)) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = \text{div}(\eta \cdot \text{grad}(v)) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = \text{div}(\eta \cdot \text{grad}(w)) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

能量守恒(热力学第一定律)方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial t} = -\rho \text{div}(U) + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + S_h + \phi \quad (5)$$

理想气体状态方程

$$\rho = f(p, T)$$

式中: $S_u, S_v, S_w$ 为动量方程的广义源项; $h$ 与流体压强和流体温度有关, $h = h(p, T)$ ; $\rho$ 为流体密度; $T$ 为流体温度; $U$ 为流体速度; $\eta$ 为流体的动力黏度; $S_h$ 为流体的内热源; $p$ 为流体压力; $\lambda$ 是流体的导热系数; $\phi$ 为耗散函数。

#### (2) 模具固体换热区

模具型面与框架支撑结构之间的传热为热传导,则

$$\frac{\partial \rho_s c_s T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j}) + Q_T \quad (6)$$

式中: $\rho_s$ 为密度, $c_s$ 为比热容, $T_s$ 为温度, $Q_T$ 为热源项。

### 1.2 几何模型与网格划分

图1所示为热压罐常见框架式模具。支撑结构多采用“鸡蛋格子”的形状,一方面节省材料减轻质量,另一方面促进底部流体空气流动。本文模拟所用的框架式模具规格为1500 mm×1500 mm×400 mm,材料为普通碳素钢;热压罐内流通气体为空气。模具和空气的热性能如表1所示。图2为

复合材料成型模具和热压罐的简化模型。为了使得 CAD 模型能够在 Fluent 里进行仿真分析,需要对当前简化后的模型进行网格划分。本文所分析的模型为框架式模型,形状简单,因此采用结构网格对其进行划分,得到约 15 万个结构化网格。

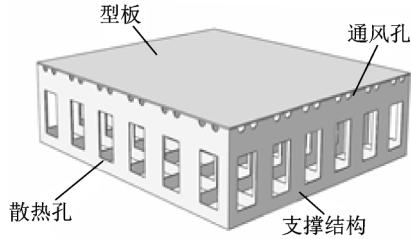


图 1 框架式模具

Fig.1 Frame type mold

表 1 材料的热性能

Tab.1 Thermal properties of materials

材料	密度 $\rho /$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比热容 $c /$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	导热系数 / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Q235	7 850	502	10
空气	1. 237	1 006.43	0.024 2

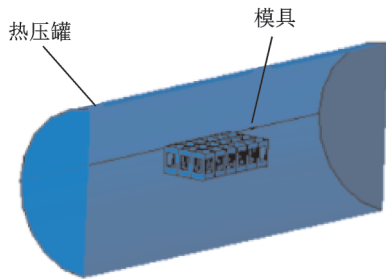


图 2 框架式模具和热压罐简化模型

Fig.2 Frame mold and autoclave simplified model

### 1.3 边界条件与计算参数

将上一步做的热压罐及模具的网格格式文件导入 Fluent 计算。本文使用的热压罐尺寸为  $\phi 2.5 \times 7 \text{ m}$ , 加热气体为空气, 密度为  $1.237 \text{ kg/m}^3$ , 流速为  $1.5 \text{ m/s}$ , 空气的动力粘度为  $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

$$Re = \frac{1.237 \times 1.5 \times 2.5}{1.79 \times 10^{-5}} \approx 259\,148 \geq 12\,000$$

一般来说通过雷诺数  $Re$  判断  $Re \geq 8\,000 \sim 12\,000$ , 流体流动状为湍流, Fluent 计算模型选择标准  $k-\epsilon$  模型。

根据热压罐的操作工艺设定边界条件如下:

(1) 将热压罐进风端口设为速度入口 (Velocity-inlet), 根据经验将其流速设定为  $1.5 \text{ m/s}$ , 同时根据文献[3]设置入口的温度变化, 简化工艺曲线如图 3 所示。由于 Fluent 无法直接设置温度随时间变化, 需要通过编写子程序 UDF (Users-Defined

Function) 实现。在 Visual Studio 中编写温度曲线的 C 语言程序, 通过 Fluent 中 User-defined 导入子程序, 最后在入口端的边界条件 Thermal 模块中引用。

(2) 模型另一端为压力出口边界条件 (Pressure-outlet), 指定压力为静压。

(3) 热压罐的壁面设置为 Wall。

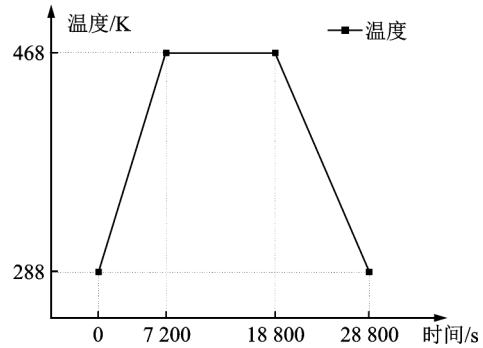


图 3 简化工艺曲线

Fig.3 Simplified cured temperature curve

### 1.4 模具传热分析模型验证

在相同条件下, 根据文献[3]提供的试验数据, 与本文仿真模型模拟数据进行精度对比验证。试验中在型面表面设置 25 个温度监测点, 具体分布如图 4 所示。采集点每隔 600 s 进行温度采集, 直至升温过程结束。框架式模具在升温阶段结束后仿真温度分布云图如图 5 所示。

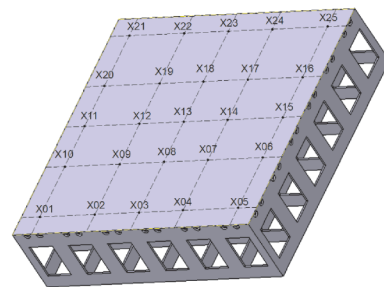


图 4 框架式模具热电偶监测点位置分布

Fig.4 Frame mold thermocouple monitoring point position distribution

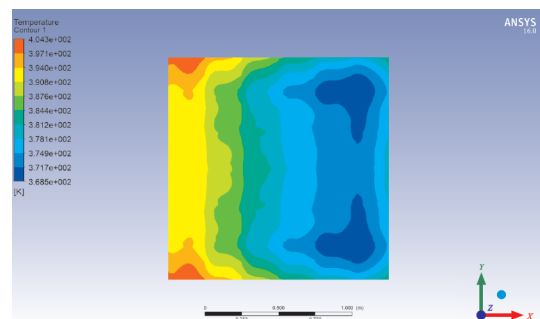


图 5 框架式模具在  $t=7\,200 \text{ s}$  时温度分布

Fig.5 Temperature distribution of frame mold at  $t=7\,200 \text{ s}$

本文分别考虑与热压罐风向平行与垂直方向,选取斜对角线上X01,X09,X13,X17,X25五个点,其监测点热电偶试验温度与仿真模拟数据分别如表2<sup>[9]</sup>和表3所示。

表2 监测点热电偶试验温度

Tab.2 Thermocouple test temperature of monitoring point

时间/s	600	1 200	1 800	2 400	3 000	3 600	4 200
X01	302.1	311.6	324.5	337.7	351	364.6	379
X09	295.1	301.3	311.9	324.2	336.9	350.9	365
X13	299.8	307.6	317.9	329.8	342.3	355.3	369.1
X17	298.4	307.9	319.7	332.2	344.6	357.8	370.9
X25	299	309	321	336	350	362	376

表3 仿真模拟数据温度

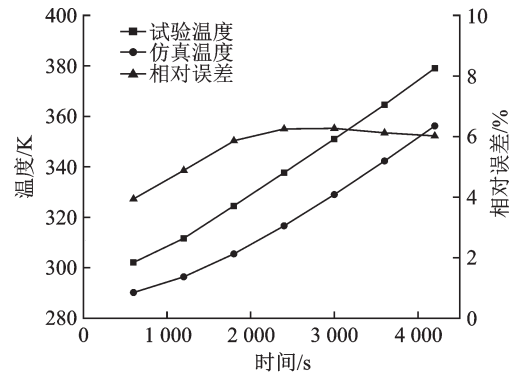
Tab.3 Simulation analog data temperature

时间/s	600	1 200	1 800	2 400	3 000	3 600	4 200
X01	290.3	296.4	305.5	316.7	329	342.3	356.3
X09	290	295.8	304.8	315.4	327.7	340.8	354.4
X13	289.8	295.5	303.9	315.8	325.9	338.6	352.2
X17	289.8	295.8	302.8	312.5	323.9	336.5	349.6
X25	290.2	296.2	305	315.7	327.9	340.8	354.4

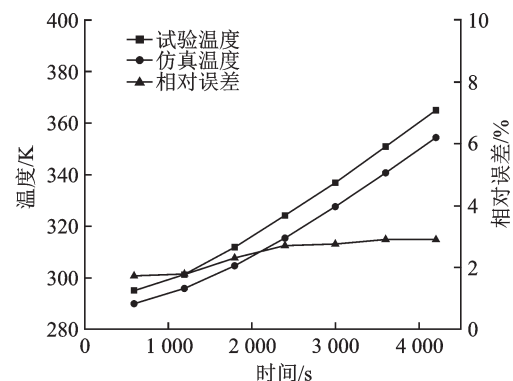
本文选取最大误差和最小误差的两个采集点绘制点线图对比如图6所示,试验中监测点温度与仿真数据误差对比可知,两者最大相对误差为6.34%,平均误差为4.53%。总体上,仿真结果与试验测量温度误差均小于10%,吻合性良好,因此上述建立的成型模具热压罐内温度场数值模拟方法可以较好地模拟模具成型过程中温度场的分布情况,说明了数值模拟方法的准确性。

## 2 支撑结构对型板温度均匀性的影响

框架式成型模具由型板面及型板下方支撑结构所组成,其中型板面在热压罐成型工艺过程中直接与复合材料构件及辅助材料接触。支撑结构主要用于保持型面形状稳定,避免产生较大变形。框架式支撑结构如图7所示,主要包括:通风孔、散热孔、U/V向支撑板。通风孔置于支撑板上端与型板连接处,用于增强型板下表面处空气的流通;散热孔形状常为方形孔,主要用于提高空气的流通及减重;U/V向支撑板如图所示为两个方向的支撑板,其中U向方向与进气风口方向垂直,V向与进气风口方向平行。因此为了改善型板表面的温度



(a) Data comparison of maximum error collection points



(b) Data comparison of minimum error collection points

图6 监测点温度与仿真数据对比

Fig.6 Monitoring point temperature and simulation data comparison

均匀性,从支撑结构的主要特征出发,通过分别改变散热孔形状、支撑板厚度等研究不同结构因素对型板表面温度均匀性的影响。本文在仿真后处理中从型板表面提取5万个均匀分布的节点温度,计算所有节点中最大温差及所有节点温度方差评价温度均匀性。

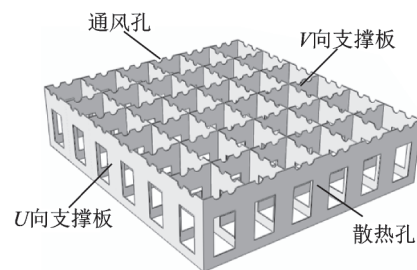


图7 框架式成型模具支撑结构

Fig.7 Frame molding die support structure

在研究型板温度均匀性时,需满足模具刚度要求。文献[11]中研究表明框架式成型模具在起吊时会产生最大变形,因此本文在考虑温度均匀性同时对模具进行3倍重力起吊仿真变形预测,根据企业要求,规范要求最大变形量必须小于0.5 mm,因此本文将以此要求作为约束条件。

### 2.1 有无支撑模具对比

为了研究支撑结构对型板表面温度均匀性的

影响,本文分别对有无支撑板的型板进行了有限元仿真,结果如图 8 所示。

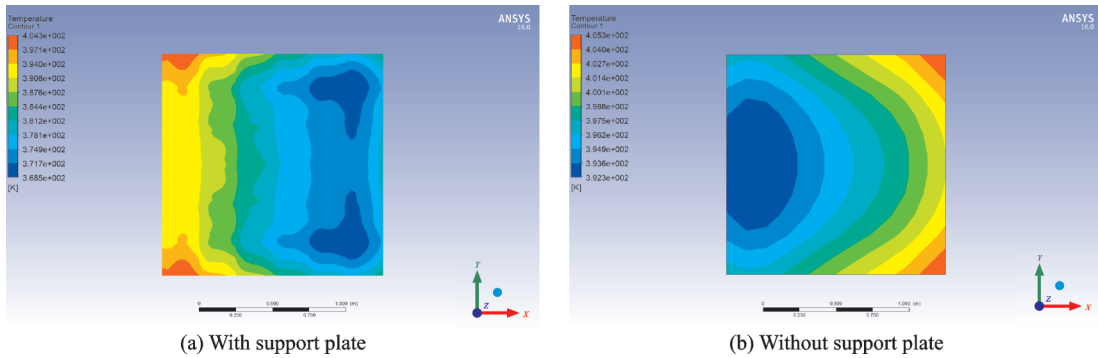


图 8 有无支撑板型板对比图

Fig.8 Comparison chart with or without support plate

当框架式模具置于热压罐内,在所有的时间历程中,其最大温差为 36 K,温度方差为 71.84 K<sup>2</sup>。若直接将型板置于罐内相同位置进行仿真,发现型板表面的最大温差为 13 K,温度方差为 9.79 K<sup>2</sup>。由此可知,型板下方有支撑结构时必然对成型面温度均匀性起到阻碍作用。此外,当  $T=10\ 200\ \text{s}$  时,含支撑结构的型板表面最高温度达到 442 K,而无支撑结构型板的最高温只有 405 K;含支撑结构的型板表面最低温度为 414 K,而无支撑结构的型板最低为 392 K,且总体低温面积小于含支撑结构的型板低温面积。因此可知,迎风端的支撑板通过热传导及自身阻碍,使得高温区域温度明显升高,而相应的低温区域因为阻碍作用,使得温度难以上升。

### 2.2 支撑板厚度对型板温度均匀性的影响

支撑板与型板直接接触,在热压罐成型中两者之间为热传导,因此可知支撑板的厚度对于支撑板本身之间的传热以及对于型板的传热起到了重要影响,将直接影响模具表面温度的均匀性。根据牛顿冷却公式

$$\Phi = Ah\Delta t = Ah(t_0 - t_s) \quad (7)$$

$$Q = \Phi \times T = C\rho V_s(t_s - t_1) \quad (8)$$

推出

$$T \times Ah(t_0 - t_s) = C\rho V_s(t_s - t_1) \quad (9)$$

$$t_s = \frac{TAht_0 + C\rho V_s t_1}{C\rho V_s + TAH}$$

得到

$$\Phi = Ah \left( t_0 - \frac{TAht_0 + C\rho V_s t_1}{C\rho V_s + TAH} \right) = Ah \frac{C\rho V_s(t_0 - t_1)}{C\rho V_s + TAH} = \frac{Ah(t_0 - t_1)}{1 + \frac{TAh}{C\rho V_s}} \quad (10)$$

式中:  $V_s$  为固体体积,  $t_1$  为固体初始温度,  $t_0$  为流体

初始温度,  $t_s$  为固体表面对流换热温度。根据式 (10) 可知,当固体的体积越大时,所通过热流量越大,而因为支撑板厚度增加,则会导致在进风端消耗更多的热流量,从而导致进风端温度较高,而背风端温度较低,固体的温度差更大。因此,本文选取了 6 组支撑板厚度,在相同固化环境下,在保证刚度要求的前提下,研究不同的支撑板厚度对型板温度均匀性的影响,其实验结果如表 4 所示。

表 4 不同支撑板厚度的温度均匀性参数

Tab.4 Temperature uniformity parameters of different support plate thicknesses

支撑板厚度/mm	最大温差/K	温度方差/K <sup>2</sup>
5	32	65.61
6	33	68.9
7	34	69.06
8	34	69.48
9	35	69.94
10	36	71.84

由表 4 可知,随着支撑板厚度的增加,型板表面温度最大温差和温度方差总体呈现上升趋势。当支撑板厚度增大时,温度均匀性逐渐降低,虽然满足刚度高要求,但总体质量增大,制造成本增加。但支撑板厚度过小时,最大变形量变大,容易影响模具成型质量。由图 9 可知,模具的最大变形量出现在支撑板厚度为 5 mm 时,为 0.039 7 mm,但是并没有超过 0.5 mm 的刚度要求。而随着支撑板厚度的增加,变形量递减,当厚度为 8 mm 时达到变形最小 0.030 1 mm。但是当支撑板厚度超过 8 mm 后,最大变形量又开始呈现上升趋势。

因此在选择支撑板厚度时,在满足刚度需求的前提下,可以尽可能地采用厚度小的支撑板,但厚度过小的支撑板因刚度较差则易发生模具的变形,从而影响构件最终成型精度。此外上述研究为同

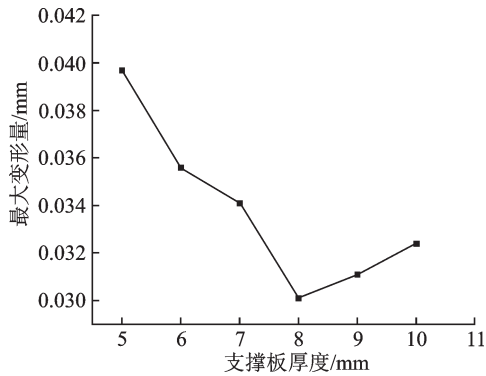
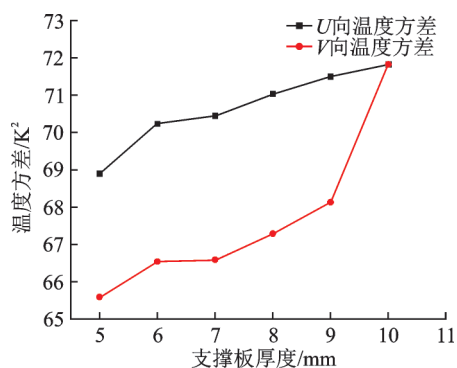


图9 不同支撑板厚度起吊最大变形量

Fig.9 Maximum deformation of lifting thickness of different support plates

时改变  $U$ ,  $V$  向支撑板厚度对比实验, 但  $U$  向支撑板与进气风口流体流向垂直, 为射流冲击换热;  $V$  向支撑板与进气风口流体流动向平行, 为外掠平板换热, 因此需考虑两者分别对流体流动的影响及对型板表面温度均匀性的影响。为了研究不同方向支撑板改变厚度对于温度均匀性的影响, 通过控制变量的方法, 设置两组参照组。一组始终保持  $V$  向支撑板厚度为 10 mm, 改变  $U$  向支撑板厚度分别为 5, 6, 7, 8, 9, 10 mm; 另一组保持  $U$  向支撑板厚度为 10 mm, 改变  $V$  向支撑板厚度分别为 5, 6, 7, 8, 9, 10 mm。

由图 10 所示, 当控制  $V$  向支撑板厚度保持为 10 mm 时, 改变  $U$  向支撑板厚度, 其最大温差值从 34 K 增至 36 K, 方差从  $68.9 \text{ K}^2$  增至  $71.83 \text{ K}^2$ ; 当控制  $U$  向支撑板厚度保持为 10 mm 时, 仅改变  $V$  向支撑板厚度, 其最大温差值从 32 K 增至 36 K, 方差从  $65.59 \text{ K}^2$  增至  $71.83 \text{ K}^2$ 。因此研究表明,  $V$  向支撑板即与进气风口流向相同的支撑板厚度的改变对型板温度均匀性更为灵敏, 因此当支撑板厚度减小以改善温度均匀性, 需增强刚度以满足条件时, 可优先考虑加厚  $U$  向支撑板厚度。

图10  $U/V$  支撑板厚度对温度均匀性的影响Fig.10 Effect of  $U/V$  supporting plate thickness on temperature uniformity

### 2.3 散热孔形状对温度均匀性影响

为了增加框架式成型模具流体流通, 通常在支撑结构中设置散热孔结构, 目前常用的散热孔形状主要为方形。本文分别对方形、菱形、圆形和椭圆形散热孔进行热均匀性及变形研究, 研究不同形状散热孔对模具温度均匀性的影响。原框架式模具中散热孔为方形孔, 尺寸为  $220 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 为消除其他因素干扰影响, 在控制所有通风孔的面积保持不变的前提下, 设计菱形边长为 186 mm, 圆形直径为 205 mm, 椭圆为长轴 300 mm 短轴 140 mm, 结构草图如图 11 所示。

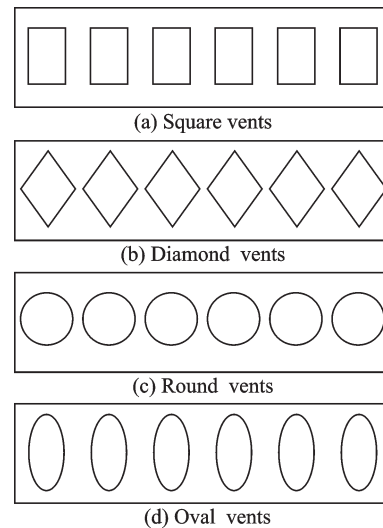


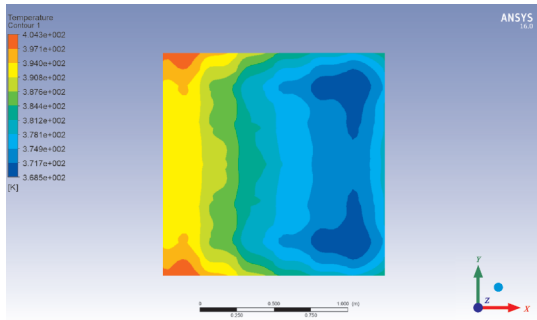
图11 不同散热孔模具草图

Fig.11 Different vent hole mold sketches

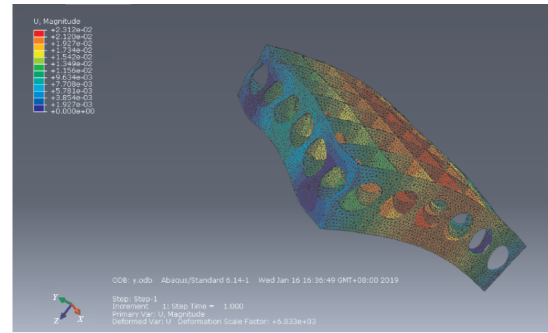
根据图 12 及表 5 可知, 以上所列举的 4 种散热孔在吊运过程中产生的最大变形量均满足企业要求, 其中菱形与圆形的变形相对更小, 而方形散热孔的变形最大达 0.032 4 mm。可见菱形与圆形具有较好的抗变形能力, 方形的抗变形能力较弱, 因此当模具体积过大或质量较重时, 应优先考虑菱形与圆形, 圆形最佳。由上可知, 方形散热口的温度均匀性方面最佳, 其温差最大值为 36 K, 温度方差为  $71.84 \text{ K}^2$ , 远小于椭圆形及菱形等。综合考虑, 因所有通风孔吊运变形均符合规范要求, 因此在侧重考虑温度均匀性的情况下, 方形散热孔最佳, 圆形次之。

### 2.4 散热孔分布对温度均匀性影响

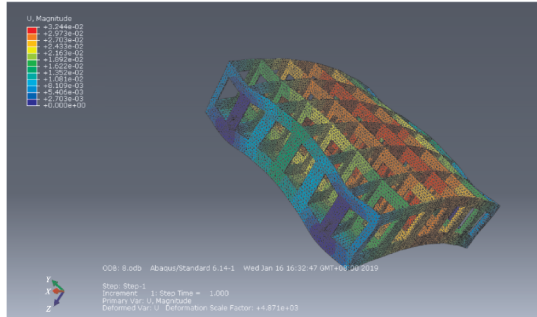
上文对于每个隔板均匀分布散热孔的全敞式框架式模具进行模拟, 验证模具温度场分布如图 12(a), 可知在框架式模具敞开全部通风的情况下, 模具入风端的温度明显高出出风端温度, 且低温区域占型板面积约 50%, 模具型面温度分布不均匀。为了改善型板温度均匀性, 在不同位置设置散热孔, 使得模具支撑结构在流体流动时起到不同的阻



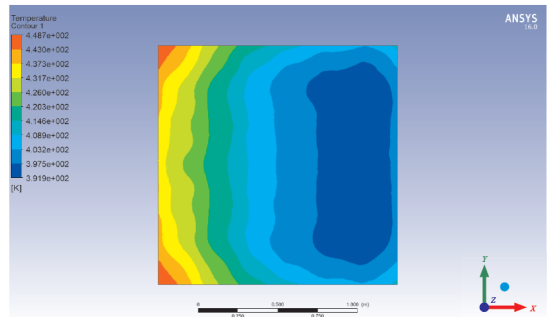
(a) Surface temperature cloud map with square vents



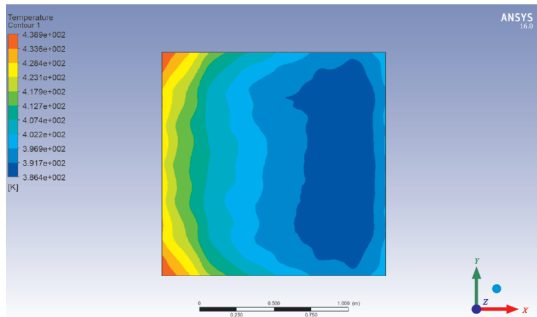
(f) Lifting deformation diagram with round vents



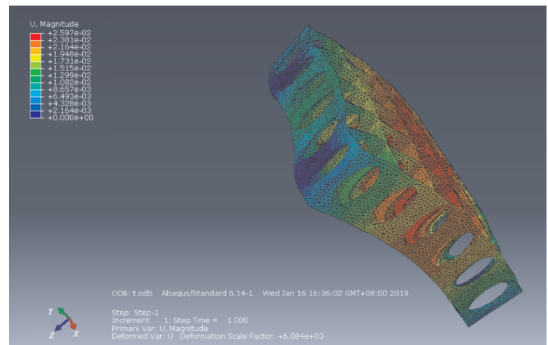
(b) Lifting deformation diagram with square vents



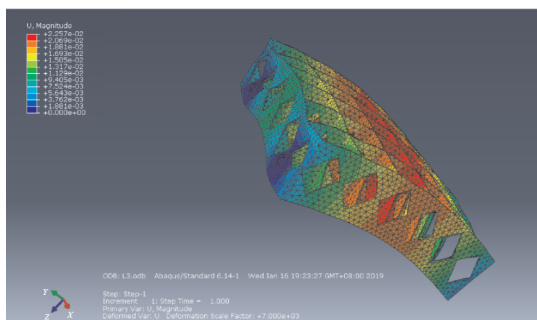
(g) Surface temperature cloud map with oval vents



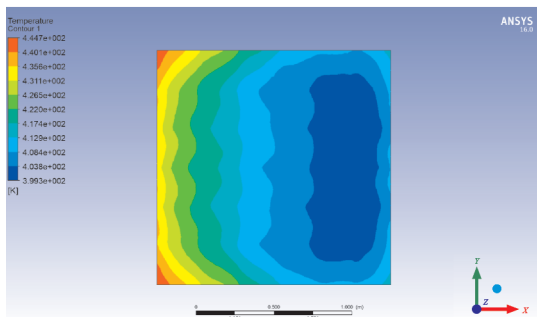
(c) Surface temperature cloud map with diamond vents



(h) Lifting deformation diagram with oval vents



(d) Lifting deformation diagram with diamond vents



(e) Surface temperature cloud map with round vents

图 12 不同散热孔模具型板表面温度云图及吊运变形图

Fig.12 Surface temperature cloud map and lifting deformation diagram of different heat dissipation hole mold plates

表 5 不同通风孔变形及温度均匀性数据

Tab.5 Different venting hole deformation and temperature uniformity data

通风孔类型	吊运最大变形/ $10^{-2}$ mm	温差最大 值/K	温度方差/ $K^2$
方形	3.24	36	71.84
菱形	2.25	53	130.36
圆形	2.31	47	101.42
椭圆形	2.59	59	192.32

碍作用,从而形成 3 种不同风道,如图 13 所示。

为了加强出口端低温区域的通风,通过更改散热孔的分布以形成局部通风,分别形成一字型、十字型和 T 字型风道。不同风道  $t=8\ 400\ s$  时模具型

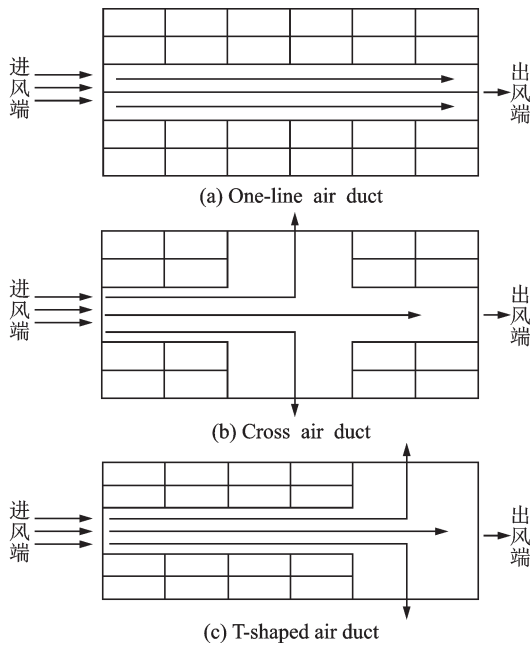


图13 风道模型平面结构图

Fig.13 Air-duct model plane structure diagram

板表面温度分布云图如图14所示。

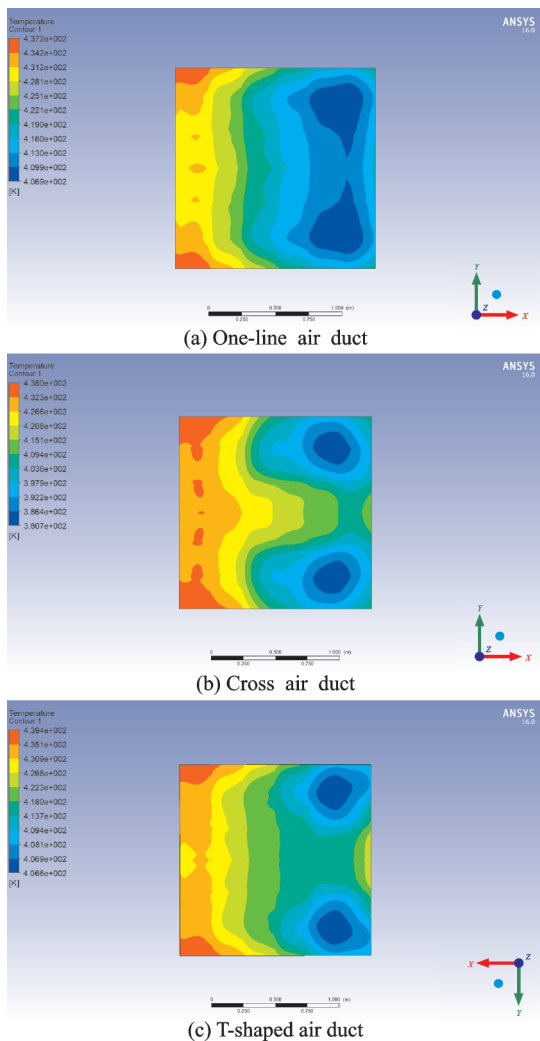


图14 不同风道  $t=8400\text{ s}$  时型板表面温度分布

Fig.14 Surface temperature distribution of the profile plate with different air-duct  $t=8400\text{ s}$

由图14型板表面温度分布情况可知,出风端低温区域温度明显上升且低温区域面积减少,温度最低点仍出现在模具尾部,说明不同散热孔分布改变了流体流向风道对于改善模具型面温度均匀性是有效的。将一字型、十字型和T字型不同风道模拟的结果进行对比,如表6所示。由此可知,其中T字型风道温度均匀性最佳,型板表面温度的分布得到了很大的改善。

表6 不同风道温度均匀性对比

Tab.6 Comparison of temperature uniformity of different air ducts

风道类型	原型	一字形	十字形	T字形
温度差值/K	36	30.3	57.3	32.8
温度方差/ $K^2$	71.84	68.06	140.67	57.52

### 3 结 论

本文针对框架式成型模具热压罐成型过程中温度场分布不均匀,对模具热压罐成型温度场进行了模拟分析,并对其影响因素进行了研究,得到了以下结论:

(1)支撑结构对复合材料构件模具型面温度均匀性不利,但可以调整结构和尺寸参数来改善型面温度均匀性。

(2)支撑板厚度对模具表面温度均匀性有较大的影响。支撑板厚度越厚,其温度均匀性越差,其中V向支撑板相较于U向支撑板对于温度均匀性的影响更为敏感。因此在设计时V向支撑板应尽可能的薄,U向支撑板可适当增加厚度以保证刚度。

(3)散热孔形状对模具表面温度分布有一定的影响。在同面积的前提下,菱形与圆形散热孔具有较好的抗变形能力,但方形散热孔温度均匀性方面更为突出。

(4)不同的散热孔分布会使得型板支撑结构在流体流动时形成不同的风道,通过模拟情况可知,3种不同风道不同程度上都起到了改善模具型面温度均匀性的作用,其中T字形的效果最佳。

#### 参考文献:

[1] 王永贵,梁宪珠,薛向晨.热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布[J].航空制造技术,2008,51(22):80-87.  
WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, XUE Xiangchen. Analysis of heat transfer and temperature field distribution on frame tooling in autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(22):80-87.



- [2] 王永贵,梁宪珠,曹正华.热压罐工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综合[J].玻璃钢/复合材料,2009(3):81-85.  
WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua. Review of the temperature field research of autoclave moulding for advanced composite components [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(3):81-85.
- [3] 张铖.大型复合材料结构热压罐工艺温度场权衡设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009:1-153.  
ZHANG Cheng. Curing temperature field tradeoff design method of large scale composite material structure in autoclave process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 1-153.
- [4] 寇哲君,龙国荣,万建平,等.热固性树脂基复合材料固化变形研究进展[J].宇航材料工艺,2006(S1):7-11.  
KOU Zhejun, LONG Guorong, WAN Jianping. Process of study on curing induced shape distortion for resin matrix thermosetting composites[J]. Aerospace Material Technology, 2006(S1): 7-11.
- [5] GNIATCZYK J L, JEFFREY L. Composite molding tools and parts and processes of forming molding tools: US6309587 B1[P].2001-10-30.
- [6] PARK H C, LEE S W. Cure simulation of thick composite structures using the finite element method [J]. Journal of Composite Material, 2001, 35 (3) : 118-201.
- [7] 岳广全,张博明,杜善义,等.模具对热固性树脂基复合材料固化变形的影响[J].玻璃钢/复合材料,2010(5):62-65.  
YUE Guangquan, ZHANG Boming DU Shangyi et al. Influence of the mould on curing induced shape distortion for resin matrix thermosetting composites [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2010(5): 62-65.
- [8] 张旭生,甘忠,张海燕,等.热压罐时效成形模具温度场优化研究[J].中国制造业信息化,2011,40(19):30-32.  
ZHANG Xusheng, GAN Zhong, ZHANG Haiyang. Research on optimization of mold temperature fields in autoclave age forming [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2011, 40(19): 30-32.
- [9] 赵一鸣,安鲁陵.复合材料构件成型模具温度场均匀性改善研究[J].航空制造技术,2018,61(5):84-94.  
ZHAO Yiming, AN Luling. Study on improvement of temperature field uniformity of composite mold [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61 (5): 84-94.
- [10] 罗登峰.热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布[J].中国高新技术企业,2013,19:84-85.  
LUO Dengfeng. Heat transfer analysis of autoclave process and temperature distribution of frame mold [J]. Chinese High-Tech Enterprises, 2013, 19: 84-85.
- [11] WANG Q, WANG L, ZHU W, et al. Design optimization of molds for autoclave process of composite manufacturing [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 21(36): 1564-1576.

(编辑:陈珺)