

文章编号: 1673-3193(2024)05-0583-09

# 复合材料热压罐成型模具结构参数 对温度场的影响

刘洋, 马贵春, 张化斌, 王磊, 郭思博

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 固化过程中热压罐内温度场分布的均匀性对于复合材料的结构性能、强度等方面具有重要影响。本文以目前航天制造业中广泛使用的用于制作复杂大型结构件的框架式模具作为研究对象, 在COMSOL中建立了热压罐框架式模具在固化过程中的非定常三维温度场, 研究了模具的不同筋板厚度和通风孔尺寸的情况以及型面下方半圆形散热孔存在与否的情况对模具型面温度场均匀性的影响。对比支撑筋板厚度分别为10, 8, 6和4 mm模具的温度标准差曲线发现: 减小支撑筋板厚度可增加型面温度场均匀性, 但模具整体稳定性随着筋板厚度变薄而迅速降低, 更易发生受压失稳现象; 对比纵向通风孔尺寸为130 mm×220 mm、150 mm×220 mm、170 mm×220 mm和190 mm×220 mm模具的温度标准差曲线发现: 适当加宽筋板通风孔尺寸可提高型面温度场的均匀性, 但宽度170 mm与190 mm的曲线基本重合, 影响已不明显; 同样型面下方散热孔的存在可以提高型面温度场的均匀性。

**关键词:** 热压罐成型; 模具; 复合材料; 温度场

**中图分类号:** V261.97

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.05.004

**引用格式:** 刘洋, 马贵春, 张化斌, 等. 复合材料热压罐成型模具结构参数对温度场的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 583-591.

LIU Yang, MA Guichun, ZHANG Huabin, et al. Influence of structural parameters of composite autoclave molding mold on temperature field[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(5): 583-591.

## Influence of Structural Parameters of Composite Autoclave Molding Mold on Temperature Field

LIU Yang, MA Guichun, ZHANG Huabin, WANG Lei, GUO Sibao

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The uniformity of the temperature field distribution in the autoclave during the curing process has an important impact on the structural performance and strength of composite materials. This paper took the frame molds that were widely used in the aerospace manufacturing industry to produce complex large structural parts as the research object. In COMSOL, the unsteady three-dimensional temperature field of the autoclave frame molds during the curing process was established. On the mold conditions of different ribs thickness, ventilation hole size, and existence of heat dissipation holes, the influence of the temperature field uniformity on the mold surface was studied. By comparing the temperature standard

**收稿日期:** 2023-06-28

**作者简介:** 刘洋(1987-), 男, 硕士生, 主要从事复合材料构件成型工艺的研究。

**通信作者:** 马贵春(1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事航空宇航先进制造工艺及装备方面的研究。E-mail: mgc1600@nuc.edu.cn。

deviation curves of molds with support rib thicknesses of 10 mm, 8 mm, 6 mm, and 4 mm, it is found that reducing the thickness of the support ribs can increase the uniformity of the temperature field on the profile, but the overall stability of the mold becomes thinner with the thickness of the ribs decreases rapidly. If it decreases rapidly, pressure instability is more likely to occur. Comparing the mold temperature standard deviation curves with longitudinal ventilation hole sizes of 130 mm×220 mm, 150 mm×220 mm, 170 mm×220 mm and 190 mm×220 mm, it is found that: appropriately widening the ribbed ventilation hole size can increase temperature field uniformity on the profile, but the curves with widths of 170 mm and 190mm basically overlap, so the impact is no longer obvious; similarly, the existence of heat dissipation holes can indeed increase the uniformity of the temperature field on the profile.

**Key words:** autoclave molding; mold; composites; temperature field

## 0 引言

复合材料是一种由增强材料(如玻璃纤维、碳纤维等)和基础材料(如树脂、金属或陶瓷)组合而成的,具有优异性能的新型高科技材料<sup>[1]</sup>。相对于传统材料,复合材料具有许多优点。首先,复合材料具有很高的比强度和比刚度,这意味着这种材料可以在相对较轻的重量下承受更高的载荷和更大的应力。其次,复合材料具有很好的抗腐蚀性和耐久性,可以在相对恶劣的环境(如高温、高压、腐蚀等)下应用<sup>[2]</sup>。另外,与传统金属材料相比,复合材料具有形状自由的优点,因此可以将它们制成各种形状或复杂的结构,满足不同领域的需求<sup>[3]</sup>。

热压罐工艺是一种高效的复合材料成型方法,被广泛应用于航空、航天、汽车等行业中<sup>[4]</sup>。该技术通过将预处理好的预浸料放入热压罐中,在高温高压下进行固化成型,得到高强度、高刚性的复合材料制品。与传统的成型方法相比,热压罐工艺具有成型周期短、成型质量稳定、自动化程度高等优点<sup>[5]</sup>。

在热压罐成型工艺方法中,温度场分布是最关键的工艺控制因素。在高温下进行固化时,不均匀的温度分布会导致材料内部产生残留应力,这些残留应力可能会导致成型后的材料出现缺陷,从而显著降低其机械性能,如强度、刚度和伸长率等指标<sup>[6-7]</sup>。实验研究大型复合材料构件热压罐成型过程的成本较高,因此如何准确、高效地模拟模具温度场成为研究热点<sup>[8]</sup>,工艺仿真模拟成为支撑技术的重要手段。

国内外研究者通过工艺仿真的方法对复合材料热压罐成型的温度场进行了大量相关研究。花蕾蕾等<sup>[9]</sup>通过改变模具通风孔的形状,如圆形、菱

形等,发现方形通风孔对型面温度均匀性最有利。Han等<sup>[10]</sup>研究了模具在热压罐中的不同放置角度对温度分布的影响。张旭生等<sup>[11]</sup>通过改变模具支撑框格的分布,研究了不同风道对型面温度分布的影响,并得出T型风道在改善型面温度场均匀性方面效果最显著。Hu等<sup>[12]</sup>探索了通过改变模具不同部位的传热系数来改善型面温度分布的可行性。张铖等<sup>[13]</sup>通过研究不同工艺参数对框架式模具温度场的影响,发现增加热流速度可以明显改善温度分布的均匀性。张杰<sup>[14]</sup>通过改变支撑隔板间距,研究发现增大支撑隔板间距对温度场的均匀化效果不明显。

以上研究者采用了改变模具通风孔的几何外形,调整模具不同部位的传热系数,调节固化过程中的工艺参数以及优化支撑结构内部框格的设计等方法,以改善模具型面温度场的分布均匀性。

本文以制造大型先进复合材料构件的热压罐工艺为主要研究对象,针对固化过程中的温度场问题展开研究。采用多物理场仿真软件COMSOL建立三维非定常温度场模拟仿真模型,用于反映热压罐固化过程中罐内温度场变化。针对通常用于成型大尺寸构件的框架式模具温度场进行数值模拟,探究模具结构参数对模具型面温度分布的影响规律,以期模具结构设计提供参考。

## 1 热压罐工作原理

典型热压罐的结构如图1所示,为一个一端封闭,另一端开口的圆柱体。将复合材料毛坯、蜂窝夹芯结构或胶接结构用真空袋(袋内抽真空后再加上复合材料热压罐的加压作用会使得罐内的制品能够更好地进行固化,达到非常低的孔隙率,从而使产品质量更好)密封在模具型面上,放

于热压罐中, 经过升温、加压、保温和泄压过程, 使复合材料制件成为所需要的形状和质量。

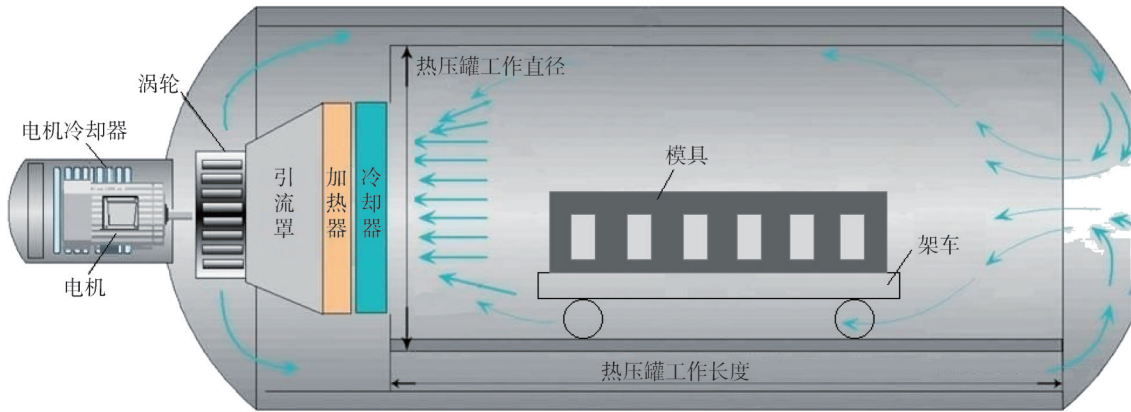


图1 热压罐透视简图

Fig. 1 Autoclave perspective diagram

罐内的加热装置安装在罐的一端。在升温阶段, 加热装置持续启动, 通过附近的鼓风机系统使罐内气体不断循环流动, 以保证罐内气体温度均匀上升。降温阶段则采用循环水冷却, 通过冷却系统使空气温度降低, 并通过鼓风机系统使罐内各处流体的温度降低。

## 2 数学模型的创建

### 2.1 热传递方程

热交换包括热传导、对流换热、热辐射三种形式。热压罐工作温度一般不需要达到很高, 可近似地认为罐内不存在热辐射现象, 而主要通过罐内气体的流动进行流体与固体之间的强迫对流热交换, 同时模具内部也存在热传导现象。因此, 可以建立方程对此过程进行数学描述。

1) 质量守恒方程(连续性方程)<sup>[8]</sup>

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

2) 动量守恒方程(牛顿运动定律)<sup>[8]</sup>

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

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

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

3) 能量守恒方程(伯努利方程)<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} =$$

$$-\rho \text{div}(U) + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + S_m + \varphi, \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为流体的密度;  $U$  为流体流速;  $p$  为流体的压力;  $T$  为流体温度;  $\eta$  为动力粘度;  $\lambda$  为流体的导热率;  $\varphi$  为流体的耗散函数;  $h$  为流体比焓, 与流体压强和温度相关;  $S_u, S_v, S_w$  为动量方程的广义源项;  $S_m$  为流体内热源, 此处为 0;  $u, v, w$  为速度矢量在  $x, y, z$  方向上的分量。

4) 传热方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \rho C_p u \cdot \nabla T, \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为模具材料的密度;  $C_p$  为模具材料的比热容;  $u$  为流体的速度矢量;  $\kappa$  为模具材料的热导率;  $T$  为温度;  $t$  为时间。

### 2.2 边界条件和初始值

根据热压罐工艺的工作原理以及实际使用过程, 对模型进行一定的简化, 并设定边界条件, 如图 2 所示。

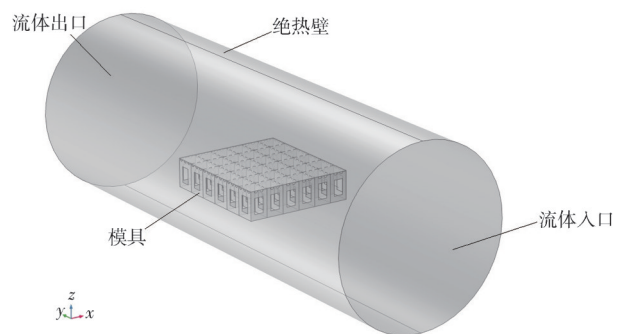


图2 热压罐温度场计算模型

Fig. 2 Autoclave temperature field calculation model

1) 侧面边界条件: 基于罐中外腔对罐内温度场影响小这一原则, 将圆柱体侧面边界条件设置为无

滑移、光滑绝缘面。这可以解释为热量流不能通过这些表面传递,这个边界处不会有热量交换。

2) 进口边界条件: 设定进口边界条件为速度流,法向流入速度为2.5 m/s。此外,还需要设定入口处气体的温度随时间的变化规律,即固化工艺温度曲线,如图3所示,在模拟计算中将温度作为边界条件之一。

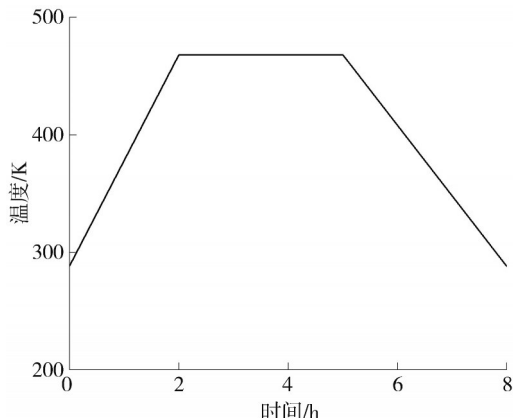


图3 工艺温度曲线

Fig. 3 Process temperature curve

3) 出口边界条件: 将出口压力条件设置为罐内气体的工作压强,此处设为0.6 MPa。

4) 模具装配区边界条件: 将模具选择为固体,其余区域选择为流体,罐内壁和模具与流体接触表面均设置为无滑移壁面。

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 建模与仿真

本文模拟研究的框架式模具规格为1 700 mm×1 500 mm×400 mm,包含尺寸为130 mm×220 mm的矩形散热孔和半径为25 mm的半圆形散热孔,型面厚度为7 mm,支撑结构筋板厚度为4 mm。热压罐的工作尺寸为Φ2.5 m×7 m,模具型面下部表面形心位于热压罐几何中心。模具结构如图4所示。

模具的材料选为结构钢,热压罐内的工作气体选为空气。两种材料的热力学性能参数见表1。

表1 材料相关参数

Tab. 1 Related parameters of materials

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
结构钢	7 850	475	44.5
空气	1.237	1 006.43	0.026

由于模具在罐内的升温方式是通过强制对流换热实现的,因此需要考虑固化过程中流体的流动状态,并以雷诺数( $Re$ )的值作为判断标准,确

定其流动状态是层流还是湍流。

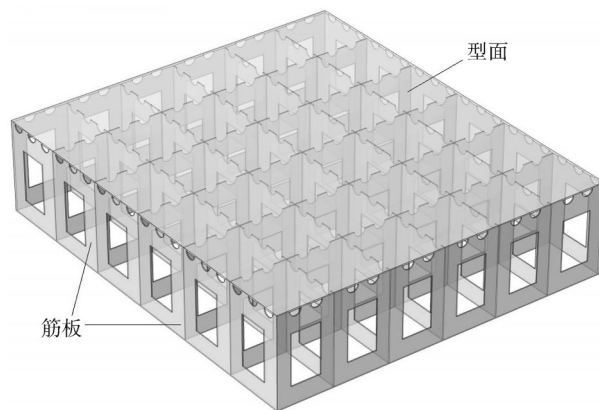


图4 框架式模具

Fig. 4 Frame-type mold

热压罐内工作气体的雷诺数

$$Re = L \times u \times \rho / \eta, \quad (7)$$

式中: $L$ 为热压罐的工作直径; $u$ 为流体速度; $\rho$ 为流体密度; $\eta$ 为流体动力粘度。

由式(7)计算可得, $Re=431\ 913 \geq 12\ 000$ ,故可判断罐内气体的流动状态为湍流。

因为固化过程中存在对流换热和热传导两种换热方式,所以在COMSOL中选择物理场为共轭传热,并将湍流端口选为 $k-\epsilon$ 模型,其中, $k$ 代表湍流动能, $\epsilon$ 代表耗散率。另外,由于流体温度的变化会导致其材料属性(如密度和粘度等)的变化,设置耦合物理场为非等温流动<sup>[15]</sup>。由于整个仿真模型具有对称性,为简化计算,将模型沿对称面剖开,取其一半作为研究对象。使用非结构化网格对模型进行划分,如图5所示。

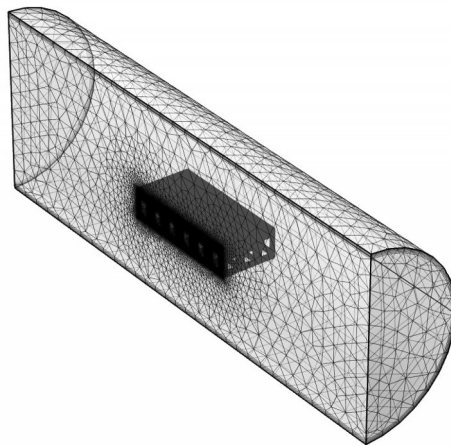


图5 非结构化网格划分结果

Fig. 5 Unstructured meshing results

在相同工艺条件下,对热压罐的固化过程进行了模拟研究,并从实验结果数据集中提取了模

具型面不同区域的5个点与文献[8]中的实验数据进行了对比,模具监测点如图6所示。

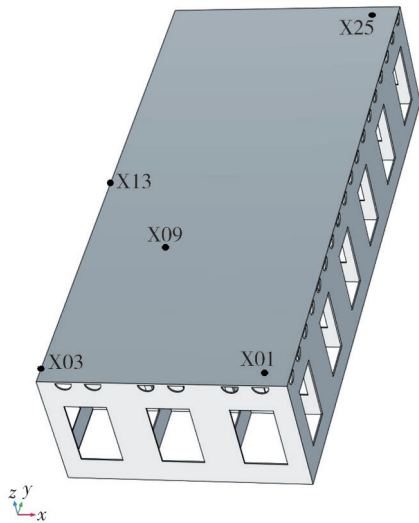


图6 模具监测点位置

Fig. 6 Mold monitoring point location

通过对比表2和表3中的数据可以发现,各对比点温度的仿真值误差小于4%,说明模拟计算精度较高,计算结果具有较高的可信度。

表2 实验各监测点数据

Tab. 2 Data from all monitoring points in the experiment

时间/min	温度/K				
	X01	X03	X09	X13	X25
10	311.6	302	301.3	307.6	309
20	324.5	314.4	311.9	317.9	321
30	337.7	327	324.2	329.8	336
40	351	339.8	336.9	342.3	350
50	364.6	353.2	350.9	355.3	362
60	379	367	365	369.1	376
70	387.5	376.3	373.9	376.6	383

表3 仿真各对应点数据

Tab. 3 Data from corresponding points in the simulation

时间/min	温度/K				
	X01	X03	X09	X13	X25
10	304.4	302.231	301.1	301.9	301
20	317.9	0.8	311.9	311.6	310.3
30	332.1	324.4	325.7	325.1	324
40	346.7	338.5	339	339.2	338.9
50	361.4	352.9	354.5	353.5	350
60	376.1	367.5	368	368.1	364.2
70	390.5	382	377.7	380.6	378.7

为了优化复合材料在固化过程中外部温度分布的均匀性,本文将研究范围限定于模具上表面的温度场。通过提取仿真结果中约14 000个型面不同点的温度值,计算得到型面温度标准差随时间的变化规律,如图7所示。由图7可以看出,随着罐内气体温度的升高,型面温度标准差值也

随之增大,但其变化梯度逐渐减小,标准差值在温度升高的结束时刻达到最大值,这说明在升温阶段型面温度分布的不均匀性逐渐增加,但其增加速度逐渐放缓,并在升温结束时刻达到峰值。在固化过程进入保温阶段后,型面温度标准差值迅速减小,且其变化梯度逐渐接近于0,这说明型面温度分布的不均匀性在进入保温阶段后迅速降低,且其降低速度随着标准差值趋近于0 K后逐渐放缓。在保温阶段的后半段,整个型面温度场都保持了良好的均匀性。最后,在降温阶段,随着罐内气体温度的降低,型面温度标准差值先增大后减小,并且曲线存在一个驻点,这说明在降温阶段型面温度分布的不均匀性先增大后减小,并且在降温阶段也存在一个峰值点。在到达峰值点后,型面温度分布的不均匀性开始缓慢降低。

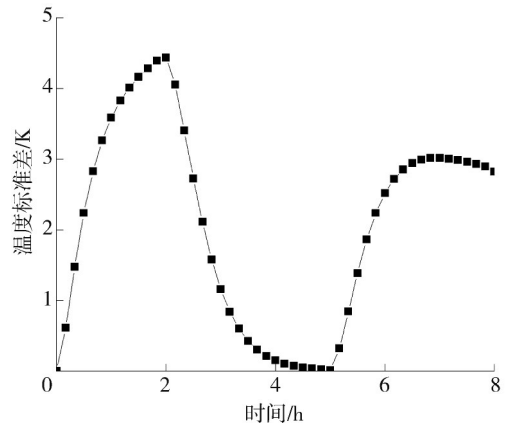


图7 温度标准差变化

Fig. 7 Variation of temperature standard deviation

### 3.2 仿真结果与分析

由3.1节的分析可知,模具型面温度分布最不均匀时刻为升温阶段结束时刻,图8展示了模具型面在升温结束时刻的温度分布云图。由图8可以看出,型面迎风侧的温度明显高于背风侧,并以近似阶梯状沿轴向由高到低分布。最高温度点位于迎风侧边角处,靠近迎风侧边角还存在一个高温区域。而模具后侧靠近边缘处则存在一个低温区域,最低温度点在该区域的中心位置。这种温度分布产生的原因是,在热压罐升温过程中,高温热风气流向模具方向流动并直接冲击模具迎风侧外表面,且流动速度较快,因此通过强制对流作用使前部的温度较快地升高。而模具的背风侧则没有高温热风的直接冲击,且热风流动速度相对较慢,因此强制对流作用也相对较弱,

导致背风侧温度相对较低。

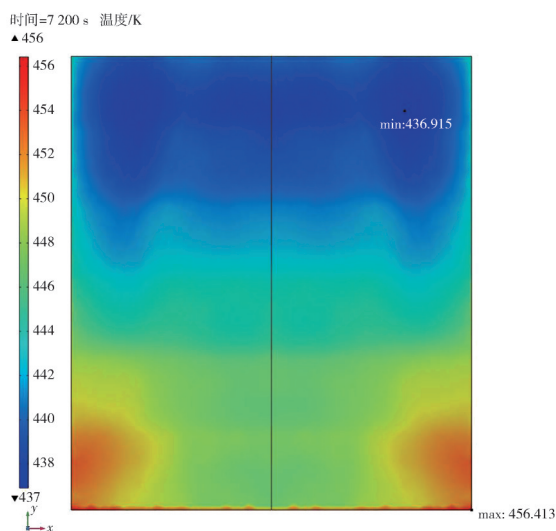


图8 模具型面温度分布

Fig. 8 Temperature distribution on the mold surface

## 4 结构参数对模具温度场的影响

本文主要研究模具筋板、通风孔尺寸等结构参数以及型面下方半圆形散热孔存在与否对模具表面温度分布的影响规律,以温度标准差作为模具温度分布均匀性的评价标准。在研究某一结构参数对模具型面温度场的影响规律时,其他参数均保持不变。

### 4.1 筋板厚度对型面温度场的影响

在保持其他参数不变的情况下,将模具支撑框格筋板厚度分别设置为4, 6, 8和10 mm,并利用COMSOL计算相应的型面温度分布图。提取约14 000个节点的温度值,并计算它们在整个固化过程中不同时刻的温度标准差。随着时间的推移,不同筋板厚度条件下,型面温度分布标准差的变化曲线如图9所示。

由图9可见,在固化过程升温阶段,不同厚度筋板模具的型面温度标准差最大值均出现在升温结束时刻,且最大标准差随着筋板厚度的增加而增大,其中10 mm厚度筋板的温度标准差相比4 mm厚度增大了接近20%。在保温阶段,温度标准差均逐渐变小并趋近于0 K。此外,在筋板厚度逐渐增大的情况下,温度标准差减小速度逐渐放缓,温度场趋于均匀所需时间也变长。一般认为在型面温度达到所需的共固化温度时,型面温度标准差应小于1℃,其中10 mm厚筋板温度标准差小于1℃的时间比4 mm厚筋板短了接近1 h。

在降温阶段,型面温度标准差逐渐增大,并存在降温阶段温度标准差的最大值。随着筋板厚度的逐渐增大,温度标准差最大值也逐渐增大,且模具达到最大标准差值所需的时间逐渐变长。

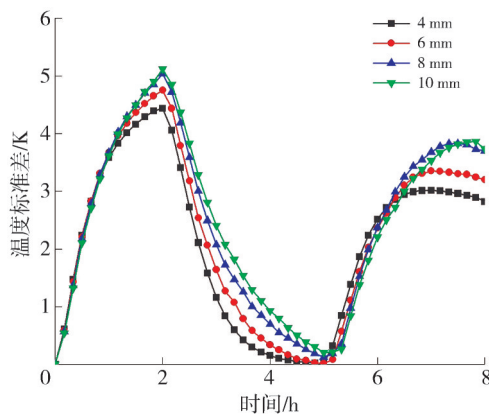


图9 不同筋板厚度时的温度标准差变化

Fig. 9 Variation of temperature standard deviation at different thicknesses of rib

支撑筋板的厚度与模具的力学性能密切相关,特别是对于模具这种薄壁框架式受压结构,除了满足强度和刚度的要求外,还需要确保结构的稳定性。因此,本文对模具的4种不同厚度的筋板进行了强度校核和稳定性分析。为了模拟实际情况并简化问题,设定模具承受重力的同时,在型面上均匀分布的力为20 000 N,模具底部则受到固定约束。使用COMSOL进行仿真,所得结果如表4所示。

表4 强度校核结果

Tab. 4 Strength check results

参数	数值			
厚度/mm	4	6	8	10
最大应力/MPa	11.48	7.414	4.114	4.530
最大位移/mm	0.014 6	0.012 3	0.010 4	0.009

由表4可以看出,4种情况下的最大应力值远低于强度目标值235 MPa,而最大位移值也远小于刚度目标值0.5 mm。这表明随着筋板厚度的减小,模具的最大应力值和变形量增加,但仍然远低于临界值。因此,这4种情况均满足强度和刚度要求,且均远低于临界值。

在满足强度和刚度要求的前提下,薄壁框架式结构还需要进行稳定性分析。通过COMSOL对4种筋板厚度模具进行屈曲分析,以确定结构失稳的型面压力临界载荷。通过仿真计算,得到4种筋板厚度模具的临界载荷如表5所示。

由表5可以看出,筋板厚度对整个模具结构

稳定性的影响显著。当筋板厚度较薄时,模具可能会发生失稳现象,导致模具的完全崩塌或部分塌陷。因此,在设计模具筋板厚度时,需参考复合材料结构件的重量,以保证型面压力低于临界载荷,确保结构的安全性和稳定性。特别地,筋板厚度为 4 mm 的模具的结构屈曲模态如图 10 所示。

表 5 临界载荷结果  
Tab. 5 Critical load results

参数	数值			
厚度/mm	4	6	8	10
临界载荷/N	6 024.3	17 043	34 173	57 990

临界载荷因子=6.024.3

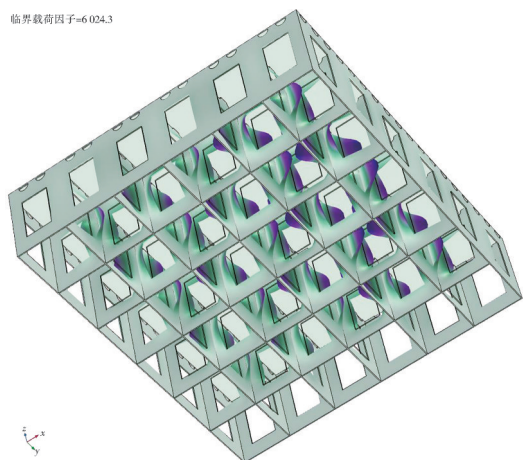


图 10 框架式模具屈曲模态

Fig. 10 Buckling mode of the frame-type mold

### 4.2 通风孔尺寸对型面温度场的影响

由于模具纵向(与热流垂直方向)筋板通风孔尺寸对模具内部流场的影响更加明显,因此本文只改变该方向的筋板通风孔尺寸,逐渐加宽通风孔并观察模具型面温度场分布标准差的变化规律,即分别将通风孔尺寸设置为 130 mm×220 mm, 150 mm×220 mm, 170 mm×220 mm 和 190 mm×220 mm, 并采取与 4.1 节相同的处理方法提取节点温度值,计算固化过程不同时刻的温度标准差。型面温度分布标准差的变化规律曲线如图 11 所示。

由图 11 可见,在固化过程升温阶段,不同宽度通风孔模具的型面温度标准差最大值均出现在升温结束时刻,且最大标准差随着宽度的增加而减小,其最大变化接近 30%。在保温阶段,温度标准差逐渐变小并趋近于 0 K。但是,随着宽度的增加,型面温度标准差接近 0 K 的速度明显加快,即

温度场达到均匀所需的时间明显缩短。在降温阶段,最大温差出现时间没有明显的变化,但随着宽度的增加,其最大温度标准差逐渐变小。观察图 11 还可以发现,通风孔的宽度由 170 mm 变化到 190 mm 时,两种情况下的整体温度标准差变化曲线基本重合,说明当通风孔的宽度增加到一定程度后,其尺度变化对型面温度分布的影响已不明显。

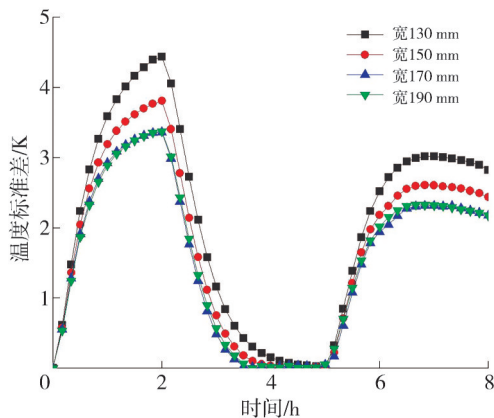


图 11 不同通风孔尺寸时的温度标准差变化

Fig. 11 Variation of temperature standard deviation at different size of ventilation hole

### 4.3 型面下方半圆形散热孔对型面温度场的影响

热压罐框架式模具的型面下方空气流动情况比较复杂。张铖<sup>[8]</sup>的研究表明,半圆形散热孔可以促进空气流动,提高模具的升降温和散热能力,并改善型面温度分布的均匀性。本文通过对比有无散热孔两种情况下型面温度分布的标准差,分析了半圆形散热孔对型面温度分布均匀性的具体影响,结果如图 12 所示。

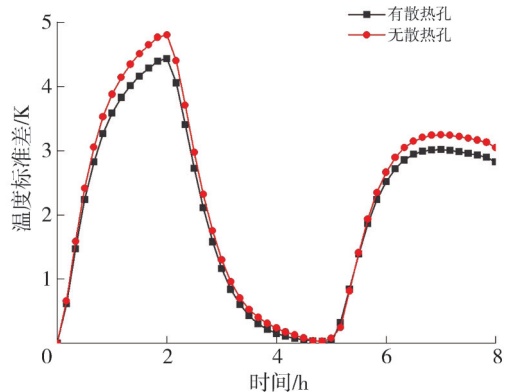


图 12 有无散热孔时的温度标准差变化

Fig. 12 Variation of temperature standard deviation with and without heat dissipation hole

由图 12 可见,两种情况下型面温度标准差随时间变化曲线的形状基本一致,散热孔的存在确实提高了整个固化工艺阶段的型面温度分布的均匀性,即升降温阶段的最大温度标准差值均有所降低,并且缩短了保温阶段型面温度分布趋于均匀化所需的时间。

## 5 结 论

本文利用 COMSOL 多物理场仿真软件对热压罐框架式模具型面温度场的均匀性进行了仿真研究,结果表明:

1) 框架式模具支撑筋板厚度对模具型面温度场均匀性的影响作用明显。在满足模具强度、刚度和稳定性的前提下,筋板应尽量选择较薄的尺寸,这是因为筋板越薄,模具型面温度场就会越均匀,且均匀化所需时间也会更短;

2) 模具纵向通风孔的宽度也可以影响模具型面温度场的均匀性,在适当范围内增加通风孔宽度可以有效提高型面温度分布的均匀性;

3) 模具型面下方的半圆形散热孔的存在确实提高了热固化过程中模具型面温度场的均匀性。此外,可以进一步研究散热孔在型面下方的分布位置,以探究如何最大化这种均匀性的效果。

在模具设计阶段,通常只从模具本身的力学性能出发来考虑和确定模具的结构参数,而很少重视这些参数对模具温度场分布的影响。通过本文对整个仿真研究过程的结合与分析可以发现,通过优化模具结构,改善模具内部流体流动情况,可以有效地改善复合材料在固化过程中温度场分布的均匀性,这对于复合材料的制造具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 王振林,孙浩,何芳,等. 纤维增强树脂基复合材料制造技术研究进展[J]. 化学与粘合, 2020, 42(5): 377-382.  
WANG Zhenlin, SUN Hao, HE Fang, et al. Research progress in manufacturing technology of fiber reinforced resin based composites [J]. Chemistry and Adhesion, 2020, 42(5): 377-382. (in Chinese)

[2] 何亚飞,矫维成,杨帆,等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. 纤维复合材料, 2011, 28(2): 7-13.  
HE Yafei, JIAO Weicheng, YANG Fan, et al. The development of polymer composites forming process

[J]. Fiber Composites, 2011, 28(2): 7-13. (in Chinese)

[3] 齐姝婧,韩勇锡,李梦涵,等. 碳纤维复合材料的应用领域及预测[J]. 化学工业, 2021, 39(2): 33-35.  
QI Shujing, HAN Yongxi, LI Menghan, et al. Application and prediction of carbon fiber composites [J]. Chemical Industry, 2021, 39(2): 33-35. (in Chinese)

[4] 宁莉,杨绍昌,冷悦,等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程, 2020(5): 123-128.  
NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology [J]. Composites Science and Engineering, 2020(5): 123-128. (in Chinese)

[5] 徐强. 复合材料热压罐成型工艺仿真技术研究综述[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 34-38.  
XU Qiang. A review on autoclave process simulation for composites manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(15): 34-38. (in Chinese)

[6] 陈绍杰. 浅谈复合材料的整体成型技术[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(1): 6-9.  
CHEN Shaojie. Integrity technology of composites [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(1): 6-9. (in Chinese)

[7] 常青,张敏弟,马潇健,等. 碳纤维复合材料各向异性特性对气泡形态影响试验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(11): 2272-2282.  
CHANG Qing, ZHANG Mindi, MA Xiaojian, et al. Experimental research on the effect of anisotropic properties of composite material on bubble shape [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(11): 2272-2282. (in Chinese)

[8] 张铖. 大型复合材料结构热压罐工艺温度场均衡设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[9] 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. (in Chinese)

[10] HAN N, AN L L, FAN L X, et al. Research on temperature field distribution in a frame mold during autoclave process [J]. Materials, 2020, 13(18): 4020.

[11] 张旭生,甘忠,张海燕. 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 Haiyan. Research on optimization of mold temperature fields in autoclave age forming [J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2011, 40 (19) : 30-32. (in Chinese)
- [12] HU J, ZHAN L H, YANG X B, et al. Temperature optimization of mold for autoclave process of large composite manufacturing [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(3): 032086.
- [13] 张铖, 梁宪珠, 王永贵, 等. 热压罐工艺环境对于先进复合材料框架式成型模具温度场的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, 29(4): 547-553.
- ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, WANG Yonggui, et al. Rules of impact of autoclave environment on frame mould temperature field of advanced composites [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2011, 29(4): 547-553. (in Chinese)
- [14] 张杰. 框架式复合材料成型模具优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] 郭靖宇, 岳光, 吕佳镁, 等. 基于流体动力学的热压罐框架式模具温度场优化[J]. *兵工学报*, 2022, 43 (1): 233-240.
- GUO Jingyu, YU Guang, LÜ Jiamei. et al. Optimization of temperature field of autoclave frame mold based on fluid dynamics [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43 (1): 233-240. (in Chinese)