



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

COMSOL
CONFERENCE
2016 SHANGHAI

基于COMSOL的树脂基复合材料 固化成型过程多场耦合仿真

李自强

中南大学机电工程学院，长沙

2016. 11

目录

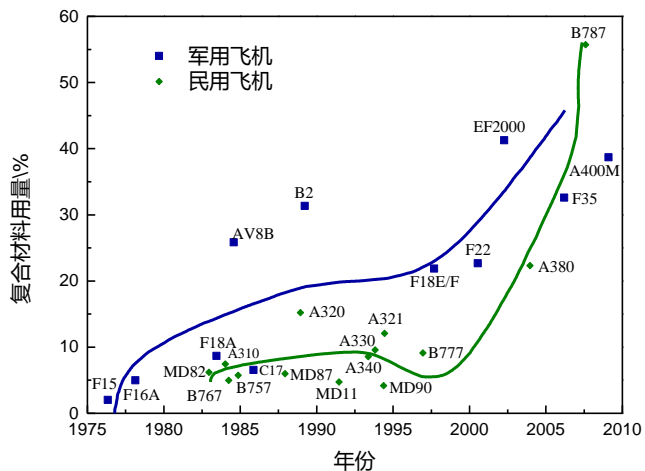


- 课题研究背景、现状与思路
- 复合材料制件热-流-固强耦合建模分析
- 复合材料制件内应力演变规律及脱模变形
- 基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真
- 总结

一、课题研究背景、现状与思路

课题研究背景

- **树脂基复合材料**以其高比强度和比刚度、可设计性强以及便于大面积复杂制件整体成型等优良特性，在航空航天等高科技领域得到了**广泛应用**；
- **热压罐**由于罐内较均匀的温度场和压力场以及成型制件孔隙率低、力学性能稳定等优点，目前已成为大型飞机复合材料承力构件的**主要成型工艺**；
- 复合材料制件的**固化成型过程**是影响其成型质量的关键环节之一，通过**有限元方法**模拟制件的固化成型过程，对于实现其形性协同制造具有重要的指导意义。



国外复合材料在飞机上应用的过程



B787机身固化热压罐 $\Phi 9m \times 23m$



B787长桁与壁板共固化机身

一、课题研究背景、现状与思路



□ 复合材料制件固化成型过程数值模拟研究现状

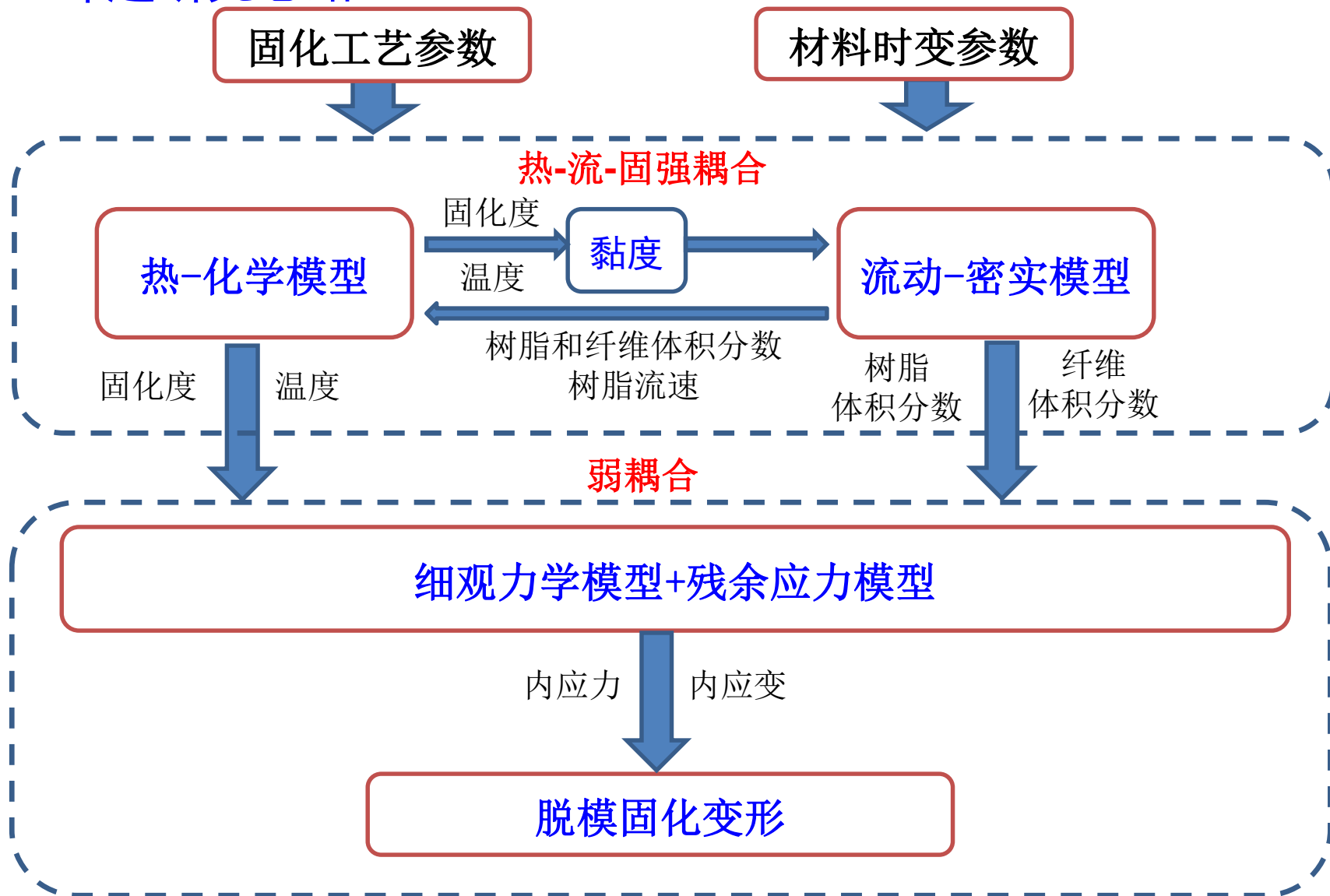
- 目前大多数针对复合材料制件固化成型过程的研究仍**停留在模块化建模分析**，或仅针对某一模块开展研究，或简单将一个模块的分析结果导入另一模块，**弱化这些现象之间的交互作用**。
- 已有的针对固化成型过程的研究往往以**等厚度层合板为结合对象**，而对**变截面制件以及变截面、带曲率的帽型加筋结构制件**的固化成型过程有限元仿真模拟研究较少。

□ 面临的挑战

- 复合材料制件固化成型过程**多物理场交互耦合**，使得**数值模拟难以实现其精确预测和控制**。

一、课题研究背景、现状与思路

□ 课题研究思路



二、复合材料制件热-流-固强耦合建模分析



热-流-固强耦合数值建模及研究思路

传热模型

基于**传热传质**和**固化反应放热方程**：

$$\rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r C_r v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = K_{ii} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + Q \quad (i = x, y, z)$$

$$Q = \rho_r V_r H_u \frac{d\alpha}{dt}$$

温度T

固化度α

固化动力学模型

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2\alpha)(1-\alpha)(0.47-\alpha) (\alpha \leq 0.3) \\ \frac{d\alpha}{dt} = K_3(1-\alpha) (\alpha > 0.3) \end{cases}$$

$$K_j = A_j \exp(-E_j/RT) \quad (j=1,2,3)$$

温度T ↓

固化度α ↓

代入**黏度方程**： $\mu = \mu_\infty \exp(U/RT + K\alpha)$

黏度μ ↓

树脂流速v_i
树脂体积分数V_r

基于**有效应力**和**多孔弹性介质原理**，根据Gutowski的“**挤压海绵模型**”：

$$v_i = -\frac{S_{ii}}{\mu} \frac{\partial p_r}{\partial z} \quad (i = x, y, z) \quad m_v \frac{\partial p_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S_{ii}}{\mu} \frac{\partial p_r}{\partial i} \right) \quad (i = x, y, z) \quad m_v = -\frac{1}{1+e} \frac{de}{d\sigma'} \quad e = \frac{V_r}{V_f}$$

$$e = \begin{cases} -1.552 \times 10^{-6} \sigma' + 0.81, & \text{for } 0 \leq \sigma' \leq 68.95 \times 10^3 \text{ Pa} \\ -0.247 \log_{10} \sigma' + 1.899, & \text{for } \sigma' > 68.95 \times 10^3 \text{ Pa} \end{cases} \quad \sigma = \sigma' + P_r \quad [\sigma'] = [C][\varepsilon']$$

流动压实模型

本章研究思路

首先以等厚层合板制件为对象，验证模型的准确性和可靠性

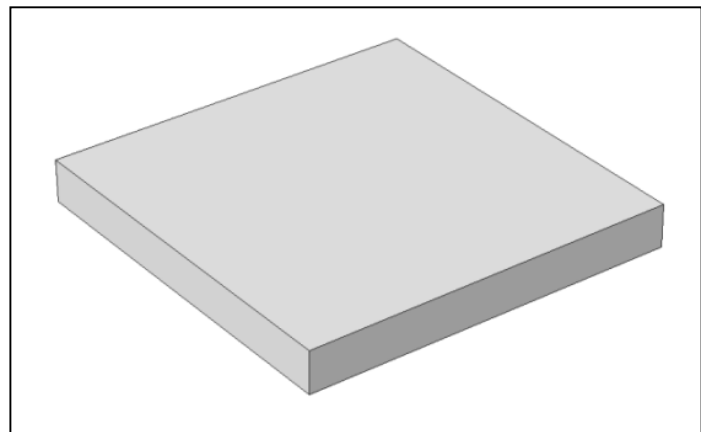
变截面制件温度场、固化度场以及树脂流场分析

二、复合材料制件热-流-固强耦合建模分析

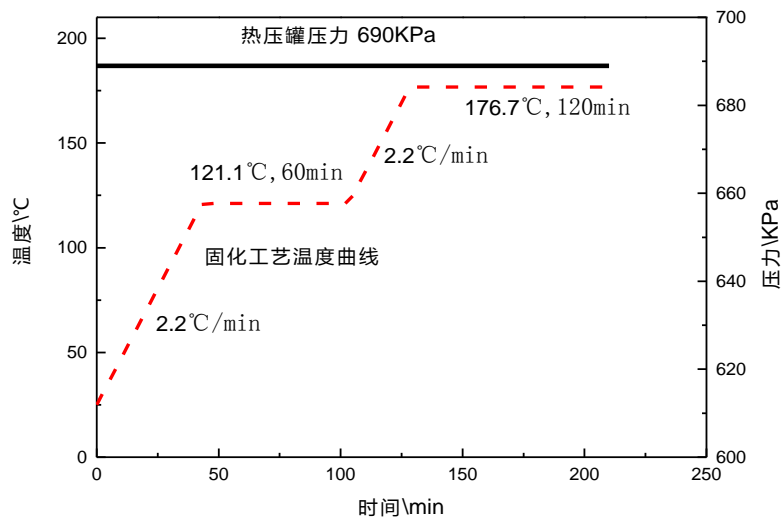


模型验证-有限元仿真建模

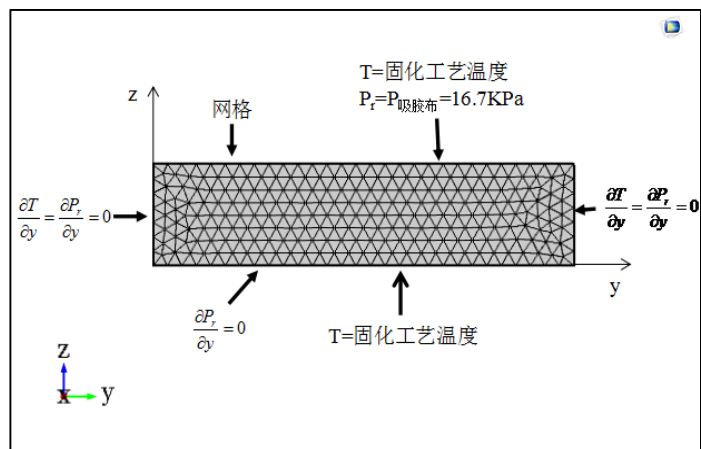
- 制件下表面与模具接触，添加固化工艺温度；上表面覆盖吸胶布和透气毡等，设定上表面和环境温度的对流换热系数为 $38W/(m^2 \cdot K)$ 。
- 初始状态下树脂承担所有压力(0.689MPa)，上表面包裹吸胶布，树脂流出出口压力为16.7KPa；四周及下表面树脂无流动；
- 下表面与模具接触，定义为固定约束。



层合板几何模型 $15.26 \times 15.26 \times 3.576\text{cm}$



AS43501-6预浸料的固化工艺曲线



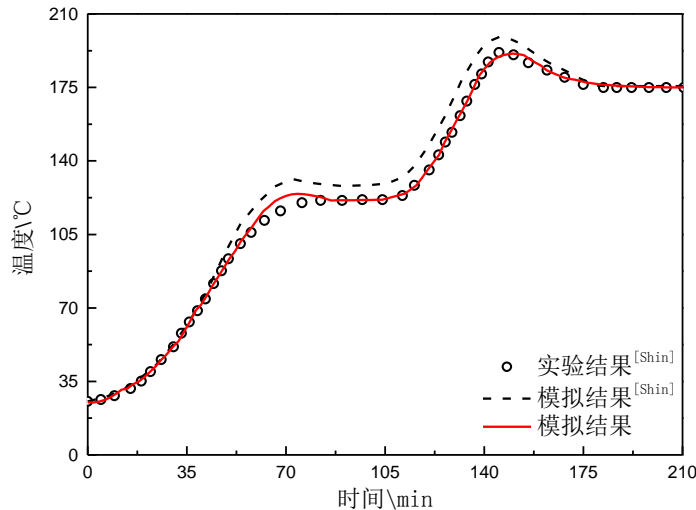
数值模拟边界条件及网格划分

二、复合材料制件热-流-固强耦合建模分析

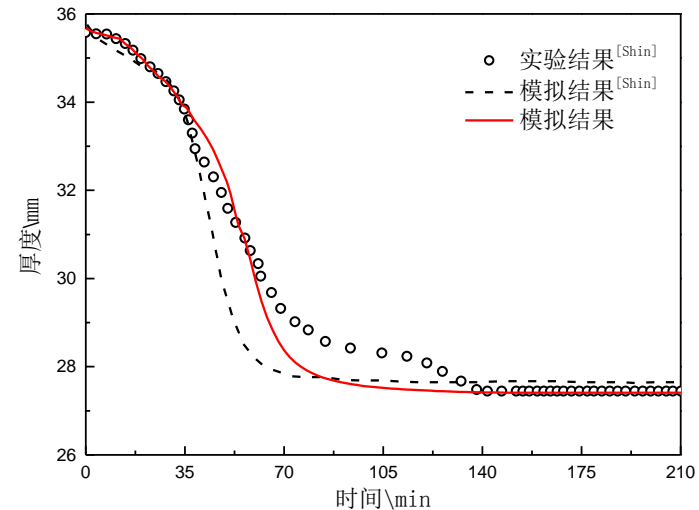


□ 模型验证-结果分析

- 本文层合板制件中心点温度峰值的数值计算结果，与实验结果误差为 2.5°C ，相比Shin没有考虑树脂流动对温度场影响的数值计算结果，**精度提高了19%**。
- 相比Shin没有考虑树脂流动的数值计算结果，本文层合板制件厚度压实的数值计算结果，与实验结果误差由Shin的 **0.23mm** 减小到 **0.04mm** 。



层合板中心点温度模拟结果与实验结果对比



层合板厚度压实模拟结果与实验结果对比

小结：本文复合材料制件固化成型过程热-流-固多场强耦合仿真计算结果与实验结果更加贴合，相比参考文献中不考虑树脂流动的仿真具有**更高的可靠性**。

三、复合材料制件内应力演变规律及脱模变形



□ 固化变形数值建模及研究思路

纤维和树脂体积分布

基于细观力学模型来确定复合材料的宏观力学特性

$$E_1 = E_{1f}V_f + E_m(1-V_f) + \frac{4(v_m - v_{12f}^2)k_f k_m G_m (1-V_f)V_f}{(k_f + G_m)k_m + (k_f - k_m)G_m V_f}$$

$$E_2 = E_3 = \frac{1}{(1/4k_T) + (1/4G_{23}) + (v_{12}^2/E_1)}$$

$$G_{12} = G_{13} = G_m \frac{(G_{12f} + G_m) + (G_{12f} - G_m)V_f}{(G_{12f} + G_m) - (G_{12f} - G_m)V_f}$$

$$G_{23} = \frac{G_m [k_m (G_m + G_{23f}) + 2G_{23f}G_m + k_m (G_{23f} - G_m)V_f]}{k_m (G_m + G_{23f}) + 2G_{23f}G_m - (k_m + 2G_m)(G_{23f} - G_m)V_f}$$

$$v_{12} = v_{13} = v_{12f}V_f + v_m(1-V_f) + \frac{(v_m - v_{12f})(k_m - k_f)G_m(1-V_f)V_f}{(k_f + G_m)k_m + (k_f - k_m)G_m V_f}$$

$$v_{23} = \frac{2E_1 k_T - E_1 E_2 - 4v_{12}^2 k_T E_2}{2E_1 k_T} \quad k_T = \frac{(k_f + G_m)k_m + (k_f - k_m)G_m V_f}{(k_f + G_m) - (k_f - k_m)V_f}$$

$$k_i = \frac{E_i}{2(1 - \nu_i - 2\nu_i^2)}, i = f, m$$

温度场和固化度场

宏细观本构模型

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t Q_{ijkl}(\alpha, T, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\varepsilon_{kl}(t) - \varepsilon_{kl}^{tc}(t)] dt$$

$$\varepsilon_{kl}^{tc} = (\alpha_i + \frac{\varepsilon_i^c}{\Delta T}) \Delta T (i=1,2,3)$$

内应力 σ^0 内应变 ε^0

脱模固化变形和残余应力模型

$$\sigma_{ij} - \sigma^0 = [Q_{ijkl}] [\varepsilon_{kl} - \varepsilon^0]$$

本章研究思路

首先以有实验数据支撑且研究比较多的L型制件为对象进行对比分析，验证模型的可靠性

变截面制件固化变形及残余应力分析

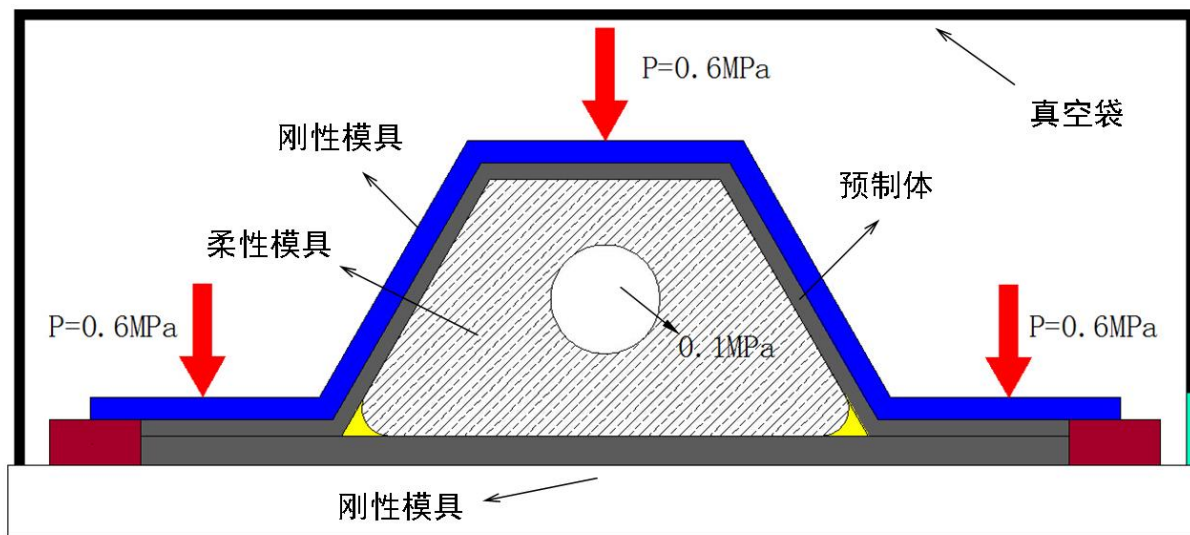
式中，1代表纤维方向，2和3代表垂直于纤维方向，f为纤维，m为树脂。

四、基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真

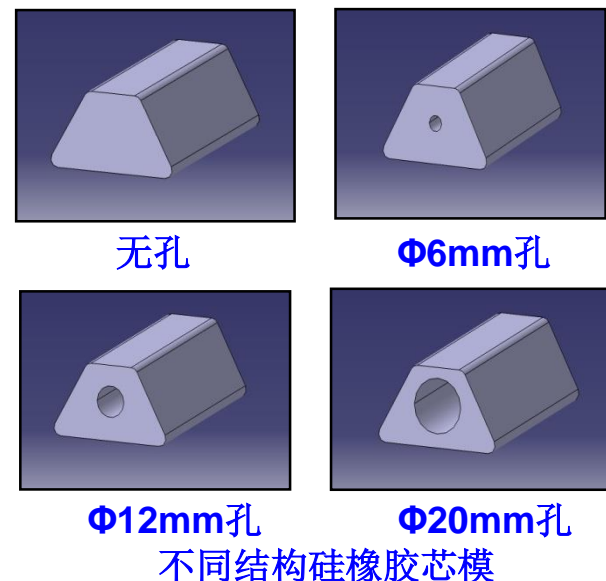


□ 帽型加筋制件有限元建模

- 帽形加筋结构制件是一个带曲率、变截面而且具有封闭空腔的复杂加筋壁板结构。
- 帽形加筋结构制件固化成型过程中，由于帽型制件的封闭梯形空腔结构的特征，需要内置芯模支撑、外覆工艺盖板以保证固化过程中帽型加筋结构制件内部压力可达。



内、外模具辅助成型复合材料帽形制件示意图

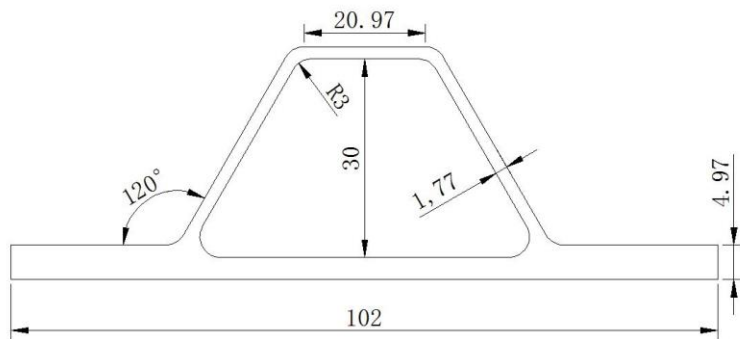


- 本文通过在硅橡胶芯模内部预制调型孔，实现硅橡胶芯模在固化过程中的压力可控，但是预制调型孔孔径的大小与帽型制件成型质量紧密相关，需要建立基于压力场均匀调控的调型孔孔径模型，最终实现对帽型制件的维形保压效果。

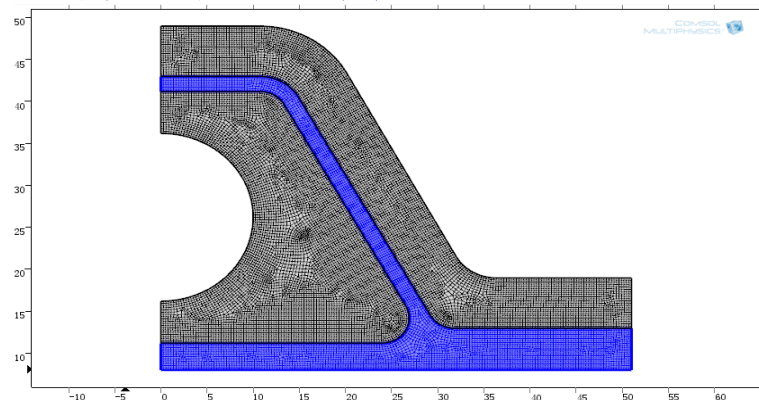
四、基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真



帽型加筋制件成型过程装配体统一有限元建模



复合材料帽型加筋结构尺寸



复合材料帽型加筋结构成型装配体网格建模

➤ **初始条件**为：工艺盖板、预制体和硅橡胶芯模初始温度为 20°C ，预制体初始固化度为0，树脂承担全部固化压力 0.6MPa ；

➤ **边界条件**为：工艺盖板上表面以及预制体下表面添加固化工艺温度，其他表面绝缘；工艺盖板上表面施加固化工艺压力 0.6MPa ，芯模预制调型孔施加 0.1MPa 边界载荷，预制体底面与侧面均设置成固定约束且无流动；盖板/预制体以及芯模/预制体之间分别定义成独立的接触对，忽略界面传热系数及界面摩擦系数，在传热和传压模块中定义接触对连续。

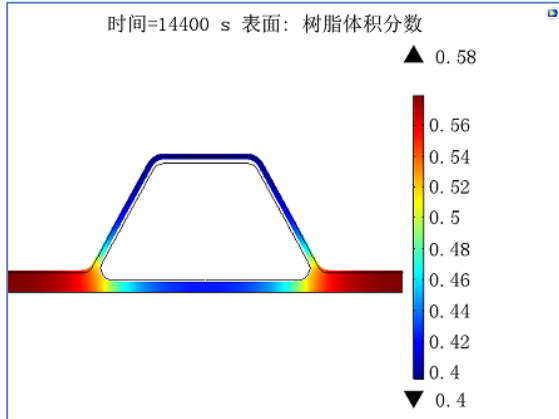
工艺盖板和硅橡胶芯模材料参数

参数及数值	工艺盖板	硅橡胶芯模
弹性模量(Pa)	210×10	2.15×10
泊松比	0.31	0.48
密度(kg/m)	7850	1100
导热系数(W/(m*K))	45.4	0.23
常压热容(J/(kg*K))	480	800
热膨胀系数(1/K)	12.32×10	3.15×10

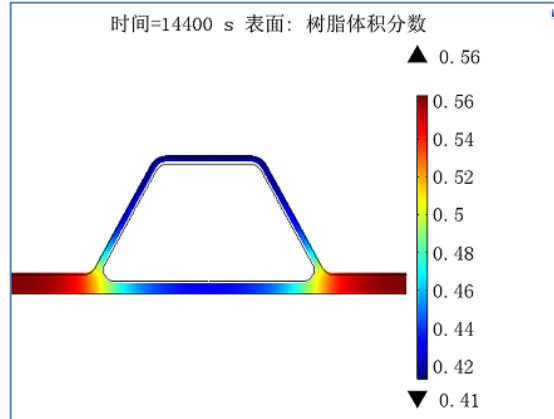
四、基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真



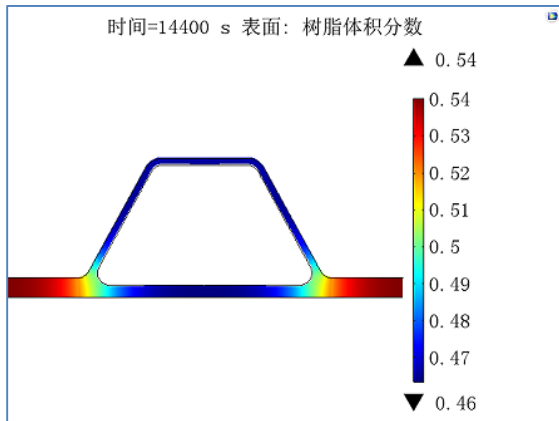
仿真结果分析-帽型制件树脂体积分数



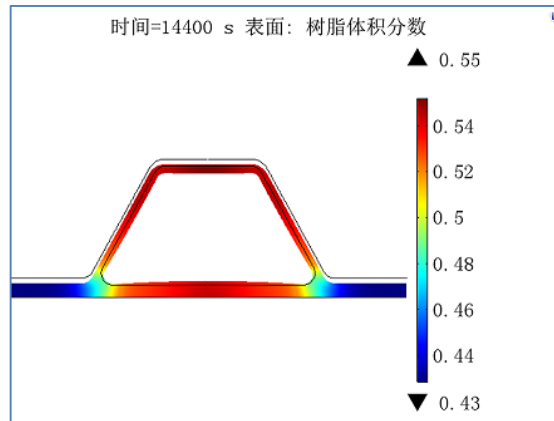
无孔



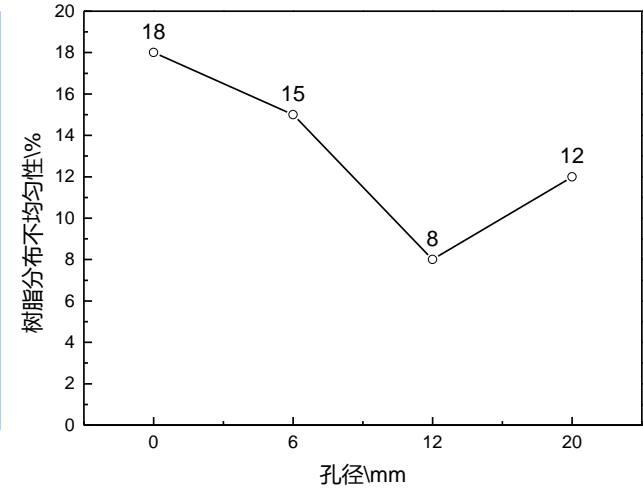
Φ6mm孔



Φ12mm孔



Φ20mm孔



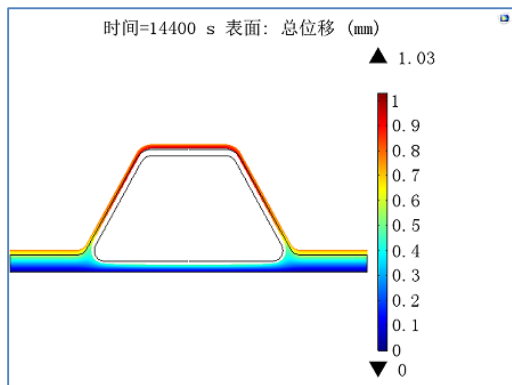
帽型制件树脂分布不均匀性

➤ 当硅橡胶芯模预制调型孔孔径为**12mm**时，辅助成型的帽型加筋结构制件**树脂分布较均匀**，不均匀性为**8%**。

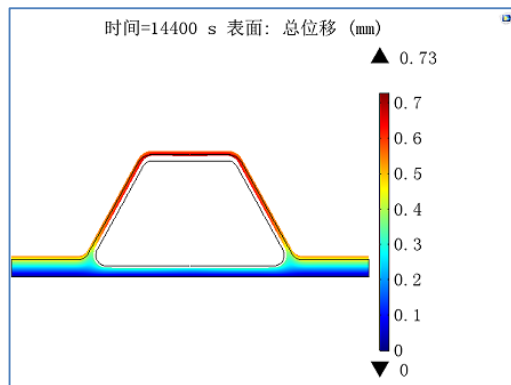
四、基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真



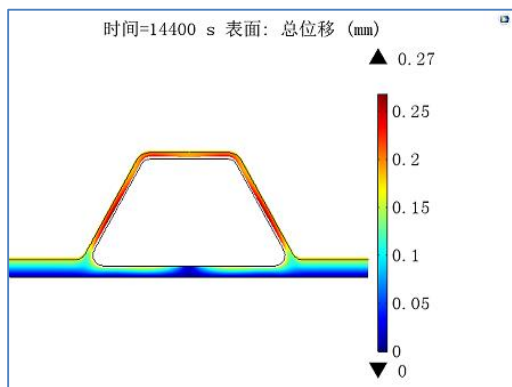
仿真结果分析-帽型制件固化压实云图及成型精度



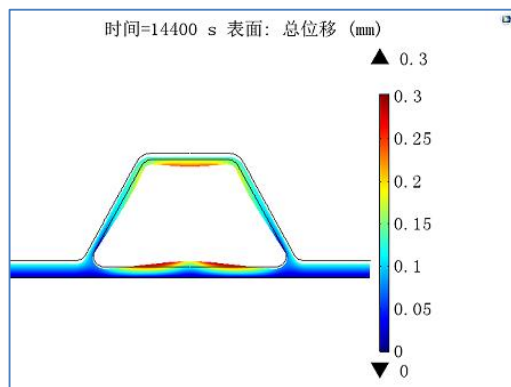
无孔



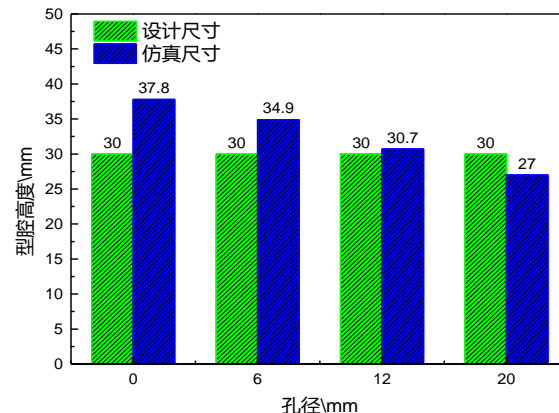
Φ6mm孔



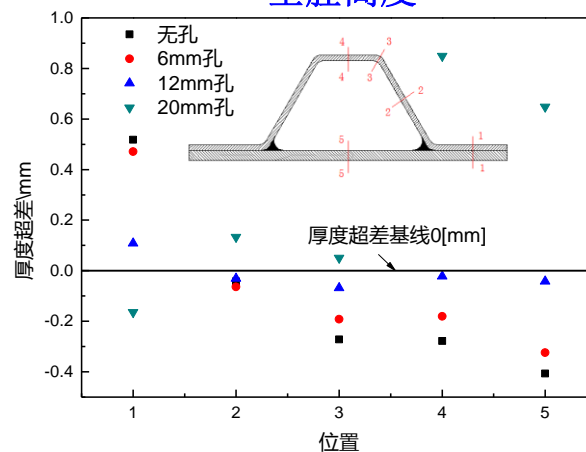
Φ12mm孔



Φ20mm孔



型腔高度



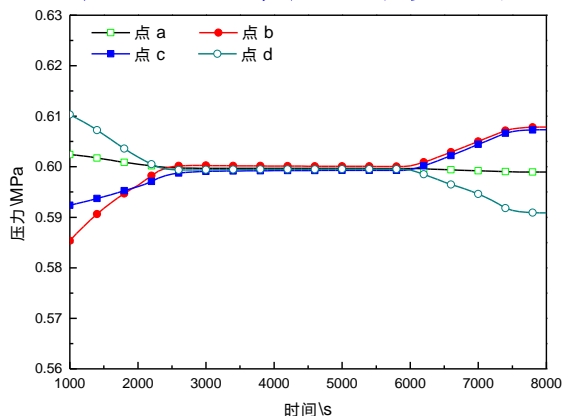
厚度偏差

➤当硅橡胶芯模预制调型孔孔径为12mm时，辅助成型的帽型加筋结构制件成形精度较好。

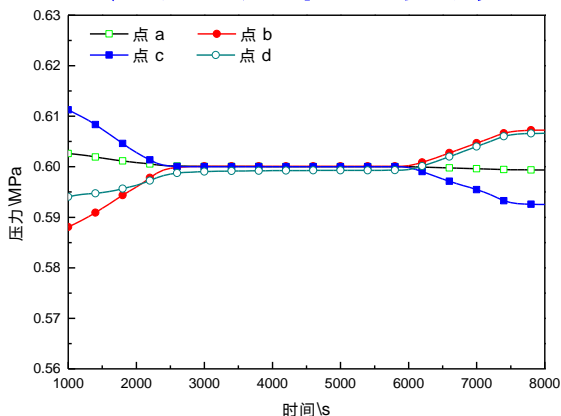
四、基于COMSOL的复合材料帽型件的建模仿真



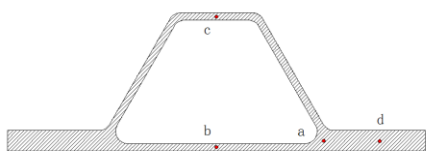
仿真结果分析-预制调型孔最佳尺寸范围的确定



Φ11.5mm孔

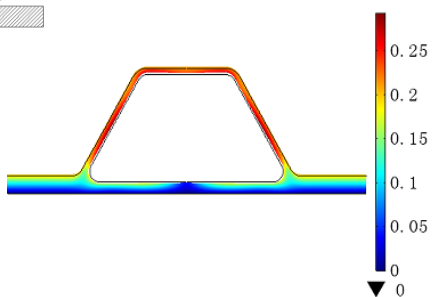


Φ12.5mm孔



时间=14400 s 表面: 总位移 (mm)

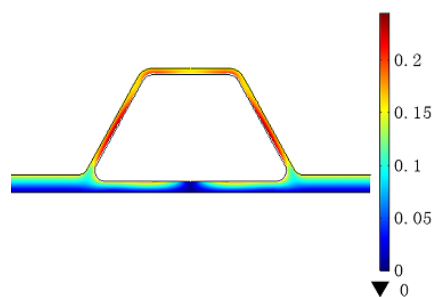
▲ 0.29



Φ11.5mm孔

时间=14400 s 表面: 总位移 (mm)

▲ 0.25



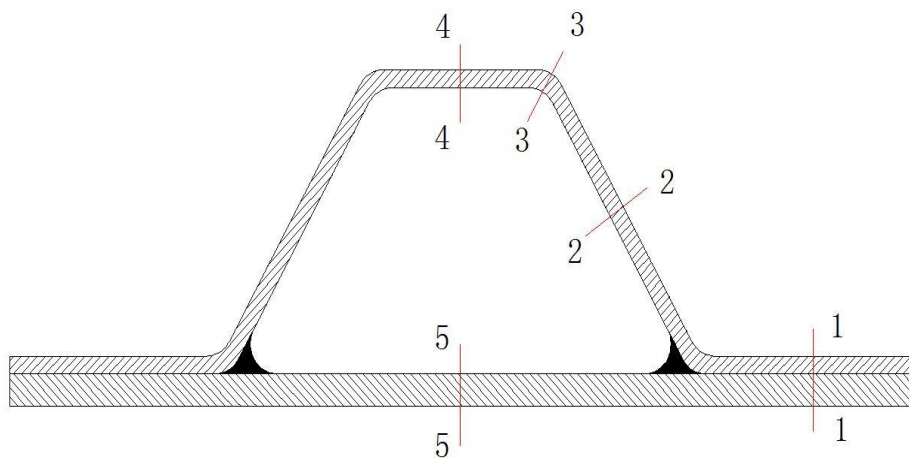
Φ12.5mm孔

➤当硅橡胶芯模预制调型孔孔径为11.5~12.5mm时，辅助成型的帽型加筋结构件**固化压力较均匀**，并且能够较好**维持初始设计尺寸**。可确定对于该类复合材料帽型加筋结构成型所需硅橡胶芯模调型孔孔径的最佳尺寸范围为**d=11.5mm~12.5mm**。

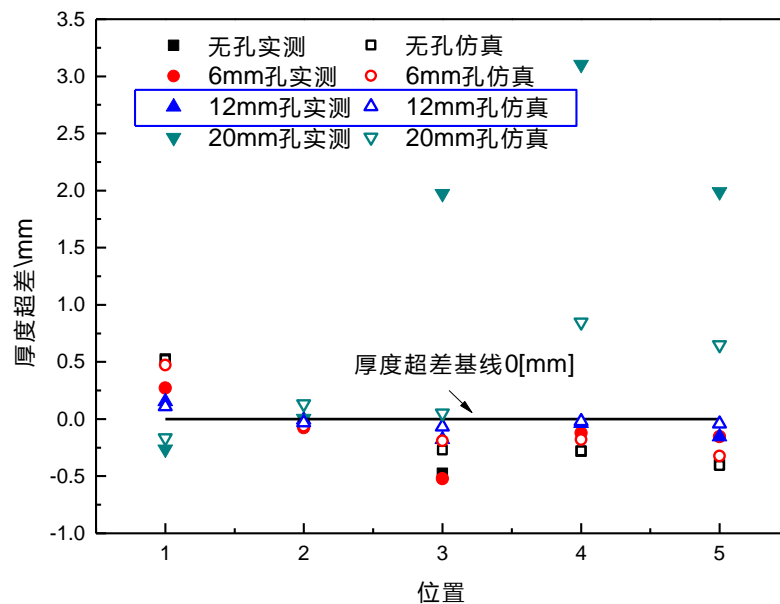
五、基于实验验证的复合材料制件形性协同制造



实验结果分析-帽型制件几何成形精度(厚度超差)



帽型加筋结构制件厚度超差测量位置



不同硅橡胶芯模结果辅助成型帽型加筋结构制件厚度超差仿真结果与实测结果对比

➤ 硅橡胶芯模预制调型孔对帽型加筋制件型腔精度、厚度精度影响研究，结果表明：硅橡胶芯模预制调型孔孔径为**12mm**时，可获得较好的型腔及厚度精度，并且**与仿真结果吻合较好**。

六、总结



- 1.使用 COMSOL Multiphysics® PDE 和传热模块模拟了复合材料固化过程的温度场和固化度场变化的过程。
- 2.使用 COMSOL Multiphysics® 结构力学模块中的固体力学和多孔弹性接口进行了复合材料固化过程的热流固强耦合分析得出残余应力、固化变形等，为优化复合材料制件成型工艺提供理论依据。

**Thank you
for your attention**

