

# 蜂窝夹层结构中粘结剂层的建模与仿真

刘少鹏<sup>1,2</sup> 翟黎明<sup>1</sup> 李志强<sup>1</sup> 梁福祥<sup>1</sup> 饶聪<sup>1</sup> 王鑫<sup>1</sup>

(1. 一汽解放动力总成事业部, 无锡 214000; 2. 德国德累斯顿工业大学固体力学研究所, 德累斯顿 01069)

**摘要:** 为分析夹层结构制造过程中粘结剂层对表面质量的影响, 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为主要研究对象, 在有限元分析软件ABAQUS中进行建模分析, 通过加热和加压2个过程研究在夹层结构的热压制造过程中粘结剂对表面质量的影响, 结果表明: 当仅考虑加热过程时, 由于粘结剂的粘弹性, 随着温度的升高, PMMA变软, 导致表面波纹度增大; 当仅考虑加压过程时, 粘弹性对表面波纹度几乎无影响; 当热压耦合时, 表面波纹度比单独考虑加热或加压的更大; 粘结剂越软, 表面波纹度越大。通过调整粘结剂的特性, 可以有效控制夹层结构的表面质量, 从而提高产品的整体质量。

**关键词:** 纸基蜂窝夹层结构 粘结剂 有限元分析 粘弹性 表面波纹度

**中图分类号:** U463.8 **文献标志码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240379

## Modeling and Simulation of the Adhesive Layer in Honeycomb Sandwich Structures

Liu Shaopeng<sup>1,2</sup>, Zhai Liming<sup>1</sup>, Li Zhiqiang<sup>1</sup>, Liang Fuxiang<sup>1</sup>, Rao Cong<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>

(1. FAW Jiefang Engine Division, Wuxi 214000; 2. Technische Universitaet Dresden Institut fuer Festkoepfermechanik, Dresden 01069)

**Abstract:** In order to analyze the influence of the adhesive layer on the surface quality during the manufacturing process of the sandwich structure, modeling and analysis are carried out in the finite element analysis software ABAQUS with PMMA as the main research object. During the hot-pressing manufacturing process of the sandwich structure, the influence of the adhesive on the surface quality is studied through the 2 processes of heating and pressurization. The results show that when only the heating process is considered, due to the viscoelasticity of the adhesive, PMMA will become softer as the temperature rises, which will lead to an increase in the surface waviness; when only the pressurization process is considered, the viscoelasticity has almost no effect on the surface waviness. When the hot-pressing is coupled, the surface waviness will be greater than that when only heating or pressurization is considered alone; the softer the adhesive, the greater the surface waviness. By adjusting the characteristics of the adhesive, the surface quality of the sandwich structure can be effectively controlled, thereby improving the overall quality of the product.

**Key words:** Paper-based honeycomb sandwich structure, Adhesive, Finite element analysis, Viscoelasticity, Surface waviness

## 1 前言

汽车制造中越来越多地采用轻量化结构, 例如使用复合材料或纸基材料的结构<sup>[1]</sup>, 在不降低机械性能的同时实现轻量化。

夹层结构是提高轻量化水平的典型策略<sup>[2-3]</sup>, 通过热压成形技术可以制造车身所需的夹层结构。蜂窝芯夹层结构在飞机舱部件中得到了广泛使用<sup>[4]</sup>。在高速客车中使用夹层蜂窝结构能减重40%, 同时提供降噪和减振等功能<sup>[5-6]</sup>。典型的夹

作者简介: 刘少鹏(1996—), 男, 硕士学位, 主要研究方向为CAE/CFD模拟仿真、结构与优化。

参考文献引用格式:

刘少鹏, 翟黎明, 李志强, 等. 蜂窝夹层结构中粘结剂层的建模与仿真[J]. 汽车工艺与材料, 2025(1): 10-16.

LIU S P, ZHAI L M, LI Z Q, et al. Modeling and Simulation of the Adhesive Layer in Honeycomb Sandwich Structures[J]. Automobile Technology & Material, 2025(1): 10-16.

层结构由多层材料组成,包括上、下两层和中间芯层。生产夹层结构时,上、下层与中间芯层之间需要使用粘结剂,使各层间紧密结合,热压后形成一个整体结构。

为了使产品能够用作车身外壳,需保证纸基夹层结构的表面质量。目前,夹层结构表面存在明显的不平整,可以通过表面波纹度来衡量。为分析和改善夹层结构的表面质量,基于有限元分析软件 ABAQUS 开发适用于纸基夹层结构压制过程的有限元模型。在实际生产中,粘结剂会对夹层表面的形状偏差造成影响。因此,把粘结剂层纳入模型中进行分析,选择聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA) 作为主要粘结剂进行模拟,考虑粘结剂的粘弹性对夹层结构表面波纹度的影响,并分析其在热压过程中对夹层结构表面质量的影响,同时研究具有不同弹性模量的粘结剂对表面质量的影响。

## 2 理论基础

粘结剂的材料行为受温度和时间的影响,无法通过传统的弹塑性变形来精确描述。为了通过有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 研究粘结剂的特性, Hahn<sup>[7]</sup> 和 Wang<sup>[8]</sup> 提供了一种描述粘结剂的策略: 粘结剂的材料行为随温度升高表现出强度降低和蠕变增加的特点。因此,与线性弹性相比,粘弹性更能描述粘结剂的特性。粘弹性指的是材料部分具有弹性,部分具有粘性的特性。粘弹性材料的特性受时间和温度的影响,在有限元模拟中,将粘结剂建模为具有温度依赖性属性的粘弹性单元,使粘结剂的建模成为可能<sup>[9]</sup>。

### 2.1 ABAQUS 中的粘弹性

粘弹性材料的反应包括弹性 (瞬时) 和粘性 (与时间、温度等相关) 行为。材料的瞬时弹性反应后,当其受到固定应力时发生蠕变,并且在受到固定应变时发生应力松弛。在 ABAQUS 中,材料的变形被分为剪切和体积行为。

线性各向同性粘弹性的基本遗传积分方程如下<sup>[10]</sup>:

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\tau - \tau') \dot{e} dt' + I \int_0^t K(\tau - \tau') \dot{\phi} dt' \quad (1)$$

式中:  $e$  为剪切变形,  $\Phi$  为体积变形,  $G$  为剪切模量,  $K$  为压缩模量,  $I$  为调整体积变形对应力贡献比例的系数,  $t'$  为积分变量,  $\tau$  为压缩时间,  $\tau'$  与时间延迟或者记忆效应有关。

$\tau - \tau'$  表明材料的性质 (剪切模量和压缩模量) 与时间差有关。通过积分微分方程将压缩时间与实际时间联系起来:

$$\tau = \int_0^t \frac{dt'}{A_\theta(\theta(t'))} \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{A_\theta(\theta(t))} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为温度,  $A_\theta$  为位移函数 (当  $A_\theta=1$  时,  $\tau=t$ )。

由此便可将温度与变形程度联系起来,以实现材料的粘弹性。在 ABAQUS 中通过设置相对应的参数来实现粘弹性的设置。

### 2.2 ABAQUS 中使用的网格单元类型

在有限元分析中,网格类型的选择对于模拟结果的准确性、计算效率和经济性均有重要影响。因此,有必要根据模型的不同区域、受力情况和几何形状来选择适当的网格类型。SC8R 网格在计算精度和计算时间上表现更好,因此,可作为粘结剂的网格类型之一。C3D8R 网格是 ABAQUS 中常用的体积网格,它是带有减少积分的线性六面体元。这 2 种网格均为三维建模中常用的网格类型,因此本文同时使用这两种网格进行对比,选出较优的网格单元。

SC8R 网格在厚度方向上没有明确的层数规定。在早期研究中,使用 SC8R 网格时只采用了 1 层厚度方向,并取得了良好的模拟结果。因此,SC8R 网格的模型被设定为只有 1 层厚度方向。而 C3D8R 网格中,厚度方向的层数应至少设置为 4,以控制沙漏值。SC8R 网格属于连续壳单元,仅具有位移自由度,这意味着厚度是根据元素节点几何形状确定的。正确对齐连续壳单元非常重要,因为厚度方向和平面方向之间的行为有所不同。在 ABAQUS 中,通过指定模型的上面和下面来确定厚度方向。如果未设置厚度方向,则标准方向通常与实际厚度方向不符,可能导致错误的计算结果。由于 C3D8R 网格本身为体积单元,已包含实际厚度,因此不需要额外的设置。

### 2.3 表面质量的评价标准

表面质量的评价通常基于 2 个指标:表面粗糙度和表面波纹度。表面粗糙度通常用来描述表面的微观结构,比如微小的凹凸、起伏、坑洼等。表面波纹度是指表面的波动或波形,它通常用来描述表面的整体形态、起伏和轮廓,可以是微观或宏观的。表面波纹度的特征可以包括波峰、波谷、波长、波高等。表面粗糙度更侧重于描述表面的微小凹凸和不规则性,而表面波纹度更关注表面整体形态和波动特征。对于车身外壳的表面质量,更看重宏观上的形态和轮廓,因此本文选择表面波纹度对表面质量进行评价。

为了评价模拟结果的收敛性,需要对表面数据进行处理,仅通过简单比较应力云图或特定路径的坐标不能准确确定表面质量。因此,需要使用滤波器对表面的坐标数据进行处理,通过计算经过滤波处理的表面波纹度,可以分析结果的收敛性。

本文使用高斯滤波器对表面数据进行处理。高斯滤波器是一种低通滤波器。低通滤波器允许低频信号(即形状轮廓)通过,同时滤除高频信号(即表面粗糙度)。 $\lambda_f$  滤波器用于定义从形状波纹到更长波长的过渡。 $\lambda_c$  滤波器用于定义从粗糙度到形状波纹的过渡。处理后的表面波纹度是通过将  $\lambda_c$  和  $\lambda_f$  滤波器应用于原始轮廓而产生的轮廓,其中短波和长波形状偏差被抑制,留下稳定的部分。高斯滤波器所使用的权重函数为:

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_f} \cdot e^{-\pi(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_f})^2} \quad (3)$$

式中: $x$  为权重函数中心(最大值)的距离, $\lambda_f$  为从形状波纹过渡到更长波长的边界波长, $\alpha$  为提供在边界波长  $\lambda_f$  处 50% 的传输特性而设定的常数。

使用以下 2 个特征参数对过滤后的表面波纹度进行评价。

如图 1 所示, $W_a$  为表面形状轮廓线纵坐标绝对值的算术平均值,它表示了轮廓与中心线的平均偏差:

$$W_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4)$$

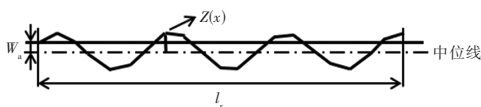


图 1 表面波纹度的算术平均值

如图 2 所示, $W_z$  为表面形状轮廓线高度的平均值。它是沿着单个测量段  $l_r$  的最大轮廓峰值高度与最大轮廓谷底深度之间的差值的算术平均值:

$$W_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_c(i) \quad (5)$$

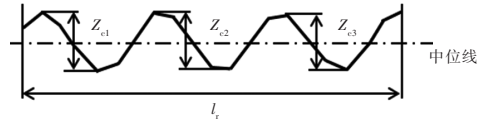


图 2 表面波纹度高度的平均值

### 3 夹层结构模型搭建

#### 3.1 夹层结构的压制模型

本文在现有的压制模型中添加粘结剂层来进行夹层结构的建模。压制模型基于某公司设计的夹层蜂窝结构(见图 3)。夹层结构通常由 2 个外表面层和 1 个内部芯层组成。纸基正弦波状蜂窝是夹层结构的中间芯层,玻璃纤维与聚氨酯(Polyurethane, PU)树脂制造的复合材料为外表面层。此外,最外层通过喷漆涂装等加工后用作隔离层。

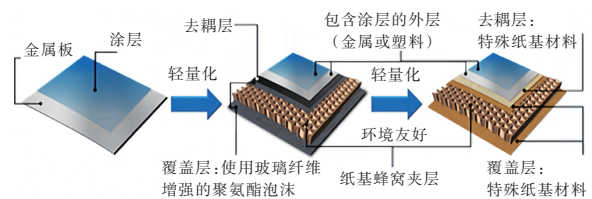


图 3 某公司所使用的纸基夹层结构

夹层结构的压制和成形过程已在现有的压制模型中进行了模拟。通过 FEM 和试验制造,研究了热压成形过程对纸基复合材料表面质量的影响。正弦波蜂窝的形状在压制过程中导致夹层结构表面形成凸起且不均匀的波纹。如图 4 所示为没有粘结剂层的压制模型。该模型共由 5 层组成:蜂窝芯层、上模具、下模具、上面板和下面板。蜂窝层的形状参数可以根据需求进行调整,例如振幅、周期和相位角。

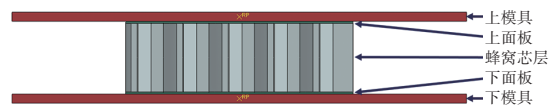


图 4 夹层结构的压制模型

#### 3.2 考虑粘结剂层的压制模型

在实际制造夹层结构时,上面板不直接与蜂窝芯层接触,而是通过粘结剂连接。通过压合过

程,粘结剂层被压入蜂窝和上板之间。为了简化模型并减少仿真时间,可以假设蜂窝和上板是相互连接固定的。在上面板外层还有一层 Senoplast 塑料材料。在上面板和 Senoplast 之间,也有一层粘结剂,其影响不可忽视。本文讨论该粘结剂层对表面质量的影响。为了有效模拟含粘结剂层的压制过程,本文采用了简化模型、单单元模型和多单元模型。在简化模型中,只考虑了 Senoplast、粘结剂和上面板,蜂窝芯层被视为刚性体。通过简化模型,确定了所需的网格单元、接触条件和边界条件等,如图5所示。

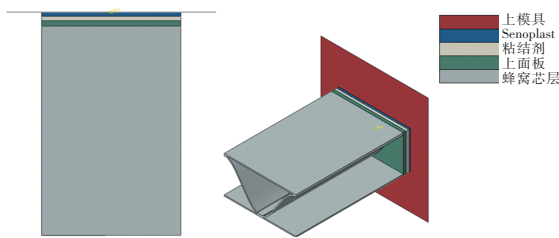


图5 简化模型

确定所需的接触条件、边界条件后,通过添加下面板和下模具得到完整的模型。同样,假设下面板和蜂窝芯层之间的粘结剂是固定耦合的。如图6所示为完整的单单元模型。在单单元模型模拟后,可以将模型从单单元扩展到六单元(即多单元模型,如图7所示)。一些模拟结果可以与单单元模型的结果进行比较:加热、加压过程,粘结剂为弹性或者粘弹性,使用不同弹性模量的粘结剂,考虑热压耦合过程。

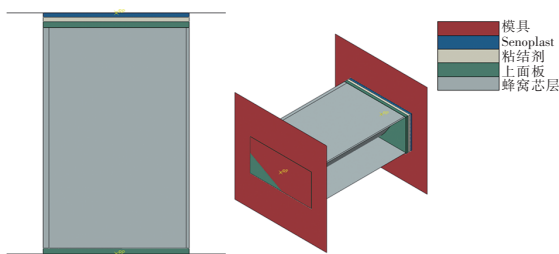


图6 带有一个单元模型

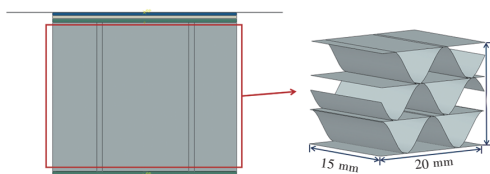


图7 带有多个单元模型

### 3.3 边界条件

材料间的接触条件是影响计算结果的关键因

素。在确定接触条件时需确定接触面的主从性。原则上,应首先选择较大的表面作为主导表面;然后选择网格较粗糙的表面作为主导表面;如果网格密度大致相等,则应选择硬度较大的材料作为主导表面。详细的接触条件如表1所示,摩擦因数为0.3,全部为面对面接触。

表1 ABAQUS中接触条件的设置

主从性	部件	接触设置
主	上模具	接触、可分离
从	Senoplast	接触、可分离
主	Senoplast	接触、不可分离
从	粘结剂	接触、不可分离
从	粘结剂	接触、不可分离
主	上面板	接触、不可分离
主	上面板	固定
从	蜂窝芯层	固定
从	蜂窝芯层	固定
主	下面板	固定
从	下面板	接触、可分离
主	下模具	接触、可分离

在简化模型中,将蜂窝芯层设置为刚性体,在相互作用(Interaction)选项中进行配置。蜂窝芯层的中心点被选为参考点(Reference Point, RP)。在建模过程中,蜂窝芯层被设置为刚性体,其RP在加热或加压过程中均被设定约束所有自由度( $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ )。上模具被设定为只沿z轴方向移动( $U_3=0$ )。在单单元或多单元模型中,蜂窝芯层设置为可变形体,下模具被固定。施加在刚性体上的约束条件必须作用于RP,在整个分析过程中,刚性体内的节点相对于RP保持不变。

在具有复杂接触条件的复杂模型中,通常通过使用显式方法来求解材料力学行为的本构方程。在显式方法中,通常选择时间离散化的二次方法(如中心差分法)。显式求解器非常快速,因为它们只需要将时间点t的状态向量与一个矩阵相乘,而不需要在每个时间步长 $\Delta t$ 中解完整的方程组。因此,它们被用于高动态和高非线性过程,例如碰撞或成形模拟,以及非常复杂的模型。并且由于蜂窝结构的几何形状和变形复杂,当在ABAQUS中考虑几何非线性时,将为所有步骤启用

几何非线性开关(Nlgeom)设置。

本文将热压过程分解为单独加热、单独加压或者同时加热加压。在加热过程中,上模具由室温 25 °C 加热到 130 °C,下模加热到 100 °C,然后冷却到室温。由于温度升高,材料会发生热膨胀。与其他层相比,粘结剂层受温度影响更大,因为它不仅会热膨胀,还会由于温度导致粘弹性变化。因此,在考虑温度影响时,重点应放在正常弹性粘结剂和粘弹性粘结剂之间的差异上。在加压过程中,通过上模具的下压和抬升模拟压制过程。模具的运动速度与试验中保持一致,为 0.5 mm/s。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 不同网格类型的模拟结果比较

粘结剂层分别使用 SC8R 和 C3D8R 网格单元进行建模。首先需要在简化模型中确定网格的类型与大小。如图 8 所示为在加热模型中使用不同网格类型和尺寸的模拟结果。通过表面中某一剖面来展示表面变形,并可由此剖面计算表面波纹度。

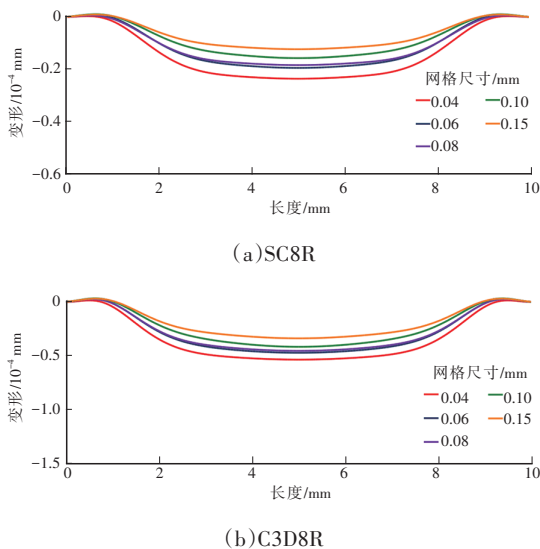


图 8 不同网格类型尺寸的表面剖面波形(加热过程模拟结果)

随着网格尺寸的变化,表面波纹度也在变化。由此可以得出,并非越细致的网格得到的模拟结果一定越好的,需要后续与试验结果进行比对,同时还需考虑计算成本,选择合适的网格大小进行模拟。从试验结果和计算成本角度出发,网格尺

寸选择 0.08 mm 或 0.1 mm。

比较结果表明,在加热过程中,使用 SC8R 网格和 C3D8R 网格得到的模拟结果之间存在明显差异。为了排除厚度方向层数对模拟结果的影响,将 SC8R 网格的厚度方向层数从 1 增加到 5,结果如表 2 所示。

表 2 SC8R 网格层数和结果与 C3D8R 对比(加热过程模拟结果)

参数	SC8R 1层	SC8R 2层	SC8R 3层	SC8R 4层	SC8R 5层	C3D8R 5层
节点数	36 933	42 286	47 639	52 992	58 345	58 345
$W_a/\mu\text{m}$	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.070
$W_z/\mu\text{m}$	0.036	0.037	0.036	0.036	0.036	0.146
时间/s	16 620	21 965	23 210	29 197	38 441	49 883

结果表明,厚度方向的层数几乎不会对结果产生影响。这种差异可能是由于 SC8R 和 C3D8R 网格单元的本构方程在热膨胀方面的差异造成的。由于 SC8R 单元基于板理论,忽略了一些因素,这导致了结果的偏差。其次,可能是因为模型中只有一个单元,模型过小使得结果并不稳定。如果在更大的模型中增加单元格的数量,处理更多的数据,结果的差异可能会减小。

因此,在比较中加入多单元模型的模拟结果。表 3 显示,在拥有六单元的大模型中,网格单元类型造成的差异明显减小。相对于只拥有一个单元的模型,更大的模型的稳定性更好,但是相对应的计算成本将大幅增加。在后续的模拟中,可以使用简单模型确认边界条件等参数,待模拟能够稳定运行时,可以适当扩充模型,增加模型稳定性。

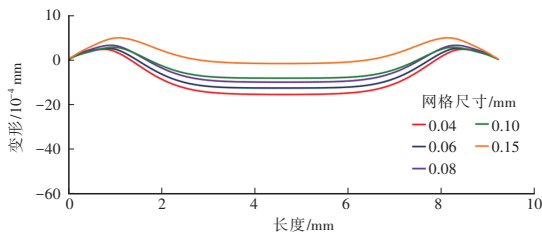
表 3 对比小模型与大模型的模拟结果

模型	网格	$W_a/\mu\text{m}$	差异/%	$W_z/\mu\text{m}$	差异/%
单单元 小模型	SC8R	0.029	68.8	0.054	71.9
	C3D8R	0.094		0.194	
多单元 大模型	SC8R	2.232	10.7	8.583	6.2
	C3D8R	2.500		9.154	

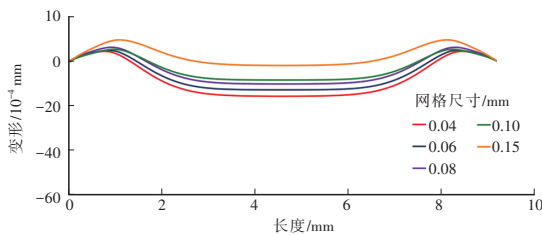
试验测得仅受温度影响的表面波纹度  $W_a$  约为 0.02~0.05  $\mu\text{m}$ , SC8R 网格单元计算得到的结果可以接受。因此,在后续的建模中应使用壳单元 SC8R 进行建模,在确保准确率的前提下,计算成

本将大幅降低。

在加压过程中,上模具的移动模拟了压制过程。对于网格类型与尺寸的影响,压制过程得出的结论印证了加热过程的模拟结果,在此不再赘述,如图9所示为加压过程的模拟结果。与加热过程的结果相比,在加压过程中,SC8R和C3D8R的差异并未过大(表4)。由此可见,当表面变形足够大(表面波纹度  $W_a$  从  $0.019 \mu\text{m}$  提升到  $5 \mu\text{m}$ )或模型足够大时,网格差异对结果的影响越小。



(a)SC8R



(b)C3D8R

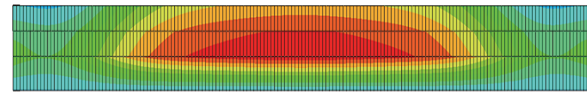
图9 不同网格类型尺寸的表面剖线波形(加压过程模拟结果)

表4 SC8R 网格层数和结果与 C3D8R 对比(加压过程模拟结果)

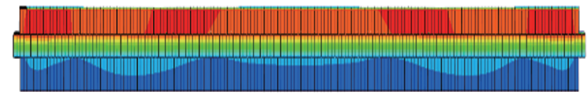
参数	SC8R 1层	SC8R 2层	SC8R 3层	SC8R 4层	SC8R 5层	C3D8R 5层
节点数	36 933	42 286	47 639	52 992	58 345	58 345
$W_a/\mu\text{m}$	5.492	5.604	5.617	5.626	5.625	6.751
$W_z/\mu\text{m}$	16.34	16.63	16.59	16.60	16.60	22.10
时间/s	33 855	46 562	54 971	65 307	71 813	77 759

#### 4.2 粘弹性的影响

通过比较弹性粘结剂和粘弹性粘结剂的模拟结果,分析粘弹性在加热过程中对表面质量的影响。由图10和表5可以得出以下结论:在加热过程中,由于粘弹性导致粘结剂变软,表面波纹度变大。这是由于温度的升高加速了粘结剂在松弛和蠕变过程中的软化,从而导致在温度升高的影响下弹性模量降低,使得夹层结构的表面变形变大。



(a)硬的弹性粘结剂



(b)软的粘弹性粘结剂

图10 弹性与粘弹性粘结剂在热载荷下的应力分布与变形对比

表5 对比考虑粘弹性时表面波纹度的变化(加热过程模拟结果)

参数	SC8R		C3D8R	
	弹性	粘弹性	弹性	粘弹性
$W_a/\mu\text{m}$	0.029	1.001	0.094	0.825
$W_z/\mu\text{m}$	0.055	2.725	0.194	2.752

而在加压过程中,由于没有温度的影响,粘弹性对表面波纹度几乎无影响,模拟结果如表6所示。

表6 对比考虑粘弹性时表面波纹度的变化(加压过程模拟结果)

参数	SC8R		C3D8R	
	弹性	粘弹性	弹性	粘弹性
$W_a/\mu\text{m}$	5.778	5.637	7.058	6.754
$W_z/\mu\text{m}$	16.27	16.29	22.19	21.85

#### 4.3 不同粘结剂对表面波纹度的影响

由于在不加热的压制过程中,粘弹性几乎不产生影响,为简化模型并节省模拟时间,在压制模型中不考虑粘结剂的粘弹性。本文主要针对3种典型的粘结剂开展研究:PMMA(硬)、PU(软)和EP(中)。从理论研究的角度来看,其他不同的粘结剂将直接根据PMMA的弹性模量的不同百分比近似替代,例如80%、60%、40%、20%和10%的PMMA弹性模量作为不同的粘结剂。如图11所示为模拟结果。

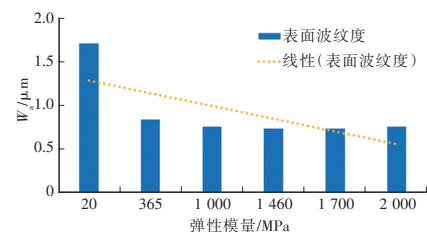


图11 不同粘结剂的表面波纹度对比

从结果来看,所用的粘结剂越软,表面波纹度越大,这与在实验室中所得结论一致。因此,为减小表面波纹度,应当选择相对较硬的粘结剂。

### 4.4 加热加压耦合的模拟结果

实际生产中,通过热压过程生产夹层结构。因此,需要通过热压耦合模拟:模具下压过程中,模具升温达到预定温度;压制结束,模具抬起,温度冷却到室温。结果如表 7 所示,热压耦合下,表面波纹度明显加大。

表 7 不同过程的表面波纹度对比 <span style="float: right;">μm</span>				
类型	参数	加热	加压	热压耦合
单单元 小模型	$W_a$	0.029	2.880	9.156
	$W_z$	0.054	9.686	18.95
多单元 大模型	$W_a$	2.232	4.540	7.093
	$W_z$	8.583	14.37	39.76

## 5 结论

a. 通过完善和扩大模型可以减小网格单元类型对结果的影响,从计算经济性和准确性角度考虑,SC8R 网格单元应作为首选;在确定网格单元尺寸时,考虑计算成本和准确性的同时,应对比试验结果,选择合适的网格单元尺寸。

b. 在加热过程中,由于粘结剂的粘弹性,粘结剂变软,表面波纹度增大。与单纯的弹性材料相比,粘弹性材料在高温下的表现需要特别关注。

c. 在加压过程中,由于没有温度的影响,粘弹性对结果无明显影响。这说明单独加压过程的表面质量主要受物理压力控制。

d. 在热压耦合过程中,相比单过程,表面波纹度明显增大。在生产中需要注意耦合效应对表面质量的影响。

e. 当使用较软的粘结剂时,表面波纹度会增大。因此,选择硬度较高的粘结剂有助于提高表面质量。

### 参考文献:

[1] STAMPB S. Material- und Prozesscharakterisierung zur Herstellung von Sandwichleichtbauteilen mit Papierwabenkern und Thermoplastischen Faserverstärkten Deck-

schichten für die Anwendung im Fahrzeuginterieur[J]. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2013.

[2] RATHBUN H, ZOK F, EVANS A. Strength Optimization of Metallic Sandwich Panels Subject to Bending[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(26): 6643-6661.

[3] XUE X, ZHANG C, CHEN W, et al. Study on the Impact Resistance of Honeycomb Sandwich Structures Under Low-Velocity/Heavy Mass[J]. Composite Structures, 2019, 226.

[4] HEIMBS S, MIDDENDORF P, MAIER M. Sandwichstrukturen in der Flugzeugkabine: Materialmodellierung und Dynamische Simulation[C]// IVW-Kolloquium. 2006: 45-56.

[5] WENBERG D. Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design Through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2011.

[6] WENBERG D, STICHEL S. Multi-Functional Design of a Composite High-Speed Train Body Structure[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 50(3): 475-488.

[7] HAHN J, JENDRY J, MAHNKEN R. Simulation der Füge- teilverformung während der Warmaushärtung von Klebstoffen: Modellierung und Experimentelle Untersuchungen an einem Schiebedachdeckel[C]// 22-nd CADFEM User Meeting, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, 2004.

[8] WANG S, STRATFORD T, REYNOLDS T. Linear Creep of Bonded FRP-Strengthened Metallic Structures at Warm Service Temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283.

[9] ROYLANCE D. Engineering Viscoelasticity. Massachusetts Institute of Technology[M]. Cambridge, MA: , 2001: 1-37.

[10] SMITH M. ABAQUS/Standard User's Manual[DB]. United States: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2020.

