

树脂基复合材料L型构件固化变形有限元分析

刘志明*, 王 坤

北京印刷学院机电工程学院, 北京

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年1月7日

摘 要

树脂基复合材料因其优异的物理和化学性能, 在航空航天、汽车、船舶等领域得到广泛应用, 其固化变形过程直接关系到构件的性能和可靠度。本文以热固性树脂基复合材料3234/T300B制作的L型构件为研究对象, 建立有限元分析模型, 利用Abaqus进行固化过程模拟, 分析固化温度和铺层角度对L型构件固化变形的影响。首先分析不同固化温度制度下L型构件的固化变形规律, 探求L型构件的最佳固化温度; 进而在该温度条件下改变铺层角度, 研究铺层角度对固化变形与功能完整性的影响规律。研究结果可为树脂基复合材料L型构件的固化工艺优化及工程结构设计提供参考。

关键词

复合材料, 固化变形, L型构件, 有限元分析

Finite Element Analysis of Curing Deformation of Resin Matrix Composite L-Shaped Components

Zhiming Liu*, Kun Wang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: December 7, 2025; accepted: December 30, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

Resin matrix composites, due to their excellent physical and chemical properties, are widely used in aerospace, automotive, and shipbuilding industries. The curing deformation process directly

*通讯作者。

impacts the performance and reliability of the components. In this study, an L-shaped component made of thermoset resin matrix composite 3234/T300B is selected as the research object. A finite element analysis model is established, and Abaqus is used to simulate the curing process, analyzing the effects of curing temperature and lay-up angle on the curing deformation of the L-shaped component. First, the curing deformation behavior of the L-shaped component under different curing temperature regimes is investigated to determine the optimal curing temperature. Then, by changing the layup angle at this temperature, the influence of the layup angle on curing deformation and functional integrity was studied. The research results can provide a reference for the optimization of the curing process and engineering structural design of resin-based composite L-shaped components.

Keywords

Composite Materials, Curing Deformation, L-Shaped Components, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

树脂基复合材料因其优异的机械性能、耐腐蚀性和轻质特性,广泛应用于航空航天、汽车、船舶等领域。但树脂基复合材料的固化过程复杂且易受外界因素影响,如材料的非均匀性、外部温度变化及铺层角度等,这些因素都可能影响最终产品的性能与可靠性。而 L 型构件作为一种常见的复合材料结构形式,其固化过程中的固化变形问题将会直接影响到最终成品的性能和可靠度,甚至会影响到改变构件的设定功能。

L 型构件作为其中的一种重要结构形式,其制造过程中的固化变形问题一直是研究的热点。因此,对于树脂基复合材料的固化变形,国内外学者进行了大量的研究,并在对其固化温度场的研究中,取得了良好成果。其中,左德峰等通过使用 OOP (Object Oriented Programming) 技术,建立固化过程的数学模型的方法,采用有限元分析技术对复合材料构件的固化温度场进行了相关的研究[1]。邬战胜等通过建立有限元分析公式来对复合材料的热传导问题进行研究,进而对厚截面树脂基复合材料的固化温度场进行了研究,并开发了相关软件来对其中复杂的物理化学变化进行模拟[2]。Qi Z 等通过建立相关的三维模型对 U 型构件的固化过程进行有限元分析,得到了构件内不同平面温度场和固化度的分布情况[3]。Sung Yi 等在考虑了材料参数随外界温度变化而变化的情况下建立了全新的复合材料层合板固化模型,通过求解其固化热传导方程进而得到了复合材料层合板的固化温度场[4]。

综上所述,尽管在复合材料固化过程的温度场模拟方面取得了显著进展,但如何在实际生产中精准控制固化温度,避免固化过程中温度过高或过低导致材料变形,仍然是一个正待解决的问题。此外,铺层角度对复合材料固化过程的影响也是一个重要的研究方向。因此,本文以 3234/T300B 复合材料为研究对象,利用 Abaqus 的有限元分析功能对树脂基复合材料 L 型构件的固化变形过程进行有限元分析,旨在研究在一定条件下的最佳固化温度及最佳固化温度下的铺层角度对固化过程的影响,以求为相关工程结构设计和后续加工生产提供可靠依据。

2. 树脂基复合材料固化变形的热传导 - 固化分析

热固性树脂基复合材料的固化过程本质上是热传导系数较低,各向异性具有非线性内热源的化学反

应过程, 其中内热源指的是树脂基体发生固化反应所放出的热量[5]。其固化过程可以看作是一个具有非线性内热源的瞬态热传导问题, 其中内热源就是化学反应热。求解该瞬态热传导问题, 就可以得到复合材料构件内部任意时刻的温度场和固化度场[6]。

如果将树脂的流动以及热对流的影响加以忽略, 根据 Fourier 热传导定律和能量守恒方程, 可以得到笛卡尔坐标系下该问题的控制方程:

$$\rho_c C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (2-1)$$

其中 T 表示绝对温度; ρ_c 表示复合材料等效密度; C_p 表示辅材料的比热; k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 分别表示复合材料的各向异性材料的热传导系数; Q 表示热生成率。

其中复合材料的各项等效性能参数可由混合率(2-2)得到:

$$\begin{aligned} \rho_c &= \rho_r (1 - V_f) + \rho_f V_f \\ k_c &= \frac{k_f k_r \rho_c}{k_r \rho_c (1 - V_f) + k_f \rho_f V_f} \\ C_p &= \frac{C_{pr} \rho_r (1 - V_f) + C_{pf} \rho_f V_f}{\rho_c} \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中 V_f 表示纤维体积参数。

热生成率 Q 可以表示为式(2-3):

$$Q = \rho_r (1 - V_f) H_r \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2-3)$$

其中 ρ_r 表示参与反应的树脂密度; H_r 表示固化反应完全时单位质量的树脂放出的总热量; c 表示树脂的固化度, 表示该时刻的放热量与总放热量的比值; $\frac{\partial c}{\partial t}$ 为树脂的瞬时固化率。

忽略物质扩散的作用, t 时刻的固化度可由瞬时固化率积分得到式(2-4):

$$c(t) = \int_0^t c'(t) dt \quad (2-4)$$

所以, 由此可知热化学模型中的内热源的大小与树脂的固化反应速率直接相关, 可由此关系建立固化过程中的反应温度和固化度之间的关系, 可用于更加精确的有限元分析中。

3. 建模与仿真

3.1. 几何建模

首先, 以 L 型构件为基础, 在软件中建立其三维几何模型, L 型构件的尺寸参数如图 1 所示。按照图 1 进行建模, 沿 Z 轴方向拉伸 30 mm 得到的 L 型构件模型如图 2 所示。考虑到模型在底部有圆角, 所以为了得到更加准确的模拟数据, 需要将圆角处与直边处进行划分, 进一步使网格进行加密划分, 如图 3 所示。对于复合材料来说, 还需要设置其堆叠方向, 即向软件说明树脂的堆叠方向, 此处使用软件中的指派堆叠方向功能完成。设置以外表面为顶面为参考方向, 即以阳模加工方式, 完成堆叠方向的设置, 如图 4 所示。为了保证对模型的分析准确性, 对已完成网格划分的模型的每一层进行划分集, 以此来更好的对复合材料的堆叠情况进行分析。

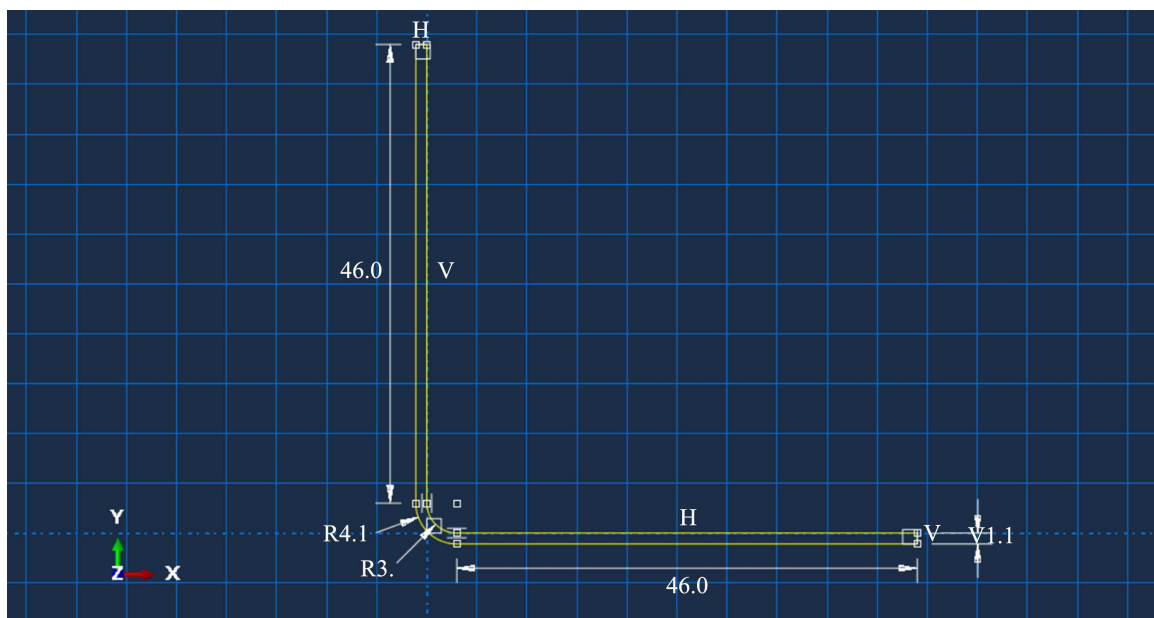


Figure 1. Dimensional parameters of L-shaped components
图 1. L 型构件尺寸参数

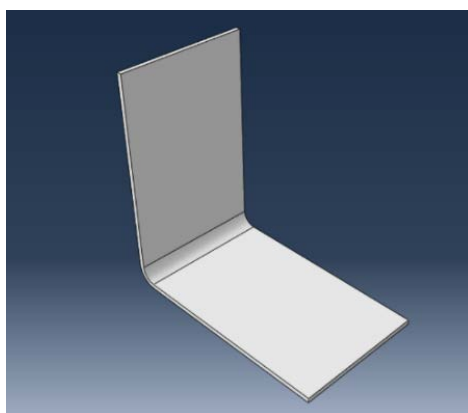


Figure 2. L-shaped component model diagram
图 2. L 型构件模型图

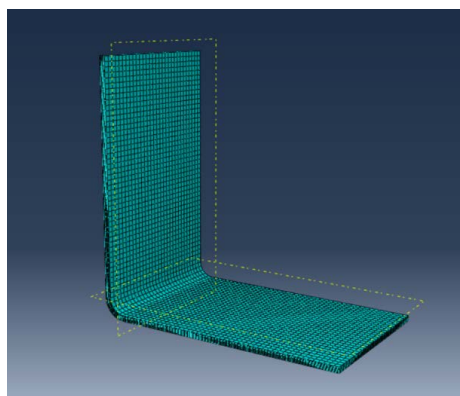


Figure 3. L-shaped component grid model
图 3. L 型构件网格模型

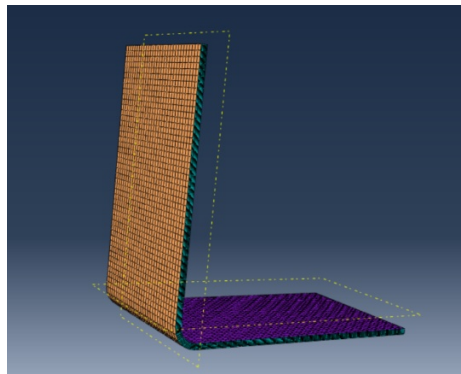


Figure 4. Stacking direction settings
图 4. 堆叠方向设置

3.2. 求解设置

本次仿真所使用的材料为 3234/T300B 树脂基复合材料, 其材料的物性参数[7]如表 1 所示。在仿真开始前, 首先进入软件的属性模块中, 使用材料管理器创建一个新的材料。将模拟所需材料的各项数据输入。

Table 1. Physical property parameters of 3234/T300B laminate
表 1. 3234/T300B 层合板的物性参数

ρ (kg/m ³)	Cp J/(kg·K)	kxx W/(m·K)	Kyy, kzz W/(m·K)	HR (J/kg)	A	ΔE	m	n
1230	1260	5.43	0.41	4.015×10^5	1.494×10^{10}	94,750	0.45	1.887

在热固性树脂基复合材料的成型过程中, 通常分为三个阶段, 依次为流动阶段、凝胶 - 玻璃化阶段和玻璃化阶段; 也可分为液态、凝胶态和玻璃态。考虑到随着温度的变化, 复合材料的固化度也会随之变化, 如图 5 所示。

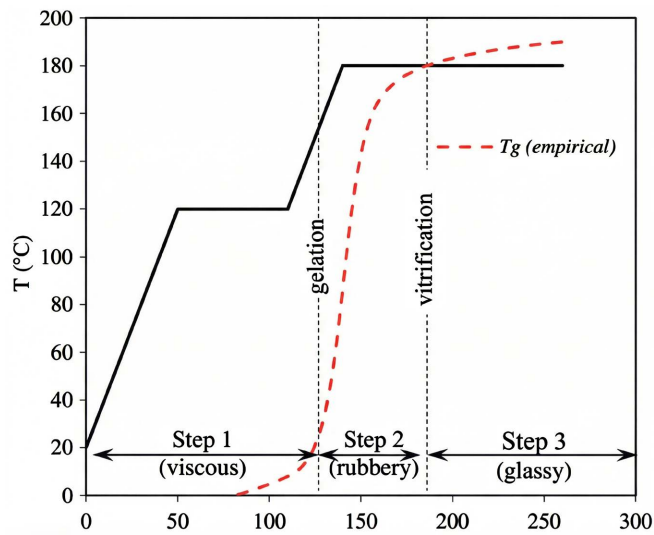


Figure 5. Diagram of the variation of material curing degree with temperature
图 5. 材料固化度随温度变化图

因此, 考虑到材料的固化度、弹性模量等材料参数随温度的变化而变化, 所以在此引入 Abaqus 的子程序 USDFLD、UMAT、UEXPAN。使用 USDFLD 用来表征固化反应中的相对温度下的固化度场, UMAT 表征温度变化过程中的弹性模量变化, UEXPAN 采集数据并转化为总膨胀应变。采用这些子程序将会使得有限元仿真的结果更加真实可靠。

在本研究中, 固化度 $c(t)$ 的演化是基于反应动力学模型进行计算的。在树脂基复合材料的固化过程中, 固化度随着时间和温度的变化而变化, 在此使用 n 级反应动力学模型来描述固化反应的速率。该模型的基本形式为:

$$\frac{dc(t)}{dt} = k(T) \cdot (1-c)^n \quad (3-1)$$

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{\Delta E}{RT}} \quad (3-2)$$

其中, R 为普适气体常数, ΔE 为动力学模型的活化能, A 为频率因子, T 为温度, n 为反应级数[8]。在后续的有限元仿真中, 固化度 $c(t)$ 通过 USDFLD 子程序来定义和更新。固化度的计算依赖于温度场和时间步长, 通过上述动力学方程更新场变量, 以模拟固化过程中材料的物理行为。

在本研究中, UMAT 子程序用于描述层合材料在温度变化下的热膨胀和模量演化。基于各向异性弹性模型, 材料的刚度矩阵 DDSDE 由以下方程更新:

$$\sigma = C \cdot \epsilon \quad (3-3)$$

其中, σ 是应力, C 是材料的刚度矩阵, ϵ 是应变。材料的弹性模量和泊松比随温度变化而变化, 采用如下方程描述:

$$E(T) = E_0 \cdot (1 - \alpha T) \quad (3-4)$$

其中, E_0 是初始弹性模量, α 是热膨胀系数。

热膨胀系数模型被用于模拟材料的热响应, 具体的热膨胀应变为:

$$\epsilon_T = \alpha \cdot T \quad (3-5)$$

其中, ϵ_T 是热应变, α 是热膨胀系数, ΔT 是温度变化。通过这种方式, UMAT 子程序将热膨胀与应力-应变关系相耦合, 描述了材料在固化过程中的热响应和变形[9]。

在固化过程中, 总应变不仅有温度变化引起的热膨胀贡献, 还包含树脂交联反应导致的化学收缩应变。化学收缩已被认为是引起复合材料固化变形的重要因素之一。因此, 在本模型的 UEXPAN 子程序中, 为简化计算, 总膨胀应变被表述为热膨胀应变与化学收缩应变线性叠加得到:

$$\epsilon = (\alpha_i + \beta_i) \cdot \Delta T \quad (3-6)$$

其中, α_i 为材料主方向的热膨胀系数, β_i 为等效化学收缩系数[10]。

此外, 考虑到因为本次模拟要用到的材料是树脂基复合材料, 所以应先完成对其复合层的设置, 并完成纤维方向设置。本文此次的有限元分析所用到的分析步模块是静力分析模块。本次仿真的目的在于寻找固化温度对成品的影响, 所以使用载荷模块中的预定义场管理器为模型创建一个模拟温度场。创建的起始温度为仿真模拟温度, 第二温度为降温温度, 在本文的模拟中将降温温度设为 25℃, 即 298.15 K。完成温度场建立后, 使用载荷中的边界场管理器对模型的四个方位点的三个坐标进行限制, 固定其边界位置。随后创建作业模块, 开始进行仿真。

4. 结果与分析

4.1. 探求不同的固化温度对 L 型构件固化成型的影响

在本文中的模拟分析中, 树脂基复合材料 L 型构件将在合适的固化温度下进行降温操作。本文以室

温为 25℃为降温最终温度，模拟在正常环境下的材料由保温至室温的固化过程。

本次模拟将以 400 K 温度为中心温度，铺层角度为[04]度，探求 L 型构件固化过程中的最小影响及最小变形量的最佳固化温度。本次分析的固化温度分别为：404 K、402 K、400 K、398 K、396 K。通过比较 L 型构件在各个温度情况下的变形情况来分析确定 L 型构件的最佳固化温度。为了便于观察应力和位移情况，使用变形放大系数自动放大变形情况。通过仿真得到的 L 型构件在各个模拟温度下的变形前后对比云图如图 6 所示。

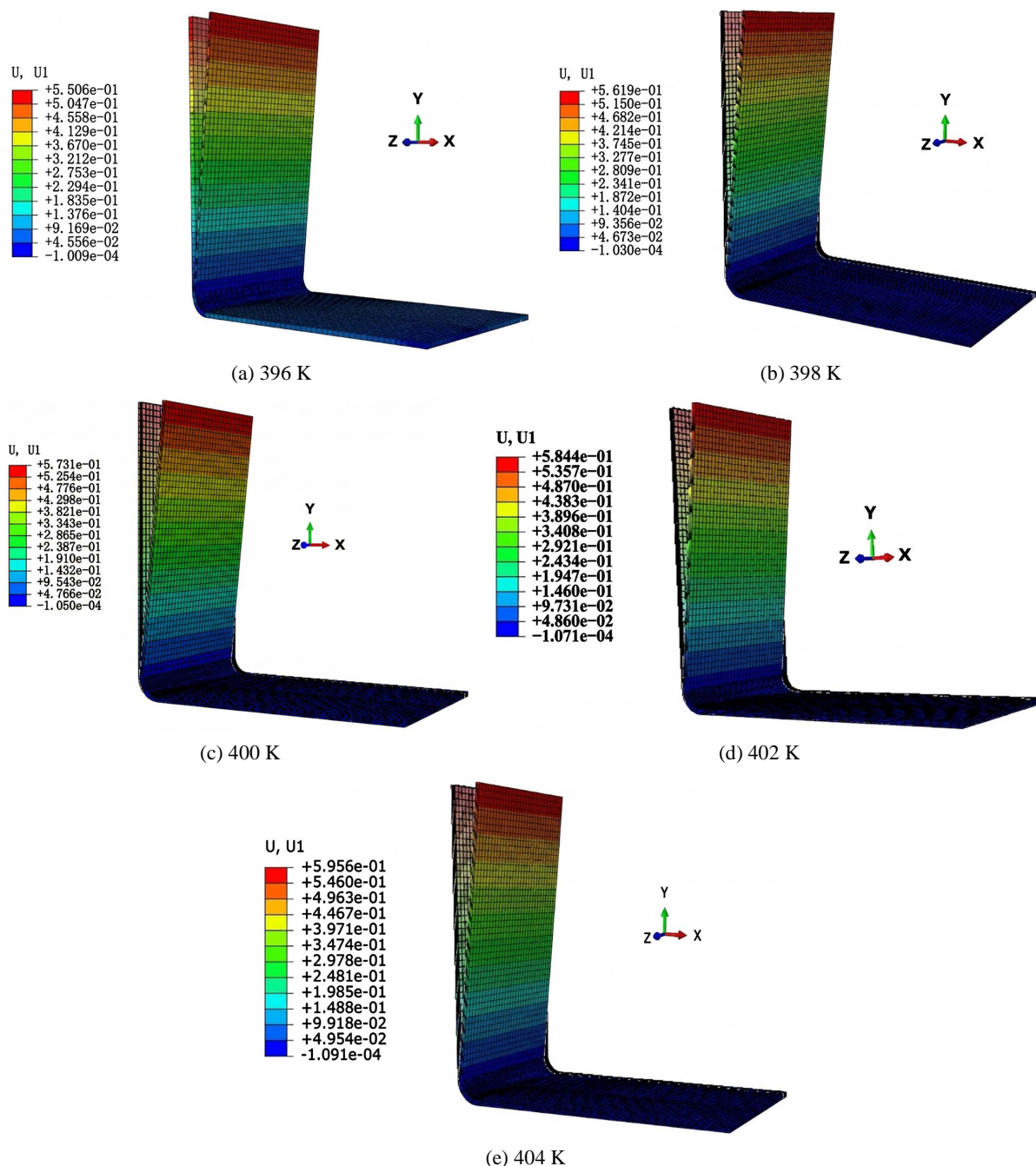


Figure 6. Comparison cloud maps before and after deformation at various simulation temperature

图 6. 各个模拟温度下的变形前后对比云图

从对位移云图的分析得知变形主要发生在 X 轴方向上，所以本次模拟以 X 轴方向为主要观测方向。而且形变主要发生在构件上端，所以最上层网格的中点建立其 X、Y、Z 轴方向的位移曲线，将其最大位移数据汇总至表 2，来表征其在该温度影响下的变形情况。

Table 2. Summary of maximum midpoint displacement at the top under different temperatures (mm)
表 2. 不同温度下顶端中点最大变形量位移数据汇总(mm)

坐标轴 \ 温度	396 K	398 K	400 K	402 K	404 K
X 轴方向	0.5448	0.5559	0.5670	0.5782	0.5893
Y 轴方向	0.0065	0.0066	0.0067	0.0069	0.0070
Z 轴方向	0.1086	0.1108	0.1093	0.1153	0.1175

通过对比不同固化温度下的五组模拟数据，可以得出以下结论：固化温度对树脂基复合材料的变形程度有显著影响。随着固化温度的升高，材料在固化过程中的变形逐渐加剧，特别是 400 K 及以上温度时，材料的变形幅度明显增大，对工件精度的影响更为严重。因此，固化温度的选择应控制在 400 K 以下，以避免过高温度带来的过度变形。当固化温度低于 400 K 时，首先需要考虑就是树脂基复合材料在固化过程中的交联反应特性。树脂材料的固化过程依赖于温度驱动的反应，温度越高，交联反应速率越快，固化效果越好。同时考虑到当固化温度低于约 394 K 时，树脂基复合材料的交联反应可能无法完全进行，导致固化不完全，材料的力学性能和稳定性无法达到预期，且可能出现固化不均匀或内应力积累的情况。因此，尽管 396 K 时的变形位移较小，但考虑到实际生产中的温度控制的精准性和保证加工的质量，为了确保材料的稳定性和性能，因此 396 K 不适合作为最佳固化温度。而以 398 K 作为固化温度，能够充分促进树脂的交联反应，确保材料在固化周期内的完全固化。虽然 398 K 的变形量较 396 K 略有增加，但相较于 400 K 及更高温度，其变形程度较小，能够避免过度变形导致的结构不稳定问题。此外，398 K 温度在实际生产中的温度控制精度较高，能够确保工件的精度与质量，避免因温度过高带来的不必要的形变。

综上所述，考虑到温度控制的精准性和实际生产中的工艺要求，树脂基复合材料 L 型构件固化变形的最佳温度应该为 398 K。该温度不仅能够有效控制材料的变形，确保固化过程的完整性，还能最大程度保证工件的精度，满足实际生产需求。

4.2. 探求不同的铺层角度对 L 型构件固化成型的影响

在复合材料的加工过程中，除了固化温度这一重要因素外，复合材料的复合层设置也对固化过程有着重要的影响。本次模拟的目的旨在探究在最佳固化温度 398 K 的情况下，复合材料的最佳铺层角度。

复合材料的铺层方向一般选取 0°、90°和±45°，铺层方向的选取一般取决于构件所要承受载荷的类型 [11]。接下来，本文将在其最佳固化温度 398 K 下，对铺层角度为[04]、[+454]、[-454]及[904]的常见铺层角度和常见的对称铺层角度[0/45] s 及[0/90] s 进行固化过程的有限元分析。通过比较 L 型构件在各个铺层角度下的变形情况来分析确定 L 型构件的最佳铺层角度。为了便于观察应力和位移情况，使用变形放大系数自动放大变形情况。通过仿真得到的 L 型构件在各个铺层角度下的变形前后对比云图如图 6 所示。

由图 7 中的有限元分析结果可知，当铺层角度发生改变，此时构件的顶端和底端都会发生形变。所以记录其顶端和底端的最大变形点处的位移图像作为后续分析数据。将所有模拟数据中的顶端最大变形点位移数据汇总至表 3 中，底端最大变形点位移数据汇总至表 4 中，来表征在不同铺层角度下的变形情况，其中的“-”号表示变形方向与坐标轴正方形相反。

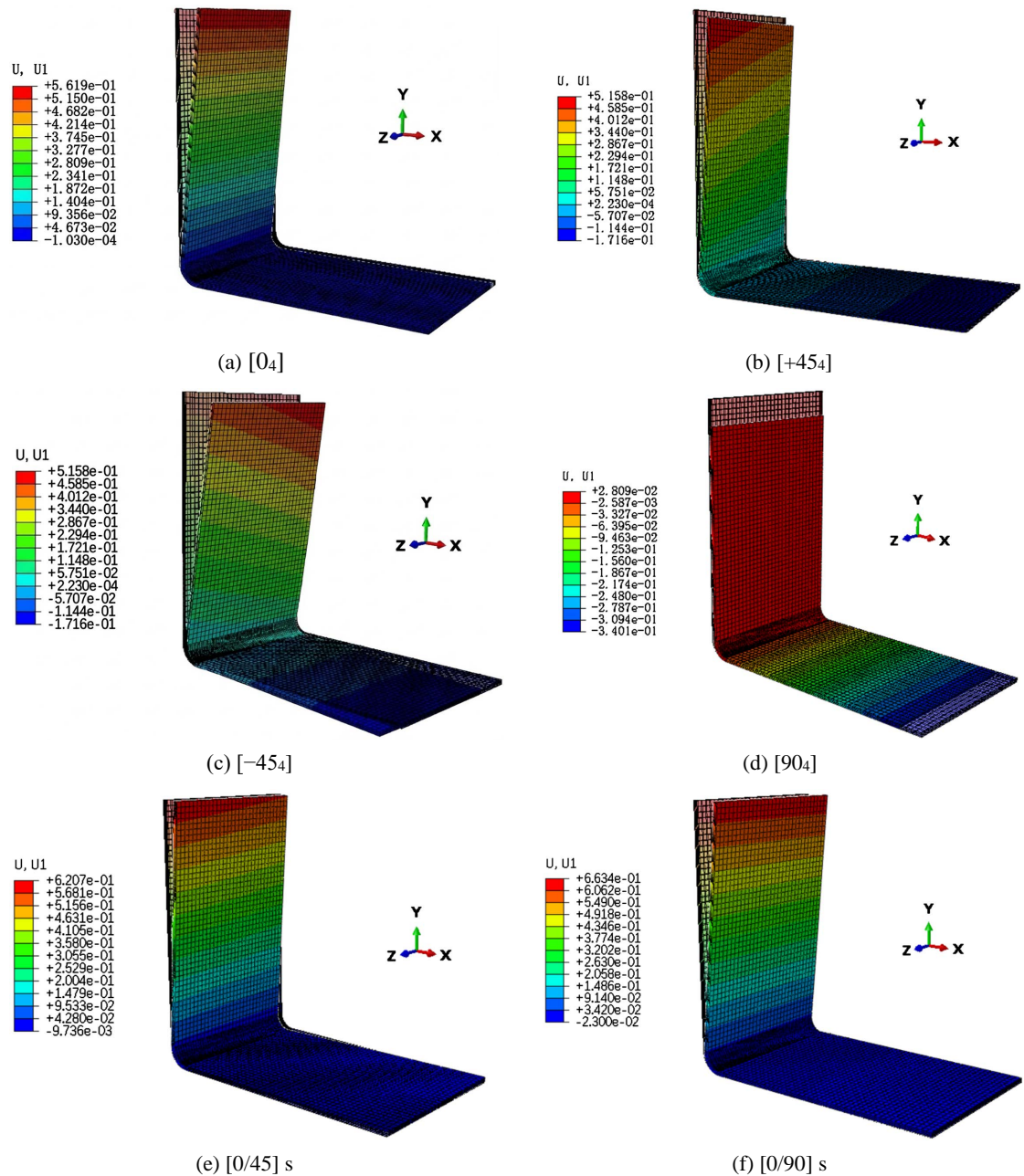


Figure 7. Comparison cloud maps of deformation before and after at various ply angles
图 7. 各个铺层角度下的变形前后对比云图

Table 3. Summary of maximum deformation data at the apex (mm)
表 3. 顶端最大变形点的数据汇总(mm)

坐标轴	铺层角度					
	[0 ₄]	[+45 ₄]	[-45 ₄]	[90 ₄]	[0/45] s	[0/90] s
X 轴方向	0.5559	0.5099	0.5099	0.0221	0.6157	0.6548
Y 轴方向	0.0066	-0.1572	-0.1572	-0.3681	0.0030	-0.0128
Z 轴方向	0.1108	0.3200	-0.2116	7.48647E-16	0.2368	0.0101

Table 4. Summary of maximum deformation at the lower end (mm)
表 4. 底端最大变形点的数据汇总(mm)

坐标轴 \ 铺层角度	[0 ₄]	[+45 ₄]	[-45 ₄]	[90 ₄]	[0/45] s	[0/90] s
X 轴方向	-0.1000	-0.1689	-0.1689	-0.3400	-0.0072	-0.0201
Y 轴方向	8.77451E-07	-0.1175	-0.1175	-0.0059	-0.0109	0.0092
Z 轴方向	-1.20215E-08	-0.3410	0.4494	-1.22823E-15	-0.2224	0.0199

通过对不同铺层角度下树脂基复合材料 L 型构件的固化变形进行有限元分析，结合其顶端和底端的变形数据，得出了以下结论：

[0₄]铺层角度在多个方向上的变形控制较为均衡，尤其在底端的 Y 轴和 Z 轴方向的变形较小。其顶端 X 轴变形为 0.5559 mm，虽然略大，但底端 X 轴方向变形仅为 0.1 mm，显示出[0₄]铺层角度下的良好的底端稳定性。顶端在 Y 轴方向的变形为 0.0066 mm，几乎没有变形。因此，[0₄]铺层角度特别适用于需要控制底端变形的应用场合，尤其是在要求精度和稳定性较高的生产过程中。而当铺层角度在[+45₄]和[-45₄]时，构件发生的变形最为严重，其三轴方向上的变形皆较大，在实际生产过程中应当避免。在顶端变形方面，[90₄]铺层角度在 Z 轴方向的变形几乎为 0 mm，顶端和底端均未发生垂直方向的形变，表现出最佳的垂直稳定性。然而，[90₄]铺层角度的顶端 Y 轴方向的变形(0.3681 mm)与底端 X 轴方向的变形(0.3400 mm)皆较大，导致其在 L 型方向的变形控制较差。因此，虽然[90₄]铺层角度在垂直方向表现最优，但在 L 型方向的稳定性较差，实际使用时需谨慎选择。[0/45] s 铺层角度顶端其 X 轴和 Z 轴形变较为严重，底端其 Z 轴变形较为严重，构件变形严重，在实际生产中应当避免。[0/90] s 铺层角度在 Z 轴方向的变形较小，但在顶端 X 轴方向的变形较大(0.6548 mm)，因此整体表现相对较弱。虽然底端的变形较小，但由于上端的变形较大，限制了其在一些要求全局稳定性的应用中的适用性。

综合考虑各铺层角度的变形方向和幅度，[0₄]铺层角度在多个方向上的表现较为均衡，尤其在底端变形控制方面表现优异。尽管其上端的 Z 轴变形相较于[0/90] s 铺层角度大 0.1 mm，但由于其底端表现优异，且能够在多个方向上有效控制变形，因此[0₄]铺层角度被认为是最佳铺层角度，适合用于对变形控制要求较高的树脂基复合材料 L 型构件固化成型。

5. 结论

树脂基复合材料 L 型构件的固化过程决定了构件成品的质量和生产成本，其固化成型过程中会受到多方面因素的影响。所以，为了进一步提高树脂基复合材料构件的生产效率和加工精度，得到对其固化过程中的温度场的变化及复合材料的铺层角度对固化过程的影响规律是很有必要的。本文以此为研究主题，开展了一系列的有限元分析模拟。

通过对 3234/T300B 树脂基复合材料 L 型构件的固化过程进一步的研究，再考虑到实际生产中的温度控制的精准性和保证加工的质量，所以 3234/T300B 树脂基复合材料 L 型构件固化变形的最佳温度应该为 398 K。

通过对其铺层角度对固化过程的研究，揭示了铺层角度对树脂基复合材料 L 型构件固化变形过程的影响规律。对于 L 型构件的固化过程而言[+45₄]与[-45₄]所产生的固化形变较为严重，在实际加工中应该避免；铺层角度为[0₄]时其固化过程的综合形变最小，为最佳铺层角度。

综上，本研究可为树脂基复合材料 L 型构件的固化工艺优化及工程结构设计提供参考，在一定程度上有助于推动复合材料在高精度、高性能要求的工业应用中的广泛应用。

参考文献

- [1] 左德峰, 朱金福, 黄再兴. 树脂基复合材料固化过程中温度场的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 1999(6): 701-705.
- [2] 郭战胜, 杜善义, 张博明, 等. 厚截面树脂基复合材料的温度场研究I: 模拟[J]. 复合材料学报, 2004(5): 122-127.
- [3] Zhu, Q., Geubelle, P.H., LI, M. and Tucker, C.L. (2001) Dimensional Accuracy of Thermoset Composites: Simulation of Process-Induced Residual Stresses. *Journal of Composite Materials*, **35**, 2171-2205. <https://doi.org/10.1106/nhub-bxgk-4x8l-777f>
- [4] Yi, S., Hilton, H.H. and Ahmad, M.F. (1997) A Finite Element Approach for Cure Simulation of Thermosetting Matrix Composites. *Computers & Structures*, **64**, 383-388. [https://doi.org/10.1016/s0045-7949\(96\)00156-3](https://doi.org/10.1016/s0045-7949(96)00156-3)
- [5] 牛晓坤. 热固性树脂基复合材料固化变形分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [6] 刘哲. 热固性树脂基复合材料固化变形数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 闫勇, 庄茁, 包正刚. 树脂比热容对复合材料固化过程数值模拟的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 37-40.
- [8] Kissinger, H.E. (1957) Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis. *Analytical Chemistry*, **29**, 1702-1706. <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
- [9] Yoon, K.J. and Kim, J. (2000) Prediction of Thermal Expansion Properties of Carbon/Epoxy Laminates for Temperature Variation. *Journal of Composite Materials*, **34**, 90-100. <https://doi.org/10.1177/002199830003400201>
- [10] Barnes, J.A., Byerly, G., LeBouton, M.C. and Zahlan, N. (1991) Dimensional Stability Effects in Thermoplastic Composites—Towards a Predictive Capability. *Composites Manufacturing*, **2**, 171-178. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(91\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0956-7143(91)90136-5)
- [11] 田鹤. 树脂基复合材料固化过程中的温度场及热应力分析[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2014.