

同济大学：使用 Direct FE2 对复合材料层压板固化变形进行多尺度热力学分析

澎湃 政务：中国复合材料学会 2024-06-29 08:03

以下文章来源于复合材料力学，作者复小七呀

复合材料力学.

专注于复合材料力学领域的知识创作与分享，第一时间更新复合材料方向前沿资讯、技术方法、仿真案例、代码插件，助力复合材料行业的发展及读者专业技能的提升，深受学生及青年科技工作者喜爱。“强化基础，聚焦前沿”，复合材料力学公众平台期待您的关注！



一、引言

随着复合材料在航空、汽车等领域的广泛应用，其制造过程中的固化变形问题日益凸显。当前，虽然已有多种模型用于预测复合材料的固化变形，但它们在精度、计算效率及实用性方面仍存在局限，特别是在处理多尺度、多物理场耦合问题时。因此，为了实现精确制造，全面了解固化过程并结合通用计算模型至关重要。

近日，国际知名期刊《Composites Part A》发表了同济大学航空航天工程与应用力学学院和新加坡国立大学机械工程系在复合材料层压板固化变形方面的研究。文章通过结合宏观与微观尺度的分析，实现了对复合材料固化过程中复杂变形行为的高精度预测，为优化制造工艺、提高产品质量奠定了坚实基础。论文标题为“Multiscale thermo-mechanical analysis of cure-induced deformation in composite laminates using Direct FE2”。

Composites: Part A 173 (2023) 107704



Contents lists available at ScienceDirect

Composites Part A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesa



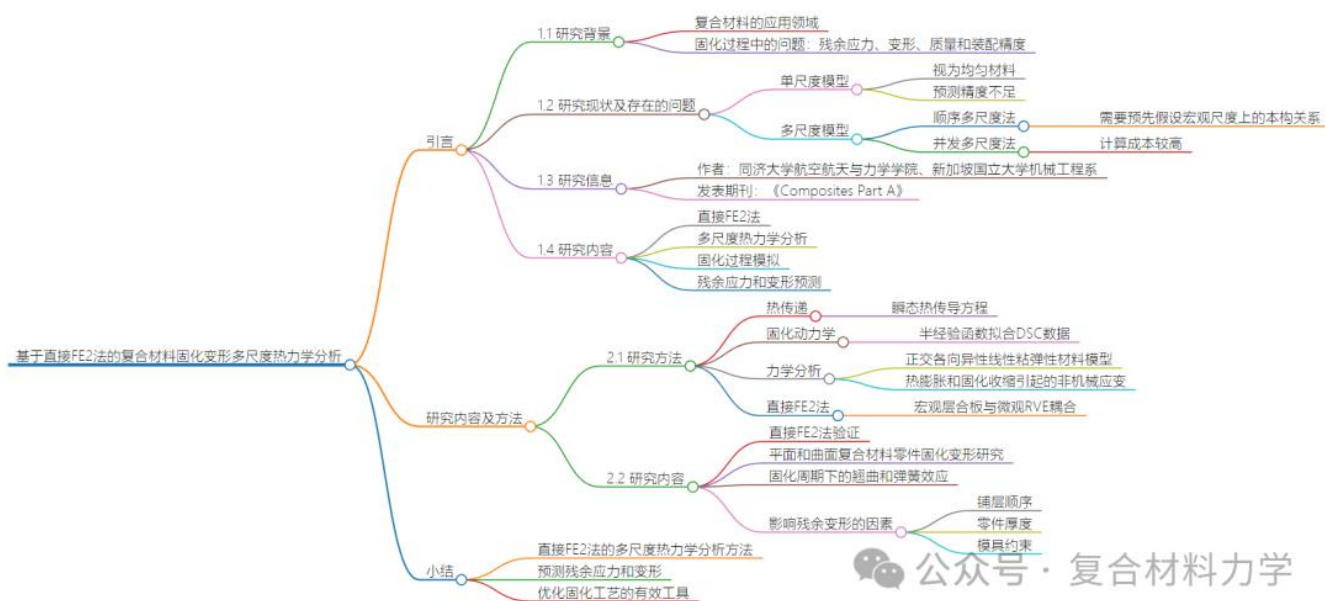
Multiscale thermo-mechanical analysis of cure-induced deformation in composite laminates using Direct FE2

Jie Zhi^a, Bin Yang^a, Yan Li^a, Tong-Earn Tay^b, Vincent Beng Chye Tan^{b,*}

^a School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, PR China

^b Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 21 Lower Kent Ridge Road, Singapore 119077, Singapore

公众号·复合材料力学



公众号·复合材料力学

二、研究内容及方法

该研究建立了多尺度的Direct FE2数值分析模型。在宏观尺度上，构建了复合材料的层压板模型，用于描述整体的力学行为；在微观尺度上，通过代表体积元素（RVE）来反映复合材料的内部细微结构。

1. 热传递

文章采用瞬态热传导方程描述复合材料固化过程中的温度场变化。该方程考虑了材料的密度、比热容、导热系数以及固化反应产生的热量。通过有限元方法求解该方程，可以得到固化过程中不同时间和位置的温度分布，为后续的力学分析和固化动力学计算提供基础。

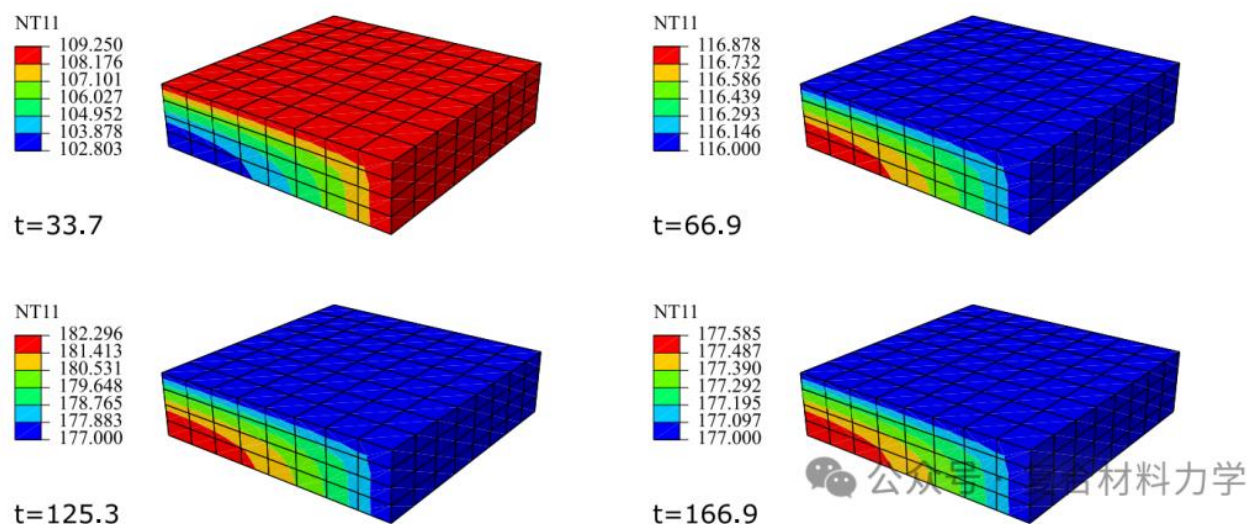
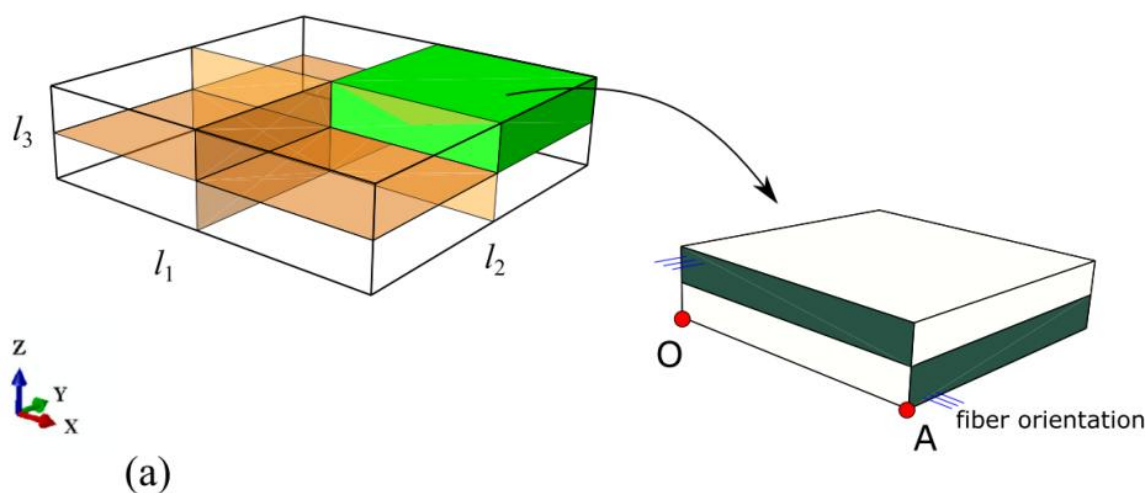


图 1. 不同时刻的温度分布。

2. 固化动力学

研究团队采用半经验函数拟合DSC数据，得到固化度随时间和温度的变化规律。该函数将固化速率表示为温度和固化度的函数，并通过实验数据进行标定。固化度是描述树脂固化程度的重要参数，用于表征树脂从粘稠液体到橡胶状固体再到玻璃态固体的转变过程。通过固化动力学模型，可以预测固化过程中不同时间和位置处的固化度分布，从而了解树脂的力学性能变化和收缩行为。



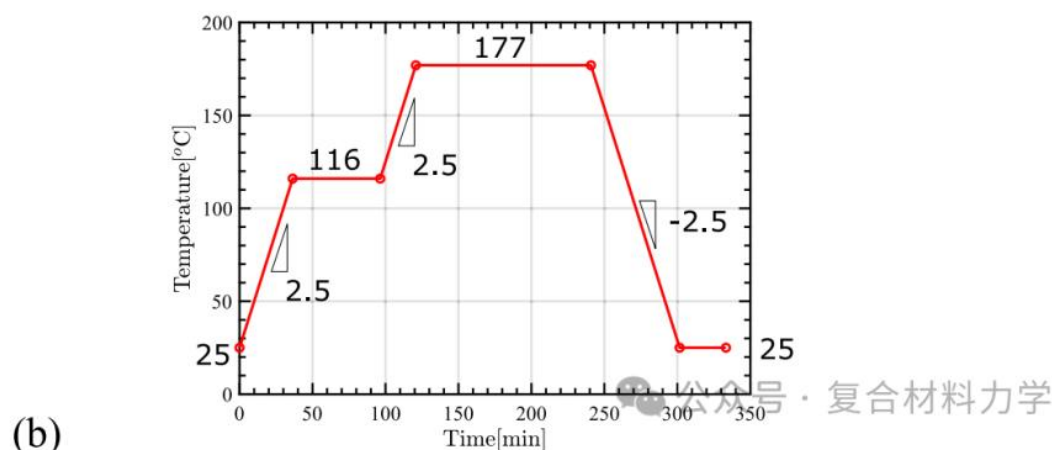


图 2. (a) 用于建模的正交层压板和八分之一部分 (b) 两次停留固化循环。

3.力学分析

研究人员采用正交线性粘弹性材料模型描述复合材料固化过程中的力学行为。该模型考虑了树脂的粘弹性行为，并通过实验数据进行标定。力学分析包括求解平衡方程和本构方程，可以得到固化过程中不同时间和位置处的应力分布和应变场。通过力学分析，可以预测固化过程中的残余应力和变形，例如翘曲和弹簧效应等。此外，文章还考虑了热膨胀和固化收缩对力学行为的影响，并通过非力学应变进行分析。

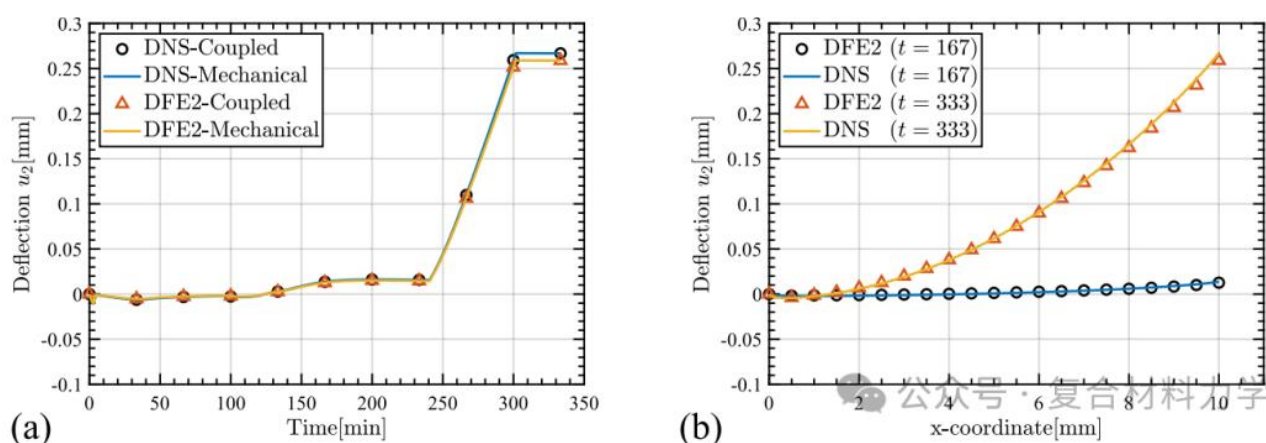


图 3. (a) 点 'A' 处的挠度历史，(b) 通过力学分析得出的沿顶部边缘的挠度。

4.直接FE2法

该研究采用直接FE2法进行多尺度建模，将宏观复合材料层压板和微观代表性体积单元 (RVE) 进行耦合。该方法通过在宏观有限元分析中引入Hill-Mandel均

匀化条件，将微观模型的结果直接应用于宏观模型，避免了传统FE2法中复杂的多尺度过程。通过多点约束，将宏观节点和微观RVE进行连接，实现不同尺度的耦合分析。直接FE2法具有计算效率高、易于实现等优点，可以有效地模拟复合材料固化过程中的多尺度力学行为。

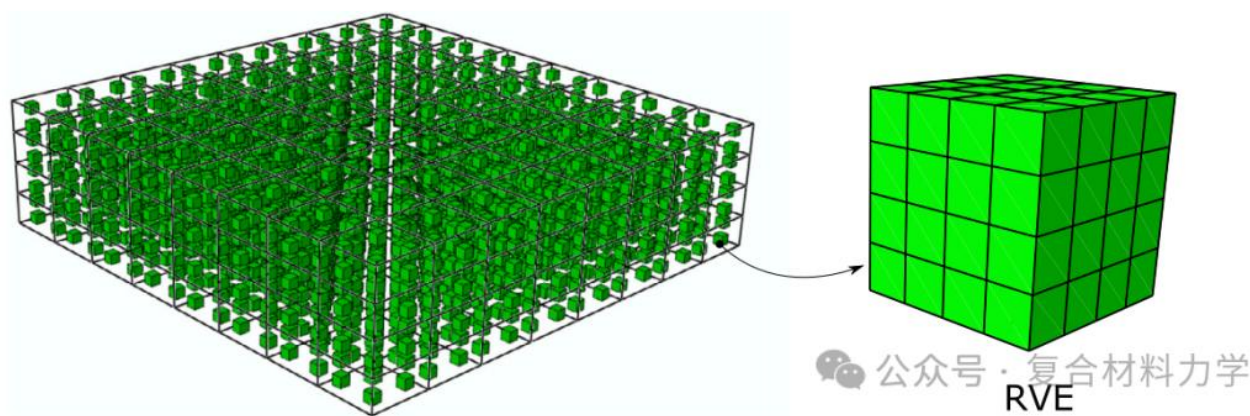


图 4. 具有立方 RVE ($1 \times 1 \times 1$) 的直接 FE2 模型。

5. 直接FE2法的验证

文章通过模拟一个正交层压板AS4/3501-6预浸料在典型双停留固化周期下的固化过程，验证了直接FE2法的有效性和准确性。结果表明，直接FE2法能够准确地预测固化过程中的温度分布、固化度分布和应力分布，并与文献结果取得了良好的一致性。这表明直接FE2法可以有效地模拟复合材料固化过程中的多尺度力学行为。

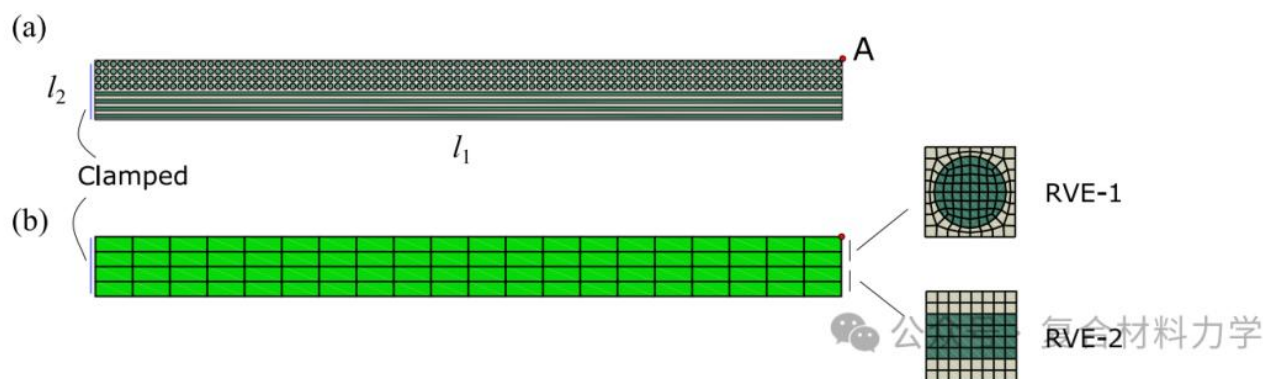


图 5. 平梁[0/90] (a) DNS 模型 (b) Direct FE2 模型。

6. 平面和曲面复合材料零件固化变形研究

对于平面零件，研究人员主要研究了翘曲现象，结果表明固化收缩对翘曲的影

响较小，而热收缩是导致翘曲的主要原因。对于曲面零件，主要研究了弹簧效应，结果表明固化收缩对弹簧效应的影响与热收缩相当，且弹簧效应在冷却阶段最为显著。此外，文章还考虑了模具与零件的相互作用以及零件厚度对变形的影响。

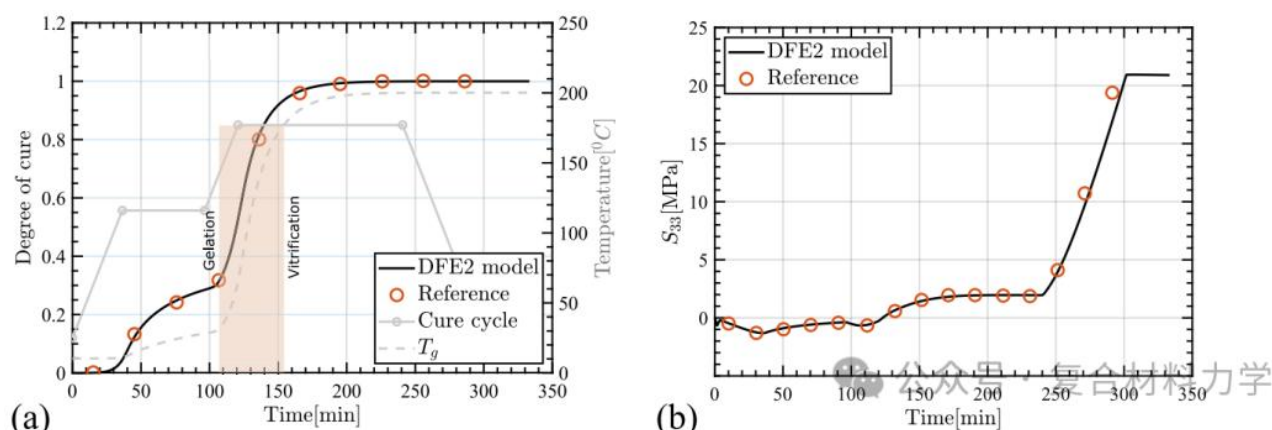


图 6. (a) 点 'O' 处的固化度、(b) 点 'A' 处的应力 S_{33} 的演变，与参考结果相比。

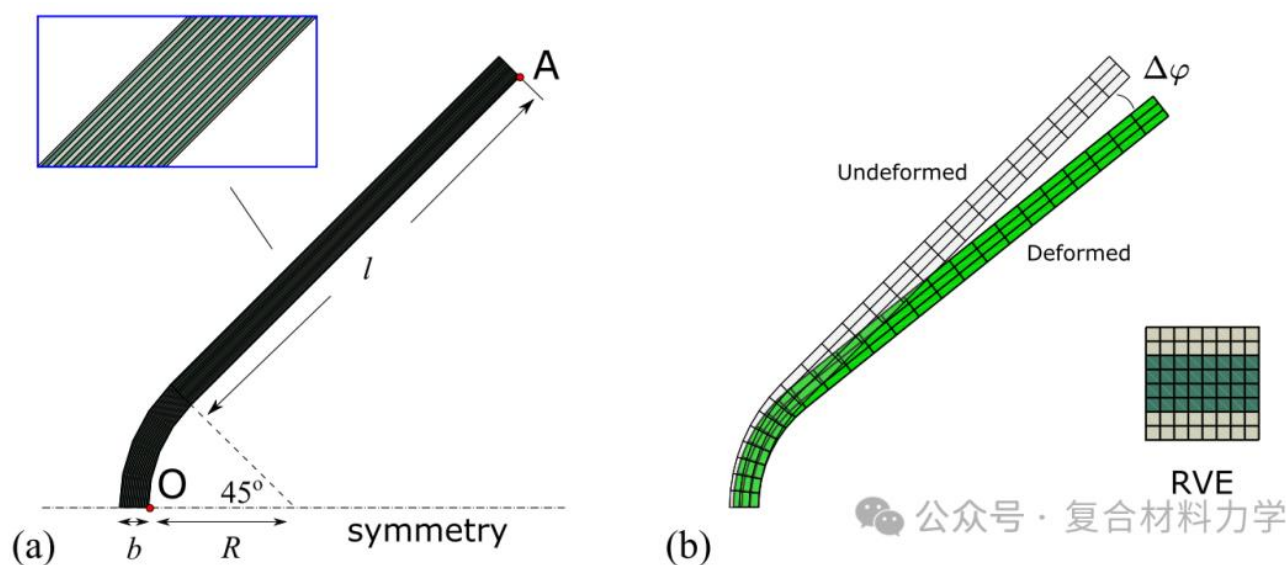


图 7.曲线梁 (a) DNS模型 (b) Direct FE2模型。

7.固化周期下的翘曲和回弹效应

研究团队通过直接FE2法研究了固化周期下复合材料零件的翘曲和回弹效应。结果表明，翘曲主要受热收缩的影响，而回弹效应则受热收缩和固化收缩的共同影响。回弹效应在冷却阶段最为显著，且模具与零件的相互作用会影响最终的回弹效应。零件厚度也会影响回弹效应，厚度越大，回弹效应越小。

8.影响残余变形的因素

复合材料固化过程中的残余变形受到多种因素的影响，主要包括：

- (1) 热收缩：材料在冷却过程中体积收缩，导致零件产生翘曲等变形。
- (2) 固化收缩：树脂在固化过程中体积收缩，也会导致零件产生变形，其影响程度与热收缩相当，尤其在冷却阶段更为显著。
- (3) 应力松弛：材料粘弹性导致应力随时间衰减，从而影响残余变形的大小和分布。
- (4) 模具与零件的相互作用：模具与零件之间的相互作用会影响零件的最终变形，例如模具约束可以减小弹簧效应。
- (5) 零件厚度：零件厚度会影响材料的热收缩和固化收缩程度，从而影响残余变形的大小和分布。

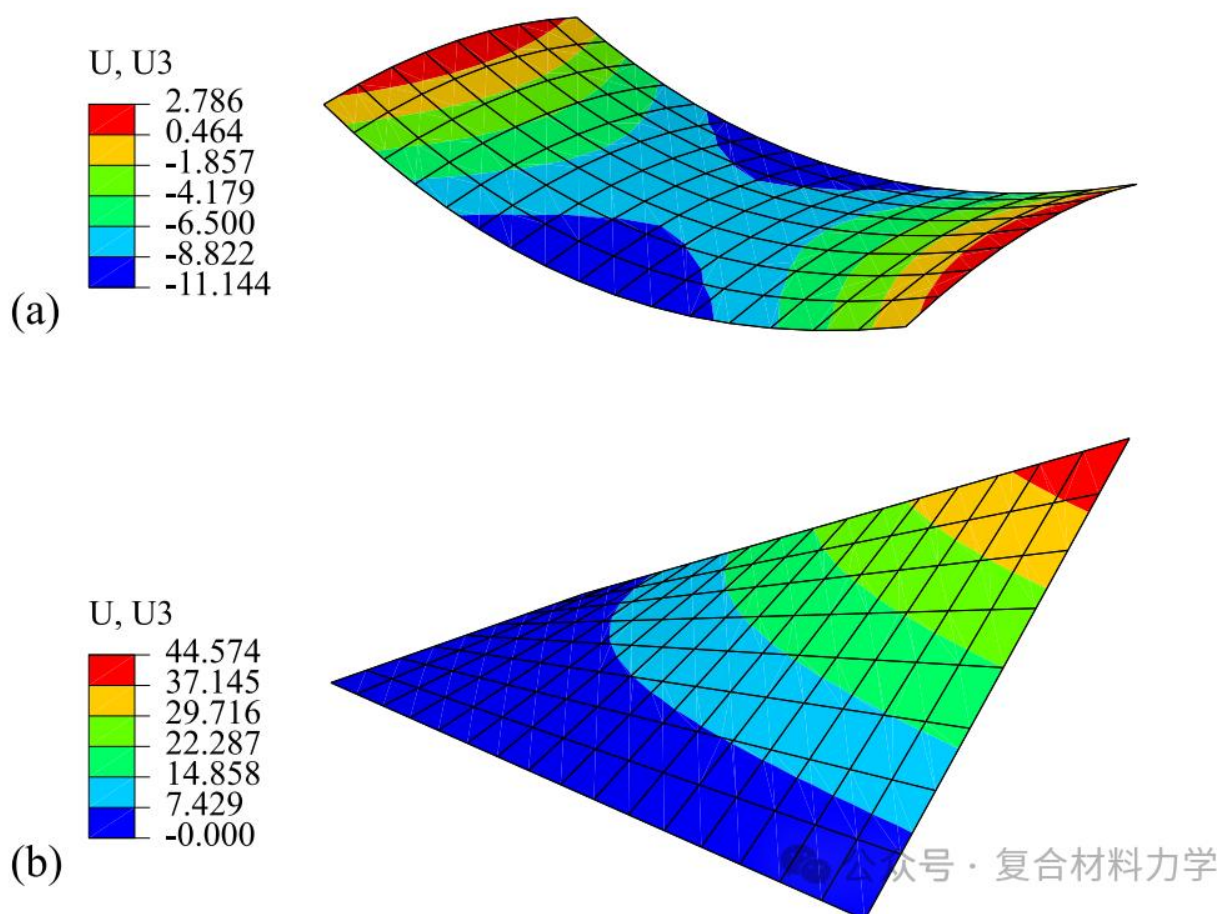


图 8. 非对称层合板的残余变形（比例因子：2.0） (a) [0/90] (b) [+45/-45]

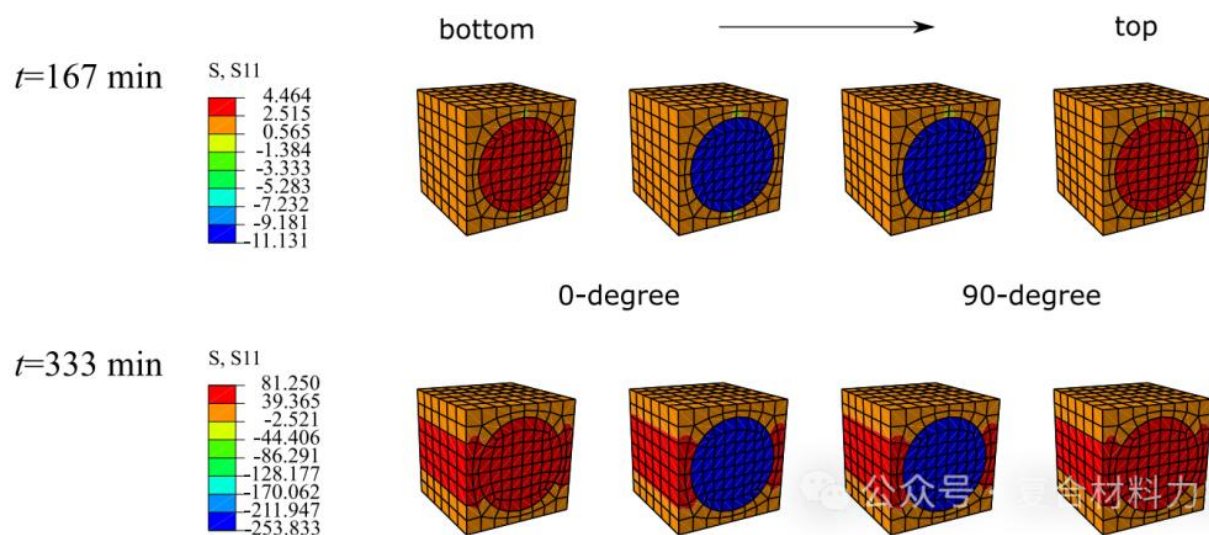


图 9. [0/90] 层压板中心点附近厚度方向上四个 RVE 沿纤维方向的应力轮廓线。

三、总结

文章提出了一个基于直接 FE2 的多尺度-多物理计算框架，用于模拟热固性复合材料层压板的固化过程。该框架考虑了影响加工引起的畸变的关键因素，包括热收缩、化学收缩和应力松弛。通过瞬态热分析和固化动力学模型，获得了温度和固化度分布的演变。同时，通过力学分析和粘弹性本构模型，分析了由此产生的非力学应变和进一步的残余变形。所有使用的属性都在纤维/基体水平上进行了表征。通过直接 FE2 实现，将宏观层压板和微观 RVE 进行耦合。尽管微观机制非常复杂，但多尺度-多物理建模的公式化和实现很简单，因为在直接 FE2 中只需要位移和温度自由度的多点约束。该方案通过几个数值算例进行了验证，其中捕获了平面零件的典型翘曲和曲形零件的回弹。

原始文献：

Jie Zhi, Bin Yang, Yan Li, Tong-Earn Tay, Vincent Beng Chye Tan, Multiscale thermo-mechanical analysis of cure-induced deformation in composite laminates using Direct FE2, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 173, 2023, 107704,

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107704>.

原文链接：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X23002804>

来源：复合材料力学

免责声明：中国复合材料学会微信公众号发布文章，仅用于复合材料专业知识和市场资讯的交流与分享，不用于任何商业目的。任何个人或组织若对文章版权或其内容的真实性、准确性存有疑议，请第一时间联系我们。我们将及时进行处理。

继续滑动看下一个轻触阅读原文



中国复合材料学会向上滑动看下一个

原标题：《同济大学：使用 Direct FE2 对复合材料层压板固化变形进行多尺度热力学分析》