

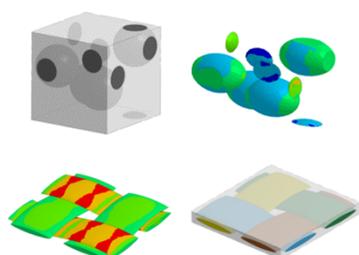
LS-DYNA 高级有限元，无网格和粒子法及其工业应用 (2)

胡炜, 吴政唐, 任波, 刘泽良, 吕丹丹

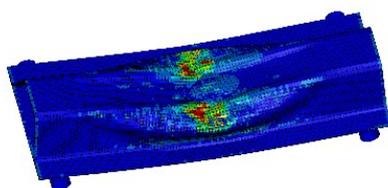
计算多尺度力学部, LSTC

<https://www.lstc-cmmg.org>

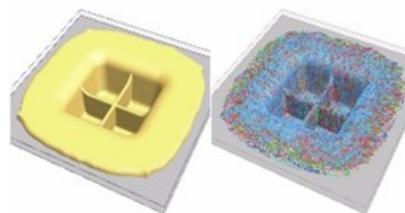
前文中我们提到 LSTC 计算多尺度力学部(CMMG)的主要研发目标是为从材料到结构分析不同尺度下的数学物理模型寻找新型数值计算方法以及多尺度串联技术, 针对汽车, 航空等领域的先进材料和加工制造过程的设计优化提供可靠高效的 CAE 分析方案。本文主要介绍复合材料 RVE(Representative Volume Element, 代表性体积元)模型分析, 纤维增强层压复合材料的破坏分析和纤维增强塑胶热压塑成型分析。这里涉及周期性边界条件, 近场动力学和三维自适应方法等 LS-DYNA 功能模块的关键字和实例。



代表性体积元分析工具包



层压复合材料破坏过程模拟



纤维增强塑胶热压塑成型

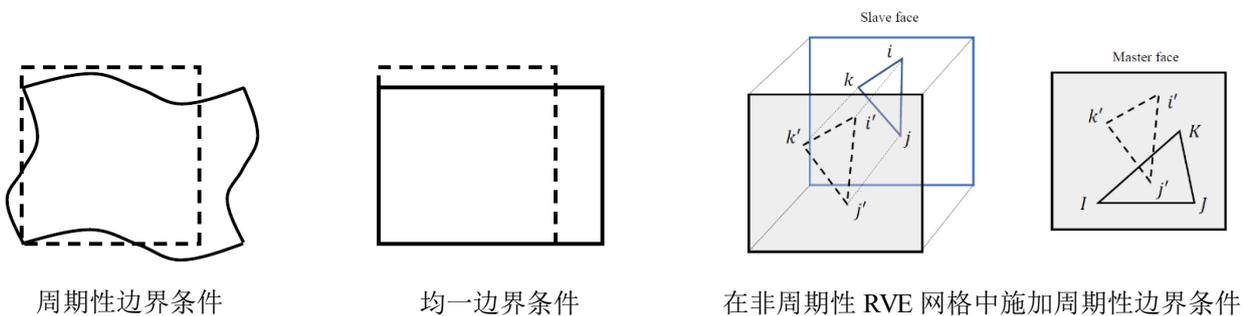
RVE 工具包基于 LS-DYNA 有限元隐式分析求解器, 能够对二维和三维代表体积元模型在不同边界条件 (宏观应变) 作用下的应力分布进行计算并给出同质化 (Homogenization) 的材料宏观应力结果。具体的功能包含以下四个方面:

1. 对于给定 RVE 模型 (二维长方形或三维长方体) 网格, 自动添加边界条件关键字, 包括周期性边界条件 (使用关键字 *CONSTRAINED_MULTIPLE_GLOBAL) 和均一边界条件 (*BOUNDARY_PRESCRIBE_MOTION)。均一的位移边界条件由于强制要求界面保持平直, 通常得到较硬的应力响应, 但这种影响随着 RVE 模型尺寸的增大而减小。对于 RVE 模型的尺寸选择, 一般来说, RVE 的大小需要涵盖足够多的材料微观结构统计信息。理论上, RVE 尺寸越大越能获得更精确的同质化结果, 同时这也带来计算量的显著增加。实际应用时对 RVE 大小最好的判断方法是做收敛性分析, 选择一个满足阈值条件 (比如 5%) 时最小的 RVE 尺寸。
2. 对于网格划分不满足周期性条件的 RVE 模型, 同样可以施加周期性边界条件。以一个方向 (比如 x 轴向) 两个非周期性网格界面为例, 我们需要定义 “主/从面”: “主面” 相对 “从面” 有较少的节点。对于任意 “从面” 上的节点 j , 在满足 RVE 模型为

二维长方形或三维长方体的前提下，我们都可以找到其在“主面”上的投影点 j' 以及该投影所在的单元，然后通过此单元的节点 (I,J,K) 和在投影点 j' 上的有限元近似函数定义他们和“从面”节点 j 之间的周期性边界条件方程。

3. 多种边界载荷（宏观应变）选择，包括单轴/多轴拉伸，剪切等。
4. 同质化分析考虑了小变形和几何大变形等非线性情况，并能将结果直接输出到 LS-DYNA database 文件。

这些功能目前主要有两个新的关键字：`*RVE_ANALYSIS_FEM` 和 `*DATABASE_RVE`，他们将替代 `*INCLUDE_UNITCELL` 进行高效且多样化的 RVE 分析计算。

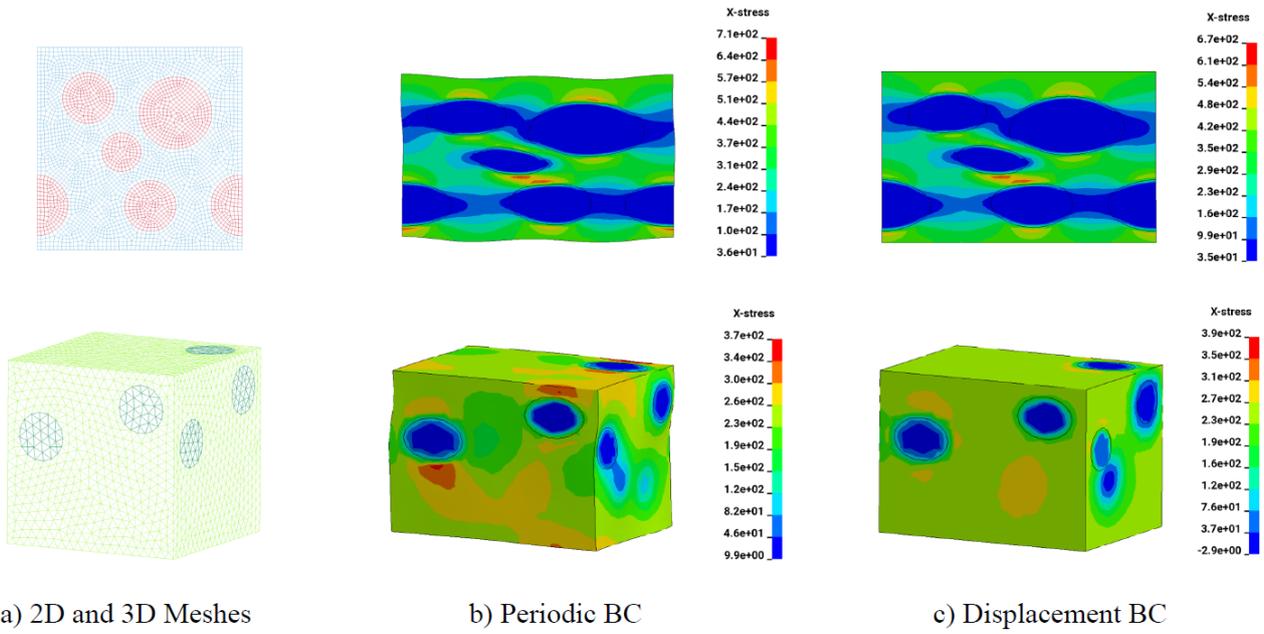


以下是 `*RVE_ANALYSIS_FEM` 关键字卡片：

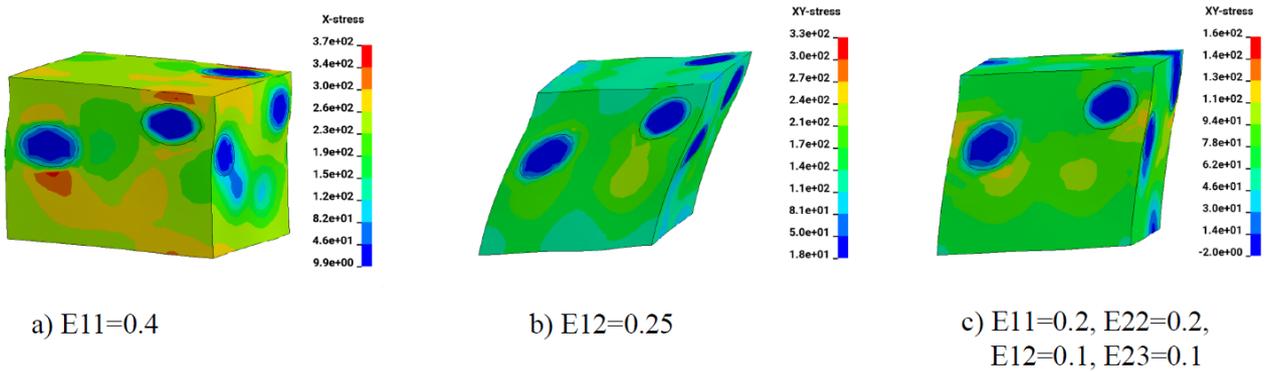
Card 1	MESHFILE						
Default							
Card 2	INPT	OUPT	LCID	IDOF	BC	IUNI	
Default	0	1			0	1	
Card 3	E11	E22	E33	E23	E13	E12	
Default	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

`MESHFILE` 定义用户输入的 RVE 模型网格关键字文件名。如果 `INPT=0` 表示用户没有定义边界条件，LS-DYNA 将会自动生成一个新的关键字文件（`RVE_MESHFILE`）用来定义边界条件。`LCID` 可以指定边界条件所需的曲线数据。`IDOF=2` 或 `3` 表示二维或三维问题。`BC` 定义边界条件类型：`0` 是周期性条件；`1` 是均一条件。`IUNI=1` 表示输入模型为周期性网格。`Card3` 用于定义宏观应变张量的分量，对应施加到边界面上的位移载荷。RVE 分析的同质化结果可以通过使用 `*DATABASE_RVE` 输出到 ASCII 或二进制文件。

接下来首先看几个简单弹性材料二维和三维的 RVE 分析实例，其中包含不同的边界条件。基底材料杨氏模量是 100MPa ，硬颗粒材料是 1GPa ，泊松常数都是 0.3 。宏观应变是 x 方向单向拉伸 0.4 。下图可以明显看出周期性边界和均一边界加载所得到的不同应力场结果。



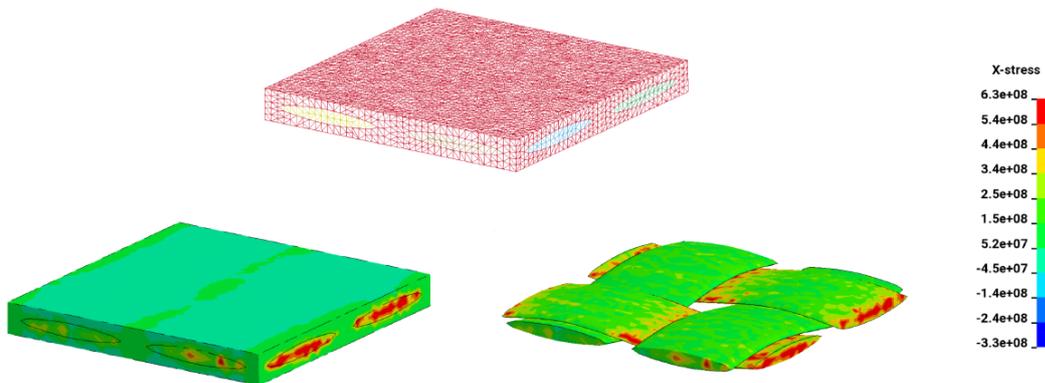
通过定义不同的宏观应变张量分量，我们可以对 RVE 进行不同的加载得到相应的应力场结果。如下图所示，分别对应单向拉伸，剪切和混合加载。



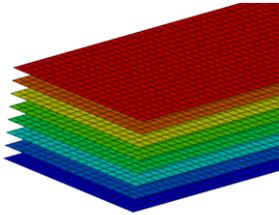
下面是一个碳纤维编织复合材料的 RVE 模型，基底弹性材料模量是 3GPa，泊松常数 0.2。碳纤维使用正交各向异性弹性材料，材料常数如下

$$E_a = 200GPa, E_b = 10GPa, E_c = 10GPa, \nu_{ba} = 0.02, \nu_{ca} = 0.02, \nu_{cb} = 0.4, G_{ab} = 5GPa, G_{bc} = 5GPa, G_{ca} = 5GPa$$

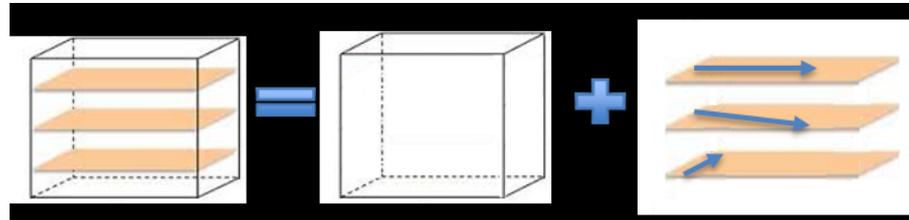
加载使用周期性边界条件，单向拉伸量为 $E_{11}=0.01$ 。



长纤维增强层压复合材料通过将多层不同方向排列的长碳纤维胶结压制在一起形成轻质坚固的板材。在加工和结构冲击碰撞过程中，它的破坏模式复杂，数值模拟非常困难。我们在 LS-DYNA 中开发了基于近场动力学的功能模块，能够使用多层均布网格模拟这种分层各向异性的材料及其复杂破坏行为。



每层均布网格能处理不同方向纤维分布

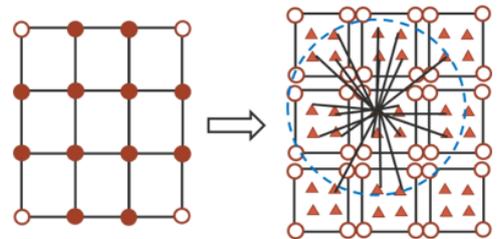


总体模型解耦为：单一均质基底材料加分层各向异性纤维增强材料
相应的近场动力学模型中键的定义包含层间及层内两种类型

近场动力学求解模块使用方式简单，类似于有限单元法，通过定义*SECTION_SOLID_PERI来引入多层有限元网格*ELEMENT_SOLID_PERI。这里有以下几点需要注意：

1. *SECTION_SOLID_PERI 中 Card2 的 DR 参数类似无网格方法中的归一化影响域大小，绝大多数情况下推荐使用默认值。
2. *ELEMENT_SOLID_PERI 定义类似于有限元壳体单元，支持三节点或四节点网格。近场动力学单层实体网格对于模拟薄层结构有很好的精度和稳定性，没有传统有限元实体单元的剪切数值锁死问题。

3. 近场动力学模块需要用户输入“离散”网格。传统有限元网格相邻单元是共节点的，而近场动力学网格单元是不共点且拥有独立节点（如右图）。材料的连续性是通过连接临近单元积分点的近场动力学键来实现的。在 LSPP 中，可以使用“detach node”功能将正常有限元网格转换成“离散”单元。



目前近场动力学层压复合材料模块只支持特殊的弹性材料模型，通过关键字*MAT_ELASTIC_PERI_LAMINATE来定义：

Card 1	MID	RO	Ef	Em	vfm	FOPT	FCf	FCm
Default						1		
Card 2	V1	V2	V3					
Default								

Ef 和 Em 分别定义单层材料沿纤维和垂直于纤维方向的弹性模量。vfm 定义泊松常数。FOPT

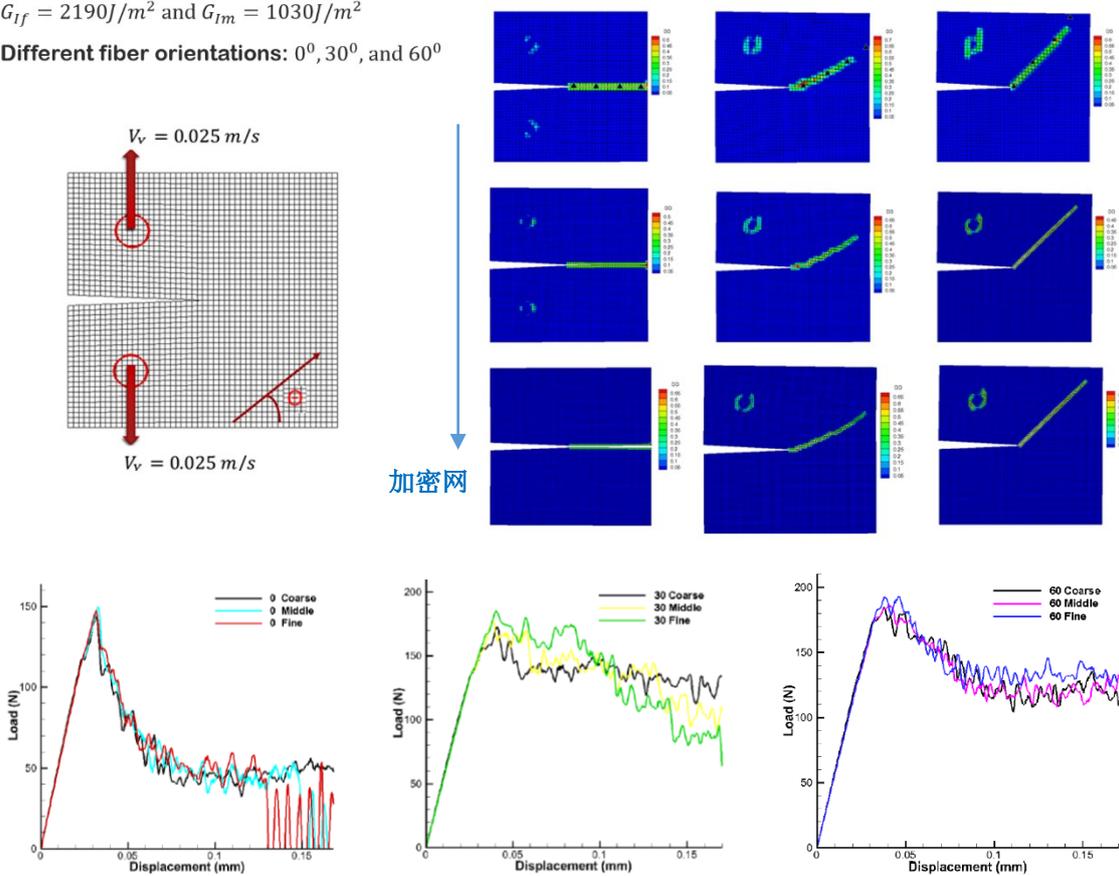
定义键破坏准则：1 能量释放率（推荐使用）；2 键拉伸率。FCf 和 FCm 分别对应沿纤维和垂直于纤维两个方向的键破坏阈值。向量(V1,V2,V3)定义在全局坐标系下的基准纤维方向，各层纤维方向角度（定义在 *SET_PERI_LAMINATE）根据这个基准向量来设定。

*SET_PERI_LAMINATE 关键字将多层独立近场动力学网格定义成层压模型：

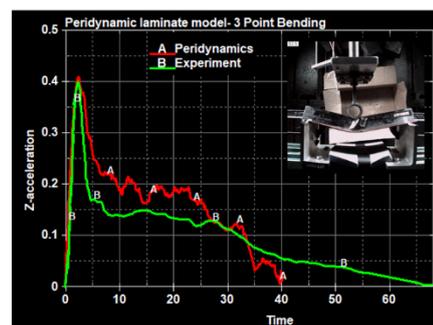
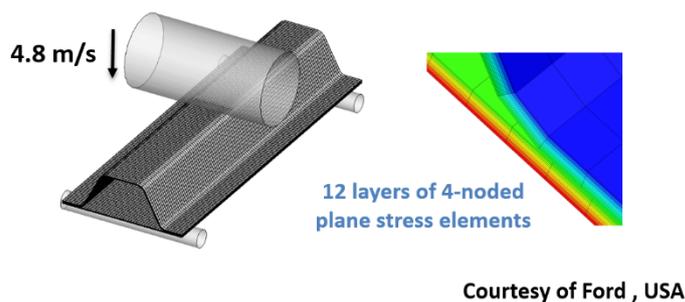
Card 2, 3, ...	PID1	A1	T1	PID2	A2	T2		
Default								

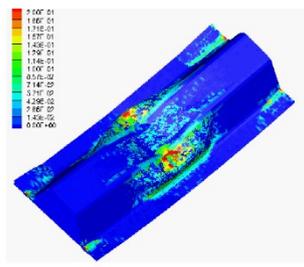
单张卡片可以最多定义两层网格，A 定义纤维方向角，T 定义厚度。重复定义此卡片直到完成所有纤维层。下面给出两个算例，一个是单层材料不同纤维角度的预置裂纹拉伸数值收敛性测试，另一个是 12 层 UD[0/60/-60/0/60/-60]s 三点弯曲测试。

- $G_{If} = 2190\text{J}/\text{m}^2$ and $G_{Im} = 1030\text{J}/\text{m}^2$
- Different fiber orientations: $0^\circ, 30^\circ$, and 60°

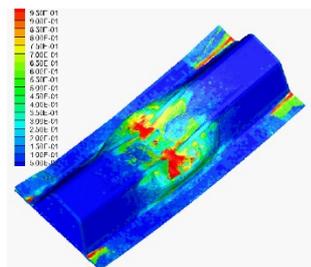


□ CFRP: UD[0/60/-60/0/60/-60]s

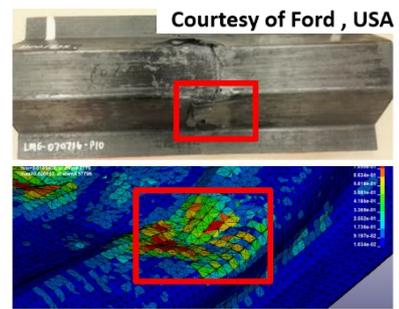




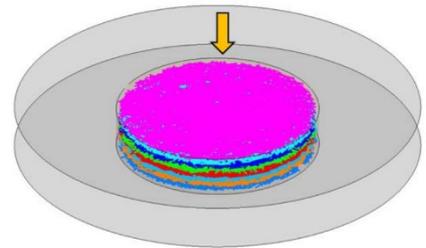
In-plane failure



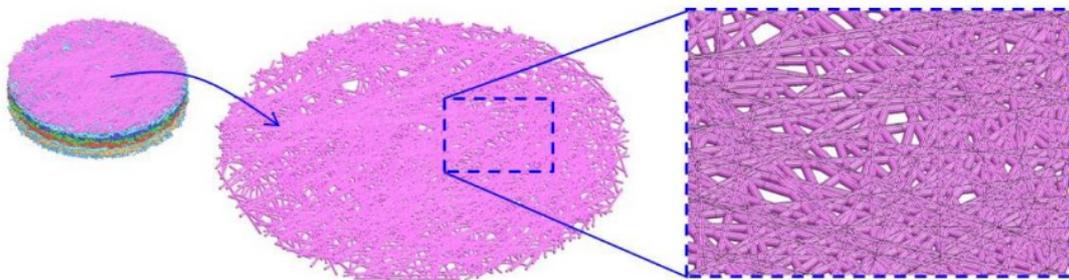
De-bonding failure



纤维增强塑胶材料坚固且有很好的吸能特性，在轻量化车身设计中得到越来越广泛的应用。热压塑成型是一种高效而且适用于批量生产的制造方法，能较为精确地将纤维增强塑胶材料制成复杂的几何形状，同时具有低成本和加工周期短的优势。对这一加工过程的仿真模拟涉及热固耦合，塑胶材料大变形，追踪复杂几何表面和纤维塑胶相互耦合等问题，需要使用到 LS-DYNA 多个功能模块。以右图所示的均匀热压塑成型为例，我们概述一下其中若干具体功能和关键字：

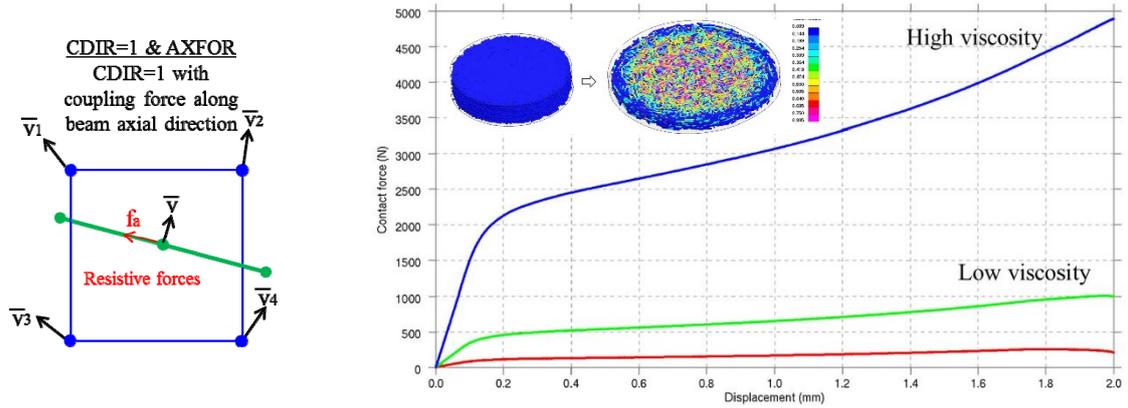


1. 长纤维网络使用有限元梁单元模拟。通过调整梁单元的截面积结合纤维长度来满足纤维体积占比的要求。

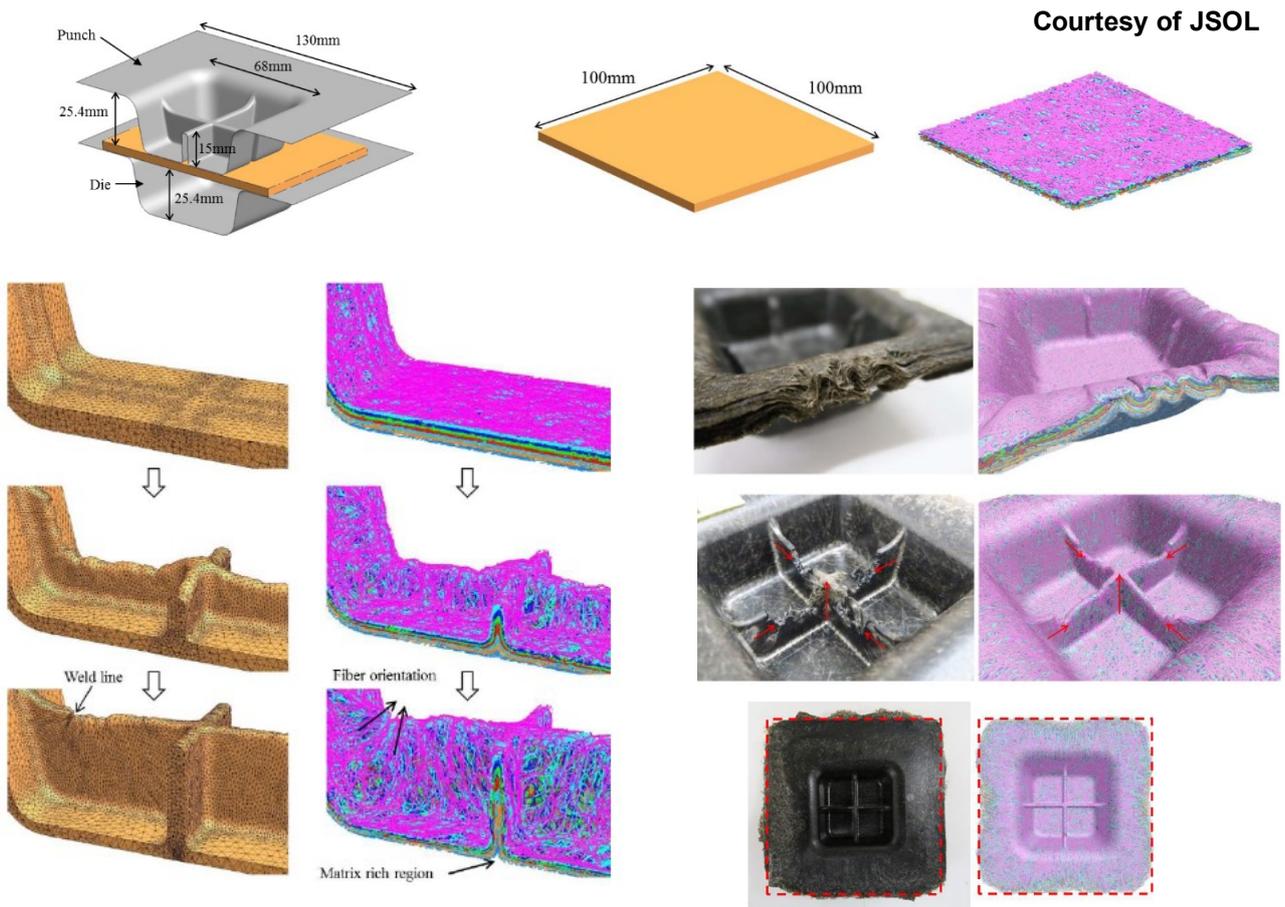


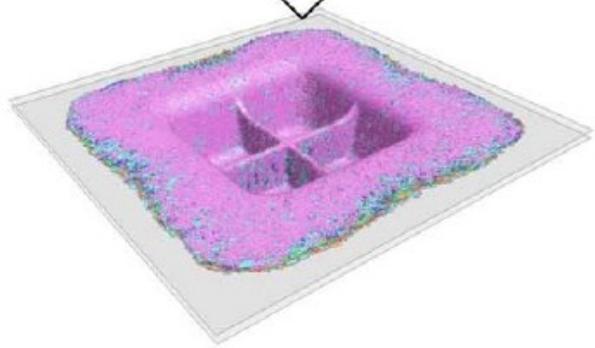
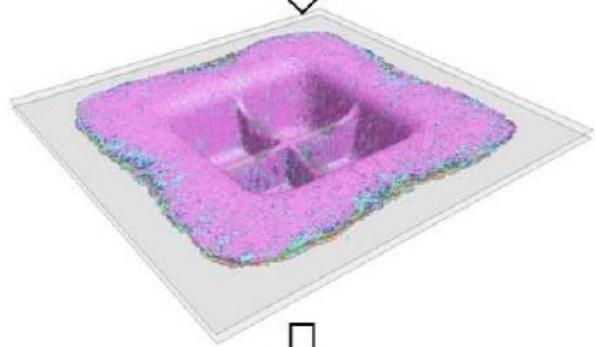
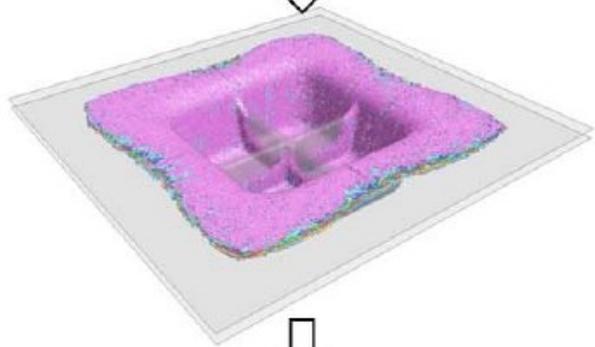
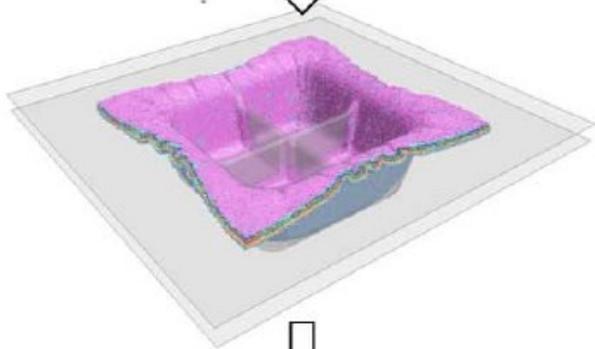
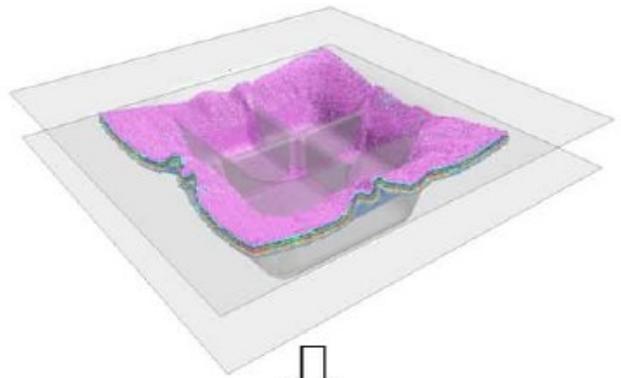
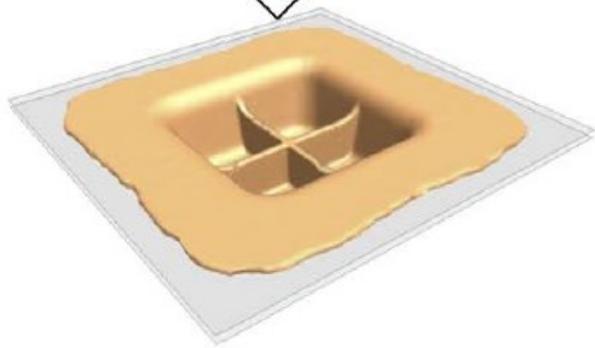
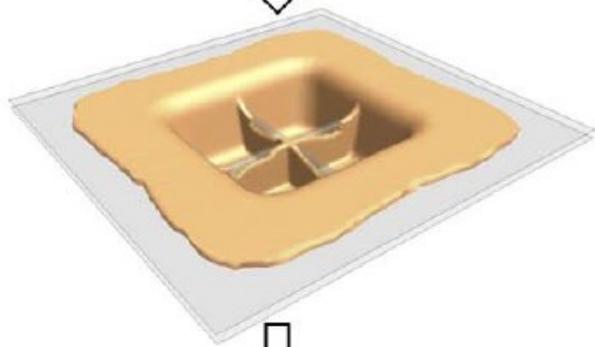
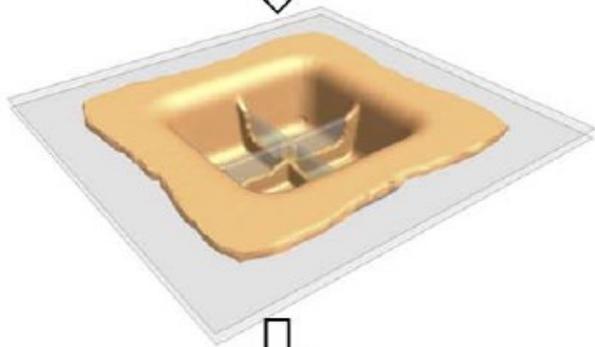
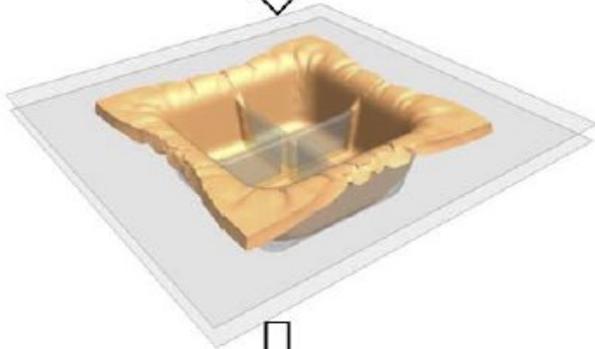
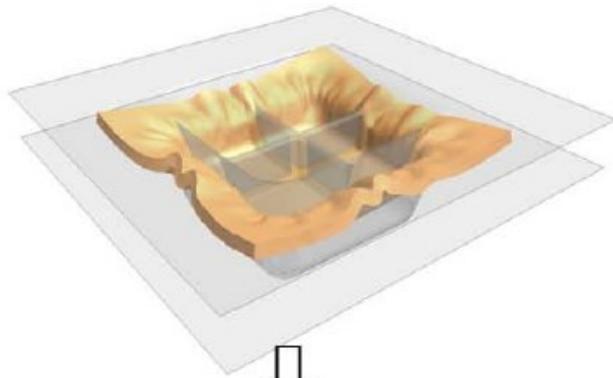
2. 塑胶的大变形过程由三维实体自适应功能来模拟，使用关键字 `*CONTROL_ADAPTIVE(ADPOPT=7)` 和 `*CONTROL_REMESHING`。目前通用自适应网格重分仅针对四节点体单元，使用 42 号 EFG 四节点单元类型可以获得更高的新旧网格间数值映射精度以及其他增强功能 (`*CONTROL_REMESHING_EFG`)。对于复杂几何表面成型，我们可以通过打开局部网格加密 (`*CONTROL_ADAPTIVE` 中的 `ADPENE`) 来获得更精细的网格分布。
3. 纤维（梁单元）和塑胶（实体单元）的耦合通过使用关键字 `*CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID` 来实现。这个关键字可以定义不同的耦合方式，在压塑成型模拟中主要使用 `CDIR=1&AXFOR`：纤维计算节点沿垂直于纤维方向完全跟随周边塑胶实体单元的变形，而在沿纤维方向施加耦合约束力（曲线），数值上类似在纤维计算节点沿纤维方向加了一个非线性弹簧。纤维增强塑胶材料在热压塑成型过

程中有材料粘性效应，数值上通过采用适合的耦合约束力曲线和塑胶材料模型 *MAT_ELASTIC_WITH_VISCOSITY 来得到和实验相近的材料粘性结果。



最后我们给出一个使用 LS-DYNA 进行纤维增强塑胶材料热压塑成型模拟的实例。这个模型使用了平均长度 30~50mm 的玻璃纤维(Tepex® flowcore)，共为八层，每层纤维沿随机方向分布，总体积占比 47%。塑胶材料为 Polyamide Nylon6 (PA6)。





*胡炜博士 2007年毕业于美国加州大学洛杉矶分校土木工程系结构力学专业。此前，于2001年、2003年获得北京清华大学工程力学系固体力学专业学士、硕士学位。从2009年至今，胡炜博士在LSTC从事三维自适应网格重构及无网格法相关的开发和工程问题的应用。

*吴政唐博士 1999年毕业于美国爱荷华大学机械系。主要专业为有限单元法及无网格法的研究及软体开发。吴政唐博士于2001年加入LSTC至今，主要从事宏观及微观尺度上的固体及结构力学问题的研究，开发和应用。

*任波博士 2003年毕业于华中科技大学水电与数字化工程学院。随后在加州大学伯克利分校担任项目科学家从事材料损伤、破坏的数值算法研究。2014年加入LSTC，主要负责多尺度下的材料失效分析数值方法开发和应用。

*刘泽良博士 2017年毕业于美国西北大学理论与计算力学专业。此前于2012年获得北京清华大学学士学位。从2017年至今，刘泽良博士在LSTC从事多尺度材料分析以及机器学习在物理材料模拟中的开发与研究。

*吕丹丹博士 2018年毕业于加州大学伯克利分校土木与环境工程系。同年加入LSTC，主要从事3D打印技术和近场动力学相关的计算功能开发及应用。