

玻璃成形工艺 数值模拟工具 DEFORM 及其应用

撰文 / 安世亚太科技股份有限公司 晏建军

一、玻璃成形工艺的工业需求

以汽车用玻璃为主的玻璃成形工艺包括落模成形、热弯成形、模压成形、辊压成形及玻璃面板热加等。这些工艺过程中，具有热粘弹塑性特性的玻璃在高温接近软化状态下进行成形，重力也将对其成形结果产生影响。与其他工业产品成形类似，玻璃的成形在成形工艺及模具设计不合理的情况下，仍然会产生成形缺陷，如贴膜不紧、形状未完全成形和表面裂纹等。目前国内企业在面临这些问题时大多采用试错法，也就是完全凭工程师经验进行大量的实际试验，这种方法的弊端在于对工程师经验依赖性大，经验又难以快速进行有效的积累和传承，多次试验使得产品的生产周期长，成本增加，质量不高。因此，企业需要一种有效地工具来面临挑战，专业材料成形工艺数值模拟工具 DEFORM 可以应对这些难题。

二、材料成形工艺数值模拟工具 DEFORM

DEFORM 源自塑性有限元程序 ALPID (Analysis of Large Plastic Incremental Deformation)。在 20 世纪 80 年代初期，美国 Battelle 研究室在美国空军基金的资助下开发了用于塑性加工过程模拟的有限元程序 ALPID，后来开发人员对程序进行了逐渐完善，并采用 Motif 界面设计工具，将程序发展成为商品化的软件 DEFORM (Design Environment for Forming)。经过 30 余年的发展，DEFORM 已经成为材料成形领域著名的工艺数值模拟软件。

DEFORM 是一套基于有限元的工艺仿真系统，用来分

析变形、传热和热处理之间复杂的相互作用，常被用于分析金属、玻璃及聚合物的成形现象。系统具有刚粘塑性及粘弹塑性算法，并同时耦合热分析，其有限单元采用 Lagrangian 算法并通过单元自适应进行大变形计算。如图 1 所示，各种现象之间相互耦合。这些耦合效应应包括：由于塑性变形引起的升温、加热软化、温度控制、热损耗、塑性和应变应力对材料的影响等，对于玻璃成形的热固耦合及温度场分析具有很强的计算能力。

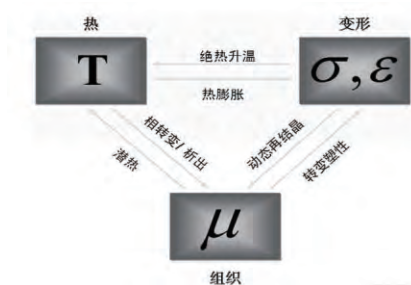


图 1 DEFORM 技术体系

三、DEFORM 玻璃成形工艺的工业应用

1. DEFORM 玻璃成形的技术特点

玻璃成形的基本理论涉及传热、流动及变化的边界条件，玻璃材料在成形过程将产生高的应变率、温度的不断变化及高的材料非线性问题。成形过程中，发生玻璃的自然散热、玻璃与模具的热传导等现象。因此，非线性模拟程序必须包括玻璃材料在热状态下的材料流动性能、温度边界的计算能力及热应力计算。

DEFORM 具有常用玻璃的成形流动应力应变数据, 该流动应力数据涉及不同温度、不同应变率条件下的多种应力应变曲线, 常用的温度范围为 $20 \sim 1250^{\circ}\text{C}$, 应变率范围为 $0.0001 \sim 100$, 因此可以分析复杂大变形的玻璃成形问题, 如模压成形和辊压成形等。另外, 如果有特殊的玻璃材料流动应力数据, 也可通过自定义模式直接输入到材料库中进行分析计算。

2. 玻璃落模成形分析

玻璃落模成形分析一般在将玻璃加热到 500°C 以上, 玻璃材料呈软化状态, 在重力作用下产生弯曲并贴合模具表面形成一定形状的产品。通过对玻璃落模成形过程的数值模拟计算, 预测不同温度及模面设计条件下玻璃的成形结果, 预测贴合间隙等缺陷, 优化工艺参数, 如图 2、图 3 所示。

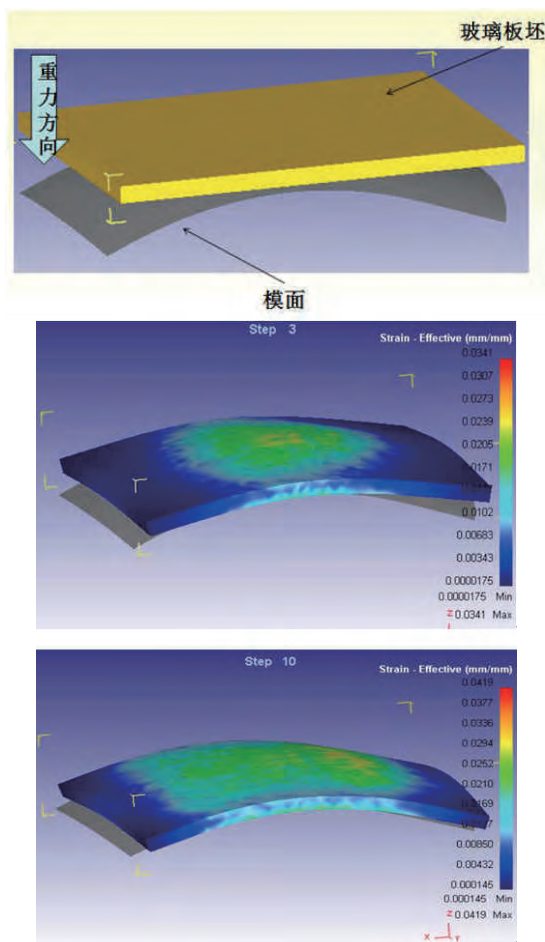


图 3 玻璃落模成形过程及应变分布云图

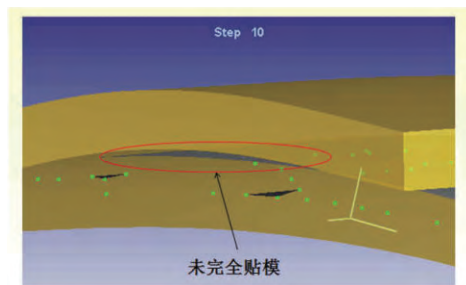


图 3 贴模成形不足的缺陷预测

3. 玻璃模压成形分析

DEFORM 玻璃成形数值模拟能够分析玻璃模压成形过程中的物理现象, 这些现象是实验很难预测的, 如图 4 ~ 6 所示。DEFORM 玻璃模压成形需要考虑的要点如下。

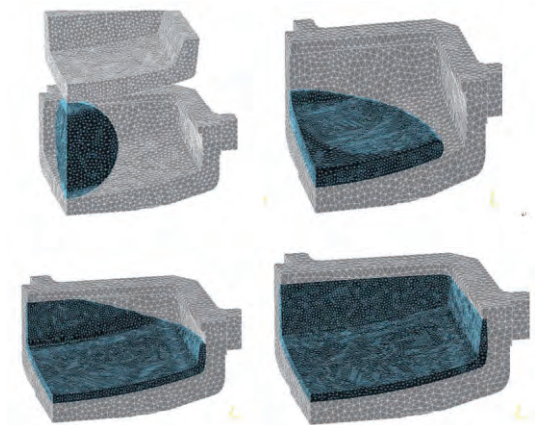


图 4 玻璃模压成形材料流动分析

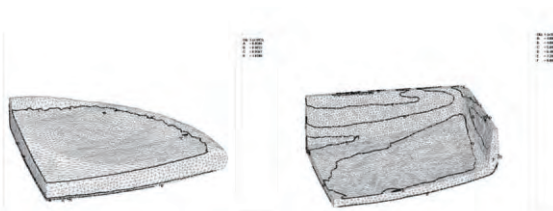


图 5 成形温度分布等值线

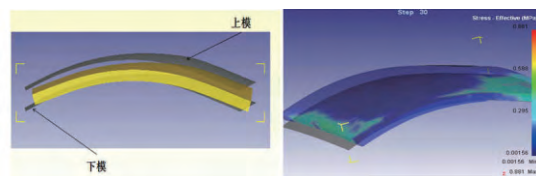


图 6 模压成形等效应力云图

(1) 金属模内的形状尺寸变化。玻璃产品形状尺寸与上下模的闭合间隙相关, 而模具在冷热状态下的尺寸可能产生变化。可以通过 CAD 建立模具冷温下的形状, 通过金属

热膨胀的热计算获得模具的温度分布及热变形。

(2) 模压过程的玻璃材料流动行为。在设计的工艺参数下玻璃是否完全填充模具型腔是模压成形的重要因素，成形过程中，有些地方可能因流动特性而更快地填充，而其他地方有可能无法完全充型。

(3) 材料充型过程和停留过程中玻璃材料的温度分布情况。玻璃需在可控速率下进行冷却，以避免玻璃因热损耗而产生畸变，过快的冷却速率将产生不理想的热应力现象。

(4) 模具的温度分布。过冷的模具表面可能造成玻璃产品的局部应力而产生扩展性裂纹，过热的模具表面可能造成玻璃粘在模具表面上。

(5) 玻璃应力。与模具接触位置的玻璃在成形和停留过程中会产生较为明显的热变化。在某些部位可能达到其流动温度点以下，因此粘性和结构松弛现象成为玻璃应力计算的重要影响因素。

(6) 重力影响。因模压前期重力作用造成的玻璃变形将在计算中予以考虑。

4. 玻璃辊压成形分析

DEFORM 具有专业的辊压成形分析模板，采用流程化操作方式，可以参数化建立玻璃辊压模型，并采用全六面体单元进行计算，预测辊压成形形状及缺陷，优化辊压工艺参数，如图 7 所示。

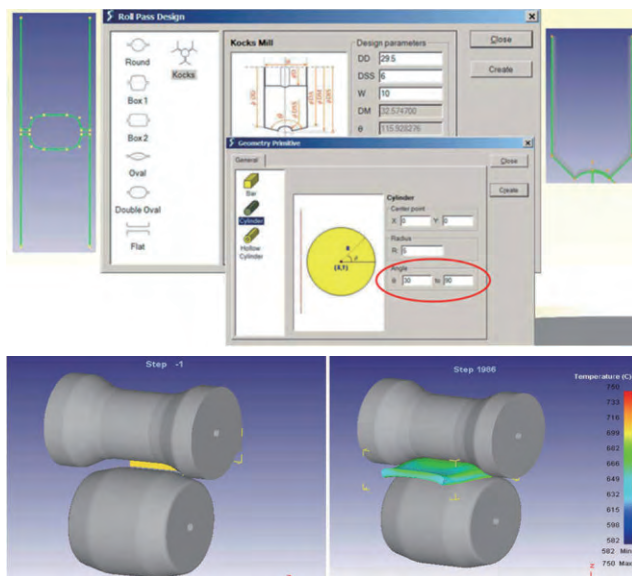


图 7 玻璃辊压成形分析

5. 玻璃加热分析

汽车玻璃的加热，通过在玻璃表面刷电阻丝并通过电流加热玻璃。其中电阻丝的尺寸及分布方式对玻璃的加热温度分布有很大影响。DEFORM 可通过热计算功能分析玻璃温度场分布，优化电阻丝参数及分布设计，如图 8 所示。

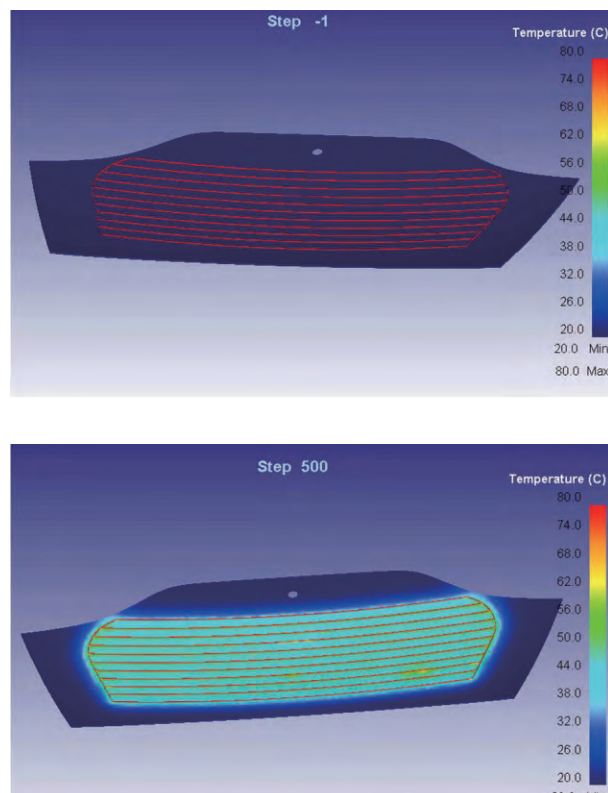


图 8 玻璃加热分析温度场云图