DOI: 10.3901/JME.2020.24.061

基于SPH的平面曲线铝合金薄板滚压成形 数值仿真与试验研究*

李建军 朱文峰

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘要: 滚边压合是实现车身门盖件内外板高质量连接的装配工艺, 其成形机理及质量预测一直是关注的重点。为定量揭示胶黏剂对轻质薄板成形的影响机理, 引入光滑粒子法(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)模拟胶黏剂, 建立能满足工程实际的预测模型, 并与传统欧拉法(Euler)进行了对比, 验证了方法的可行性。以典型曲线轮廓结构为研究对象, 采用有限元法(Finite element method, FEM)模拟铝合金薄板, 建立 SPH-FEM 耦合的数值模型, 对含胶滚压过程进行仿真, 并通过试验进行了验证。然后, 采用响应面法建立了胶层黏度、挤压速度和胶层厚度参数对成形质量交互影响的数学模型。研究表明, 与无胶层相对比, 有胶层的外板缩进值和最大塑性变形降低。胶层厚度对成形质量的影响显著, 胶层黏度次之, 滚压速度相对较小。基于 SPH 的建模方法解决了含胶滚压成形难以量化的问题, 为工艺优化和提升制造精度提供了重要的理论依据。

关键词: 滚压成形; SPH-FEM 耦合; 铝合金薄板; 胶黏剂

中图分类号: TG156

Numerical Simulation and Experiment of Roller Hemming-compression with Flat Surface-curved Edge Aluminum Alloy Sheet Based on SPH

LI Jianjun ZHU Wenfeng

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Roller hemming-compression is an assembly process to realize high quality connection between inner and outer panels of auto-body, and its forming mechanism and quality prediction have always been the research focus. In order to quantitatively reveal the effect mechanism, the smoothed particle hydrodynamics(SPH) is introduced to simulate the adhesive, and a simulation prediction model is established, in line with the engineering. The feasibility is verified by comparing with the traditional Euler method. The finite element method(FEM) is used to simulate the aluminum alloy sheet with the typical flat surface-curved edge., and the SPH-FEM coupled numerical model is established. The process is simulated and analyzed, and verified by experiments. Then, the mathematical model of the interaction effect of adhesive viscosity, squeeze speed and adhesive thickness on forming quality is established by response surface method. Results show that the roll-in and maximum elastic-plastic deformation with adhesive decrease relatively, compared with the model without adhesive. The influence of the thickness of the adhesive on the forming quality is significant, followed by the viscosity of the adhesive, and the squeezing speed is not significant. The modeling method based on SPH solves the difficult quantification problem of forming with adhesive, and provides a important theoretical basis for process optimization and improvement of manufacturing accuracy.

Key words: roller-hemming forming; SPH-FEM coupled; aluminum alloy sheet; adhesive

0 前言

滚边压合(滚压)是一种重要的车身门盖件内外

板连接的装配工艺, 如车门、行李箱盖、引擎盖等^[1-2]。为获得光滑的边缘轮廓, 该工艺的成形质量和精度一直是关注的重点。随着轻量化材料在门盖件中的广泛应用, 低密度薄板滚压质量的预测已经变得越来越重要^[3]。

成形过程中影响因素众多, 外板容易产生不同

* 国家自然科学基金资助项目(51975416, 51275359)。20200302 收到初稿, 20200825 收到修改稿

程度的轮廓尺寸变动和外观质量缺陷^[4-6],如缩进/涨出、褶皱和翘曲等。针对缺陷产生的机理^[5-7],前期学者做了大量的试验与仿真研究。铝合金板相对钢板的延展性和成形性较差,当采用传统的压合工艺时,弯曲区域容易产生断裂和裂纹^[8]。这促进了滚压工艺的发展,该工艺采用机器人驱动滚轮沿一定轨迹实现板材的弯曲。为缩短试验周期并降低试验成本,数值仿真成为质量预测的重要手段。THUILLIER 等^[9]采用有限元法(Finite element method, FEM)法对比了两种成形方式下铝合金薄板缩进/涨出值及弯曲弹塑性的变化。MAOÛ T 等^[10-12]分别计入了几何应变历史、循环硬化条件和机器人刚度对成形质量的影响。可以看出,构建更精确的数值模型一直是研究的重点。

内外板之间的胶黏剂在滚压工艺中起到了重要作用。一方面,它可代替点焊实现牢固连接^[13],使外板无焊点痕迹;另一方面,还可起到防振、防腐及密封等辅助作用^[14]。由于胶黏剂的物理特性与传统金属材料不同,这给数值仿真和试验测算带来了难度。SVENSSON 等^[15-16]发现并讨论了胶黏剂的作用,但是做了简化处理,最终导致了在不同区域理论仿真和试验结果差别较大。常温下,胶黏剂是一种高黏度非牛顿流体。根据流体动力润滑机理,受到两固体边界快速挤压时,产生黏压效应。该效应使流体内部产生压强,其大小与几何边界、挤压速度、流体黏度特性等有关^[17-18]。同样,当胶黏剂受到快速挤压时,将会产生瞬态的压强,并对固体约束边界产生作用力。BURKA 等^[19]研究了飞机制造复合材料领域中,胶黏剂受到板材挤压时的动力学特性,通过 Fluent 的仿真与试验对比,发现胶黏剂对插入板材产生显著的黏性反作用力。胶黏剂给计算和测量带来了难度,然而为持续提高轻质薄板的成形精度,有必要提出新的方法加以量化。

门盖件的轮廓形状复杂,以曲线轮廓比较常见,滚压结构与工艺如图 1 所示。在研究曲线轮廓时,需构建相对复杂的三维固体模型^[20-22]。如果再计入黏流态的胶黏剂,数值模型的建立和求解就会更加困难。

带胶黏剂的滚压过程,是典型的流固耦合问题。外板弯曲时,受挤压的胶黏剂具有自由边界,凸显出了高度非线性问题。Lagrange 法效率高,但是在处理计算大变形时容易遇到网格畸变,最终导致计算发散。Euler 法能够有效避免网格畸变问题,但该方法的边界定义不够精确,很难描述物质的自由边界运动。任意拉格朗日-欧拉方法(Arbitrary

lagrangian eulerian, ALE)具有两者的优点,但是该方法计算效率较低,且经常出现节点速度溢出等问题。光滑粒子法(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)法是一种无网格数值法,适合求解大变形及不连接介质的动力学问题。与 Lagrange 方法耦合时,不仅可解决单纯使用有限元法造成的网格过度扭曲问题,也可大大提高 SPH 法的计算效率。该方法在多个领域已成功应用^[23-26],因此,同样可以求解薄板-胶黏剂滚压耦合问题。

图 1 滚压结构与工艺

总之,若忽略胶黏剂的影响,则可能引起低密度薄板几何偏差及溢胶等工艺质量缺陷。但是,由于金属-胶黏剂耦合预测模型难以建立,导致胶黏剂的作用大小难以量化,作用机理尚不清楚。

本文以平面曲线轮廓的铝合金薄板 AA6016-T4 为研究对象,研究胶层-铝合金薄板耦合作用下的滚压成形机理及胶层挤压参数的影响。采用 SPH 法模拟胶黏剂, FEM 模拟铝合金薄板,建立 SPH-FEM 耦合的数值模型,对比分析了有胶层和无胶层时成形质量的变化,并通过试验进行了验证。然后,采用响应面法(Response surface methodology, RSM),研究了胶层黏度、挤压速度和胶层厚度等不同参数影响下,不同响应值的变化。通过构建更符合工程实际的数值模型,提高成形质量预测精度,以更好地支持对轻质车门工艺质量的持续改进和提升。

1 基于 SPH 的挤压流变模型

1.1 SPH 流体理论

SPH 是由 LUCY 等^[23-25]提出并发展起来的一种无网格法,应用于求解大变形及不连接介质的动力学问题,随后被成功应用于求解流体动力学问题。SPH 用粒子来表示流动的液体,并将流体的所有物理和数学特性都赋给 SPH 粒子。SPH 的核心是插值,SPH 粒子通过点插值的方法近似求出支持域内任意

点的场变量。

给定粒子 i 处的任意光滑函数 $f(x_i)$ 及其导数的离散近似形式为^[27]

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(|x_i - x_j|, h) \quad (1)$$

$$\nabla f(x_i) = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \nabla_i W(|x_i - x_j|, h) \quad (2)$$

式中, m_j 、 ρ_j 分别为粒子的质量和密度, W 是光滑核函数, 具有与 Dirac δ 函数相同的峰值性和正规化条件约束, h 是光滑长度。采用三次样条核函数

$$W(x - x', h) = C \begin{cases} 1 - 1.5u^2 + 0.75u^3 & 0 \leq u < 1 \\ 0.25(2 - u)^3 & 1 \leq u < 2 \\ 0 & 2 \leq u \end{cases} \quad (3)$$

式中, $u = |x - x'|/h$, 为常数系数, 对于三维问题, 常数 C 取值为 $1/(\pi h^3)$ 。

将流体力学连续、动量方程用式(1)、(2)表示, 得到 SPH 形式的质量守恒和动量守恒方程

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (4)$$

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v_i^\alpha + f_s \quad (5)$$

动量守恒中需要考虑黏性项的作用, 这将涉及到速度二阶导数的处理, 采用有限差分与 SPH 耦合的方法来模拟黏性项。采用文献[28]的推导方法, 由式(1)、式(2)和式(5)得到黏性流体作用的 SPH 形式动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{dv_i^\alpha}{dt} = & \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \\ & \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mu_i + \mu_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij}^\alpha \left(\frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \right) + f_s \end{aligned} \quad (6)$$

式中, i 和 j 表示粒子编码, N 代表粒子 i 支持域内的粒子总数, ρ_i 、 p_i 、 μ_i 、 v_i^α 为粒子 i 的密度、压强、动力黏度, α 方向的速度。矢量 r_{ij} 为粒子 i 和 j 的距离, v_{ij}^α 为粒子 i 和 j 在 α 方向的速度差。 f_s 为表面张力。

1.2 SPH-FEM 耦合法

FEM 是基于网格的 Lagrange 法, SPH 属于无网格 Lagrange 粒子法, 其计算精度不受物质变形程度的影响, 适合求解大变形以及高应变率问题。SPH 和 FEM 两者适用对象和领域各不相同, 两者有一定的互补性。SPH 与 FEM 的耦合可以通过接触算法来实现^[29], 如图 2a 所示。设置 SPH 粒子为从体, FEM 单元为主体, 通过接触算法来实现 SPH 粒子与有限元表面力的传递。接触算法如图 2b 所示, 大虚圆代表粒子 i 的支持域, 小虚圆代表设置在有限

元节点处的背景粒子。背景粒子具有 SPH 粒子的属性, 并与有限元节点保持一致。当 SPH 粒子与有限元节点间距达到设定光滑长度时, 在 SPH 粒子和有限元节点上施加接触力 $f(x_i)$ 。SPH 粒子数值积分时, 有限元以背景粒子的形式加入 SPH 临近支持域。

SPH 采用蛙跳格式求解流体动力学方程^[23-24], FEM 采用中心差分法求解显示动力学方程, 有利于提高数值模型的收敛性。将接触力分别以外力的形式加入 SPH 动量方程和有限元方程^[30]

$$\begin{aligned} \frac{dv^\alpha}{dt} = & \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \\ & \sum_j m_j \frac{\mu_i + \mu_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij}^\alpha \left(\frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \right) + f_s + f(x_i) \end{aligned} \quad (7)$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(x_i) \quad (8)$$

式中, M 为结构质量矩阵, C 为结构阻尼矩阵, K 为结构刚度矩阵, u 为某时刻结构位移。

(a) 耦合流程图

(b) 接触算法

图 2 SPH-FEM 耦合模型

1.3 数值方法对比

黏性流体的流变理论及应用已经相当成熟, 然而胶黏剂的挤压流变对固体边界影响的研究很少, 可参考的案例比较少。为阐明胶黏剂的挤压特性, 并验证 SPH-FEM 方法的准确性, 以飞机制造领域中复合材

料胶粘工艺^[19]为例进行了对比分析。采用 SPH 法模拟胶黏剂, FEM 法模拟平板和 π 型窄缝, 建立平板插入到 π 型窄缝结构过程中的数值模型, 插入的动态过程, 如图 3 所示。相关结构参数、工艺参数与文献^[19]相同, 整个仿真过程基于商业软件完成。

图3 基于 SPH 法的薄板插入 π 型结构的胶粘工艺过程

胶黏剂的分布和插入参数对胶接结构具有重要影响, 图 4 为胶黏剂黏度为 $1 \text{ kPa} \cdot \text{s}$, 插入速度 10 mm/s 时, 不同方法下板插入 π 型槽过程中受到的单位反作用力 F_{ins} 和归一化时间 t^* 的关系。可见 SPH-FEM 法与理论分析吻合较好, 能有效地实现胶黏剂挤压流动特性的模拟。

图4 SPH 法与欧拉法的比较

当平板插入 π 型槽内时, 胶黏剂受到挤压, 会在固体之间狭窄的缝隙里流动。物理上, 当黏性流体受到两固体相对挤压作用时, 压强出现在薄层间隙内, 并对固体边界产生法向作用力, 形成黏压效应^[17-18]。胶黏剂和插入板形成流固耦合的运动, 相互作用。文献^[19]研究已经表明, 插入参数对胶黏剂的流动分布和插入力均会产生显著的影响。滚压工艺与胶粘复合连接结构形式存在着差异, 但是胶黏剂同样会在外板和内板之间形成的间隙内流动, 流固耦合运动的机理相似。与它不同是, 滚压工艺中力学作用更加复杂, 胶黏剂的流动与薄板弯曲互相影响, 胶黏剂受到挤压时流动方向不固定。当采用基于 Euler 的 ALE 法建立流固数值模型时, 需要额外地划分空气域; 且为保持自由界面精度, 还需加密网格, 这增加了计算量。特别是受到快速挤压时, 胶黏剂可能会产生溢胶问题, 则需要更大的离散域, 这导致计算效率低甚至难以收敛。SPH-FEM 法不需要考虑空气域, 将胶黏剂划分为无网格的拉格朗日型 SPH 粒子, 其精度不受物质变形精度的影响, 显示出计算效率的优势, 可以有效克服前述难题。

2 滚压模型的建立

2.1 材料特性

AA6 016-T4 具有良好的力学和弯曲成形特性, 在汽车外覆盖件中应用广泛, 其材料特性参数通过电液伺服试验机 SHT4 305 试验获得。相对于轧制方向, 沿 0° 、 45° 和 90° 方向完成单轴拉伸试验, 真实应力-应变曲线如图 5 所示, 其特性展现出各向同性。由于在滚压过程中, 载荷没有反向加载的过程, 因此不考虑包辛格效应带来的影响。整个弹塑性变形过程中, 采用 Von Mises 屈服准则和幂律等向强化模型。其中, AA6016-T4 材料的弹性模量 $E=69 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$, 密度 $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$, 硬化指数 $n=0.28$, 屈服强度 $\sigma_s=124 \text{ MPa}$ 。

图5 AA6 016-T4 的应力应变曲线

胶黏剂是一种高分子聚物流体, 在挤压过程中, 主要发生拉伸流动, 忽略其随剪切速率发生变化的非牛顿特性; 同时由于挤压作用时间短, 忽略胶黏剂的时间相关项, 如触变性和震凝性。因此, 本文将其作为一种高黏性牛顿流体。所研究胶黏剂为汽车用单组分环氧树脂型折边胶, 通过旋转黏度计测得其动力黏度为 $50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。常温下, 折边胶为黑色柔性糊状物, 其密度 $\rho=1.48 \text{ g/cm}^3$, 含固率为 99%, 剪切强度 $\tau_s=31 \text{ MPa}$ 。

2.2 数值模型

曲线轮廓的滚压结构是工程中常见的结构形式, 如图 6 所示, 而相关的研究较少。其中, 图 6b 中, S1、S2、S3、...、S13 表示沿曲边切线方向上等间距分布的不同截面。与平面直边不同, 由于曲率的存在, 外板在不同阶段会产生周向压缩, 并且容易造成褶皱缺陷。一般地, 褶皱是轮廓半径 R_c 和翻边高度 L_F 的函数, 当轮廓半径 R_c 较小、翻边高度值大时, 翻边区更容易出现^[6]。因此, 为保证在翻边阶段不产生褶皱, 选择了比较典型的结构尺寸, 如表 1 所示。胶黏剂的黏性较高且流淌性较差, 在重力作用下形状基本不变化, 假定其横截面的初始形状为圆柱状, 如图 6c 所示。

图 6 结构尺寸图

实体单元考虑了弯曲效应和剪切效应, 在滚压仿真中计算精度要高于壳体单元, 但壳单元能够有效降低计算时间。WAGONER 等^[31]指出, 通过增加壳单元厚向积分点的数目, 可以提高小半径弯曲的成形精度。因此, 铝合金外板采用厚向 5 个积分点的壳单元来建模。在外板的弯曲区域, 网格大小为 0.5 mm , 长度方向 4 mm , 其他区域网格稀疏。为节约计算时间, 内板设置为刚体。

耦合算法中, 界面处粒子密度相对于单元密度越大, 计算精度越高, 通常两者相当或粒子密度稍大时, 可获得理想结果^[25-26]。胶黏剂横截面上 SPH 粒子间距为 0.1 mm , 长度方向 3 mm 。相对于前期的仿真研究, 本模型存在 SPH 粒子, 耦合后的三维模型计算量大, 容易导致不收敛。为提高计算效率, 采用了质量缩放的方法, 并通过计算机多核运算。

表 1 结构主要尺寸参数

参数	mm
数值	
内外板厚度 t_1	0.8
上/下胶层厚度 t_2	0.2
样本长度 L_S	200
样本宽度 L_W	42
胶黏剂初始状态直径 D	3
高度 L_H	40
翻边半径 R_c	240

3 试验对比

3.1 试验过程

试验装置包括 FANUC R-2000iB 机器人、滚压胎模、夹具、支座、以及滚压头。首先, 按图 6 制作试验样本; 然后, 通过专用胶枪将圆柱状胶黏剂, 涂抹在折弯 90° 后的外板的预定位置上, 扣合上内板, 缓慢平行挤压至指定厚度。内外板之间的厚度, 通过在两端添加少量玻璃珠来控制。

将准备好的样件通过夹具固定在胎膜上。机器人手臂控制着滚轮, 按照系统预设的轨迹完成对样件的滚压运动, 滚轮的运动速度为 100 mm/s 。每次样本试验进行三次, 取平均值。缩进/涨出值将影响后继装配工序的匹配间隙, 是成形的重要指标, 是本文关注的重点, 该试验值通过游标卡尺测量获得。

3.2 对比分析

图 7a 为铝合金外板上涂胶的试验与数值仿真结果。图 7b 分别为滚轮挤压铝合金外板的试验与仿真瞬态过程(内板未显示)。高黏度流体的折边胶以 SPH 形式建模, 受外板挤压后流动, 且外板在折边胶的影响下成形, 这与试验过程相似。这表明 SPH-FEM 法可将胶黏剂因素引入到轻质薄板的成形中, 可以构建更符合工程实际的数学模型。

(a) 涂胶过程

(b) 滚边过程

图7 滚压过程试验与仿真对比

图8为预滚压和终滚压后的铝合金薄板的仿真和试验结果。预滚压时翻边处有波浪褶皱较大,终滚压时翻边处波浪减小。与试验结果相比,带胶的数值仿真,能够反映出薄板成形的趋势。

(a) 样本仿真结果

(b) 样本试验结果

图8 样本试验与仿真对比

图9和图10分别给出了相同样本下预滚压和终滚压中不同方法的缩进涨出值。可以看出,采用文献方法时,缩进值偏大,单纯改变摩擦因数时,不能实现有效逼近测量值。采用SPH-FEM方法时,预测趋势和大小与试验值吻合较好。

图9 预滚压缩进/涨出对比

图10 终滚压缩进/涨出对比

4 结果与讨论

4.1 带胶滚压过程

在翻边阶段, 缺陷相对较少, 可能出现的褶皱现象主要与翻边高度和曲率半径的匹配有关^[7]。在压合阶段, 胶黏剂与外板的几何位置关系, 能够影响胶层的最终分布, 但该阶段没有影响成形质量。在预滚边和终滚边阶段, 在滚轮、胎模、胶层的多个约束下, 内板和外板形成瞬态的封闭空间, 成形质量与无胶层时发生相对变化。

如图 9 和图 10 所示, 总体上, 预滚压阶段, 铝合金薄板运动趋势为缩进; 终滚压阶段, 缩进值相对降低。同时, 缩进涨出值和几何形状有关, 对于平面直线轮廓结构, 缩进涨出变化均匀; 对于平面凸线轮廓结构, 中间缩进值平稳, 两侧相对较大, 与无胶层时规律相似^[9]。这是由于在挤压过程中, 薄板主要产生 y 轴方向的运动; 中间受对称边界约束的影响较大, 在两端自由边界处影响较小。相对于无胶层, 有胶层时的薄板结构, 缩进值相对降低, 但总体趋势相同。一方面, 高黏度胶层在挤压状态下, 产生的黏压力对薄板产生作用; 另一方面, 胶层厚度的存在改变了滚轮的着力点, 在多因素瞬态作用下, 铝合金薄板材料变形规律和成形精度相对于高强度厚板发生了改变。

图 11 为预滚压和终滚压阶段, $a-a'$ 中间截面上 SPH 粒子的挤压产生的黏压力和流速随时间的变化。可以看出, 黏压力和流速存在一定的关联性, 整个过程出现两个峰值, 分别发生在预滚压和终滚压两个阶段。胶黏剂黏度远高于常见的水、润滑油等液体, 在固体表面边界挤压条件下, 压黏效应显著, 外板弯曲影响了胶层的流动分布, 流体对薄板产生了显著的反作用力。

图 11 中间截面处某粒子黏压力和流速的变化

铝合金的延展性比钢板要差, 过大的塑性变形时, 折弯区容易产生裂纹。塑性变形是铝合金成形质量的重要指标^[8]。图 12 和图 13 分别为无胶层和有胶层时, 不同区域的等效塑性应变随时间的变化。可以看出: 有胶层的结构相对于无胶层, 等效塑性

应变值在不同阶段均有所下降; 同时, 不同区域的弹塑性应变值也不同, 对称中间截面 $a-a'$ 比截面 $b-b'$ 上的值偏高。这是因为含胶滚压时, 胶层受到快速挤压后, 薄板在内侧弯曲圆角处受到黏压力的反向作用, 同时为保证胶层工艺厚度, 滚轮与薄板的力作用点相对外移, 增大了弯曲半径, 从而降低了铝合金薄板的拉伸率。在不同截面处, 由于瞬态的挤压边界存在变化, 对薄板的挤压方向和大小均有所改变, 部分截面处有材料堆积, 导致弹塑性值有所改变。总体上, 胶层的存在有助于改善铝合金薄板的弹塑性应变特性。

图 12 无胶时折弯区和翻边区等效塑性应变

图 13 有胶时折弯区和翻边区等效塑性应变

在预滚边和终滚边阶段, 铝合金薄板受到滚轮的挤压和拉伸作用, 材料发生失稳, 在翻边区域产生波浪和褶皱, 影响成形厚度, 进而影响后继装配工序的匹配面差^[2]。如图 7 中所示, 在预滚边阶段, 翻边区波浪程度较大, 此时胶层未产生作用。在终滚边阶段, 滚轮水平滚压, 翻边区波浪程度降低。无胶层时, 对于平面直边结构, 预滚压产生的波浪褶皱, 在终滚压阶段会被压平^[10]。对于曲线结构, 平整度相对较差, 这与多个因素有关。

为了直观量化翻边的平整度, 学者采用了不同方法。本文定义波浪系数方法, 如图 14 所示。通过测量点的方差来反映终滚压的不平整程度。结果显

示有胶层和无胶层的波浪系数值分别为 0.056 和 0.015。这表明有胶层时, 终滚边后的表面质量相对于无胶层时, 平整度有所降低, 波浪程度有增大的趋势。另一方面, 由于曲线结构曲率的存在, 与直线结构相比, 瞬态挤压时, 薄板产生一定的累积^[7], 在胶层的流动的共同作用下, 波浪系数相对增加。

图 14 波浪系数

4.2 参数的影响

影响成形过程和目标质量的参数众多, 本文主要关注由胶层带来的影响。平行挤压过程中的雷诺方程表明, 黏压强度的大小, 主要与流体黏度、挤压速度和挤压厚度相关^[18]。由于滚压工艺过程复杂, 且影响是随机的, 很难通过解析数学公式来实现多因素的预测。RSM 响应面法是试验设计和数学统计的组合方法, 在研究单因素及多因素交互作用对响应目标的影响时, 通过回归方程拟合, 能够建立高精度的预测模型, 特别适合于复杂的工艺过程, ZHANG 等^[4]、LIN 等^[21]和 GÜRGEN 等^[22]分别对无胶的滚压工艺过程, 采用 RSM 法建立了较高精度的线性回归预测模型, 本文采用相同的方法研究不同参数对目标响应的影响。

以胶层黏度、滚压速度、胶层厚度作为输入变量, 通过 RSM 法建立输入参数与目标响应之间的数学模型。BBD(Box-Behnken)法是一种基于三水平的二阶采样试验法, 采用多元二次方程拟合因素和响应值之间的关系, 无需多次连续试验, 具有效率高的优势。参考了汽车折边胶的标准 QC/T852-2011 及薄板滚压工艺经验参数^[9-12], 采用 BBD 法设计的试验因子与水平如表 2 所示, 通过 Design-expert11.0 完成数据响应面模型的拟合。其中, 缩进/涨出均值为图 6b 所示的各截面上的平均值。

表 2 试验因子与水平

参数	变化因子		
	-1	0	1
胶层厚度 h/mm	0.1	0.2	0.3
滚压速度 $V/(\text{mm/s})$	50	200	350
胶层黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	50	200	350

通过方差分析, 试验模型的 P 值均小于 0.000 1 (<0.05), 表明该模型是显著的。为检验模型

的合理性, 以模型的相关系数 R^2 和调整后的离差平方和 R_{adj}^2 为评价指标, 建立不同目标响应的回归模型, 如表 3 所示。表明该回归模型能够在设计空间内精确地反映试验参数与不同响应目标之间的关系。

表 3 不同目标的回归模型

参数	回归模型	相关系数 R^2	修正相关系数 R_{adj}^2
缩进/涨出值/mm	$0.30 - 0.25h + 4.0 \times 10^{-5}v - 2.0 \times 10^{-4}\mu + 2.2 \times 10^{-18}hv - 5.5 \times 10^{-4}h\mu + 1.1 \times 10^{-8}v\mu + 3.42h^2 - 1.88 \times 10^{-7}v^2 + 4.44 \times 10^{-8}\mu^2$	0.997 8	0.994 9
最大塑性应变	$0.50 - 8.3 \times 10^{-4}h + 6.5 \times 10^{-5}v - 6.0 \times 10^{-5}\mu - 9.4 \times 10^{-18}hv - 8.3 \times 10^{-4}h\mu - 8.8 \times 10^{-8}v\mu - 1.1h^2 - 1.5 \times 10^{-7}v^2 - 2.6 \times 10^{-7}\mu^2$	0.996 5	0.992 1
波浪系数/ mm^2	$-0.06 + 0.51h + 2.89 \times 10^{-4}v + 3.54 \times 10^{-5}\mu - 6.0 \times 10^{-4}hv - 4.0 \times 10^{-4}h\mu - 8.8 \times 10^{-8}v\mu + 1.0 \times 10^{-3}h^2 - 2.8 \times 10^{-8}v^2 + 8.9 \times 10^{-8}\mu^2$	0.995 7	0.990 2

根据表 3 中的回归模型, 相对于胶层黏度和厚度, 滚压速度对缩进/涨出的影响相对较小。如当厚度为 0.2 mm、黏度为 200 Pa·s 时在水平范围内改变滚压速度, 目标值在 0.37~0.41, 变化幅度相对较小。这是由于在翻边拐角处, 试验水平范围内由滚压速度引起的黏压力的变化幅度不大。图 15 给出了胶层厚度和黏度的非线性关系。可以看出随着厚度的增加, 缩进值变大, 这是因为在终滚压阶段, 挤压间隙增加, 导致黏压效应降低, 黏压力变弱, 同时滚轮挤压着力点向内移动。胶层黏度的影响次之, 黏度值减小时缩进值增大。在前期研究中, 无胶层滚压时, 板材厚度、预滚压角度是影响缩进/涨出的最重要的两个因素^[21-22]。有胶层时, 胶层厚度和黏度的变化改变了挤压受力作用点, 同样对缩进/涨出产生影响, 成为仅次于板材厚度的重要因素。

图 15 参数对缩进/涨出的影响

方差分析显示, 滚压速度对目标响应不显著, 在试验范围内影响相对小。图 16 给出了胶层厚度和黏度对最大应变影响的非线性关系。可以看出胶层厚度和黏度的影响是显著的, 厚度和黏度增加时, 最大塑性变形减小。这是因为在滚边线处, 挤压瞬态边界发生了变化, 导致外板材料的最大拉伸形变降低。无胶层滚压时, 板材厚度、预滚压角度是影响最大塑性应变的两个因素^[21-22]。有胶层时, 胶层厚度和黏度影响显著。

图 16 参数对最大应变的影响

图 17 给出了挤压速度和胶层厚度对波浪系数影响的非线性关系。波浪系数是由滚轮滚动循环拉伸压缩翻边区域产生的^[11]。厚度增加时, 波浪系数增加, 这是由于在终滚边压平阶段, 当厚度超过 0.2 mm 时, 增加了挤压边界的不稳定性。同样挤压速度增加时, 折边胶的黏压效应增加, 瞬态的滚压条件改变, 导致波浪系数增加。文献[21-22]研究表明, 无胶层滚压时, 板材厚度影响最大, 滚轮直径、预滚压角度影响次之。有胶层时, 厚度影响明显, 速度和黏度次之。

图 17 参数对波浪系数的影响

综上所述, 胶黏剂具有的不可压缩、高黏度特性是黏压效应产生的基础。在铝合金薄板带胶滚压工艺中, 当胶黏剂黏度超过 200 Pa·s 时, 整体影响

会越来越明显。胶层厚度过低和过高都会降低黏压作用, 当厚度处于 0.1~0.2 mm 时, 与无胶相比, 缩进值降低相对明显。胶黏剂厚度和黏度的增加均能够降低在滚压线处的最大塑性应变, 有利于降低裂纹产生的风险。滚压速度增加时, 胶黏剂流速增加, 与薄板相互作用明显。但速度过高时, 波浪系数增加, 同时有溢胶的风险。因此, 滚压速度控制在 100~300 mm/s 比较适宜。

5 结论

(1) SPH-FEM 耦合仿真模型与试验结果吻合度较好, 表明建立的数值模型能够有效模拟胶层-轻质薄板的滚压成形过程。

(2) 在黏压效应及滚压挤压作用点改变的影响下, 薄板的成形质量会发生改变。当采用改变摩擦系数的简化方法模拟或者忽略胶层的存在时, 均会造成较大的偏差, 不利于实现精确预测。

(3) 在平面凸线轮廓的铝合金薄板滚压工艺中, 胶层受到挤压, 与流体动压润滑相似, 在预滚边和终滚边阶段, 内部均会出现一个黏性压强峰值, 对铝合金薄板成形产生影响。与无胶层时相对比, 成形趋势相同, 缩进值相对增加, 最大塑性变形相对降低, 波浪起皱程度相对增加。

(4) 通过 RSM 法建立了滚压参数与铝合金薄板成形质量之间的数学模型。其中, 厚度对目标响应均有显著性影响; 厚度增大时, 缩进值增大, 最大塑性应变降低, 同时波浪系数增加。黏度的影响次之, 当黏度超过 200 Pa·s 时, 黏压效应越明显。滚压速度的影响相对小一些, 但速度过高时, 波浪系数增加, 且增加了溢胶的风险。

参 考 文 献

- [1] LIVATYALI H, LAXHUBER T, ALTAN T. Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(1): 41-52.
- [2] LIN G, KLYER, HU S J, et al. A computational design-of-experiments study of hemming processes for automotive aluminium alloys[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2005, 219(10): 711-722.
- [3] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.

- LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-materials lightweight car body[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 1-23.
- [4] ZHANG G, WU X, HU S J. A study on fundamental mechanisms of warp and recoil in hemming[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the ASME*, 2003, 123(4): 436-441.
- [5] MUDERRISOGLU A, MURATA M, TUFEKCI S, et al. Bending, flanging and hemming of aluminum sheet-an experimental study[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 59(1-2): 10-17.
- [6] LIVATYALI H, LARRIS S J. Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming: roll, recoil and warp [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153(10): 913-919.
- [7] LIVATYALI H, LAXHUBER T, ALTAN T. Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146(1): 20-27.
- [8] HU Xing, ZHAO Yixi, HUANG Sheng, et al. Numerical analysis of the roller hemming process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(5-8): 543-550.
- [9] THUILLIER S, MAOÛ T L N, MANACH P Y, et al. Numerical simulation of the roller hemming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3): 226-233.
- [10] MAOÛ T L N, MANACH P Y, THUILLIE S. Influence of prestrain on the numerical simulation of the roller hemming process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(2): 450-457.
- [11] HU Xing, LIN Z Q, LI S H, et al. Fracture limit prediction for roller hemming of aluminum alloy sheet[J]. *Materials and Design*, 2011, 31(3): 1410-1416.
- [12] EDUARDO E, GIUSEPPE C, MARCO C. A dynamic compensation for roll hemming process [J]. *IEEE Access*, 2018, 6(3): 18264-18275.
- [13] ZHENG S, VANDERSTELT J, MCDERMID J R. Non-destructive investigation of aluminum alloy hemmed joints using neutron radiography and X-ray computed tomography[J]. *NDT and E International*, 2017, 91(10): 32-35.
- [14] MOURA M F S F, GONÇ ALVES J P M, CHOUSAL J A G, et al. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008, 28(8): 419-426.
- [15] SVENSSON M, MATTIASSON K. Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-Method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128(1-3): 142-154.
- [16] SIGVANT M, MATTIASSON K. FE-simulation of hemming in the automotive industry[C]// *Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*. Detroit, Michigan: AIP Conference Proceedings, 2005, 778: 675-680.
- [17] LAUN H M, RADY M, HASSAGER O. Analytical solutions for squeeze flow with partial wall slip[J]. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, 1999, 81(1-2): 1-15.
- [18] 熊万里, 胡灿, 吕浪, 等. 可控节流参数对液体静压轴承特性的影响研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(21): 63-71.
- XIONG Wanli, HU Can, LÜ Lang, et al. Research on the influence of controllable restrictor parameters on the characteristics of hydrostatic journal bearings[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(21): 63-71.
- [19] BURKA P, LIU X, THOMPSON M C. Modelling of adhesive bonding for aircraft structures applying the insertion squeeze flow method[J]. *Composites: Part B*, 2013, 50(7): 247-252.
- [20] SELIM G. Numerical simulation of roller hemming operation on convex edge-convex surface parts[C]// *Advanced Engineering Forum*, 2016, 4365(15): 75-84.
- [21] LIN Guosong, LI Jing, HU J, et al. A computational response surface study of curved-surface-curved-edge aluminum hemming using solid-to-shell mapping[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 129(2): 360-367.
- [22] SELIM G. A parametric investigation of roller hemming operation on a curved edge part[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 19(1): 11-19.
- [23] LUCY L B. A numerical approach to testing of the fission hypothesis[J]. *Astronomical Journal*, 1977, 82(10): 1013-1024.
- [24] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 181(3): 375-389.

- [25] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 213(2): 803-822.
- [26] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics: a mesh-free particle method[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd., 2003.
- [27] TAKEDA H, MIYAMA S M, SEKIYA M. Numerical simulation of viscous flow by smoothed particle hydrodynamics[J]. Progress of Theoretical Physics, 1994, 92(5): 939-960.
- [28] CLEARY P W, MONAGHAN J J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 148(1): 227-264.
- [29] 石秉良, 周孔亢, 张云, 等. 基于 SPH 算法的驾驶室底部结构对爆炸冲击波响应数值仿真[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 132-139.
- SHI Bingliang, ZHOU Kongkang, ZHANG Yun, et al. Numerical simulation of the response of vehicle cab bottom shell structure under explosive blast wave based on smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 132-139.
- [30] VIGNJEVIC R, VUYST T D, CAMPBELL J C. A frictionless contact algorithm for meshless methods[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2006, 13(1): 107-112.
- [31] WAGONER R H, LI M. Simulation of springback: Through thickness integration[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23(3): 345-360.

作者简介: 李建军, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为胶粘异质薄板连接。

E-mail: lijianjun@tongji.edu.cn

朱文峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车身数字化设计与制造。

E-mail: zhuwenfeng@tongji.edu.cn