

铝合金翼子板锐棱成形模具磨损仿真研究

蒋 磊¹, 谢 晖^{2,3}, 李乐平³, 龚 熙¹, 廖 敏¹, 陈俊伟¹, 孔繁涛³, 马培兵¹

(1. 东风本田汽车有限公司 新车型中心, 湖北 武汉 430056; 2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 大捷智能科技(广东)有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要: 为了研究铝合金锐棱成形模具的磨损规律, 以采用锐棱造型设计的某车型铝合金翼子板为研究对象, 利用 CATIA 软件构建了翼子板拉伸成形模具的三维几何模型, 并借助 Autoform 有限元仿真平台对翼子板拉伸成形过程进行了数值模拟。基于数值模拟结果和 Archard 磨损模型应用 Python 进行二次开发, 建立了可在 Autoform 有限元仿真平台进行模具磨损分析的模拟方法和流程, 从而快速获得翼子板锐棱成形模具的磨损仿真结果。根据磨损仿真结果, 对翼子板锐棱成形模具进行了针对性的表面强化处理, 提高了翼子板锐棱成形模具的耐磨性, 通过大批量生产验证, 翼子板锐棱成形模具无过度磨损, 可以满足连续应用的需求。研究表明, 将 Python 二次开发应用于 Autoform 有限元仿真平台, 能够高效、准确地得出锐棱成形模具的磨损规律。

关键词: 翼子板; 磨损规律; 锐棱成形模具; 二次开发; Archard 磨损模型; 耐磨性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.029

中图分类号: U466; TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0210-09

Simulation study on forming die wear for aluminum alloy fender with sharp edge

Jiang Lei¹, Xie Hui^{2,3}, Li Leping³, Gong Xi¹, Liao Min¹, Chen Junwei¹, Kong Fantao³, Ma Peibing¹

(1. New Model Center, Dongfeng Honda Automobile Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

2. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Dajie Intelligent Technology (Guangdong) Co., Ltd., Foshan 528225, China)

Abstract: In order to study the wear laws of the sharp edge forming die for aluminum alloy, for the aluminum alloy fender of a certain vehicle model with sharp edge design, the three-dimensional geometry model of drawing die for fender was constructed by using software CATIA, and the drawing process of fender was numerically simulated by the finite element simulation platform Autoform. Then, based on the numerical simulation results and Archard wear model, the secondary development was conducted by Python, and a simulation method and process for die wear analysis were established on the finite element simulation platform Autoform to quickly obtain the wear simulation results for the forming die of fender with sharp edge. Furthermore, according to the wear simulation results, the targeted surface strengthening treatment for the forming die of fender with sharp edge improves the wear resistance of the forming die for fender with sharp edge, and through mass production verification, the forming die of fender with sharp edge has no excessive wear, which could meet the continuous production requirements. The results show that applying the secondary development of Python to the finite element simulation platform Autoform can efficiently and accurately obtain the wear laws of the sharp edge forming die.

Key words: fender; wear laws; sharp edge forming die; secondary development; Archard wear model; wear resistance

随着我国新能源汽车产业的快速蓬勃发展, 各种造车新势力异军突起, 传统车企亦随之转战电动车市场, 导致汽车行业的竞争益发激烈。为了立足

于市场, 不断提高产品质量、降低生产成本是当下汽车企业最重要的工作之一。对于乘用车而言, 其生产成本主要由研发成本、设备工装成本、零部件采购成本、劳务成本等构成, 而这其中又以设备工装成本和零部件采购成本占比最高。一台整车往往由上万个零部件构成, 这些零部件中 80% 以上为金属薄板件, 其生产加工方式以冲压成形为主, 即需要使用冲压模具进行生产制造。通过企业统计数据可知, 一款全新开发的车型, 用于生产金属薄板件

收稿日期: 2022-11-21; **修订日期:** 2023-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51975439, 51675392); 中国汽车产业创新发展联合基金 (U1564202); 湖南省创新型省份建设专项项目 (2019GK5018)

作者简介: 蒋 磊 (1987-), 男, 工学学士, 高级工程师

E-mail: 648213973@qq.com

的冲压模具可多达数千套,设计、制造、安装、调试成本约为2~3亿元。

近年来汽车行业的电动化进程不断加快,越来越多的汽车企业采用架构化设计来逐步取代传统的平台化和模块化设计,基于同一架构所衍生的不同车型所共用的零部件,尤其是金属薄板件也随之不断增多。一般来说,用于生产金属薄板件的冲压模具能够保持稳定生产的服役极限为50~60万冲次。由于架构共用件需同时满足多个车型的生产工件,在车型生命周期内,冲压模具有可能要生产数百万冲次,远远超出其正常工况下的极限寿命。应对冲压模具的超寿命服役,以往的做法是在濒临使用寿命极限之前,对冲压模具进行复制,与之相伴的是车型开发费用和生产制造成本的提高。因此,在增加架构共用件的同时,不断提高冲压模具服役极限和工况质量,延长冲压模具使用寿命,是降低汽车开发、制造成本的重要途径之一^[1-4]。

冲压模具的质量主要包括结构强度、加工精度和疲劳寿命3个方面,前两方面主要由模具结构设计方案、机床加工精度、机加工工艺、研配调试手法决定。而对于疲劳寿命方面,其决定因素众多,不仅受到模具材料选型、模具结构布局、模具负载方式、应力分布状态等因素的影响,还与模具表面处理方法和润滑条件、定期维护保养频次、所生产的零件材料强度等因素息息相关^[5-6]。

在实际生产中,一旦冲压模具工作部位发生塑性变形、模具表面粗糙度和润滑条件恶化、冲压生产过程中过度磨损,则会直接降低冲压模具质量和使用寿命,甚至造成冲压模具报废失效,其中磨损对冲压模具使用寿命的影响最大。而对于车身侧面线条采用锐利化设计语言的外覆盖件而言,其锐棱成形模具由于所受到的接触应力更大,故而磨损会更加严重^[7-8]。锐棱成形模具的局部磨损不仅会导致锐利化特征棱线无法再现,还会造成冲压件表面划伤,从而无法满足汽车生产质量要求^[9]。根据研发制造经验,锐棱成形模具的设计、加工、安装、调试往往需要投入大量的时间和资金成本,随着有限元仿真技术的成熟,在模具设计制造之前对模具进行有限元仿真分析,预测板料的成形以及模具的磨损状态,对于降低锐棱成形模具的制造成本、缩短模具设计和制造的加工周期具有重要的意义^[10-11]。目前,行业内对于锐棱成形模具的研究主要集中于钢板,而对于采用双锐棱造型设计的铝板汽车覆盖件,其锐棱成形模具的磨损研究相对较少。

鉴于上述研究现状,本文以东风本田汽车有限公司的某SUV车型铝合金双锐棱翼子板为研究对象,通过分析锐棱翼子板的成形规律以及在成形过程中模具的磨损情况,基于AutoForm有限元仿真平台,分析板料在冲压过程中的成形,通过插入板料在成形过程中与模具的相对滑动速度,以及板料对模具的接触作用力,对模具的应力状态进行分析,最后利用Archard磨损模型计算得到模具的磨损量,进一步预测模具的使用寿命。

1 模具磨损机理

两个相互接触的物体,在发生相对滑动后,滑动接触表面出现基体损失、材料脱落,从而导致物体发生变形的现象被称为磨损。铝合金锐棱翼子板在冲压成形过程中,模具表面与板料表面始终保持接触,并形成相对滑动。虽然锐棱成形模具型面经过打磨、抛光以及热处理,但是模具型面和板料表面仍然存在微观的高低起伏结构,这些高低起伏结构在模具与板料发生相对滑动后会直接导致磨损的产生^[12-14]。翼子板锐棱成形模具最常见的磨损大致可归为4类:粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。其中,粘着磨损是锐棱成形模具最常见的磨损形式。在锐棱成形模具的磨损分析中,Archard磨损模型被广泛应用。Archard磨损模型的基本原理为:宏观上光滑的两个物体表面发生接触行为后,受物体表面微观凹凸不平的影响,较高的微凸体将先发生接触,在此过程中若其受到载荷作用,则将在物体表面产生局部应力集中,当应力超过物体材料的屈服强度后,继续产生相对滑动,那么微凸体就会发生一定量的塑性变形^[15-16]。

摩擦过程中设定载荷为 P ,在其作用下,发生相互滑动的两个接触面上的微凸体将产生塑性变形,进而演变为磨损失效,这种磨损失效并非每次摩擦均会产生,而是存在一定的概率。将相互接触的微凸体半径设定为 r ,表面硬度为 H ,其在法向载荷 P 的作用下被迫产生屈服,由此可得出 $dP = \pi r^2 H$ 。假设摩擦过程中所产生的磨粒(微凸体)为半球形状,将其体积和半径分别定义为 V_0 和 r ,则因磨损而脱落的材料体积可表达为 $dV_0 = 2/3 \pi r^2$ 。由于相互接触的两个微凸体在滑动距离内将会始终保持接触,直至部分材料与基体脱离,而后所受到的载荷将由基体上新的微凸体承受。将相对滑动距离定义为 L ,摩擦所产生磨损磨粒的概率定义为 K ,物体整个磨

损的体积可表达为 $V=KPL/H$ 。其中, 摩擦所产生磨损磨粒的概率 K 又可称为磨损系数, 其和物体表面粗糙度、润滑条件、环境温度、摩擦副材料性能、摩擦类型等均有关系, 一般可通过磨损实验获取, 经典 Archard 理论认为磨损系数 K 是一个与摩擦副自身条件相关的常量^[17-19]。

由实验可知, 粘着磨损的本质是物体外表产生塑性变形, 导致部分材料与基体剥离。材料在受到拉伸变形时, 其与模具均会在表面产生一定的压强并且发生相对位移, 由于法向压强极大并带来附加切向应力, 冲压模具在经过长时间服役后, 其工作表面的微凸体会因为超出材料的屈服极限而脱落^[20-21]。根据粘着点的强度与破坏位置可将粘着磨损分为 4 个过程: 涂抹、擦伤、脱落、咬合。

2 锐棱翼子板冲压成形仿真

2.1 基于 AutoForm 锐棱翼子板冲压成形有限元建模方法

冲压成形仿真是冲压模具设计开发的首要步骤, 借助有限元分析软件对零件的冲压成形过程进行数值模拟, 可以在产品开发前期快速识别冲压模具制造难题, 并基于数值模拟结果对冲压工艺和模具结构进行优化。冲压成形仿真的主要工作包括 5 个方面: (1) 可通过数值模拟结果对冲压成形载荷进行预测, 并校核成形工艺参数; (2) 可对冲压成形过程中的各变量进行精确控制; (3) 可准确预测冲压成形过程中的各种质量缺陷; (4) 可实现产品结构制造可行性的预先分析以及优化产品质量特性; (5) 可基于数值模拟结果对现场试模进行指导和验证。

汽车覆盖件冲压成形在有限元分析时需要考虑多方面因素。首先, 板料在冲压成形过程中所受的载荷较大, 通常在 100~1000 kN 之间, 从而导致材料产生较大的塑性变形, 材料与模具表面之间的相对位移也会随之发生变化, 因此, 传统的线性方程已经无法准确表征这种复杂的变化; 其次, 板料在冲压成形过程中, 一旦发生塑性变形, 就难以恢复到初始状态, 这说明板料自身并不伴随时间的改变而发生变化; 再次, 冲压模具与板料之间的接触应力为非线性应力, 对于这种非线性力的表征极其复杂。冲压成形过程中成形工艺参数与材料性能参数之间的关系如图 1 所示。

本次模拟仿真分析以东风本田汽车有限公司的

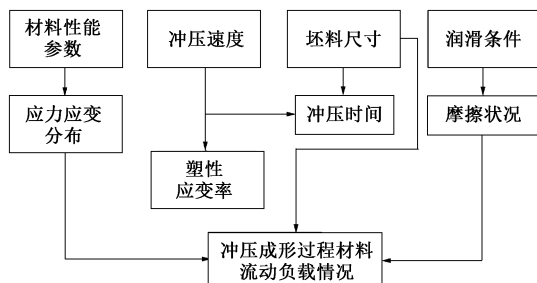


图 1 冲压过程中材料参数和工艺参数之间的关系

Fig. 1 Relationship between material parameters and process parameters in stamping process

某 SUV 车型锐棱翼子板拉伸成形模具为仿真对象, 由于采用的冲压成形分析软件为 Autoform R8, 而 Autoform R8 并不支持三维模型的建模与绘制。因此, 需要先使用 CAD 软件对翼子板锐棱成形模具的凸模、凹模、压边圈以及其他非标结构与标准件进行绘制、导入和最终装配。本文所用到的 CAD 软件为 CATIA, 利用 CATIA 完成翼子板锐棱成形模具的 3D 结构图绘制后, 将其转换为 IGS 格式文件, 并导入至 AutoForm R8 有限元仿真平台, 模型导入之后, 冲压模具各部件之间的装配关系保持不变, 即无需在 AutoForm 软件中对 3D 结构图模型进行调整。锐棱翼子板拉伸成形模具三维实体模型如图 2 所示。

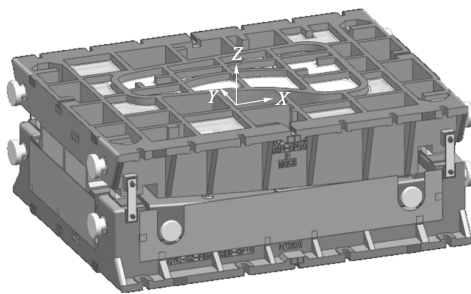


图 2 锐棱翼子板拉伸成形模具三维实体模型

Fig. 2 3D solid model of drawing die for fender with sharp edge

对翼子板锐棱成形模具几何模型进行简化, 除去不必要的结构, 得到简化模型如图 3 所示。

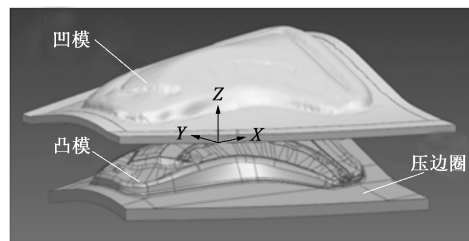


图 3 锐棱翼子板拉伸成形模具简化模型

Fig. 3 Simplified model of drawing die for fender with sharp edge

2.2 锐棱翼子板冲压成形仿真

将简化后的锐棱翼子板拉伸成形模具模型导入 AutoForm 软件中, 将板料成形分为两个阶段, 分别为闭合阶段和成形阶段。在闭合阶段和成形阶段中均设置凹模为主动模具, 并根据锐棱成形模具的运动关系, 将凹模、凸模和压边圈的相对位置进行设置, 模具闭合阶段, 其运动方向设置为 $-Z$ 向, 凸模和压边圈保持固定不动, 模具与板料之间的摩擦因数设置为 0.13, 工作温度设为默认的常温环境温度, 所用板料为 6014-T2 铝合金, 厚度为 0.9 mm, 锐棱成形模具的凸模、凹模、压边圈材料均为 KSCD800I。完成设置的翼子板锐棱成形仿真的有限元模型如图 4 所示。

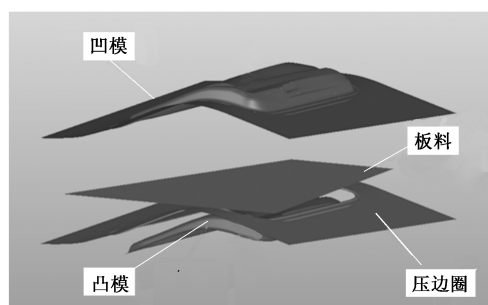


图4 翼子板锐棱成形有限元模型

Fig. 4 Forming finite element model of fender with sharp edge

模具的冲压速度通常由成形工艺要求和压机能力决定, 一般会在 $300 \sim 3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间进行设定, 结合模具自身特点, 选择与其相匹配的冲压速度, 可有效延长模具的服役极限。冲压速度过大, 会导致模具在成形过程中所载荷发生显著变化, 影响板料成形质量, 并加剧模具表明磨损; 冲压速度过小, 则会导致生产效率低下, 增大单件冲压生产成本。综合考虑生产车间工艺条件和同类零件的成形仿真经验, 将翼子板锐棱成形模具空载阶段的冲压速度设置为 $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 负载阶段的冲压速度设置为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 凹模运动方向设置为 $-Z$ 方向, 压边圈的压边力设置为 1200 kN, 运动方向为 $+Z$ 方向, 压边圈运动行程为 125 mm。

冲压成形模拟过程中所设定的步数, 直接决定了数值模拟的效率和迭代计算行程, 为了提升仿真效率, 本文选择了无需直接求解切线刚度、无需进行平衡迭代以及计算速度快的动态显示计算方法。对于汽车覆盖件的冲压成形问题, 通常采用控制模具行程的模拟方法, 迭代步长以有限元模型中最小单元格尺寸的 $1/3$ 作为参考。当控制方式为时间增

量时, 则需要以模具总行程为计算依据, 计算得出总的时间增量。由于板料在变形阶段与模具工作面之间的压力作用呈非线性关系, 并在整个冲压成形过程中不断发生变化, 导致板料与模具工作面之间的接触关系较为复杂, 无法以时间为单位对接触和摩擦的边界关系进行准确定义, 从而间接增加了有限元分析的工作量, 并在无形中提高了数值模拟的复杂程度。因此, 对接触关系和边界条件进行合理定义, 是保证冲压成形仿真精准度的前提条件和关键要素。

在汽车覆盖件的冲压成形过程中, 板料与模具之间的接触形式、受力状态均较为复杂, 在众多的接触形式之中, 面面接触为最重要的接触形式, 并同时附加存在点面接触和线面接触等其他复杂的接触形式。本文所研究的翼子板锐棱成形模具, 根据冲压成形机理与模具运动接触关系, 定义了板料上表面、板料下表面、凸模外表面、凹模外表面和压边圈外表面这 5 个接触面。接触关系设置为 3 组, 即板料上表面与凹模外表面的接触、板料下表面与凸模外表面的接触、板料下表面和压边圈外表面的接触。根据 3 种接触关系的接触形式、接触条件对冲压成形仿真参数进行详细的设定。其中, 板料与模具工作面之间的摩擦因数设置为 0.13。对于温度的设置, 由于锐棱翼子板成形为冷冲压加工方式, 在冲压成形过程中温度的变化对工艺参数的影响较小, 为提高有限元分析效率, 将环境温度设定为恒定模式, 即无需考虑板料与模具之间的热量传输。因此, 结合实际工程经验, 将冲压成形时的工作温度设置为 20°C 。各项参数设置完成后提交求解计算, 得到锐棱翼子板的接触面法向应力云图和切向滑移速度云图, 如图 5 所示。

3 锐棱成形模具磨损仿真

锐棱成形模具的磨损主要以粘着磨损为主, 所有的锐棱成形模具在实际生产中均存在不同程度的粘着磨损, 而模具维护保养的主要工作即为清除模具工作表面的粘着痕迹。因此, 粘着磨损在锐棱翼子板的冲压生产中无法完全消除, 其磨损的严重程度直接决定了锐棱成形模具的使用寿命。因此, 本文重点针对翼子板锐棱成形模具的粘着磨损进行分析。而对于其他类型的磨损, 通过对磨损模型进行修正, 采用与粘着磨损相同的仿真流程与方法即可获得磨损分析结果。

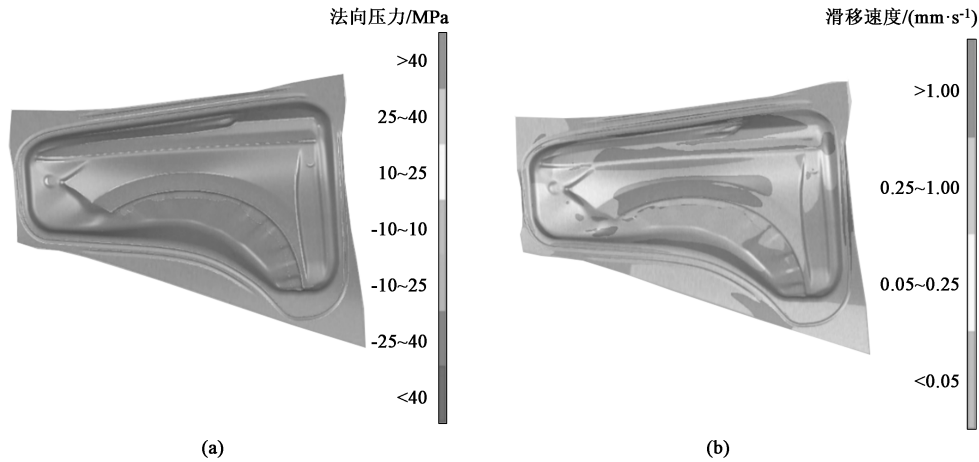


图 5 锐棱翼子板成形仿真结果

(a) 接触面法向应力云图 (b) 切向滑移速度云图

Fig. 5 Forming simulation results of fender with sharp edge

(a) Cloud diagram of contact surface normal stress (b) Cloud diagram of tangential slip velocity

锐棱成形模具的磨损研究需考虑计算速度及精度问题, 基于 AutoForm 成形仿真结果, 使用 Python 语言进行二次开发, 来计算接触面节点磨损量。具体公式为:

$$dV = K \frac{dP \cdot dL}{H} \quad (1)$$

式中: K 为磨损系数, 即材料发生磨损的概率, 可通过实验获得, 取值范围一般在 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ 之间, 由上文可知, 磨损系数与接触材料的性能、板料润滑条件以及模具工作环境等因素有关。

根据式 (1) 可以得出如下 3 项磨损规律: (1) 接触面所承受的法向载荷越大, 模具磨损量越大; (2) 摩擦行程越长, 模具磨损量越大; (3) 模具表面硬度越大, 模具磨损量越小。实际对于车身覆盖件冲压模具的磨损往往更关注磨损量, 因此, 式 (1) 中的 dV 可以表达为:

$$dV = dh \cdot dA \quad (2)$$

式中: h 为磨损量; A 为接触面的面积。

而 dh 又可表达为:

$$dh = K(dP \cdot dL)/(H \cdot dA) \quad (3)$$

再将式 (3) 中 dP 和 dL 进一步转化, 可表达为:

$$dP = P \cdot dA \quad (4)$$

$$dL = v \cdot dt \quad (5)$$

式中: v 为接触面相对滑移速度; t 为滑移时间。

P 和 v 的之间的关系可通过有限元方法对接触面进行离散化分析获取, 离散后磨损量 h 与接触面法向应力 P 、接触面相对滑移速度 v 之间的关系的

可表达为:

$$h_{i,j} = K(i,j) \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N P(i,j) \cdot v(i,j)/H(i,j) dt \quad (6)$$

式中: i 为节点位置, $i=1, 2, \dots, N$; N 为节点数量; j 为分析步, $j=1, 2, \dots, M$; M 为分析步数量; $h_{i,j}$ 为在单次冲压成形中 i 节点区域在第 j 步时发生磨损后的磨损量; $K(i,j)$ 为在单次冲压成形中 i 节点区域在第 j 步时所受的接触压力和硬度条件下的磨损系数; $H(i,j)$ 为在单次冲压成形中 i 节点区域在第 j 步时的模具表面硬度; $P(i,j)$ 为在单次冲压成形中 i 节点区域在第 j 步时的接触面法向应力; $v(i,j)$ 为在单次冲压成形中 i 节点区域在第 j 步时的接触面相对滑移速度。

在计算翼子板锐棱成形模具磨损时需要用到 Autoform 软件和 Python 语言, 从而实现板料冲压成形和模具磨损并行仿真, 具体分析流程如图 6 所示, 主要包括工艺条件设置、材料库建立、磨损要求设定和磨损结果读取。翼子板锐棱成形模具磨损分析的关键步骤如下: (1) 对冲压模具和板料的有限元模型按一定单元尺寸进行网格划分, 并设置成形仿真工艺参数和提交求解计算, 这一步骤全部在 Autoform R8 有限元仿真平台中完成。(2) 利用 Autoform 有限元仿真结果, 获取每个节点的位置和每个成形步内用于计算磨损量所需要的接触压力和滑移速度。(3) 根据仿真条件设定和磨损结果决定是否对模具和板料有限元模型进行网格退化, 并再次对成形仿真工艺参数进行设置, 之后展开循环成形仿真以计

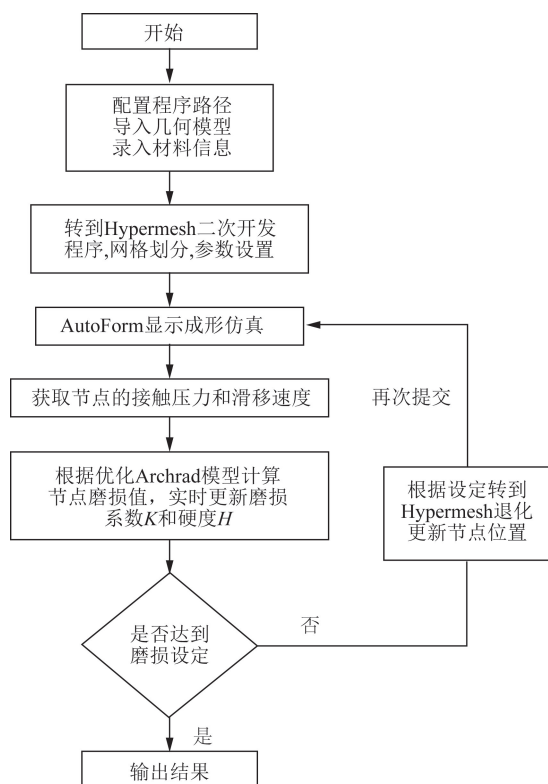


图6 冲压成形与模具磨损并行仿真流程图

Fig. 6 Parallel simulation flow chart of stamping and die wear

算磨损量,直至达到磨损设置条件,循环计算结束,最后对仿真结果进行输出。

对于接触面的磨损量的获取,其最大的难点在于如何获取接触面的法向应力。为了解决这一难题,本文利用有限元方法模拟整个磨损过程。将所研究对象的连续求解区域离散为一组有限元单元组合体,该组合体以一定方式相互连接,并逐一分析每个单元体的受力状态,最后再将所有单元进行集成,从而获得整体受力数据。翼子板锐棱成形模具在冲压成形过程中,其磨损接触面表面形态发生变化后,磨损量也不尽相同,这就需要利用网格划分方法,对冲压模具有限元网格进行二次处理,然后可求解出接触点上的法向应力值,并将其用于磨损量的计算。

由于翼子板锐棱成形模具单次冲压的磨损量非常小,故而不可能在每次磨损计算完成之后,即对冲压模具有限元模型进行网格退化,然后再次进行冲压成形仿真和模具磨损仿真。对于翼子板锐棱成形模具冲压过程中的微小磨损的模拟,出于提高仿真效率和降低计算成本的考虑,对翼子板锐棱成形模具的磨损网格退化操作进行数量设定,每次仅实施1次网格退化操作。本文默认以10000冲次为网格退化操作的跨度数值,并将其作为翼子板锐棱成

形模具磨损分析的网格退化基准。网格退化处理所设定的数值可根据锐棱翼子板实际成形质量和受力状态进行实时修改。在整个磨损仿真迭代计算过程中,将每10000冲次的磨损量 h 和磨损次数设定为线性关系,即可将单次磨损量 h 放大10000倍,使其作为10000冲次后锐棱成形模具的磨损量 h_{10000} 。按照冲压次数迭代进行锐棱成形模具磨损仿真的流程图如图7所示。

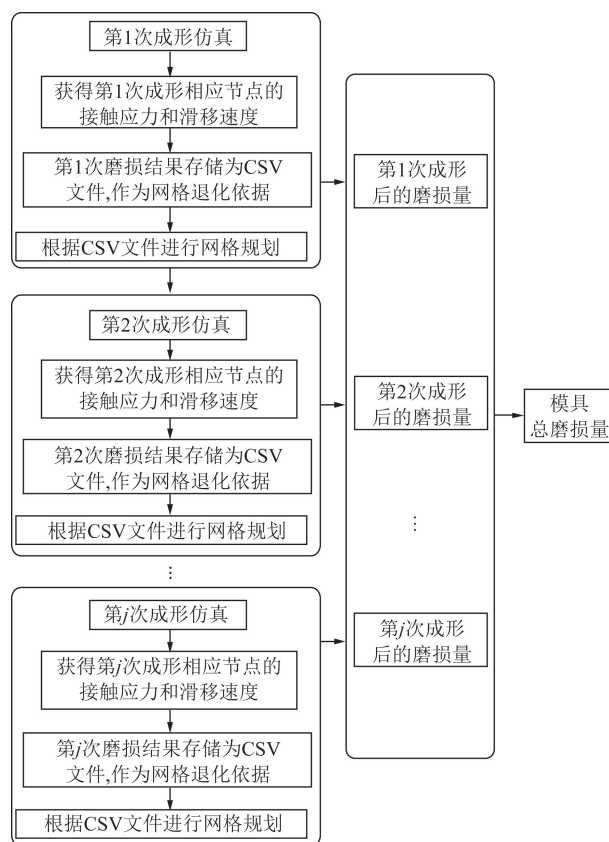


图7 按照冲压次数迭代磨损计算流程图

Fig. 7 Flow chart of iterative wear calculation according to stamping times

将翼子板锐棱成形模具10000冲次的磨损量 h_{10000} 和所对应的节点编号一一对应,并使其自动完成网格退化操作,从而得到网格退化后的模型文件。在网格模型文件、材料参数、工况条件等信息保持不变的前提下,再次返回Autoform R8有限元仿真平台,提交求解计算,便可得到新一轮冲压成形仿真的结果文件。之后再次进行锐棱成形模具磨损仿真,并根据上一轮各节点的磨损量数值,得到各节点在本轮计算周期内的模具表面硬度值。与第1轮磨损仿真方法相同,获取锐棱成形模具有限元模型各节点的接触压力 $CPRESS$ 、滑移速度 v 和时间间隔 Δt 。重新导入至磨损仿真模型,即可获得锐棱成形模具各

节点位置的磨损量。通过计算得到翼子板锐棱成形模具在冲压 15×10^4 、 50×10^4 和 80×10^4 次后的磨损云图如图8所示,由图8可知,在 15×10^4 冲次时,模具整体磨损量较小,锐棱区域的最大磨损量为

0.017 mm; 在 50×10^4 冲次时,模具凸模圆角与拉延筋出现明显磨损,锐棱区域的最大磨损量为 0.029 mm; 在 80×10^4 冲次时,模具凸模圆角与拉延筋的磨损进一步加剧,锐棱区域的最大磨损量达到 0.037 mm。

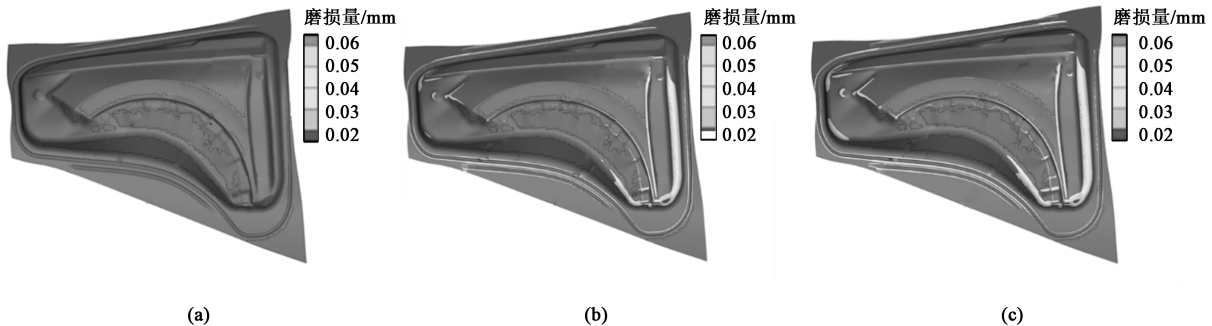


图8 不同冲压次数下翼子板锐棱成形模具磨损仿真结果

(a) 15×10^4 (b) 50×10^4 (c) 80×10^4

Fig. 8 Wear simulation results of forming die for fender with sharp edge under different stamping times

4 锐棱成形模具实际磨损验证

根据翼子板锐棱成形模具 $15 \times 10^4 \sim 80 \times 10^4$ 冲次的磨损仿真结果,对凸模锐棱区域进行激光淬火,以提高其表面硬度,在凹模锐棱区域内 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的法向刻槽、锐棱两侧 10 mm 宽度区域内设定 $0.05 \sim 0.08 \text{ mm}$ 强压,强压区以外 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 宽度区域进行渐变过渡,并进行光顺处理,如图9所示。之后将凸模、凹模以及压边圈进行脉冲等离子体扩散 (Pulse-plasma Diffusion, PPD) 处理,以进一步提高模具表面的硬度和光洁度,从而提升锐棱成形模具整体耐磨性。

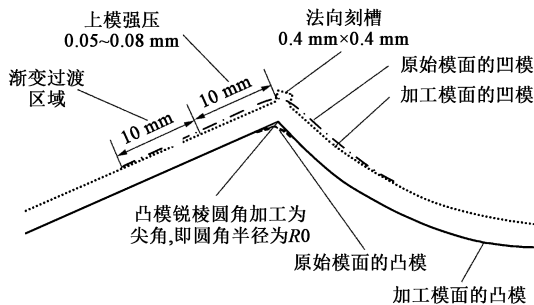


图9 翼子板锐棱成形模具棱线加工处理方法

Fig. 9 Edge line machining method of forming die for fender with sharp edge

加工、研配、表面处理以及调试修正后获得如图10所示的翼子板锐棱成形模具,其两条锐棱特征清晰,表面光洁度高,无破损以及明显磨损缺陷。

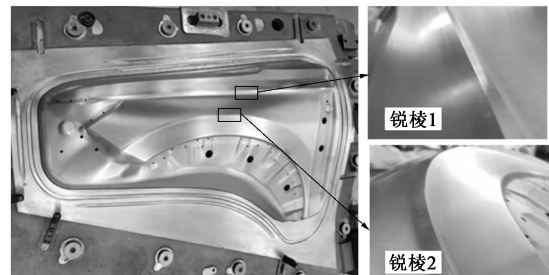


图10 翼子板锐棱成形模具实物

Fig. 10 Physical object of forming die for fender with sharp edge

利用翼子板锐棱成形模具进行连续性批量生产,得到无明显开裂、起皱以及大的面品缺陷的合格零件,两条锐棱成形质量良好,未发生滑移线缺陷。锐棱翼子板零件如图11所示。

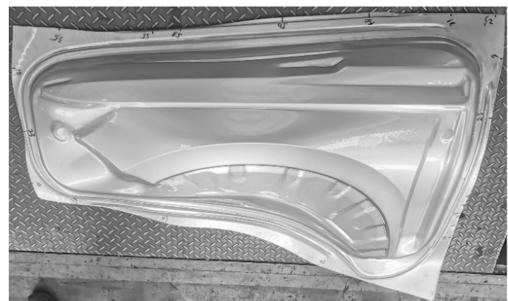


图11 锐棱翼子板零件

Fig. 11 Fender part with sharp edge

在翼子板锐棱成形模具生产 80×10^4 冲次后,利用 GOM-Atos 蓝光扫描系统对锐棱成形模具的凸模进行全型面扫描,以确认特征棱线和型面的磨损情

况, 获得了如图 12a 所示的扫描云图。由图 12a 可知, 翼子板锐棱成形模具特征棱线和型面整体磨损量较小, 锐棱区域的最大磨损量仅为 0.029 mm, 说明翼子板锐棱成形模具在大批量生产后仍然保持着优异的耐磨性能和良好的棱线锐度。为进一步验证磨损仿真结果的准确性, 分别基于凸模型面扫描云图和 80×10^4 冲次厚的磨损仿真云图 (图 12b) 进行取点对比, 在主棱线区域以 150 mm 为间距均匀取 8

个测点, 依次记为测点 A'、B'、C'、D'、E'、F'、G'、H'。利用直方图对翼子板锐棱成形模具的实际磨损量和仿真磨损量进行对比分析, 其对比结果如图 13 所示。由图 13 可知, 翼子板锐棱成形模具的实际磨损结果与仿真结果基本吻合, 且磨损趋势一致, 实际磨损量整体略小于仿真磨损量, 这是由于: 翼子板锐棱成形模具在实际生产过程中会定期进行保养维护, 在一定程度上延缓了锐棱区域的磨损进程。

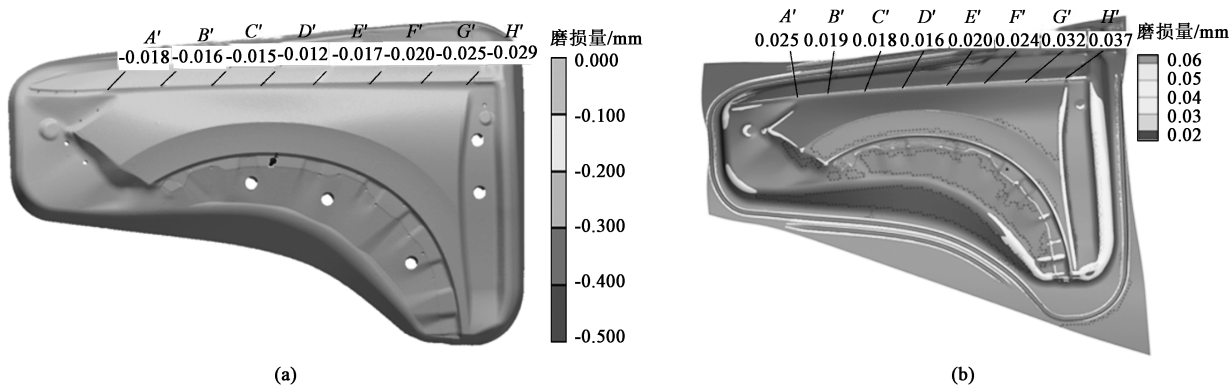


图 12 翼子板锐棱成形模具实际磨损 (a) 与仿真磨损 (b) 云图

Fig. 12 Cloud diagrams of actual wear (a) and simulated wear (b) of forming die for fender with sharp edge

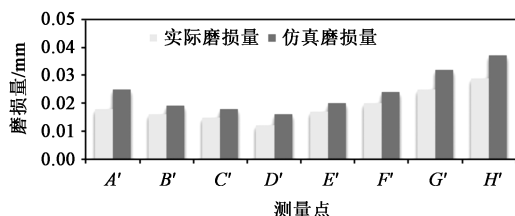


图 13 翼子板锐棱成形模具实际磨损与仿真磨损对比

Fig. 13 Comparison between actual wear and simulated wear of forming die for fender with sharp edge

5 结论

(1) 借助 AutoForm 有限元仿真平台分析了锐棱翼子板成形过程, 获得了成形过程每个节点位置和每个成形步内用于计算磨损所必须的接触应力以及滑移速度, 奠定了翼子板锐棱成形模具快速磨损仿真的基础。

(2) 利用 Archard 磨损计算公式, 通过 Python 语言编写了模具磨损计算子程序, 得到了翼子板锐棱成形模具在 15×10^4 、 50×10^4 和 80×10^4 次冲压成形后的磨损量, 并通过翼子板锐棱成形模具实物进行扫描对比, 验证了磨损仿真结果的准确性, 研究表明理论磨损趋势与实际磨损的趋势基本一致。

(3) 根据磨损仿真结果对翼子板锐棱成形模具

结构进行优化补强, 并在锐棱区域采用变形量更小、淬透性和淬硬性更加均匀的淬火方法, 提高了锐棱成形模具的耐磨性和特征性的形状保持性, 模具锐棱区域的实际磨损量显著减小, 提高了翼子板锐棱成形模具的使用寿命, 降低了抗磨损维护成本, 对于同类零件的冲压成形仿真和磨损分析具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 李靖南, 董瑞峰, 陈子帅, 等. 梯度加热工艺对自由锻 GH4720Li 高温合金成形性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 162-168.
Li J N, Dong R F, Chen Z S, et al. Formability of free forging GH4720Li superalloy with different gradient heating process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 162-168.
- [2] 蒋磊, 马培兵, 王龙, 等. 翼子板成形数值模拟与工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 113-123.
Jiang L, Ma P B, Wang L, et al. Numerical simulation and process optimization on fender forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 113-123.
- [3] 谢晖, 李江曼, 王诗恩, 等. 超高强钢板冲压模具磨损 CAE 分析研究与应用 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42 (8): 15-21.
Xie H, Li J M, Wang S E, et al. Research and application of die wear CAE analysis of ultra high strength steel stamping [J]. Journal

- of Hunan University: Natural Science, 2015, 42 (8): 15-21.
- [4] 聂昕, 王成龙. 基于动态摩擦因数磨损系数的先进高强钢模具寿命研究 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (3): 346-353.
Nie X, Wang C L. A study on AHSS die life based on dynamic friction and wear coefficients [J]. Automotive Engineering, 2019, 41 (3): 346-353.
- [5] 谢晖, 凌鸿伟. 基于 sobol 法的热成形工艺参数全局灵敏度分析及优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 11-15.
Xie H, Ling H W. Global sensitivity analysis and optimal design for hot forming parameters based on sobol method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 11-15.
- [6] 蒋磊, 袁璐, 王龙, 等. 侧围外板全工序成形数值模拟与工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (10): 50-60.
Jiang L, Yuan L, Wang L, et al. Numerical simulation and process optimization of full process forming of side outer panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (10): 50-60.
- [7] 谢晖, 凌鸿伟. 基于 Archard 理论的热冲压模具磨损分析及优化 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (1): 100-104.
Xie H, Ling H W. Analysis and optimization of hot stamping die wear based on Archard theory [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (1): 100-104.
- [8] 聂昕, 宁敏清, 乔晓勇. 基于动态模型的冲压模具磨损寿命研究 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (3): 133-141.
Nie X, Ning M Q, Qiao X Y. Research on stamping die wear life based on Dynamic model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (3): 133-141.
- [9] 蒋磊, 李十全, 王龙, 等. TWB 汽车覆盖件成形工艺参数优化 [J]. 制造技术与机床, 2022, (8): 122-128.
Jiang L, Li S Q, Wang L, et al. Research on forming process parameters optimization of TWB for automobile cover panel [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, (8): 122-128.
- [10] 蒋磊, 李十全, 王龙, 等. 基于模面工程的侧围外板全工序成形仿真研究 [J]. 制造技术与机床, 2022, (7): 121-128.
Jiang L, Li S Q, Wang L, et al. Research on full process forming simulation of side outer panel based on die surface engineering [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, (7): 121-128.
- [11] 乔晓勇. 车身覆盖件模具磨损机理及寿命预测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Qiao X Y. The Research on Automobile Body Covering Parts Die Wear Mechanism and the Life Prediction [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [12] 冯源, 乔晓勇, 王石刚. 车身冲压模具磨损特性试验机的误差模型与分析 [J]. 机械设计, 2019, 36 (5): 4-9.
Feng Y, Qiao X Y, Wang S G. Tolerance model and analysis of wear tester on the vehicle's stamping die [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36 (5): 4-9.
- [13] 蒋磊, 张雄飞, 袁璐, 等. 全景天窗顶盖修整复合工艺与模具设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 112-121.
Jiang L, Zhang X F, Yuan L, et al. Trimming and restriking composite process for panorama sunroof panel and die design [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 112-121.
- [14] 徐钰鹏. 7075 铝合金板料热冲压成形摩擦与润滑行为研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Xu Y P. Investigation on Friction and Lubrication Behavior in Hot Stamping of 7075 Aluminum Alloy Sheet Metal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [15] 蒋磊, 张雄飞, 王龙, 等. 基于变压边力的侧围外板成形研究 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 157-163.
Jiang L, Zhang X F, Wang L, et al. Forming of side outer panel based on variable blank holder force [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 157-163.
- [16] 高圣勇, 王一雯, 苏濡, 等. GH4169 高温合金低周疲劳变形行为研究 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 289-296.
Gao S Y, Wang Y W, Su R, et al. Low-cycle fatigue behavior of GH4169 superalloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 289-296.
- [17] 蒋磊, 李十全, 王龙, 等. 基于 AutoForm 的锌铝镁镀层板拉深成形及回弹研究 [J]. 模具工业, 2021, 47 (2): 11-16.
Jiang L, Li S Q, Wang L, et al. Research on drawing and spring-back of zinc-aluminum-magnesium coated sheet based on AutoForm [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (2): 11-16.
- [18] 蒋磊, 龚剑, 王龙, 等. 侧围外板浅拉延成形工艺数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 73-81.
Jiang L, Gong J, Wang L, et al. Numerical simulation of shallow drawing for body side outer panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 73-81.
- [19] 梁森. 基于 Deform 的锌合金冲模零件磨损特性研究 [J]. 模具工业, 2019, 45 (10): 17-23.
Liang S. Research on wear characteristics of zinc alloy stamping die based on Deform [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (10): 17-23.
- [20] 陈少华, 张杨, 谢伟, 等. 铝型材挤压模具失效分析 [J]. 失效分析与预防, 2021, 16 (6): 402-407.
Chen S H, Zhang Y, Xie W, et al. Failure analysis of aluminum profile extrusion mould [J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16 (6): 402-407.
- [21] 陈贺贺, 姜涛, 刘昌奎, 等. DD6/GH3536 高温合金摩擦副摩擦磨损特性研究 [J]. 失效分析与预防, 2020, 15 (2): 84-90.
Chen H H, Jiang T, Liu C K, et al. Friction and wear properties of friction pairs of DD6/GH3536 superalloy [J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15 (2): 84-90.