

摩擦与润滑

汽车消声半壳模具表面摩擦特性的优化设计

蒋嘉兴, 符永宏, 符 昊, 杨 杰

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 以汽车消声半壳模具为研究对象, 采用数值模拟方法, 在揭示模具表面摩擦特性对成形件厚度均匀性影响规律的基础上, 对模具表面摩擦敏感区的摩擦特性进行优化设计。首先, 对汽车消声半壳模具表面进行区域划分, 利用 ABAQUS 对拉伸成形过程进行数值模拟, 采用单因素分析法, 探究模具表面不同区域摩擦因数对工件厚度均匀性的影响, 确定模具表面的摩擦敏感区域。其次, 以板料厚度均匀性为优化目标, 采用均匀设计法, 对摩擦敏感区的摩擦特性进行了优化设计, 最终获得消声半壳模具表面最优摩擦因数组合。优化后的模拟结果显示, 成形件最薄处的破裂可能性降低了 13.03%, 成形件厚度的变化幅度降低了 6.68%。为基于摩擦特性优化分布的模具表面激光微织构加工提供了设计依据。

关键词: 拉伸模具; 区域划分; 摩擦特性; 厚度均匀性; 摩擦敏感区域

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.028

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0188-07

Optimization design on surface frictional characteristics for automobile muffler half-shell die

Jiang Jiaying, Fu Yonghong, Fu Hao, Yang Jie

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: For the automobile muffler half-shell die, on the basis of revealing the influence laws for friction characteristics of die surface on the thickness uniformity of formed parts, the frictional characteristics in the friction sensitive regions on the die surface were designed optimally by numerical simulation method. First, the automobile muffler half-shell die surface was divided into regions, and the drawing process was numerically simulated by software ABAQUS. Then, the influences of friction factors for different regions in the die surface on the thickness uniformity of workpiece were explored by single factor analysis method, and the friction sensitive regions in the die surface were determined. Furthermore, taking the sheet thickness uniformity as the optimization goal, the friction characteristics in the friction sensitive regions were designed optimally by uniform design method, and the optimal friction factor combination for the surface of the automobile muffler half-shell die was obtained. The optimized simulation results show that the fracture possibility at the thinnest part of the formed part decreases by 13.03%, and the variation rate of the formed part thickness drops by 6.68%, which provides design reference for laser microtexture processing of the die surface based on the optimized distribution of friction characteristics.

Key words: drawing die; region division; frictional characteristics; thickness uniformity; friction sensitive regions

拉伸成形是金属板材的主要成形方式, 广泛应用于汽车、船舶、家电等领域^[1]。其成形通常在高压和交变载荷等恶劣工况下进行, 伴随大面积的金属流动和塑性变形, 由此带来既常见又突出的技术

问题, 即不均匀变形造成的工件成形缺陷, 包括起皱、开裂^[2-3]。

为了解决不均匀变形带来的缺陷, 研究人员通过优化压边力、润滑条件、拉伸筋等冲压工艺来改善板料成形质量^[4-5]。Ko D C 等^[6]通过成形极限图, 对汽车覆盖件失效的原因进行分析, 使用响应曲面法设计成形试验, 在对凸凹模间隙、冲压速度、压边力等参数优化的基础上, 降低了汽车覆盖件起皱的危险值。Naceur H 等^[7]结合一步模拟法、灵敏度分析及优化算法, 求得了盒形件拉深的最优拉伸筋阻力, 改善了成形件的均匀性。Schmid H 等^[8]评估

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705210、51705211);

江苏省博士后科研资助计划 (2019K195)

作者简介: 蒋嘉兴 (1995-), 男, 硕士

E-mail: 1020302332@qq.com

通信作者: 符 昊 (1988-), 男, 博士, 助理研究员

E-mail: fh@ujs.edu.cn

了拉延筋对不同钣金材料的影响,指出了使用拉延筋成形工艺的局限性。Jansson T 等^[9]通过响应曲面方法和空间映射技术来调整拉延筋的约束力,从而优化了汽车零件的拉延。Ingarao G 等^[10]提出了一种计算机辅助设计方法,能够满足多种复杂的冲压工艺要求,提供不同的优化可能性。Zhang Z Q 等^[11]根据热冲压原理,提出了一种热冲压仿真模型,并采用多重迭代算法对 U 形件毛坯轮廓线进行优化。尽管上述方法有一定的改进效果,但由于方法自身的局限性仍无法根本避免工件起皱和开裂等缺陷。

随着理论研究的不断深入和工程实践发现,造成工件不均匀成形缺陷的原因是模具-工件界面的不合理摩擦特性分布。事实上,模具-工件界面的摩擦因数是一个随时空变化的二元函数,不同区域的摩擦特性对成形性能的影响各不相同^[12]。Leu D K^[13]提出了一种用于布氏硬度试验的压痕模型来阐明板料成形过程中的滑动摩擦机理。符永宏等^[14]使用均匀设计法对筒形件模具表面进行了摩擦特性优化设计,降低了成形件拉裂的几率。何梦虎等^[15]通过加工凸体增摩和凹体减摩的复合织构模具,成功地降低了筒形件底部圆角区的减薄率。Hassan M A 等^[16]将压边圈分为 4 个部分,通过设置不同的压边力,来实现对压边区与工件界面摩擦力的主动控制。Chen P 等^[17]通过仿真和实验,探讨了微织构对冲压模具摩擦学性能的影响,通过在模具圆角处加工三角形织构,提高了成形件的厚度均匀性。Zein H 等^[18]模拟了筒形模具拉深成形过程,对凸模、凹模、压边圈与板料间的摩擦因数进行优化,成功地预测了工件的厚度分布。Kitamura K 等^[19]设计了一种冲裁装置,来估计冲头与板料间的摩擦学行为,通过微凹痕冲头改善了摩擦学条件。

尽管模具表面摩擦特性对成形件质量有着至关重要的影响,但是传统加工方法只能形成“等摩擦”模具表面。为此,江苏大学表界面研究所提出模具表面分区激光复合织构技术^[20],即在模具表面不同摩擦敏感区域,加工出凸体增摩织构与凹体减摩的复合织构,实现对复杂模具表面摩擦特性的主动调控与优化。本文以该技术在汽车消声半壳模具上的工程应用为研究对象,采用数值模拟方法,寻找并确定模具表面的关键摩擦敏感区域,主动优化调控模具表面摩擦,为在模具表面实施激光复合织构加工提供设计依据。

1 汽车消声半壳模具特征结构分析

汽车消声半壳模具可以看作由凸缘区、圆角区、侧壁区和底部区这 4 大基本特征结构组成。

凸缘区上的毛坯以拉深变形为主,与凹模、压边圈接触,板料发生变形流入凹腔。若此处摩擦力过小,板料快速流入凹模内腔造成材料堆积,引起起皱;若此处摩擦力过大,板料不易流入凹模,凹模圆角区板料会因过度减薄而破裂。

圆角区是板料拉深过程中的主要变形区域,按其变形特征又可分为凸模圆角区和凹模圆角区。凸模圆角区连接着侧壁区和底部区,此处板料成形主要依靠自身的减薄,属于胀形变形,为成形件减薄最严重的区域,增大该区域的摩擦可以对材料流动起到约束作用,防止板料快速流出导致减薄。而凹模圆角区连接着凸缘区和侧壁区,此处板料变形属于拉深变形,减小凹模圆角区的摩擦可以促使凸缘区的板料更加顺利地流入凹模腔内。

侧壁区板料与凸凹模侧壁直接接触,增大凸模侧壁摩擦,可以使凸模更好地带动板料流入凹腔;减小凹模侧壁摩擦,可以促进板料流动,使板料流动更均匀。

底部区板料双向受拉,属于胀形变形。然而,由于圆角区摩擦对毛坯材料流动的限制,该部分材料流动量很少,板厚基本未发生变化。因此,该区域摩擦对板厚变化影响很小。

基于上述分析,对汽车消声半壳模具各区域的结构特征元素进行具体划分,如图 1 所示。将凹模分为 16 个区域,区域 1、2 和 3 为凸缘圆角区,区域 4、5 和 6 为侧壁区,区域 7、8、9、10 和 11 为底部圆角区,区域 12 和 13 为平面底部区,区域 14 为台阶形底部区,区域 15 为外凸形曲面底部区,区域 16 为凸缘区。将凸模分为 16 个区域,区域 a、b 和 c 为凸模侧壁圆角区,区域 d、e 和 f 为侧壁区,区域 g、h、i、j 和 k 为顶部圆角区,区域 l 和 m 为平面顶部区,区域 n 为台阶形顶部区,区域 o 为内凹形曲面顶部区,区域 p 为其他区域。

2 数值模拟

2.1 有限元模型建立

对模具各部件表面区域初步划分后,开始进行数值模拟。首先,通过 Solidworks 完成对消声半壳

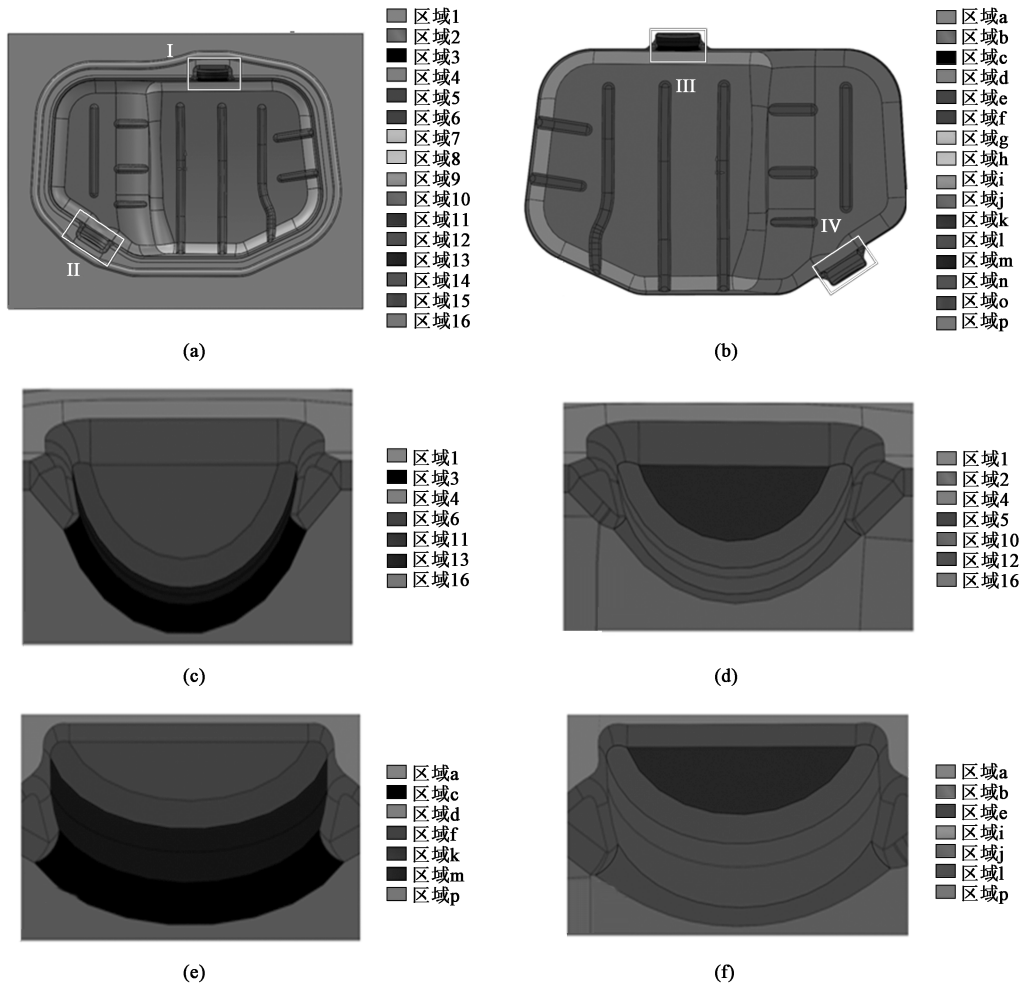


图 1 凸、凹模区域划分

(a) 凹模 (b) 凸模 (c) 凹模区域 I 局部放大图 (d) 凹模区域 II 局部放大图 (e) 凸模区域 III 局部放大图
(f) 凸模区域 IV 局部放大图

Fig. 1 Area division of punch and die

(a) Die (b) Punch (c) Partial enlarged diagram of area I for die (d) Partial enlarged diagram of area II for die
(e) Partial enlarged diagram of area III for punch (f) Partial enlarged diagram of area IV for punch

模具图像的三维建模，使用标准的 IGES 格式将模具导入至 ABAQUS 中。然后，对凸模、凹模、压边圈和板料进行装配，确定各部件的相对初始位置，并对其冲压成形过程进行数值模拟。在网格划分的步骤中，为了实现高质量的网格，所有部件均采用四边形壳单元，且在如底部狭沟这样面积小却重要的区域进行网格细化和调整。基于实际工况，为了合理地简化计算，凸模、凹模、压边圈的单元均设置为刚性单元 R3D4，板料采用四边形有限薄膜应变缩减积分壳单元 S4R。模具的网格划分如图 2 所示。仿真参数设置如表 1 所示。

板料的材质为 SUS304 不锈钢，板料厚度为 1 mm。材料采用 Mises 屈服准则，其材料性能如表 2 所示，具体的应力-塑性应变关系如图 3 所示。

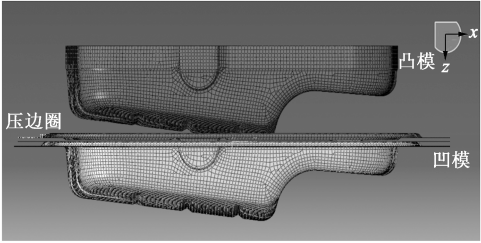


图 2 消声半壳模具网格划分

Fig. 2 Meshing of muffler half-shell die

2.2 数值模拟

模拟采用单因素控制变量法，以优化板料厚度为目标，寻找模具表面的摩擦敏感区域，即主要摩擦影响区域。设置模具表面摩擦因数的范围为 0.03~0.21，取数间隔为 0.03，其他区域的摩擦因数均为

表 1 仿真参数设置

| Table 1 Setting of simulation parameters | |
|--|-------------------------|
| 参数 | 数值 |
| 板料材料 | SUS304 不锈钢 |
| 网格单元类型 | 模具：刚性网格单元 R3D4 |
| | 板料：四边形有限薄膜应变缩减积分壳单元 S4R |
| 网格单元数目 | 模具：43966 |
| | 板料：43920 |
| 冲压速度/(mm·s ⁻¹) | 220 |
| 拉伸深度/mm | 103.8 |
| 压边力/MPa | 10 |
| 约束 | 凹模：完全约束 |
| | 凸模和压边圈：除 z 轴外，完全约束 |
| 接触类型 | 面面接触 |

表 2 SUS304 不锈钢性能参数

| Table 2 Property parameters of SUS304 stainless steel | | | | |
|---|--------------------------|----------------------|------|------------|
| 参数 | 密度/(g·cm ⁻³) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 初始屈服应力/MPa |
| 数值 | 7.93 | 2.30×10 ⁵ | 0.28 | 253.40 |

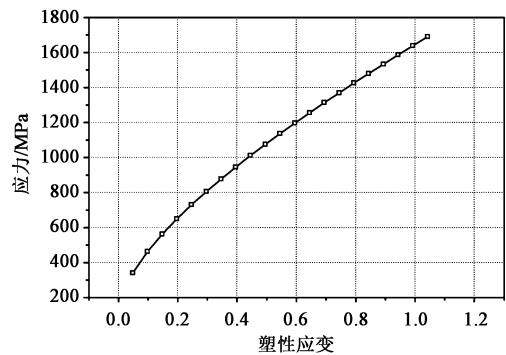


图 3 SUS304 不锈钢的应力-塑性应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of stress and plastic strain for SUS304 stainless steel

0.12。以板厚变化幅度的 5% 作为临界线，低于 5% 定为次要摩擦影响区域，高于 5% 定为主要摩擦影响区域，即摩擦敏感区域。

图 4 为板料与凸、凹模表面摩擦因数均为 0.12 时成形件的板料厚度云图。从图 4 中可以发现，冲压件的压料部位形成褶皱，最大处板厚增加了 16.4%。侧壁区与底部圆角区均出现减薄现象。其中，底部圆角区减薄最为严重，减薄率达到了 28.8%。此处板料与凸模顶部圆角接触，承受凸模顶部圆角的压力和弯曲作用，主要依靠板料的减薄成形，越靠近中心区域减薄越严重，如图 5（图 4 中区域 I）和图 6 所示。

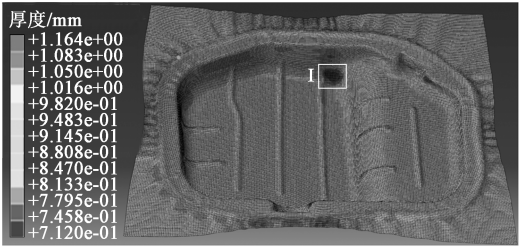


图 4 成形件板料厚度云图

Fig. 4 Cloud map of sheet thickness for formed part

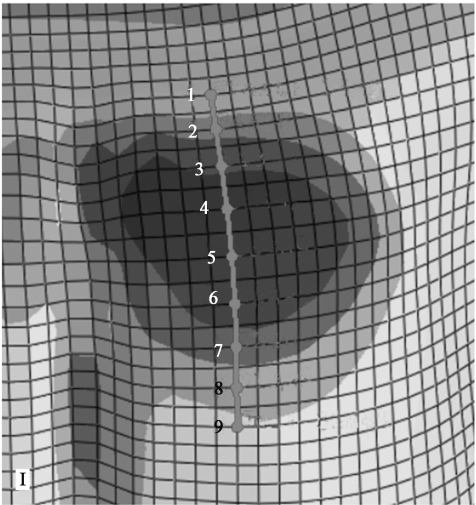


图 5 底部圆角路径云图

Fig. 5 Cloud map of bottom fillet path

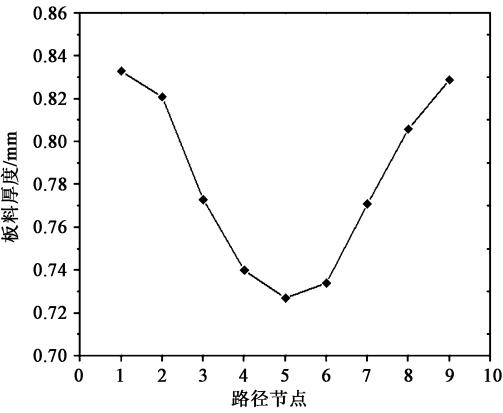


图 6 底部圆角沿路径的板料厚度变化

Fig. 6 Sheet thickness changing of bottom fillet along path

如图 7 所示，通过模拟结果发现：成形件减薄主要集中在底部区域和侧壁区域，A、B 两处分别为底部区和侧壁区减薄最严重的地方；成形件起皱主要集中在凸缘区的边缘，C 处为凸缘区起皱最严重的地方。由于起皱区域在后续的修边工序中均将被切除，因此起皱可不予考虑。以 A、B 两个区域为研究对象，定义路径为从板料边缘至板料中心，

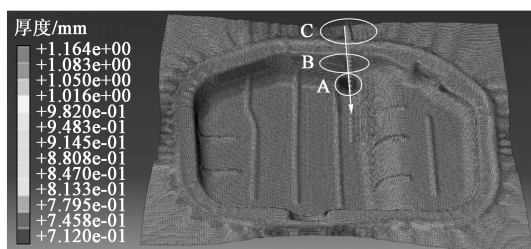


图 7 路径定义

Fig. 7 Definition of path

将路径在 A、B 两个区域中节点的平均值定义为该区域的平均厚度。

板料 A、B 处分别接触凸、凹模的不同区域, 板料 A 处与凹模区域 4、7、8、14 以及凸模区域 d、g、h、n 接触, 板料 B 处与凹模区域 1、4、16 以及凸模区域 a、d 接触。

2.3 模拟结果与分析

不同区域摩擦因数对板料 A 处平均厚度的影响如图 8 所示。凸模区域 h 处的摩擦对板料 A 处平均厚度的影响最为显著, 此处属于胀形变形, 增加摩擦可以有效地对材料流动起到约束作用, 防止板料快速流出而导致减薄。当摩擦因数从 0.03 逐步上升至 0.21 时, 板料 A 处平均厚度增加了 0.088 mm, 增厚率为 13.12%。凸模区域 d、g 处的摩擦因数与板料 A 处的平均厚度变化也呈正相关, 但影响较小, 为非敏感区, 该区域摩擦的增加可以使凸模更好地带动板料流入凹模。凸模区域 n 处的材料流动量很少, 因此, 对平均厚度的变化几乎没有影响。凹模区域 4、7、8 处的摩擦因数与板料 A 处平均厚度变化基本呈负相关, 摩擦因数越大, 板料 A 处的平均厚度越小, 因此, 减小这些区域的摩擦可以促进板料流动, 提高板料 A 处的平均厚度。凹模区域 14 处摩擦因数的变化对板料 A 处平均厚度几乎无影响, 这是由于板料与区域 14 的接触发生在冲压成形的最后时刻, 此时材料流动甚微。根据图 8 中曲线变化趋势进行分析可知, 凸、凹模区域摩擦因数对板料 A 处平均厚度的影响程度由大到小依次为: h、g、d、4、8、7、n、14, 其中, 主要影响区为区域 h, 次要影响区为区域 g、d、4、8、7、n、14。

不同区域摩擦因数对板料 B 处平均厚度的影响如图 9 所示。板料 B 处的平均厚度总体上与凸模区域 a、d 处的摩擦因数呈正相关, 与凹模区域 1、4、16 处的摩擦因数呈负相关。其中, 凹模区域摩擦因数对板料 B 处的平均厚度影响相较于凸模更为显著, 凹模区域 1 处摩擦对板料 B 处平均厚度影

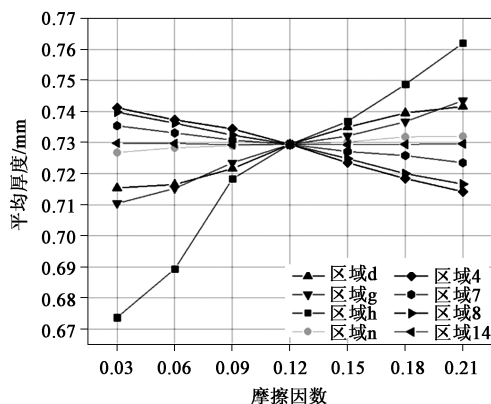


图 8 摩擦因数对板料 A 处平均厚度的影响

Fig. 8 Effect of friction coefficient on average thickness for sheet A area

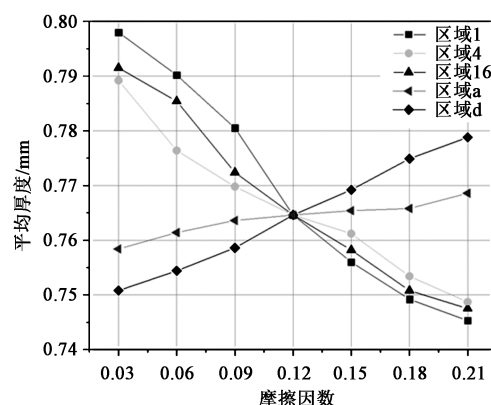


图 9 摩擦因数对板料 B 处平均厚度的影响

Fig. 9 Effect of friction coefficient on average thickness for sheet B area

响最大。当摩擦因数从 0.03 逐步上升至 0.21 时, 板料 B 处平均厚度减少了 0.028 mm, 减薄率为 7.11%。由此可见, 减小该区域的摩擦可以让板料更加顺利地流入凹模腔内, 使侧壁区的材料流动更加均匀。根据图 9 中曲线变化趋势进行分析可知, 凸、凹模区域摩擦因数对板料 B 处平均厚度的主要影响区为区域 1、16、4, 次要影响区为区域 a、d。

由上述分析可知, 板料厚度的主要摩擦影响区域依次为: 凸模顶部圆角区域 h、凸缘圆角区域 1、凸缘区域 16、凹模侧壁区域 4。这些区域的摩擦特性对板料成形质量有着显著的影响。凸模顶部圆角区摩擦因数增加可以对板料流动起到阻滞作用, 减少板料流出减薄。凹模圆角区、侧壁区以及凸缘区摩擦因数减小, 有利于促进板料流动, 使板料成形更加均匀。

3 优化设计

确定主要摩擦影响区域后, 即可对这些区域的

摩擦特性分布进行优化。以板料 A、B 处的厚度均匀性作为优化的目标，通过均匀设计法，找到模具表面最优摩擦因数组合。选取摩擦敏感区域 h、1、16 和 4 为试验因素，各因素水平（摩擦因数）设为 10 个水平。根据上述模拟分析结果可以看出，A、B 处板料厚度大小与凸模摩擦呈正相关，与凹模摩擦呈负相关。因此，设置凹模区域 1、16 和 4 与板料之间的摩擦因数范围为 0.03~0.12，取数间隔为 0.01，凸模区域 h 与板料之间的摩擦因数范围为 0.12~0.30，取数间隔为 0.02，其他凸、凹模区域与板料之间的摩擦因数均保持 0.12 不变。

根据上述试验因素和水平数，选择均匀设计表 $U_{10}^*(10^8)^{[21]}$ ，试验因素水平如表 3 所示。

| 表 3 试验因素水平表 | | | | |
|--|------|------|------|-------|
| Table 3 Factors and levels of experiment | | | | |
| 试验编号 | 区域 h | 区域 1 | 区域 4 | 区域 16 |
| 1 | 0.12 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 2 | 0.14 | 0.08 | 0.10 | 0.12 |
| 3 | 0.16 | 0.11 | 0.03 | 0.06 |
| 4 | 0.18 | 0.03 | 0.07 | 0.11 |
| 5 | 0.20 | 0.06 | 0.11 | 0.05 |
| 6 | 0.22 | 0.09 | 0.04 | 0.10 |
| 7 | 0.24 | 0.12 | 0.08 | 0.04 |
| 8 | 0.26 | 0.04 | 0.12 | 0.09 |
| 9 | 0.28 | 0.07 | 0.05 | 0.03 |
| 10 | 0.30 | 0.10 | 0.09 | 0.08 |

根据表 3 中 10 组不同的摩擦因数组合，重新建立了有限元模型进行数值模拟，得到了板料 A、B 两处的平均厚度，如图 10 所示。10 组试验下，板料 B 处平均厚度变化范围在 0.781~0.802 mm 之间，减薄率控制在 19.8%~21.9% 之间，完全满足实际需要。板料 A 处平均厚度变化相对较大，最大平均厚度发生在第 9 组试验，此时，板料 A 处平均厚度为 0.7639 mm，减薄率为 23.61%。为了减小板料减薄程度，降低拉裂的可能性，提高板料厚度均匀性，应尽可能增加最薄处板料平均厚度，因此，第 9 组试验的优化结果最佳，即当区域 h、1、4 和 16 的摩擦因数 $\mu_h=0.28$ 、 $\mu_1=0.07$ 、 $\mu_4=0.05$ 和 $\mu_{16}=0.03$ 时，板料的减薄程度最小，板厚的均匀性最好。

优化前后的成形件沿定义路径（图 5）的厚度分布如图 11 所示。从图 11 中可以发现，优化前板料在路径上的最大减薄率为 38.79%，优化后最大减薄率为 25.04%，降低了 13.03%。优化前板厚的

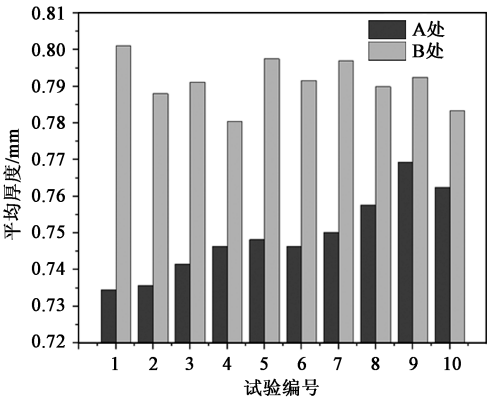


图 10 优化后成形件 A、B 处的平均厚度
Fig. 10 Average thicknesses at A and B of formed part after optimization

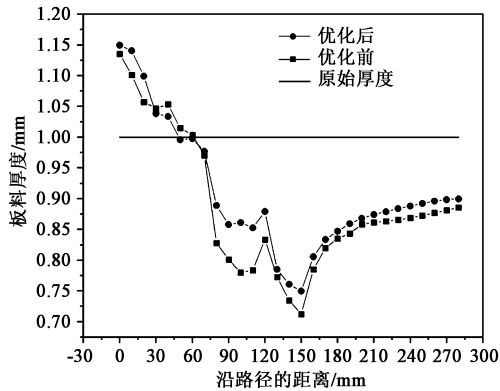


图 11 优化前后沿路径的板料厚度变化曲线
Fig. 11 Change curves of sheet thickness along path before and after optimization

变化幅度为 37.27%，优化后板厚的变化幅度为 34.78%，降低了 6.68%。优化前后的板料厚度云图，如图 12 所示，从图 12 中可以明显看出，优化后凸缘区板厚分布更加均匀，板料起皱的现象得到了明显的改善，最大板厚处位于板料边缘区域，其在后续工艺中将被切除，对成形件的质量没有影响。

4 结论

- （1）模具表面存在摩擦敏感区域，且各区域摩擦特性对成形性能的影响各不相同，即有利摩擦和有害摩擦区域，这表明模具-工件界面理论上存在最优的摩擦特性分布。
- （2）通过数值模拟，可确定模具表面摩擦敏感区域。增大凸模摩擦敏感区域 h 的摩擦以及减小凹模摩擦敏感区域 1、4 和 16 的摩擦，均可以不同程度上减小板厚的减薄程度。
- （3）以成形件厚度均匀性为优化目标，采用均

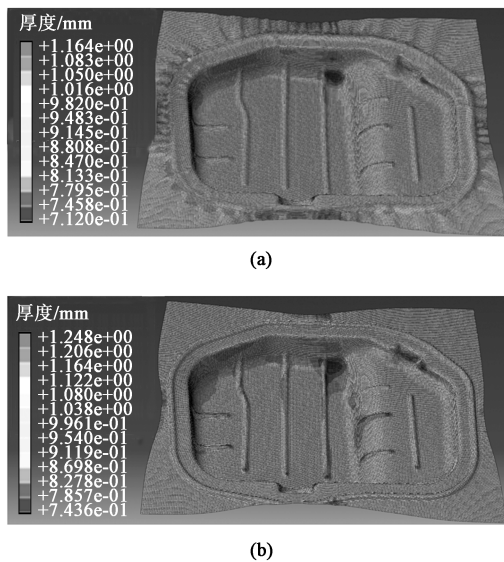


图 12 优化前后板料厚度分布云图

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 12 Cloud maps of sheet thickness distribution before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

匀设计法, 得到模具表面最优摩擦特性分布组合, 即 $\mu_0 = 0.28$ 、 $\mu_1 = 0.07$ 、 $\mu_4 = 0.05$ 和 $\mu_{16} = 0.03$ 。优化后的模拟结果显示, 成形件最薄处的破裂可能性降低了 13.03%, 板厚的变化幅度降低了 6.68%。

参考文献:

- [1] Choi J, Choi B, Heo S, et al. Numerical modeling of the thermal deformation during stamping process of an automotive body part [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 159–172.
- [2] Dwivedi R, Agnihotri G. Study of deep drawing process parameters [J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4 (2): 820–826.
- [3] Takalkar A S, Babu M C L. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233 (4): 1011–1036.
- [4] Li Z F, Lu S H, Zhang T, et al. A simple and low-cost lubrication method for improvement in the surface quality of incremental sheet metal forming [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71 (7): 1715–1719.
- [5] Wang Z, Zhang Q C, Liu Y Q, et al. A robust and accurate geometric model for automated design of drawbeads in sheet metal forming [J]. Computer-Aided Design, 2017, 92: 42–57.
- [6] Ko D C, Cha S H, Lee S K, et al. Application of a feasible formability diagram for the effective design in stamping processes of automotive panels [J]. Materials & Design, 2015, 31 (3): 1262–1275.
- [7] Naceur H, Guo Y Q, Batoz J L, et al. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43 (10): 2407–2434.
- [8] Schmid H, Hetz P, Merklein M. Failure behavior of different sheet metals after passing a drawbead [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 125–132.
- [9] Jansson T, Andersson A, Nilsson L. Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part: An evaluation using surrogate models and response surfaces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159 (3): 426–434.
- [10] Ingarao G, Lorenzo R D. Optimization methods for complex sheet metal stamping computer aided engineering [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 42 (3): 459–480.
- [11] Zhang Z Q, Jia X F, Wang Y J, et al. Optimization analysis of initial sheet metal contour line for high-strength boron steel in hot stamping [J]. Strength of Materials, 2016, 48 (1): 77–81.
- [12] Yang H, Li H, Zhan M. Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (15): 2273–2284.
- [13] Leu D K. Evaluation of friction coefficient using indentation model of Brinell hardness test for sheet metal forming [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25 (6): 1509–1517.
- [14] 符永宏, 杨守军, 许华, 等. 基于均匀性的模具表面复合织构 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2014, 35 (3): 343–348.
- [15] 何梦虎, 符昊, 符永宏, 等. 复合织构模具对筒形件成形影响的数值模拟及实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 58–65.
- [16] He M H, Fu H, Fu Y H, et al. Numerical simulation and experimental study on influence of composite texture die on forming of cylindrical parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 58–65.
- [17] Hassan M A, Takakura N, Yamaguchi K. A novel technique of friction aided deep drawing using a blank-holder divided into four segments [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 139 (1–3): 408–413.
- [18] Chen P, Liu X J, Huang M J, et al. Numerical simulation and experimental study on tribological properties of stamping die with triangular texture [J]. Tribology International, 2018, 132: 244–252.
- [19] Zein H, El Sherbiny M, Abd-Rabou M, et al. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process [J]. Materials & Design, 2014, 53: 797–808.
- [20] Kitamura K, Makino T, Nawa M, et al. Tribological effects of punch with micro-dimples in blanking under high hydrostatic pressure [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65 (1): 249–252.
- [21] Yang X P, Fu Y H, Ji J H, et al. Study on tribological properties of surface concave convex micro-texture on the mold steel [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 72 (10): 1167–1171.
- [22] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [23] Fang K T. Uniform Design and Uniform Design Table [M]. Beijing: Science Press, 1994.