

提高汽车拉延模具与零件贴合率的型面补偿方法及应用

王 辉^{1,2,3}, 金香凤¹, 傅 杰¹, 刘莉滋^{1,2}

(1. 重庆三峡学院 机械工程学院, 重庆 404130; 2. 重庆市轻合金材料与加工工程技术研究中心, 重庆 404130;
3. 智能制造先导技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 404130)

摘要: 针对汽车覆盖件拉延模具开发中研配周期长的问题, 提出一种基于零件厚度变化和凸、凹模变形的模具型面补偿方法, 以提高拉延模具试模中模面和零件的贴合率。首先, 采用冲压成形软件对拉延工艺进行数值模拟, 得到成形载荷和成形后零件的厚度变化情况; 然后, 将拉延成形分析得到的最大载荷信息映射到划分网格的三维实体模型中对模具进行静力分析, 得到模具的变形位移; 最后, 借助 ThinkDesign 软件的 GSM 模块, 依次用模具变形位移和厚度变化位移对模具型面进行补偿。并以汽车前隔板拉延模具为研究对象, 进行模具型面补偿和实验验证, 结果表明该方法可有效地提高拉延模具首次试模的贴合率。

关键词: 型面补偿; 贴合率; 模具变形; 拉延模具; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.027

中图分类号: TG386.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0196-05

Surface compensation method and application for improving fit rate of automobile drawing dies and parts

Wang Hui^{1,2,3}, Jin Xiangfeng¹, Fu Jie¹, Liu Lizi^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404130, China;

2. Chongqing Light Alloy Materials and Processing Engineering Technology Research Center, Chongqing 404130, China;

3. Chongqing Engineering Research Center for Advanced Intelligent Manufacturing Technology, Chongqing 404130, China)

Abstract: For the problem of long research and development cycle in the development of drawing die for automobile cover panels, a die surface compensation method was proposed based on the variation of part thickness and the deformations of punch and die, so as to improve the fit rate of die surface and part in the drawing die trial. Firstly, the numerically simulation of drawing process was carried out by the stamping software, and the change of forming load and thickness of formed part were obtained. Secondly, the maximum load information obtained by the drawing analysis was mapped to the three-dimensional solid model which was divided into meshes, and the static analysis of die was performed to obtain the deformation displacement of die. Finally, with the help of the global shape modeling (GSM) module for software ThinkDesign, the die surface was compensated by the die deformation displacement and the thickness change displacement in turn. Furthermore, for the drawing die of automobile front bulkhead, the die surface compensation and the experimental verification were carried out. The results show that the proposed method can effectively improve the fit rate of drawing die in the first die trial.

Key words: surface compensation; fit rate; die deformation; drawing die; forming load

汽车冲压模具是汽车生产制造过程的重要装备之一, 为了保证大批量生产中冲压零件的形状和尺寸的稳定性, 要求成形后零件与模具工作面接处, 因此, 模具和零件的贴合率是评价冲压模具是否合格的重要指标之一^[1-3]。模具和零件不贴合会导致零件受力不均, 容易发生回弹, 严重时会产生扭曲,

造成产品质量不稳定, 影响后续的组装焊接^[4-6]。为了达到厂家规定的型面和零件的贴合率, 实际模具调试非常耗时, 会增加设备运行费用和工人调试费用, 直接导致模具制造成本增加^[7-8]。

为了提升模具与型面的研合质量, 黄黑等^[9]分析了冲压在研配方法和数控加工方向上的问题, 提出了相应的解决措施。窦锦文等^[10]针对拉延后的零件厚度减薄的情况, 采用有限元软件和 C 语言二次开发结合对拉延模具型面进行补偿, 从而提高了模具型面贴合率。刘进军等^[11]发现, 尺寸较大的零件在试模中易出现两侧接触、中间悬空的现象, 通过

收稿日期: 2022-01-25; 修订日期: 2022-04-26

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202101234);
重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2019jcyj-msxmX0505)

作者简介: 王 辉 (1989-), 男, 博士, 讲师

E-mail: wanghui@sanxiao.edu.cn

测量中间悬空的高度对模具结构易变形区域进行整体补偿可达到缩短模具研修时间的目的。

考虑到冲压零件在成形前后的厚度变化以及模具在成形过程中的变形对贴合率的影响, 本文提出了一种提高模具型面和零件贴合率的补偿方法。采用有限元软件 Dynaform 分析零件拉延成形过程, 然后借助有限元软件 Hyperworks 将拉延成形分析得到的载荷信息映射到模具上以分析凸模和凹模的变形位移, 最后借助 ThinkDesign, 先后用模具变形位移和零件厚度变化位移对模具型面进行补偿。

1 提高模具贴合率的补偿方法

汽车拉延类模具具有较高的贴合率要求, 为了提高模具型面的贴合率, 提出型面补偿方法, 如图 1 所示。针对汽车拉延模具, 首先, 采用冲压成形分析软件分析拉延成形过程, 得到数值模拟的分析结果。与此同时, 对三维模具进行结构简化和网格划分, 然后将冲压成形分析得到的载荷映射到划分网格的拉延模具上, 并按实际工况定义边界条件, 分析模具的变形位移。最后, 将冲压分析得到的零件厚度变化位移和模具变形位移叠加后用于补偿模具型面。型面补偿中以凸模为基准型面, 分别用凸、凹模总变形位移和厚度变化位移对凹模的模面进行补偿。

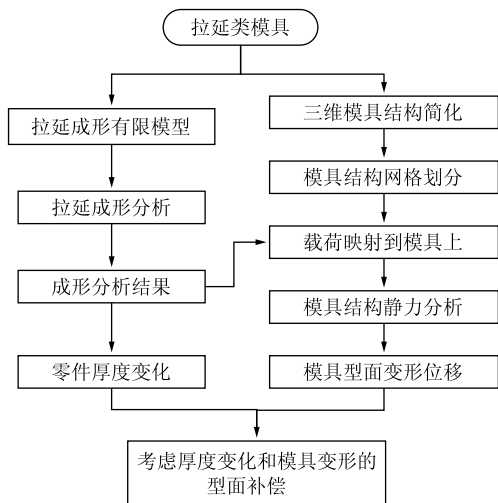


图 1 考虑厚度变化和模具变形的型面补偿方法流程图

Fig. 1 Flow chart of surface compensation method based on thickness change and die deformation

假设 $C(x, y, z)$ 为模具型面上的一个节点, 其中零件厚度变化的补偿值为 $C_t(x_t, y_t, z_t)$, 由于凹模变形的补偿值为 $C_d(x_d, y_d, z_d)$, 凸模变形的补偿值为 $C_p(x_p, y_p, z_p)$, 则节点 $C(x, y, z)$ 的

总补偿量 $\Delta C(x, y, z)$ 可表示为:

$$\Delta C(x, y, z) = C_t(x_t, y_t, z_t) + C_d(x_d, y_d, z_d) + C_p(x_p, y_p, z_p) \quad (1)$$

2 数值模拟

2.1 拉延成形数值模拟分析

以汽车前隔板拉延模具为例, 采用板料成形模拟软件 Dynaform 对前隔板零件的拉延成形过程进行数值模拟, 图 2 为构建的前隔板拉延成形工序的数值仿真模型, 包括凹模、板料、压边圈和凸模, 零件的材质为冲压用钢 BLD, 通过改变工艺参数优化拉延工序, 得到满足工艺要求的拉延成形数值模拟结果。图 3 为数值模拟中前隔板零件拉延成形的厚度变化分布图, 成形后零件的最小和最大厚度分别为 0.591 和 0.856 mm。

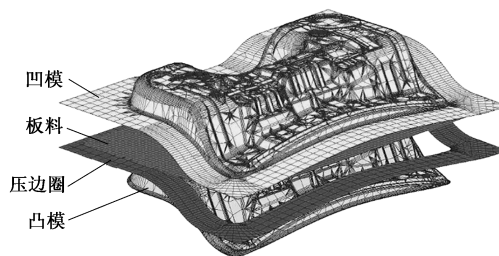


图 2 前隔板拉延成形工序的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of front bulkhead in drawing process

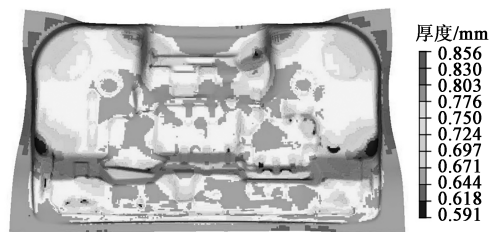


图 3 前隔板拉延成形后的厚度分布图

Fig. 3 Thickness distribution diagram of front bulkhead after drawing

2.2 模具变形数值模拟

图 4 为前隔板拉延模具的工作状态示意图, 该模具为倒装模具, 模具安装在单动薄板液压机中成形。前隔板拉延模具的上模为凹模; 前隔板拉延模具的下模部分包括下模座、压边圈和凸模, 下模座通过紧固螺丝固定在液压机工作台面的马槽中。其中, 凸模、凹模以及压边圈的材质为 QT600 球墨铸铁, 下模座的材料为 HT300 灰铸铁, 液压机工作台材质为 Q235 钢, 其材料力学性能参数如表 1 所示。

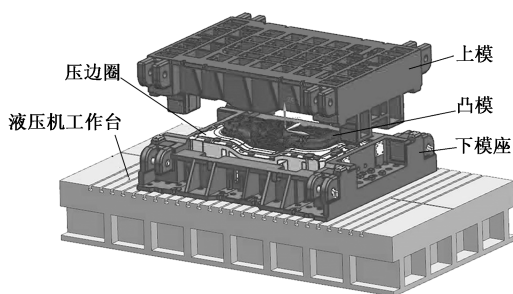


图 4 前隔板拉伸模具在液压工作台合模前的结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of front bulkhead drawing die before die closing on hydraulic worktable

表 1 有限元模型中的材料力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of materials in FEM model

材料	弹性模量/Pa	泊松比	密度/($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
QT600 球墨铸铁	1.69×10^{11}	0.286	7.12
HT300 灰铸铁	1.43×10^{11}	0.270	7.30
Q235 钢	2.12×10^{11}	0.288	7.86

采用三维建模软件对前隔板拉伸模具三维图进行简化,将零件分别导入 Hypermesh 软件化网格,得到三维实体网格后,从三维实体网格中抽取模具的

凸模和凹模成形型面的网格。前隔板成形过程中模具闭合时受力最大,因此,将此时的冲压零件的受力载荷导入,将载荷分别映射到与零件直接接触的凸模和凹模的网格节点上,然后在有限元中设置其他边界条件。建立的前隔板拉伸模具的下模部分静力分析有限元模型如图 5 所示,采用 OptiStruct 求解器进行计算,得到如图 6a 所示的前隔板拉伸模具的下模部分的变形位移分布图,其中,模具的最大变形位移为 1.106 mm,最大变形区位于凸模。图 6b 为有限元分析得到的上模变形位移分布图,上模的最大变形位移为 0.270 mm。

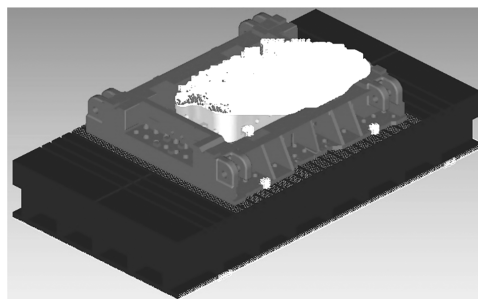


图 5 前隔板拉伸模具的下模的静力分析有限元模型

Fig. 5 Static analysis finite element model of lower die for front bulkhead drawing die

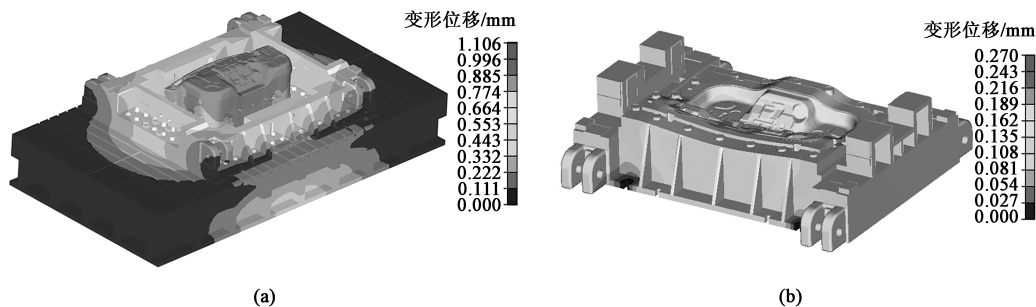


图 6 前隔板拉伸模具的变形位移分布图

(a) 下模 (b) 上模

Fig. 6 Deformation displacement distribution diagrams of front bulkhead drawing die

(a) Lower die (b) Upper die

3 模具型面补偿

前隔板拉伸模具的模具型面补偿包括两方面:模具凸、凹模变形位移补偿和零件厚度变化位移补偿。模具实际制造开发中,在型面补偿中以凸模作为基准模具,因此,在型面补偿中选择前隔板拉伸模具的凸模作为基准型面,首先,将凸模和凹模变形位移叠加后对凹模进行补偿,然后在此基础上再加入零件厚度变化的补偿量,得到最终补偿后的凹模模面结果。

在后处理模块 HyperView 中查看凸模和凹模静力分析后的变形模面,导出凸模和凹模变形的网格数据,将其导入 ThinkDesign 软件的 Compensation MD 模块,计算得出模具凸、凹模的总变形位移,并将其作为全局形状建模 (Global Shape Modeling, GSM) 的变形参考体用于补偿模具型面,补偿后得到考虑凸模和凹模变形的模面,如图 7a 所示。测量 A~F 这 6 个点的补偿位移分别为 0.993、1.069、1.157、0.990、1.110 和 1.456 mm。

零件厚度补偿值的计算过程是借助 MATLAB 编写程序实现的。首先,从冲压成形数值模拟后处理

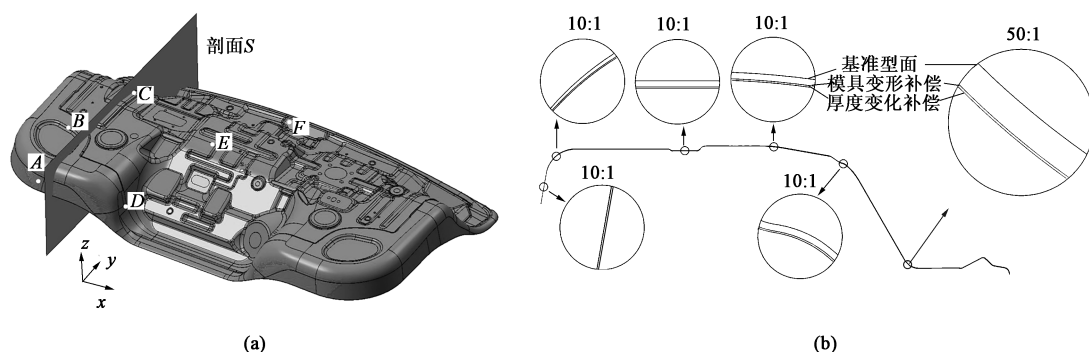


图 7 模具型面补偿结果

(a) 补偿结果 (b) S 截面的剖面图

Fig. 7 Die surface compensation results

(a) Compensation result (b) Sectional view of S section

软件导出成形后的零件厚度结果文件，包括网格、节点、节点坐标和厚度值，在每个节点的厚度值上减去初始料厚，得到该节点的厚度补偿值；厚度补偿值需要在网格单位法向量进行补偿，利用通过查找每个网格上的 3 个节点，可得到单个网格上的所有节点的 x 、 y 、 z 坐标值，利用法向量与任意两个网格上的节点组成的向量均垂直，从而求解出每个网格的单位法向量。再用网格节点坐标分别加上厚度补偿值与单位法向量的乘积，得到补偿后的节点坐标值，按以上同样方法计算所有网格节点的补偿后的坐标值，从而得到厚度变化补偿网格。将不考虑厚度变化的零件网格和厚度变化补偿网格导入 ThinkDesign 软件中，计算得出因厚度变化而引起的网格节点的位移，并以第 1 步得到的考虑凸模和凹模变形的补偿模具型面作为补偿对象，得到模具型面补偿结果如图 7 所示。由于补偿的数值相对于零件尺寸较小，选取截面 S 进行剖切得到剖面图如图 7b 所示。测量图 7a 中检测点 A~F 的厚度补偿位移分别为 0.079、0.062、0.210、0.132、0.059 和 0.192 mm。

4 实验

在模具制造加工阶段，前隔板拉延模具的凸模作为基准件，按设计图纸进行加工，拉延模具的凹模按照补偿后模具型面编程加工。由于加工工艺本身的原因，加工后的模具需进行清根和清角处理，然后利用油石研磨和砂纸抛光处理^[12]。接着将拉延模具安装到试模压机上进行调试，得到试模零件后，在试模零件内、外表面均匀地刷上一层红丹着色，再将着色后的试模零件放回拉延模具中测试模具与零件的贴合情况，得到模具的首次试模如图 8 所示，

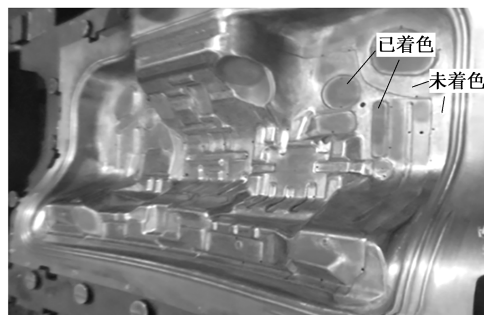


图 8 首次试模的模具着色分布情况

Fig. 8 Distribution condition of die coloring in the first die trial

其中模具型面与零件贴合的区域已被着色（图 8 中深色部分）。由图 8 中可知，该模具在首次试模中模具和零件的贴合面积约占模面的 1/2，贴合区域较均匀地分布在模具型面内，此外还有部分区域未贴合，还需进一步研配。实验结果表明，与传统方法相比，此方法可以有效地提高拉延模具首次试模模具型面和零件的贴合率。

5 结论

(1) 为了提高汽车拉延类模具试模中模具型面和零件的贴合率，提出一种基于零件厚度变化和凸、凹模变形的模具型面补偿方法，并以汽车前隔板拉延模具为例，对其进行模具型面补偿和实验验证，结果表明，该方法可以有效地提高拉延模具首次试模的贴合率，缩短模具研配时间。

(2) 基于模具变形的模具型面补偿过程，借助有限元软件计算整个模具以及成形设备的工作台变形对模具型面的变形影响。为增加数值模拟结果的准确性，将冲压成形分析中的最大载荷直接映射到静力

分析模型中作为边界条件,得到下模最大变形位移为 1.106 mm,上模最大变形位移为 0.270 mm。

(3) 实验得出零件厚度变化的位移补偿相对于模具变形位移补偿较小,在补偿过程中,先进行凸、凹模变形的模具型面补偿,然后在此基础上进行厚度变化的补偿以得到最终结果。

参考文献:

- [1] 赵殿明,王利,黄昭明,等.多弯角车身钣金件多工位级进模设计与应用[J].锻压技术,2020,45(3):125-130.
Zhao D M, Wang L, Huang Z M, et al. Design and application of multi-position progressive die for multi-angle car body sheet metal parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (3): 125-130.
- [2] Chen J, Xu D K, Xia G D, et al. Geometric compensation for automotive stamping die design integrating structure deflection and blank thinning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66 (9): 1449-1456.
- [3] 孙刚,徐建军,白朋鹏,等.汽车发罩外板冲压回弹补偿研究[J].锻压技术,2021,46(5):64-71,168.
Sun G, Xu J J, Bai P P, et al. Springback compensation research of stamping for automobile hood outer plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 64-71, 168.
- [4] 李伟,秦兴喜,侯艳飞.提高冲压模具型面研合率的措施[J].模具制造,2014,14(9):4-8.
Li W, Qin X X, Hou Y F. Improvement the qualified rate measures stamping die grind rate [J]. Die & Mould Manufacture, 2014, 14 (9): 4-8.
- [5] 夏国栋.汽车覆盖件冲压模具精细化设计的关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2011.
Xia G D. Research on the Key Technologies for Accurate Design of Automotive Body Panel Stamping Die [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [6] 章爽滨,付再兴,李磊.降低深冲件开裂风险的质量策略研究与实践[J].锻造与冲压,2021,(18):55-59.
Zhang S B, Fu Z X, Li L. Research and test of the reducing the risk of cracking of deep-drawing parts [J]. Forging & Metalforming, 2021, (18): 55-59.
- [7] Keum Y T, Ahn I H, Lee I K, et al. Simulation of stamping process of automotive panel considering die deformation [J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 778 (1): 90-95.
- [8] 王辉.汽车冲压模具短周期开发关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2017.
Wang H. Research on Key Techniques of Short Cycle Development of Automobile Stamping Die [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [9] 黄罍,唐雅,宾小林.提升冲压模具型面研配质量及效率的方案分析[J].装备制造技术,2017,(12):136-139.
Huang P, Tang Y, Bin X L. Scheme analysis of improving quality and efficiency of stamping die profile [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017, (12): 136-139.
- [10] 窦锦文,苗德华,蔡玉俊.基于拉延减薄的汽车覆盖件模具型面补偿研究[J].模具制造,2011,11(3):7-10.
Dou J W, Miao D H, Cai Y J. Research on the compensation for the automobile panel die faces based on drawing thinning [J]. Die & Mould Manufacture, 2011, 11 (3): 7-10.
- [11] 刘进军,王一帆,贺立辉,等.提高冲模研合率的方法与应用[J].模具工业,2019,45(8):14-17,23.
Liu J J, Wang Y F, He L H, et al. Methods to improve lapping-inrate of stamping die and the application [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (8): 14-17, 23.
- [12] 贾利然,马恒源,周雄辉.模具型腔数控加工时间的评估方法研究[J].模具工业,2017,43(5):7-13.
Jia L R, Ma H Y, Zhou X H. Study on the evaluation method of NC machining time for mould cavity plate [J]. Die & Mould Industry, 2017, 43 (5): 7-13.

(上接第 150 页)

- Ji M J, Deng W H, Guo W W, et al. Improved filling algorithm for rectangle packing problem [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49 (4): 139-150.
- [9] 穆丹.基于遗传算法的木板材优化下料问题研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2017.
Mu D. Research on the Wood Board Cutting-stock Problem Based on Genetic Algorithm [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [10] 陈洁琼,樊留群,杨剑.遗传算法在风管制造排样中的应用[J].制造业自动化,2017,39(5):113-115,143.
Chen J Q, Fan L Q, Yang J. Genetic algorithm application in air duct sheet metal parts layout [J]. Manufacturing Automation, 2017, 39 (5): 113-115, 143.
- [11] 董功云,陈进,王鸿超.矩形件排样的流程和算法设计[J].轻工机械,2016,34(6):57-61.
Dong G Y, Chen J, Wang H C. Process and algorithm design of layout of rectangular plate [J]. Light Industry Machinery, 2016, 34 (6): 57-61.
- [12] 王伟,杜向阳.基于捕食搜索策略的遗传算法在矩形件优化排样中的研究[J].中国农机化学报,2019,40(2):157-162.
Wang W, Du X Y. Genetic algorithm based on predatory search strategy for rectangular optimal layout [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40 (2): 157-162.
- [13] Vitayasak S, Pongcharoen P. Consistency on optimal ga parameter setting on various characteristics of layout design problem [A]. Proceedings of 2015 International Conference on Power Electronics and Energy Engineering (PEEE 2015) [C]. Hong Kong: 2015.