

文章编号:1001-4934(2010)01-0006-05

# 板料包边中边界缩进的敏感性分析

袁鹏飞<sup>1</sup>, 韩旭<sup>1</sup>, 姜潮<sup>1</sup>, 郭水军<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 上海赛科利汽车模具技术应用有限公司, 上海 201209)

**摘要:** 板料包边过程形成的边界缩进是前、后门与门框配合间隙不均匀的根本原因,如何控制边界缩进的大小是设计和生产中的关键问题。归纳了影响板料包边后边界缩进的各种参数,建立有限元模型对影响板料包边后边界缩进的参数进行敏感性分析,找到了影响板料包边后边界缩进大小的敏感参数,并就其对边界缩进的影响进行了分析。根据敏感性分析结果可以对边界缩进进行优化设计,为包边模的设计和调试提供了参考。

**关键词:** 敏感性分析;运动学描述;金属成形;模拟;有限元;应用

**中图分类号:** O242.21

**文献标识码:** A

**Abstract:** The hemming process leads to retraction, which will result in the uneven gaps between door and doorframe. Therefore it is a key issue to control the retraction in designing and manufacturing of hemming dies. The major influencing parameters of retraction in hemming were summarized. A FEM model of sheet metal hemming process was established to conduct sensitivity analysis of those parameters and find out the sensitive parameters and also analyze their influences on hemming retraction. The analysis results could lay the foundation for optimization of hemming retraction, and provide reference for the designing and adjusting of hemming dies.

**Keywords:** sensitivity analysis; kinematic description; metal forming; simulation; finite element; application

## 0 引言

汽车车门、发动机盖和行李箱盖,即四门二盖,是汽车车身总成的重要组成部分,因在车身制造中所具有的普遍性和工艺上的特殊性而越来越受到重视。汽车四门二盖是汽车车身的外表开启件,装配后要与周围零件保持圆滑过渡

和均匀的装配间隙,以达到良好的互换性。而包边是汽车覆盖件生产中1道至关重要的工序,包边质量的好坏直接影响汽车的美观和不同板料之间装配。实际生产表明,车门包边过程形成的边界缩进是前、后门与门框配合间隙不均匀的根本原因<sup>[1]</sup>。实际生产中对于包边模的设计和制造一般凭借经验,导致包边模的设

收稿日期:2009-09-17

基金项目:国家自然科学基金(10802028),国家杰出青年科学基金(10725208),汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(30775010)。

作者简介:袁鹏飞(1983-),男,硕士研究生。

计生产和调试成本都比较高。

一些学者对包边模的边界缩进进行了研究。Livatyali H.等<sup>[2-3]</sup>对包括边界缩进在内的不同包边缺陷进行了分析,得到了在几个不同的设计参数影响下包边缺陷的变化趋势,并对凸包边边界产生的成形缺陷进行了分析。Mats Svensson 和 Mattiasson Kjell<sup>[4]</sup>用有限元方法对几种不同单元类型进行仿真并与试验得到的边界缩进值进行比较。Guosong Lin 等<sup>[6]</sup>用退化的实体单元建立三维有限元模型进行仿真,并与壳单元和实体单元进行了比较。目前,包边模设计中存在的问题是对边界缩进的机理、影响参数及影响程度均缺乏认识,使包边模的设计缺乏理论指导,边界缩进的控制上太依赖经验,精度和成本控制上都有待改善。

为此,本文采用壳单元建立板料包边过程的三维有限元模型,对影响参数进行敏感性分析,确定了对板料包边后边界缩进影响较大的参数及变化趋势。

1 板料包边过程及建模

板料包边时,将经 90°翻边后的外板待包边向内翻折 90°包住内板边缘。理论分析和试验表明,很难做到将待包边从 90°一步翻折至 180°包住内板边缘。因此,实际生产中将包边工艺分成两步:首先将待包边从 90°翻折至 135°,称之为预包边;然后再将其从 135°翻折至 180°并压实,称为终包边<sup>[6]</sup>。板料的包边顺序如图 1 所示。

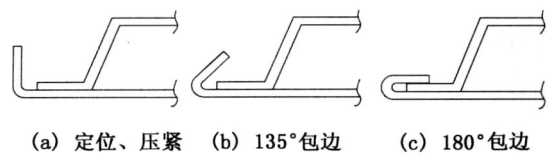


图1 板料包边顺序

用 LS-DYNA 建立有限元模型对板料包边过程进行仿真分析,可以指导实际生产,提高模具的设计和调试效率,节约模具的开发成本。通过研究表明在板料包边仿真中用壳单元式可以的,并且壳单元在包边模的仿真方面有利于减少仿真时间和模型的<sup>[4]</sup>。用壳单元建立有限

元三维模型,选取 3 参数 Barlat 材料模型、板料外板和内板材料分别是 CR3 和 CR4,其材料特性参数如表 1 所示。

表 1 材料 CR3 和 CR4 的参数

材料参数	CR3	CR4
质量密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	7.80E+03	7.85E+03
杨氏模量 E/ MPa	206 000	207 000
泊松比 $\mu$	0.33	0.28
厚向异性系数 $r_0$	1.85	1.995
厚向异性系数 $r_{45}$	1.37	1.945
厚向异性系数 $r_{90}$	2.02	2.676
板料厚度 t/ mm	0.8	0.8

包边板料长 25 mm、宽 20 mm,板料包边横截面模型如图 2 所示。在有限元计算时,预包边块和上模均设为刚体,预包边块与水平面夹角 135°且采用斜 135°包边路径,将外板立边包成 135°,上模在预包结束后竖直向下移动,将边包成 180°,完成终包边。最后测量板料包边的边界缩进,即外板边界在包边前后的变化。

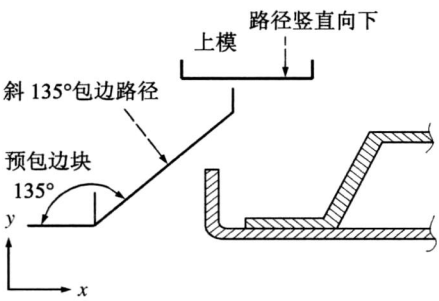


图2 板料包边横截面模型

2 包边参数对边界缩进的敏感性分析

在汽车板料包边中,边界缩进有内向和外向 2 种,通常用图 3 中的 P 表示<sup>[2]</sup>。边界缩进影响因素的敏感性分析是分析包边模设计的各参数与边界缩进之间的相关性,即分析各因素的变化对于边界缩进的影响。在一定的条件下不同的影响因素对包边后板料边界缩进的贡献是不同的。本文通过用 LS-DYNA 建立包边板料的壳单元有限元模型并进行计算,对有可能对边界缩进产生影响的参数进行单因素敏感性分析。通过敏感性分析,找到引起边界缩进的主导因素,从而为包边模的分析、设计、调试与优化提供指导。

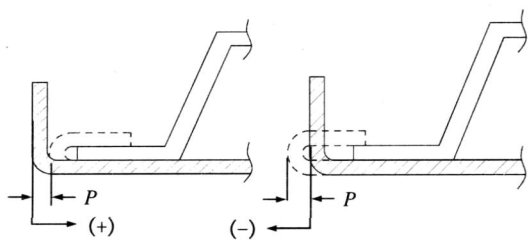


图3 边界缩进的测量

通过分析,可能对板料包边后边界缩进影响较大的参数有(见图4):翻边圆角半径  $R_d$  (外板翻边后的内侧角)、立边高度  $H$ 、内外板之间的间隙  $G$ 、外板立边与水平板的初始夹角、外板厚度  $T$ 、预包边机构与外板的摩擦因子  $\mu_1$ 、上模与外板之间的摩擦因子  $\mu_2$ 、预包边后所成的角度。选取各参数的参考值为: $R_d = 0.5 \text{ mm}$ 、 $\theta = 135^\circ$ 、 $H = 10 \text{ mm}$ 、 $G = 2.0 \text{ mm}$ 、 $\beta = 90^\circ$ 、 $T = 0.8 \text{ mm}$ ,当  $\mu_1 = \mu_2 = 0$ ,  $\theta = 135^\circ$ 。

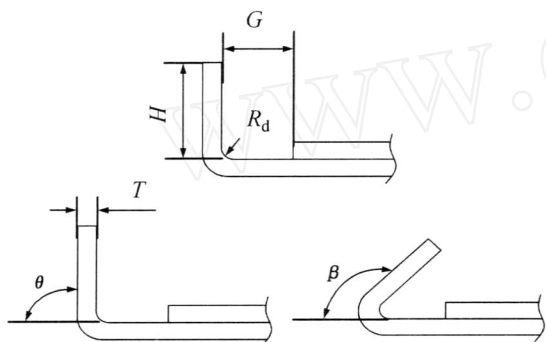
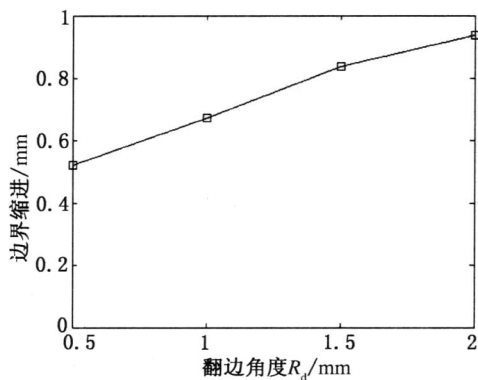


图4 参数定义

### 2.1 $R_d$ 对边界缩进的影响

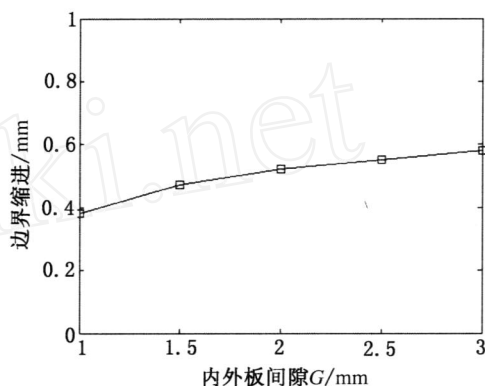
在其他参数一定的情况下,取  $R_d$  分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 进行有限元计算,获得敏感性曲线如图5所示,在  $R_d$  为 0.5 mm 的时候出现了边界缩进的最小值为 0.520 7 mm,在  $R_d$  为 2 mm 的时候出现了边界缩进的最大值为

图5 翻边角度  $R_d$ 的敏感性分析

0.937 7 mm,伴随着  $R_d$  的增大,包边后的边界缩进值显著变大,并在分析区间内呈现出单调递增的趋势。

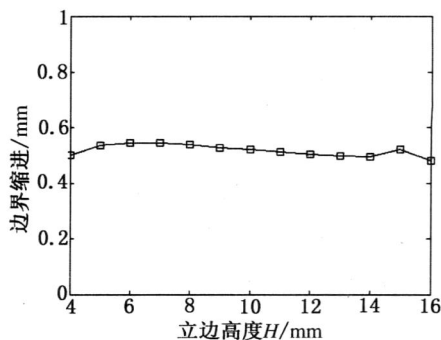
### 2.2 $G$ 对边界缩进的影响

当内、外板之间间隙  $G$  取值为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 mm 时进行有限元计算得到包边后板料的边界缩进值如图6所示,在  $G$  为 1.0 mm 时出现了边界缩进的最小值 0.380 6 mm,在  $G$  为 3.0 mm 时出现了边界缩进的最大值 0.580 2 mm,随着内、外板间隙  $G$  的变大边界缩进值也在逐步的增加,在分析区间内同样呈现出单调递增的趋势。

图6 内、外板间隙  $G$ 的敏感性分析

### 2.3 $H$ 对边界缩进的影响

实际生产中,立边高度一般为 10 mm 左右,但是根据不同的情况立边高度会有比较大的变化,例如在有转角的位置  $H$  会适当减小。如图7所示,在其他参数一定的情况下立边高度取 4~16 mm 的 13 个值,随着  $H$  的变化包边后板料的边界缩进值发生了一定波动,在分析区间内边界缩进的最小值 0.479 6 mm 出现在  $H$  为

图7 立边高度  $H$ 的敏感性分析

16 mm 时,而边界缩进的最大值 0.546 2 mm 出现在  $H$  为 6 mm 时。

2.4 对边界缩进的影响

外板立边与水平板的初始夹角 一般认为是  $90^\circ$ ;而在实际生产中由于生产条件及技术原因等造成 值一般不等于  $90^\circ$ ,而是小于  $90^\circ$ ,其中有些角度甚至小于  $70^\circ$ 。为了分析 对板料包边后边界缩进的影响大小,取了  $65^\circ\sim 90^\circ$  的 13 个角度,进行有限元计算获得敏感性曲线如图 8 所示,边界缩进值产生了一定的波动,最小值为 0.460 0 mm 出现在  $73^\circ$ 时,最大值为 0.497 3 mm 出现在  $84^\circ$ 时, 对边界缩进的大小产生了一定影响。

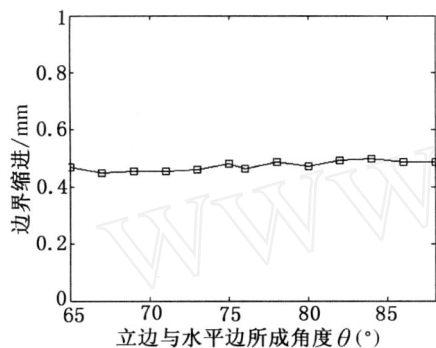


图 8 立边与水平边所成角度的敏感性分析

2.5  $T$ 对边界缩进的影响

汽车板料包边所用的板料是经过拉延成型等工序得到的,在加工之后板料的厚度已经变得不均匀,而一般的分析中都会认为这个厚度是不变的,所以有必要研究  $T$  对板料包边后边界缩进的影响。板料厚度取 0.70、0.75、0.80 和 0.85 mm 若干值进行仿真计算,得到的边界缩进值出现了一定波动(见图 9),最小值为

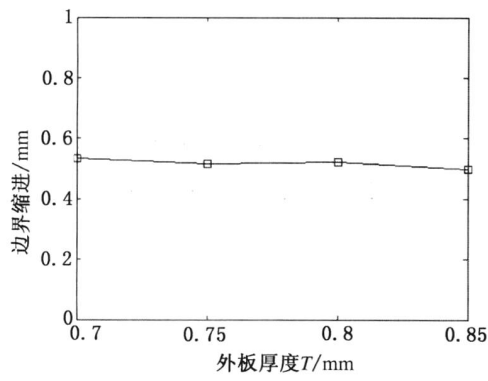


图 9 外板厚度  $T$  的敏感性分析

0.498 1 mm 出现在  $T$  为 0.85 mm 时,最大值为 0.532 4 mm 出现在  $T$  为 0.70 mm 时。

2.6  $\mu_1$ 和  $\mu_2$ 对边界缩进的影响

在实际生产中,摩擦因子对生产设备和产品的质量影响是比较大的。图 10 反映了摩擦因子的变化引起边界缩进的变化,在图中  $\mu_1$  (预包边机构与外板的摩擦因子) 在  $0\sim 1$  之间变化时,边界缩进的变化值非常小,最大值与最小值之差仅为 0.007 3 mm,边界缩进对摩擦因子  $\mu_1$  的变化不敏感; $\mu_2$  (上模与外板摩擦因子) 在  $0\sim 1$  变化时边界缩进相应变化比较大,曲线波动较大而且在  $\mu_2$  取 0.9 和 1.0 的时候仿真结果变差,出现了边缘凸起,严重影响了包边质量,所以为了减小板料包边后的边界缩进应该着重致力与减小上模与外板之间的摩擦因子  $\mu_2$ ,把上模尽量做得光滑些以减小摩擦。但是,实际的包边生产中,模具制造得十分光滑,摩擦因子值一般在  $0.1\sim 0.2$  之间,而当摩擦因子在这个范围内波动时,边界缩进值变化也相应较小,所以板料包边的边界缩进对摩擦因子  $\mu_1$  和  $\mu_2$  不敏感。

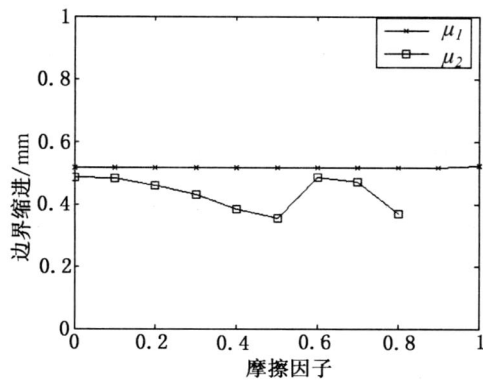


图 10 摩擦因子的敏感性分析

2.7 对边界缩进的影响

一般认为预包边后立边与水平边所成的角度 为  $135^\circ$ ,而实际生产中预包边后所成的角度不都是  $135^\circ$ 。当 在  $115^\circ\sim 145^\circ$  取了 16 个值进行有限元仿真计算得到敏感性分析曲线如由图 11 所示,曲线几乎没有波动,所以板料包边后的边界缩进对 值的变化并不敏感。

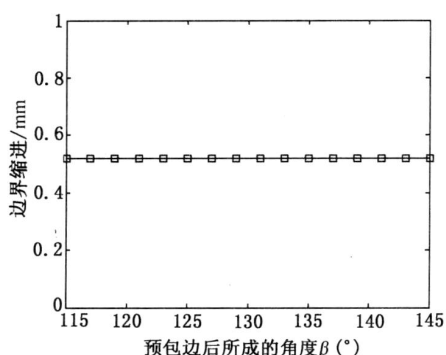


图 11 预包边后所成角度 的敏感性分析

## 2.8 敏感性分析结果

根据敏感性分析(见表 2),将各参数对板料包边后的边界缩进影响进行排序依次是:翻边角度  $R_d$ 、内、外板间隙  $G$  和翻边高度  $H$ 、外板立边与水平板的初始夹角 和外板厚度  $T$ ,其中  $R_d$  的影响最为明显,随着  $R_d$  的增大,边界缩进值也会变大,它成为影响板料包边后的边界缩进的主要因素; $G$  次之,是影响板料包边边界缩进的重要因素,且随着  $G$  的增大,边界缩进值也会变大呈现出单调递增的趋势; $H$ 、和  $T$  都对边界缩进有一定的影响,在敏感性分析中,边界缩进值出现了一定波动,但是没有规律性。其他几个参数对板料的边界缩进影响都比较小,所以在包边模板料设计中要控制包边后边界缩进大小可以不考虑这些参数的变化,但是要着重注意  $R_d$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $T$  5 个参数的选取。

表 2 敏感性分析结果及比较

	Max/ mm	Min/ mm	Max- Min/ mm
$R_d$	0.937 7	0.520 7	0.417 0
$G$	0.580 2	0.380 6	0.199 6
$H$	0.546 2	0.479 6	0.066 6
	0.497 3	0.456 0	0.037 3
$T$	0.532 4	0.498 1	0.034 3
$\mu_1$	0.526 0	0.518 7	0.007 3
$\mu_2$	0.487 9	0.354 4	0.133 5
	0.520 0	0.517 9	0.002 1

## 3 结论

本文以汽车板料包边为研究对象,对有可能影响板料包边后边界缩进的参数进行了敏感性分析,并找到了对边界缩进影响比较大的 5 个参数。根据敏感性分析结果可以对边界缩进进行优化设计,这是以后需要进一步研究的工作。

## 参考文献:

- [1] 张如飞. 身门盖件机器人包边运动规划与仿真 [D]. 上海:上海交通大学,2005.
- [2] Livatyali H, M Ülerisoglu A, Ahmetoglu M A, et al. Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 41-52.
- [3] 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: 20-27.
- [4] Svensson M, Mattiasson K. Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128: 142-154.
- [5] Lin G S, Li J, Jack Hu S, et al. A computational response surface study of three-Dimensional aluminum hemming using solid-to-shell mapping [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129: 360-368.
- [6] Zhang G H, Wu X, Jack Hu S. A study on Fundamental mechanisms of warp and recoil in hemming[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2001, 123: 436-441.

## 本刊加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”的声明

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《模具技术》编辑部