

覆盖件拉延模工艺补充及压料面的参数化设计新方法*

陈 涛 李光耀

(湖南大学现代车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082)

摘要：针对基于有限元法的板料成形数值模拟技术已广泛应用于汽车覆盖件制造行业的状况，对快速、自动化的有限元网格建模方法提出迫切要求的现状提出一种新的汽车覆盖件模具冲压工艺设计思路与方法，使用离散三角面片模型，在 CAE 的前处理软件中进行参数化的工艺补充面和压料面设计，方便进行修改。在完成工艺设计的同时，可自动生成整套模具的网格模型，供有限元仿真分析使用。提供参数化的真实拉深筋的模型建模手段，能够精确模拟拉深筋的形状和拉延过程中拉深筋的力学行为。完成了相关软件 STLMesher 的开发，大量的算例证明该方法具有较高的精度和较强的工程实用性。

关键词：覆盖件 拉延工艺 离散模型 网格划分
中图分类号：TP31

0 前言

拉延工序是覆盖件成形工艺中最重要的一道工序，拉延工序的工艺性能决定了覆盖件的成形质量。覆盖件拉延模工艺设计主要包括工艺补充面设计和压料面设计。图 1 所示为常规的覆盖件拉延模成形模拟和模具设计过程，包括 CAD 造型和 CAE 分析两大部分。在通用 CAD 软件进行产品造型设

计和工艺设计，而在 CAE 软件中进行网格划分和有限元分析。在 CAE 和 CAD 之间，设计人员要不断进行交互、修改和分析，直到产品的工艺性合格为止，这使得整个开发周期较长。

针对这一现状，目前将 CAD 和 CAE 集成已成为新的发展方向^[1]如 DYNAFORM、AUTOFORM、PAM-STAMP 2G 等商业化软件，都在 CAE 前处理软件中集成了部分 CAD 功能，能够直接进行工艺设计^[2]。

提出一种新的基于离散模型拉延工艺补充面和压料面设计思路和方法，流程如图 2 所示。在

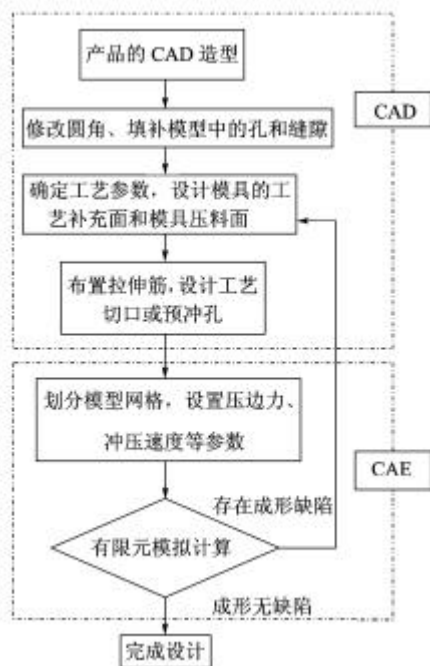


图 1 传统覆盖件模具模拟与设计流程

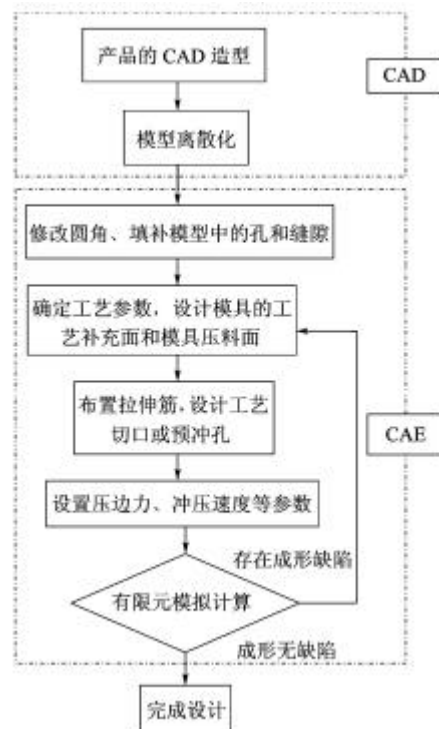


图 2 文中的覆盖件模具模拟与设计流程

* 国家 973 计划(2004CB719402)和教育部跨世纪优秀人才计划资助项目。20050920 收到初稿，20060206 收到修改稿

从 CAD 系统中获取了零件模型之后,模具的工艺面和压料面都在 CAE 前处理系统中进行参数化设计,无须在 CAD 软件中处理。该方法极大地方便了工艺方案设计和修改,节约了设计时间,并且在工艺设计的同时进行网格划分,无须再进行专门的网格划分,可方便地设计和布置参数化的真实拉深筋模型。

1 离散三角面片零件模型

所提出的新方法需要使用三角面片离散后的零件模型,在工艺补充面、压料面设计中也将使用三角面片进行造型。

三角面片模型的来源主要有三种,其中第一种是 STL(Stereo lithography)格式的模型。STL 是为快速原型制造服务的文件格式,通过将 CAD 实体或曲面模型进行表面三角化得到的。目前在 UG、Pro/E、CATIA 等商业化 CAD 软件中都带有 STL 格式文件输出接口。与 CAE 前处理常用的输入格式如 IGES、STEP 等相比,STL 格式的数据文件格式更简单,模型转换与传输中出现的错误也更少。

目前在国内汽车覆盖件设计与制造领域中,反求工程的应用日益广泛。反求工程取得的点云,在进行三角化处理后的模型可使用文中所提出的方法直接进行工艺设计。

第三个数据来源是原有模型的有限元网格模型。在许多情况下,一些模型仅仅保留下了有限元网格,而对应的 CAD 模型已经丢失。这一现象对那些时间稍微久远的模型比较普遍。这种情况下,传统的基于 CAD 模型的模具设计方法就已无能为力,而使用文中的方法仍可从零件的网格模型入手,进行工艺设计。

2 模型内孔补充与边界简化

工艺补充面的设计首先要满足两个重要的原则:内孔封闭原则和简化拉深件结构原则^[3]。前者要求对零件先作封闭补充,使零件成为无内孔的制件;后者需要简化零件的边缘轮廓形状。

原始的 CAD 模型(图 3a),由 CAD 软件输出 STL 格式三角面片模型(图 3b)。首先进行模型内部孔洞填补。搜索出所有的内部孔洞边界使用三角面进行孔洞的填补。图 3c 所示为完成孔洞填补后的结果。

模型的边界简化可以简化模具的型面,有利于冲压时材料的流动性。边界简化的过程可视为使用一个圆柱形滚轴沿着模型的边界滚过,并将位于模

型边界和圆柱体之间的区域用三角形面片填补。根据输入模型的不同,可以调整滚轴的半径尺寸,默认半径值为 300 mm。图 3d 所示为边界简化后的模型,模型中原来凹凸不平的边界,经过处理后变得很光滑。

修边线是后续修边工序的依据,因此正确的提取修边线十分重要。将边界向外平移,并对边界中的尖角进行圆整处理(图 3e 中的 A、B、C 等处),得到模具修边线(图 3e 中用粗线标志)。

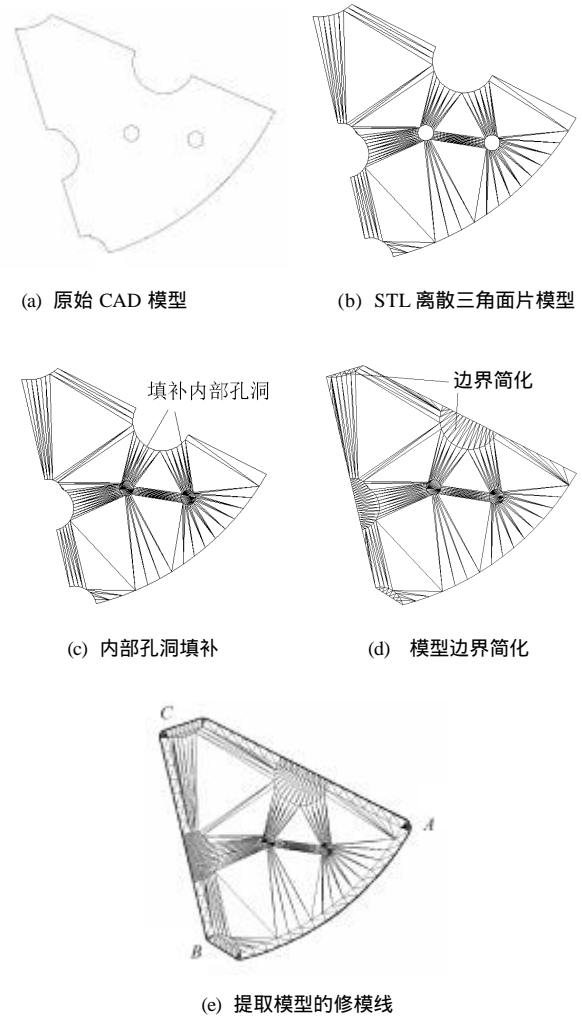


图 3 一个简单模型的工艺补充准备过程示意图

3 工艺补充面和压料面的参数化设计

传统的基于 CAD 方法的工艺设计方法中,使用曲面进行模具的工艺补充面和压料面设计,这里采用大量的三角形平面片完成工艺设计。在冲压过程中,相比于板料的变形,模具的变形相对要小很多,但模具的形状却十分复杂。因此一般把模具作为刚体处理。因为刚体不存在应力及应变计算,单元的尺寸大小也不影响时间积分步长。因此采用三

角形进行模具型面设计，不会产生单元扭曲现象。

同时为了保证仿真计算的精度，三角形逼近的模具网格必须精确模拟模具的几何形状，如果造型中使用的三角形数量过少，逼近的精度就比较低；如果三角形的数量太多，有限元计算中接触搜寻的计算量就会大大增加。这里通过控制模型的离散误差，以控制三角形的数量。

使用三角形造型时，曲线段是由数段弦代替。如图4所示的圆弧，其半径为 R ，包含角为 a 的圆弧使用 n 段弦替代，由此定义弦长逼近标准 l 为

$$l = R - R \cos[a/(2n)]$$

弦长逼近标准 l 为弦与对应弧中点的距离。设定 l 的值(通常设定为 0.1 mm)，即可控制逼近曲线的弦的长度，进而控制三角形的数量。

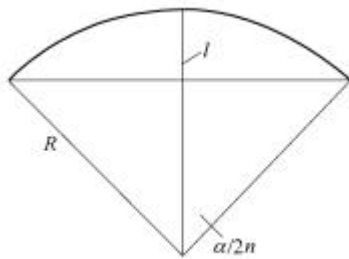


图4 弦长逼近标准

在 CAD 软件中进行工艺补充部分的参数化设计时^[4]，首先在模型的边缘曲线上作反映工艺补充部分形状的断面线，然后沿模型边界扫描得到工艺补充面。由于每条断面线的定位和建立需要不停地变换坐标系，设计过程十分费时。

这里也采用类似的思想，首先沿模型边界设计断面线，而后再将断面线使用三角形连接，完成工艺补充面造型。与基于 CAD 方法的不同之处是，使用分段的直线段来逼近断面线，使用离散的三角面片逼近模具的曲面。

工艺补充断面线可根据修边线位置的不同而分为三种：修边线位于拉深件的压料面、修边线位于拉深件的斜面和修边线位于拉深件的底面。断面线的形状是由一些参数控制的，包括凹模圆角半径 r_1 ，凸模圆角半径 r_2 ，斜壁的长度 c ，斜面与冲压方向的夹角 a ，修边线到凸模圆角的距离 a ，压料面与水平面的夹角 q 等。图5和6分别显示了修边线在拉伸件底部和拉伸件斜面时的断面线。较简单的模型，如图7中的模型，仅需要设计一种断面线的形状；对于较复杂的模型，需要设定不同参数值、不同类型的多条断面线，可参见后文中所述的覆盖件的 CAD 模型。

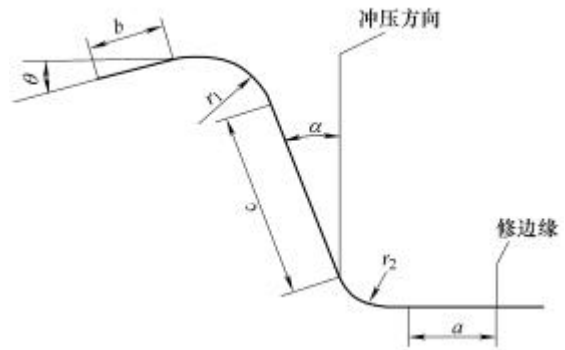


图5 修边线在拉伸件底部的工艺补充断面线示意图

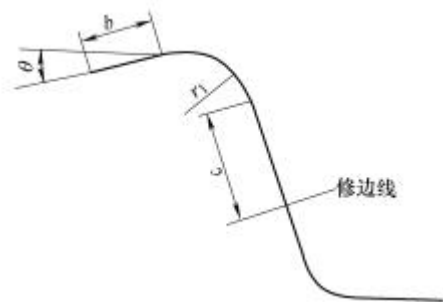


图6 修边线在拉伸件斜面的工艺补充断面线示意图

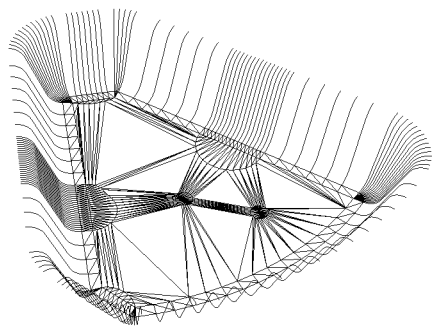


图7 断面线布置到模型边界的示意图

完成断面线形状参数设定后，使用直线段以逼近断面线上的曲线。根据弦长逼近标准确定直线段的数量和尺寸，如图7的模型中，为了逼近半径为 5 mm 的凹模圆角，使用 8 条长度为 0.73 mm 的直线段；而长度为 15 mm 的斜面只需使用两条直线段。将不同的断面线应用到模型边界上的相应的区域内，沿边界生成一系列的断面线，结果如图7所示。根据弦长逼近标准确定断面线的数量，模型边界上直边的部分布置的断面线较稀疏，而在圆角部分则布置了较多的断面线。将断面线上的直线段用三角面片连接，得到离散化的工艺补充面的网格模型如图8所示。从图9的光照模型可以看出，使用文中方法设计的模型型面的光顺程度很高。

完成工艺补充部分的设计后，把所有断面线中凹模圆角上的最后一个点连接起来，即可得到模具的分模线(图9中的黑色线所示)。

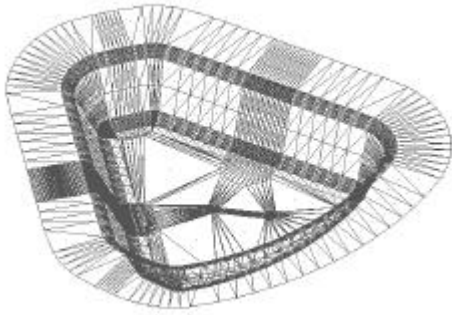


图8 完成工艺设计的凹模模型

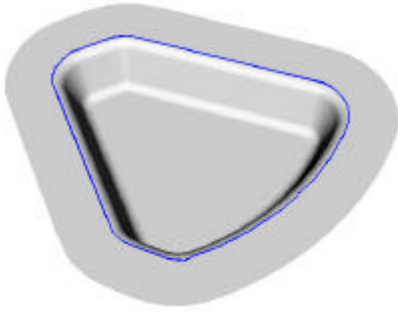


图9 凹模的光照模型

压料面的设计相对简单,造型的思想与工艺补充设计相同。压料面轮廓线的形状通常都是直线,通过调整压料面与水平面的夹角 q 可设计出水平压料面和斜压料面。将断面线沿分模线扫描,而后使用三角面将所有的断面线连接即可完成压边面设计。图8所示为完成工艺补充面和压边面设计的完整凹模模型。

将模型沿分模线进行分割,位于分模线外面的部分作为压边圈,而内部的部分作为凸模,生成整套的冲压模具网格模型,如图10所示。

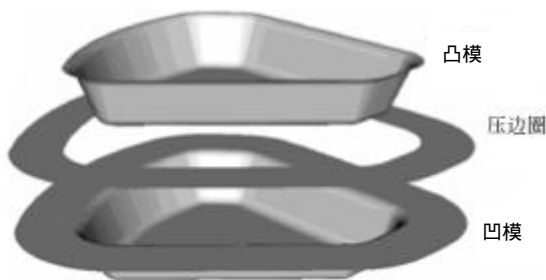


图10 整套模具模型

4 参数化的真实拉深筋模型

汽车覆盖件拉深成形中,广泛使用拉深筋(或拉深槛)调节和控制压料面作用力,在较大范围里控制板料的变形大小和变形分布,抑制起皱、破裂等缺陷的产生。因此准确地模拟成形过程中拉深筋的作用就显得非常重要。拉深筋的类型包括:圆筋、矩

形筋、拉深槛和三角形筋,使用最广泛的是半圆形拉深筋。

目前,对拉深筋的模拟主要有两种方式:真实拉深筋模型和等效拉深筋模型。等效拉深筋又称为拉深筋的力函数模型,通过计算阻力函数以模拟冲压过程中拉深筋对板料的约束作用。等效拉深筋模型建模很简单,但是与真实拉深筋模型相比,有两个主要缺陷^[5]:一是真实拉深筋可以精确的模拟拉深筋的形状及在冲压过程中的力学行为,尤其是当拉深筋的布置位置复杂时尤为突出;二是真实拉深筋可以模拟拉深筋的端部效应,以及冲压过程中模具间隙的变化对冲压结果的影响等复杂现象。真实拉深筋模拟的主要难题在于建模和网格划分较困难,对板料网格也提出了较高的要求。因此,国内外的研究中大多建立等效拉深筋进行分析,包括DYNAFORM、AUTOFORM等商业软件中也只提供了等效拉深筋模型。

所提出的方法可进行参数化的真实拉深筋建模,有效地提高了仿真计算的精度。拉深筋造型的思路与前面的工艺设计类似,下面以最常用的半圆形拉深筋为例。首先确定拉深筋的断面线形状参数,包括拉深筋宽度 b ,拉深筋高度 h ,筋半径 r_1 和 r_2 ,以及筋距离分模线的距离 d ,如图11所示。同样使用直线段以逼近断面线上的曲线,按照弦长逼近标准确定直线段的数量和尺寸。而后通过交互模式确定拉深筋的起点和终点。最后将断面线布置到压边面内,用三角形将各条断面线连接起来,即可完成真实拉深筋的造型。使用相同的方法,可以建立真实的三角形筋、矩形筋和拉深槛模型。图12所示的模型是在图9模型中加入了两条直筋,一条曲筋。

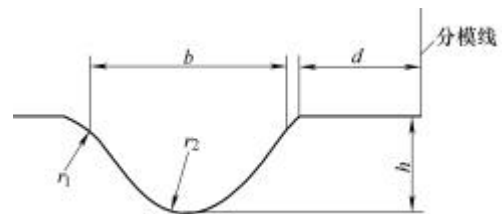


图11 半圆形拉深筋断面线形状参数



图12 加入真实拉深筋的覆盖件模型

从图 12 中看到，拉深筋跟随分模线的形状，可以模拟非常复杂的拉深筋布置方式。

使用真实拉深筋进行模拟时，对板料网格提出了很高的要求。拉深筋的径向方向上，应该至少保证在拉延筋的半径这个长度内有 3 或 4 个单元。将冲压过程中会流过拉深筋的板料，以及可能与模具曲率变化大的区域接触的部分板料，划分细密的网格。以满足板料网格和模具网格的适应性要求。

5 算例结果和未来工作的展望

第一个算例使用 UG 输出车身覆盖件的 STL 三角面片模型，图 13 所示为原始的 CAD 模型，完成工艺补充设计后的模型如图 14 所示。模型内部的 10 个孔均被填补。在进行工艺面设计时，使用了两种类型的断面线：修边线在拉深件斜面和修边线在拉深件底部。由于工件拉深较浅，为了增大成形力，在四周布置了拉深筋。压边面设计为平滑曲面压边面。图 15 显示了模型的局部细节，可以看到，尽管是使用三角面片逼近曲面，模型的光顺程度仍然相当高。使用湖南大学现代车身实验室开发的薄板冲压有限元仿真软件 CADEM II 完成冲压分析，最终的板料成形情况如图 16 所示。

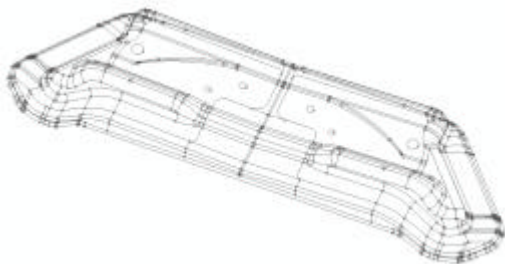


图 13 覆盖件的 CAD 模型

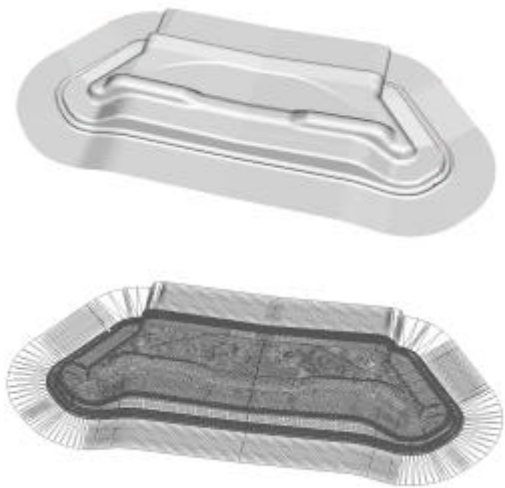


图 14 完成工艺补充和拉深筋设计的凹模模型 (光照效果图和网格模型)

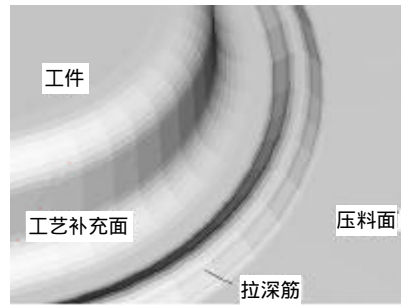


图 15 模型细节放大图

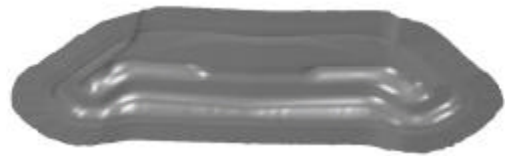


图 16 板料成形情况

在第二个算例中，使用反求技术，对某车型的车门内板进行激光扫描测量输出的三角面片模型，如图 17 所示。模型的尺寸为 1 014 mm×860 mm，共由 162 787 个三角形构成，包括车窗在内共有 17 个内部孔。压边圈设计为平滑曲面压边。工艺补充面的断面线设计为修边线在拉深件斜面的类型。完成工艺补充设计后，凹模的网格模型中共有 174 283 个三角形，如图 18 所示。使用模具轮廓作为板料毛坯的轮廓线，生成的全四边形毛坯板料网格。使用 CADEM II 软件计算，最终工件成形情况如图 19 所示(注：边缘出现轻微起皱的部位将在接下来的修边工序中被裁掉，不影响零件成形)。

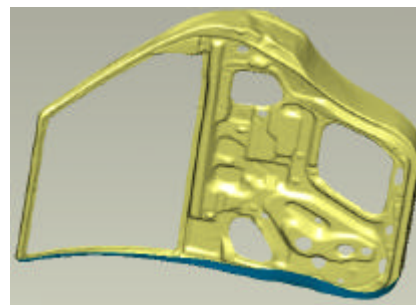


图 17 激光扫描得到的点云模型



图 18 使用 STLMesher 完成工艺设计的模型



图 19 门内板冲压仿真计算结果

从上述的各个算例可以看出,所提出的新思路可以方便有效地进行汽车覆盖件的工艺补充面设计和压料面设计。提出的方法可处理包括车门、顶盖、行李箱盖和翼子板等在内的车身覆盖件,但对于需要进行翻边展开的汽车内覆盖件,目前尚不能处理,今后将重点对这一问题进行研究。覆盖件冲压时通常需要修改半径较小的倒角,而离散模型中已丢失了原始模型中的倒角工艺特征,因此今后将加入特征识别和特征提取技术,在建模过程中进行倒角的修改、抑制。

6 结论

提出一种全新的使用离散化的零件模型,对覆盖件的工艺补充面和压边面进行参数化设计的思路和方法。该方法能够进行工艺补充的参数化设计,并可建立参数化的真实拉深筋模型。开发出了相关软件 STL Mesher,经过算例验证,该思路和方法是有效的。与传统的基于 CAD 的方法相比,所提出的方法在建模时更快捷、简单,并方便修改,可大大缩短产品设计周期。

参 考 文 献

- [1] EL KHALDI F LAMBRIKS M New requirements and recent development in sheet metal stamping simulation[C]// Proceedings of the NUMISHEET' 02 Jeju Island, Korea, 2002, 10: 411-421.
- [2] 徐金波,董湘怀. 基于有限元分析的汽车覆盖件模具设计及优化[J]. 锻压技术, 2003, 1: 63-67.

- [3] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 吴伯森,赵殊. 基于 UG II 汽车覆盖件工艺补充面的参数化设计[J]. 现代制造工程, 2003(3): 18-20.
- [5] 雷正保,付爱军,黄充,等. 拉延筋模拟方法对覆盖件 CAE 结果影响的工业试验[J]. 汽车工程, 2004, 26(1): 73-77.

NEW METHOD ON PARAMETRIC DESIGN OF ADDENDUM BINDER SURFACE AND DRAWING PROCESS COMPLEMENTARY FOR AUTOMOTIVE PANEL RAWING DIE

CHEN Tao LI Guangyao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: A new method of addendum and binder surface design is proposed. Using this method, the design of addendum surface and binder surface is completed in CAE preprocessor instead of in CAD systems as ordinary methods do. It improves the efficiency of the tool design. After the design is completed, it can automatically produce a clean and connected mesh. This method provides convenient way to model true drawbead and improve the simulation's precision. Many applications have proved this method is suitable for automotive engineering.

Key words: Automotive panel Drawing process

Discrete model Mesh generation

作者简介:陈涛,男,1978 年出生,博士研究生。主要研究方向为有限元网格自动生成,冲压工艺设计,计算机辅助几何设计及科学计算可视化。

E-mail: daniel_chen2004@163.com

李光耀,男,1963 年出生,教授,博士生导师。