

复杂轿车前底板变压边力数值模拟和物理模拟研究

Numerical and Physics Simulations of Variable Blank

Holder Force in Process of Deep

Drawing Complex Overlay

朱 伟, 董湘怀, 张质良, 舒世湘

(上海交通大学 国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

ZHU Wei, DONG Xiang-huai, ZHANG Zhi-liang,

SHU Shi-xiang(National Die & Mould CAD Engineering

Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 为了有效地解决实际生产中如何优化复杂轿车前底板拉深成形过程中的变压边力工艺, 首先基于相似物理模拟理论建立了前底板的简化物理模拟模型, 其次通过数值模拟手段从众多典型变压边力模式中得到一条最优化变压边力加载曲线, 使拉深件不出现起皱和拉破现象, 且厚度分布最均匀。最后通过实际物理模拟实验对比来验证所得结果。数值模拟和物理模拟最终结果均表明: U 型变压边力加载模式是复杂轿车前底板拉深成形的较优压边力控制曲线, 其状态下不仅拉深工件的厚度最大减薄率最小, 而且工件的最终厚度变化率的整体均方差为最小。

关键词: 前底板; 拉深成形; 变压边力; 相似理论; 数值模拟; 物理模拟; 均方差

中图分类号: TG378 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2007)07-0033-07

Abstract: In order to effectively solve the problem that how to optimize the technics of variable blank holder force (BHF) in the process of deep drawing complex automotive forward-soleplates in real manufacture, one simplified simulation model was built based on the Similitude-theory. Then numerical simulations were carried out to search out which one was the best from lots of typical variable BHF modes, with better uniformity in thickness distribution and without wrinkling and cracking phenomena. Finally, physics tests were done to validate above results. Both numerical simulation and physics simulation results show that under the control of U curve of variable BHF, not only the maximum thickness-reduction of workpiece is the lowest, but also the whole mean-squared error of thickness-reduction is the minimal.

Key words: forward-soleplate; deep drawing; variable BHF; similitude-theory; numerical simulation; physics simulation; mean-squared error

板料拉深成形过程中, 最容易控制和调节的成形参数即为压边力大小, 压边力的大小是影响板料成形质量的一个非常重要的因素。一般来说, 压边力过小, 则无法有效地控制材料的流动, 板料容易发生起皱现象; 压边力过大, 虽然可以避免起皱, 但相应拉破趋势会明显增加。同时, 模具和板料表面受损的可能性亦大大增大, 从而影响模具寿命和板料表面拉深成形质量。现阶段诸多研究结果表明^[1-3]: 拉深成形过程中, 板料在变形的不同阶段对压边力的需求是变化的。然而, 以往传统的压边力工艺研究仅仅定位于恒定加载模式, 对于现阶段许多复杂的不规则零件来说, 已经越来越无法满足实际生产需求。事实上, 大型复杂汽车覆盖件的实际生产调模过程也主要就是以压边力调节

为主的一系列工艺参数的调整过程。因此, 如何寻找板料拉深成形过程中的优化变压边力加载曲线已经成为当前板料成形工艺研究领域中的一个热点^[4-7]。

以相似理论和物理模拟为基础的相似物理模拟理论已经成为塑性成形研究领域一种非常重要的实验方法和研究手段。相似理论中有关现象相似的充分必要条件(相似第三定量)定义为: 对于同一类现象, 当将表征一个各别现象从这同一类现象中区别出来的具体条件和特征均相似, 如几何条件、物理条件、边界条件和起始条件等等, 且由这些条件中物理量所组成的相似准则在数值上相等时, 则两现象必定相似。物理模拟, 即是简单地指缩小或放大比例, 或简化外界条件或是代用材料, 用具体实验室小型实验模型来代替原有

实物原型的科学研究。对板料拉深成形工艺来说,物理模拟一般是指缩比试件尺寸,借助相应实验室小型实验设备再现大型板材在拉深成形过程中有关受力情况的物理过程。图 1 即为本工作研究的轿车前底板实物图和依据相似物理模拟理论所建立的实验简化模型图(1:8 比例缩小)。

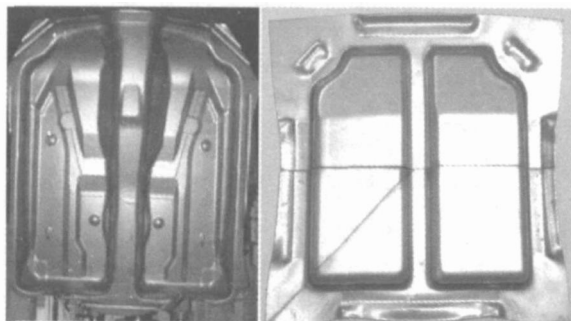


图 1 轿车前底板实物和简化物理模拟实验模型

Fig. 1 Entity and simplified test model of automobile forward soleplate

通过事先采取有限元数值模拟方法来预测得到轿车前底板拉深成形过程中的优化变压边力控制曲线,然后再结合物理模拟实验手段来进一步验证前述数值模拟中所得结果的可行性和准确性。最后研究结果表明:U 型变压边力加载模式是复杂汽车前底板拉深成形过程中的一条优化控制曲线,其状态下不仅成品件厚度最大变化率值最小,而且最终厚度变化率的整体均方差为最小。

1 数值模拟模型

近年来,随着计算机科学、有限元理论及计算机图形学等相关学科的飞速发展,有限元数值模拟技术在预测板料成形方面的应用日趋成熟,在成功解决了一系列理论问题实际化以后,有限元方法在预测诸如起皱、拉破、回弹等典型拉深成形缺陷时的精度方面得到了很大的提高,使之逐步成为了解决许多实际工程问题的重要分析手段之一,并在实际生产中发挥越来越大的作用^[8,9]。

板料拉深成形过程的计算机数值模拟实质上就是在计算机上进行虚拟板料拉深成形实验,通过输入各种给定虚拟外界条件和一些实际实验材料性能参数,分析板料在拉深成形过程中各种缺陷产生的位置及分布程度,以此来判断所选材料力学性能参数、工艺设计方案以及模具参数选择的合理性,同时通过可详细分析拉深成形过程中的每一小步过程,从而准确地判断出缺陷产生的本质原因以及找出相对应的解决策略。总的来说,采用计算机数值模拟技术可将过去需进行

大量实际实验后才能得到的客观规律在计算机上虚拟地实现,同时还可将一些难以在实际当中进行的物理实验内容通过计算机数值方便、快捷地虚拟出来。这样不仅能使经济成本大大降低,有效提高工作效率,而且可方便地分析各种假设情况下的状况,进而帮助工艺师快速、准确地分析出拉深工艺的最优工艺参数组合。图 2 即为本研究所建立的简化前底板有限元数值模拟对称半边模型。

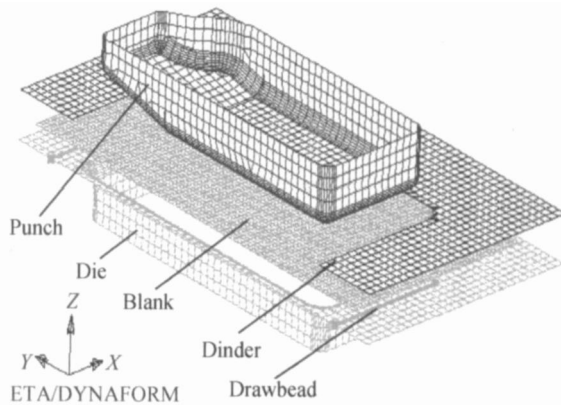


图 2 简化前底板有限元数值模拟对称半边模型

Fig. 2 Half of symmetrical simplified model in numerical simulation

1.1 变压边力加载模式

分析总结了近年来板料拉深成形过程中有关变压边力加载模式的研究成果,本次数值模拟选取了 16 种变压边力加载模式(如图 3 所示)进行研究,并通过分析最终试样厚度的最大减薄量及厚度变化率的整体均方差的方式来判断哪种加载模式最好。其中,图 3 中的 a, b 分别对应数值模拟中恒定压边力加载模式下此前底板拉深成形时对应的上、下限压边力值,也即 a 对应于临界拉破压边力值, b 对应于临界起皱压边力值。

1.2 数值模拟中参数设定

实验材料性能参数:热深冲镀锌钢板(牌号 ST07Zn),板料初始厚度 0.8mm,板料初始尺寸 245mm × 122.5mm;屈服强度 $\sigma_s = 150.04\text{MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b = 279.11\text{MPa}$,硬化指数 $n = 0.23$,板厚各向异性系数 $r = 2.06$,平均延伸率 $e = 23.73\%$,断裂延伸率 $e = 46.51\%$ 。

拉深工况参数:冲压速度 4000mm/s,拉深高度 15mm,润滑条件 PK 油(静态摩擦系数 $\mu = 0.25$)。

模具参数:凸、凹模单边间隙 $1.2 \times$ 初始板厚 (0.8mm),凹模圆角半径 5mm,凸模圆角 5mm。

1.3 数值模拟结果分析

数值模拟研究结果表明:恒定压边力加载模式下的临界拉裂压边力值 a 为 $4.3t$ (半边模型),临界起皱

压边力值 b 为 $2.9t$ (半边模型)。其中, 临界起皱压边力值是根据板料最大增厚率达到或超过了板料初始厚度的 7% , 即认为起皱了。因为在板料数值模拟软件 DYNAFORM 中有关起皱的判断条件太敏感, 导致数

值模拟时无论给定多大的压边力值, 其法兰部分的最外缘总是会出现起皱的趋势。由此, 可得到图 3 中第一种恒定模式下的压边力值 $(a+b)/2 = (4.3T + 2.9T)/2 = 3.6T = 36kN$ 。

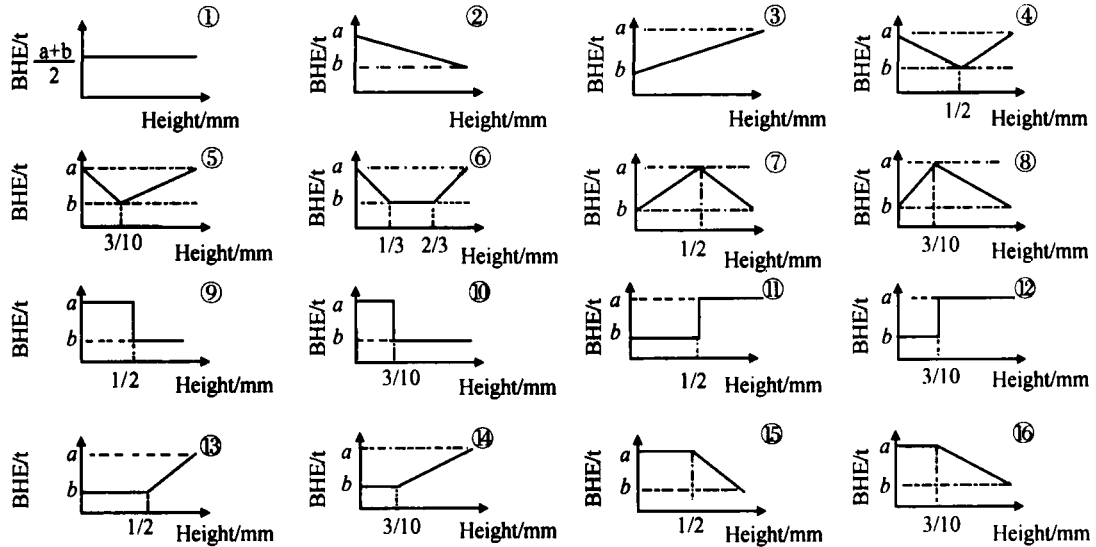


图 3 16 种变压边力加载模式图

Fig. 3 Sixteen kinds of variable BHF loaded modes

为了更好地突出优化变压边力曲线的效果, 经过前期大量的数值模拟结果比较后(直观起皱和拉裂观察、增厚及减薄最大点位置判断), 最终有选择性地选取了三条变压边力控制曲线模式(先下降后上升 U 型、先恒定后下降折线型和常规恒定型), 并对其状态下的特征测量点的厚度(一条效果最好, 一条最差, 一条居中)进行比较。

为了精确测量最终试样厚度的变化率, 在数值模拟采取沿最终成品件的两个方向切开的方法, 具体方向如图 4 所示。

通过计算图 5 中三条控制曲线模式下有关横向和斜向 45° 度角方向上的所有测量数据点的整体均方差(见表 7)的方法作为评判准则, 最后结果表明: ⑥号先下降后上升 U 型加载模式为最好, 其厚度变化率整体均方差最小; 而 ⑮号先恒定后下降型是最差的, 均方差值最大; 常规的恒定模式 ①居中。

2 物理模拟实验

物理实验设备为一台型号 HH P28-120 的单动薄板拉深液压机(图 6a)。通过前期对压机原有结构中的下顶料缸进行计算机控制改造, 在其液压油路系统中加入高精度比例溢流阀控制器、调速阀控制器以及外部搭建起由各种传感器(油压传感器、位移传感器、拉深力传感器(图 6a 中压机工作台上)、压边力传感

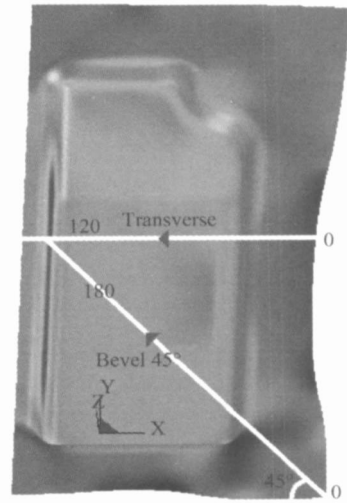


图 4 数值模拟中厚度测量切割方向

Fig. 4 Incision directions of thickness measurement in numerical simulation

器(图 6b)、组合式摩擦系数探针传感器(图 6c)所组成的采集系统部分, 并开发出相应配套的控制和数据采集软件系统, 从而实现下顶料缸作为压边力加载动力时实时控制变压边力的目的。

在实际物理实验当中, 同数值模拟方法一样, 首先采取试错法找到变压边力研究的上、下压边力极限值, 即恒定压边力加载模式下的临界起皱点值($a' = 6T$)和临界拉裂点值($b' = 4T$), 其大小与数值模拟结果中找到的上、下限点($8.6T$ 和 $5.8T$)存在一定的差值(如

图 7 所示, 其中图中虚线为实验设定曲线, 实线为实验

实际控制曲线)。

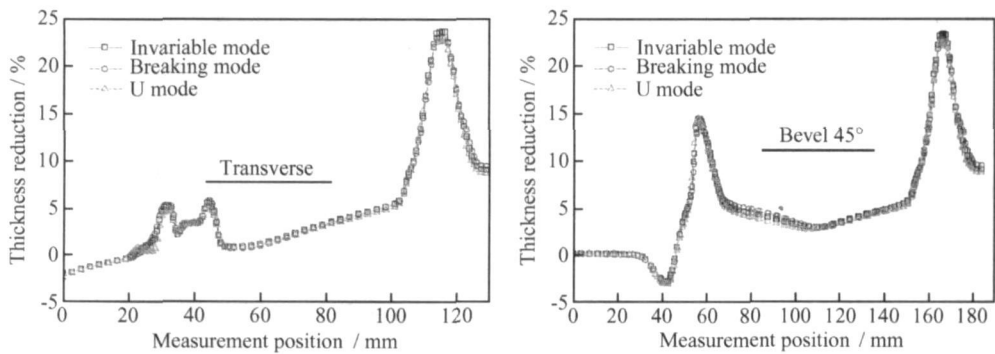


图 5 数值模拟中成品件横向与斜向 45 度角方向上的厚度变化率

Fig. 5 Thickness reduction of transverse and bevel 45° directions in numerical simulation

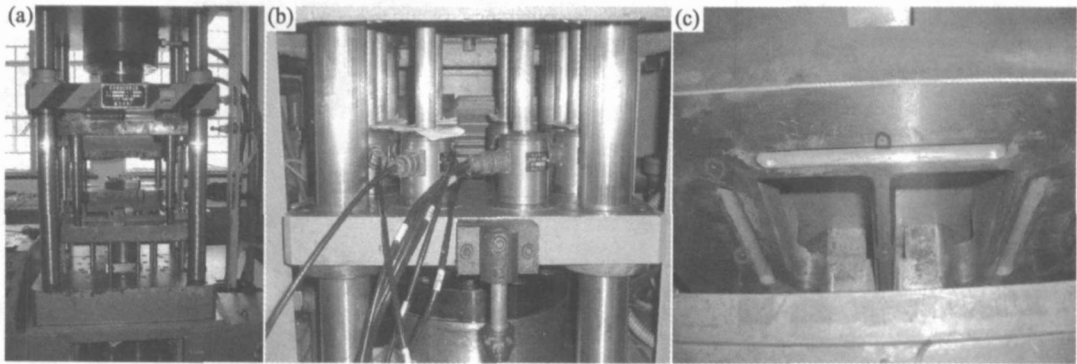


图 6 物理实验设备及部分传感器

Fig. 6 Test equipment and parts of sensors

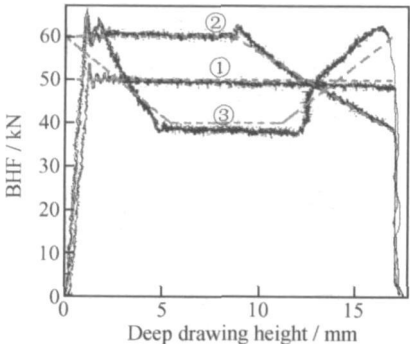


图 7 三种实验变压边力控制曲线

位置的五次测量平均值, 第四行为基于上述三行平均值后的总平均值。

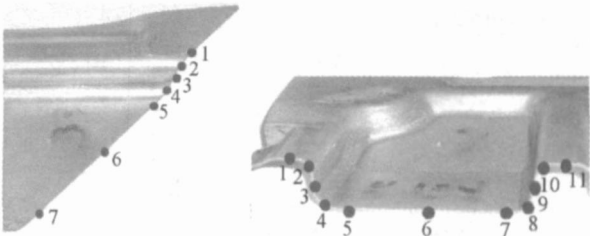


图 8 横向直边和斜向 45 度角厚度测量点位置

Fig. 8 Measurement points of transverse and bevel 45° direction

实验初始板坯尺寸为 245mm×245mm, 平均初始厚度为 0.834mm, 选取数值模拟中所得到的三种变压边力加载模式, 在控制程序中修改其上、下限, 每种模式分别重复 10 次实验, 并最后在每一种模式下随机抽取出三个样品, 分别沿两个方向切开 (图 1 右所示)。通过在样品上的每个特征测量点上 (如图 8 所示) 重复测量五次后取平均值 (其中圆角拐弯处采取如图 9 所示的夹滚珠测量方法), 得到 6 张厚度测量点表格 (表 1-表 6)。其中, 每张表格第一行到第三行为每个测量点

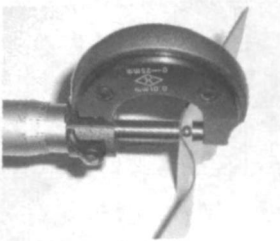


图 9 圆角拐弯处测量手段

Fig. 9 Measurement means of round corner location

表 1 5t 恒定压边力加载模式下横向各测量点位置厚度表(单位: mm)

Table 1 Thickness distribution of transverse direction under invariable mode of BH F (mm)

Transverse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No. 23	0.824	0.795	0.775	0.804	0.82	0.81	0.79	0.669	0.795	0.756	0.81
No. 24	0.83	0.76	0.778	0.79	0.82	0.81	0.79	0.655	0.786	0.75	0.80
No. 25	0.833	0.773	0.768	0.8	0.821	0.805	0.794	0.655	0.787	0.758	0.805
Average	0.829	0.776	0.774	0.798	0.820	0.808	0.791	0.660	0.789	0.755	0.805
Reducing	0.005	0.058	0.060	0.036	0.014	0.026	0.043	0.174	0.045	0.079	0.029

表 2 5t 恒定压边力加载模式下斜向 45°角各测量点位置厚度表(单位: mm)

Table 2 Thickness distribution of bevel 45° direction under invariable mode of BH F (mm)

Bevel 45°	1	2	3	4	5	6	7
No. 23	0.865	0.822	0.76	0.752	0.81	0.8	0.796
No. 24	0.868	0.828	0.77	0.758	0.81	0.804	0.798
No. 25	0.863	0.826	0.77	0.747	0.819	0.801	0.80
Average	0.865	0.825	0.767	0.752	0.813	0.802	0.798
Reducing	- 0.031	0.009	0.067	0.082	0.021	0.032	0.036

表 3 先恒定后下降加载模式下横向各测量点位置厚度表(单位: mm)

Table 3 Thickness distribution of transverse direction under breaking mode of BH F (mm)

Transverse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No. 2	0.844	0.781	0.775	0.773	0.829	0.815	0.803	0.647	0.759	0.753	0.803
No. 3	0.841	0.798	0.759	0.758	0.83	0.791	0.792	0.645	0.752	0.751	0.801
No. 4	0.84	0.785	0.78	0.79	0.828	0.8	0.795	0.65	0.755	0.756	0.79
Average	0.842	0.788	0.771	0.774	0.829	0.802	0.797	0.647	0.755	0.753	0.798
Reducing	- 0.008	0.046	0.063	0.06	0.005	0.032	0.037	0.187	0.079	0.081	0.036

表 4 先恒定后下降加载模式下斜向 45°角各测量点位置厚度表(单位: mm)

Table 4 Thickness distribution of bevel 45° direction under breaking mode of BH F (mm)

Bevel 45°	1	2	3	4	5	6	7
No. 2	0.849	0.844	0.768	0.738	0.805	0.81	0.803
No. 3	0.851	0.837	0.761	0.752	0.801	0.809	0.798
No. 4	0.845	0.84	0.755	0.75	0.8	0.815	0.805
Average	0.848	0.840	0.761	0.747	0.805	0.811	0.802
Reducing	- 0.014	- 0.006	0.073	0.087	0.029	0.023	0.032

表 5 先下降后上升加载模式下横向各测量点位置厚度表(单位: mm)

Table 5 Thickness distribution of transverse direction under U mode of BH F (mm)

Transverse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
No. 7	0.829	0.75	0.785	0.812	0.841	0.809	0.793	0.69	0.798	0.761	0.802
No. 8	0.822	0.801	0.779	0.791	0.831	0.801	0.798	0.699	0.812	0.752	0.798
No. 9	0.821	0.784	0.782	0.788	0.848	0.80	0.801	0.70	0.799	0.751	0.801
Average	0.824	0.778	0.782	0.797	0.840	0.803	0.797	0.696	0.803	0.755	0.800
Reducing	0.01	0.056	0.052	0.037	- 0.006	0.031	0.037	0.138	0.031	0.079	0.034

表 6 先下降后上升加载模式下横向各测量点位置厚度表(单位: mm)
Table 6 Thickness distribution of bevel 45° direction under U mode of BH F (mm)

Bevel 45°	1	2	3	4	5	6	7
N o. 7	0. 845	0. 828	0. 761	0. 751	0. 799	0. 802	0. 799
N o. 8	0. 841	0. 822	0. 762	0. 742	0. 8	0. 802	0. 791
N o. 9	0. 848	0. 821	0. 762	0. 737	0. 803	0. 805	0. 794
Average	0. 845	0. 824	0. 762	0. 743	0. 801	0. 803	0. 795
Reducing	- 0. 011	0. 01	0. 072	0. 091	0. 033	0. 031	0. 039

3 两种模拟整体均方差结果比较与分析

根据减薄率均方差公式 $J = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^K (\frac{A_n}{A'})^2}{K}} +$

$\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^L (\frac{B_n}{A'})^2}{L}}$, 其中: 式中 A' 为板料初始平均厚度(数值模拟中为 0. 8mm, 物理模拟实验中为 0. 834mm); A_n 为横向第 n 个测量点位置的厚度减薄量, B_n 为斜向 45 度角方向上第 n 个测量点位置的厚度减薄量。

表 7 两种研究方法横向、斜向、整体均方差结果比较

Table 7 Comparison of two methods on transverse, bevel 45° and whole mean-squared errors

Method	Numerical simulation(transverse bevel 45° whole)			Test(transverse bevel 45° whole)		
loaded curves						
Invariable mode	0. 0911	0. 0962	0. 1873	0. 0811	0. 0555	0. 1366
Breaking mode	0. 0914	0. 0968	0. 1882	0. 0895	0. 0626	0. 1521
U mode	0. 0889	0. 0935	0. 1824	0. 0696	0. 0595	0. 1291

从表 7 中可以明显看出: 不论是数值模拟研究结果, 还是物理模拟研究结果, U 型变压边力加载模式都要更好一些。这是因为拉深初始阶段, 由于法兰外缘部分急剧收缩而导致起皱趋势占据明显主导地位, 此时压边力最好施加大一些, 随后随着拉深成形进一步的深入, 一方面由于作用于板料法兰突缘部分上的瞬时最大径向拉力总是位于凹模入口处, 因此总拉深力在板料突缘内缩开始阶段也将逐渐增大, 但达到一定程度极大值后又会逐渐降了下来, 究其原因在于法兰突缘面积随着拉深行程在不断的减小, 而与此同时材料硬化效果在不断的增加。另一方面, 由于法兰外缘半径在不断缩小, 起皱的趋势也在显著下降, 因此, 在拉深中期阶段(拉深高度约等于凸模圆角半径+凹模圆角半径)拉裂趋势占主导地位, 此时所施加的压边力应尽可能小些, 应当正好与总拉深力变化趋势相反。也就是说, 当拉深力达到最大时, 压边力最小达到临界最小值, 以此来避开拉深力最大时刻, 从而避免拉深件出现拉裂现象。而随后又由于中间一段时刻压边力较小而引起的起皱趋势有明显增强, 占据了主导地位, 故最后压边力最好又增加上去, 以此来平整板平面效果。这也正好解释了为何先下降再上升的变压边力控制模

式要比常规恒定加载模式要好^[10]。

4 结论

- (1) 变压边力的理论模型还不够精确, 归其原因在于影响变压边力控制效果的因素过多, 难以准确确定各参数的影响程度及其相互之间的关联。
- (2) 已有的许多研究结果表明: 得出的最优变压边力控制曲线在形式上存在较大的差异, 有些结论甚至是相互矛盾的。虽说可以肯定不同的变压边力加载模式对产品的成形性能有一定的影响, 但究竟何种模式最好、更具现实意义还尚无定论。
- (3) 复杂不规则零件由于各个部位所需的压边力在拉深过程的同一时刻也是不尽相同, 因此采取分段变压边力是有效解决这个问题的手段。但由于目前诸多拉深设备是基于整体压边设计的。因此, 如何经济而又有效地改造现有的传统恒定压边力装置来实现分段变压边力的精确控制已成为目前一个亟待解决的问题。

参考文献

[1] LEONID B S, RONALD A P, MUSTAFA A A, et al. Blank

holder force control in viscous pressure forming of sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 7–16.

[2] 孙成智, 陈关龙, 李淑惠, 等. 变压边力对矩形件成形性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2003, 10(4): 6–9.

[3] LARS G, ERIK S. Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 114: 168–173.

[4] LARS G, NADER A, ERIK S. In-process control of blank holder force in axis-symmetric deep drawing with degressive gas springs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 73: 89–96.

[5] 谢晖, 钟志华. 基于 CAE 和神经网络的压边力优化 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 105–109.

[6] SHENG Z Q, JIRATHEARANAT S, ALTAN T. Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 487–494.

[7] 王东哲, 姜臻亮, 张永清, 等. 板材变压边力拉深成形方盒件数值模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1543–1546.

[8] LEI L P, HWANG S M, KANG B S. Finite element analysis and design in stainless steel sheet forming and its experimental comparison [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110: 70–77.

[9] LU C P, PONTHOT J P. Finite element simulation of springback in sheet metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125–126: 785–791.

[10] 常荣福. 冲压成形中的摩擦分析 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.

收稿日期: 2006-03-28; 修订日期: 2006-12-25

作者简介: 朱伟(1976–), 男, 博士研究生, 研究方向: 板料成形工艺优化及其智能自动化控制, 联系地址: 上海市华山路 1954 号上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心(200030)。

2007 中国国际纳米科学技术会议在京开幕

继“2005 中国国际纳米科学技术会议(ChinaNANO 2005)”在京成功举办之后, 由国家纳米科技指导协调委员会主办、国家纳米科学中心承办的“2007 中国国际纳米科学技术会议(ChinaNANO 2007)”于 2007 年 6 月 4 日在北京召开, 会议为期三天。中国科学院常务副院长、国家纳米科学中心主任白春礼院士担任大会主席。本次大会得到科技部、教育部、中国科学院、国家自然科学基金委、中国科协等单位的支持。

本次大会旨在促进国际纳米科技前沿问题的研讨与交流, 进一步提高我国纳米科技的整体研究水平和自主创新能力。会议围绕纳米材料与结构、自组装与表面生长、纳米光学与纳米光子学、纳米电子学与纳电子机械系统、纳米生物与医学、计算与模拟和纳米计量等七个领域, 分为九个分会展开广泛而深入的学术交流。会议共收到论文摘要 1300 多篇, 参会学者共计 1000 余人, 其中海外学者 400 余人、中国大陆学者 500 余人。

会议邀请德国 Muenster 大学的 Harald Fuchs 教授、美国加州大学 Irvine 分校的 Wilson Ho 教授、日本 Kyoto 大学的 Susumu Noda 教授、英国剑桥大学的 Mark Welland 教授和中国清华大学的李亚栋教授等五位国际纳米科技界活跃的专家作大会特邀报告。

全国人大副委员长、中国科学院院长路甬祥院士专门为大会的召开发来贺信。他在贺信中对我国纳米科技发展给予充分肯定。他指出, 我国是世界上最先开始纳米科技研究的国家之一, 研究工作所取得的成就已为国际学术界所认同。路甬祥院士进一步强调纳米科技发展要与产业结合, 中国的纳米科技不仅仅在学术研究领域产生了深远的影响, 其发展已经开始进入工业产品的新阶段中。

全国人大副委员长、中国科协主席韩启德院士, 科技部副部长程津培院士, 国家自然科学基金委员会副主任王杰等中国科技界领导同志莅临了大会开幕式并致辞。韩启德院士在开幕式的讲话中强调, 纳米技术作为当今世界优先发展的科技领域之一, 其创新活动正逐渐对经济社会产生深远影响。中国的纳米科技方兴未艾, 并在促进学科交叉与融合、促进国际交流与合作和人才培养等诸多方面, 扮演着越来越重要的角色。他希望本次会议能够促进纳米科技前沿领域的交流, 并使纳米科技更好的服务于社会公众。

“中国国际纳米科学技术会议”的召开不仅将扩大我国在国际纳米科技界的影响和地位, 促进国际纳米科技界的学术交流, 而且将有力地推动我国纳米科技事业的持续、健康和快速发展。