

拉深工艺减薄率数值模拟及响应面分析

成波¹, 胡学敏²

1. 美特富精密拉深技术(无锡)有限公司 江苏无锡 214000

2. 盐城工学院汽车工程学院 江苏盐城 224000

摘要: 拉深工艺的壁厚减薄率受拉深凸凹模间隙、凹模圆弧角及凹模的定径长度等因素影响, 运用响应曲面法设置三因素三水平的试验。确定试验方案后利用Autoform软件对这些不同拉深工艺参数进行数值模拟, 从而得到不同参数作用下的壁厚减薄率结果。再运用响应曲面法对数值模拟的结果进行统计分析, 得到二次多项式拟合模型和最佳工艺参数, 最终投入实际生产。

关键词: 拉深; 减薄率; Autoform; 响应曲面法

1 序言

冲压拉深往往伴随着壁厚的减薄, 不仅影响工件成形质量, 也会影响生产工艺的稳定性。目前很多企业的工程技术人员以及院校专家学者们对冲压减薄率的影响因素做了大量的研究。首先, 成形材料涉及较广, 有铝合金、钛合金和钢等; 工艺上分别从冲压速度、摩擦系数、冲压间隙、压边力和成形温度等因素去分析冲压壁厚减薄率。同时, 除了传统的CAD软件之外, Autoform、Dynaform、Deform等CAE软件也被广泛用于数值模拟冲压成形。正交试验法、响应曲面法、BP神经网络加遗传算法和灰色关联分析法等多因素分析法也被应用于实际生产, 使得结果更加优化且符合生产实际。

结合以上分析, 本文先对拉深模具进行设计, 然后利用Autoform软件对某汽车气体发生器外壳体的第一道拉深成形进行数值模拟分析。结合发生器壳体壁厚以及拉深工艺的特殊性, 使用响应曲面法来设计实验, 分析拉深间隙、拉深凹模的圆弧角以及凹模的定径带长度这三个因素对拉深壁厚减薄率的影响, 从而优化工艺参数。此外, 利用实际拉深模具生产来验证工艺参数的有效性, 模拟分析优化以及响应曲面分析对于拉深零件的生产实践具有一定参考价值。

2 拉深工艺数值模拟

2.1 模型及材料

以某汽车安全气囊的气体发生器的外壳体拉深零件为例, 材料为S420MC结构钢, 屈服强度420MPa, 抗拉强度500MPa左右, 壁厚要求 $\geq 2.3\text{mm}$ 。实际生产工艺涉及拉深、剪切和冲孔等步骤, 取其中拉深工艺进行仿真模拟, 分析不同工艺参数对壁厚减薄率的影响, 拉深零件如图1所示。

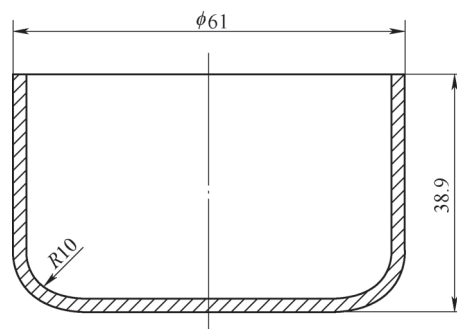


图1 拉深零件

2.2 基于Autoform的数值模拟分析

实际冲压拉深设计时, 会使用经验数值来设计工艺参数, 拟设定凸凹模间隙为2.5mm, 凹模圆弧角半径为8mm, 定径带长度为3mm。使用Solid Edge对凸凹模建模, 转换后导入至Autoform中, 拉深模型如图2所示。

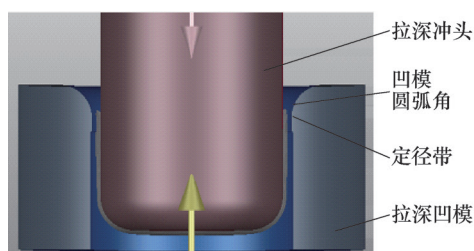


图2 拉深模型

在Autoform软件中设置好模型拉深方向，选择材料S420MC，设置原材料厚度2.5mm，定义工艺流程为无凸缘拉深，料坯尺寸 $\phi 106\text{mm}$ ，定义好模具模型拉深的深度，在此选项中可以调整拉深的间隙。参数设置完成后进行数值模拟，从而得到分析结果，Autoform软件分析结果中默认有壁厚分析，可以通过软件全局标注来得到壁厚最薄处的减薄率，该设定参数下的壁厚减薄率为9.2%，如图3所示。

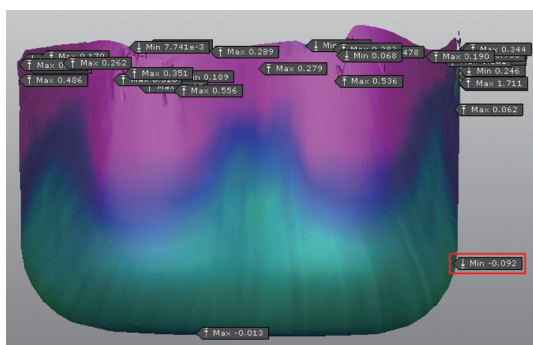


图3 数值模拟结果

结合Autoform数值模拟分析的结果，零件壁厚在拉深之后出现减薄。而作为气体发生器的壳体，减薄较大处可能出现开裂，这是安全气囊这类安全件需要严格检验且不被允许的。数值模拟的优越性就在于能找到零件上减薄率最大的地方，然后加以分析。

3 响应曲面法分析拉深工艺的优化

3.1 响应曲面模型设计

利用响应曲面法分析不同因素、不同参数水平对零件壁厚减薄的影响，结合生产实际选择拉深间隙 A 、拉深凹模圆弧角半径 B 和定径带长度 C ，并分别设定三水平。Design Expert是目前运用最广泛的响应曲面分析软件，利用该软件进行试验设计，方案见表1。方案确定后，利用Autoform对试验方案中的不同参数水平逐个进行上述的数值模拟，从而得到各因素水平的减薄率，记录到表1中，并利用

Design Expert对试验结果进行统计分析。

表1 拉深模拟试验方案及结果

试验序号	拉深间隙 A/mm	凹模圆弧角 半径 B/mm	定径带长度 C/mm	壁厚减薄率 R (%)
1	2.5	10	4	7.8
2	2.5	10	4	7.8
3	2.5	8	5	9.2
4	2.6	10	5	7.8
5	2.6	10	3	7.8
6	2.6	8	4	9
7	2.5	10	4	7.8
8	2.6	12	4	8.4
9	2.5	12	3	8.1
10	2.5	12	5	8.1
11	2.4	10	5	9.7
12	2.4	12	4	8.2
13	2.5	10	4	7.8
14	2.5	8	3	9.2
15	2.4	8	4	10.5
16	2.5	10	4	7.8
17	2.4	10	3	9

3.2 响应曲面模型的结果分析

根据表1的试验结果建立壁厚最大减薄率 R 与拉深工艺参数之间的二次多项式： $R = 7.8 - 0.55A - 0.6375B + 0.0875C + 0.425AB - 0.175AC - 1.57 \times 10^{-17}BC + 0.575A^2 + 0.65B^2 + 0.2C^2$ 。

通过分析，可以得到响应曲面模型的方差（见表2）。 F 值和 P 值是方差分析中针对模型和模型系数进行显著性检验得到的结果， F 值的大小反映交互影响的程度， P 值则反映显著程度（通常 $P < 0.01$ 表示极显著， $P < 0.05$ 表示显著）。该回归模型的 P 值是 $0.0008 < 0.05$ ，表示该模型显著，同时还可以发现 A 、 B 、 AB 、 A^2 、 B^2 的 P 值均 < 0.05 ，根据 F 值可以得出影响减薄率 R 的因素由强到弱分别是拉深凹模圆弧角半径 B 、拉深间隙 A 以及定径带长度 C 。

根据模拟分析结果以及响应曲面法得出二次多项式的回归模型，进一步分析得到减薄率和拉深间隙以及拉深凹模圆弧角之间交互影响的响应曲面，如图4所示。由图4可以看出，当拉深间隙取较大值，凹模圆弧角也取较大值时可以获得较小的减薄率。分析拉深的成形过程，拉深过程中，材料在受力作用下，沿着凹模的圆弧角流入拉深凹模内，同时被定径带熨平。而凹模的圆弧角如果比较大，材料流动比较顺畅，就会影响成形零件的壁厚。同

表2 减薄率二次多项式模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	平均方差	F值	P值	显著性
模型	10.2	9	1.14	15.08	0.0008	显著
A	2.42	1	2.42	32.11	0.0008	—
B	3.25	1	3.25	43.14	0.0003	—
C	0.06	1	0.061	0.813	0.3973	—
AB	0.72	1	0.723	9.59	0.0174	—
AC	0.12	1	0.123	1.63	0.243	—
BC	0	1	0	0	1	—
A ²	1.39	1	1.39	18.47	0.0036	—
B ²	1.78	1	1.78	23.61	0.0018	—
C ²	0.17	1	0.168	2.23	0.1786	—
残差	0.53	7	0.075	—	—	—
失拟度	0.53	3	0.176	—	—	—
纯误差	0	4	0	—	—	—
总和	10.8	16	—	—	—	—

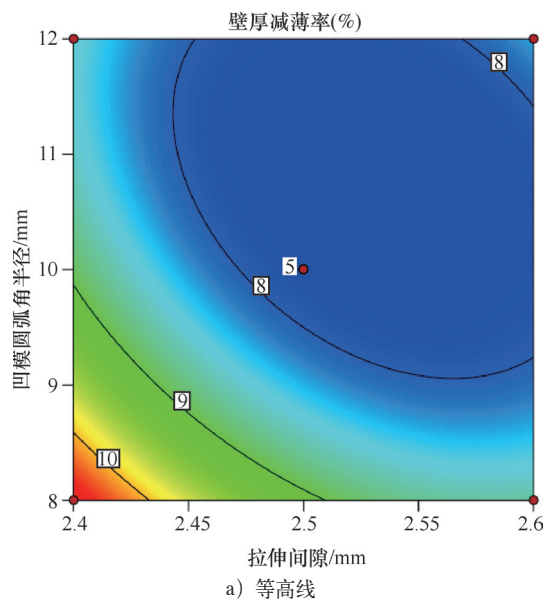
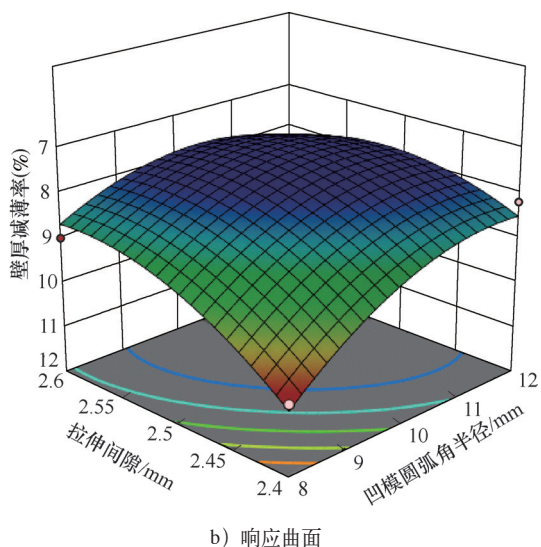


图4 拉伸间隙和凹模圆弧半径对减薄率交互式影响

样，拉深过程中，冲头凹模的间隙大，材料流动过程中被挤压熨平的较少，也会减少材料的减薄。而定径带主要是影响拉深凹模的使用寿命，定径带越长，使用寿命也就越长。由分析结果可以看出，定径带的长短对材料的熨平效果影响不大。

3.3 工艺参数优化

通过以上分析，对拉深成形过程中影响壁厚减薄的因素有了较为清楚的认知。响应曲面法可以给出优化后的拉深参数——拉深凹模圆弧角半径为10.94mm，冲头凹模间隙为2.56mm，定径带长度为3.34mm，得出的拉深件壁厚减薄率的响应值为7.75%。借助于Autoform软件对该工艺参数进行模拟验证，得到的模拟结果如图5所示。拉深件壁厚最薄处在零件底部直线与圆弧的交界处，减薄率为7.8%，与响应曲面法得到的响应值吻合。

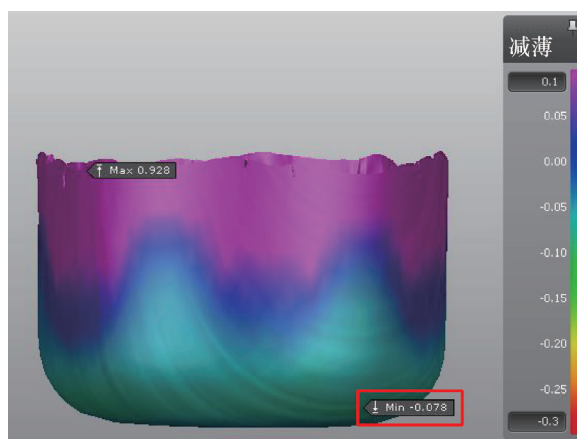


图5 优化后的数值模拟结果

4 实际生产应用效果

拉深速度、摩擦系数以及成形温度也会对零件壁厚产生一定的影响，但在此次研究中没有考虑，主要是因为实际生产项目中往往涉及到量产件的爬坡，冲压速度也会随着量产越来越快，同时会采用一定浓度的乳化液进行降温，冲头和凹模也会做相应的涂层来降低摩擦系数，以提高其寿命，所以对此研究的意义不大。在以上参数固定不做调整的情况下，使用分析后获得的最佳工艺参数进行实际生产，拉深零件如图6所示，取点多次测量壁厚，壁厚最薄处为2.320mm，减薄率为7.2%。使用响应曲面法分析冲压拉深的模拟结果能够指导实际生产，获得最优参数。

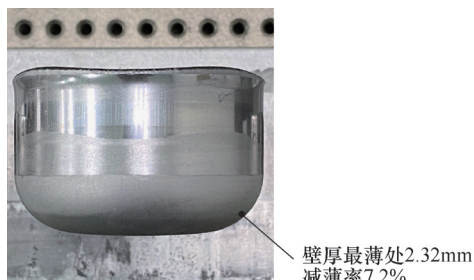


图6 实际生产的零件及减薄率

5 结束语

利用Autoform软件以及响应曲面法对拉深工艺参数进行优化,并建立拉深件壁厚减薄率与工艺参数的二次多项式拟合模型。根据响应曲面法分析可知:拉深间隙和凹模、圆弧角半径以及两者的交互对拉深壁厚减薄率影响较大,而定径带长度对其影响较小。最终优化后的凹模圆弧角半径为10.94mm,拉深间隙为2.56mm,定径带长度为3.34mm,壁厚减薄率为7.8%。该最佳参数投入到实际生产中,得到拉深零件的壁厚减薄率为7.2%,在合理范围内。

对于筒形金属拉深件,通过Autoform软件模拟仿真及响应曲面分析,能够获得最佳的工艺参数,从而得到最佳的材料壁厚减薄率,运用到实际拉深生产中,可以避免反复生产试验。

参考文献:

- [1] 高铁军,王旭,刘少青,等. TA2钛合金圆筒件超声振动辅助拉深工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (1): 8-12.
- [2] 冯翠云. 铝箱盒形件成形数值模拟及模具设计[J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 34-39.
- [3] 徐丁旺. 高强钢汽车结构件冲压成形及回弹控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [4] 李辉,杨锋,梁忠强. 多道次变薄拉深尺寸精度研究与优化[J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 41-47.
- [5] 施为钟,龚红英,姜天亮,等. 基于Dynaform和响应面法的带凸缘圆筒件拉深工艺优化[J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34 (2): 168-173.
- [6] 金磊,王宝川,韩龙帅,等. 基于Auto Form的材料仿真数据影响因素研究[J]. 锻压技术, 2019, 44 (9): 180-186.
- [7] 仇建桐,邓沛然,邵威,等. 基于Dynaform的铝合

金筒形件拉深成形[J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 49-55.

- [8] 王金刚,赵文凯,刘旭洋,等. 基于Deform的椭圆形封头热冲压成形有限元分析及优化[J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 40-46.
- [9] 陈一鑫,刘倩,张天周,等. 冲裁断面质量优化研究进展[J]. 模具工业, 2020, 46 (2): 27-32.
- [10] 熊文韬,陈楷翼,刘剑,等. 基于灰色关联度分析与响应曲面法的汽车驾驶室底板拉深成形优化[J]. 模具工业, 2020, 46 (4): 12-15.
- [11] 李兵,姜海林,刘奎武,等. 基于BP人工神经网络的油箱端盖拉深成形仿真预测[J]. 锻压技术, 2017, 4 (11): 177-180.

MW 20210213

专家点评



拉深工艺的壁厚减薄率受很多因素影响,文章通过Autoform软件对拉深工艺进行数值模拟,能够得到不同因素作用下的拉深减薄率,并通过响应曲面法分析拉深间隙、拉深凹模圆弧角和拉深的定径长度等对拉深减薄率的影响,最终得到二次多项式拟合模型和减薄率优化结果,通过拉深模具实际拉深来验证拉深工艺参数的有效性。

使用软件模拟和实际生产相结合是文章的亮点,科学合理,理论结合实际,解决了模具生产中常见的拉伸难题,有效地缩短了后期模具调试时间,降低后期调试的费用。模拟软件建立数据库和工艺流程的方法,对于后期相关模具制作做出了有益的探索,经济效益和社会效益显著,体现出作者精益生产的理念。