

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2022.02.010

基于正交试验的深筒形制件拉伸成形工艺参数优化

胡李勇¹, 王利^{1,2*}, 王雷³, 王锐³

(1.宣城职业技术学院机电与汽车学院,安徽宣城 242000;

2.皖江工学院汽车冲压模具先进设计马鞍山市工程技术研究中心,安徽马鞍山 243031;

3.潍坊职业学院汽车工程学院,山东潍坊 262737)

摘要:为控制深筒形制件的多步冲压成形质量,采用成形仿真工艺方案优化和正交试验设计的均值差分析工艺参数优化方法,研究了制件成形过程中拉伸摩擦系数 f_1 、反拉伸摩擦系数 f_2 、拉伸压边力 Q_1 和反拉伸压边力 Q_2 对减薄率 T_{\min} 和 T_{\max} 的影响。结果表明:增大拉伸圆角后,消除了材料因弯曲与反弯曲变形流入过慢导致的开裂现象;优化切边线后,减少了材料因各向异性导致的“凸耳”现象。采用正交试验设计的均值差分析工艺参数优化,获得影响 T_{\min} 和 T_{\max} 因素的主次关系为 $f_1 > Q_1 > f_2 > Q_2$,最优工艺参数组为 $f_1 = 0.200$, $f_2 = 0.100$, $Q_1 = 60$ kN 和 $Q_2 = 40$ kN,减薄率为 $T_{\min} = -0.1303$, $T_{\max} = 0.1404$,制件无开裂与起皱现象且成形质量得到进一步提升。得出结论:该方法对制件成形工艺的质化与量化调整具有一定的工程应用价值。

关键词:深筒形制件;多步冲压成形;正交试验;均值差

中图分类号:TG386.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)02-0050-05

Optimization of Drawing Process Parameters for Deep Cylindrical Parts Based on Orthogonal Test

HU Liyong¹, WANG Li^{1,2*}, WANG Lei³, WANG Rui³

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Xuancheng Vocational and Technical College, Xuancheng, Anhui 242000, China; 2.Ma'anshan Engineering Technology Research Center for Advanced Design of Automobile Stamping Dies, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243031, China; 3.School of Automotive Engineering, Weifang Vocational College, Weifang, Shandong 262737, China)

Abstract: In order to control the multi-step stamping quality of deep cylindrical parts, the effects of drawing friction coefficient f_1 , reverse drawing friction coefficient f_2 , drawing blank holder force Q_1 and reverse drawing blank holder force Q_2 on thinning rates T_{\min} and T_{\max} were studied by using the optimization of forming simulation process scheme and the optimization of process parameters by means of mean difference analysis of orthogonal experimental design. The results show that the cracking phenomenon caused by the slow inflow of bending and reverse bending deformation is eliminated after increasing the drawing fillet; after optimizing the trimming line, the "lug" phenomenon caused by anisotropy is reduced. Through the mean difference analysis of orthogonal experimental design and process parameter optimization, it is obtained that the primary and secondary relationship of the factors affecting T_{\min} and T_{\max} is $f_1 > Q_1 > f_2 > Q_2$, the optimal process parameter groups are $f_1 = 0.200$, $f_2 = 0.100$, $Q_1 = 60$ kN, $Q_2 = 40$ kN, and the thinning rate is $T_{\min} = -0.1303$ and $T_{\max} = 0.1404$. The parts have no cracking and wrinkling, and the forming quality has been further improved. It is concluded that this method has good engineering application value for the qualitative and quantitative adjustment of part forming process.

Keywords: deep cylindrical parts; multi-step stamping; orthogonal experiment; mean difference

收稿日期:2022-02-21

基金项目:安徽省高校自然科学研究项目(KJ2019A1140、KJ2020A0837);马鞍山市工程技术研究中心开放基金项目(QMSG202102、QMSG202103)。

作者简介:胡李勇(1981—),男,陕西澄城人,讲师/工程师,硕士,研究方向:汽车冲压模具先进设计。*通信作者:王利(1986—),女,山东济宁人,讲师,硕士,研究方向:汽车冲压模具先进设计。

0 引言

要获得合格的拉伸制件产品,必须考察零件的拉伸工艺性,其关键在于拉伸工艺的可能性和可靠性。其中,除了拉伸制件本身的形状无法改变外,拉伸工艺决定了冲压件的成形性、表面质量和尺寸精度^[1-2]。拉伸工艺设计难度大、技术含量高,是拉伸模具设计的核心和关键^[3]。因此拉伸工艺设计在整个拉伸模具设计中具有举足轻重的作用。

近年来,随着计算机技术的飞速发展,世界各主要工业国都在大力发展计算机技术在拉伸工艺设计中的应用。数值仿真技术结合数学试验的应用,对拉伸工艺设计起到越来越大的作用^[4-6]。因此,拉伸工艺及其设计软件应尽可能地脱离 CAD 环境,集成更多 CAD 功能到 CAE 环境中,如三维几何造型、有限元网格划分等^[7-9],直接在 CAE 环境下采用 CAD 系统的底层开发平台。基于零件信息的参数化特征建模和面向对象知识库的人工智能技术及专家系统等在拉伸工艺设计软件中的应用^[10-11],是实现拉伸工艺设计的一个切实可行的好方法,这种做法正被越来越多的国际著名 CAE 软件公司所采用^[12-14]。

鉴于此,本文以深筒形制件为研究对象,为实现其良好的拉伸工艺设计,通过 Catia 联合 AutoForm 软件,实现拉伸工艺方案的 CAD/CAE 技术。在获得良好的拉伸工艺方案的前提下,进一步应用正交试验设计的均值差分析优化拉伸关键工艺参数,探究制件成形过程中拉伸关键工艺参数对成形质量的影响程度,为制件拉伸成形工艺的质化与量化调整提供参考。

1 冲压工艺设计

图 1 为深筒形制件的三维数模,该制件采用的是厚度为 1 mm 的冷轧冲压用钢板 DC03,外形直径为 152 mm,拉伸深度为 35 mm。应用双动压力机时,在不调整制件位置的情况下,对初始料片进行拉伸、反拉伸和切边,即可获得成形制件。测量得到制件的拉伸圆角半径为 3 mm、反拉伸圆角半径为 1.5 mm,反拉伸台阶为 8 mm。由工程经验知,该制件的拉伸与反拉伸圆角半径较小,拉伸过程中材料突出的弯曲与反弯曲变形加上材料的各向异性现象,使材料难以均匀流入凹模而导致成形开裂问题。因此,先优化成形仿真工艺方案,再结合正交试验设计的均值差分析优化工艺参数,以获得期望的成形质量。

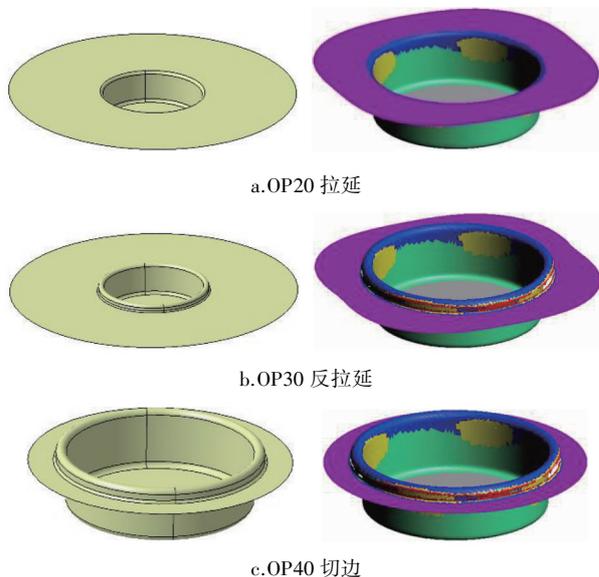


图 1 深筒形制件三维数模

2 有限元仿真及其结果分析

2.1 有限元仿真

逐步建立 Catia 数模如图 2a、2b、2c 左侧所示。网格划分参数缺省设置,依次导入图 2 左侧建立的 Catia 数模,完成工艺过程设置、料片设置和控制参数设置;然后完成全工序三维有限元建模,最后进行运动过程设置。对所建立的模型进行仿真求解,获得的仿真结果如图 2a、2b、2c 右侧所示。



注:OP 指工序,OP 后面数字代表工序号

图 2 初步工艺方案的成形数模与仿真结果

2.2 初步仿真分析与优化

图 2a 仿真结果显示,在 OP20 拉伸过程中,由于材料流过半径为 3 mm 的拉伸圆角时,材料流入量不足导致制件侧壁减薄,此时最小壁厚为 0.831 mm,同时由于材料的各向异性现象影响,致使成形件的沿口出现了“凸耳”现象;图 2b 仿真结果显示,板料在经过 OP20 拉伸后再进行 OP30 反拉伸,即板料由弯曲过渡到反弯曲,在拉应力作用下反拉伸台阶侧壁进一步减薄,最后材料的拉应力超出其临界值而发生开裂,红色区域即为开裂区域,此时最小壁厚为 0.524 mm,同时由于材料的各向异性现象继续影响,使成形件的沿口“凸耳”现象更为突出;最后经过 OP40 切边后获得的成形件不合格。

本文将拉延圆角半径增大至 10 mm,反拉延圆角半径增大至 3 mm,并以制件为优化对象反复迭代计算坯料形状的切边线优化的工艺方案,获取无成形性问题的制件仿真结果以供正交试验设计的均值差分析工艺参数优化,工艺方案优化前后仿真结果对比如图 3 所示。

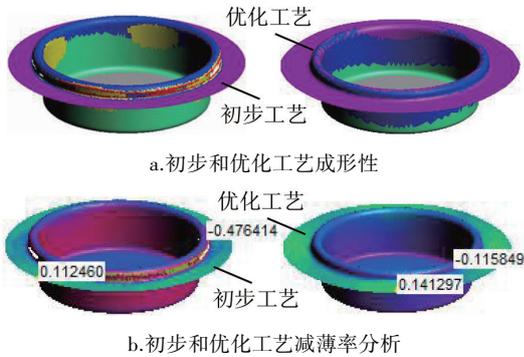


图 3 工艺方案优化前后仿真结果对比

3 正交试验设计

3.1 试验因子与水平

影响拉延与反拉延成形的工艺参数众多,本文主要研究影响深筒形制件成形质量的关键因素,以拉延摩擦系数 f_1 、反拉延摩擦系数 f_2 、拉延压边力 Q_1 和反拉延压边力 Q_2 (分别设为因子 A、因子 B、因子 C 和因子 D)4 个因子工艺参数组为研究对象,根据行业设计标准和设计经验,设计正交试验因子及水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因子及水平

水平	因子 A f_1	因子 B f_2	因子 C Q_1/kN	因子 D Q_2/kN
1	0.100	0.100	40	20
2	0.150	0.150	50	30
3	0.200	0.200	60	40

表 1 中,冷轧钢板 DC03 的拉延摩擦系数、反拉延摩擦系数通常合理的选择范围为 0.10~0.20^[13];拉延压边力的确定,通常是计算并结合 AutoForm 软件仿真后,视仿真情况,通过观察过程数据进行 2 次调整获取。此表确定拉延压边力为 50 kN,反拉延压边力为 30 kN,并向两端等差 10 kN 确定 3 水平。

3.2 正交试验方案

由于表 1 是建立在 2 次工艺方案仿真的基础之上,而且 2 次工艺方案仿真结果如图 3b 所示,显示制件上的最大减薄率 $T_{\max} = 0.1413$,最小减薄率 $T_{\min} = -0.1158$,达到了结构特征件 $\pm 20\%$ 的厚度减薄率控制要求^[15],因此在满足深筒形制件不发生开

裂和起皱的前提下,将成形制件上的 T_{\max} 或 T_{\min} 作为正交试验的评价指标^[16-18],并对其进一步优化。以 f_1 、 f_2 、 Q_1 和 Q_2 作为因子, T_{\max} 或 T_{\min} 作为优化目标,进行正交试验表 $L_9(3^4)$ 的设计,得到表 2 所列的 9 组不同的试验工艺参数,经过仿真获得了对应的 T_{\max} 和 T_{\min} 。

表 2 正交试验表 $L_9(3^4)$

样本	水平				减薄率	
	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	T_{\min}	T_{\max}
1	1	1	1	1	-0.111 1	0.154 0
2	1	2	2	2	-0.112 8	0.152 7
3	1	3	3	3	-0.111 9	0.151 5
4	2	1	2	3	-0.114 4	0.148 0
5	2	2	3	1	-0.118 4	0.148 0
6	2	3	1	2	-0.114 8	0.151 3
7	3	1	3	2	-0.130 3	0.140 7
8	3	2	1	3	-0.120 8	0.144 2
9	3	3	2	1	-0.127 6	0.144 7

3.3 正交试验结果分析

表 2 中通过 9 次正交试验方案获得的减薄率 T_{\min} 控制在 -0.111 1~-0.130 3 之间,减薄率 T_{\max} 控制在 0.140 7~0.154 0 之间。相较而言,在各因子的水平中,优化 T_{\max} 对提高制件的成形质量更好,故选择 T_{\max} 作为制件质量的评价指标,同时观察 T_{\min} 的变化值。表 2 中算出了 T_{\max} 的试验结果,可以看出 T_{\max} 样本优劣比较为: $T_{\max 1} > T_{\max 2} > T_{\max 3} > T_{\max 6} > T_{\max 4} = T_{\max 5} > T_{\max 9} > T_{\max 8} > T_{\max 7}$ 。

为比较各因子影响 T_{\max} 的主次关系,达到简便判别 4 因子 3 水平,计 4^3 次全面试验工艺参数组中的最优工艺参数组,应用极差分析法分析正交试验 T_{\max} 的值,获得的正交试验均值分析数据如表 3 所示。表 3 中各因子极差 $R_A > R_C > R_B > R_D$,即影响 T_{\max} 因素的主次关系是 $f_1 > Q_1 > f_2 > Q_2$ 。由表 3 中各因子的最小正交试验均值,确定表 1 中对应的最优水平值,即最优工艺参数组为: $f_1 = 0.200$ 、 $f_2 = 0.100$ 、 $Q_1 = 60 \text{ kN}$ 和 $Q_2 = 40 \text{ kN}$ 。

表 3 正交试验均值分析数据

水平	因子 A f_1	因子 B f_2	因子 C Q_1/kN	因子 D Q_2/kN	减薄率均值 \bar{T}_{\max}
1	0.152 7	0.147 6	0.149 8	0.148 9	
2	0.149 1	0.148 3	0.148 5	0.148 2	0.148 3
3	0.143 2	0.149 2	0.146 7	0.147 9	
极差 R	0.009 5	0.001 6	0.003 1	0.001 0	-

为直观表达各因子对减薄率 T_{\max} 的影响关系,应用表3正交试验均值分析数据绘制出各因子与减薄率 T_{\max} 的关系,如图4所示。图中各因子变化的最大高度差为表3中各因子的极差 R 。通过9次正交试验,并应用极差分析法判别出4³次全面试验中各因子的最优工艺参数组。

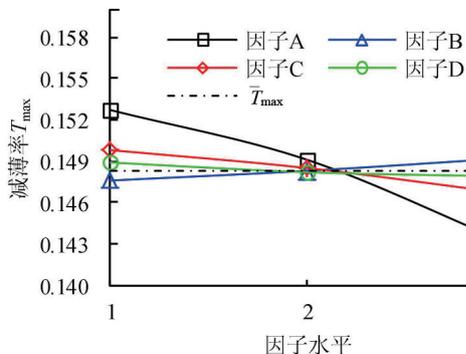


图4 各因子与减薄率 T_{\max} 的关系

4 数值模拟验证

通过正交试验设计的均值差分析工艺参数优化,用获得的全面试验工艺参数组中的最优工艺参数组仿真得到 $T_{\min} = -0.1303$ 、 $T_{\max} = 0.1404$ 。图5为优化后板料数值模拟结果。从图中可以看出,深筒形制件冲压成形质量良好,没有拉裂和起皱现象,进一步由 $T_{\min} = T_{\min 7}$ 且 $T_{\max} < T_{\max 7}$,说明本文所应用的方法起到了较好的优化效果。

5 结论

本文通过成形仿真工艺方案优化结合正交试验设计的均值差分析法获得了深筒形制件多步冲压成形预期成形质量。通过增大拉延与反拉延圆角和优化切边线分别消除了制件的开裂和“凸耳”

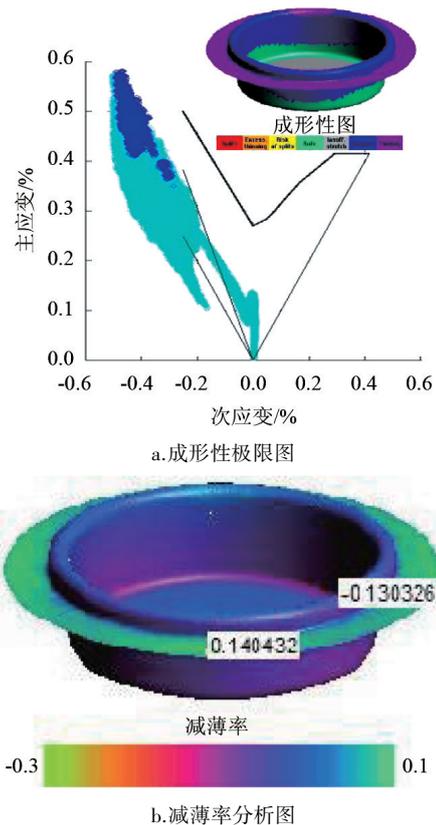


图5 优化后板料数值模拟结果

现象,获得了可靠的成形仿真工艺方案。通过正交试验设计的均值差分析法,以减薄率 T_{\max} 为正交试验的评价指标,采用正交试验设计的均值差分析法,获得了全面试验中的最优工艺参数组: $f_1 = 0.200$ 、 $f_2 = 0.100$ 、 $Q_1 = 60$ kN 和 $Q_2 = 40$ kN,应用该参数组仿真得到 $T_{\min} = -0.1303$ 、 $T_{\max} = 0.1404$ 。由 $T_{\min} = T_{\min 7}$ 且 $T_{\max} < T_{\max 7}$ 知:本文所应用的方法起到了较好的优化效果。该方法对制件成形工艺的质化与量化调整具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 林金海,孙层层.某汽车翼子板的拉延工艺分析[J].锻压技术,2021,46(7):96-99.
- [2] 黄昭明,赵恒文,刘小飞,等.筒形件多次拉延与反拉延成形仿真与优化[J].南京工程学院学报(自然科学版),2018,16(1):44-48.
- [3] 王利,黄昭明,胡李勇,等.半盒形特征件全工序多步冲压成形工艺优化[J].沈阳理工大学学报,2019,38(2):44-48+53.
- [4] 李陶胜,王利,王益平,等.车身内板件拉延成形仿真与工艺参数优化[J].沈阳理工大学学报,2021,40(2):84-89.
- [5] 吴群彪,曹阳,蔡李花,等.汽车前围板前部拉延成型模拟及组合参数优化[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(1):34-40.
- [6] 苏友煌,王军辉,冯怡爽,等.汽车内覆盖件无油冲压的数值模拟及工艺优化[J].塑性工程学报,2019,26(5):42-50.
- [7] 蒋磊,李十全,王龙,等.基于CAD模面的翼子板全工序成形模拟与优化[J].制造技术与机床,2021(4):115-121.
- [8] 赵夫超,刘畅,黄昭明,等.基于模面工程的轿车侧围拉延成形数值模拟[J].南京工程学院学报(自然科学版),2020,18(2):13-17.
- [9] 赵殿明,黄昭明,王利,等.发动机油底壳自动线多工位传递模设计与应用[J].锻压技术,2019,44(8):137-142.
- [10] 李孟祥.板料弯曲成形性能测试系统研发及试验[D].上海:上海工程技术大学,2020.

- [11] 刘其源.超高强度钢板热成形模具冷却系统设计及数值模拟研究[D].重庆:重庆理工大学,2014.
- [12] 涂小文.AutoForm 原理技巧与战例使用手册[M].湖北:湖北科学技术出版社,2013.
- [13] 龚红英.金属塑性成形 CAE 应用-DYNAFORM[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [14] 胡建军,李小平.DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程[M].北京:北京大学出版社,2020.
- [15] 闫盖,郑燕萍,张文彦,等.基于正交试验的板料冲压成形工艺参数优化[J].热加工工艺,2013,42(17):94-97.
- [16] 郝洪艳,倪飞,杨阳,等.基于正交试验的钢质气瓶封头拉深成形工艺参数优化研究[J].热加工工艺,2021,50(5):98-101+105.
- [17] 么大锁.汽车引擎盖外板拉延成形工艺参数优化研究[J].机电工程,2020,37(7):795-800.
- [18] 夏琴香,熊盛勇,潘兴毅,等.不锈钢/铝/不锈钢复合板拉深工艺及有限元数值模拟[J].精密成形工程,2016,8(2):37-42.

(上接第 7 页)

- [5] GUPTA B N,RATURI A S.Tetrazolium staining of seeds for interpretation of viability for six Indian tree species[J].Indian Forester,1975,101(11):659-673.
- [6] SAWMA J T,MOHLER C L.Evaluating seed viability by an unimbibed seed crush test in comparison with the tetrazolium test[J].Weed Technology,2002,16(4):781-786.
- [7] HARRADINE A R.Seed longevity and seedling establishment of bromus diandrus roth[J].Weed Research,1986,26(3):173-180.
- [8] LEGUIZAMON E S.Seed survival and patterns of seedling emergence in Sorghum halepense(L.) pers[J].Weed Research,1986,26(6):397-403.
- [9] GROSS K L.A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil[J].Journal of Ecology,1990,78:1079-1093.
- [10] GOPAL M,THAPLIYAL R C.Topographical tetrazolium test of Indian tree seeds[J].Van Vigan,1969,7:37-45.
- [11] PASHA M K,DAS R K.Quick viability test of soybean seeds by using tetrazolium chloride[J].Seed Science and Technology,1982,10:651-655.
- [12] BABELEY G S,KANDYA A K.Use of TTC for rapid testing of viability of Lagerstoemia parviflora Roxb seeds[J].Journal of Tropical Forestry,1986,2:226-231.
- [13] 余佳荣,宋自力,唐强等.华山松种子发芽影响因素和生活力检验方法研究[J].湖南林业科技,2011,38(6):41-42.
- [14] 李基平,钟淑英.X 射线水衬比法测定华山松种子生活力的研究[J].西部林业科学,1998(4):21-27.
- [15] ASLAM M,RESHI Z A,SIDDIQI T O.Standardization of seed viability protocol for Pinus wallichiana A.B.Jackson in Kashmir, India[J].International Journal of Pharmaceutical Sciences Review & Research,2010,4(3):93-98.
- [16] 国家质量技术监督局.林木种子检验规程 GB2772-1999[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [17] AOSA.Tetrazolium testing handbook[M].North Brunswick,N.J.:Association of Official Seed Analysts,2000.
- [18] CORBINEAU F,COME D.Some particularities of the germination of Oldenlandia corymbosa L.seeds(tropical Rubiaceae)[J].Israel J.Bot,1981,29:157-167.
- [19] FIGUEROA R,DOOHAN D,CARDINA J,et al.Common groundsel(Senecio vulgaris) seed longevity and seedling emergence[J].Weed Sci,2007,55(3):187-192.
- [20] LEON R G,BASSHAM D C,OWEN M D K.Thermal and hormonal regulation of the dormancy-germination transition in Amaranthus tuberculatus seeds[J].Weed Res,2007,47(4):335-344.