TB5 钛合金凸弯边橡皮成形中侧压块优化设计

孙永娜 万 敏 吴向东

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: TB5 钛合金凸弯边橡皮成形时易失稳起皱. 将起皱缺陷量化作为优化目标, 以凸弯边起皱为缺陷考察指标和侧压块优化的目标函数, 基于有限元模拟和试验设计, 对不同几何参数下的侧压块橡皮成形进行了有限元模拟, 分析了几何参数对起皱指标的影响程度, 应用响应面法建立侧压块几何参数和起皱评价指标间的函数关系, 并用拟牛顿法进行优化. 建立了优化参数和成形指标间的近似函数关系及侧压块优化设计模型. 通过试验验证该优化方法的有效性和正确性.

关 键 词: TB5 钛合金; 凸弯边; 橡皮成形; 侧压块; 优化

中图分类号: V 262.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1292-06

Design and optimization of elimination tool in rubber forming of TB5 titanium

Sun Yongna Wan Min Wu Xiangdong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Wrinkling will occur in the rubber forming of convex flange, even for the forming of TB5 titanium when the flange height is higher. Wrinkling was quantified as objective functions. The rubber forming process with different side blank holder parameters were simulated based on the optimum design and FEM. Influences of different side blank holder parameters on the wrinkling were analyzed. The relationship with forming index was approximately expressed as a polynomial function. Optimal parameters were obtained using proper optimization methods based on the response surface methodology and quasi-Newton method. Practicability and validity of the optimization methods proposed in this work were verified by experiments.

Key words: TB5 titanium; convex flange; rubber forming; side blank holder; optimization

Ti-15-3(名义成分 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, 简称 TB5)是一种高强亚稳定 β 钛合金, 具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温及良好的冷成形性能, 因此, TB5 钛合金在航空航天行业具有巨大的应用潜力[1]. 因冷成形技术成熟且不涉及加热问题, 故应尽量采用冷成形制造钣金件, 然而由于 TB5 钛合金室温下的塑性变形范围窄及易失稳起皱等特点, 目前对 TB5 钛合金冷成形的研究还处于起步阶段, 对其冷成形缺陷的研究还较少[2].

高强钛合金多用于飞机框肋零件中, 框肋的基本结构是弯边, 主要包括直弯边、凸弯边、凹弯边和凸凹弯边等. 凸弯边成形过程中, 板料周向因材料收缩而产生压应力, 当压应力达到临界应力时, 发生失稳起皱[3]. 而框肋零件多用橡皮成形制造. 橡皮成形用橡皮做半模, 具有效率高、成本低、保护零件表面等优点[4].

起皱影响成形精度和质量, 若起皱发生在中间工序还有可能影响下道工序的正常进行. TB5 钛合金冷成形过程中易发生失稳, 凸弯边成形中板料受压失稳且无模具支撑作用, 故 TB5 钛合金凸弯边橡皮成形中易起皱. 因此研究 TB5 钛合金凸弯边成形中的起皱消除方法具有现实意义.

消皱方法有多种但普遍行之有效的方法并不存在. 最直观的消皱法是增加起皱处的法向接触

收稿日期: 2012-12-03; **网络出版时间**: 2013-04-18 09:15

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130418.0915.005.html

作者简介: 孙永娜(1982-), 女, 河南杞县人, 博士生, syn1004@me.buaa.edu.cn.

力,但这有可能导致其它部位被拉裂,因此消皱不是一件简单的事. 航空工厂常用侧压块消除凸弯边橡皮成形的皱纹[5]. 目前对侧压块的优化,一般是通过固定其它参数只改变该参数,通过有限次的模拟选择最优的几何参数,不可避免地会带来较大误差,从科学角度来看并不是真正意义上的优化[6]. 因此,需对侧压块的几何结构进行优化. 有学者通过试验和仿真方法得到了应变空间中的起皱极限曲线(WLC, Wrinkling Limit Curve),该曲线受材料属性的影响不大,可近似作为判断材料局部是否起皱的判据[7]. 在侧压块橡皮成形中要避免或尽量减少起皱,需对侧压块橡皮成形中的起皱缺陷进行量化作为评价指标.

侧压块几何优化是多变量优化,设计变量与目标函数间是非线性隐式关系,如果设计变量的任何修改都进行试验或模拟,会造成大量的资源浪费和时间消耗. 响应面法是数学方法和统计分析方法有机结合的产物,在输入变量和输出响应间构造一个具有明确表达式的多项式,通过建模和分析,最终达到优化响应值的目的[8].

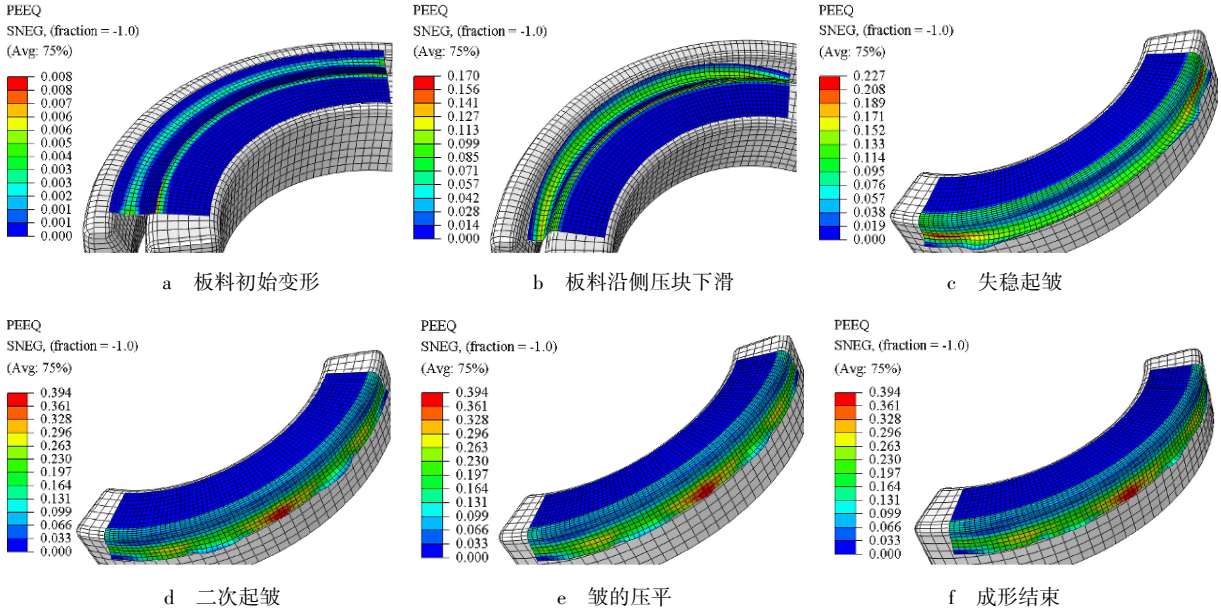
本文定义应变点到 WLC 的垂直距离为评价目标,用试验设计安排侧压块不同几何参数对起皱的影响,基于 ABAQUS 模拟结果,选择对起皱影响最大的几何参数作为设计变量. 用响应面函数建立设计变量与评价指标间的关系,并采用拟牛顿法进行优化达到消皱的目的.

1　侧压块橡皮成形消皱原理

1.1　侧压块橡皮成形过程

以某典型件侧压块橡皮成形过程为例,用 ABAQUS/Explicit 进行有限元建模. 橡皮成形中,刚模水平放置,完全约束边界,视为刚体. 板料为弹塑性变形体,用文献[9]中的材料模型定义,采用 4 节点减缩积分壳单元(S4R),弯边上网格尺寸为 3 mm×3 mm;橡皮为超弹性体,采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),并且采用粘弹性沙漏网格控制方法来控制超弹性的变形. 对橡皮表面施加均布载荷,从而成形力通过橡皮的变形而施加到板料上. 采用罚函数法定义接触摩擦. 与橡皮接触面采用 General Contact,摩擦系数取 0.15,板料和刚模间的接触为 surface-to-surface,摩擦系数为 0.45[10].

在变形开始时,很小的压力(5 MPa)就可使弯曲圆角和凸弯边上的板料发生轻微塑性变形,如图 1a 所示. 这是因为弯曲圆角处以弯曲变形为主易折弯发生变形;刚模与侧压块间的板料处于悬空状态,初始时变形抗力较小,对橡皮稍加压力,悬空部分的板料即会发生变形. 随橡皮压力的增大,板料沿侧压块下滑,在侧压块径向拉应力作用下,无失稳,如图 1b 所示. 板料在继续增加的压力作用下沿侧压块向刚模和侧压块间移动. 当切向压应力达到失稳的临界应力时,凸弯边上的板料受压失稳,见图 1c. 继而发生二次失稳起皱,见图 1d. 随橡皮压力的增加,皱纹波长越来越大,皱纹高度越来越小,即进入消皱阶段,如图 1e 所示. 橡皮较难流入狭小的空间,当侧压块几何结构不合理时,有可能造成凸弯边不能完全贴模和存在无法消除的皱褶,见图 1f. 因此需对侧压块几何结构进行优化以满足板料完全贴模,凸弯边皱纹被压平,成形出合乎零件外形的目的.



a　板料初始变形　　b　板料沿侧压块下滑　　c　失稳起皱

d　二次起皱　　e　皱的压平　　f　成形结束

图 1　侧压块橡皮成形过程

1.2 侧压块主要几何参数

侧压块必须有一定的倾角才能保证板料沿侧压块下滑. 倾角越小板料所受的拉应力越大,越利于消皱,但太小的倾角会导致板料变薄过多而破裂,或导致刚模和侧压块间的空间在板料未完全变形前被填满而阻碍板料的变形;若倾角过大会造成板料所受拉应力不足而引起起皱. 因此,侧压块的倾角是侧压块的主要几何因素之一,主要由图 2 中的 A 和 B 决定.

侧压块与刚模间的距离是影响侧压块橡皮成形的另一个主要因素,如图 2 中的 B. 若 B 太小,则板料在下滑到一定深度时,橡皮下滑困难,导致零件不能完全贴模;侧压块和刚模间的悬空材料随 B 的增大而增大,如果 B 过大,拉应力不足以抵消较大的切应力而起皱.

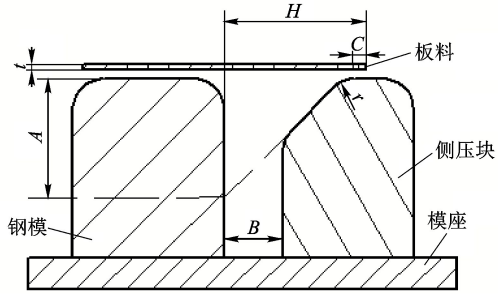


图 2 侧压块主要成形参数

板料边缘在侧压块上的搭边 C 较小时,板料的径向拉应力较小. 拉应力的减小将导致压应力的增加,成形时板料会因切向压应力过大而有起皱的危险;板料和侧压块间的接触面积随着 C 的增大而增大,造成板料受到的径向拉应力增加,能有效减小切向压应力而阻止起皱的发生,但如果 C 过大,板料有被拉裂的危险.

侧压块圆角半径 r 对成形时材料的流动速度及能否顺利流过凸缘及最终成形结果有很大影响. r 太小不仅不利于板料下滑,且会使板料在侧压块弯曲圆角处发生过大的弯曲变形,而降低板料强度. r 太大,板料所受拉应力不够,且板料沿侧压块下滑速度增加会导致板料变形不均匀,导致板料起皱.

因此,侧压块橡皮成形的主要结构参数可由图 2 中的 A,B,C 及 r 完全表达.

2 优化模型建立

2.1 优化目标

WLC 曲线可近似表示为

$$\varepsilon_{1,\mathrm{wlc}}(\varepsilon_2) = -\varepsilon_2 \qquad \varepsilon_2 < 0 \tag{1}$$

由于起皱区在安全区之下,因此应变点在安全区内时,距离 WLC 越远越安全;应变点在起皱区内时,距离 WLC 越远,起皱越严重.

因此本文将应变点到 WLC 的垂直坐标 d_w 定义为起皱指标的目标函数,见式(2).

$$d_w = \varepsilon_{1,\mathrm{wlc}}(\varepsilon_2) - \varepsilon_1 \tag{2}$$

式中,$\varepsilon_{\mathrm{wlc}}(\varepsilon_2)$ 是第二主应变对应的 WLC 上的起皱临界应变点.

由于起皱区在安全区的下方,所以当 $d_w<0$ 时,应变点不发生起皱;当 $d_w>0$ 时,应变点起皱. 本文选取所有大于 0 的 d_w 值之和的平均值作为优化目标.

2.2 优化参数的确定

由上述分析可知侧压块几何优化主要包括 4 个设计变量和 1 个起皱评价指标. 为了对侧压块几何参数对消皱指标的影响规律做出判断及获取原始数据,采用 3 水平正交试验设计,安排针对这 4 个设计变量的模拟试验.

由于弧面曲率半径对凸弯边起皱的影响最大[9],因此本文对曲率半径分别为 100 mm 和 300 mm,圆心角为 90°时,弯边高度比极限弯边高度分别大 6 mm 和 10 mm 时的情况进行研究. 参考《飞机钣金工艺手册》,分别对 4 个参数的水平进行设定,水平如表 1 所示.

表 1 3 水平正交试验的参数水平设置

水平	A	B	C	r
1	H-3	H/3	1	5
2	H	5H/12	3	7
3	H+3	H/2	5	9

以弧面曲率半径为 100 mm,弯边高度 H = 18 mm时的正交试验方案和结果为例,如表 2 所示,对该情况下的极差分析如表 3 所示.

表 2 正交试验方案及结果

试验	A/mm	B/mm	C/mm	r/mm	d_w
1	15	6	1	5	0.064 579
2	15	7.5	3	7	0.026 940
3	15	9	5	9	0.046 225
4	18	6	3	9	0.025 696
5	18	7.5	5	5	0.017 078
6	18	9	1	7	0.064 696
7	21	6	5	7	0.043 123
8	21	7.5	1	9	0.067 133
9	21	9	3	5	0.079 035

表 3 正交试验结果直观极差分析 mm

项目	A	B	C	r
均值 1	0.046	0.044	0.065	0.054
均值 2	0.036	0.037	0.044	0.045
均值 3	0.063	0.063	0.035	0.046
极差	0.027	0.026	0.030	0.009

表 3 可见,侧压块圆角半径 r 在该区间的取值对 d_w 的影响相对另外 3 个参数来说非常小,因此本文对侧压块的几何优化选取 A,B,C 3 个值进行优化. 由于均值 2 和均值 3 最接近,因此,r 可选 7 mm.

本文对 A,B,C 按表 4 的水平设置,利用均匀设计表 $U_5*(5^3)$,采用拟水平法,把 5 水平因素虚拟成 10 水平,进行模拟以获取响应面建模的数据.

表 4　均匀设计试验方案设置　mm

水平	A	B	C
1	$H-2$	$H/3$	1
2	$H-1$	$3H/8$	2
3	H	$5H/12$	3
4	$H+1$	$11H/24$	4
5	$H+2$	$H/2$	5

以曲率半径为 100 mm,弯边高度为 18 mm 时的均匀设计和结果为例,如表 5 所示.

表 5　均匀设计试验的参数水平设置

试验	A/mm	B/mm	C/mm	d_w
1	17	9	5	0.021 78
2	19	6	5	0.020 46
3	20	6.75	2	0.038 597
4	19	9	1	0.063 59
5	18	7.5	3	0.017 02
6	17	6	1	0.019 86
7	20	8.25	4	0.039 797
8	18	7.5	3	0.017 02
9	16	6.75	4	0.375 97
10	16	8.25	2	0.039 86

2.3　响应面建模

根据 2.2 节获取基本数据的方法,对弧面半径 $R=100$ mm 时,弯边高度 $H=18$ mm 和 24 mm 及 $R=300$ mm 时,H 分别为 21 mm 和 27 mm 的情况,对 A,B,C 和 d_w,分别按一次多项式(3)、二次多项式(4)及三次多项式(5)建立响应面关系,系数分别见表 6 ~ 表 8.

1) 一次多项式:

$$f(X)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3 \tag{3}$$

表 6　一次多项式函数的系数

系数	R100-H18	R100-H24	R300-H21	R300-H27
a_0	0.198 3	0.020 4	0.088 4	0.148 2
a_1	−0.006 5	−0.012 8	−0.004 1	−0.009 6
a_2	−0.004 0	−0.030 8	−0.003 6	−0.004 2
a_3	0.001 7	0.024 9	0.004 6	0.001 7

2) 二次多项式:

$$f(X)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_{11}x_1^2+a_{12}x_1x_2+a_{13}x_1x_3+a_{22}x_2^2+a_{23}x_2x_3+a_{33}x_3^2 \tag{4}$$

表 7　二次多项式函数的系数

系数	R100-H18	R100-H24	R300-H21	R300-H27
a_0	3.818 1	3.519 6	3.356 6	1.466 9
a_1	−0.314 4	−0.437	−0.439 9	−0.199 6
a_2	−0.375 0	−0.249 7	−0.226 1	−0.173 4
a_3	0.437 4	0.138 4	0.137 8	0.131
a_{11}	0.005 2	0.002 9	0.002 1	0.002 8
a_{12}	0.020 8	0.015 2	0.018 4	0.008 3
a_{13}	−0.014 4	−0.015 3	−0.017 4	−0.000 7
a_{22}	0.002 8	0.002 92	0.002 1	0.018 8
a_{23}	−0.021 2	−0.022 3	−0.018	−0.007 8
a_{33}	−0.000 2	−0.000 5	−0.000 7	−0.000 9

3) 含部分交叉项的三次多项式:

$$f(X)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_{11}x_1^2+a_{12}x_1x_2+a_{13}x_1x_3+a_{22}x_2^2+a_{23}x_2x_3+a_{33}x_3^2+a_{111}x_1^3+a_{123}x_1x_2x_3+a_{222}x_2^3+a_{333}x_3^3 \tag{5}$$

表 8　三次多项式函数的系数

系数	R100-H18	R100-H24	R300-H21	R300-H27
a_0	−53.005 5	−16.188 5	−33.561 5	−20.372 3
a_1	4.192 6	1.400 1	4.594 6	3.317 4
a_2	11.740 8	1.217 4	0.748	1.436
a_3	0.558 9	1.588 4	0.303 2	0.205 5
a_{11}	−0.233 1	−0.056 3	−0.223	−0.136 4
a_{12}	−0.024 1	−0.008 1	−0.007 2	−0.023 7
a_{13}	−0.062 7	−0.057 4	−0.02	−0.023
a_{22}	−1.530 3	−0.075	−0.061 1	−0.157 1
a_{23}	−0.164 1	−0.207 8	−0.016 5	−0.035 4
a_{33}	0.255 4	0.012 5	0.029 2	0.159 9
a_{111}	0.004 5	0.000 8	0.003 6	0.002 0
a_{123}	−0.008 4	−0.007 8	−0.001	−0.001 7
a_{222}	−0.068 4	−0.001 7	−0.002 1	−0.003 9
a_{333}	−0.028 1	−0.001 4	−0.003 2	−0.021 8

本文通过选取随机参数进行模拟,并对响应面多项式各函数的精确度进行验证,以确定最终的响应面函数.

在正交设计参数水平区间内任取 5 组随机数进行模拟. 以弧面曲率半径为 100 mm,弯边高度 18 mm 为例,随机参数的有限元试验参数设置及结果见表 9.

表 9　随机生成的 5 组参数及模拟试验结果

试验	A/mm	B/mm	C/mm	d_w
1	15	7	3	0.025 379
2	16.5	8	3	0.037 92
3	18	8	3	0.017 93
4	19.5	7	3	0.028 31
5	20	7	3	0.035 89

对试验设计中对应的响应面函数值和试验得到的应变值,采用误差均方根作为误差大小的评价标准. 对比验证试验目标函数值与各个响应面上对应值的误差均方根,选择误差均方根最小的

多项式作为优化过程中的响应面函数. 均方根由式(6)计算得到.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta d_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (d_i - f(\delta_{2,i}, \delta_{3,i}))^2}{n}} \tag{6}$$

式中,σ 是误差的均方根;i 是试验序号;n 是试验次数;Δd_i 是指标误差;d_i 是目标函数的模拟试验值;$f(\delta_{2,i}, \delta_{3,i})$ 是 d_i 对应的响应面计算值.

本文所选取的几何结构下的各个多项式函数的均方差分析见表 10 ~ 表 13. 对比分析可知,d_w 的响应面函数采用二次多项式最好.

表 10 *R*100-*H*18 的误差

项 目	响应面		
	一次	二次	三次
正交试验误差均方根	0.076 355	0.060 655	0.3
验证试验误差均方根	0.062 488	0.065 405	0.313 734
误差均方根平均值	0.069 4215	0.063 03	0.306 867

表 11 *R*100-*H*24 的误差

项 目	响应面		
	一次	二次	三次
正交试验误差均方根	0.075 805	0.026 463	0.483 52
验证试验误差均方根	0.028 995	0.019 631	0.533 503
误差均方根平均值	0.052 4	0.023 047	0.508 511

表 12 *R*300-*H*21 的误差

项 目	响应面		
	一次	二次	三次
正交试验误差均方根	0.026 968	0.011 6298	0.099 794
验证试验误差均方根	0.006 328	0.049 937	0.106 207
误差均方根平均值	0.003 164	0.030 784	0.103 001

表 13 *R*300-*H*27 的误差

项 目	响应面		
	一次	二次	三次
正交试验误差均方根	0.060 267	0.047 741	0.036 996
验证试验误差均方根	0.044 064	0.020 1841	0.092 05
误差均方根平均值	0.052 166	0.033 962	0.103 001

3 参数优化

建立好优化模型后,首先用 MATLAB 的遗传算法工具箱对上述二次多项式计算可行域内最优解的近似值,将这个近似值作为单目标优化问题计算的初始值. 然后采用 fmincon 求解器的 Active set(有效集算法)来计算更加精确的最小值及相应的参数值. 最终计算得到的对应问题的最优解的参数值见表 14.

表 14 最优解参数值

优化参数	*R*100-*H*18	*R*100-*H*24	*R*300-*H*21	*R*300-*H*27
A	19.515	26.094	22.759	29.327
B	7.251	9.675	8.513	10.901
C	1.071	1.072	1.076	1.079

基于表 14,对不同弯边高度的侧压块的几何参数值可归纳为式(7):

$$\left.\begin{aligned} A &\approx H + \frac{H}{11.72} \\ B &\approx \frac{H}{3} + \frac{H}{14.4} \\ C &\approx t + 0.75 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中,H 为零件弯边高度;t 为板料厚度.

由此可知侧压块几何参数与零件几何结构无直接关系,而与弯边高度和材料厚度有关系.

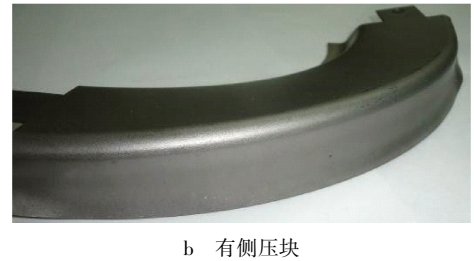
4 优化方法应用实例

以凸弯边弧面半径为 140 mm,弯曲圆角半径为 5 mm,弯边角为 90°,圆心角为 90°时的零件为例验证侧压块优化的正确性. 由于弯边高度越大,起皱趋势越明显,而弯边高度一般在 10 ~ 20 mm,变化范围较小,本文选用相对较大的弯边高度(20 mm)来考察.

按式(7)对该几何结构下的侧压块进行优化,则 $A = 21.7$ mm,$B = 8.06$ mm,$C = 1.75$ mm. 首先采用邵氏 70A 的橡皮在进行侧压块橡皮成形试验,当压力达到 30 MPa 时撤掉侧压块,采用邵氏 90A 的橡皮,在北航的单动压力机 YD28Q-550Q 进行橡皮成形. 为进行对比,在同样的刚模和板料尺寸下采用邵氏 90A 的橡皮进行最大压力为 60 MPa 的无侧压块橡皮成形,成形结果如图 3 所示.



a 无侧压块



b 有侧压块

图 3 有无侧压块的橡皮成形结果对比

由图 3a 可知,无侧压块时板料起皱严重;由图 3b 可知,采用本文优化的侧压块进行橡皮成形时,凸弯边板料无起皱现象,说明该侧压块所产生的附加拉应力使凸弯边橡皮成形中板料在凸弯边上受到的切向压应力降低,限制了板料在凸弯边周向上的收缩,凸弯边的皱纹最终被压平,板料没有起皱,零件成形高度达到要求. 这也说明本文优化的几何结构的侧压块在用来控制钛合金凸弯边橡皮成形的起皱时是有效的.

5　结　论

通过分析影响侧压块橡皮成形的侧压块的几何结构参数,将起皱缺陷量化,采用试验设计和有限元模拟相结合的方法获取了设计变量和目标函数之间关系的原始数据. 采用最小误差均方根来评价响应面多项式的优劣,可知采用二次多项式能较好的描述侧压块几何结构参数与皱纹量化目标间的关系. 采用拟牛顿法对该响应面进行优化,获取侧压块几何参数与弯边高度及板料厚度的关系. 通过试验验证了该侧压块优化方法的可靠性.

参考文献(References)

[1] 李重河,朱明,王宁,等. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属,2009,33(1):84-91
Li Chonghe, Zhu Ming, Wang Ning, et al. Application of titanium alloy in airplane[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1):84-91(in Chinese)

[2] Shan Debin, Lu Yan, Li Ping, et al. Experimental study on process of cold-power spinning of Ti-15-3 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(3):380-383

[3] Asnafi N. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96(1/2/3):198-214

[4] Ramezani M, Ripin Z M, Ahmad R. Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 10(209):4925-4934

[5] 航空制造工程手册总编委员会. 飞机钣金成形工艺[M]. 北京:航空工业出版社,1992
Aviation Editor of Manufacturing Engineering Handbook Committee. Aircraft sheet metal process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992(in Chinese)

[6] 王福东. 大曲率凸弯边零件橡皮囊液压成形工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011
Wang Fudong. Study on rubber blander hydraulic forming process for shrink flanging part with large curvature[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011(in Chinese)

[7] Kim J B, Yoon J W, Yang D Y, et al. Investigation into wrinkling behavior in the elliptical cup deep drawing process by finite element analysis using bifurcation theory[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/2/3):170-174

[8] 韩金全,万敏,袁胜,等. 飞机复杂蒙皮拉形模具型面设计方法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(11):1360-1363
Han Jinquan, Wan Min, Yuan Sheng, et al. Design method for surface of stretching tool for complex aircraft skin[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(11):1360-1363(in Chinese)

[9] Sun Yongna, Wan Min, Wu Xiangdong. Inverse identification of titanium alloy TB5's material parameters based on response surface methodology and quasi-Newton method[J]. Advanced Composite Materials, 2012, 482/483/484:2012-2016

[10] Sun Yongna, Wan Min, Wu Xiangdong. Study on friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12):3012-3018

(编　辑:文丽芳)