橡皮液压成形工艺的可靠性稳健优化设计方法

王 淼 李东升 李小强 杨伟俊

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对当前橡皮液压成形工艺过程中材料特性、工艺参数和其他随机因素都存在的固有波动问题,面向飞机精准制造,提出了一种考虑不确定性的可靠性稳健优化设计方法. 该方法基于稳健优化设计和合理的可靠性约束,对比了可靠性稳健优化解和传统优化解相关度量指标,并对2B06-O态铝合金板材橡皮成形典型的曲弯边零件进行了工艺试验验证. 结果表明该方法可有效降低质量评价指标对不确定性因素的敏感度,提高了橡皮成形工艺的稳健性和可靠性.

关 键 词: 橡皮液压成形; 可靠性稳健优化设计; 不确定性; 波动; 铝合金板; 曲弯边

中图分类号: TG 386

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)08-1064-06

Reliability-based robust optimization design for rubber fluid cell forming process

Wang Miao Li Dongsheng Li Xiaoqiang Yang Weijun

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

Abstract: The inherent variations that exist in aluminum alloy sheet properties, process parameters and other random factors effect forming quality of rubber fluid cell forming process. Oriented to precision manufacturing of aircraft, a reliability-based robust optimization design approach for rubber fluid cell forming process based on robust optimization design and reasonable reliability constraints was proposed. The reliability-based robust optimization design solution with the traditional optimization design solution was compared, and the typical flanging parts of 2B06-O aluminum alloy sheet in rubber fluid cell forming were used to verify the practicability and validity. The results show that the proposed approach made quality performance indicators less sensitive to uncertainties, and improved the robustness and reliability of the rubber forming process.

Key words: rubber fluid cell forming; reliability-based robust optimization design; uncertainty; variation; aluminum alloy sheet; curved flange

当前航空制造业竞争日趋激烈,工程设计过程中如何通过更新、更有效的工程设计方法以确保生产出高稳健型、高可靠性的航空产品是先进飞机钣金制造技术的关键. 为了适应新型号飞机的研发制造,确保成形零件质量的稳健性和可靠性,在生产制造过程中需要使用新的工程设计方法和质量控制技术[1]. 橡皮液压成形(以下简称“橡皮成形”)工艺在飞机钣金制造领域应用较多,其优点是效率高、成本低、成形质量好,适合多品种、小批量生产[2]. 传统的橡皮成形工艺主要依靠人工的经验,通过试错法和人工敲修以获得所需的零件形状,工艺质量不稳定,成形结果可靠性低. 将有限元数值仿真的分析方法应用于橡皮成形是一种研究的新途径[3]. 但是,单一的仿真方法没有考虑到实际生产过程中的波动性,实际上是一种确定性方法,仿真结果未必准确. 为了充

收稿日期: 2011-05-23; **网络出版时间**: 2012-03-20 10:38

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120320.1038.013.html

基金项目: 大型客机关键技术攻关项目(SAMF09-07-7s-047); 领航基金资助项目(YWF-10-01-B08)

作者简介: 王 淼(1981 -),男,辽宁沈阳人,博士生,wangmiao512@126.com.

分考虑板料成形过程中诸多因素产生的工艺不确定性,文献[4－6]通过概率优化、六西格玛原则、响应面法和稳健设计等方法对汽车制造领域的拉深零件进行了稳健优化设计. 但目前对航空钣金工艺的可靠性稳健优化设计方面研究尚少.

本文针对 2B06-O 态铝合金橡皮成形工艺在材料性能波动、工艺参数波动和其他随机因素波动对工艺质量的影响,面向飞机精准制造,提出了一种考虑不确定性的、结合稳健优化设计和可靠性设计的设计方法. 它要求产品质量在均值一定范围内波动时,均可满足设计要求. 将可靠性设计和基于容差模型的稳健设计相结合,在优化过程中将响应均值远离约束,并减小响应偏差,来提高设计的可靠性和稳健性,可降低质量评价指标对某些材料参数和工艺参数波动的敏感性,改进橡皮成形工艺质量.

1　橡皮成形工艺及有限元建模

1.1　橡皮成形工艺

橡皮成形技术简化了模具,缩短了生产周期,提高了贴膜精度. 橡皮成形工艺是通过将橡皮囊充入高压液体后膨胀产生成形力,与压型模具发生相对运动,将模具上的板料包在模面上,直至板料贴模压制出零件,成形原理见图 1.

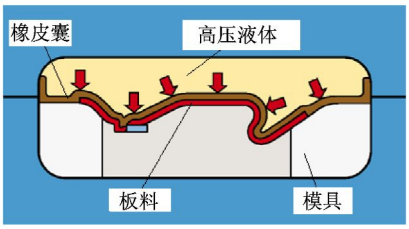
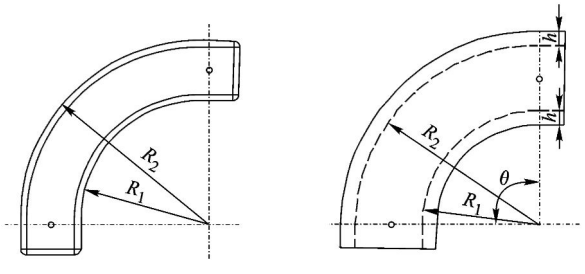


图 1　橡皮成形原理

1.2　有限元模型

橡皮成形零件包括直线弯边、凸曲线弯边、凹曲线弯边和凸凹曲线弯边零件[2]. 本文选择同时包含内外圆曲线轮廓的典型凸凹曲线弯边零件模型,该零件常用于飞机框缘. 几何解析模型见图 2,参数详见表 1. 有限元模型见图 3. 板料选取的



a　模具　　b　板料

图 2　几何解析模型

屈服准则是 Hill 48,硬化模型选取 Hollomon,橡胶垫材料模型为 Mooney-Rivlin. 有限元数值仿真计算基于 PAM-STAMP 2G 软件.

表 1　几何解析模型参数

几何解析模型参数	数值
凹曲线弯边弯曲半径 R_1/mm	100
凸曲线弯边弯曲半径 R_2/mm	150
弯边曲线中心角 θ/(°)	90
弯边高度 h/mm	15
板料厚度 t_0/mm	2

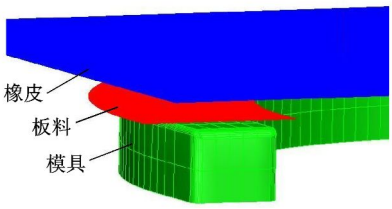


图 3　有限元数值解析模型

2　可靠性稳健优化设计方法

2.1　稳健优化设计

稳健设计旨在使产品(或过程)的质量特性对设计参数和噪声因素变差的影响不敏感[7-8]. 把对产品(或过程)的质量特性有影响的因素分为 2 类:一类是可以控制的设计参数 x,一类是难以控制的噪声因子 z. 通过稳健设计可以有效减小由设计参数 x 和噪声因子 z 的变差引起的质量特性波动.

稳健性设计需要实现 2 个目标:使产品质量特性的均值尽可能接近目标值;使质量特性的波动(通常用方差度量)尽可能小. 稳健优化设计是根据稳健设计的 2 个目标,通过 3 种质量特性下的稳健优化准则实现:

望目特性

$$\min \Delta_y = (\mu_y - y_0)^2 + \sigma_y^2 \tag{1}$$

望小特性

$$\min \Delta_y = \mu_y^2 + \sigma_y^2 \tag{2}$$

望大特性

$$\min \Delta_y = \frac{1}{\mu_y^2}\left(1 + \frac{3\sigma_y^2}{\mu_y^2}\right) \tag{3}$$

式中,μ_y 为质量特性 y 的均值;y_0 为 y 的目标值;σ_y^2为 y 的方差;Δ_y 为 y 的均方误差.

2.2　可靠性优化设计

可靠性优化设计以提高设计的可靠度为优化目标,使设计响应均值远离边界约束,以满足可靠性条件[9-10]. 本文中可靠性设计选择以确定性优化中约束条件转化为概率约束的表达方式,即采

用可靠度作为约束,其数学模型为

$$\left.\begin{aligned}&\min \quad F(x_1,x_2,\cdots,x_n)\\&\text{s.t.} \quad \beta > \beta_{\mathrm{T}}\\&\qquad x_{\mathrm{L},i} \leqslant x \leqslant x_{\mathrm{U},i}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中,F 为目标函数;x_i 为设计变量,$i=1,2,\cdots,n$;β 为可靠度指标,β_{T} 为目标可靠度指标,$\beta=-\Phi^{-1}(1-P(g>0))$,$\Phi$ 为标准正态分布的累积分布函数.

2.3 可靠性稳健优化设计

可靠性稳健优化设计是一种不确定性设计方法,在一个模型中同时实现稳健性和可靠性. 将稳健性作为目标函数,以减少质量损失;同时可靠性约束使得设计满足约束的概率尽可能高. 可靠性稳健优化模型可以表达成如下形式:

$$\left.\begin{aligned}&\min \quad \Delta_{y_j}\\&\text{s.t.} \quad \beta_k > \beta_{\mathrm{T}_k}\\&\qquad x_{\mathrm{L},i} \leqslant x \leqslant x_{\mathrm{U},i}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中,Δ_{y_j}为质量特性 y_j 的均方误差,$j=1,2,\cdots,m$;β_k 为第 k 个约束的可靠性指标,$k=1,2,\cdots,r$;β_{T_k}为第 k 个约束的目标可靠性指标.

3 橡皮成形工艺的可靠性稳健优化设计

3.1 响 应

本文研究橡皮成形中凸凹曲线弯边类零件会出现起皱、变薄破裂和卸载后回弹. 考虑到回弹指标符合稳健优化设计中的“望小”特性,因此将回弹指标作为优化目标,同时将破裂指标、起皱指标、贴膜度指标和压力控制范围作为约束.

3.1.1 回弹指标

回弹是板料成形卸载后,弹性变形部分产生回复的一种现象. 在橡皮成形过程中,凸弯边一侧和凹弯边一侧在卸载后都会存在回弹问题. 贴膜度可以作为衡量橡皮成形零件精度的常用指标. 在有限元数值模拟中将成形后的弯边零件的节点到模具模面的法向距离作为该零件在该节点处的贴膜度. 实质就是空间一点到曲面的最短距离. 本文将回弹最大值作为回弹指标.

3.1.2 破裂指标

破裂是材料成形时常见的缺陷,从宏观上看,破裂是材料拉伸失稳的表现;从内部机理上看,是材料所受的最大剪切应力或最大拉伸应力达到了极限造成失稳破裂. 在橡皮成形凸凹弯边曲线零件过程中,凹曲线弯边一侧在弯边时受拉应力较大,使材料拉伸变薄,易出现破裂现象.

在板料成形理论解析研究中,常采用成形极限曲线(FLC)来评估材料在成形中的破裂危险性. 基于 FLC 的破裂性判别是通过材料局部应变在主应变空间中与 FLC 的相对位置来进行判断. 文献[11]通过比较不同屈服准则和硬化准则,提出一种 FLC 曲线的通用模型,如图 4 所示. 应变点在安全区内,距离 FLC 越远,安全性越高;应变点在破裂区内,距离 FLC 越远,破裂趋势越大.

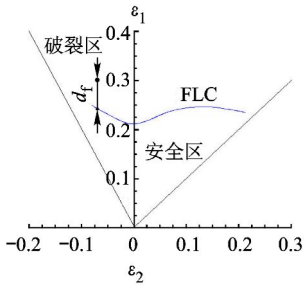


图 4 破裂指标示意图[11]

根据此特点,本文建立了针对破裂危险性的目标函数. 将应变点到 FLC 的垂直坐标距离 d_{f} 定义为破裂指标的目标函数之一:

$$d_{\mathrm{f}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_{\mathrm{flc}}(\varepsilon_2) \tag{6}$$

式中,ε_1 是材料上某点的面内第一主应变;ε_2 是该点的面内第二主应变;$\varepsilon_{\mathrm{flc}}(\varepsilon_2)$是第二主应变对应的 FLC 上破裂临界应变点. 当 $d_{\mathrm{f}}<0$ 时,不会发生破裂.

3.1.3 起皱指标

起皱是由于板料局部产生了过大的压应力,导致板料发生了压缩失稳. 从物理现象来看,主要是局部产生了过大的应变,进而导致起皱. 在橡皮成形凸凹弯边曲线零件过程中,凸曲线弯边一侧在弯边时受压应力较大,易出现起皱现象.

文献[12]通过试验和仿真方法得到应变空间中的起皱极限曲线(WLC),如图 5 所示. 可作为判断材料局部是否起皱的判据,近似表示为

$$\varepsilon_{\mathrm{wlc}}(\varepsilon_1) = -\varepsilon_2 \qquad \varepsilon_2 < 0 \tag{7}$$

式中 $\varepsilon_{\mathrm{wlc}}(\varepsilon_1)$是第一主应变对应的 WLC 上起皱临界应变点.

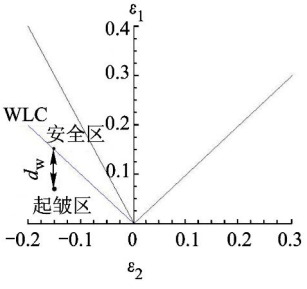


图 5 起皱指标示意图[12]

由于起皱区域在安全区之下,因此应变点在

安全区内,距离 WLC 越远,安全性越高;应变点在起皱区内,距离 WLC 越远,起皱趋势越大.

根据起皱判断依据,将应变点到 WLC 的垂直坐标距离 d_w 定义为起皱指标的目标函数之二:

$$d_w = \varepsilon_{wlc}(\varepsilon_2) - \varepsilon_1 \quad (8)$$

式中,$\varepsilon_{wlc}(\varepsilon_2)$是第二主应变对应的 WLC 上起皱临界应变点. 当 $d_w<0$ 时,不会发生起皱.

3.2　设计变量

铝合金板料橡皮成形工艺中,影响成形过程和成形件质量的主要因素是材料参数和工艺参数. 设计变量分为噪声因子和可控因子 2 部分. 噪声因子主要是 2B06-O 态铝合金材料性能参数,主要包括杨氏模量 E,屈服应力 σ_s,各向异性指数 r_0,r_{45}和 r_{90},强度系数 K,应变强化指数 n,泊松比 μ 等;可控因子主要是成形压力和不同摩擦方式对应的库仑摩擦系数.

3.3　噪声因子波动测量试验

本文按照单拉试验国标设计了单向拉伸试验,获取了 2 mm 厚度 2B06-O 态铝合金板料的各项性能参数及波动. 通过数据统计分析得出该铝合金材料性能参数的均值和容差,见表 2.

表 2　材料性能和工艺参数的概率分布

衡量指标	材料性能的各项噪声因子							
	E/GPa	r_0	r_{45}	r_{90}	σ_s/MPa	K/MPa	n	μ
均值	66	0.625	0.748	0.694	79	355.5	0.241	0.3
容差	5	0.0396	0.0744	0.034	4.029	15.4	0.011	0.03

3.4　噪声因子筛选试验

当噪声因子过多时,需要采用 Plackett-Burman (P-B)筛选试验对成形质量影响相对较敏感的噪声因子进行筛选. 本文先通过 P-B 筛选试验设计出 12 组数值仿真试验,图 6 给出了破裂指标、起皱指标和回弹指标的筛选结果主效应图.

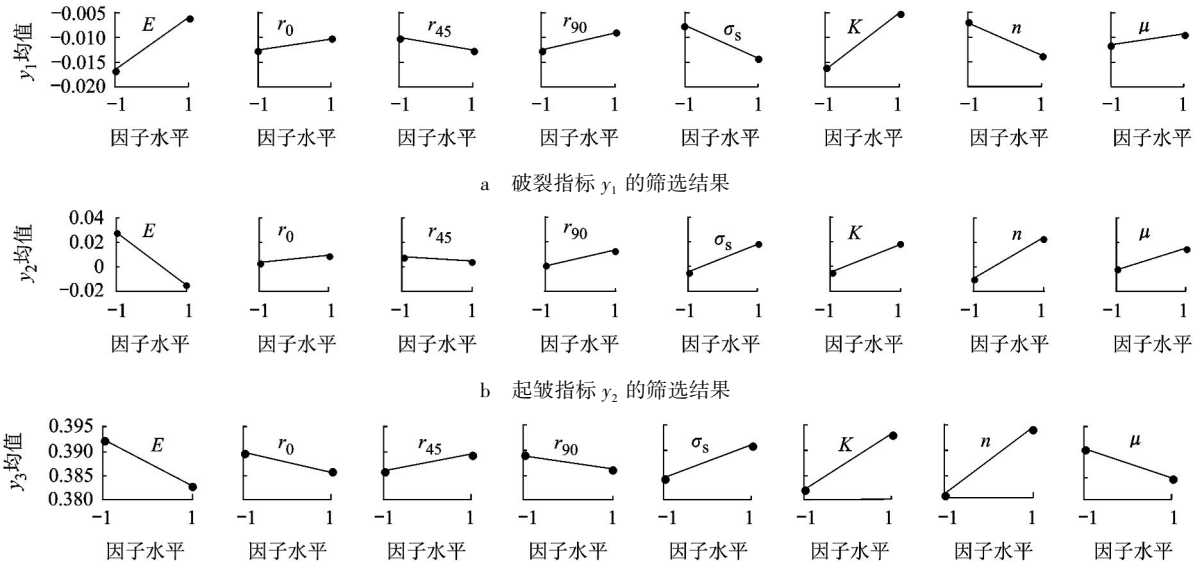


图 6　质量评价指标的 *P-B* 筛选试验结果

图 6 代表 8 个噪声因子在不同因子水平(横轴)下,分别对破裂指标 y_1、起皱指标 y_2 和回弹指标 y_3(纵轴)的影响. 结果表明 E,K 和 n 3 个噪声因子对响应影响相对更敏感.

3.5　约束条件

变形中的约束条件分为显约束和隐约束. 显约束用来控制设计变量的取值空间,即建立设计可行域. 隐约束是对成形条件的控制,如控制成形中的破裂、起皱等缺陷. 结合橡皮成形工艺特点,本文将破裂指标和起皱指标作为隐约束,将回弹指标和设计变量成形压力范围约束作为显约束. 根据橡皮成形工艺实际经验和贴膜度要求,约束条件为:破裂指标取 $d_f<0$,起皱指标取 $d_w<0$,回弹指标贴模度取值 < 0.5 mm,压力范围取 20 MPa≤x_1≤40 MPa.

3.6　响应面建模

响应面法是数学方法和统计方法结合的产物,通过近似构造一个具有明确表达形式的多项式,对响应受多个变量影响的问题进行建模和分析,最终达到优化响应值目的. 本文针对橡皮成形工艺,将成形压力 F 和摩擦系数 μ 分别作为可控因子 x_1和 x_2;n,E 和 K 分别作为噪声因子 z_1,z_2 和 z_3; y_1,y_2 和 y_3 代表响应指标. 采用中心复合设计(CCD),共进行 28 组数值仿真试验,可控因子和噪声因子水平见表 3.

基于响应面法构造 y_1,y_2 和 y_3 关于 x_1 和 x_2

的函数关系式,响应模型建立如下:

当 $x_2=0.05$ 时

$$y_1=-0.3210+0.0139x+2.281z_1-0.058xz_1$$

$$y_2=0.7390-0.035x-4.053z_1-0.01z_2+0.002z_3+0.178xz_1-(8.365E-5)xz_3$$

$$y_3=0.9910-0.012x_1-0.513z_1-0.007z_2+(5.437E-5)x_1z_2+(2.910E-5)x_1z_3$$

当 $x_2=0.10$ 时

$$y_1=-1.0160+0.016x+2.281z_1+0.001z_3-0.058xz_1$$

$$y_2=1.0480-0.039x-4.053z_1-0.013z_2+0.002z_3+0.178xz_1-(8.365E-5)xz_3$$

$$y_3=0.9270-0.012x_1-0.5960z_1-0.006z_2+(5.437E-5)x_1z_2+(2.910E-5)x_1z_3$$

当 $x_2=0.15$ 时

$$y_1=-0.917+0.014x+2.281z_1+0.002z_2+0.001z_3-0.058xz_1$$

$$y_2=1.145-0.04x-4.053z_1-0.014z_2+0.002z_3+0.178xz_1-(8.365E-5)xz_3$$

$$y_3=1.111-0.012x_1-0.916z_1-0.008z_2+(5.437E-5)x_1z_2+(2.910E-5)x_1z_3$$

表 3 可控因子和噪声因子的水平

因子	水平		
	1	-1	0
$x_1(F/\text{MPa})$	20	30	40
$x_2(\mu)$	0.05	0.1	0.15
$z_1(n)$	0.23	0.241	0.252
$z_2(E/\text{GPa})$	61	66	71
$z_3(K/\text{MPa})$	340.1	355.5	370.9

3.7 可靠性稳健优化设计

令 $\sigma_{x_1}^2=(0.05/3)^2$,$\sigma_{z_1}^2=\sigma_{z_2}^2=(0.03/3)^2$,$\sigma_{z_3}^2=(0.025/3)^2$,基于二阶泰勒展开分别得到 y_3 的均值和方差估计 $\hat{\mu}_{y_3}$ 和 $\hat{\sigma}_{y_3}^2$. 质量特性 y_3 以式(2)望小特性为稳健优化准则,加入可靠性约束,令 $\beta_{T_1}=\beta_{T_2}=\beta_{T_3}=3.0902$,该铝合金板料橡皮成形工艺的可靠性稳健优化模型为

$$\begin{cases}\min & \text{MSE}(y_3)=\hat{\mu}_{y_3}^2+\hat{\sigma}_{y_3}^2\\ \text{s.t.} & -\Phi^{-1}(1-P(y_1<0))>3.0902\\ & -\Phi^{-1}(1-P(y_2<0))>3.0902\\ & -\Phi^{-1}(1-P(y_3<0.5))>3.0902\\ & -\Phi^{-1}(1-P(40-x_1\geqslant 0))>3.0902\\ & -\Phi^{-1}(1-P(x_1-20\geqslant 0))>3.0902\end{cases}\tag{9}$$

采用 Matlab 7.11.0(R2010b)进行求解,可以得到该铝合金板料橡皮成形工艺的可靠性稳健优化解为 $x_1=39.9$ MPa 和 $x_2=0.10$.

4 试验验证与结果分析

由于噪声因子和可控因子的数量较多,如果全部用工艺试验来验证可靠性稳健设计结果,需要大量工艺试验,这显然不够经济. 因此,为了证明可靠性稳健优化方法的有效性,首先可以将数值仿真结果与工艺试验结果相对比,如果误差在可以接受的范围内,那么可以将数值仿真结果作为验证可靠性稳健优化方法的经济型方法. 同时,需要将其与传统的优化设计结果进行对比,比较二者在质量和可靠度等方面的指标. 最后,还需要在可靠性稳健优化的优化工艺条件下,成形几组零件,进行工艺试验验证,判断其有无破裂和起皱缺陷,若得到成形质量较好的零件则可以证明该方法的有效性.

4.1 工艺性试验结果与数值仿真结果对比

本文将可靠性稳健优化条件下的工艺试验结果与数值仿真结果进行对比,图 7 和图 8 分别表示凹弯边和凸弯边的回弹角试验与模拟结果对比.

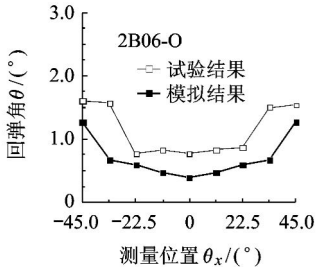


图 7 凹弯边一侧试验与模拟结果对比

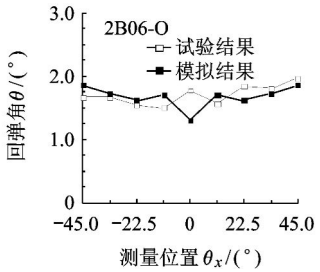


图 8 凸弯边一侧试验与模拟结果对比

结果表明橡皮成形试验结果与仿真结果整体趋势接近,试验结果偏小,试验与模拟的回弹角误差不超过 0.5°,在可接受范围. 因此可以证明仿真结果的准确性和可行性,用仿真结果代替试验去验证可靠性稳健优化结果是可行的.

4.2 可靠性稳健设计与传统优化设计结果对比

表 4 给出了可靠性稳健优化解和传统优化解关于稳健性度量指标和可靠性度量指标的对比,

约束可靠度的计算在 100 000 次蒙特卡洛仿真下完成. 传统优化解是指在不考虑波动的情况下,通过普通优化方式达到目标值的优化解.

可靠性稳健优化设计下的回弹 y_3 均值比传统的优化设计下小,特别是约束 2、约束 3 和约束 5 的可靠度得到了极大的提高,约束 4 可靠度虽然较传统解低,但已满足可靠度目标要求. 结果表明,通过可靠性稳健优化设计所得的优化解在质量和满足约束的可靠度方面全面占优.

表 4　可靠性稳健优化结果与传统优化结果对比

衡量指标	传统优化解 $x_1=20$ MPa, $x_2=0.10$	可靠性稳健优化解 $x_1=39.9$ MPa, $x_2=0.10$
y_3 均值 $\hat{\mu}_{y_2}$	0.6870	0.4476
约束 1 可靠度指标	5.6120	5.6120
约束 2 可靠度指标	$-\infty$	5.6120
约束 3 可靠度指标	$-\infty$	5.6120
约束 4 可靠度指标	5.6120	3.0902
约束 5 可靠度指标	-2.9889	5.6120

4.3　工艺试验验证

为了说明可靠性稳健优化解不仅比传统优化解的度量指标更优,而且可以有效指导橡皮成形工艺试验,获得成形质量较好的弯边零件. 本文选取可靠性稳健优化解的工艺条件,成形了几组弯边零件. 图 9 所示是成形后零件,图 10 所示是工艺试验模具,试验设备是 AVURE 公司生产的 21 000 t橡皮囊液压机成形机.

通过对破裂和起皱 2 个典型质量缺陷进行观察发现,在可靠性稳健设计方法的优化工艺条件下橡皮成形零件没有发生起皱和破裂,贴膜度较好;弯边零件整体厚度分布均匀,成形质量好.

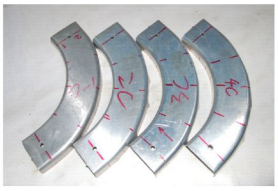


图 9　成形后零件



图 10　工艺试验模具

5　结 束 语

本文针对铝合金板材橡皮成形工艺质量控制中出现的问题,提出了一种考虑不确定性的可靠性稳健优化设计方法. 该方法通过噪声因子波动测量试验和噪声因子筛选试验获得对成形质量较为敏感的设计变量,最终通过响应面建模法获得可靠性稳健优化结果. 本文将可靠性稳健优化结果与传统的优化设计结果进行了对比,结果表明,可靠性稳健优化设计结果的度量指标更优,且满足约束的概率更高,可靠性更好. 最后在可靠性稳健工艺条件下,进行工艺验证性试验,得到了成形质量较好的零件.

参考文献（References）

[1] Duncan M. Six sigma methodology: reducing defects in business processes[J]. Filtration & Separation, 2006, 43(1): 34 - 36

[2] 航空制造工程手册总编委员会. 机钣金工艺[M]. 北京:航空工业出版社, 1992: 439 - 454
Aviation Editor of Manufacturing Engineering Handbook Committee. Aircraft sheet metal process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992: 439 - 454 (in Chinese)

[3] Peng Linfa, Hu Peng, Lai Xinmin, et al. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process: simulation and experiments[J]. Materials and Design, 2009, 30(3): 783 - 790

[4] Li Y Q, Cui Z S, Ruan X Y, et al. Application of six sigma robust optimization in sheet metal forming[C]//NUMISHEET 2005: Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes. Detroit: [s. n.], 2005: 819 - 824

[5] Li Y Q, Cui Z S, Ruan X Y, et al. CAE-based six sigma robust optimization for deep-drawing process of sheet metal[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(7/8): 631 - 637

[6] Li Y Q, Cui Z S, Zhang D J, et al. Six sigma optimization in sheet metal forming based on dual response surface model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2006, 19(2): 251 - 255

[7] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000
Chen Lizhou. Robust design[M]. Beijing: China Machine Press, 2000 (in Chinese)

[8] Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. New Jersey: Wiley, 2009

[9] Nikolaidis E, Stroud W J. Reliability-based optimization: a proposed analytical-experimental study[J]. AIAA Journal, 1996, 34(10): 2154 - 2161

[10] Youn B D, Choi K K, Yang R J, et al. Reliability-based design optimization for crashworthiness of vehicle side impact[J]. Structural and Multidiseiplinary Optimization, 2004, 26(3/4): 272 - 283

[11] Butuc M C, Gracio J J, Rocha A B. A theoretical study on forming limit diagrams prediction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 714 - 724

[12] Kim Y, Son Y. Study on wrinkling limit diagram of anisotropic sheet metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 97(1/2/3): 88 - 94

（编　辑:文丽芳）