

# 两种不同诱导槽结构抗撞性优化设计

谭丽辉<sup>1,2</sup>, 谭洪武<sup>3</sup>, 崔晓梅<sup>1,2</sup>, 徐 涛<sup>2</sup>

(1. 吉林化工学院 机电工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;  
3. 中油吉林石化公司有机合成厂, 吉林 吉林 132022)

**摘 要:**为了提高圆截面金属薄壁构件的抗撞性,在其上引入圆弧形凹、凸 2 种诱导槽结构并以其为研究对象。建立以诱导槽数量及其半径为优化参数,以比吸能(SEA)和压溃力效率(CFE)为评价指标的多目标优化数学模型。讨论了均布设置的诱导凹槽、凸槽对结构吸能、最大峰值压溃力及压溃力曲线平稳性的影响。采用全因子试验设计选取设计样本点,通过有限元软件 LS-DYNA 得到不同样本点的碰撞响应,结合径向基函数法构造优化指标的近似函数,并采用理想点法进行优化设计。研究表明:优化后凹、凸 2 种诱导槽结构与原模型相比,压溃力效率分别提高了 53.22%、102.15%,最大峰值压溃力各降低了 52.1%、57.49%,压溃力曲线更趋于平稳;由于施加诱导槽造成结构整体质量增加,导致优化后凹、凸 2 种诱导槽结构的比吸能分别比原模型各减少了 4.05%、7.99%,与大幅降低的最大峰值压溃力相比,很好地达到了提高抗撞性的目标。

**关键词:**汽车工程;优化设计;比吸能;压溃力效率;诱导槽;薄壁构件

**中图分类号:**U463.83 **文献标志码:**A

## Crashworthiness optimization design of two kinds of different inducing grooves

TAN Li-hui<sup>1,2</sup>, TAN Hong-wu<sup>3</sup>, CUI Xiao-mei<sup>1,2</sup>, XU Tao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China; 3. PetroChina Jilin Petrochemical Company Organic Synthesis Factory EPDM Plant, Jilin 132022, Jilin, China)

**Abstract:** In order to improve crashworthiness of circular cross-section of thin-walled metal component, this paper took thin-walled metal cylindrical tubes as research objects on the basis of inducing indentations and convex grooves. The multi-objective optimization mathematical model was built by taking the specific energy absorption and the crush force efficiency as evaluation indexes, and numbers and radius of the inducing grooves were chosen as optimization parameters. The energy absorption, the maximization peak force and the smoothness of crush force curves were analyzed. The sample points were selected by full factorial experimental design, and collision response of the sample points were got through finite element software LS-DYNA, objective functions were constructed based on the radial basis function (RBF), and multi-

objective optimization for thin-walled metal component with the inducing indentations and convex grooves was presented by using the ideal point method. The results show that compared with the original model, crushing force efficiency of the structure of two kinds of inducing grooves increase separately by 53.22%, and 102.15%, and the maximum peak crushing force reduced by 52.1%, and 57.49%. The crush force curve tends to be more smoother. Due to the increasing quality of induced structure, the specific energy absorption decrease by 4.05%, 7.99%. Compared with the greatly reduced maximum peak crush force, it can achieve the aim of improving crashworthiness. 3 tabs, 9 figs, 16 refs.

**Key words:** automobile engineering; optimization design; specific energy absorption (SEA); crush force efficiency (CFE); inducing groove; thin-walled component

## 0 引言

薄壁金属构件由于质量轻、吸能性好而被广泛应用于车身吸能装置<sup>[1-2]</sup>。金属薄壁构件作为缓冲吸能装置,其破坏形式稳定且能够产生一定的压溃行程,可通过自身的塑性变形吸收和耗散大量的碰撞动能,同时能够减缓碰撞时的最大冲击载荷。从而达到降低车辆速度、保护乘员及汽车主要部件安全的目的。

为了满足碰撞过程中薄壁构件吸能的同时尽量降低最大冲击载荷,国内外学者进行了大量的研究,对薄壁构件的截面形状、几何尺寸等参数进行了科学设计及优化。Lee 等对薄壁圆柱管进行了抗撞性研究和优化设计<sup>[3]</sup>;Shakeri 等在薄壁圆管上端分别设置了加强环和凹槽 2 种诱导结构,研究表明改进结构可降低最大冲击载荷<sup>[4]</sup>;Hosseinipour 等针对圆截面薄壁构件施加矩形诱导槽,证明了所加诱导槽可控制结构变形、力-位移曲线的稳定性和吸能效果<sup>[5]</sup>;张涛等研究了薄壁组合结构及其设计缺陷结构的吸能特性,提出设置一定的诱导缺陷可以降低碰撞过程中的峰值载荷<sup>[6]</sup>。

目前的研究大多针对诱导结构对抗撞能力的影响,很少涉及对诱导结构的优化。为此,本文从实际出发在薄壁圆管上分别施加圆弧形凹槽和凸槽 2 种诱导结构,研究其对抗撞性的影响。在碰撞分析中大多采用最大峰值压溃力为评价指标,而对乘员损伤有重要影响的压溃力曲线的平稳性却没有量化考虑。为了提高结构的抗撞性,同时满足轻量化的设计要求,本文综合考虑了比吸能、最大峰值压溃力及压溃力的平均值,以诱导槽数量及其半径为动态变量,创建一种多目标优化设计方案,并结合径向基函

数法构造优化目标的近似函数,采用理想点法对多目标优化问题寻优。

## 1 问题描述

(1) 最大峰值压溃力  $F_{\max}$  表示在压溃过程中沿轴向产生的压溃载荷的最大值<sup>[7]</sup>。最大峰值压溃力会引起较高的加速度,是碰撞过程中需要考虑的重要参数。为了减小对乘员的伤害,希望在整个压溃过程中最大峰值压溃力尽可能小<sup>[8]</sup>。

(2) 平均压溃力  $F_{\text{mean}}$  表示薄壁构件在碰撞过程中的平均压溃力,其表达式为

$$F_{\text{mean}} = \frac{\int_0^{\delta_{\max}} F d\delta}{\delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: $F$ 为压溃力; $\delta$ 为压溃位移; $\delta_{\max}$ 为最大压溃位移。

在碰撞过程中压溃力一般围绕平均压溃力波动。

(3) 压溃力效率 CFE 表示平均压溃力与最大峰值压溃力之比,其表达式为

$$I_{\text{CFE}} = \frac{F_{\text{mean}}}{F_{\max}} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{CFE}}$ 为压溃力效率 CFE 的计算参数。

压溃力效率 CFE 综合考虑了平均压溃力与最大峰值压溃力对薄壁构件抗撞性的影响,CFE 越大说明最大峰值压溃力越小,越接近平均压溃力,压溃力曲线平稳,理想的吸能构件 CFE 应为 1。

(4) 比吸能 SEA 表示单位质量薄壁结构所吸收的能量<sup>[9]</sup>,其表达式为

$$I_{\text{SEA}} = \frac{E_{\text{total}}}{W} \quad (3)$$

式中: $I_{\text{SEA}}$ 为比吸能 SEA 的计算参数; $E_{\text{total}}$ 为薄壁结构所吸收的总能量; $W$ 为薄壁结构的总质量。

为了提高结构的抗撞性,同时满足轻量化的设计要求,应使薄壁构件的比吸能最大化。

为此,本文以比吸能和压溃力效率为优化设计指标,在优化设计过程中,有 2 个设计参数即诱导槽数量  $m$  和诱导槽半径  $r$ ,它们在一定范围内变化。该多目标优化问题可表示为

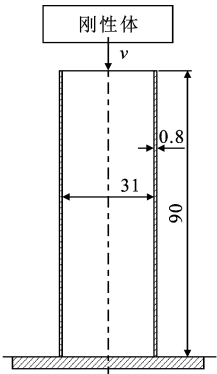
$$\begin{cases} \max \text{SEA}(m,r) \\ \max \text{CFE}(m,r) \\ \text{s. t.} \quad m^L \leq m \leq m^U \\ \quad \quad r^L \leq r \leq r^U \end{cases} \quad (4)$$

事实上,目标函数很难用数学方法精确地表达,本文采用径向基函数模型构造其近似表达式,并采用理想点法寻找多目标问题最优解。

2 结构抗撞性设计

2.1 数值分析

为了验证本文有限元分析的精确性,将本文通过有限元分析得到的结果与其他文献中的试验值进行比较。采用文献[10]中的数据,首先对薄壁金属圆管(以下称原模型)进行数值分析。如图 1 所示,圆管下端固定,上端自由并受质量为 25 kg,速度为  $v=15.49\text{ m/s}$  的刚性体冲击作用;圆管厚度  $t=0.8\text{ mm}$ ,长度  $L=90\text{ mm}$ ,直径  $d=31\text{ mm}$ 。



单位: mm

图 1 薄壁圆管的分析模型

Fig. 1 Analysis model of thin-walled cylinder

薄壁构件的材料选为高强度钢,密度  $\rho=7.82\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=207.2\text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,屈服应力  $\sigma_0=446\text{ MPa}$ 。高强度钢材料的动态变形受材料应变率的影响较大,需要在材料模型中考虑应变率的影响,一般采用 Cowper-Symonds 塑性材料模型<sup>[10]</sup>

$$\sigma_y=\sigma_0(1+\epsilon/c)^{1/p} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_y$  为考虑应变率之后的动态屈服应力;  $\sigma_0$  为静态屈服应力;  $\epsilon$  为应变率;  $c$ 、 $p$  为模型中与应变率相关的参数。

静态应力-应变变化曲线如图 2 所示。

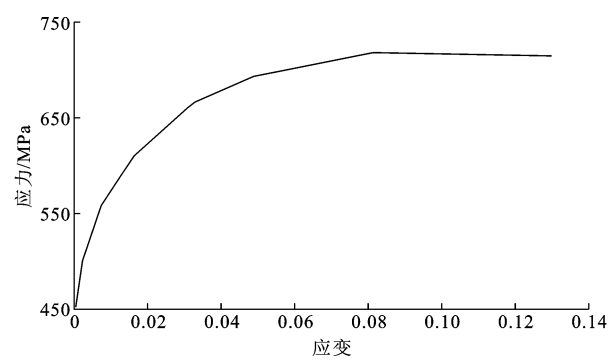


图 2 静态应力-应变关系曲线

Fig. 2 Static curve of stress vs. strain

表 1 给出了薄壁构件原模型由 LS-DYNA 计算得到的最大峰值压溃力、总吸能、最大压溃位移及其与文献中对应的试验值<sup>[7]</sup>。通过对比可以看出,有限元结果和试验值之间的相对误差很小,可见数值模拟的结果与试验值能够较好地吻合。

表 1 原模型有限元分析结果与试验对比

Tab. 1 Comparison of experiments and FE results of

original model

碰撞响应	试验值	有限元结果	误差/%
最大峰值压溃力/kN	120.30	120.09	0.2
吸能/kJ	2.95	2.94	0.3
最大压溃位移/mm	64.10	58.40	8.9

2.2 模型改进

诱导结构是应力集中的地方,在薄壁构件上设置诱导结构可以控制薄壁构件变形形式,使结构的屈曲变形稳定。为了提高原模型在碰撞过程中的抗撞性,本文对原模型结构做了改进,如下页图 3 所示。沿光滑表面的薄壁结构(原模型结构尺寸不变)分别添加均布的圆弧形凹槽、凸槽 2 种诱导结构。以诱导槽个数  $m\in[1,4]$ ,半径  $r\in[0.8,3.2]\text{ mm}$  作为试验因素。针对以上 2 种不同结构的诱导槽,采用全因子试验设计<sup>[11]</sup>,在  $m$ 、 $r$  设计域内各选用 28 个样本点。前文已对原模型有限元分析结果与文献上的试验值进行了对比,验证了有限元分析的可靠性。为了节约资源,本文对所选的设计样本点只进行有限元分析计算从而得到其碰撞响应,比较 2 种不同诱导槽结构对薄壁构件抗撞性的影响。

该多目标优化问题数学表达式可进一步表

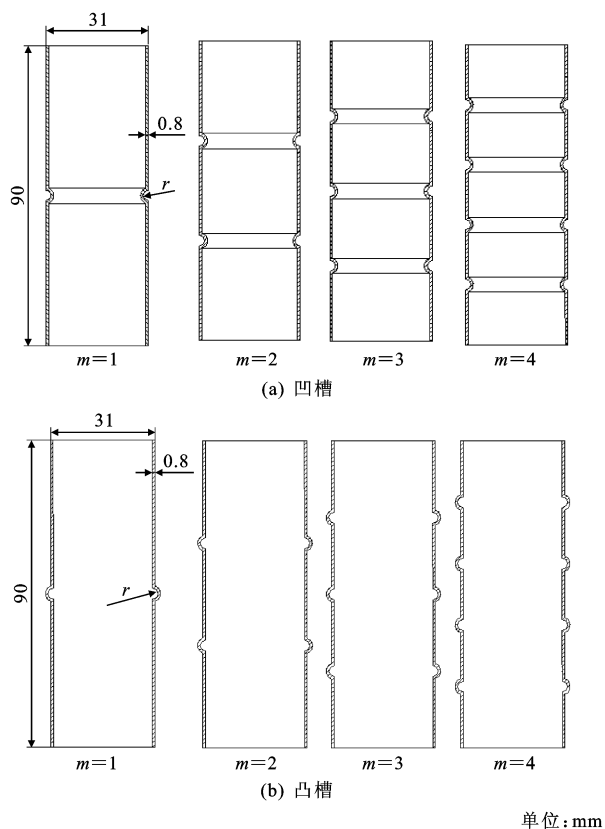


图 3 改进结构模型

Fig. 3 Improved structural model

示为

$$\begin{cases} \min & -\text{CFE}(m, r), -\text{SEA}(m, r) \\ \text{s. t.} & 1 \leq m \leq 4 \\ & 0.8 \text{ mm} \leq r \leq 3.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

### 3 径向基函数法优化设计

#### 3.1 径向基函数模型

径向函数是以预测点与样本点间的欧氏距离为自变量的一族函数<sup>[12-15]</sup>。以径向函数为基函数,通过线性组合构造出来的近似模型即为径向基函数模型。

在设计空间中,关于设计变量响应函数的近似表达式可以定义为

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi \|x - x_i\| \quad (7)$$

式中:  $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  为权系数;  $\|x - x_i\|$  为预测点和样本点间的欧氏距离;  $\varphi \|x - x_i\|$  为径向函数。

将  $n$  个样本点及每个样本点对应的响应函数值代入到式(7),可以得到方程组矩阵形式为

$$\mathbf{Y} = \Phi \lambda \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{Y} = [\hat{y}(x_1), \hat{y}(x_2), \dots, \hat{y}(x_n)]^T$ ,  $\Phi = [\Phi_{ij}] =$

$$[\varphi \|x_i - x_j\|](i, j = 1, 2, \dots, n)。$$

在得到响应函数的径向基函数模型后,需要对近似模型精度进行验证,通过额外测试点(不包括样本点)判定系数  $R^2$  及误差平方和均方根 RMSE 来验证径向基函数模型对设计变量的拟合情况。判定系数  $R^2$  及误差平方和均方根 RMSE 分别定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{error}}} (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_{\text{error}}} (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$$I_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{error}}} (y_i - \bar{y}_i)^2}{n_{\text{error}}}}$$

式中:  $n_{\text{error}}$  为测试点的个数;  $\bar{y}_i$  为  $i$  个测试点的有限元分析结果  $y_i$  的平均值;  $\bar{y}$  为第  $i$  个测试点的径向基函数近似值;  $I_{\text{RMSE}}$  为均方根 RMSE 的计算参数。

#### 3.2 理想点法求解多目标优化问题

多目标优化问题在数学上一般可表示为

$$\begin{cases} \min & f_1(x_1, \dots, x_n) \\ & \vdots \\ \min & f_p(x_1, \dots, x_n) \\ \text{s. t.} & g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & h_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)中,先求解  $p$  个单目标问题

$$\min_{x \in D} f_j(x), \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

设其最优值为  $f_j^*$ , 称  $f^* = (f_1^*, \dots, f_p^*)^T$  为值域中的一个理想点,因为一般很难达到,故在期望的某种度量下,寻求距离  $f^*$  最近的  $f$  作为近似值。一种最直接的方法是构造评价函数

$$\varphi(z) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (z_i - f_i^*)^2} \quad (12)$$

然后极小化  $\varphi[f(x)]$ , 即求解

$$\min_{x \in D} \varphi[f(x)] = \sqrt{\sum_{i=1}^p [f_i(x) - f_i^*]^2} \quad (13)$$

并将它的最优解  $x^*$  作为式(8)在这种意义下的最优解<sup>[16]</sup>。

对于多目标优化问题采用理想点法易得到较明确的全局最优值,于是本文的多目标优化问题可进一步表示为

$$\begin{cases} \min & f_1(x) = -I_{\text{SEA}}(x) \\ \min & f_2(x) = -I_{\text{CFE}}(x) \\ \text{s. t.} & 1 \leq m \leq 4 \\ & 0.8 \text{ mm} \leq r \leq 3.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (14)$$

3.3 优化结果

数值算例结果表明,带有 2 种不同诱导槽结构的薄壁构件,诱导槽数量  $m$  和半径  $r$  是影响薄壁构件抗撞性能的 2 个重要参数。通过有限元计算分别得到了 2 种不同诱导结构样本点的碰撞响应,从而得到 SEA 和 CFE 关于设计变量  $m$ 、 $r$  的响应函数和响应面。从图 4、图 5 中响应面可见,诱导槽数量、半径对结构的比吸能和压溃力效率有很大影响,呈现出一定的非线性关系,不具备单调性。

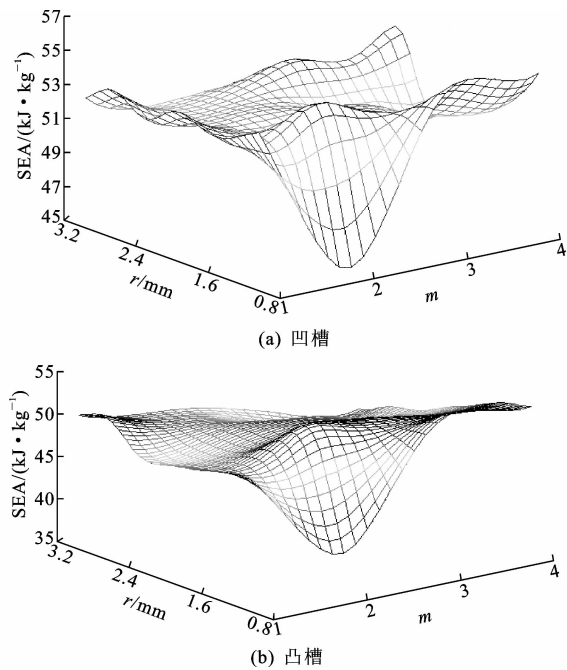


图 4 比吸能 SEA 关于  $m$  和  $r$  的响应面

Fig. 4 RBF surface of SEA vs.  $m$  and  $r$

表 2 分别给出了凹、凸 2 种诱导槽结构 SEA 和 CFE 这 2 个单目标函数的优化值,可见 2 个单目标函数分别有不同的优化解,很难同时达到最优。故本文采用理想点法对式(14)的多目标优化问题进行求解,得到带有圆弧形诱导凹槽结构的最优值出现在  $m=3$  和  $r=1.224$  mm 处,其值分别为  $I_{SEA}=53.723$  kJ/kg 和  $I_{CFE}=0.673$ ;而带有圆弧形诱导凸槽结构的最优值出现  $m=3$  和  $r=1.501$  mm 处,其值分别为  $I_{SEA}=51.104$  kJ/kg 和  $I_{CFE}=0.814$ 。如下页图 6 所示,分别给出了 2 种诱导槽结构分别达到最大的 SEA、CFE 和理想点法计算得到多目标问题的优化结构。

将理想点法计算得到的最优设计参数代入有限元模型中进行计算,以验证参数的有效性,同时与原模型的有限元结果进行比较(表 3)。表 3 分别给出了凹、凸 2 种诱导槽结构由理想点法求出的多目标优化值与有限元分析结果对比,从中可以看出两

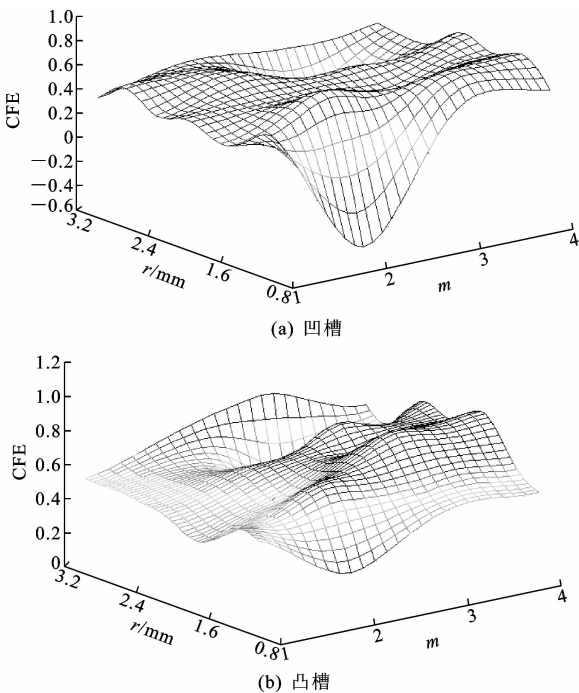


图 5 压溃力效率 CFE 关于  $m$  和  $r$  的响应面

Fig. 5 RBF surface of CFE vs.  $m$  and  $r$

表 2 SEA 和 CFE 这 2 个单目标函数优化值

Tab. 2 Optimums of two single objective functions about SEA and CFE

诱导槽类型	单目标	$m$	$r/\text{mm}$	SEA/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	CFE
凹 槽	max SEA	1	0.800	54.290	0.593
	max CFE	4	1.198	51.942	0.683
凸 槽	max SEA	2	1.345	52.821	0.710
	max CFE	4	1.631	50.769	0.857

表 3 多目标优化结果与有限元结果对比

Tab. 3 Comparison of multiobjective optimization and FE results

诱导槽类型	单目标	$m$	$r/\text{mm}$	SEA/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	CFE
凹 槽	无	有限元		55.063	0.419
	优化	3	1.224	53.723	0.673
	有限元			52.854	0.642
凸 槽	优化	3	1.501	51.104	0.814
	有限元			50.658	0.847

者的误差很小,进一步说明了径向基函数模型和理想点优化方法的有效性,满足工程设计的要求。

由表 3 可知,优化后凹、凸 2 种诱导槽结构的 CFE 值分别为 0.642 和 0.847,比原模型各提高了 53.22%、102.15%,可见与原模型相比 2 种诱导槽结构的碰撞力曲线更趋于平稳,诱导凸槽结构优于诱导凹槽结构(下页图 7);而 SEA 仅各降低了 4.01%、7.99%。下页图 7、图 8 分别给出了该多目标问题达到最优时,在碰撞过程中压溃力和吸收能量随压溃位移和压溃时间的变化情况,并将其与相

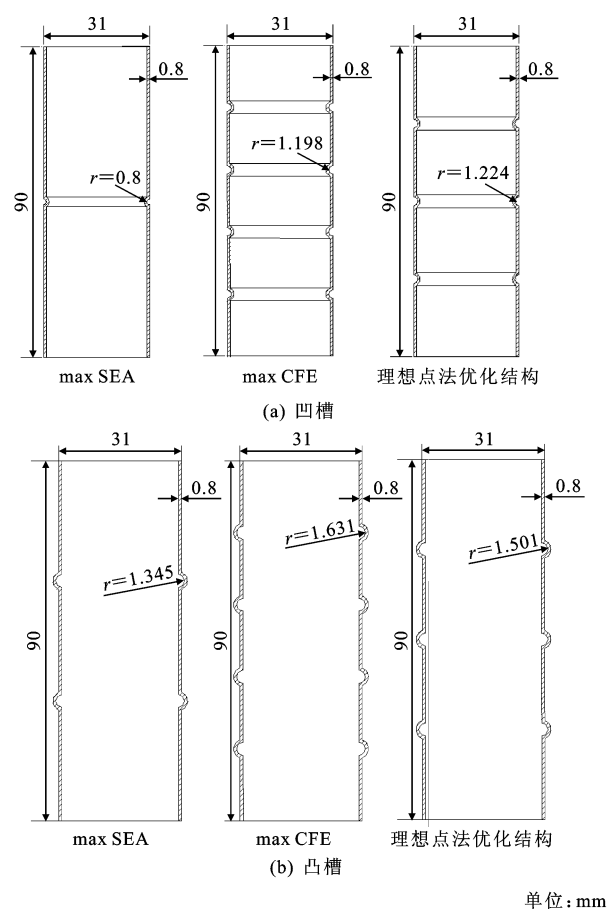


图 6 优化后薄壁结构模型

Fig. 6 Optimized thin-walled structure models

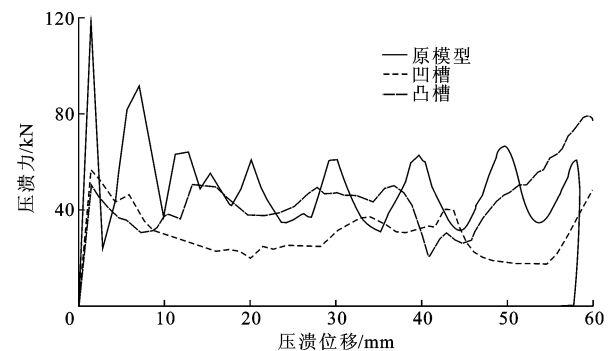


图 7 压溃力随压溃位移变化的对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of axial force-crushing vs. displacement

应条件的原模型进行比较。从压溃载荷图 7 可以看出,与原模型相比,凹、凸 2 种诱导槽结构最大峰值压溃力各降低了 52.1%、57.49%,最大峰值压溃力更接近平均压溃力,压溃力曲线平稳。可见以 CFE 为优化设计指标是合理的,CFE 综合考虑了最大峰值压溃力和压溃力曲线的平稳性。从吸收能量图 8 可以看出,优化后构件所吸收的能量并没有很大程度的减少,在碰撞时间为 10 ms 时,优化后构件所吸收的能量与同时间原模型吸收的能量比较相近了,

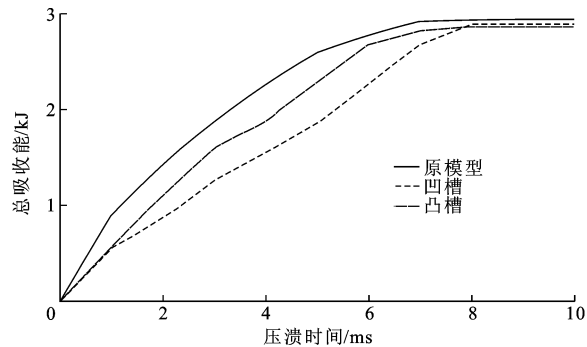


图 8 吸收能量随冲击时间变化的对比曲线

Fig. 8 Comparison curves of absorbing energy vs. time

可见优化后构件的抗撞性得到了显著提高。

优化后凹、凸 2 种诱导槽结构在碰撞过程中发生叠缩变形如图 9 所示。这种变形模式有利于结构在变形过程中吸收更多的碰撞动能,这是由于塑性变形首先在诱导槽处开始,大部分的冲击能在诱导槽处以塑性变形的方式被吸收。可见增加圆弧形诱导槽结构后,薄壁构件的抗撞性能可大大提高。

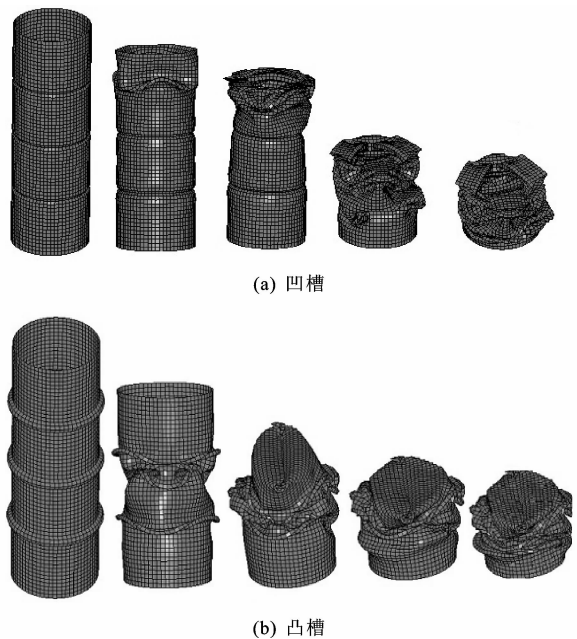


图 9 优化后构件叠缩变形

Fig. 9 Progressive folding deformation of optimal components

## 4 结 语

(1)数值分析结果表明,2 种诱导槽结构均实现了在保证不减少薄壁构件吸能能力的情况下达到了减小最大峰值压溃力、使压溃力曲线平稳的目的。

(2)从压溃力效率和峰值压溃力角度来看,优化后凹、凸 2 种诱导槽结构的压溃力效率比原模型分别提高了 53.22%、102.15%,而最大峰值压溃力比原模型各减小了 52.1%、57.49%,压溃力曲线与原

模型相比更趋于平稳,诱导凸槽结构压溃力曲线平稳性要优于诱导凹槽结构,从而有效地保证了碰撞过程中乘员的安全性。

(3)从吸能角度来看,优化后凹、凸 2 种诱导槽结构所吸收的能量并没有很大减少,在碰撞时间为 10 ms 时,所吸收的能量分别达到了同一时间原模型吸收的能量。

(4)从比吸能角度来看,由于施加诱导槽造成结构整体质量增加,导致优化后凹、凸 2 种诱导槽结构的比吸能分别比原模型各减少了 4.05%、7.99%,与大幅降低的最大峰值压溃力相比,很好地达到了提高抗撞性的目标。

(5)引入的 2 种均匀分布圆弧形诱导槽结构均提高了薄壁结构的抗撞性,对于非均匀分布诱导槽结构对薄壁构件抗撞性的影响有待进一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 郝亮,徐涛,崔健,等.参数化诱导槽设计的吸能盒结构抗撞性多目标优化[J].吉林大学学报:工学版,2013,43(1):39-44.  
HAO Liang,XU Tao,CUI Jian,et al. Multi-objective optimization for crashworthiness of crash box with parameterized inducing grooves[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2013,43(1):39-44. (in Chinese)
- [2] 亓昌,董方亮,杨妹,等.锥形多胞薄壁管斜向冲击吸能特性仿真研究[J].振动与冲击,2012,31(24):102-107.  
QI Chang,DONG Fang-liang,YANG Shu,et al. Energy-absorbing characteristics of a tapered multi-cell thin-walled tube under oblique impact[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(24):102-107. (in Chinese)
- [3] LEE S H,KIM H Y,OH S I. Cylindrical tube optimization using response surface method based on stochastic process[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,130/131(12):490-496.
- [4] SHAKERI M,MIRZAEIFAR R,SALEHGHAFFARI S,et al. New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes[J]. Mechanical Engineering Science,2007,221(8):869-885.
- [5] HOSSEINIPOUR S J,DANESHI G H. Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression[J]. Thin-walled Structures,2003,41(1):31-46.
- [6] 张涛,刘士光,肖汉林,等.高速冲击下薄壁组合构吸能特性研究[J].爆炸与冲击,2006,26(5):395-403.  
ZHANG Tao,LIU Tu-guang,XIAO Han-lin,et al.

Energy absorption performance of thin-walled structures with triggering holes subjected to high-speed axial impact[J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(5):395-403. (in Chinese)

- [7] 王海亮,林忠钦,金先龙.基于响应面模型的薄壁构件抗撞性优化设计[J].应用力学学报,2003,20(3):61-66.  
WANG hai-liang,LIN Zhong-qin,JIN Xian-long. Optimal design of thin-walled sections for structural crashworthiness based on the response surface model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2003,20(3):61-66. (in Chinese)
- [8] MASSIMILIANO A,GIORGIO C. Optimization of a vehicle energy absorbing steel component with experimental validation[J]. International Journal of Impact Engineering,2007,34(4):843-858.
- [9] JIN S Y,ALTENHOF W. Comparison of the load/displacement and energy absorption performance of round and square AA6061-T6 extrusions under a cutting deformation mode[J]. International Journal of Crashworthiness,2007,12(3):256-278.
- [10] TAI Y S,HUANG M Y,HU H T. Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2010,53(1):1-8.
- [11] 刘文卿.试验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.  
LIU Wen-qing. Design of experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005. (in Chinese)
- [12] FANG H,RAIS-ROHANI M,LIU Z,et al. A comparative study of metamodeling methods for multiobjective crashworthiness optimization[J]. Computers and Structures,2005,83(25/26):2121-2136.
- [13] JIN R,CHEN W,SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2001,23(1):1-13.
- [14] RAIS-ROHANI M,SINGH M N. Comparison of global and local response surface techniques in reliability-based optimization of composite structures[J]. Structural Multidisciplinary Optimization,2004,26(5):333-345.
- [15] FANG H,WANG Q. On the effectiveness of assessing model accuracy at design points for radial basis functions[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering,2008,24(3):219-235.
- [16] 曹卫华,郭正.最优化技术方法及 MATLAB 的实现[M].北京:化学工业出版社,2005.  
CAO Wei-hua,GUO Zheng. Optimization methods and the realization of MATLAB[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2005. (in Chinese)