

金字塔型波纹薄壁管抗撞性分析和优化

胡晓光, 隋允康, 薛贵林, 杜家政

北京工业大学工程数值模拟中心, 北京 100124

摘要 为提高薄壁结构吸能元件的抗撞性能, 在传统的光滑圆柱壳表面添加金字塔型波纹。基于显式有限元技术, 应用 LS-DYNA 软件对这种新型的金字塔型波纹薄壁管进行抗撞性分析。采用 Fibonacci 搜索方法搜索该波纹管的正多边形截面的最佳边数, 以波纹的高度和倾角为设计变量, 以结构的吸能为优化目标建立优化模型。采用响应面法拟合目标函数, 进行优化设计。半径为 40mm 的波纹管算例的优化结果表明, 金字塔型波纹管在截面为正十一边形、波纹高度为 80mm、金字塔形波纹的顶点到中心轴的距离为 38.92mm 时吸能最大, 吸能能力比光滑表面的圆截面结构提高 31.88%。新提出的波纹结构可用于实际吸能元件的设计, 并为进一步研究奠定基础。

关键词 抗撞性; 波纹管; LS-DYNA; Fibonacci 搜索; 优化设计

中图分类号 TB122

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0079-07

Crashworthiness Analysis and Optimization of Thin-walled Tube with Pyramidal Folding Patterns

HU Xiaoguang, SUI Yunkang, XUE Guilin, DU Jiazheng

Numerical Simulation Center for Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Thin-walled structures are often used as energy absorbers to dissipate the kinetic energy of impacting in case of accident. In order to improve the crashworthiness of thin-walled structures, the pyramidal folding pattern is added to the smooth surface of traditional cylindrical shell. LS-DYNA is adopted to analyze the new tube's crashworthiness with explicit Finite Element (FE) technique. Fibonacci Search method is used to search the optimal number of sides of polygon of the new model's section. With the height and obliquity of the pattern as optimization variables, the absorbed energy as the optimization objective, the optimization model is built. Response Surface Method is used to obtain an approximation of the implicit quadratic function to make the optimization objective explicit. And then, the optimization problem can be solved. Take 40mm-radius tube with pyramidal folding patterns as an example, the optimization results show that, when the side number of the section polygon is 11, the pattern's height is 80 mm and the distance from pattern peak to axis is 38.92mm, the pyramidal folding pattern tube has the best ability in absorbing energy. Compared with the traditional smooth cylindrical shell, the energy-absorption ability is improved by 31.88%. The new folding pattern structure proposed in this paper can be applied in designing practical energy absorption components. The directions for further study are suggested.

Keywords crashworthiness; tube with folding pattern; LS-DYNA; Fibonacci Search; optimization design

0 引言

薄壁管结构(如圆柱管、方管、波纹管以及泡沫铝填充结构等)具有优良的吸能性能, 被作为吸能元件广泛应用于航天、航空、汽车以及轮船等领域的抗撞性设计中^[1-3]。对于结构的截面形状和薄壁表面添加的波纹对吸能性能的影响研究,

国内还比较少, 通常采用实验和计算机仿真模拟相结合的方法。结构抗撞性分析属于非线性力学问题, 传统实验方法要消耗大量的人力财力, 且碰撞过程在极短的时间内完成, 进行实验观察有较大难度。随着计算机技术的迅速发展, 数值实验成为研究结构抗撞的重要手段。本文提出带金字塔型波

收稿日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872012); 北京市自然科学基金项目(3093019); 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室基金项目(GZ0819)

作者简介: 胡晓光, 硕士研究生, 研究方向为计算固体力学、结构和多学科优化, 电子信箱: huxiaoguang_1985@163.com; 隋允康(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030105001M), 教授, 研究方向为计算固体力学、结构和多学科优化、智能结构最优控制, 电子信箱: yysui@bjut.edu.cn

纹的新型吸能管,并通过数值试验方法同普通圆截面薄壁管进行了抗撞性的对比分析。金字塔型波纹薄壁管的分析过程复杂,拟优化的目标函数是设计变量的隐函数,欲进行优化设计,敏度分析的难度非常大,本文采用响应面方法近似拟合目标函数。

1 数值模拟

应用全世界范围内最知名的有限元显式求解程序 ANSYS/LS-DYNA^[4]对表面带有金字塔型波纹的新型薄壁管受轴向冲击的过程进行数值模拟,研究车辆的抗撞吸能元件。应用 Fibonacci 搜索对薄壁管的多边形截面边数进行优化搜索求解,同时以波纹的高度和波纹面的倾斜角为设计变量,以结构吸能为优化目标,进行优化设计,得到一种全新的吸能效果有较大改善的汽车用吸能管元件模型。

1.1 薄壁圆管数值模拟

1.1.1 几何模型建立

圆截面薄壁管的半径 $R=40\text{mm}$,高度 $H=400\text{mm}$,如图 1 所示。

1.1.2 网格划分、材料设置和接触定义

模型采用四边形单元,用映射的方法划分网格,单元边长为 4mm (图 2)。单元采用显式壳单元 SHELL163,单元算法使用能够容忍弯曲能力的 Belytschko-Wong-Chinang 算法。壳单元的剪切因子为 $5/6$ 、壳单元的厚度为 2mm ,为保证壳单元非线性分析精度,厚度大于 1.5mm 时,厚度方向的积分点数设为 5。薄壁管材料采用双线性同性材料,其弹性模量、屈服应力、线性剪切模量分别为 210 、 0.23 、 10GPa ,泊松比为 0.3 。在圆柱壳碰撞变形过程中,很难人工判断壳单元发生接触的方向,而 Automatic 接触方式主要是针对壳单元的方向问题,接触在壳单元的两侧都发生,适合各种复杂的接触行为。由此在接触设置中采用 ANSYS 中的 Antomatic, Surface to Surface 接触类型,定义其接触面的静、动摩擦系数都为 0.1 。

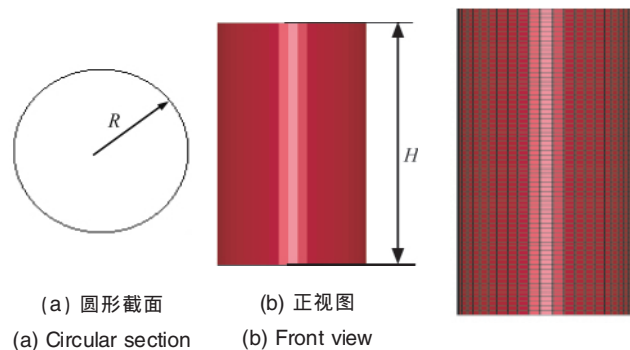


图 1 几何模型
Fig. 1 Geometric mode

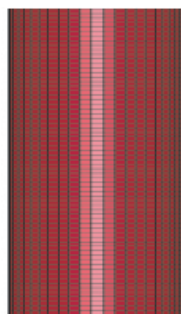


图 2 网格模型
Fig. 2 Meshed model

1.1.3 边界条件、冲击载荷和求解设置

在边界条件设置中,约束圆柱壳下端边界节点在 z 方向

的平动自由度和上端边界节点在 x 、 y 、 z 方向上的转动以及 x 、 y 方向上的平动自由度。在圆柱壳上端边界节点施加一个在 2ms 的时间内冲击压缩 200mm 的冲击载荷。

定义沙漏黏性属性为 5 (stiffness form of type 2, 即 Flanagan-Belytschko),壳单元在冲击大变形时,网格有较大的畸变,使得简单连接区域变成多连接,以及网格重叠造成负质量,将导致时间步长缩小,求解精度降低,甚至停止计算。采用自适应划分网格方法解决这个问题,当单元变形较大时,将单元细分为更小的单元以改善精度。

1.1.4 模拟结果与分析

完成求解设置后提交 LS-DYNA 进行计算,在 LS-DYNA 的后处理程序 lsprepostd 读取结果文件。图 3 为圆形截面薄壁管压缩过程中的能量关系曲线图,压缩过程中沙漏能接近于 0,远小于冲击分析中沙漏能小于 5% 的要求,说明模型的精确度很高。

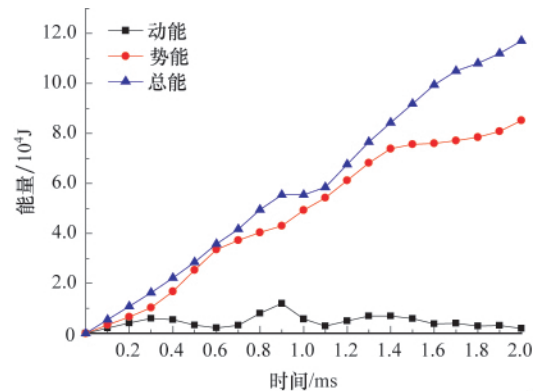


图 3 圆形截面薄壁管的能量关系曲线
Fig. 3 Energy curve of the thin-walled tube with circular section

1.2 金字塔型波纹薄壁管数值模拟

波纹管的几何模型如图 5 所示,其中 R_n 是与半径为 R

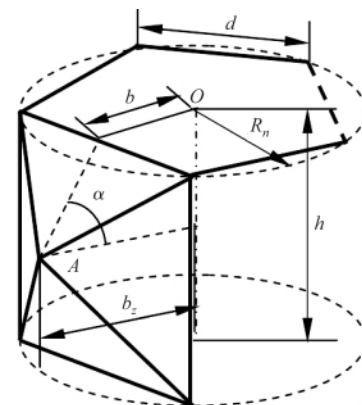


图 4 波纹管模型部分几何参数
Fig. 4 Some geometric parameters of folding pattern tube

的圆等周长的正多边形外接圆半径,波纹高度 $h/2$,三角形波纹都为等腰三角形,波纹面与水平面的夹角为 α ,三角形波纹的顶点 A 到中心轴的距离为 b_z ,多边形的边长为 d ,多边形中心到边的距离为 b 。各个参数间的关系为, $\pi R = nR_n \sin(\pi/2n)$ 、 $b = R_n \cos(\pi/2n)$ 、 $\tan \alpha = h/[2(b_z - b)]$ 。

应用 ANSYS 的 APDL 语言建立参数化模型,截面为正五边形(优化前边数随机取),其外接圆半径为 R_n ,正五边形周长与半径为 40mm 的圆等周长。波纹管长度 $L=400$ mm,波纹个数(波纹个数等于波纹管长度 L 除以波纹高度 $h/2$)为 16 个时的折纹管,几何模型如图 5 所示。

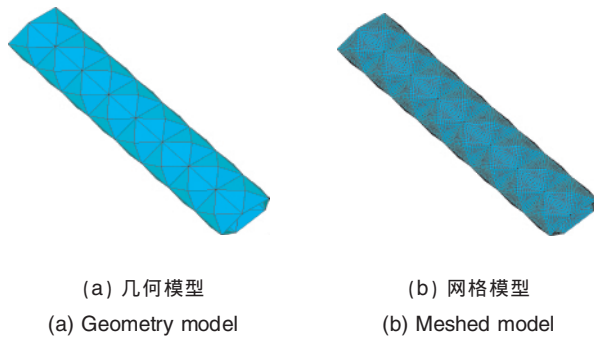


图 5 正五边形截面波纹管模型

Fig. 5 Model of folding pattern tube with regular pentagon section

材料、边界载荷和求解设置均与圆截面薄壁管相同,图 6 为正五边形截面波纹管在压缩过程中的能量关系曲线图,压缩过程中沙漏能接近于 0,说明模型的模拟精确度很高,能够保证求解精度。

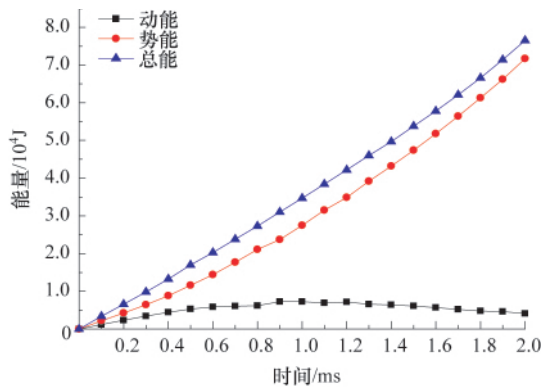


图 6 正五边形截面波纹管冲击载荷下的能量曲线

Fig. 6 Energy curve of folding pattern tube with regular pentagon section under impact load

2 金字塔型波纹薄壁管的结构优化

2.1 优化方法

2.1.1 Fibonacci 数列

Fibonacci 数列是指具有式(1)关系的数列,即

$$F_{k+1} = F_k + F_{k-1} \quad (k \geq 1) \quad F_0 = F_1 = 1 \quad (1)$$

其中, F_{k+1}, F_k, F_{k-1} 分别表示第 $k+1, k, k-1$ 个 Fibonacci 数。

随着数字的增大,两 Fibonacci 数的比值越来越接近黄金分割率,约为 1.618,是一个与圆周率 π 相类似的无限不循环小数。由于相邻两个 Fibonacci 数的比值随序号的增加而逐渐趋于黄金分割比,即 $F_{n-1}/F_n \rightarrow 0.618 \dots, F_{n-2}/F_n \rightarrow 0.382 \dots$ 。在 Fibonacci 搜索中,可以把 F_{n-1}/F_n 看作黄金分割法中 0.618 所对应的点,把 F_{n-2}/F_n 看作 0.382 所对应的点。所以说 Fibonacci 搜索优化方法本质上是离散变量的“黄金分割”方法。

2.1.2 响应面法

响应面法是以试验设计为基础的用于实验模型建立和模型分析的一套统计方法,主要用途包括:选择响应面逼近函数模型(常采用多项式模型);确定一组用于评估响应函数的实验数据点;基于实验结果构造响应逼近函数,并对响应逼近函数的预估性能进行评估;最后将响应面法应用于优化设计。

从概率方面讲,响应面方法的基本原理属于多元线性回归分析。对于 $x \in E^n$,可以构造二次响应面近似函数(当二次项系数为零时为一次函数)

$$\hat{y} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

其中, α_0 为常数项待定系数, α_i 为一次项待定系数, α_{ij} 为二次项待定系数。进一步简化式(2)得到线性函数形式

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m-1} \beta_i x_i \quad (3)$$

其中, β_0 为常数项待定系数, β_i 为一次项待定系数。

要确定 β_0 和 β_i , 需做 $k \geq m$ 次独立试验,得到 k 组数据,代入式(3),得到响应面的近似函数值,假设响应面函数值与试验值之间的误差为 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k)^T$,有

$$\begin{cases} y^{(1)} = (\beta_0 + \sum_{i=1}^{m-1} \beta_i x_i^{(1)}) + \varepsilon_1 \\ y^{(2)} = (\beta_0 + \sum_{i=1}^{m-1} \beta_i x_i^{(2)}) + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y^{(k)} = (\beta_0 + \sum_{i=1}^{m-1} \beta_i x_i^{(k)}) + \varepsilon_k \end{cases} \quad (4)$$

写成矩阵形式,有

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & \cdots & x_{m-1}^{(1)} \\ 1 & x_1^{(2)} & \cdots & x_{m-1}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^{(k)} & \cdots & x_{m-1}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{m-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

即

$$\varepsilon = y - X\beta \quad (6)$$

其中,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & \cdots & x_{m-1}^{(1)} \\ 1 & x_1^{(2)} & \cdots & x_{m-1}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^{(k)} & \cdots & x_{m-1}^{(k)} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{m-1} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(k)} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

利用最小二乘原理使误差的平方和最小,得

$$\varepsilon^T \varepsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \rightarrow \min \quad (7)$$

式(7)的极值条件为

$$\nabla (\varepsilon^T \varepsilon) = \nabla [(y - X\beta)^T (y - X\beta)] = 2(y - X\beta)^T X = 0 \quad (8)$$

得到

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (9)$$

当 $k=m$ 时, $(X^T X)^{-1} X^T = X^{-1}$, 则

$$\beta = X^{-1} y \quad (10)$$

2.2 金字塔型波纹薄壁管优化模型的建立

以金字塔型波纹管在冲击载荷下吸能最大为优化目标,波纹管的正多边形截面边数 n , 波纹高度 $h/2$ 以及波纹角度 α 为设计变量, 建立如下优化模型

$$\begin{aligned} & \text{求 } n \in \{3, 4, \dots, 16\}; h, \alpha \in R^+ \\ & \text{使 } E(n, h, \alpha) \rightarrow \max \quad (11) \\ & \text{s.t. } \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, 20 \leq h \leq 80 \end{aligned}$$

其中, $E(n, h, \alpha)$ 为结构冲击过程中储存的势能。

优化模型中, 截面多边形的边数在正整数集中取值, 属于离散变量; 薄壁结构表面的波纹尺寸取正实数值, 属于连续变量, 如果把两类变量在同一个问题中求解, 将使求解难度增大。考虑离散变量和连续变量的不同特点, 予以分解, 分层进行优化, 把问题按截面边数和波纹尺寸 2 个层次处理。截面边数是离散变量, 只有一个变量, 可以用一维搜索求解, 又因为是正整数变量, 可选用作为离散型黄金分割的 Fibonacci 寻优法。截面层在比较 2 个与离散变量值相应的目标函数值时, 也就很自然地各自对应一个波纹优化问题。于是, 截面层作为外循环进行一维 Fibonacci 寻优, 波纹层作为内循环进行实数非线性规划问题的求解。具体求解策略如下。

- 1) 按照 Fibonacci 寻优法在离散变量取值范围内选取 2 个数, 形成不同截面的薄壁结构;
- 2) 用响应面法和二次规划法求解这 2 个模型, 得到对应的最优值;
- 3) 按照 Fibonacci 寻优法舍去 2 个模型中目标函数值小的变量所在区间, 重复 1)。

执行这 3 步迭代, 直到搜索到最优点为止。整体优化流程如图 7 所示。

2.3 金字塔型波纹薄壁管优化求解

优化模型中含有 3 个设计变量, 截面多边形边数 n 为离散变量, 波纹高度 $h/2$ 和波纹夹角 α 为连续变量。为方便建模, 将 α 转化为波纹顶点与波纹管轴心的距离 $b_z = h \cot(\alpha) + b$ 。把模型分层进行优化, 应用 Fibonacci 搜索对 n 进行最外层截面层的优化^[5-7], 如图 8 所示。

以波纹高度 $h/2$ 、波纹角度 α 的等效变量 b_z 为连续变量, 用一个非显式二次函数做目标函数, 建立优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{求 } h, b_z \in R^+ \\ & \text{使 } E(h, b_z) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 b_z + \beta_3 h^2 + \beta_4 b_z^2 \rightarrow \max \quad (12) \\ & \text{s.t. } b \leq b_z \leq b + h \cot(\pi/6), 20 \leq h \leq 80 \end{aligned}$$

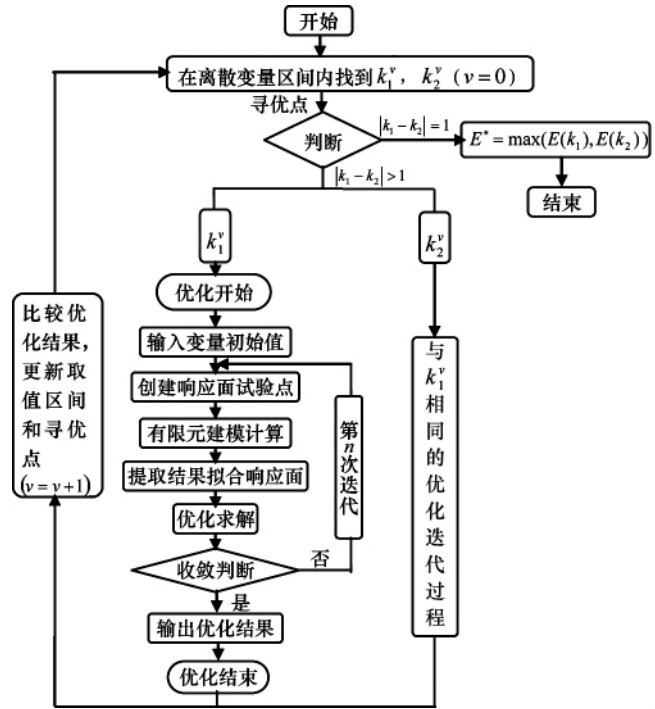


图 7 优化流程图

Fig. 7 Flowchart of optimization

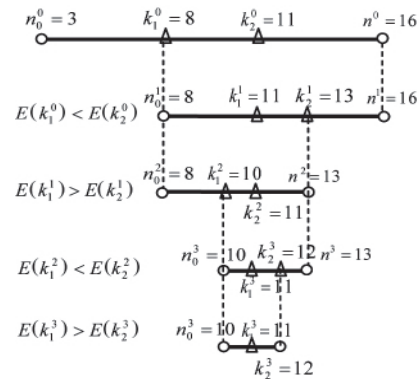


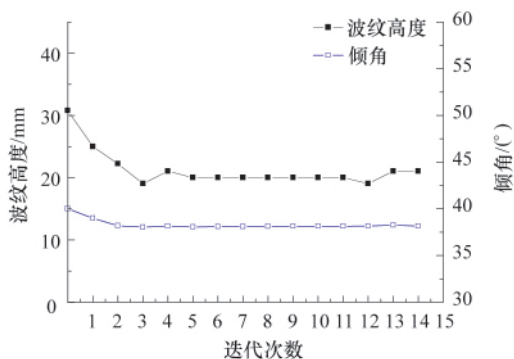
图 8 Fibonacci 搜索过程

Fig. 8 Process of Fibonacci search

将设计变量多边形边数截面 n 从优化模型中分离出来, 应用 Fibonacci 搜索进行求解, 对波纹高度和波纹夹角采用响应面方法进行函数拟合^[8-9]。目标函数转化为无交叉项的二次函数, 如式(12)所示, $\beta_i (i=0, 1, 2, \dots, 4)$ 为未知系数。采用中心对称法设计试验点^[10], 用响应面法拟合目标函数, 将其转化为一个近似显式二次函数, 采用 Matlab 编制的二次规划程序对以上优化模型进行优化求解。

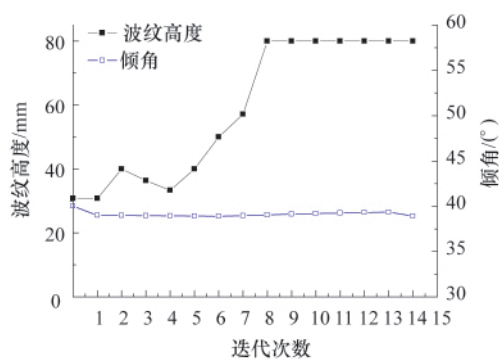
设计变量 $n (n=3, 4, \dots, 16)$ 为截面正多边形边数。根据 Fibonacci 搜索方法, 要先求解 $n=8$ 和 $n=11$ 时截面波纹管的最大吸能。2 个模型的设计变量、目标值最大吸能的迭代过程如图 9 所示。

通过对正八边形截面与正十一边形截面波纹管模型的



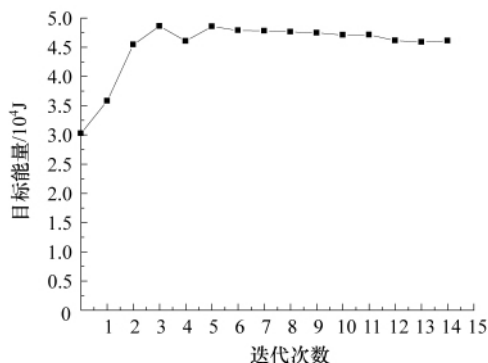
(a) $n=8$ 时设计变量迭代过程

(a) Iterations of variables when $n=8$



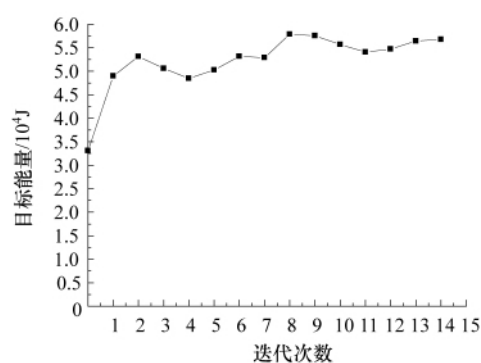
(b) $n=11$ 时设计变量迭代过程

(b) Iterations of variables when $n=11$



(c) $n=8$ 时目标值迭代过程

(c) Iterations of objective when $n=8$



(d) $n=11$ 时目标值迭代过程

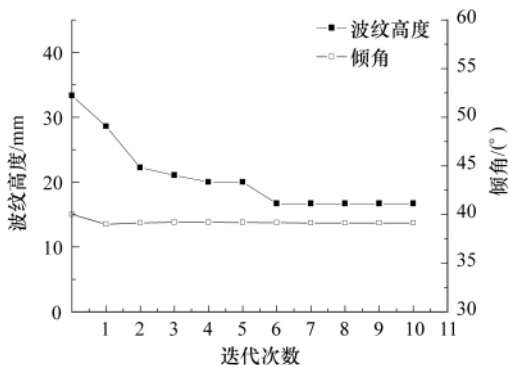
(d) Iterations of objective when $n=11$

图 9 正八边形和正十一边形截面波纹管设计变量与目标值迭代过程

Fig. 9 Iterations process for variables and objective of folding pattern tube with regular octagon and hendecagon section

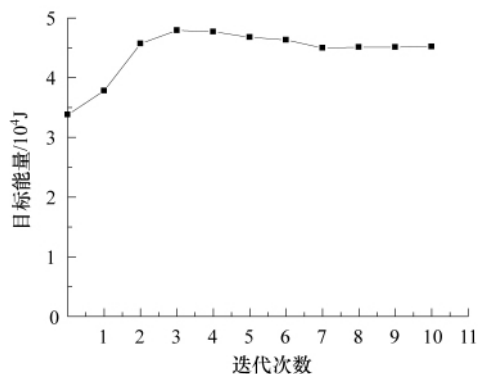
优化,得到 $E(11, h, \alpha)$ 大于 $E(8, h, \alpha)$ 。根据 Fibonacci 搜索,再从正八边形到正十六边形截面波纹管中寻优。需比较 $n=11$

和 $n=13$ 的最大吸能。当 $n=13$ 时,即正十三边形截面波纹管优化迭代过程如图 10 所示。



(a) $n=13$ 时设计变量迭代过程

(a) Iterations of variables when $n=13$



(b) $n=13$ 时目标值迭代过程

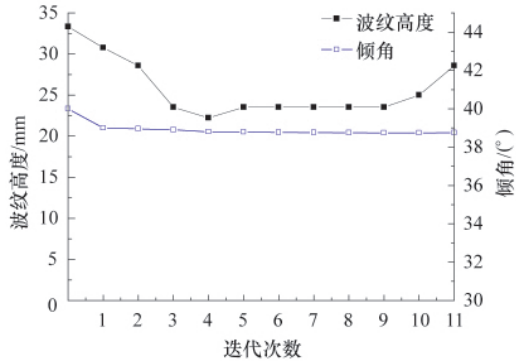
(b) Iterations of objective when $n=13$

图 10 正十三边形截面波纹管设计变量与目标值迭代过程

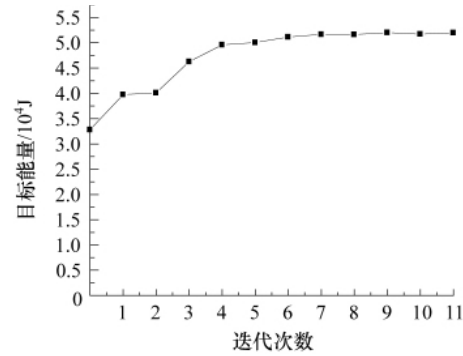
Fig. 10 Iterations process for variables and objective of folding pattern tube with regular tridecagon section

通过对正十三边形截面与正十一边形截面波纹管模型的优化,得到 $E(11, h, \alpha)$ 大于 $E(13, h, \alpha)$ 。根据 Fibonacci 搜索,舍去边数大于 13 的正多边形截面波纹管,从正八边形到正十

三边形截面波纹管中寻优。比较 $n=11$ 和 $n=10$ 的吸能性能,即正十一和正十边形截面波纹管的最大吸能, $E(11, h, \alpha)$ 已经在上一次搜索中求得。当 $n=10$ 时,优化迭代过程如图 11 所示。



(a) $n=10$ 时设计变量迭代过程
(a) Iterations of variables when $n=10$



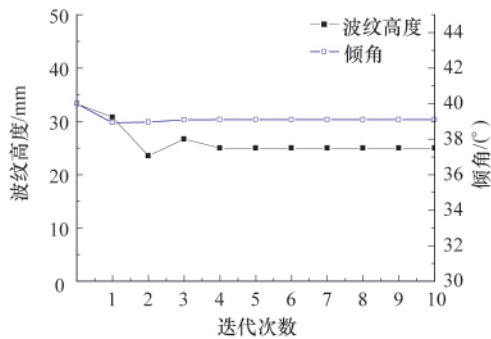
(b) $n=10$ 时目标值迭代过程
(b) Iterations of objective when $n=10$

图 11 正十边形截面波纹管设计变量与目标值迭代过程

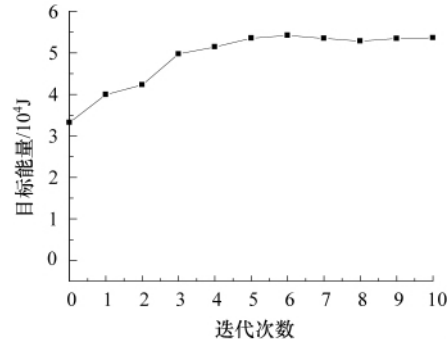
Fig. 11 Iterations process for variables and objective of folding pattern tube with regular decagon section

通过对正十边形截面与正十一边形截面波纹管模型的优化,得出 $E(11, h, \alpha)$ 大于 $E(10, h, \alpha)$ 。根据 Fibonacci 搜索,舍去边数小于 10 的区间,在正十边形到正十三边形截面波

纹管中寻优。此时需要求解 $n=11$ 和 $n=12$,即正十一边形和正十二边形截面波纹管的最大吸能。 $n=12$ 时,优化迭代过程如图 12 所示。



(a) $n=12$ 时设计变量迭代过程
(a) Iterations of variables when $n=12$



(b) $n=12$ 时目标值迭代过程
(b) Iterations of objective when $n=12$

图 12 正十二边形截面波纹管设计变量与目标值迭代过程

Fig. 12 Iterations process for design variables and objective of folding pattern tube with regular dodecagon section

比较正十二边形截面与正十一边形截面波纹管的冲击过程,前者的最大吸能 $E(11, h, \alpha)$ 大于后者 $E(10, h, \alpha)$ 的。根据斐波那契搜索,应该舍去边数大于 12 的正多边形截面波纹管,这样就只剩正十、正十一和正十二边形截面的波纹管,这 3 种截面的波纹管的最大吸能都已计算得到,通过比较可知:当金字塔型波纹管截面为正十一边形,在 $h=80\text{mm}$, $b_2=38.92\text{mm}$ 时吸能最大。

2.4 优化后的金字塔型波纹管冲击模拟结果

优化结果表明,正十一边形截面薄壁管在 $h=80\text{mm}$, $b_2=38.92\text{mm}$ 时吸能最大,对优化所得模型进行 200mm 冲击压缩,其最大吸能为 $1.123 \times 10^5 \text{J}$,变形过程如图 13 所示。

3 结论

应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对带有金字塔型波纹

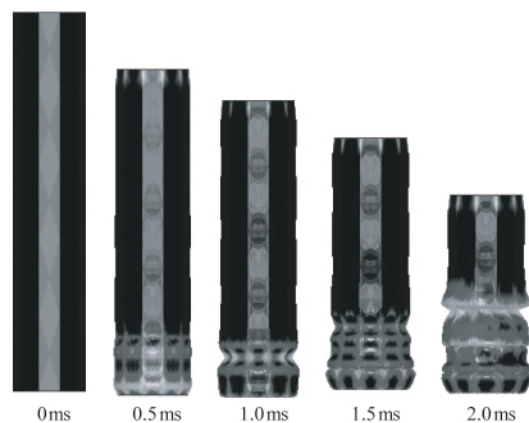


图 13 正十一边形截面薄壁管的压缩过程

Fig. 13 Compression of thin-walled tube with regular hendecagon section

的薄壁管进行抗撞性数值模拟,并对金字塔型波纹管的截面多边形的边数、波纹高度以及波纹夹角应用 Fibonacci 搜索和响应面法相结合进行优化。Fibonacci 搜索通过 4 次搜索 5 次冲击的计算机模拟即可从 13 个变量值中得到最优边数,极大地提高了效率;在确定边数后,应用响应面法和二次规划求解得到波纹尺寸的最优值。结果表明,金字塔型波纹薄壁管在截面为正十一边形, $h=80\text{mm}$, $b_z=38.92\text{mm}$ 时吸能最大,这种新型的波纹管在优化后吸能性能比普通的光滑圆柱薄壁管提高了 31.88%,效果显著,为实际工程应用提供了一种新型的高性能吸能元件。

参考文献 (References)

- [1] Pugsley A, Macaulay M. The large scale crumpling of thin cylindrical columns [J]. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1960, 13(1): 1-9.
- [2] Hanssen A G, Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(5): 475-477.
- [3] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial load[J]. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1969, 13: 10-15.
- [4] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 23-60.

- Bai Jinze. Underlying Rationale and Case Studies of LS-DYNA3D[M]. Beijing: Science Press, 2005: 23-60.
- [5] 隋允康. 建模·变换·优化——结构综合方法新进展[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996: 354-361.
- Sui Yunkang. Modelling transformation and optimization: New developments of structural synthesis method. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996: 354-361.
- [6] Subasi M, Yildirim N, Yildiz B. An improvement on Fibonacci search method in optimization theory[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2004, 147: 893-901.
- [7] 张延年, 刘斌, 朱朝艳. 离散变量优化设计的改进斐波那契遗传算法 [J]. 机械强度, 2006, 28(1): 55-60.
- Zhang Yannian, Liu Bin, Zhu Chaoyan. *Journal of Mechanical Strength*, 2006, 28(1): 55-60.
- [8] Yamazaki K, Han J. Maximization of the crushing energy absorption of tubes[J]. *Structural Optimization*, 1998, 16: 37-46.
- [9] Forsberg J. On polynomial response surface and Kriging for use in structural optimization of crashworthiness [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2005, 29(3): 232-243.
- [10] 隋允康, 白海波. 基于中心点精确响应面法的板壳结构优化[J]. 机械设计, 2005, 22(11): 10-11.
- Sui Yunkang, Bai Haibo. *Journal of Machine Design*, 2005, 22(11): 10-11.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“中国徐州第四届国际 甘薯学术研讨会暨 第四届中日韩甘薯 学术研讨会”征文

中国作物学会将于 2010 年 11 月在江苏省徐州市召开“中国徐州第四届国际甘薯学术研讨会暨第四届中日韩甘薯学术研讨会”。会议主题是: 甘薯——粮食与能源安全。

征文内容包括: 甘薯遗传育种、种质资源与育种技术, 甘薯生理生化、耕作栽培与施肥技术, 甘薯病虫害与综合防治技术, 甘薯营养保健功能、食品开发及能源化利用技术, 其他相关领域。

征文截止时间: 2010 年 6 月 30 日。

联系方式: 江苏省徐州市城东大道徐州市农业科学院内 (221121), 电话: 0516-83257837, 82189210, 电子邮箱: cqh75@yahoo.cn, zjsjyf@163.com。

·学术动态·



“中国病理生理学会 第九届全国代表大会 暨学术会议”征文

中国病理生理学会将于 2010 年 11 月 1—4 日在南京市召开“中国病理生理学会第九届全国代表大会暨学术会议”。征文内容包括: 心血管疾病的基础与临床, 干细胞生物学及应用, 肿瘤发病学及其干预, 炎症与免疫, 神经生物学与疾病。

详见会议网站: <http://www.caop.ac.cn/readnewstg.asp?id=770&bigclassname=xuehui&smallclassname=活动/会议&SpecialID=0>; 征文截止时间: 2010 年 6 月 30 日。

联系方式: 南京市汉中中路 140 号南京医科大学基础医学院病理生理学系 (210029) 李跃华, 电话: 025-86862886, 传真: 025-86862735, 电子邮箱: pathophysiology-nanjing@yahoo.com.cn。