

Crushing analysis of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations

Chen xiaoyong¹, Liu Meigang¹, Liu bo¹, Lei Zhengbao¹

¹ School of Vehicle and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, 410004

Email: 1363321355@qq.com

Abstract: In this paper, the slotted pipe deformation and energy absorption characteristics of thin-walled tubes under axial impact load was analyzed by the finite element software LS-DYNA. The number of indentations and the radius of it were studied. It is found that the tubes with indentations have better crush performance than tubes without indentations. Maximum CFE requires large number of indentations with high radius, while maximum SEA requires small number of indentations with low radius.

Key words: thin-walled tubes; indentations; tapered; crashworthiness

轴向冲击载荷下开槽薄壁锥形管吸能特性的研究

陈小勇¹, 刘美刚¹, 刘博¹, 雷正保¹

¹ 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙, 中国, 410114

Email: 1363321355@qq.com

摘要: 利用有限元软件 LS-DYNA 对开槽薄壁锥形圆管在轴向冲击载荷作用下的变形规律和吸能特性进行了数值仿真分析。通过改变诱导槽的数目、半径来研究开槽锥形薄壁圆管的耐撞性。结果表明: 在研究的范围内, 开槽薄壁圆管的破坏模式为外延式破坏模式, 其变形过程为动态渐进屈曲; 随着诱导槽数目的增加, 半径的增大, 其峰值冲击力在增大, 比吸能也在增大。

关键字: 薄壁管; 诱导槽; 锥形; 耐撞性

1 引言

金属薄壁管作为一种低成本、高效率的缓冲吸能构件, 被广泛应用于车辆、船舶、航空航天等各种交通工具的冲击耗能系统中^[1-6]。在汽车设计领域, 其耐撞性设计更是当前研究的重点。各国学者针对金属薄壁管结构的耐撞性进行了大量的研究, 但大多都集中在轴向冲击载荷下金属薄壁管吸能特性的研究^[7]。由于失稳现象的存在, 薄壁直管的吸能特性被削弱, 换句话说, 薄壁锥管相对薄壁直管有着更好的吸能特性, 因此本研究选取薄壁锥管为研究对象。

文献^[8]以单锥管和双锥管作为吸能元件, 对比了他们的碰撞性能, 并对其静态特性和动态特性进行了分析。文献^[9]对比了静态载荷下三角形薄壁直管和锥管的吸能特性其结果表明, 薄壁锥管更加优秀。文献^[10]对锥形薄壁方管进行了优化设计, 他以方管的小截面尺寸, 壁厚以及锥角为设计变量, SEA 和 CFE 为优化目标, 并采用响应面法建立了函数关系^[11]。但大多数的研究都忽略了现实生活中的碰撞情况, 把太多的注意力放在了轴向载荷的情况下。斜向冲击载荷下, 薄壁管同时受到轴向力以及斜向力的作用, 此时薄壁管不在是单纯的轴向压溃, 更容易产生弯曲这种情况。文献^[12]对斜向冲击下锥形方管进行了参数研究, 他们发现多胞管有着更好的吸能特性。文献^[13]对薄壁空管和泡沫填充的薄壁管进行了研究, 他们发现当薄壁管弯曲时, 吸能特性大幅降低。

在现在的研究中, 还很少有人对斜向冲击载荷下带有诱导槽的锥形薄壁圆管的多目标耐撞性优化进行研究。本研究对开有导向槽的锥形薄壁圆管进行了评估, 并对其进行了优化设计, 结果显示优化后的薄壁管吸能性能有了很大的提升。

2 仿真模型

2.1 有限元建模

利用有限元前处理软件 HYPERMESH 建立的锥胞管有限元模型如图 2 所示, 采用适合于大变形分析的 Belytschko-Tsay 四节点薄壳单元建模, 考虑到仿真精度和求解效率的要求, 壳单元沿厚度方向取 3 个积分点, 内采用缩减积分, 元特征长度取 2 mm。尽管锥胞管具有轴对称性, 采用非线性显式有限元求解器 LS-DYNA 对斜向冲击下锥胞管的响应进行数值仿真。分析过程采用自动单面接触算法 (CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE) 以考虑管与刚性墙之间, 及管壁自身变形可能产生的接触。计算中同时考虑管与刚性墙之间的摩擦以及管自身的摩擦作用, 与面间的静、动摩擦系数分别取 0.3, 0.2。结构大端节点施加所有六个自由度的位移约束以模拟固支边界条件。对于动态变形需要考虑应变率对结果的影响, 这里采用 Cowper-Symonds 本构关系, 动态屈服硬化参数 $C=40$, $p=5$ 。

本研究中锥度, 壁厚, 诱导槽的数目和半径为设计变量。锥管的高度为 180mm, 是个常数, 一块 1500kg 的刚性壁以 9m/s 的初速度冲击该结构。

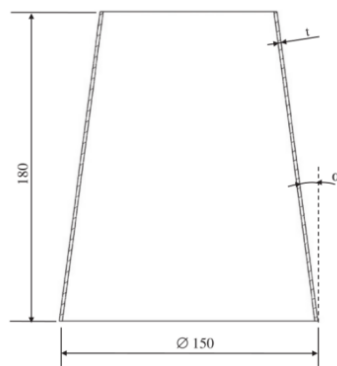


Fig.1.The geometry of the thin walled tube(without axisymmetric indentations)

图 1.薄壁管几何图 (没有诱导槽)

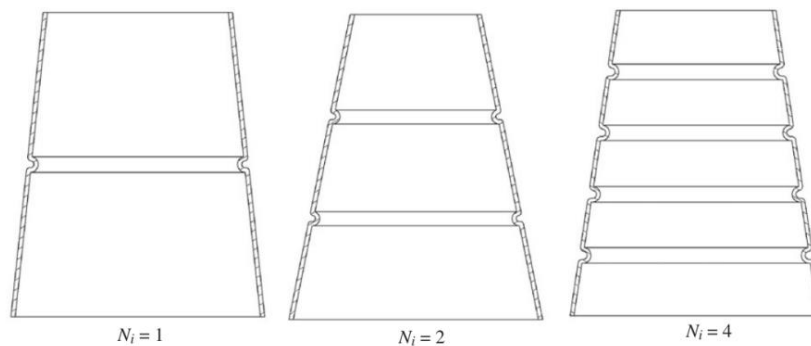


Fig.2.The geometry of the thin-walled tube(with axisymmetric indentations)

图 2.薄壁管几何图 (有诱导槽)

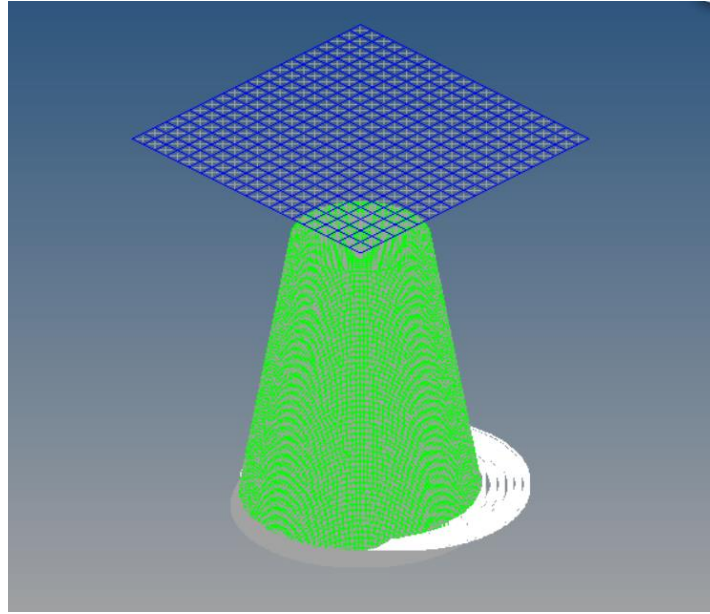


Fig.3.Finite element mesh of the tubes
图 3.薄壁管有限元模型

3.模型验证

为了验证上述建立的有限元模型的可靠性，从数值分析结果中提取能量曲线进行检验。图 3 给出了开孔管 w1-2 的能量时程曲线和能量比率的时程曲线。由图 3(a)可知，动能和内能的总和等于总能量，在整个变形过程中能量状态是守恒的，且沙漏能占总能量的比例不超过 5%。在变形过程中能量比率(即总能与初始能量之比)始终在 1.0 附近波动且波动幅度不超过 0.0006，如图 3(b)所示。说明有限元模型计算精度很高，满足模拟计算的要求。

3.1 评价标准

峰值碰撞力 F_{max} 是一个重要的评价指标，根据生物力学的要求，在设计吸能结构时，必须使得峰值碰撞力小于规定值。能量吸收用以下表达式表示：

$$E_a = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

比吸能表达式为

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (2)$$

比吸能(SEA)越大，其薄壁结构的吸能效果越好。为了获得更高的 (SEA)，结构的质量越小越好

3.2 实验设计

试验设计是优化设计中的重要组成部分，常见的实验设计方法有正交试验设计、中心组合设计、Box-Behnken 设计、拉丁超立法设计等方法。本研究中选用正交实验设计。其正交表如表 1：

Label.1.Label of desin of experiment

表一.试验设计表

实验组数	数目	半径	比吸能/kj	峰值碰撞力 k/N
1	1	6	21.5	555.3
2	5	3	21.6	570.3
3	3	6	18.1	508.2
4	3	9	17.9	494.3
5	1	9	20.9	540.1
6	3	3	22.6	586.4
7	1	3	19.7	538.3
8	5	6	17.9	692.5
9	5	9	16.9	721.1

由实验设计的结果可以得出：随着诱导槽数目的增加，半径的增大，其峰值冲击力在增大，比吸能也在增大。

4.结果

将优化后的结构与原始结构进行了对比分析，如图所示：

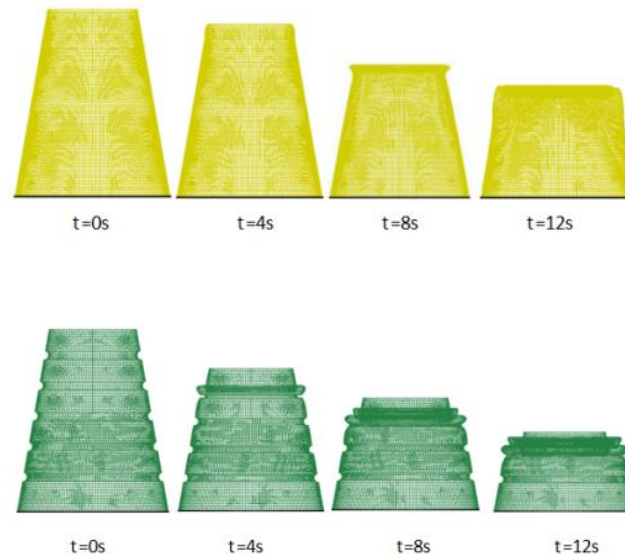


Fig.4.Crash behaviour of the tubes with and without indentations
图 4.有无诱导槽对比

从图对比可以看出，加上诱导槽后的锥形薄壁圆管的压溃更加充分，所能吸收的能量也更多，对比未开诱导槽的薄壁管，其吸能特性更好。

References (参考文献)

- [1] Y Zhang, XU Xiang, LI Qi, LU Minghao, S Liao. Crashworthiness Research on Novel Multi-cell Thin-walled Structure of Varying Cross-sections, 2017, 30(07): 151-158.
张勇, 徐翔, 李奇, 鲁明皓, 廖水容. 新颖变截面多胞薄壁结构的耐撞性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(07): 151-158.
- [2] YQ Zheng, XC Zhu, Q Hu, J Liu. Effect of ridgeline strengthening in thin-walled structure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(05): 57-65.
郑玉卿, 朱西产, 胡强, 刘颀. 薄壁结构棱边强化效果[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(05): 57-65.
- [3] F. Tarlochan, F. Samer, A.M.S. Hamouda, S. Ramesh, K. Khalid, Design of thin wall structures for energy absorption applications: enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces, Thin Walled Struct. 71 (2013) 7-17.
- [4] G. Li, Z. Zhang, G. Sun, X. Huang, Q. Li, Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles, Thin Walled Struct. 94

(2015) 334–347.

- [5] R.JohnsonW.Cook, A constitutive model data for metals subjected to large strains,high strain rates, and high temperatures. in: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlandspp, 1983, pp. 541–547.
- [6] J.LacyJ.ShelleyJ.WeathersbyG.DaehnJ.JohnsonG.Taber, Optimization-based con-stitutive parameter identification from Sparse Taylor cylinder data. in: Proceedings of the 81st shock and vibration symposium. Idaho National Laboratory, US, 2010.
- [7] S. Furusako, A. Uenishi, Y. Miyazaki, Improvement of crashworthiness by application of high-strength steel, Nippon Steel (2007) (Jan. Report No. 95).
- [8] C.W. Isaac, O. Oluwole, Finite element comparative analysis of the crushing behaviour of square steel tubes, Int. J. Sci. Eng. Res 6 (7) (2015) 1650–1655.
- [9] Zhang X, Cheng G, You Z, et al. Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns[J]. Steel Construction, 2007, 45(9):737-746.
- [10] Yin H, Wen G, Liu Z, et al. Crash-worthiness optimization design for foam-filled multi-cell thin-walled structures[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 75(75):8-17.
- [11] Peng Y, Deng W, Xu P, et al. Study on the impact performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94:663-672.
- [12] Ma F, Yao Z, Liu Q, et al. Comparative analysis by simulating and testing pole impact for hot stamping front crossbeam of automobile[J].Engineering Sciences, 2012, 10(6):71-74.
- [13] Nawale S P, Vyavahare R T, Aradhye A S. High Strain Rate Response of A356/Al 2 O 3, Aluminum Alloy MMCs Using Ls-Dyna [J]. Procedia Engineering, 2017, 173:1967-1974.
- [14] MP Bendsoe, O Sigmund. Topology Optimization: Theory Methods and Applications[J], Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [15] M. P. Bendsoe, O Sigmund. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69(9-10):635-654.
- [16] NM Patel, Crashworthiness Design Using Topology Optimization, PhD thesis, University of Notre Dame, 2004.