DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0380-06

轴向冲击载荷下薄壁折纹管的屈曲模态与吸能*

郝文乾,卢进帅,黄 睿,刘志芳,王志华
(太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 在方管的基础上引入折纹结构,利用几何关系建立折纹管的折角公式。采用 LS-DYNA 软件研究了 6 种折纹管在轴向冲击下的屈曲模态与能量吸收性能,并与方管进行对比分析。结果表明,折纹管在冲击载荷作用下屈曲变形过程可分为 3 个阶段,初始峰值阶段、稳定渐进屈曲阶段和密实化阶段。折角是影响初始峰值载荷和平均载荷的重要因素之一,折纹结构的引入有效的降低了初始峰值载荷,减小了冲击力的波动幅度;折纹管的比吸能低于方管,但是在特定折角下,折纹管的压缩力效率和比总体效率高于方管。

关键词: 固体力学;屈曲模态;冲击载荷;能量吸收;折纹管
中图分类号: O347 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

碰撞过程实质上是能量转化的过程,将碰撞的动能转化成应变能以及其它形式的能量。金属薄壁结构,作为一种低成本、高吸能效率的构件,广泛应用于碰撞动能耗散系统[1]。在结构的耐撞性设计中,要保证冲击动能尽可能被结构吸收,确保被保护人员的安全。理想的吸能结构,初始峰值力尽可能小,后期随时间的波动幅度也尽可能小[2]。国内外学者对薄壁管在冲击载荷下的屈曲及吸能性能进行了大量的研究。W. Abramowicz 等[3]研究了管受冲击作用下的能量吸收,方管的变形屈曲模态有外延式模态,对称式模态与混合模态,其中外延式模态是最优的吸能模态。D. Karagiozova 等[4]对圆柱壳在轴向载荷作用下的屈曲与吸能性能进行了数值分析。研究了材料性质、壳体的几何形状、边界条件以及载荷方式对能量吸收和屈曲形状的影响。A. Rossi 等[5]研究了多边形截面铝合金受动态冲击的变形特点。得到后屈曲变形现象主要表现为材料产生褶皱时冲击能量的耗散。结构的尺寸以及屈曲模态对管的后屈曲位移形式有影响。A. G. Mamalis 等[6]对八边形金属管受轴向冲击进行了研究,分析了材料的几何、物理性质对变形模态的影响,并且给出了载荷-位移曲线以及能量吸收情况。M. Langseth 等[7]研究了不同质量比和冲击速度下铝合金的耐撞性,得到方形铝管的平均冲击载荷随着冲击速度的增大而增大,然而冲击块与被冲击体的质量比对这些响应参数无影响。Zhang Xiong 等[8]设计了 2 种金字塔形状的折纹管模型,并与方管进行数值对比分析,指出折纹管模型比方管的吸能效率高。王博等[9]引入一种新型折纹管结构。得出折纹管比方管能量吸收率高,初始峰值力降低的结论。

折纹管由于具有可以控制的模态以及极大降低初始峰值力的优点,是一种理想的能量吸收元件,已有的研究只是针对某一种具有折纹的几何形状。本文中通过改变折角来研究折纹管的屈曲模态及吸能性能,并与方管进行对比分析,发现折纹结构的引入有效减小冲击力的波动幅度,可为理想吸能结构提供参考。

1 折纹管模型及理论

1.1 折纹管折角的理论公式

折纹管是通过预期引入的折纹,使管在受冲击时按预定折纹进行变形、折叠继而破坏,从而达到可控制的、较好的吸能效果。在方管的基础上,引入特殊的图案形成折纹管。图 1 给出了折纹管的基本单

* **收稿日期:** 2013-10-17; **修回日期:** 2014-02-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(11172196,11372209);山西省自然科学基金项目(2013011005-2)
第一作者: 郝文乾(1988—),男,硕士研究生; **通讯作者:** 刘志芳,liuzhifang@tyut.edu.cn。

元的三视图以及示意图，其中折角 θ 是 2 个平面所形成的二面角，$\theta=109.47°$。折纹管折角 θ 为：

$$\theta=2\arctan\frac{\sqrt{2}H}{a_1-a_2-c} \tag{1}$$

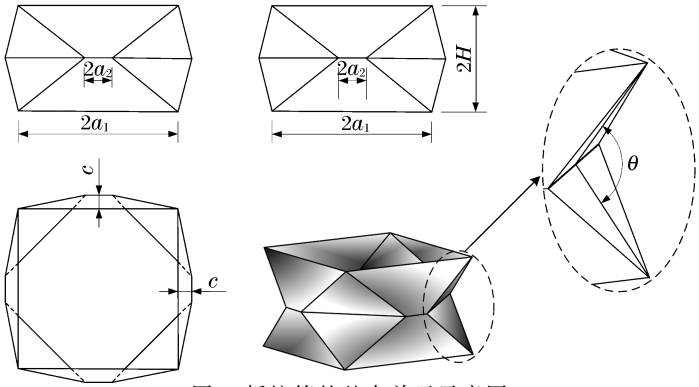

图 1 折纹管的基本单元示意图

Fig. 1 Schematic of the unit corrugated tube

1.2 各种折纹管几何模型参数

分别对长度 $L=160$ mm，壁厚 $\delta=2$ mm，管口边长为 60 mm 的方管和 6 种不同折纹管进行数值模拟。方管和折纹管的几何尺寸如表 1 所示。

表 1 方管和折纹管结构的几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of square tube and different corrugated tubes

类型	实验编号	$2a_1$/mm	$2a_2$/mm	c/mm	H/mm	L/mm	θ/(°)
方管	ST	60	—	—	—	160	—
折纹管	CTN1	60	0	5	20	160	97.05
折纹管	CTN2	60	10	5	20	160	109.47
折纹管	CTN3	60	20	5	20	160	124.12
折纹管	CTN4	60	30	5	20	160	141.06
折纹管	CTN5	60	40	5	20	160	159.95
折纹管	CTN6	60	50	5	20	160	180.00

2 有限元模型的建立

采用有限元软件 LS-DYNA 对方管和 6 种不同折角的折纹管在轴向冲击载荷下进行了数值分析，研究方管与折纹管的冲击屈曲模态与能量吸收性能。管的底端放置在固定的刚性底板上，顶端受到速度为 $v=25$ m/s 的刚性板冲击。方管中间段的网格大小为 1.5 mm，两端的单元网格大小为1 mm；折纹管网格大小为1 mm。方管和折纹管都采用壳单元，上下刚性板采用实体单元。

对上下板采用 MAT_RIGID 材料模型，方管和折纹管选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型，对于铝管 AA-6060T4 的材料行为可以视为应变率无关材料，材料密度为 2.7 g/cm^3，弹性模量为 70 GPa，泊松比为 0.3，屈服应力为 0.08 GPa，切线模量为 0.682 GPa。管与顶板和底板的接触为自动面面接触，管自身采用自动单面接触。

3 数值分析和结果讨论

3.1 方管和折纹管的屈曲模态分析

从数值模拟结果中提取能量守恒曲线，是检验上述有限元模型的可靠性以及计算精确性的判据。在图 2 中给出了方管和折纹管($\theta=109.47°$)的动能、内能、总能和沙漏能的时间历程曲线。可以看出：有限元模型在整个冲击过程中能量守恒，沙漏能小于总能量的 5%，表明建立的有限元模型是可靠的。

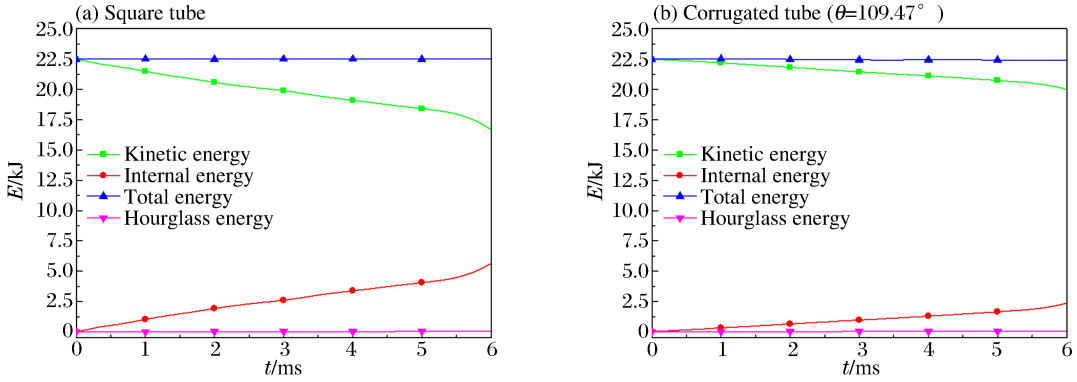

图 2 方管与折纹管的能量历程曲线

Fig. 2 Energy histories of square tube and corrugated tube

图 3 给出了方管和折纹管的载荷-时间曲线，管的变形过程可分为 3 个阶段：初始峰值阶段、稳定渐进屈曲阶段和密实化阶段。方管的初始峰值载荷明显高于折纹管，在初始峰值之后出现了大的波动，这是由于方管表面平坦，有利于应力波的传播，使应力波在方管表面来回反射、叠加所致。折纹管在初始峰值之后的波动较小，没有出现大的波动。在稳定渐进屈曲阶段，方管的波动幅度明显大于折纹管。

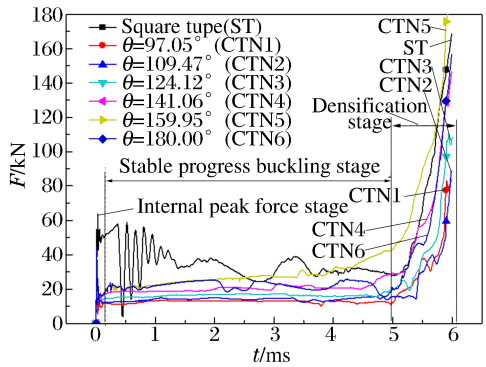

图 3 方管和折纹管的载荷-时间曲线

Fig. 3 Force histories of square tube and corrugated tubes

图 4 给出了方管和折纹管的初始峰值载荷。可以看出：方管的初始峰值力高于折纹管，折纹管的初始峰值载荷相对方管降低了 30%～60%。折纹管的初始峰值载荷随折角的增加先减小后增加，折纹管 $\theta=109.47°$的初始峰值载荷最小。

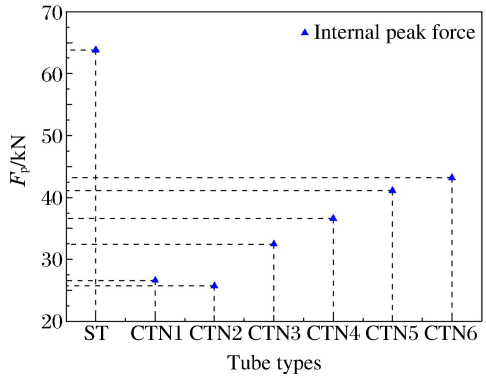

图 4 方管和折纹管的初始峰值载荷

Fig. 4 The initial peak force of square tube and corrugated tubes

图 5 给出了方管和折纹管残余变形的俯视图。可以看出，折纹管的变形模态变为近似八边形。随着折角的增加，折纹管底部的八边形变形模态逐渐变成近似方管的变形模态。在相同的冲击力作用下，折纹管向内的横向位移小于方管。由于预先引入的折纹结构使管发生可以控制的变形模式，每个褶皱的位移相等，因此波纹管的变形比方管更稳定。

图 6 给出了不同时刻沿折纹管 $\theta=159.95°$轴线方向的横向位移。在大的波峰之间产生锯齿形的小波动，这是由于随着折角的增大，折纹的长度变小，在折角处很小的区域内产生一个弹性区，随着变形这些区域逐渐进入塑性阶段，其作用时间比开始产生塑性区的时间滞后，其对应的数值也会降低。

图 7 给出了方管在不同时刻的屈曲模态以及 Von-Mises 应力图。从图中可知：方管在底端最先产生了屈曲变形，在 $t=790$ μs 产生第 1 个向外的褶皱，对应的位移为正向，在 $t=1\,460$ μs 产生第 2 个向内的褶皱，对应的位移为负向，在 $t=2\,500$ μs 第 2 个褶皱的负位移最大，在 $t=3\,600$ μs 产生第 3 个向外的褶皱，方管产生对称性屈曲，打破了外延式屈曲的规律，此刻所吸收的能量就会减小。图 8 给出了折纹管 $\theta=97.05°$的屈曲模态及 Von-Mises 应力图。在初始冲击时刻（$t=180$ μs），折纹管在冲击端开始屈曲。在 330～1 000 μs 阶段，其它的褶皱开始产生并扩展。在 $t=6\,000$ μs 时折纹管进入密实化阶段，

整体变形平稳，模态是对称形式，每个褶皱最终的横向位移相等。图 9 给出了折纹管 $\theta=159.95°$的屈曲模态及 Von-Mises 应力图。可以看出：在 $t=180$ μs 时折纹管顶端先产生了屈曲现象，继而折纹管的其它褶皱同时产生，并在 $t=2\,500$ μs 折纹处的横向位移相等。在 $t=5\,500$ μs 折纹管屈曲进入密实化阶段，折纹管的模态也呈现对称形式。

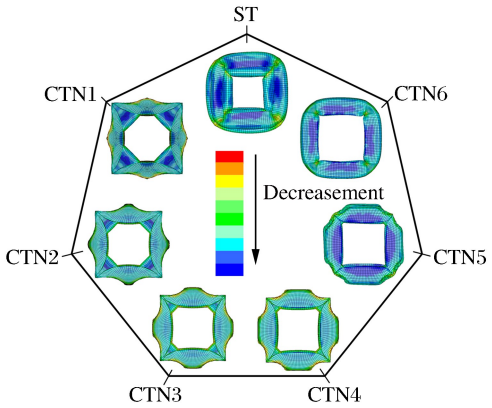

图 5　方管和折纹管的变形模态俯视图

Fig. 5　The deformation modes from top view of square and corrugated tubes

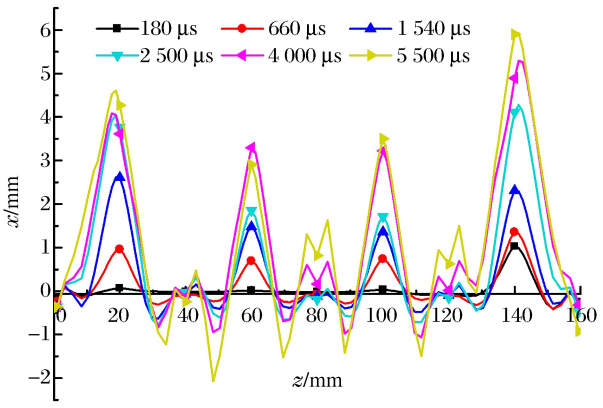

图 6　折纹管的横向位移曲线

Fig. 6　Lateral displacement-axial length curves of corrugated tube

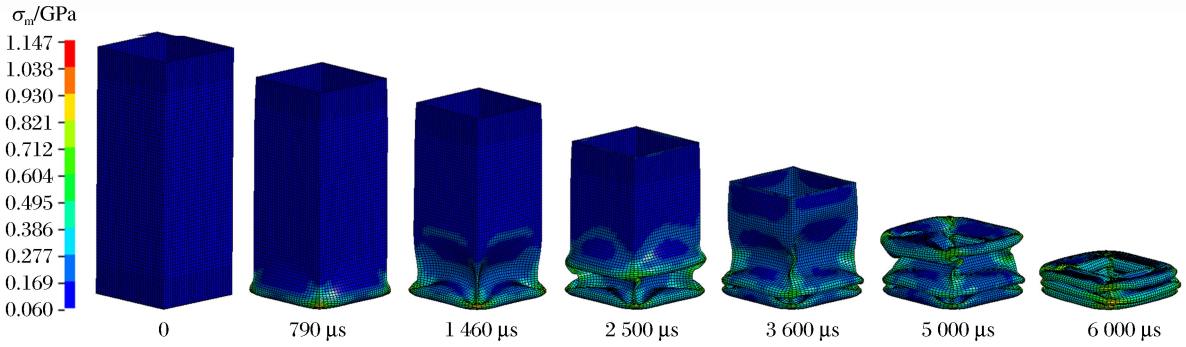

图 7　方管的屈曲模态及 Von-Mises 应力图

Fig. 7　Buckling modes and Von-Mises stresses of square tube

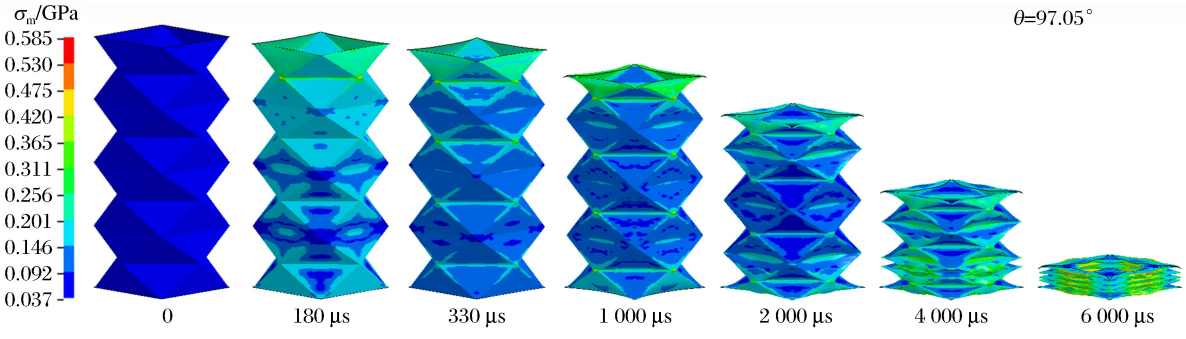

图 8　折纹管的屈曲模态及 Von-Mises 应力图

Fig. 8　Buckling modes and Von-Mises stresses of corrugated tube

3.2　方管和折纹管的吸能效率

平均载荷是结构吸收的总能量与最后压缩量之比。图 10(a)给出了折纹管在时刻 $t=6$ ms 的平均载荷和接触力。可以看出：平均载荷和接触力都是随着折角的增加先增加后减小，$\theta=159.95°$时都达到最大。在结构耐撞性分析中，管的吸能特性采用 3 种不同的评价指标[1]，分别为比吸能 χ、压缩力效率 η 和比总体效率 ξ。比吸能是指结构单位质量的能量吸收。图 10(b)给出了结构的比吸能曲线图。根据

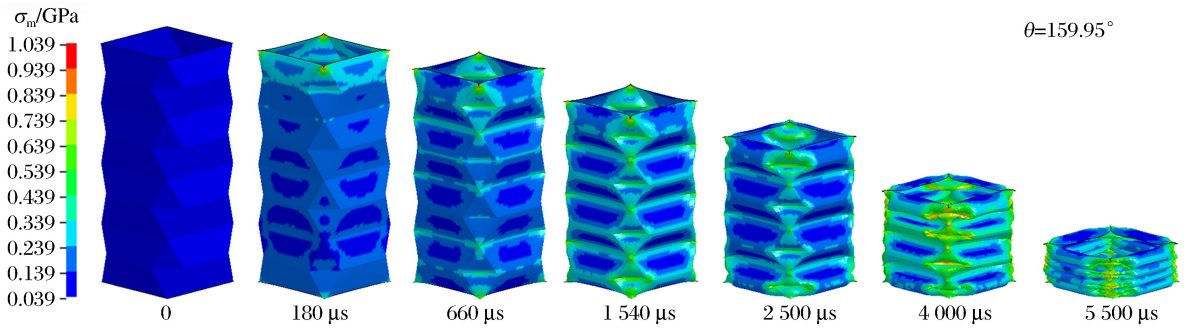

图 9 折纹管的屈曲模态及 Von-Mises 应力图

Fig. 9 Buckling modes and Von-Mises stresses of corrugated tube

计算得知:折纹管的质量相对方管增加了 2.42%～6.76%,因此方管的比吸能大于折纹管。压缩力效率为平均载荷与初始峰值载荷的比值,他是评价载荷一致性的指标,压缩效率越大,其吸能效果最佳。图 10(c)给出了方管与折纹管的压缩力效率与压缩位移的曲线图。折角为 $\theta=159.95°$的折纹管的最大压缩率效率接近 90%,高于其他管。比总体效率是单位长度下管的比吸能与初始峰值载荷的比值。图 10(d)给出了方管与折纹管的比总体效率与压缩位移的曲线图。由图可知,折角为 $\theta=141.06°$,$\theta=159.95°$的 2 种折纹管的比总体效率 ξ 在位移量大于 58 mm 时,明显高于方管的,其他 4 种折纹管的 ξ 则低于方管。综合 3 种吸能指标可以得出:当需考虑结构的比吸能时,方管的比吸能大于折纹管的;当考虑结构的压缩力效率和比总体效率时,折角为 $\theta=159.95°$的折纹管则比方管的好。

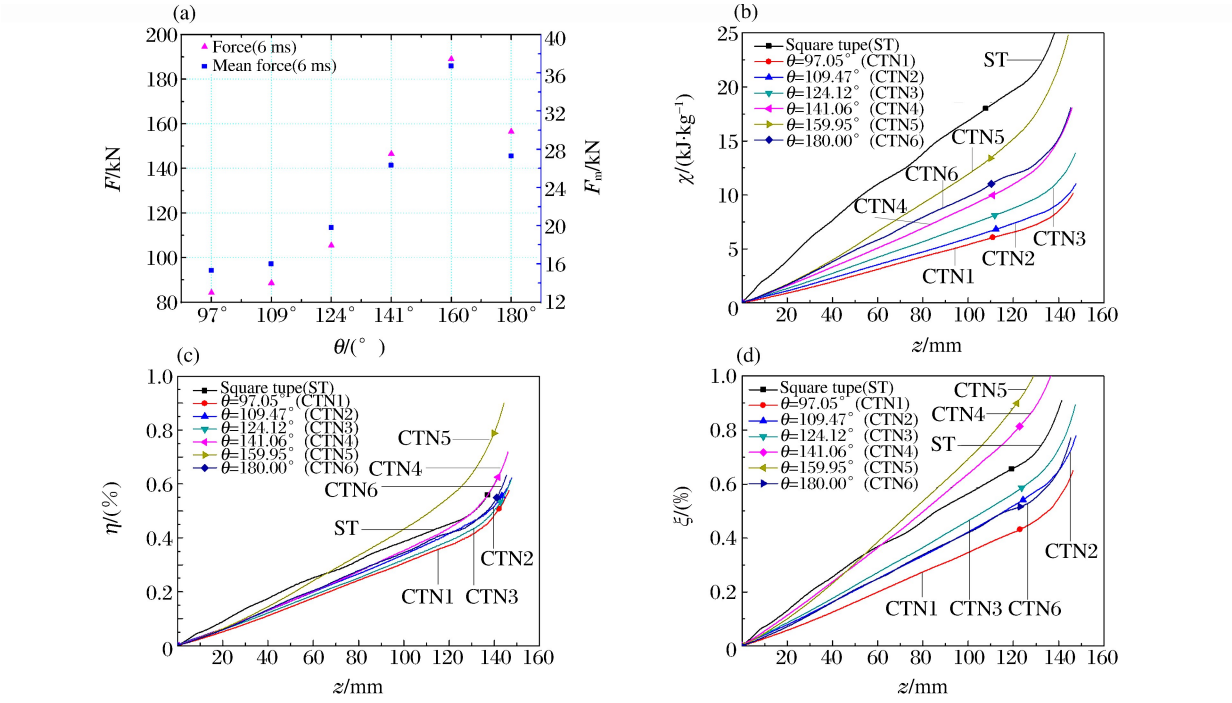

图 10 折纹管的平均载荷以及方管和折纹管的 3 种吸能指标

Fig. 10 Mean force of corrugated tubes and three energy absorption indexes of square tube and corrugated tubes

4 结 论

利用折纹管的几何模型,导出了折角的计算公式。利用 LS-DYNA 对 6 种不同折角的折纹管结构进行了轴向冲击下的数值仿真分析,研究了折纹管的屈曲模态与能量吸收性能,并与方管进行了对比分析。结果表明,在方管上引入折纹结构,有效的降低了初始峰值载荷,减小了冲击载荷的波动幅度,使变

形按照预定的折纹结构进行，产生可控制的变形模态。折角是影响初始峰值载荷和平均载荷的主要因素之一，初始峰值载荷和平均载荷随折角的改变而变化。对比分析了 6 种折纹管和方管的 3 种吸能指标可以得出：当需考虑结构的比吸能时，方管的比吸能大于折纹管；当考虑结构的压缩力效率和比总体效率时，折角为 $\theta=159.95°$的折纹管则比方管的效果好。

参考文献：

[1] 张雄. 轻质薄壁结构耐撞性分析与设计优化[D]. 大连：大连理工大学，2007.

[2] 余同希，邱信明. 冲击动力学[M]. 北京：清华大学出版社，2011：200-204.

[3] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(2): 179-208.

[4] Karagiozova D, Jones N. Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact [J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(7): 583-610.

[5] Rossi A, Fawaz Z, Behdinan K. Numerical simulation of the axial collapse of thin-walled polygonal section tubes [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(10): 1646-1661.

[6] Mamalis A G, Manolakos D E, Loannidis M B, et al. Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section[J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(10): 891-900.

[7] Langseth M, Hopperstad O S, Berstad T. Crashworthiness of aluminium extrusions: Validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9/10): 829-854.

[8] Zhang Xiong, Cheng Geng-dong, You Zhong, et al. Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(9): 737-746.

[9] 王博，骆洪志，牟超，等. 折痕式能量吸收管的性能分析与优化设计[C]// 中国力学大会暨钱学森诞辰 100 周年纪念大会. 北京：中国力学学会，2011：62-431.

Buckling and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes under axial impacting

Hao Wen-qian, Lu Jin-shuai, Huang Rui, Liu Zhi-fang, Wang Zhi-hua

(*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi*, *China*)

Abstract: The square tube with pre-designed corrugations shape is presented and the folding angles formula of the corrugated tubes is established in this study base on geometrical relationship. Buckling modes and energy absorption of square tube and six kinds of corrugated tubes under axial impacting are compared and analyzed by LS-DYNA. The simulation result shows that deformation of tubes can be divided into three stages, including the initial peak stage, the stable progress buckling stage and the densification stage. The folding angle is one of important influence factors on the initial peak force and mean force. The pre-designed corrugations demonstrate some obvious advantages at reducing initial peak force and the fluctuation range of impact force curves which are smoother than the square tube. In addition, the specific energy absorption of the corrugated tubes are lower than the square tube, while the crush force efficiency and specific total efficiency of corrugated tube with a certain folding angle are higher than those of the square tube.

Key words: solid mechanics; buckling mode; impact loading; energy absorption; corrugated tube

（责任编辑　王易难）