

不同管状和材料对结构能量吸收性能的影响

项燕飞, 杨黎明*

(宁波大学 力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出了评价和比较各类管件结构的能量吸收性能的评估指标体系, 具体指标为: 有效行程比(ESR)、结构承载能力(NLC)、单位重量的能量吸收能力(SEA)、吸能有效率(EEA)和载荷波动度(ULC)。为了分析截面和材料对管件能量吸收能力的影响, 比较了铝合金和低碳钢 2 种材料的圆管和方管的能量吸收性能。结果表明: 在相同密实度下, 圆管的能量吸收能力要优于方管, 且在同一截面的管件中, 铝合金管件的能量吸收能力和载荷波动程度要优于低碳钢管件。

关键词: 能量吸收; 评估指标; 铝合金; 低碳钢

中图分类号: TB303

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 02-0085-06

近年来, 频繁的汽车碰撞、大型船舶撞击以及飞机或航天器的紧急着陆等, 这些事故不仅造成了巨大的经济损失, 还对乘员的生命安全构成严重的威胁。为了保护乘员安全和降低结构的损毁程度, 许多学者对能量吸收装置进行了大量的研发, 其中尤以管状结构在能量吸收装置中的应用最为广泛^[1]。近 20 年来, 人们对各种管件的能量吸收性能做了详细的分析, 如圆管、方管、多角形薄壁管、预制图案的管、开窗的管、沿轴向呈锥形的管等等^[2-4]。

表征各类管件结构的能量吸收性能的因素很多。首先, 平均压缩力对管件的能量吸收性能有着至关重要的作用。平均压缩力代表了结构的承载能力, 其大小和压缩位移共同决定了整个结构的能量吸收能力。始于 Alexander 的多位研究者提出了轴向压缩下圆管和方管的理论分析模型, 给出了平均压缩力的理论预测公式^[5-7]。同时, 单位重量的能量吸收能力是比较实际结构的能量吸收能力的另一个重要指标, 它对于需要限制重量的能量吸收元件尤为重要, 但目前对于单位重量的能量吸收能力的计算方式尚没有统一的标准^[2,8]。

由于上述各评价参数仅仅停留在个别材料或管件比较的层面上, 因此希望能够提出一套具有

普遍适用性的评估指标体系^[9], 用来评价和比较各类管件的能量吸收性能, 进而为能量吸收装置的优化设计提供参考。

笔者介绍了有效行程比(Effective Stroke Ratio, ESR)、结构承载能力(Non-dimensional Load-carrying Capacity, NLC)、单位重量的能量吸收能力(Specific Energy Absorption, SEA)、吸能有效率(Effectiveness of Energy Absorption, EEA)和载荷波动度(Undulation of Load-carrying Capacity, ULC) 5 项评估指标, 并用这套评估指标体系全面分析和比较了轴向压缩下铝合金和低碳钢 2 种材料的圆管和方管的能量吸收性能。

1 评估指标体系

对于轴向压缩下的薄壁金属管件, 典型的力-位移曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出, 渐进压溃的薄壁管件的承载会呈现出 3 个明显的阶段: 初始屈曲阶段、平台阶段、压实阶段。初始屈曲阶段存在初始峰值载荷; 在平台阶段中载荷大体平稳, 但随着管的渐进屈曲会呈现出显著的波动; 压实阶段则表现为载荷迅速增加。

按图 1, 管的吸能效率公式为:

$$f = \int_0^s F(s) ds / F_{\max}, \quad (1)$$

收稿日期: 2014-09-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11032001)。

第一作者: 项燕飞(1990—), 女, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学。E-mail: xiangyanfei90@foxmail.com

*通信作者: 杨黎明(1957—), 男, 福建长乐人, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学。E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

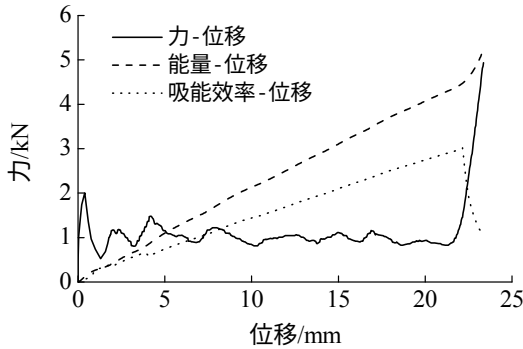


图1 轴向压缩下管件的典型力-位移曲线

式中: s 为压缩位移, F 为压缩载荷, $F_{\max}$ 为除初始峰值载荷 F_p 外, 在 $[0, S]$ 区间中最大的压缩载荷. 吸能效率 f 随着位移的增加会出现一个最大值. 这里我们将吸能效率最大值所对应的压缩位移记录为有效压缩行程 $S_{\text{ef}}^{[10]}$, 它明确地表征了由平台阶段到压实阶段的过渡点. 实际上, 类似的概念和方法也曾经用于计算多孔材料的压实应变.

值得指出的是, 过去由于对由平台阶段到压实阶段的过渡点缺乏统一和明确的定义, 许多文献在确定有效压缩行程和计算相应的平均载荷时常常带有随意性, 例如有效压缩行程有的取值为 0.7, 有的取为 0.8 等等, 这种情况也给不同文献的结果比较带来了困难. 现在我们给出了有效压缩行程 S_{ef} 的明确定义, 增强了客观性和确定性, 为下一步建立评估指标体系奠定了基础.

1.1 有效行程比

有效行程比可由有效压缩行程 S_{ef} 除以试件原长得到:

$$Q_{\text{ESR}} = \frac{S_{\text{ef}}}{L}, \quad (2)$$

式中: L 为试件原长, S_{ef} 为有效压缩行程.

有效行程比是一个无量纲评价指标, 它反映了吸能元件中材料的有效利用率. 对于多孔材料有效行程比的概念类似于“压实应变”.

1.2 结构承载能力

结构承载能力由平均压缩力 F_m 除以结构单位长度的塑性极限弯矩 M_0 计算得到:

$$Q_{\text{NLC}} = \frac{F_m}{M_0}, \quad (3)$$

式中: F_m 为结构的平均压缩力, 其数值由有效压缩行程 S_{ef} 计算得到:

$$F_m = \frac{\int_0^{S_{\text{ef}}} F(s) ds}{S_{\text{ef}}}, \quad (4)$$

M_0 为单位长度的塑性极限弯矩, $M_0 = Yt^2 / 2\sqrt{3}$, Y 是材料在单向拉压下的屈服应力, t 是管的壁厚. 由于 M_0 具有力的量纲, Q_{NLC} 是一个无量纲评估指标, 它表征了结构有效承受载荷的能力.

1.3 单位重量的能量吸收能力

单位重量的能量吸收能力由结构在有效压缩行程 S_{ef} 之内所吸收的总能量 W_{ef} 除以结构总质量 G 得到, 简称比吸能.

$$Q_{\text{SEA}} = \frac{W_{\text{ef}}}{G} = \frac{\int_0^{S_{\text{ef}}} F(s) ds}{G} = \frac{F_m S_{\text{ef}}}{\rho A L}, \quad (5)$$

式中: ρ 为材料密度, A 为结构的净面积.

比吸能, 即 SEA, 是一个有量纲评估指标. 由于比吸能表现了结构单位重量的能量吸收能力, 因此对于那些需要考虑自重的能量吸收器(如航天器), 这个指标显得尤其重要.

1.4 吸能有效率

吸能有效率由平均压缩力 F_m 除以结构截面的净面积 A , 再除以材料的屈服应力 Y , 然后再乘以有效行程比得到, 即:

$$Q_{\text{EEA}} = \frac{W_{\text{ef}}}{VY} = \frac{\int_0^{S_{\text{ef}}} F(s) ds}{AYL} = \frac{F_m S_{\text{ef}}}{AY L}, \quad (6)$$

式中: V 为结构的净体积.

值得注意的是, 吸能有效率与比吸能不同, 后者有量纲, 而吸能有效率是一个无量纲评估指标, 它表现了轴向压缩下结构体积 V 的有效利用率.

这里不妨将吸能有效率与结构有效率^[11]作一比较. 结构有效率是将平均压缩力除以结构的净面积和材料的屈服应力得到, 而吸能有效率考虑了结构的有效行程比, 因而更有利于评估结构的能量吸收性能.

1.5 载荷波动度

为了表征管状结构在压缩过程的平台阶段中载荷围绕平均压缩力的波动程度, 引入了载荷波动度, 定义为压缩载荷 F 偏离平均压缩力 F_m 所作的功与结构在有效压缩行程 S_{ef} 之内所吸收的总能量之比, 即:

$$Q_{\text{ULC}} = \int_0^{S_{\text{ef}}} |F(s) - F_m| ds / \int_0^{S_{\text{ef}}} F(s) ds, \quad (7)$$

显然, 载荷波动度是一个无量纲评估指标, 它的数值越小, 平台载荷越平稳。

2 管件的能量吸收性能分析

根据轴向压缩下的管件的实验数据和近似理论模型的预测, 我们分析和比较各类管件在各个评价指标下的能量吸收能力。

每种结构和材料的上述评估指标既依赖于其自身的构型特征, 又依赖于其具体的几何尺寸。因此, 采用密实度 $\phi (A/A_0)$ 来表征不同截面管件的几何性质。对于薄壁圆管和方管, 密实度分别为:

$$\phi = \frac{A}{A_0} = 4 \frac{t}{D}, \quad \phi = \frac{A}{A_0} = 4 \frac{t}{C}, \quad (8)$$

式中: A_0 为结构截面外缘包围的总面积, A 为截面内材料实际占有的面积, D 为圆管的直径, C 为方管的边长。

2.1 有效行程比

利用不同尺寸和不同材料的薄壁圆管和方管的实验数据^[2,12], 对各个管件根据(2)式计算得到有效行程比, 结果如图2所示。

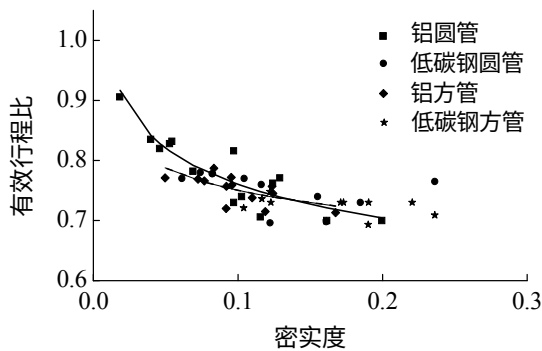


图2 圆管和方管的有效行程比随密实度的变化

利用最小二乘法拟合实验数据, 可以得到铝圆管与铝方管的有效行程比与密实度的关系, 分别为:

$$Q_{\text{ESR}} = 0.59 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.11}, \quad (9a)$$

$$Q_{\text{ESR}} = 0.64 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.069}, \quad (9b)$$

从(9)式可以看出, 随着管件相对厚度的增加, 管件就越难压缩到一个较大的有效位移。但当铝圆管和铝方管的密实度接近于 0.2 时, 管件的有效行

程比就近似于常数 0.7。同时也可发现, 对于圆管和方管, 材料对管件有效行程比的影响不大。

2.2 结构承载能力

根据现有圆管和方管平均压缩力的理论预测公式^[5-7], 结构承载能力可由(3)式计算得到。如利用 Alexander 的理论模型^[5], 圆管的结构承载能力为:

$$\frac{F_m}{M_0} = 20.73 \left(\frac{2R_0}{t} \right)^{0.5} = 41.46 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.5}. \quad (10)$$

同样, 结构承载能力也可通过文献[6-7]中公式计算得到。

另外, 根据最小二乘法, 铝圆管的结构承载能力与密实度之间的关系有:

$$\frac{F_m}{M_0} = 66.09 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.52}. \quad (11a)$$

基于铝圆管的实验数据, Guillow 等^[13]拟合得到了结构承载能力与密实度之间的关系, 相关结果如图3所示。

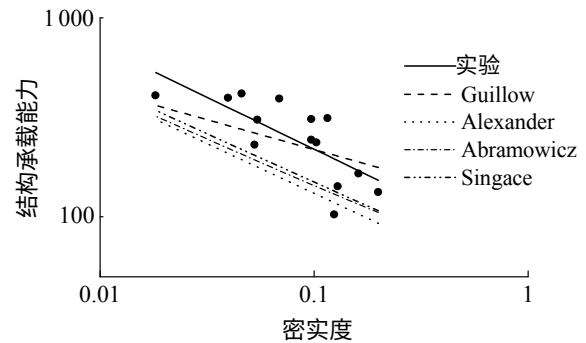


图3 铝圆管的结构承载能力实验与理论结果比较

为了显示横截面积对结构承载能力的影响, 圆管与方管的结构承载能力实验结果汇集于图4。

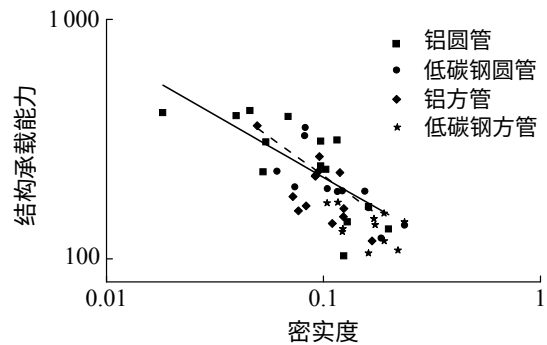


图4 圆管与方管的结构承载能力随密实度的变化

利用最小二乘法, 铝方管的结构承载能力与密实度之间的关系为:

$$\frac{F_m}{M_0} = 49.69 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.65} \quad (11b)$$

由此看出,在相同的密实度下,铝圆管与铝方管的结构承载能力大致相同.图4同时显示了在相同的密实度下,材料对管件的结构承载能力影响不大.

2.3 单位重量的能量吸收能力

单位重量的能量吸收能力可以由(5)式计算得到.根据早期 Alexander 的计算模型^[5],平均压缩力的计算公式为:

$$\frac{F_m}{M_0} = 20.73 \left(\frac{2R_0}{t} \right)^{0.5}, \quad (12)$$

再利用轴向压缩下圆管的有效行程比经验公式(9)式,可得到:

$$Q_{SEA} = \frac{F_m}{\rho A} \frac{S_{ef}}{L} \approx 0.562 \frac{Y}{\rho} \left(\frac{A}{A_0} \right)^{0.39} \quad (13)$$

同样能量吸收能力也可以通过文献[6-7]中公式计算得到.

圆管的比吸能的实验结果与理论结果比较如图5所示.图5中实验结果要略高于理论结果,这可能是由理论模型的简化所引起.为了比较不同截面和不同材料管件的能量吸收能力,对比了圆管与方管的比吸能,结果如图6所示.由图6可以发现,从不同截面的角度圆管与方管的比吸能随密实度变化的趋势大致相同,然而就比吸能而言,轴向压缩下圆管的能量吸收能力更为有效.

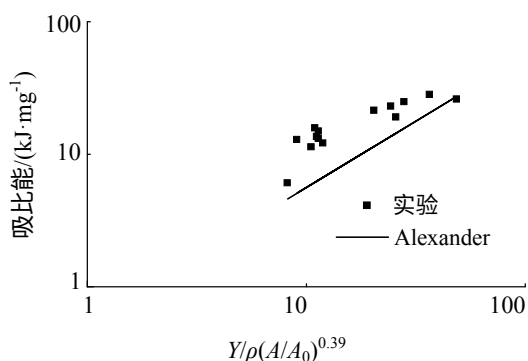


图5 铝圆管的比吸能实验与理论结果比较

由于比吸能是一个有量纲指标,它与管件材料密切相关,因此考虑材料对管件能量吸收能力的影响.图6显示了相同截面的管件,在相同密实度下,铝合金管件的比吸能要略高于低碳钢管件.

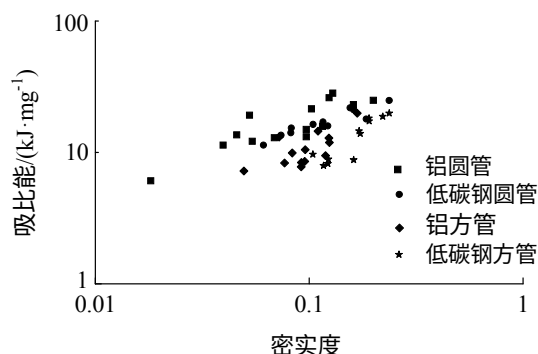


图6 圆管与方管的比吸能随密实度的变化

2.4 吸能有效率

吸能有效率可以由(6)式计算得到.若采用 Alexander 的理论模型,吸能有效率的表达式为:

$$Q_{EEA} = \frac{F_m}{AY} \frac{S_{ef}}{L} = 20.73 \left(\frac{2R_0}{t} \right)^{0.5} \left(\frac{2Y}{\sqrt{3}} \frac{t^2}{4} \right) / (AY) \times 0.59 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.11} \approx 0.562 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{0.39} \quad (14)$$

类似的计算公式也可以根据其他理论模型计算得到.铝圆管吸能有效率的实验和理论结果如图7所示.从图7可以发现,大部分实验值均高于理论预测值,且通过实验数据拟合得到的吸能有效率与密实度的关系式((15)式)也与理论公式不同:

$$Q_{EEA} = 1.01 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{0.4} \quad (15)$$

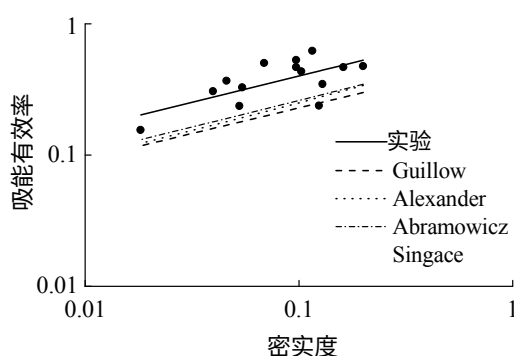


图7 铝圆管的吸能有效率实验与理论结果比较

吸能有效率对评估各类管件的能量吸收能力有着重要作用.图8显示了圆管和方管的吸能有效率随密实度的变化.结果表明,若比较不同截面对管件能量吸收能力的影响,就能量吸收能力而言,圆管比方管更有优势,这一点与 SEA 的结果相一致.若考虑材料对同一管件能量吸收能力的影响,

图8中显示了无论是圆管还是方管, 在相同的密实度下, 铝合金管件与低碳钢管件的吸能有效率大致相同。

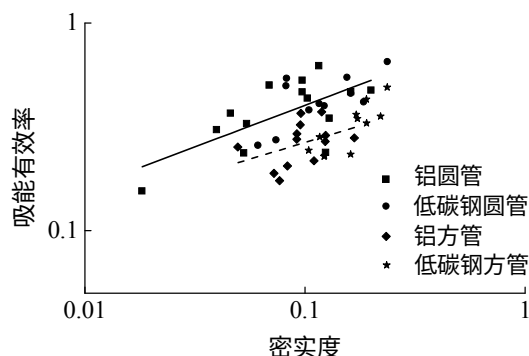


图8 圆管与方管的吸能有效率随密实度的变化

2.5 载荷波动度

根据(7)式整理的实验数据^[14], 得到轴向压缩下各类管件的载荷波动度如图9所示。利用最小二乘法, 铝圆管和铝方管的载荷波动度与密实度的关系分别有:

$$Q_{ULC} = 0.25 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{0.08}, \quad (16a)$$

$$Q_{ULC} = 0.065 \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-0.59}. \quad (16b)$$

从图9可以发现, 铝圆管的 ULC 随着密实度的增加呈缓慢增大趋势, 而铝方管的 ULC 却随着密实度的增加有显著下降。这表明当管件壁厚相对较薄时, 圆管的平台载荷波动较小; 而当管件壁厚相对较厚时, 方管的平台载荷反而更平稳。另外, 从图9还可以看出, 对于同一截面的管件, 在相同密实度下, 铝合金管件的平台载荷要比低碳钢管件更平稳。

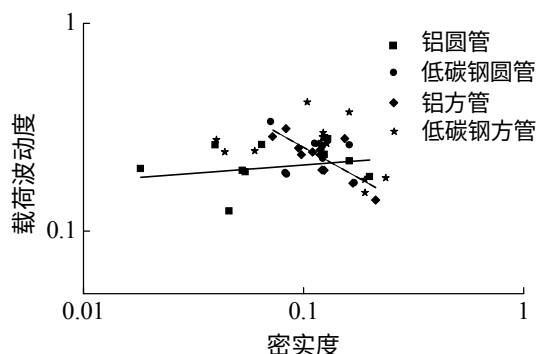


图9 圆管与方管的载荷波动度随密实度的变化

3 结论

根据能量吸收装置的设计要求, 提出了一个较为全面的能量吸收评估指标体系, 它包含有效行程比、结构承载能力、单位重量的能量吸收能力、吸能有效率和载荷波动度。为了比较实验结果与理论结果的一致性, 将铝圆管的 NLC、SEA 和 EEA 的实验结果与理论模型进行了比较, 结果表明各个评估指标随管件密实度的变化趋势与理论结果相一致, 但实验值均略高于理论结果。

另外, 为了比较和分析截面对管件能量吸收能力的影响, 给出了圆管和方管的各个评估指标随密实度变化曲线, 结果表明, 除了载荷波动度外, 圆管的能量吸收能力均优于方管。同时, 为了比较和分析材料对管件能量吸收能力的影响, 从各个评估指标随密实度的变化曲线发现, 就有效行程比、结构承载能力和吸能有效率而言, 材料对管件的能量吸收性能影响不大, 但对单位重量的能量吸收能力和载荷波动度, 铝合金管件的能量吸收能力和载荷波动程度要优于低碳钢管件。

显然, 这些评估指标可以用于评估各类能量吸收结构和材料的能量吸收性能, 包括多胞材料, 从而为能量吸收装置的优化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] Alghamdi A A A. Collapsible impact energy absorbers: An overview[J]. Thin-walled Structures, 2001, 39(2): 189-213.
- [2] Hanssen A G, Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic crushing of circular aluminum extrusions with aluminum foam filler[J]. Int J Impact Engng, 2000, 24(5):475-507.
- [3] Di-Paolo B P, Monteiro P J M, Gronsky R. Quasi-static axial crush response of a thin-wall, stainless steel box component[J]. Int J Solids Struct, 2004, 41(14):3707-3733.
- [4] Jandaghi S V, Marzbanrad J. Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes[J]. Thin-walled Structures, 2012, 60:24-37.
- [5] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading[J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13:10-15.

- [6] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes[J]. *Int J Impact Engng*, 1986, 4(4):243-270.
- [7] Singace A A, Slobky H. Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes[J]. *Int J Solids Struct*, 1996, 33(24):3517-3538.
- [8] Seitzberger M, Rammerstorfer F G, Grading R, et al. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminum foam[J]. *Int J Solids Struct*, 2000, 37(30):4125-4147.
- [9] Yu T X, Xiang Y F, Wang M, et al. Key performance indicators of tubes used as energy absorbers[C]//The 12th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA2014), Taiwan, 2014:155-161
- [10] Wang M, Yang L M, Yu T X. A further study on the energy absorption capability of thin wall tubes under axial crushing[C]//The 3rd International Symposium on Plasticity and Impact (ISPI2011), Hong Kong and Nansha, 2011:8-13
- [11] Lu G, Yu T X. Energy absorption of structures and materials[M]. Boca Raton, CRC Press, 2003:10-100.
- [12] Toksoy A K, Guden M. The strengthening effect of polystyrene foam filling aluminum thin-walled cylindrical tubes[J]. *Thin-walled Structures*, 2005, 43(2):333-350.
- [13] Guillow S R, Lu G, Grzebieta R H. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes[J]. *Int J Mech Sci*, 2001, 43(9):2103-2123.
- [14] Mamalis A G, Johnson W. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression[J]. *Int J Mech Sci*, 1983, 25(9):713-732..

Effects of Section and Material of Tubes on Energy Absorption

XIANG Yan-fei, YANG Li-ming*

(Mechanics and Material Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on our extensive studies in the last few years, a set of Key Performance Indicators (KPIs) is proposed to assess and compare the energy absorbing performance of tubular structures with various configurations so as to offer the guidelines for the design of energy absorbers whilst to archive optimization to a certain degree. The set of KPIs contains five indicators, which are Effective Stroke Ratio (ESR), Non-dimensional Load-carrying Capacity (NLC), Effectiveness of Energy Absorption (EEA), Specific Energy Absorption (SEA), and Undulation of Load-carrying Capacity (NLC). In this paper, a series of diagrams is presented to compare the energy absorbing performance of circular and square tubes made in aluminum and mild steel in terms of the five KPIs. The results show that the energy absorption capacity of circular tubes is superior to that of square tubes, although their KPIs as the functions of solidity ratio usually follow similar trends. It is also found that the specific energy absorption and undulation of aluminum tubes are superior to that of the mild steel tubes.

Key words: energy absorption; key performance indicators; aluminum; mild steel

(责任编辑 史小丽)