

城市轨道交通车辆用薄壁圆锥形构件 轴向耐撞性能研究

冯悦¹ 肖守讷¹ 车全伟² 李铎¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 硕士研究生)

摘要 针对城市轨道交通车辆压溃式吸能装置常用的 Q345 和 5083H111 材料, 以数值仿真的方式研究冲击动态下壁厚、冲击速度、锥角对其轴向耐撞性能的影响, 比选出总吸能一定时耐撞性能更优的设计方案。研究结果表明, 薄壁圆锥形构件的比吸能和碰撞力随壁厚和冲击速度的增加而增加, 随锥角的变化因材料而异, 且 Q345 材料的比吸能和碰撞力均大于 5083H111; 在总吸能一定时, 采用大锥角、增加壁厚的方案轴向耐撞性能更优, 选用 5083H111 材料耐撞性能更优。

关键词 城市轨道交通车辆; 薄壁构件; 圆锥管; 耐撞性能
中图分类号 U270.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.022

Axial Crashworthiness of Thin-walled Tapered Circular Tube Used on Urban Rail Transit Vehicle

FENG Yue, XIAO Shoune, CHE Quanwei, LI Duo

Abstract Since the Q345 and 5083H111 materials are commonly used in the crushing energy absorbers of urban rail vehicles, the impact of thick-wall, striking velocity and cone angle under impact dynamics on the axial crashworthiness are studied through numerical simulation, a design with better crashworthiness with a fixed energy absorption is selected. The research results show that the specific energy absorption and collision force of thin-walled tapered circular tube will increase following the increase of wall thickness and impact velocity, but the influence of cone angle varies with materials, and the specific energy absorption and collision force of Q345 are larger than that of 5083H111. When the total energy absorption is constant, the scheme of larger cone angle and wall thickness will improve the crashworthiness, therefore the selection of 5083H111 material will further increase the crashworthiness.

Key words urban rail transit vehicle; thin-walled structure; tapered circular tube; crashworthiness

First-author's address State Key Laboratory of Traction

Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

压溃式薄壁构件是城市轨道交通(以下简称“城轨”)车辆常用的吸能装置,在车辆发生碰撞事故时发挥着重要的吸能作用。目前,对薄壁吸能构件的研究主要集中在薄壁圆形构件和方形构件,对锥形构件的研究比较少。

对于方锥形构件,文献[1]研究了薄壁方形与方锥形构件在倾斜轴向载荷作用下的能量吸收响应;文献[2]研究了方锥形 PVC(聚氯乙烯)薄壁构件的轴向压溃变形;文献[3]通过数值仿真,研究了准静态以及冲击动态下薄壁方锥形构件在不同壁厚、锥角、冲击速度、冲击质量下的轴向碰撞响应。

对于圆锥形构件,文献[4]进行了薄壁圆形、圆锥形构件轴向准静态压缩试验,对比了二者准静态压缩变形模式,并研究了壁厚对变形模式的影响。文献[5]采用有限元方法研究了泡沫填充薄壁圆锥形构件准静态轴向载荷下不同壁厚和锥角的响应。文献[6]指出,在轴向冲击下,圆形截面构件在轻量化和比吸能方面优于相应的方形截面构件,且圆锥形构件最优。文献[7]得到了与文献[6]相同的结论,且对圆锥形结构直梁的研究发现,圆锥管的锥角在 4.3° 附近时,材料可以更好地发挥缓冲撞击的效率。文献[8]指出,对于轴向冲击碳钢管薄壁圆锥形构件,在一定范围内,随着锥角的增大,比吸能增大,初始峰值载荷减小。文献[9]研究了准静态压缩下轴向倾角对钢质圆锥形构件轴向压缩性能的影响,并分析了在轴向压缩过程中的典型变形模式以及相应的理论模型。

根据现有研究可知,薄壁圆锥形构件在轴向动态压缩时的耐撞性能优于薄壁圆形、方形、方锥形

构件,但问题是目前对薄壁圆锥形构件的研究并不完善。问题主要集中在锥角研究方面,对壁厚和冲击速度的研究很少,且未对不同材料的耐撞性能加以比较。本文针对城轨车辆压溃式吸能装置常用材料 Q345 钢与 5083H111 铝合金,研究动态冲击下壁厚、冲击速度、锥角对吸能装置轴向耐撞性能的影响,并对两种材料吸能装置加以比较;同时,提出以总吸能一定为设计目标时的优选设计方案,为工程设计提供参考。

1 耐撞性能评价指标

评价薄壁构件耐撞性能的常用指标主要有以下几种^[6]:

- (1) 总吸能与比吸能。总吸能为薄壁构件在有效压溃过程中吸收的总能量(本研究取有效压溃长度为总长度的 75%),比吸能为薄壁构件在有效压溃过程中单位质量吸收的能量。
- (2) 峰值碰撞力与平均碰撞力。峰值碰撞力是压溃过程中出现的碰撞力最大值,其值越大,碰撞减速度越大,对乘员造成的伤害越严重。平均碰撞力为单位压溃位移上的吸能,在压溃位移相同时,平均碰撞力越大,总吸能越多,耐撞性能越好。

表 2 5083H111 材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	A	B	n	C ₁	C ₂	$\dot{\epsilon}_0$
5083H111	69	0.33	2 700	166.1	653.1	0.634	-0.044	0.003	2×10^{-4}

注: $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率;A 为参考应变率下的屈服强度;B 和 n 为参考应变率下的应变硬化参数;C₁ 和 C₂ 为应变率敏感系数

为方便描述,首先对薄壁圆锥形构件的基本参数作如下定义(见图 1):D 为大端直径;d 为小端直径;L 为锥管高度; ϕ 为锥角;t 为管壁厚度。

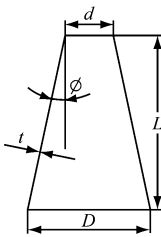


图 1 薄壁圆锥形构件基本参数示意图

根据城轨车辆吸能装置常用尺寸,设定 $L = 400$ mm,D 恒为 150 mm。

- (1) 壁厚。壁厚研究范围为城轨车辆吸能装置常用尺寸 2~6 mm,梯度 1 mm;冲击速度参考 EN 15227 标准,对于城轨 C-Ⅲ型车辆,取 25 km/h;根

- (3) 碰撞力效率。碰撞力效率为平均碰撞力与峰值碰撞力的比值,其值越大,说明峰值碰撞力越接近平均碰撞力,耐撞性能越好。

2 模型建立与仿真

2.1 有限元模型的建立

采用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值计算。薄壁圆锥形构件的大端固定,刚性墙以一定的速度冲击小端。由于吸能构件为主要研究内容,且在实际列车碰撞中冲击速度变化很小,故冲击速度设定为恒速。

由于吸能装置发挥作用时伴随着明显的塑性变形,因此必须考虑材料的应变率效应。Q345 材料模型选用 Cowper-Symonds 模型,5083H111 材料模型选用 Johnson-Cook 模型,由冲击试验得到的材料数据见表 1 和表 2^[10]。

表 1 Q345 材料参数

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg/m ³)	g	p
Q345	208	0.3	7 850	35 680	4.62

注:g 和 p 为与应变率相关的材料参数

据参考文献对其他材料的研究结论,锥角取耐撞性能优越的 5°。

- (2) 冲击速度。冲击速度属于中低速碰撞范围,参考 EN 15227 标准中碰撞工况的设计,设置速度系列为 36 km/h、30 km/h、25 km/h、15 km/h、10 km/h、5 km/h,此外还增加了 48 km/h 与 60 km/h;壁厚取常用尺寸 3 mm;锥角为 5°。

- (3) 锥角。针对现有尺寸,选择与结构尺寸匹配的锥角系列为 1°、3°、5°、7°。同时,进行薄壁圆管的仿真以便于比较,圆管直径与圆锥形构件大端直径相同,冲击速度取 25 km/h,壁厚 3 mm。

2.2 模型验证

将相同条件下的数值仿真计算结果与相关文献的试验数据对比,其冲击速度分别为 2.5 m/min^[11]与 2 m/s^[5]。对比结果分别整理于图 2 和表 3。

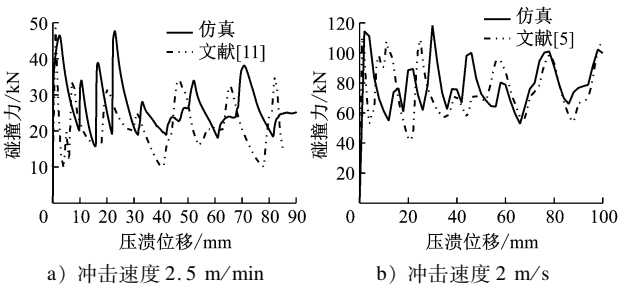


图2 薄壁构件耐撞性数值仿真与文献数据对比图

表3 薄壁构件耐撞性数值仿真与文献数据对比表

速度	峰值碰撞力			平均碰撞力		
	文献值/ kN	仿真值/ kN	误差/ %	文献值/ kN	仿真值/ kN	误差/ %
2.5 m/ min ^[11]	49.30	47.66	3.33	23.48	26.82	14.22
2 m/s ^[5]	110.42	114.44	3.64	74.10	77.97	5.22

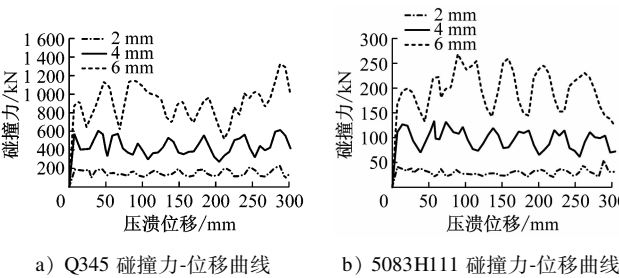


图3 薄壁构件在不同壁厚下的轴向耐撞性能

3.1.1 能量吸收

在壁厚 2~6 mm 的范围内,Q345 和 5083H111 材料的总吸能随壁厚的增加而增加,比吸能随壁厚的增加近似线性增长。锥角为 5° 时,Q345 材料的比吸能比 5083H111 材料的大,前者比吸能随壁厚的增加速度为 6.62 (kJ/kg)/mm,后者为 4.74 (kJ/kg)/mm,二者比吸能差值随壁厚的增加逐渐扩大。

3.1.2 碰撞力

在壁厚 2~6 mm 的范围内,Q345 材料的峰值碰撞力与平均碰撞力均比 5083H111 材料的大,其原因是 Q345 材料的动态屈服应力比 5083H111 材料的大,导致结构的碰撞力增大,二者的峰值碰撞力与平均碰撞力随壁厚增加近似幂函数增加。

对于平均碰撞力 F_{mean} ,由拟合数据得到,在特定的结构尺寸下,Q345 材料的 $F_{mean} = 47.171t^{1.6045}$,判定系数 $R^2 = 0.9989$;5083H111 材料的 $F_{mean} = 8.4677t^{1.7249}$, $R^2 = 0.9992$ 。Q345 材料的增加速度比 5083H111 材料的大,二者平均碰撞力的差值随壁厚的增大而增加。

本文仿真得到的峰值碰撞力、平均碰撞力与文献的试验值相差不大,碰撞力-位移曲线变化趋势大体一致;除与文献[11]在平均碰撞力方面的误差在 14.22% 外,其余各项的误差均在 5% 左右。对于工程应用,该误差范围可以接受。误差的产生主要是由于有限元仿真时材料数据无法做到与试验完全一致,且试验过程自身存在一定的误差。综上所述,本文的数值计算能够比较准确地模拟准静态与冲击动态下薄壁圆锥形构件的轴向压缩变形行为。

3 仿真结果分析

3.1 壁厚对轴向耐撞性能的影响

Q345 和 5083H111 材料在不同壁厚下的轴向耐撞性能如图 3 所示。仿真结果表明,动态压缩时壁厚对薄壁圆锥形构件轴向耐撞性能的影响趋势与文献[11]中的准静态压缩类似。

对于结构变形,随着壁厚的增加,压溃单个塑性铰需要的轴向力增大,单个塑性铰的轴向长度增加,总体的褶皱数目减少,其在图 3 碰撞力位移曲线中表现为波动振幅更大,峰值数目减少。由此可知,虽然增加壁厚可以增加吸能量,但由此引起的碰撞力波动以及碰撞减速度会更恶劣,故设计时需要综合考虑。

3.2 冲击速度对轴向耐撞性能的影响

不同冲击速度下的轴向耐撞性能如图 4 所示。

3.2.1 能量吸收

在壁厚 3 mm 及中低速范围内,两种材料的薄壁圆锥形构件总吸能随冲击速度的增加均近似线性增加。由于本小节中只涉及壁厚且质量保持不变的情况,故总吸能与比吸能的变化趋势一致。Q345 材料比吸能的增长速度近似为 0.24 (kJ/kg)/(km/h),5083H111 材料比吸能的增长速度近似为 0.20 (kJ/kg)/(km/h)。两种材料的比吸能随冲击速度近似平行增加,即随冲击速度增加,Q345 与 5083H111 材料的比吸能差值基本不变。因此,在结

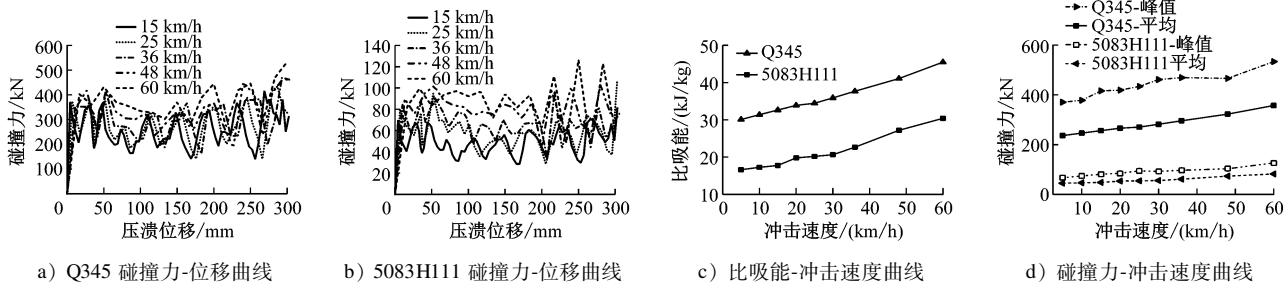


图4 薄壁构件在不同冲击速度下的轴向耐撞性能

构设计时,可不考虑碰撞工况中由于冲击速度不同引起的两种材料比吸能的差异。

3.2.2 碰撞力

从图4可以看出,不同冲击速度下的两种材料碰撞力的波动起伏程度和峰谷值变化不明显,构件发生褶皱的数目和位置基本不随速度的变化而改变;随着冲击速度的增加,两种材料的峰值碰撞力与平均碰撞力均近似线性增加,但与图3d)相比,增长速度比较和缓。造成碰撞力增加的主要原因是随着冲击速度的增加,结构变形应变率增大,材料的屈服强度和流动应力增加,结构碰撞力增大。通过在有限元模型中测量指定单元的应变率变化

可知,在本文所研究的冲击速度范围内,应变率的变化范围为 $10 \sim 300 \text{ s}^{-1}$ 。虽然5083H111材料具有负应变率敏感性,但在冲击速度范围内,5083H111材料处于单调增加的应变率范围内,应变率在 400 s^{-1} 以下,故随着应变率增加,材料的屈服应力增加,结构的碰撞力增大。仿真结果表明,与薄壁圆管一样,薄壁圆锥形构件也是应变率敏感结构。

3.3 锥角对轴向耐撞性能的影响

不同锥角薄壁圆锥形构件轴向耐撞性能如图5和图6所示。仿真结果表明,锥角对两种材料轴向耐撞性能的影响略有不同。

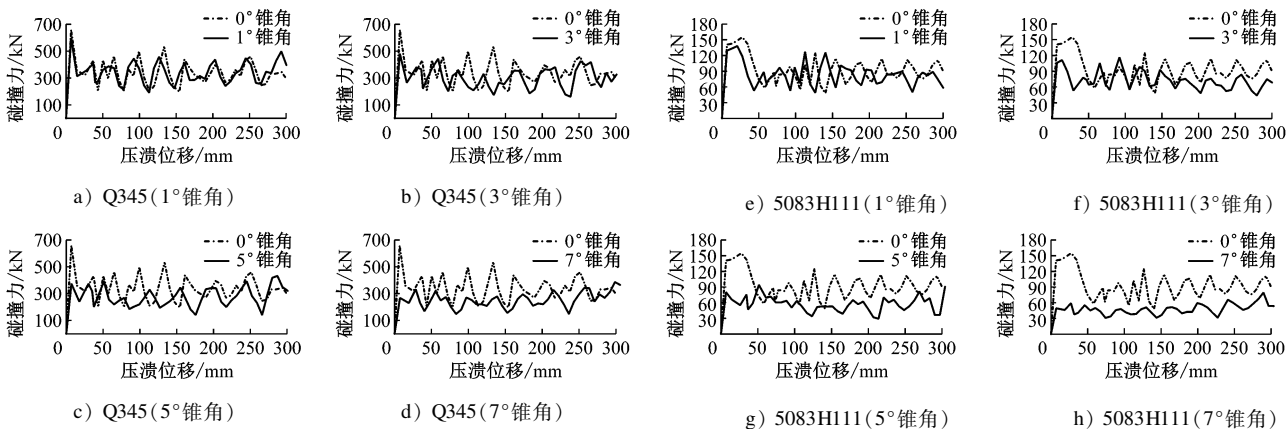


图5 薄壁构件不同锥角的碰撞力-压溃位移曲线

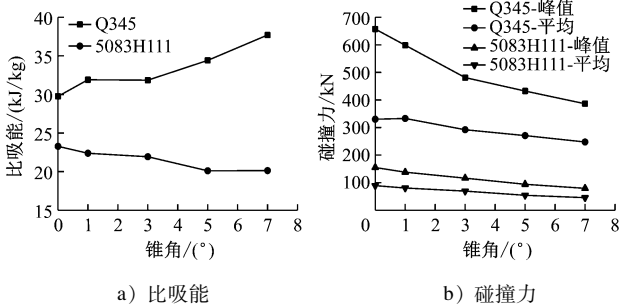





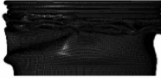


图6 薄壁构件不同锥角下比吸能与碰撞力变化

3.3.1 能量吸收

两种材料的总吸能均随着锥角的增加而减小,在同一位置处,压缩截面积随锥角的增大而减小,发生塑性变形的吸能材料减少,总吸能减少。但是,锥角的变化会改变锥形构件的变形模式,如轴对称模式、钻石模式、嵌套模式和混合模式等。表4为两种材料同一时刻不同锥角下的变形模式。

由表4可知,随着锥角的增大,Q345材料的变形模式更加规则和有序,也会开始出现嵌套模式。

表 4 薄壁构件不同锥角下碰撞变形模式

材料	0°锥角	3°锥角	7°锥角
Q345			
5083H111			

尤其是在锥角为 7° 时,变形模式包括嵌套模式和钻石模式,而且从小端到大端依次变形,材料有效吸能变形的部分增加,比吸能增加。而 5083H111 材料的变形模式没有发生明显改善,变形的随机性仍然较大。故对于 Q345,比吸能随锥角的增大而增大;对于 5083H111,比吸能随锥角的增大呈现减小趋势。由此可见,对于不同材料,锥角对吸能的影响不同,故在进行不同材料的吸能结构设计时,必须首先研究吸能随锥角的变化规律,以指导结构设计。

3.3.2 碰撞力

两种材料的峰值碰撞力和平均碰撞力均随着锥角的增大而减小。其原因主要是在大端直径不变的情况下,锥角增大使小端直径变小,碰撞力减小。对于 Q345 材料,锥角为 7° 的薄壁圆锥形构件峰值碰撞力仅为圆管峰值碰撞力的 56.64%;对于 5083H111 材料,锥角为 7° 的峰值碰撞力为圆管的 44.73%。由此可见,增大锥角在减小碰撞力方

面效果显著。由图 5 可知,随着锥角的增大,两种材料的碰撞力-位移曲线均更加平缓,振幅减小,碰撞力效率增大。同时,由于初始碰撞截面积减小,峰值碰撞力更小,碰撞力-位移曲线的波动变化更小,材料利用率更高,故在吸能装置设计时应优先考虑这一点。

4 方案比选

Q345 与 5083H111 材料制成的薄壁圆锥形构件受轴向冲击时,壁厚与冲击速度的增加会引起碰撞力与比吸能增加,而锥角的增大能够有效减少峰值碰撞力,减少碰撞力的波动,这对于保护乘员可起到明显的效果。在吸能装置的工程设计中,通常会以给定的总吸能为设计目标,但薄壁圆锥形构件碰撞力减小的同时,总吸能会减少。为消除总吸能差异,需进行总吸能相同的耐撞性能指标对比分析(分析时的冲击速度为 25 km/h)。

4.1 同种材料时的耐撞性能对比

有限元仿真结果得到,对于 Q345 材料,锥角为 0°、壁厚为 3.5 mm 的薄壁圆管总吸能为 127.52 kJ,与锥角为 7°、壁厚为 4 mm 的薄壁圆锥形构件总吸能基本相同。而对于 5083H111 材料,锥角为 7°、壁厚为 4.9 mm 的薄壁圆锥形构件总吸能与壁厚为 3.5 mm 的薄壁圆管总吸能基本相同。两种材料在不同锥角、总吸能一定时的耐撞性能指标见表 5。

表 5 不同锥角薄壁构件总吸能一定时耐撞性能对比

材料	锥角/(°)	壁厚/mm	总吸能/ kJ	质量/ kg	峰值碰撞力/ kN	平均碰撞力/ kN	碰撞力 效率
Q345	0	3.5	127.52	3.89	795.82	425.07	0.534
	7	4.0	129.04	2.63	617.70	430.13	0.696
5083H111	0	3.5	31.65	1.34	188.52	105.50	0.560
	7	4.9	32.63	1.11	174.67	108.77	0.623

仿真结果表明,对于同种材料的薄壁构件,当总吸能相同时,薄壁圆锥形构件的耐撞性能较薄壁圆管更优。尤其是 Q345 材料,锥角 7° 的薄壁圆锥形构件的峰值碰撞力相比薄壁圆管减小 22.38%,碰撞力效率增加 30.33%,结构质量减少 32.39%,可确定为达到总吸能要求时的优选方案。在以总吸能为目标的吸能装置设计时,应考虑以薄壁圆锥形构件代替薄壁圆形构件,并针对特定材料和尺寸等因素进行比选,从而得到最优设计方案。

4.2 不同材料时的耐撞性能对比

由表 6 的仿真结果可知,锥角为 7° 时,Q345 材料制成的壁厚 3 mm 薄壁圆锥形构件与 5083H111 材料制成的壁厚 7.5 mm 薄壁圆锥形构件的总吸能一致,约为 75 kJ。相比 Q345 材料,5083H111 材料的峰值碰撞力可减小 9.71%,碰撞力效率可提高 11.86%,质量减少 14.21%,故 5083H111 材料比 Q345 材料更有优势。综上所述,在类似的工程设计时,建议优先采用 5083H111 材料。

表 6 不同材料薄壁构件总吸能一定时耐撞性能对比

材料	锥角/(°)	壁厚/mm	峰值碰撞力/ kN	平均碰撞力/ kN	总吸能/kJ	质量/kg	碰撞力 效率
Q345	7	3.0	386.27	247.53	74.26	1.97	0.641
5083H111	7	7.5	348.76	249.93	74.98	1.69	0.717

5 结论

针对城市轨道交通车辆用压溃式薄壁圆锥形构件吸能装置,研究了以 Q345 和 5083H111 为材料时,其壁厚、冲击速度、锥角对轴向耐撞性能的影响,并得出以下结论:

(1) 两种材料的薄壁圆锥形构件的比吸能、峰值碰撞力、平均碰撞力均随壁厚和冲击速度的增加而增加;且在相同的壁厚和冲击速度下,Q345 材料的比吸能和碰撞力均比 5083H111 材料的要大。

(2) 针对两种材料,锥角对耐撞性能的影响差异明显。随锥角增大,Q345 材料的比吸能增大,5083H111 材料的比吸能总体呈减小趋势;两种材料的峰值碰撞力均减小,且碰撞力-位移曲线随锥角的增大趋于缓和。增大锥角对减小峰值碰撞力、减小碰撞减速度效果显著。

(3) 薄壁圆锥形构件减小碰撞力的同时会减少总吸能。在总吸能一定时,采用大锥角同时增加壁厚的薄壁圆锥形构件较薄壁圆管峰值碰撞力更小,碰撞力波动更小,比吸能更高。使用 5083H111 材料并增加壁厚比使用 Q345 材料有同上述一样的耐撞性能优势。因此,在工程设计中,吸能装置应考虑选用薄壁圆锥形构件代替圆形构件,并考虑选用 5083H111 材料。

由于目前城轨车辆的碰撞主要集中在中低速范围,故本文主要基于 EN 15227 标准开展了城轨车辆吸能结构的中低速碰撞研究,对于更高速度下的碰撞性能有待进一步研究。

参考文献

[1] NAGEL G M, THAMBIRATNAM D P. Dynamic simulation

and energy absorptionof tapered thin-walled tubes under oblique impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10):1595.

[2] MAMALIS A G, MANOLAKOS D E, VIEGELAHN G L. The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989, 8(3):241.

[3] NAGEL G M, THAMBIRATNAM D P. A numerical study on theimpact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(2):201.

[4] MAMALIS A G, JOHNSON W. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25 (9/10):713.

[5] AHMAD Z, THAMBIRATNAM D P. Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading [J]. Materials & Design, 2009, 30(7):2393.

[6] 侯淑娟. 薄壁构件的抗撞性优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[7] 荆友录,温卫东,魏民祥. 不同截面结构薄壁直梁的轴向耐撞性研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(4):455.

[8] 邹猛,魏灿刚,许述财,等. 汽车碰撞中锥形晶胞薄壁金属管吸能特性的仿真研究[J]. 汽车安全与节能学报,2012, 3 (4):326.

[9] 洪武,徐迎,金丰年,等. 薄壁圆锥管轴向压缩吸能特性研究 [J]. 振动与冲击,2015, 34(5):88.

[10] 杨超. 列车碰撞动力学关键问题研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[11] MAMALIS A G, MANOLAKOS D E, IOANNIDISM B, et al. Numerical simulation of thin-walled metallic circular frusta subjected to axial loading [J]. International Journal of Crash-worthiness, 2005,10(5):505.

(收稿日期:2017-06-13)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—51030704