

Reproduce of Vehicle Frontal Crash Waveform Using Thin-Walled Circular Energy Absorption Tube

Libo Cao, Peigang Yan

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Changsha, China, 410082

Email: hdclb@163.com, sdypg@163.com

Abstract: The method to reproduce the vehicle frontal crash acceleration waveform using the combination of thin-walled circular energy absorption tubes welded on the front end of sled was introduced. Finite element model of the sled with tubes was developed, and the parameters of these tubes were determined by sled crash simulation using LS_DYNA software. Sled tests were conducted to demonstrate the feasibility of the method. The test and simulation results show that this method can reproduce the frontal crash acceleration waveform with the deviation less than 10%.

Keywords: front crash; waveform repetition; thin-walled circular tube; sled test

利用薄壁圆形吸能管模拟实车正面碰撞波形的研究

曹立波, 颜培岗

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 中国, 410082

Email: hdclb@163.com, sdypg@163.com

摘要: 本文提出了一种采用薄壁圆形吸能管组合来模拟实车正面碰撞加速度波形的方案。通过对样车的正面碰撞加速度曲线的特征进行分析, 选择不同长度、不同壁厚的薄壁圆形吸能管焊接在台车前方, 在台车碰撞中复现正面碰撞加速度曲线。本文建立了台车碰撞仿真有限元模型, 利用LS_DYNA软件进行了仿真研究, 确定各圆形吸能管的参数值, 并通过台车实验验证了方案的可行性。结果表明, 采用该方法可以较好地复现碰撞加速度波形, 误差可以控制在10%以内。

关键词: 正面碰撞; 波形复现; 薄壁圆管; 台车实验

1 引言

碰撞缓冲吸能装置, 也就是波形复现装置, 是台车碰撞实验中的关键。利用台车模拟实车碰撞时须保证二者的速度及加速度变化情况基本一致, 常用的台车碰撞缓冲吸能装置有液压缓冲吸能装置、塑料缓冲吸能装置和机械缓冲吸能装置等。液压缓冲吸能装置^[1]机构复杂且造价高昂, 一般高校及科研院所所难以接受; 塑料缓冲吸能装置^[2]波形复现能力有限, 仅仅适合ECER16\ECER17等法规实验; 机械缓冲吸能装置^[3-5]结构相对简单, 波形复现能力较好, 在各种台车碰撞设备中得到广泛应用。

本文提出了采用多根薄壁圆形吸能管的组合结构来复现实车正面碰撞加速度波形的方案, 利用计算机仿真技术确定圆形吸能管的参数, 再利用台车实验来验证该方案的可行性。

2 圆形吸能管的动态响应特性

圆形吸能管破坏模式稳定、变形历时长、吸能效率高, 这些都符合能量吸收结构及材料选择的一般原则。进行台车碰撞时, 各吸能管水平焊接在台车前端, 与刚性墙碰撞后发生轴向压溃。圆形吸能管在轴向冲击载荷下的动态响应比较复杂, 受外载特性、几何特性和材料特性等因素的影响。

圆形吸能管在轴向冲击载荷作用下的动力屈曲问题可分为动力塑性屈曲和动力渐进屈服两类(如图2所示), 其中动力渐进屈服可以吸收碰撞过程中的大部分能量。当冲击速度较低时(例如 $v < 5 \text{ m/s}$)金属圆形吸能管通常表现为动力渐近屈服; 而在受到高速冲击时, 圆形吸能管首先发生动力塑性屈服, 然后再进入动力渐进屈服阶段。

受轴向冲击的圆形吸能管变形模式受结构的径厚比 R/t 影响较大, 随着径厚比增大, 屈服形式会由轴对称模式向非轴对称模式转变。但对薄壁圆形吸能管而言, 由于其壁厚的不均匀性相对厚壁圆形吸能管大很

多,因而很难出现轴对称变形模式,一般以过渡或者非轴对称变形模式为屈服模式^[6-8]。此外,圆形吸能管的变形模式还会受到结构的初始几何缺陷(诱导孔)影响。

应变率效应是材料固有的特性,在轴向冲击载荷作用下,材料应变率敏感性可以显著提高使材料发生塑性变形的冲击载荷峰值,进而推迟材料进入塑性屈服的时间。应变率效应表现为一种强化效应,分析时考虑应变率敏感性可以显著地提高圆形吸能管的抗冲击屈服能力。本文选用的薄壁圆形吸能管使用的便是应变率敏感的Q235材料。

3 台车碰撞的仿真与实验研究

分析样车为某款量产紧凑车型,加速度波形复现的目标是使台车碰撞加速度波形在峰值及峰值出现时刻上与实车碰撞加速度波形的误差控制在10%以内。图1所示为该样车在C-NCAP正面100%重叠刚性壁障碰撞试验中得到的加速度曲线。由图1可以看出,实车碰撞的加速度曲线有五个特征峰值(如图1中编号所示)。由于碰撞加速度值达到最大峰值时(第4个峰值)假人的损伤值已经达到最大,因而,对第5个波峰及其后曲线的模拟不是太重要,但须保证其值小于第4个波峰的大小。

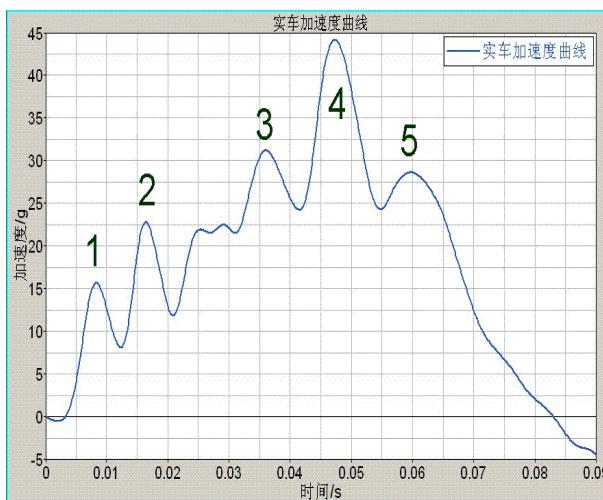


Figure 1. The vehicle frontal crash acceleration waveform

图1. 实车碰撞加速度曲线

台车实验时,为准确得到仪表板、方向盘、座椅、安全带及安全气囊等部件对假人动态响应的影响,将实车的乘员仓截取下来固定在了台车上,如图2所示。实车的整车整备质量为1120kg,台车及乘员仓的总质

量为1050kg,二者基本相同,也就是说台车与实车在碰撞过程中吸收的能量基本相同。参照实际结构,建立了如图3所示的台车有限元模型,车身骨架及假人的质量用配重模拟,并通过调整配重的位置实现仿真模型与台车质心位置的一致。车轮与台车通过圆柱铰连接,用于模拟碰撞后期台车的上翘过程。



Figure 2. The sled crash test

图2. 台车实验图

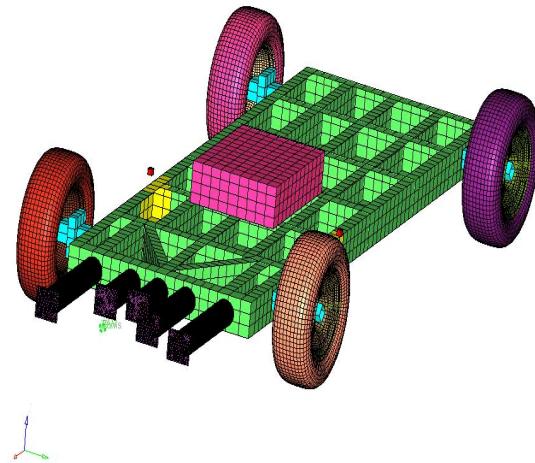


Figure 3. The sled simulation modal

图3. 台车仿真模型

本文采用组合的薄壁圆形吸能管结构作为台车的吸能装置。圆形吸能管模型由四节点的BT壳单元组成,单元大小为5mm。为降低沙漏现象的影响,单元在厚度方向上取3个积分点。在进行台车仿真分析时,选择了材料为Q235的焊接钢管,并将材料模型定义为24#分段线性弹塑性材料。考虑到Q235为应变率敏感材料,定义时使用Cowper-Symonds对模型施加了应变

率效应, 其中C=2500, P=5。

在进行仿真分析时, 综合考虑了薄壁圆形吸能管的数量、长度、外径、壁厚、诱导孔参数以及诱导孔距前端距离等参数对加速度曲线的影响。由实车的加速度曲线可以看出, 前四个波峰峰值逐渐增大, 因而, 分析时采用了四组长度依次减小的圆形吸能管来模拟, 各管的具体长度由峰值发生的时间确定。选择圆形吸能管的外径及壁厚时, 需综合考虑加速度曲线各峰值及各波峰间平均值的影响。各峰值的微调, 通过在圆形吸能管前端开诱导孔并调整其参数来实现。表1所示为最终确定的各薄壁圆形吸能管参数值。

Table 1. The parameters of thin-walled circular energy absorption tubes

表 1. 各薄壁圆形吸能管参数

| 编号 | 长度 /mm | 外径 /mm | 壁厚 /mm | 诱导孔参数 | 诱导孔圆心距前端距离 |
|----|--------|--------|--------|-------|------------|
| 1 | 600 | 114 | 1.8 | 6-Ø12 | 30mm |
| 2 | 600 | 114 | 1.8 | 6-Ø12 | 30mm |
| 3 | 500 | 114 | 1.8 | 6-Ø12 | 30mm |
| 4 | 320 | 114 | 1.8 | 无 | 无 |
| 5 | 260 | 114 | 2.0 | 无 | 无 |

图4中虚线为台车模型以50km/h的初速度与刚性墙碰撞后得到的加速度曲线, 通过对台车仿真的加速度曲线与实车的加速度曲线可以看出, 二者的走势基本一致, 各峰值及峰值发生时间比较吻合。

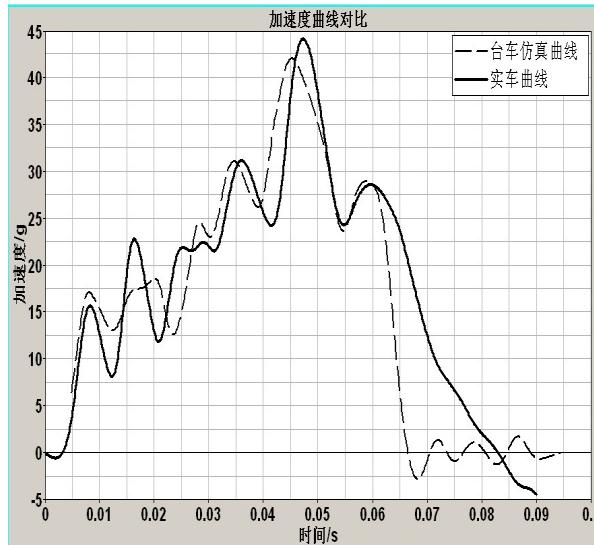


Figure 4. Contrast between sled simulation acceleration and vehicle crash acceleration

图4. 台车仿真加速度曲线与实车加速度曲线对比

表2更直观地给出了台车仿真加速度与实车加速度在峰值及峰值发生时间上的差异。除2号波峰在峰值与峰值发生时间上的相对误差比较大以外, 其余各波峰均控制在10%的范围内。考虑到仿真的加速度曲线波峰过度比较平缓, 2号波峰没有形成一个明显的突起, 但在台车实验时会有所改善, 因而认为此方案仍是可行的。

Table 2. Peak value contrast between sled simulation acceleration and sled test acceleration

表 2. 台车仿真加速度峰值与实车加速度峰值对比

| 峰值编号 | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 |
|-------------|------|-------|------|------|
| 仿真峰值 (g) | 17.1 | 18.6 | 31 | 42 |
| 实车峰值 (g) | 15.6 | 22.8 | 31.2 | 44.1 |
| 峰值相对误差 | 9.6% | 18.4% | 0.6% | 4.8% |
| 仿真峰值时间 (ms) | 8.1 | 20.1 | 34.6 | 45.2 |
| 实车峰值时间 (ms) | 8.3 | 16.4 | 36 | 47.3 |
| 峰值时间相对误差 | 2.4% | 22.5% | 3.9% | 4.4% |

为了验证台车仿真模型的有效性, 对该方案进行了台车实验研究。由台车仿真与实验加速度对比曲线(如图5所示)可以看出, 二者走势一致, 峰值及峰值发生时间相近, 因而该仿真模型是可靠的。对比发现, 台车实验加速度曲线的波峰比台车仿真陡峭一些, 且各峰值发生的时间均有所提前。但台车实验加速度曲线的2号峰值有明显增大, 与实车的加速度曲线会更加接近。

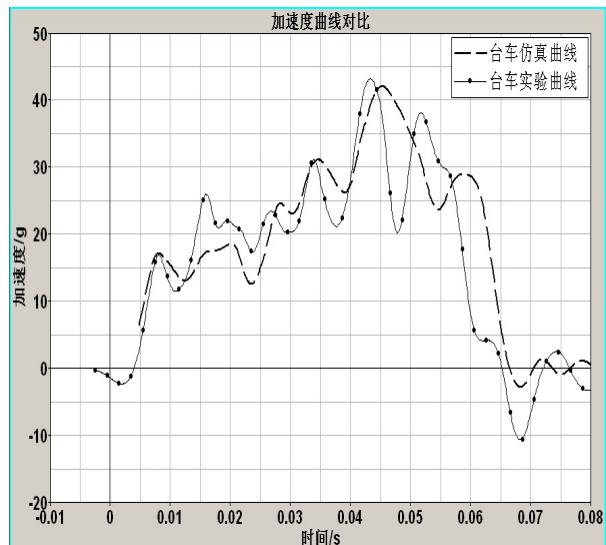


Figure 5. Contrast between sled simulation acceleration and sled test acceleration

图5. 台车仿真加速度曲线与台车实验加速度曲线对比

由于碰撞初始速度较高（50km/h），较长的两组圆形吸能管在碰撞过程中先发生了动力塑性屈服，又进入了动力渐进屈服阶段，由台车实验与仿真中薄壁圆形吸能管的变形图（如图6和图7所示）可以看出，由于径厚比较大且前端开有均布诱导孔，其屈服形式表现为过度变形模式。碰撞后期，台车冲击速度减小，因而较短的两组圆形吸能管直接进入了动力渐进屈服阶段，且由于轴向压缩距离较短，没有产生大的变形。



Figure 6. The deformation of circular energy absorption tubes in sled crash test

图6. 台车实验各圆形吸能管变形图

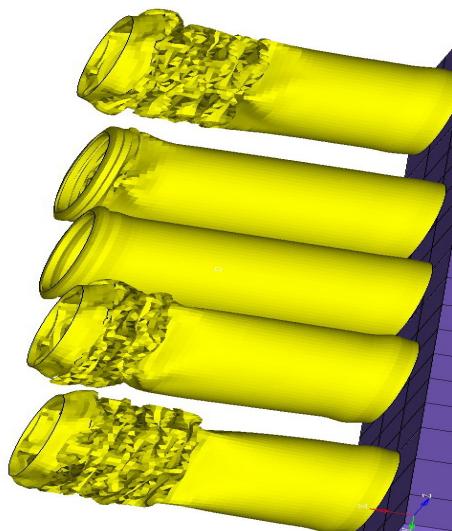


Figure 7. The deformation of circular energy absorption tubes in sled simulation

图7. 台车仿真中各圆形吸能管变形图

4 台车实验与实车加速度曲线对比

图8与表3为台车实验加速度曲线与实车加速度曲线的对比情况。对比发现，台车实验加速度曲线趋势与实车加速度曲线走势一致，除2号峰值误差为13.5%，基本符合要求外，其余峰值及峰值发生时间误差均在10%范围内。由此可见，台车碰撞的加速度曲线各峰值及峰值发生时间与实车相符，可以代替实车用于正面碰撞约束系统相关参数的研究。

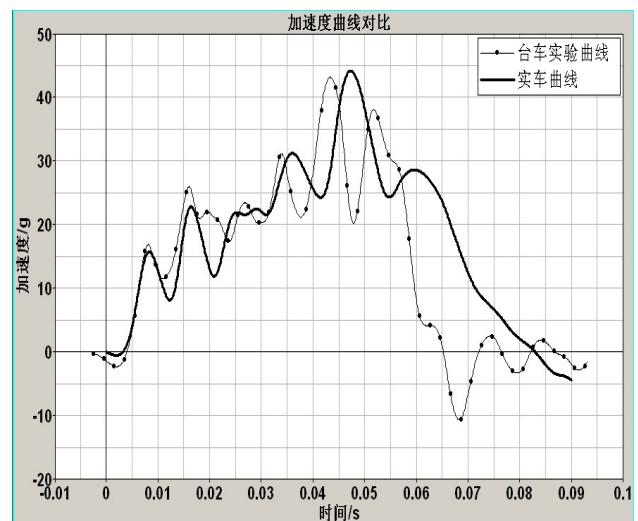


Figure 8. Cure contrast between sled test acceleration and vehicle crash acceleration

图8. 台车实验加速度曲线与实车实验加速度曲线对比

Table 3. Peak value contrast between sled simulation acceleration and sled test acceleration

表 3. 台车实验加速度峰值与实车实验加速度峰值对比

| 峰值编号 | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 |
|-------------|------|-------|------|------|
| 台车峰值 (g) | 16.8 | 25.9 | 31.1 | 43.1 |
| 实车峰值 (g) | 15.6 | 22.8 | 31.2 | 44.1 |
| 峰值相对误差 | 7.7% | 13.5% | 0.3% | 2.3% |
| 台车峰值时间 (ms) | 8.1 | 16 | 33.9 | 43.3 |
| 实车峰值时间 (ms) | 8.3 | 16.4 | 36 | 47.3 |
| 峰值时间相对误差 | 2.4% | 2.4% | 5.8% | 8.5% |

5 结论

采用薄壁圆形吸能管组合结构作为台车正面碰撞的波形复现装置是可行的，其波形复现误差基本上可以控制在10%以内。该方法结构简单，成本低廉，且重复性较好，可以应用台车碰撞实验中。

References (参考文献)

- [1] Yang Zhen, Qiu Yang, Bo Yucheng. Study of PG-15- control-staff sled test technology [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003,37 (1) :89-91
杨臻, 邱阳, 薄玉成.PG- 15 型节制杆式台车试验系统的稳定性和重复性[J].西安交通大学报, 2003, 37(1): 89-91.
- [2] Dong Lili, Wang Xuan, Li Hongguang. A study on plastic energy absorber for simulation crash test system of motor vehicle, [J]. *World auto*, 1996 (5) ,18-20.
董丽莉, 王瑄, 李宏光.汽车模拟碰撞试验系统塑料吸能器的研究[J].世界汽车, 1996(5),18-20.
- [3] Cao Libo, Zhong Zhihua, Baizhong Hao, Liu Kejin. A research on mechanical energy absorbing device used in sled crash test [J]. *Automotive Engineering*, 2002,24 (3) ,228-231.
曹立波, 钟志华, 白中浩, 刘克进.台车碰撞试验用机械缓冲吸能装置研究[J].汽车工程, 2002, 24(3), 228-231.
- [4] Ma Zhixiong, Zhu Xichan, Shang Enyi, Miao qiang. Development and application of a new frontal impact sled test system [J]. *Journal Wuhan University of Technology*, 2008,30 (2) :248-251.
- [5] Chan Xiaodong, Shang Enyi, Ge Ruhai, Zheng Zhaochu, Zhang Bingjun. A research on an energy absorber for vehicle sled test of crash simulation [J]. *Automotive Engineering*, 2006,28 (7), 659-662.
陈晓东, 商恩义, 葛如海, 郑兆树, 张丙军.汽车碰撞台车模拟试验吸能器的研究[J].汽车工程, 2006, 28(7), 659-662.
- [6] Gu Hongjun, Zhao Zhiguo, Lu Ting jin, Fan Fusheng. Buckling of thin-wall cylindrical shell under axial impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2004, 24 (4) ,58-63.
顾红军, 赵志国, 陆廷金, 范伏生.轴向冲击下薄壁圆形吸能管的屈曲行为的实验研究[J].振动与冲击, 2004, 24(4), 58-63
- [7] Zimcik D G, Tennyson R C. Stability of circular cylindrical shells under transit axial impulsive loading [J]. *AIAA Journal*. 1980, 18(5): 691-699.
- [8] Z.G. Wei, J. L. Yu, R.C. Batra. Dynamic buckling of thin cylindrical shells under axial impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, 32: 575-592.