

轨道车辆切削式吸能过程仿真

常宁, 刘国伟

(中南大学 交通运输工程学院 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 利用金属切削过程吸收能量的原理, 在金属切削研究和轨道车辆吸能研究的交叉领域内, 提出一种利用切屑生成过程进行吸能并用于轨道车辆被动安全的新型切削式吸能装置。根据非线性动态模拟理论, 利用显式有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对该切削式吸能装置的吸能过程进行三维仿真, 得到该装置在撞击过程中能量吸收和切削力的时程曲线。研究表明: 与现有吸能装置相比, 切削式吸能装置可以在更短的时间内吸收撞击能量, 而且吸能能力更强; 切削式吸能装置具有更强的降低撞击力峰值的能力, 而且撞击力到达第 1 个峰值的时间也有所延迟。

关键词: 轨道车辆; 切削; 吸能装置; 显式有限元

中图分类号: U270.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)06-2444-07

Simulation for energy-absorbing process of railway vehicle in metal-cutting way

CHANG Ning, LIU Guo-wei

(Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Using the theory of energy absorption in the metal-cutting process, a new-style energy-absorbing device in metal-cutting way utilizing the absorbing energy in the generating process of chips and using for passive safety device of railway vehicle was put forward in the cross research field between metal-cutting and railway vehicle energy absorption. Based on the non-linear dynamic simulation principle, the three-dimensional simulation for the energy-absorbing process of energy-absorbing device in metal-cutting way was carried out with explicit finite element software ANSYS/LS-DYNA. Absorbed energy and cutting force curve were obtained. The results show that compared with existing energy-absorbing device, proposed energy-absorbing device in metal-cutting way can absorb more collision energy in a shorter time, and energy-absorbing capacity is stronger; energy-absorbing device in metal-cutting way can well reduce the peak value of impact force, and it takes more time to reach the peak value.

Key words: railway vehicle; cutting; energy-absorbing device; explicit finite element

随着铁路运输事业的发展, 客运列车运行速度迅速提高, 一旦发生列车碰撞事故, 将造成重大人员伤亡。提高客运列车在碰撞事故中的被动安全性, 为乘员提供被动安全保护, 是一个极其重要的问题。轨道车辆发生意外碰撞时, 吸能装置可吸收大部分碰撞动

能, 可减缓车辆碰撞对乘员区的不利影响, 最大限度地减少人员伤亡和财产损失。因此, 对吸能装置进行深入研究, 对减少交通事故造成人员伤亡, 减少由此产生的社会经济损失有着非常重要的意义。英国最早进行了耐冲击吸能车体研究, 对铁道车辆结构耐撞性

收稿日期: 2009-11-15; 修回日期: 2010-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175110)

通信作者: 刘国伟(1955-), 男, 湖南醴陵人, 教授, 从事轨道交通研究; 电话: 13187055884; E-mail: liuguoweimail@yahoo.com.cn

和吸能元件碰撞进行了深入的研究。法国、德国、美国、韩国等国家对列车碰撞过程中的吸能问题进行了相应的研究^[1-4]。我国对列车碰撞问题的研究始于90年代中期。李兰等^[5-6]对轨道列车多体耦合碰撞时车体结构发生塑性大变形的仿真基本原理和方法进行了研究。车辆被动安全防护中的一项重要技术就是将车体结构分为乘员区、承载吸能结构区和专用吸能结构区。乘员区在撞击事故中不发生塑性大变形,可以为乘员提供有效的生存空间,降低碰撞带来的伤害;承载吸能结构区在正常运行时可正常传递纵向力,发生撞击事故时该部分结构产生塑性大变形吸收能量;专用吸能结构区内安装专用吸能装置(以下简称为“吸能装置”),仅在发生撞击事故时通过材料塑性大变形和大变形后材料的破裂过程吸收能量,吸能装置在碰撞失效后可以替换^[7]。现有轨道车辆吸能装置的吸能元件基本结构形式为:金属材料或复合材料构成受轴向压力作用的管状结构(如W型、V型、圆形、方形、Z形和波纹形等),蜂窝状结构和网状结构^[8-9]。现有轨道车辆吸能装置所采用的吸能原理主要是通过材料在碰撞过程中产生塑性大变形(如波纹型金属管)或复合材料的分层弯曲进行吸能、横向剪切以及局部屈曲吸能(如玻璃纤维增强塑料GRP管)。就吸能装置的吸能能力而言,金属材料塑性大变形和变形之后材料破裂的吸能方式优于金属材料仅产生塑性大变形的吸能方式^[10]。根据这一结论推测,金属的破碎过程很可能是一种吸能能力更强的过程。任何一种有效的吸能装置所进行的吸能过程必须是一种不可逆和可控制过程。在金属切削过程中,刀具对工件进行切削而产生切屑的过程就是一种金属的破碎过程,是一种典型的、不可逆的能量耗散的过程,可以在短时间内消耗大量的能量。在金属切削和轨道车辆吸能研究领域,利用金属切削原理对轨道车辆吸能装置进行研究的报道较少。本文作者根据金属切削过程和轨道车辆碰撞吸能的特点,提出一种新型的吸能装置即切削式吸能装置,并对切削吸能过程进行三维有限元仿真,研究切削式吸能过程的吸能能力以及切削力的变化,对吸能过程进行基础研究,并与现有吸能装置进行比较,研究切削式吸能装置的可行性及其应用。

1 轨道车辆切削式吸能装置

切削式吸能装置的结构原理如图1所示,该装置由安装在被撞车车体底架上的套筒、装有切削刀具的刀杆和可拆卸的刀杆轴向定位套组成。刀杆轴向定位

套固定在套筒左端,限制刀杆只能沿套筒的轴线方向(x 方向)运动。当撞击车以速度 v 与刀杆左端相撞后,撞击车和刀杆同时以初速度 v_0 向被撞车车体底架方向移动,刀杆右端的切削刀具(硬质材料)对套筒(软质材料)内表面表层进行切削。沿用金属切削加工的习惯,以下将套筒称为“工件”。刀具在切削吸能行程范围内对工件进行切削,产生切屑以耗散撞击能量,从而达到大量吸能的目的。刀具对工件的切削力就是撞击力的直接体现。

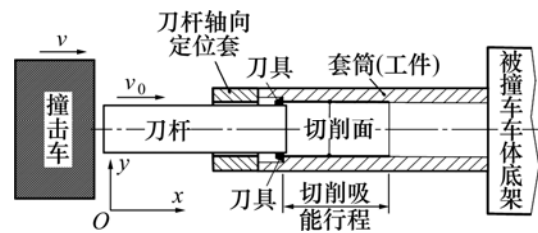


图1 切削式吸能装置结构原理图

Fig.1 Elementary diagram of energy-absorbing device structure in metal-cutting way

尽管切削式吸能过程与金属切削加工过程都是切屑形成的过程,但两者有着以下主要不同。金属切削加工具有以下特点:以尽可能小的能耗,获得希望的表面形状和表面质量;根据工件加工需要确定切削行程;刀具切削速度恒定。而切削式吸能过程的特点为:以获得理想的耗能过程及耗能量为目的,对切削表面质量不要求;切削行程需根据减小撞击力最大值、延长撞击力作用时间和大量吸能的原则而定;只给定切削初速度,撞击吸能过程中的切削速度随切削时间变化。鉴于金属切削加工与切削吸能过程存在不同,需对切削吸能过程进行专门研究。轨道车辆切削式吸能装置安装在车体结构的专用吸能装置处。吸能装置的一端固定在车体底架缓冲梁上,另一端与防爬器相连。撞击事故发生时,车钩缓冲装置吸收一定动能后与底架脱离;然后,由切削式吸能装置继续吸收撞击能量直至其失效为止;最后,由车体承载吸能结构产生塑性大变形吸能。

2 非线性动态模拟理论

切削式吸能过程是一个复杂的非线性动态过程,其控制方程简述如下^[11-12]。

取初始时刻的质点坐标为 $X_i(i=1, 2, 3)$,在任意时刻 t ,质点坐标为 $x_i(i=1, 2, 3)$ 。则此质点的运动方程为:

$$x_i = x_i(X_i, t); \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

在 $t=0$ 时, 初始条件为

$$\begin{cases} x_i(X_i, 0) = X_i \\ \dot{x}_i(X_i, 0) = V_i(X_i, 0) \end{cases} \quad (2)$$

2.1 质量守恒方程

$$\rho_0 = J_x \cdot \rho \quad (3)$$

其中: ρ_0 为初始密度; ρ 为当前密度; J_x 为形变梯度。

2.2 运动方程

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \ddot{x}_i \quad (4)$$

其中: σ_{ij} 为柯西应力; b_i 为单位质量的体积力; \ddot{x}_i 为加速度。

2.3 能量守恒方程

在碰撞过程中, 系统中动能大部分转化为结构的变性能即位能, 并有部分动能以热能形式耗散。为使仿真过程简单, 仅考虑动能和位能的变化。

根据能量守恒定律, 动能和位能的变化等于外力所作的功, 即

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dw}{dt} = \int \rho \cdot b_i \frac{\partial u_i}{\partial t} dV + \int T_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial t} dS \quad (5)$$

其中: w 为单位位能; k 为单位动能; u_i 为 i 方向的位移; T_i 为面力; S 为单位面积。

2.4 边界条件

(1) 面力边界条件: $\sigma_{ij} \cdot n_j = T_i(t)$ 。在面力边界 S^1 上, n_j 为系统面力边界 S^1 的外法线方向余弦; $T_i(t)$ 为面力载荷。

(2) 位移边界条件: $x_i = K_i(t)$ 。在位移边界 S^2 上, $K_i(t)$ 为给定的位移函数。

滑动接触面间断处的跳跃条件: $(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0$ 。在接触边界 S^3 上, 当 $x_i^+ = x_i^-$ 时该式成立。

3 轨道车辆切削式吸能过程的仿真

在切削式吸能过程中, 工件上的被切削层在刀具的挤压作用下, 沿切削刃附近的金属首先产生弹性变形, 当剪应力引起的应力达到金属材料的屈服极限后, 切削层金属便发生滑移, 沿切削分离线与工件未加工表面发生分离, 产生塑性变形, 然后, 沿前刀面流出。在流出过程中, 受摩擦力作用再次发生滑移变形, 最后形成切屑。切削式吸能过程示意图如图 2 所示(其中: γ_0 为前角; α_0 为后角)。

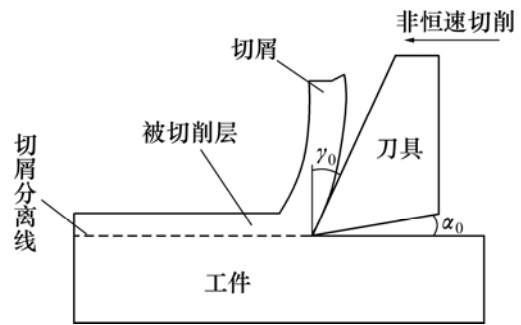


图 2 切削式吸能过程示意图

Fig.2 Sketch map of energy-absorbing process in metal-cutting way

根据上述理论和方法, 借助于大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对切削式吸能过程进行仿真。ANSYS/LS-DYNA 同时具有 ANSYS 强大的前后处理功能和 LS-DYNA 的非线性求解功能的特点, 而且 LS-DYNA 是世界上著名的以显式为主、隐式为辅的通用显式非线性动力分析程序, 能够模拟真实世界的各种复杂问题, 适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题, 在工程应用领域被认可为最佳的分析软件包^[13]。

3.1 切削式吸能过程的有限元模型

将切削式吸能装置简化为图 3 所示的有限元模型, 只采用 1 把刀具切削工件; 取工件外表面靠近刀具的一小部分作为研究对象, 其形状简化为长方体。

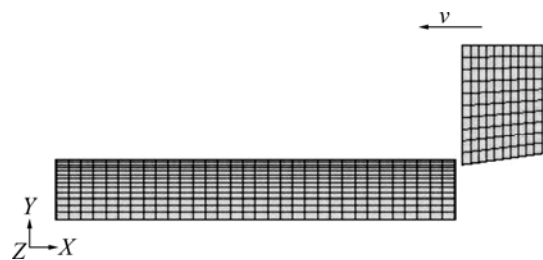


图 3 吸能装置有限元简化模型

Fig.3 Simplified model of energy-absorbing device

刀具基本几何角度 γ_0 为 0° , α_0 为 8° , 切削层厚度为 2 mm 。前角影响切削过程中的切削力, 增大刀具前角, 可以减小切削力, 但刀具前角增大, 会降低切削刃和刀头的强度, 切削时刀头容易崩刃; 后角影响刀具后刀面与已加工表面之间的摩擦, 后角增大可减小后刀面与加工表面之间的摩擦, 但是后角越大, 切削刃越锋利, 切削刃和刀头的强度越弱^[14]。在研究中, 主要考虑在保证刀刃不损坏的前提下, 尽量增加能量消耗, 保证切削刃和刀头的强度, 而对切削表面质量, 切屑

形状不做具体要求。故在仿真过程中, 选用前角为 0° , 后角为 8° 的刀具。

在切削吸能过程中, 工件切削区材料会经历由弹性变形到塑性变形的过程。因此, 在仿真时, 合理确定材料模型是正确仿真切削吸能过程的关键。由于切削过程中刀具只发生弹性变形, 工件既有弹性变形, 又有塑性变形, 因此, 在仿真中, 刀具材料选用弹性材料模型 MAT_ELASTIC。该模型是一种各向同性的材料模型; 而工件材料选用弹塑性材料模型 MAT_ELASTIC_KINEMATIC, 该材料模型是一种各向同性应变率相关的运动硬化材料模型。刀具和工件材料参数如表 1 所示。

表 1 刀具和工件材料参数

Table 1 Tool and workpiece material parameters

部件	材料	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	屈服应 力/ MPa	切线模量/ MPa
工件	45 号钢	7 865	210	310	768
刀具	硬质合金 YT15	11 500	510	—	—
部件	材料	失效应变 ε	应变率 参数 C	应变率 参数 P	应变硬化 参数 β
工件	45 号钢	0.75	5	40	0.30
刀具	硬质合金 YT15	—	—	—	—

3.2 单元特性及网格划分

刀具和工件均采用常用的三维六面体单元 SOLID164 进行网格划分, 该单元是具有 8 节点的体单元, 稳定性好。在网格划分过程中, 为了保证网格单元的有序性, 采用六面体映射网格划分方法^[15]。刀具采用单点积分算法, 工件采用全积分单元算法, 在尽可能缩短计算时间的情况下, 避免出现沙漏问题。划分完网格后, 创建刀具和工件 Part, 其中工件 part 包含 12 500 个有限元单元, 刀具 part 包含 1 000 个有限元单元。

3.3 接触的处理

切削过程中刀具与工件、切屑的接触处理是一个非常关键的问题。接触问题涉及应力集中、边界非线性、材料或几何非线性, 甚至单元的侵蚀, 问题复杂, 但十分重要^[16]。

由于是三维分析且切削式吸能过程中涉及工件材料的去除问题, 因此, 选用面面侵蚀接触算法来仿真切削过程中的刀具和工件的接触问题。在定义侵蚀接

触时, 指定发生材料失效时保持边界条件对称, 允许发生实体内部侵蚀, 自由表面发生侵蚀时包括实体单元的表面。

3.4 边界条件及载荷

本文仿真分析过程中的边界条件为工件固定, 刀具移动。所以, 对工件施加 X , Y 和 Z 3 个方向的位移约束, 对刀具施加 Y 和 Z 方向位移约束, 为了与已有的、基于金属塑性变形吸能原理的吸能过程进行对比, 选取质量为 50 kg 的刚性块以 -10 m/s 的速度撞击刀具, 使刀具获得 X 负方向初速度载荷。

3.5 切屑分离准则

金属切削加工是一个使被加工材料不断产生分离的过程。一个合理的分离准则只有真实地反映切削加工材料的力学和物理性质, 才能得到合理的结果。

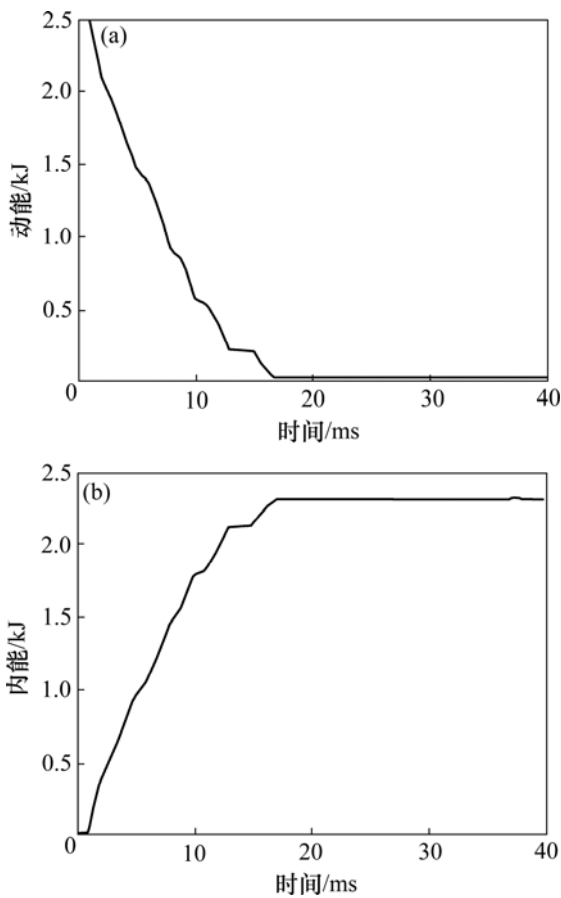
金属切削过程有限元仿真的分离准则主要分为几何分离准则和物理分离准则^[17]。几何分离准则是以刀尖与刀尖前单元节点的距离来定义的。假定在预定义加工路径上, 此距离小于某个临界值时, 该节点被分成 2 个, 其中一个节点沿前刀面向上移动, 另一个保留在加工表面上。物理分离准则是以刀尖前单元节点的物理量来定义的, 如应变、应力、应变能等。当单元中所选定物理量的值超过给定材料的相应物理条件时, 即认为单元节点分离。采用物理分离准则使得金属切削的有限元仿真研究更接近实际情况, 因此, 采用有效应变作为切屑分离准则。随着刀具的位移, 刀尖前面的节点对产生塑性应变, 当等效塑性应变达到分离准则值时, 节点对分开。随着节点对的连续分离, 就形成了切削过程。

3.6 计算结果及分析

3.6.1 切削吸能过程中能量吸收、速度和切削力的时程变化曲线

对切削吸能过程进行仿真, 对吸能过程中能量变化及切削力变化曲线进行分析。

切削式吸能过程是一个能量转换的过程, 包括: 动能与内能的转化, 动能与其他形式能量的转化。能量以何种方式耗散对吸能装置的吸能效果有较大影响。图 4 所示为切削式吸能过程中动能和内能曲线。由能量守恒定理可知: 在吸能过程中能量总和不变, 发生碰撞前的动能与碰撞后的内能相当, 即在碰撞发生时大部分动能转化为内能。从图 4(a)和图 4(b)可以得到碰撞前的动能为 2.500 kJ, 碰撞后车体的内能为 2.276 kJ, 经过计算有 91%的动能转化为内能。由以上分析可知: 切削式吸能过程中吸收了 91%的能量, 说明切削式吸能的吸能效果较好。由图 4(b)可知: 撞击开始后约 18 ms, 撞击动能逐渐被消耗, 吸能元件吸收的



(a) 动能变化图; (b) 内能变化图

图 4 金属切削过程中动能和内能变化图

Fig.4 Curve of kinetic energy and internal energy in cutting process of metal

能量开始趋于平稳, 最终吸收的总能量为 2.276 kJ。

从图 4 可以看出: 随着撞击时间的推移, 结构塑性变形逐渐增大, 吸能装置因发生塑性变形和变形后的材料破裂消耗了内能, 该内能来自冲击动能。也可以说是吸能装置在碰撞过程中因发生材料的塑性大变形和变形之后材料破裂吸收冲击动能。

图 5 所示为撞击速度随时间变化的曲线, 图 6 所示为切削力随时间的变化曲线。由图 5 可知: 在撞击开始时, 速度最大, 当吸能元件开始切削时, 碰撞速度迅速下降, 直至趋为 0。由图 6 可知: 撞击开始后约 2 ms, 出现整个撞击过程中撞击力的第 1 个峰值, 其值为 39.7 kN。

3.6.2 与现有吸能过程进行比较

为了与切削式吸能过程进行比较, 现给出利用金属塑性变形吸能的现有吸能元件的吸能特性曲线。

已用于耐冲击地铁车辆的吸能元件, 其形状为方管薄壁结构(60 mm×70 mm×300 mm, 侧壁厚度均为

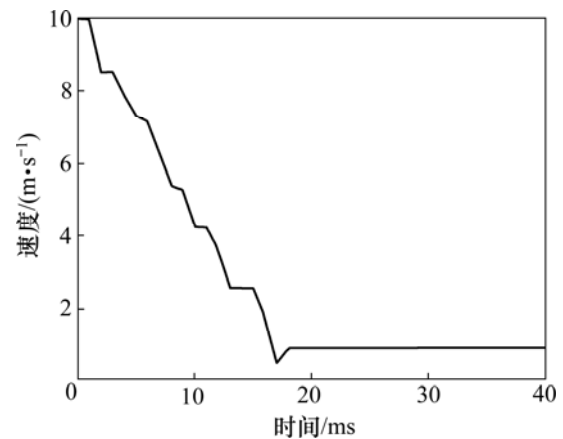


图 5 金属切削过程中速度和时间关系曲线

Fig.5 Curve of velocity and time in cutting process of metal

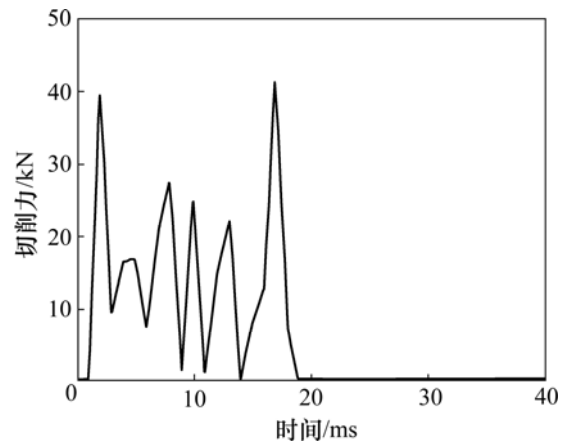


图 6 金属切削过程中切削力和时间关系曲线

Fig.6 Curve of cutting force and time in cutting process of metal

1.5 mm), 在与切削式吸能元件相同的撞击条件(即方管的一端约束, 另一端受到质量为 50 kg 的刚性块以 10 m/s 的速度撞击)下, 其吸能特性曲线如图 7 和图 8 所示。数值仿真结果和实物撞击结果吻合^[18]。图 7 所示为现有吸能元件的能量随时间变化的曲线, 图 8 所示为现有吸能元件的撞击力随时间变化的曲线。

由图 7 可知: 撞击开始后约 35 ms, 撞击动能逐渐被消耗, 装置吸收的能量开始趋于平稳, 最终吸收的总能量为 2.47 kJ。由图 8 可知: 撞击开始后约 1 ms, 出现整个撞击过程中撞击力的第 1 个峰值, 其值为 58.176 kN。

在不考虑切削式吸能过程中以热能形式耗散掉的能量的基础上, 对 2 种吸能过程吸能效果进行比较。

对图 4(b)与图 7 进行比较可知: 在撞击条件完全相同情况下, 2 种原理不同的吸能装置在撞击过程中

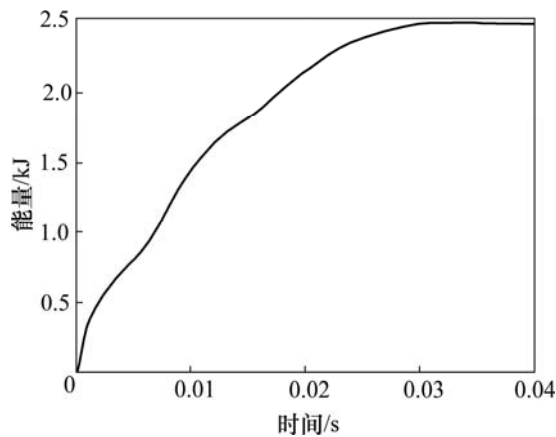


图7 金属切削过程中能量与时间关系曲线

Fig.7 Curve of energy vs time in cutting process of metal

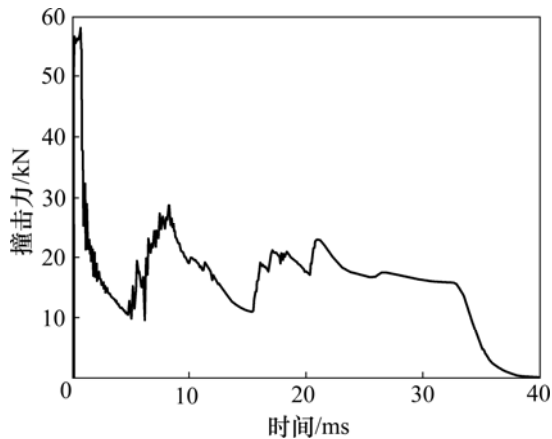


图8 金属切削过程中冲击力与时间关系曲线

Fig.8 Curve of impact force vs time in cutting process of metal

能量随时间的变化趋势均是一致的;与现有吸能元件比较,切削式吸能过程可以在更短的时间内吸收更多的撞击能量。

对图6与图8进行比较可知:现有吸能元件撞击力峰值是切削式吸能过程撞击力峰值的1.5倍,说明切削式吸能装置具有更强的降低撞击力峰值的能力;切削式吸能装置撞击力达到第1个峰值的时间比现有吸能装置到达第1个峰值的时间长,说明切削式吸能装置对撞击力峰值出现时间的调控能力更强。

4 结论

(1) 切削式吸能作为一种全新的吸能形式,拓展

了轨道车辆吸能装置的研究思路,是金属切削研究和轨道车辆吸能研究交叉领域内值得探索的研究方向。

(2) 与现有利用金属塑性变形吸能原理的吸能方式相比,切削式吸能方式具有吸能能力强、撞击力最大峰值低、撞击力峰值出现时间延迟且容易控制、吸能过程的可控性好等优势。

参考文献:

- [1] Wolter W. 铁道车辆的防碰撞要求、设计原理和初步结果[J]. 国外铁道车辆, 2004, 41(2): 23-30.
Wolter W. Requirements, design principles and initial results of crashworthy rail vehicles[J]. Foreign Rolling Stock, 2004, 41(2): 23-30.
- [2] Severson K J, Tyrell D C, Perlman A B. Analysis of collision safety associated with conventional and crash energy management cars mixed within a consist[C]//International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Washington DC: ASME, 2003: 65-72.
- [3] Lewis J. 铁路客车冲击试验研究[J]. 国外铁道车辆, 1999, 36(4): 31-32.
Lewis J. Research on impact test for railway passenger cars[J]. Foreign Rolling Stock, 1999, 36(4): 31-32.
- [4] Koo J S, Kwon T S, Cho H J. 韩国高速列车碰撞设计与评估[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 1-7.
Koo J S, Kwon T S, Cho H J. Korean high-speed railway anti-impact structure design and appraisal[J]. China Railway Science, 2004, 25(1): 1-7.
- [5] 李兰. 城轨车辆耐碰撞结构设计及其乘员安全数字仿真研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2007: 38-66.
LI Lan. Research on designing crashworthy structure for urban rail vehicle and occupant safety by simulation method[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007: 38-66.
- [6] 姚松, 田红旗. 车辆吸能部件的薄壁结构碰撞研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 55-60.
YAO Song, TIAN Hong-qi. Crash research on thin-shelled structure as vehicle energy-absorbing components[J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 55-60.
- [7] 张振淼, 逢增祯. 轨道车辆碰撞能量吸收装置原理及结构设计(续完)[J]. 国外铁道车辆, 2001, 38(4): 16-19.
ZHANG Zhen-miao, PANG Zeng-zhen. Principles and structure design of collision energy absorption equipment for rail cars (End)[J]. Foreign Rolling Stock, 2001, 38(4): 16-19.
- [8] 张振淼, 逢增祯. 轨道车辆碰撞能量吸收装置原理及结构设计(待续)[J]. 国外铁道车辆, 2001, 38(3): 13-19.
ZHANG Zhen-miao, PANG Zeng-zhen. Principles and structure design of collision energy absorption equipment for rail cars (To

- be continued)[J]. *Foreign Rolling Stock*, 2001, 38(3): 13-19.
- [9] 王熙, 卢国兴, 余同希. 复合材料管状结构的能量吸收性能[J]. *工程力学*, 2003, 20(3): 155-160.
- WANG Xi, LU Guo-xing, YU Tong-xi. Energy absorption behavior of composite tube structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(3): 155-160.
- [10] 程玲. 轨道车辆被动安全系统及其模块化研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2006: 20-30.
- CHENG Ling. The study of passive-safety system and modular design for railway vehicle[J]. Shanghai: Tongji University. Mechanical Engineering College, 2006: 20-30.
- [11] 吴琼, 张以都, 刘东, 等. 基于 LS-DYNA 的铣削过程三维仿真研究[J]. *机械设计*, 2006, 23(11): 40-43.
- WU Qiong, ZHANG Yi-du, LIU Dong, et al. 3D simulation study of milling process based on LS-DYNA[J]. *Journal of Machine Design*, 2006, 23(11): 40-43.
- [12] 姚松, 田红旗, 高广军. 显式有限元法在车辆耐撞性研究中的应用[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(1): 13-16.
- YAO Song, TIAN Hong-qi, GAO Guang-jun. Explicit finite element method for vehicle crashworthiness[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(1): 13-16.
- [13] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 58-126.
- BAI Jin-ze. LS-DYNA3D theoretical foundation and examples of analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005: 58-126.
- [14] 杜俊玮. 基于刀具涂层改性的切削过程三维数值模拟技术[D]. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2007: 24-26.
- DU Jun-wei. Research on 3D numerical simulation of metal-cutting process based on coating technology[D]. Beijing: North China Electric Power University. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, 2007: 24-26.
- [15] Shet C, DENG Xiao-min. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 105(1): 95-199.
- [16] Bil H, Kilic S E, Tekkaya A E. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models[J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2004, 44(1): 933-944.
- [17] 李国和, 王敏杰, 段春争. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的金属切削过程有限元模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 173-176.
- LI Guo-he, WANG Min-jie, DUAN Chun-zheng. Finite element simulation of the process of orthogonal metal cutting based on the ANSYS/LS-DYNA[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 173-176.
- [18] 谢素超, 田红旗, 周辉. 耐冲击地铁车辆设计及整车碰撞研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2008, 5(5): 65-70.
- XIE Su-chao, TIAN Hong-qi, ZHOU Hui. The design of crashworthy subway vehicle and crash research of whole car-body[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2008, 5(5): 65-70.

(编辑 刘华森)