

文章编号:1671-6833(2012)04-0065-04

基于显式有限元的轨道车辆撞击能量吸收研究

雷 成^{1,2},肖守讷¹,罗世辉¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031;2. 郑州铁路职业技术学院 车辆工程学院,河南 郑州 450052)

摘 要: 吸能装置是提高轨道车辆耐碰撞性能的关键部件. 将金属切削加工技术应用到轨道车辆的被动安全防护上,提出利用切屑的生成过程吸收列车的撞击能量,作为新型吸能装置的吸能原理. 建立了金属薄壁结构切削吸能过程的三维显式有限元模型,分析了刀具的前角对薄壁结构切削吸能性能的影响,并与金属薄壁结构的压缩吸能进行了比较. 结果表明,金属切削吸能过程是理想的轨道车辆撞击能量吸收过程.

关键词: 轨道车辆;切削吸能;显式有限元;吸能装置;吸能原理

中图分类号: TP391.9;U270.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.04.015

0 引言

运动的轨道车辆,特别是客运车辆在发生意外碰撞或脱轨倾覆等重大事故时,其巨大的动能不能在瞬间消散,将会导致重大的人员伤亡和财产损失. 现代轨道车辆主要通过采用多级能量吸收系统吸收撞击能量,吸能装置的性能直接决定了轨道车辆的耐碰撞性能. 因此,亟需开展轨道车辆撞击能量吸收原理的研究,为新型吸能装置的研发打下坚实的基础. 笔者将金属切削加工技术应用到轨道车辆的被动安全防护上,利用切屑的生成过程吸收列车的动能,降低列车的减速度. 由于金属薄壁结构切削时,其吸能性能与刀具的前角密切相关,因此,笔者对不同前角的刀具切削金属薄壁结构的过程进行模拟,研究刀具的前角对金属薄壁结构切削吸能过程的影响. 最后对笔者提出的吸能原理与金属薄壁结构的压缩吸能进行比较研究.

1 动态仿真显式有限元

金属薄壁结构切削过程是一个复杂的塑性变形过程,通常情况下是在高温、高速下产生的. 当前对金属切削过程的研究工作已经深入到塑性力学、有限元法、位错理论以及断裂力学等范畴^[1].

随着计算机技术与有限元理论的发展,有限元技术已经成为研究金属切削过程及碰撞吸能过程的一个重要手段. 显式时间积分特别适用于各种结构冲击动力学问题,如爆炸、碰撞和金属加工成型等高度非线性问题. 金属切削过程具有动态性、大变形和高度非线性的特点,因此运用显式有限元程序对这一过程进行分析模拟非常适合^[2]. 笔者拟采用通用的非线性显式动力学分析程序 LS-DYNA 模拟金属薄壁结构的切削吸能过程.

2 切削吸能过程的三维有限元模型

刀具采用硬质合金,其硬度和强度远远高于金属薄壁结构材料,用刚体模拟. 金属薄壁结构材料为 4340 钢,壁厚 6 mm,内径 100 mm,长 200 mm. 刀具以 10 m/s 的恒定速度切削金属薄壁结构. 切屑厚 3 mm,切屑圆心角 30°,刀具数量 8 个,刀具后角 5°,刀具圆心角 30°. 笔者建立了刀具前角分别为 5°、10°和 20°的金属薄壁结构切削吸能过程的三维有限元模型. 其中刀具前角为 10°的三维有限元模型如图 1 所示.

2.1 金属薄壁结构材料本构模型

切削过程的实质是在一定的条件下,被切削材料在外力作用下,产生一个从弹性变形到塑性变形(滑移、孪生、晶界滑动、扩散性蠕变)再到断

收稿日期:2012-01-28;修回日期:2012-04-09

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A04-A11);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(SWJTU09ZT23)

作者简介:雷成(1980-),男,河南开封人,西南交通大学博士生,郑州铁路职业技术学院讲师,主要从事轨道交通车辆安全性研究.



图1 刀具前角为10°的切削吸能过程三维有限元模型

Fig.1 The three-dimensional finite element model of the energy-absorbing process in cutting way when tool rake angle is 10 degree

裂(切屑与工件分离)的过程. 切削过程的等效应力—等效应变关系与应变、应变率、温度等多种因素有关^[3]. 笔者选用 LS-DYNA 材料库中的 Johnson-Cook 本构模型模拟被切削材料. 模型使用下面的等效流动应力.

$$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\bar{\epsilon}}) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right]. \quad (1)$$

式中: T , T_{room} 和 T_{melt} 分别为变形温度、室温(一般取 20 °C)和材料熔点; A 为材料的屈服应力, MPa; B 为应变硬化常数, MPa; C, n, m 为材料特性系数, 可通过材料试验或切削试验方法获取.

2.2 切屑与母体材料的分离准则

金属薄壁结构的切削过程是一个使被切削母体材料不断产生分离的过程, 切屑分离准则的确定对于成功实现切削过程模拟至关重要. 在有限元模拟中切屑分离准则可以分为: 几何准则和物理准则. 几何准则主要基于刀尖与刀尖前单元节点的距离变化来判断分离与否. 物理准则主要基于制定的物理量的值是否达到临界值而进行判断. 如几何分离准则^[4]、应变能密度准则^[5]、网格

重划分准则^[6]及断裂准则^[7]等.

Johnson 和 Cook 提出把应变率、应变、温度和压力都考虑进去的剪切失效准则. 这个准则的特点是和实验相结合, 因此比较可靠, 该失效准则特别适用于金属高应变率变形, 广泛应用于动态仿真数值模拟.

笔者应用 Johnson 和 Cook 提出的材料失效准则并结合失效单元删除的方法实现切屑与母体材料的分离, 切削过程中, 当到达切屑分离准则时, 发生材料失效, 失效单元自动从模型中删除, 最终实现切屑的分离.

3 金属薄壁结构切削吸能分析结果

3.1 刀具前角对切屑形状的影响

随着刀具的切入, 切屑层材料与薄壁结构母体材料逐渐分离形成切屑. 刀具前角对切屑形状的影响如图 2 所示. 从左至右, 刀具前角依次为 20°、10°和 5°, 0.01 s 时的最大剪应力 (Maximum Shear Stress) 云图. 从图中可以看出, 刀具前角越小, 切屑的卷曲半径越小, 卷曲越厉害, 这与实际的金属切削过程是相符合的.

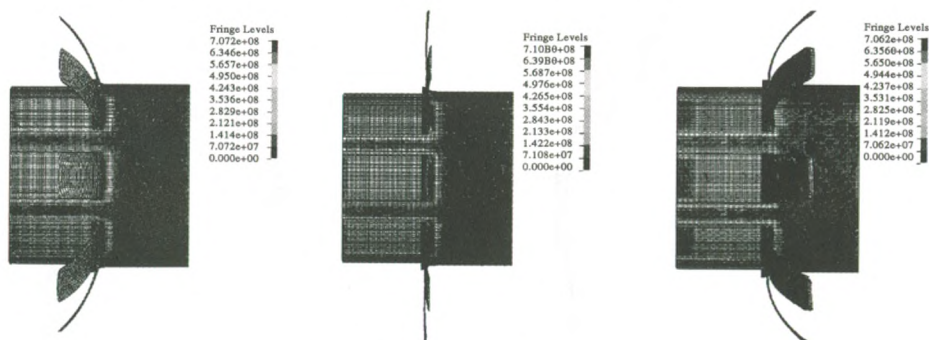


图2 刀具前角对切屑形状的影响

Fig.2 Tool rake angle on the chip shape influence

3.2 刀具前角对切削吸能性能的影响

刀具前角不同时, 金属薄壁结构切削吸能过程吸收的能量、界面力随时间的变化曲线如图 3、4 所示. 从图 3 可以看出, 刀具的前角越小, 金属

薄壁结构切削过程中吸收的能量越多. 从图 4 可以看出, 随着刀具的切入, 金属薄壁结构切削过程中的界面力逐渐趋于稳定. 刀具前角越小界面力的峰值和稳定值越大. 并且界面力—时间曲线近

似为四边形,吸能效果较好。

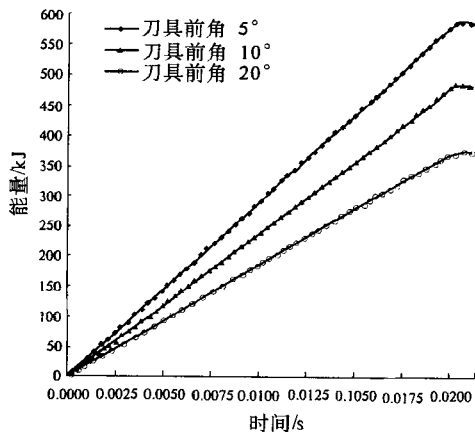


图3 切削过程吸收的能量—时间历程曲线

Fig. 3 Curve of energy absorbing and time in cutting process

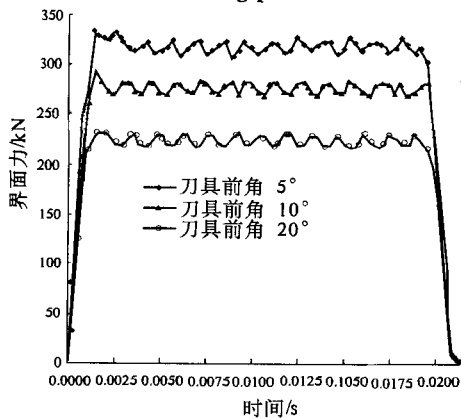


图4 切削过程界面力—时间历程曲线

Fig. 4 Curve of interface force and time in cutting process

3.3 与金属薄壁结构压缩吸能的比较

为了与切削吸能过程进行比较,对相同条件下金属薄壁结构的压缩吸能过程进行了分析.压缩过程中,金属薄壁结构吸收的能量、界面力随时间的变形曲线如图5、6所示。

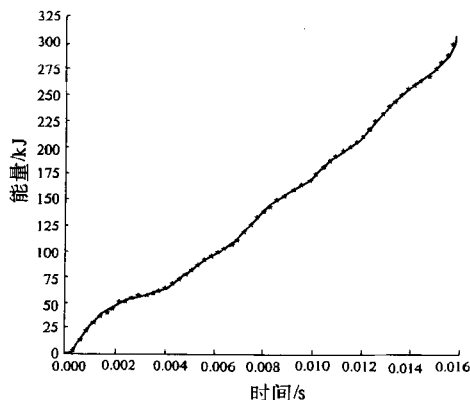


图5 压缩过程吸收的能量—时间历程曲线

Fig. 5 Curve of energy absorbing and time in compression

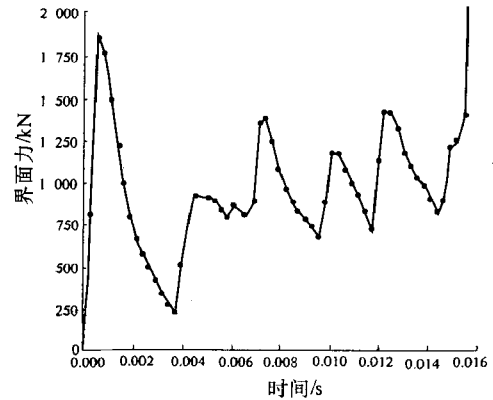


图6 压缩过程界面力—时间历程曲线

Fig. 6 Curve of interface force and time in compression

从图6可以看出,由于金属薄壁结构压缩过程中不断产生褶皱,界面力的波动较大,不利于对撞击减速度的控制,并且薄壁结构的有效压缩行程约为其长度的70%~80%,吸能元件的利用率不高。

金属薄壁结构在发生塑性变形和变形后的材料破裂过程中吸收了能量,并且金属薄壁结构的有效切削行程可达100%,对吸能元件的利用充分。

相同条件下,金属薄壁结构切削吸能和压缩吸能的比较如表1所示。

表1 金属薄壁结构切削吸能与压缩吸能比较

Tab.1 Cutting energy absorption compared with the compression of metal thin-walled structure

刀具前角/(°)	切削吸能/ kJ	压缩吸能/ kJ	吸能提高/ %
20	372.7	—	32
10	483.5	283	71
5	586.2	—	107

从表1可以看出,切削吸能的效果较好,比吸能(单位质量吸收的能量)较大.刀具前角为5°时,吸能提高可达107%,另外,在设计新型吸能装置时,一般选用前角较小的刀具,因为刀具前角较大时,会降低切削刃和刀头的强度,切削时刀头容易崩刃,所以金属切削吸能相对于压缩吸能的吸能提高较大,是一种理想的轨道车辆撞击能量吸收原理。

4 结论

(1)金属薄壁结构切削吸能过程中吸收的能量和界面力与刀具的前角成反比,并且刀具前角越小,切屑卷曲的半径越小,卷曲程度越大。

(2)与金属薄壁结构压缩吸能相比,切削吸

能的有效行程可达100%,对吸能元件的利用充分,并且切削过程中的界面力稳定,波动小.采用该原理设计的吸能装置,在吸能元件尺寸一定的条件下,比吸能大,作用行程长,容易实现减速度为常速的匀减速过程.并且改变吸能装置的吸能容量,只需增加或减少刀具的数量,或者更换不同前角的刀具就能实现,吸能装置的可控性、适应性和灵活性较好.所以,金属切削吸能是一种理想的轨道车辆撞击能量吸收原理.

参考文献:

- [1] 杨晓琦,韩风起.基于正应力摩擦模型的金属切削有限元仿真[J].电子机械工程,2008,24(4):48-50.
- [2] SOO S L, ASPINWALL D K, DEWES R C. 3D FE modeling of the cutting of Inconel 718 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 105: 116-123.
- [3] 刘战强,吴继华.金属切削变形本构方程的研究[J].工具技术,2008,42(3):1.
- [4] LO Ship-peng. An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002(105): 143-151.
- [5] LIN Zone-ching, LO Ship-peng. 2-D discontinuous chip cutting model by using strain energy density theory and elastic-plastic finite element method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(2):381-398.
- [6] MAMALIS A G, BRANIS A S. Modeling of precision hard cutting using implicit finite element methods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(3):464-475.
- [7] CERETT E, FALLBOHMER P, WU W T, et al. Application of 2DFEM to chip formation in orthogonal cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996(59):169-180.
- [8] 常宁,刘国伟.轨道车辆切削式吸能过程仿真[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(6):2444-2450.
- [9] 陈汉珍.城际列车耐碰撞车体研究[D].成都:西南交通大学牵引动力国家重点实验室,2008.
- [10] 单其雨.高速列车车体耐碰撞结构研究[D].成都:西南交通大学机械工程学院,2010.

Researching on Impact Energy Absorption Principle of Rail Vehicles Based on the Explicit Finite Element

LEI Cheng^{1,2}, XIAO Shou-ne¹, LUO Shi-hui¹

(1. Traction&power National Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Vehicle Engineering Department, Zhengzhou Railway Vocational&Technical College, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Energy-absorbing device is the key component to improve the crashworthiness of the rail vehicles. This paper introduces metal cutting technology into the field of passive safety protection of rail vehicles, and proposes the use of chip generation process to absorb the impact energy of the train, and this process is to treat as the energy-absorbing principle of new energy-absorbing device. The three-dimensional simulation for the energy-absorbing process in metal-cutting way of metal thin-walled structure is carried out with explicit finite element, the influence of tool rake angle on the absorption characteristics of thin-walled structures is analyzed, and energy-absorbing process of metal thin-walled structure in metal-cutting way is compared with the compression. The results show that: the energy-absorbing process in metal-cutting way is a very ideal impact energy absorption principle of rail vehicles.

Key words: rail vehicle; energy-absorbing in cutting; explicit finite element; energy-absorbing device; energy absorption principle