DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2014.04.015

文章编号:1005-0523(2014)04-0021-05

室内停车场防撞带设计的碰撞仿真分析

吴 中,苏治北

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对室内停车场碰撞事故的伤害问题,提出了停车场防撞带的设计,建立有无防撞带的车辆碰撞模型,并对长方体防撞带与波浪形防撞带进行性能分析比较,运用LS-DYNA软件对车辆、防撞带以及墙体碰撞进行仿真模拟。得到防撞带和车辆翼子板的等效应力分布和能量转化情况,证实了防撞带能有效减少车辆的损害程度,且长方体防撞带效果更好。

关键词:室内停车场;防撞带;翼子板;碰撞;LS-DYNA仿真

中图分类号:U492.1 **文献标志码**:A

随着城市化进程的明显加快与城市交通快速发展,城市室内、地下和空中立体停车场得到长足发展,车辆在狭小空间回旋的防撞以及减少车辆与建筑部件的伤害问题也日益突显。停车场内除加强或改善车辆进出管理外,在停车场适用处设置简易的小体积防撞设施,对改善车辆在停车场内移动的安全性有重要作用。 现有停车场的防撞设施一般只设有护角,护角的主要用途是为停车场立柱作防护,增加反光,减少车辆与立柱碰撞的破坏程度,但也有很多小的事故是与立柱的表面或者与停车场的墙面发生摩擦或碰撞。大多数地下或楼顶停车场的出入口坡道都设计为螺旋状或弯道,车辆容易在狭窄的弯道与墙面发生摩擦或碰撞,造成最常见的车辆前后翼子板损坏,对车主和停车场都有不同程度的损害。

针对上述情况,需要吸收撞击能量好、安装方便而且成本低廉的墙柱体防撞带。橡胶材料因其吸附能力强、成本低常被用作两物体间冲撞挤压的缓冲材料。本文采用有限元法对车辆与防撞带碰撞的过程进行仿真分析,先用HYPERMESH软件建立车辆、防撞带以及墙体的模型,并用LS-DYNA软件进行碰撞性能的仿真计算[1],得到车辆碰撞构件和防撞带的等效应力分布以及能量转化情况,从而检验防撞带对车辆碰撞性能的作用。

1 防撞带力学分析以及模型的建立

1.1 力学分析

车辆与防撞带的碰撞会导致车辆构件与防撞带发生弹塑性变形,碰撞过程主要依靠变形来吸收能量,防撞带由橡胶材料来制成。

防撞带的橡胶作为弹性体形变化时,外力对防撞带做功的能量储存于橡胶中,作为弹性复原的能量,称为弹性应变能(即弹性储能),它用来描述弹性体的应力—应变行为,通常用W来表示应变能[2],假设弹性体是各向同性的,应变能W可以表示为应变不变量的函数

$$W=W(I_1,I_2,I_3) \tag{1}$$

式中:I_1, I_2, I_3为应变不变量(也称Green应变不变量),分别为

收稿日期:2014-05-27

作者简介:吴中(1964—),男,教授,博士,研究方向为交通规划与管理、交通运输信息与控制、交通流仿真、交通被动安全。

中国知网 https://www.cnki.net

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2 \\ I_2 &= (\lambda_1\lambda_2)^2+(\lambda_2\lambda_3)^2+(\lambda_3\lambda_1)^2 \\ I_3 &= (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：λ_1，λ_2，λ_3为主伸长比，下标1，2，3分别表示3个相互正交的坐标轴。

橡胶作为粘弹性材料，在车辆发生碰撞过程中，其刚性表面发生滑动接触界面上的相互作用，这种作用主要包括黏附摩擦作用和黏弹摩擦作用[3]，黏附作用可以有效地将橡胶与车辆表面进行对偶表面相的贴和，该作用能减少车辆表面的刮擦程度，保持车辆表面的光滑与平整度。对于黏弹摩擦作用，通过橡胶的弹性变形和粘弹性变形来吸收车辆碰撞过程中的能量，减小车辆刚性表面的损害程度。

1.2 墙体与防撞带

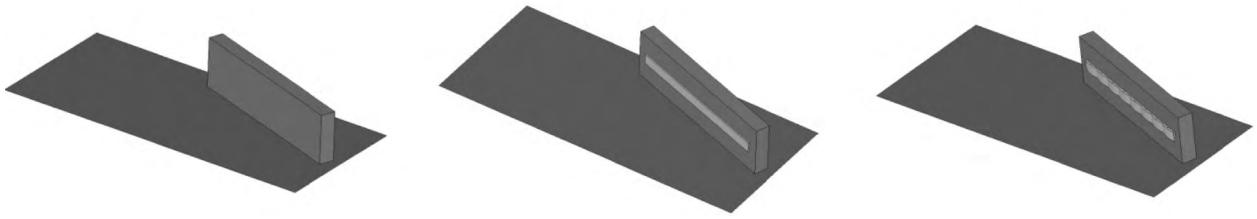
模型的墙体和防撞带结构都采用实体单元，实体单元的算法采用的是全量方法研究[4]。为了节省模型计算的时间，墙体采用长为3 600 mm，宽为1 000 mm，厚度为300 mm的长方体代替，见图1(a)，墙体模型在碰撞过程中不会发生形变，所以混凝土材料采用*MAT_RIGID定义，混凝土结构材料参数见表1。

表1 墙体的材料参数

Tab. 1 The material parameters of the wall

材料名称	弹性模量E/GPa	泊松比ν	密度ρ/(kg·m^{-3})	热膨胀系数/×10^{-6}℃
混凝土	17~31	0.1~0.2	1 100~2 500	7 ~ 14

防撞带被固定于在墙体上，其横截面中心线距地面为500 mm(车辆俯视图外边缘与地面的距离)，为了优化设计，设计了两种类型的防撞带，长方体防撞带长为3 200 mm，宽为200 mm，厚度为30 mm，见图1(b)，波浪形防撞带长为3 200 mm，宽200 mm，在长度方向上每隔200 mm有一个圆弧并在其中间有一个半径为10 mm的贯穿孔，圆弧弧顶到墙体的间距50 mm，见图1(c)。两种类型的防撞带都采用橡胶材料*MAT_BLATZ_KO_RUBBER定义，橡胶的材料参数见表2。



(a) 未安装防撞带的墙体　(b) 安装长方体防撞带的墙体　(c) 安装波浪形防撞带的墙体

图1 墙体模型

Fig. 1 Wall mode

表2 橡胶材料参数表

Tab. 2 The material parameters of the rubber

材料名称	弹性模量E/GPa	泊松比ν	密度ρ/(kg·m^{-3})	热膨胀系数/×10^{-6}℃
橡胶	0.000 7~0.004	0.45~0.5	960~1 300	130~200

在橡胶制品中，丁基橡胶的性能较为良好，故采用其为室内停车场防撞带的材料[5]，该类橡胶具有较强的能量吸收率，突出的气密性和耐热性，并且具有良好的减振性能。为了增加防撞带的功能，可以在其表面粘贴反光材料起到导向的作用，该材料遇到光线照射时产生反光，尤其适合室内停车场[6]。

1.3 有限元模型的建立

使用HYPERMESH软件建立实体模型，对构件进行网格划分，按照规范要求设置各构件间相应的接触类型、定义初始边界条件、连接方式和制定求解控制参数等[7]。车辆模型采用美国国家碰撞分析中心发布的单横臂独立悬挂小车，Part的数量为336个，节点数为283 859个，实体数量为2 852个，单元数为270 769个，

中国知网 https://www.cnki.net

车辆重量为1.333 t。为了保证所建模型的准确性,碰撞模型采用整车碰撞[8],见图2。模型路面采用*RIGID_WALL关键字定义,采用*AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE定义车轮与路面的接触。车辆与防撞带和墙体的接触也采用*AUTOMATIC _SURFACE_TO_SURFACE。根据室内停车场的相关规定,设定车辆与防撞带发生碰撞的速度,为5 km·h^{-1},并用关键字*INITIAL_VELOCITY_GENERATION定义车轮的转动角速度,模型碰撞角度为20°,碰撞位置选在防撞带中间。分析驾驶员从开始踏下制动踏板到制动结束至少用时0.7 s,故模型的碰撞过程设为0.7 s,基本单位选用s,mm,t,计算单元总数量为296 272个。

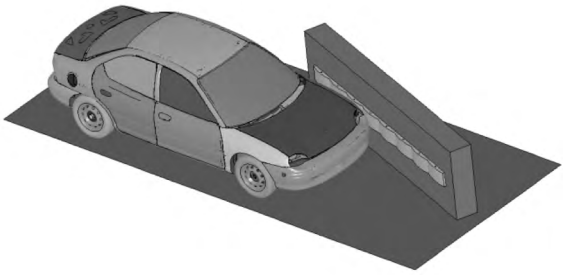


图2　车辆碰撞有限元模型

Fig. 2　The finite element model of vehicle collision

2　模型碰撞仿真分析

LS-DYNA是世界上最著名显式为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,主要用于求解三维非线性结构在碰撞、爆炸冲击下的大变形力学相应问题,其作为有限元求解器在汽车、军工、航天航空领域有着广泛的应用,也是目前汽车安全分析的主要工具之一[9]。为了深入分析车辆与防撞带和墙体碰撞的动态物理状况,采用LS-DYNA对其碰撞过程进行仿真分析,仿真完成后采用LS-PREPOST对结果进行分析,得到车辆构件与防撞带的应力、能量转化和损害情况,以此评价防撞带的性能特征。

2.1　防撞带的黏合与吸能情况分析

对于没有安装防撞带的模型,由于碰撞过程存在摩擦力,使得车辆在一定程度上存在刮伤,而安装了防撞带的模型,防撞带由橡胶制成,可以使防撞带与车辆表面发生对偶表面相的贴和,其作用以有效的减少车辆表面的刮伤程度,保护表面的光滑度,但由于车辆构件的刮伤程度较浅,没有明显现象,因此这里采用理论分析。 在此,为了方便模型的区分,将设定未安装防撞带的碰撞模型为A,安装长方体防撞带的碰撞模型为B,安装波浪形防撞带的碰撞模型为C。通过仿真实验,安装了不同防撞带的模型,在车辆与防撞带的碰撞过程中,防撞带由于被撞击而产生的应力云图如图3,也会因为形变的产生而吸收能量,如图4,对比图中的吸能曲线,B模型与C模型的吸能效果相当,但较没有安装防撞带可以减少车辆构件的损伤,起到

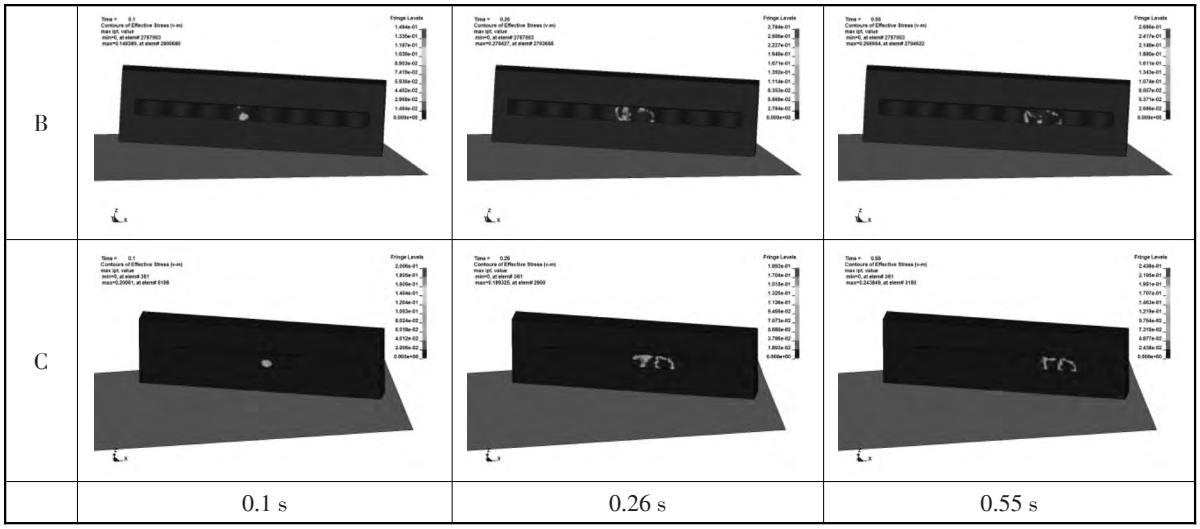


图3　防撞带等效应力云图

Fig. 3　The Von Mises stress of anti-collision belt

中国知网　https://www.cnki.net

保护车辆的效果。

2.2 车辆翼子板的等效应力分布与能量转化情况的分析

通过LS-DYNA软件仿真，将读取3个模型中碰撞构件的应力云图、最大单元应力值和碰撞构件的吸能情况，以此来分析防撞带的性能特征。

图5给出了碰撞构件的等效应力云图。从图中可以看出，碰撞过程中车辆翼子板的变形不大，A模型中的单元应力部分随时间的增加而在增大，B模型随时间先增大后减小，而C模型的单元应力随时间先增大后减小，但是减少的程度显然没有B模型大。对于车辆碰撞构件的表面单元应力情况，表3为每隔0.1 s构件的单元最大应力值，但这些值中并不存在碰撞模型的最大应力值，在A模型中的最大应力值出现在0.24 s时，最大应力值为385.228 MPa，B模型中的最大应力值出现在0.27 s，其值为346.460 MPa，由此数据可以得到，安装长方体防撞带之后，其最大应力值比未安装减少10.06%，可以减少碰撞车辆的损坏程度。而C模型中的最大应力值出现在0.26 s时，最大应力值为421.218 MPa，通过B模型与C模型数据对比，可以得到长方体防撞带比波浪形防撞带的减少应力效果更好。

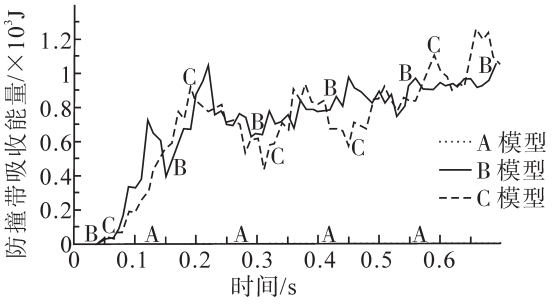


图4 防撞带的吸能曲线

Fig. 4 Energy absorption curve of anti-cdlision belt

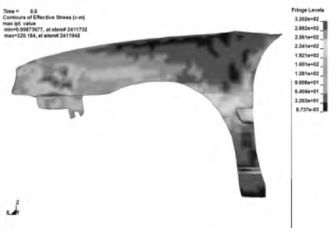
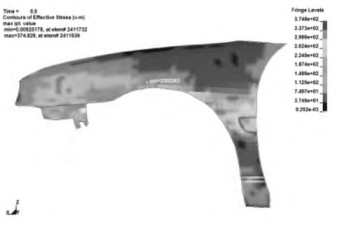
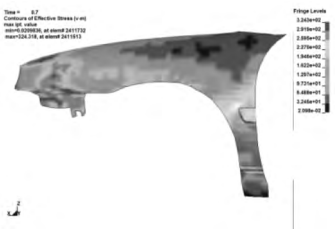
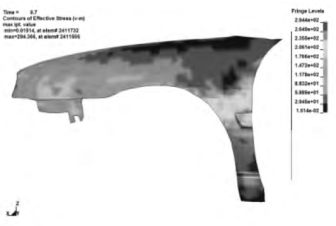
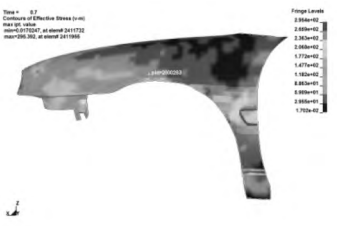
时刻	A的翼子板	B的翼子板	C的翼子板
0.25 s			
0.5 s			
0.7 s			

图5 翼子板的等效应力云图

Fig. 5 The Von Mises stress of the fender

中国知网 https://www.cnki.net

表3　单元最大应力值

Tab. 3　Unit maximum stress value　　MPa

模型	0.1 s	0.2 s	0.3 s	0.4 s	0.5 s	0.6 s	0.7 s
A	278.831	334.882	306.765	292.378	359.908	292.832	324.318
B	198.629	343.559	329.715	292.995	320.184	298.423	294.336
C	104.082	325.548	370.005	293.936	374.829	300.362	295.392

在3个模型的碰撞过程中,能量的转化情况反映出车辆与防撞带和墙体碰撞的剧烈程度,同时也反映出车辆碰撞构件与防撞带的吸能情况,还能检验防撞带的缓冲作用以及碰撞构件的受影响程度[10]。车辆翼子板的材料内能随时间会产生一定量的增长,但也会出现相应的波动。从图6可以得出,在0.2,0.4,0.6 s时刻,B模型翼子板比A模型翼子板吸收的能量要少,少吸收的能量分别为6.935,1.775,4.480 J,能量降低的比例分别为67.1%,13.3%,25.5%。通过比较发现,安装防撞带之后,可以有效减少碰撞构件吸收的能量,起到保护车辆的作用。通过对比图6中B模型与C模型的吸能结果,发现C模型中车辆翼子板所受的吸能更大,故碰撞对其损伤程度也就越大,导致此结果的原因是波浪形防撞带的厚度大,结构复杂引起车辆翼子板的变形大,因此得到长方体防撞带比波浪形防撞带的效果要好,所以选用长方体防撞带。

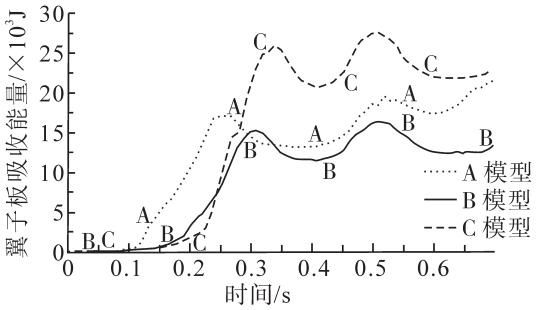


图6　不同时刻3个模型翼子板的吸能曲线

Fig. 6　Energy absorption curve of the fender

3　结论

通过对室内停车场适用处设置简易的小体积防撞设施的研究,提出了防撞带的设计方案,运用有限元软件LS-DYNA进行仿真分析,得出以下结论:安装防撞带后能对发生碰撞的车辆构件起到保护作用,车辆构件的平均能量吸收率减少35.3%,有效减少车辆表面的损害程度;车辆构件吸能越多,损害程度就越大,安装长方体防撞带比波浪形防撞带车辆构件的平均能量吸收率减少41.1%,故长方体防撞带的效果更好。

参考文献:

[1] LSTC.LS-DYNA theoretical manual[M].USA:Livermore Software Technology Coporation,2007:1062-1078.

[2] 刘萌,王青春,王国权.橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J].橡胶工业,2011,58(4):241-245.

[3] 刘高明,沈钢.机械式半主动控制橡胶节点的计算机仿真[J].华东交通大学学报,2012,29(5):18-22.

[4] 白泽金.LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,2005:41-46.

[5] 聂恒凯.橡胶材料与配方[M].北京:化学工业出版社,2009:29-31.

[6] 程贤福,熊坚,李骏.汽车鼓式制动器的可靠性稳健优化设计[J].华东交通大学学报,2009,26(2):67-71.

[7] 胡远志,曾必强,谢书港,等.基于LS-DYNA和HyperWorks的汽车安全仿真与分析[M].北京:清华大学出版社,2011:62-64.

[8] 高伟,黎权波.基于LS-DYNA的汽车前纵梁碰撞性能仿真研究[J].湖北汽车工业学院学报,2010,24(2):21-26.

[9] 万银辉,王冠,刘志文.6061铝合金汽车保险杠横梁的碰撞性能[J].机械工程材料,2012,36(7):67-71.

[10] 程海根,邹江娜.用LS-DYNA仿真车-桥墩碰撞时角度对桥梁的影响[J].华东交通大学学报,2013,30(6):19-24.

(下转第64页)

中国知网　https://www.cnki.net

Truncated Aggregate Smoothing Method for Nonlinear LTS Estimator

Xiao Yu

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013,China)

Abstract: The computing of the nonlinear least trimmed squares (LTS) estimator is considered. LTS is a robust estimator and can be converted to a min-min non-convex and non-smooth programming problem. For the data set with size m, the objective function is the minimum of all the $\tilde{m}$-subsets' residual sum of squares. Even if m is not big, the number of the subsets may be very large which makes computing LTS estimator difficult. For such a special kind of problem, an appropriate truncated criteria standard is given and then an efficient truncated smoothing Newton method is proposed. The numerical results show the efficiency.

Key words: LTS estimator; aggregate function; truncation smoothing

(上接第25页)

Collision Simulation Analysis of Indoor Parking Anti-collision Belt Design

Wu Zhong, Su Zhibei

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University , Nanjing 210098,China)

Abstract: Aiming at indoor parking collision damages, this paper proposes the design of anti-collision belt and establishes vehicle collision model with or no anti-collision belt. The rectangular anti-collision belt and wavy anti-collision belt performances are analyzed through LS-DYNA for simulation of vehicle collision into the wall body. The results demonstrate the equivalent stress distribution and energy conversion of anti-collision belt and the vehicle fender, which confirms that the anti-collision belt can effectively reduce vehicle damage degree and the effect of the rectangular anti-collision belt is better.

Key words: indoor parking; anti-collision belt; fender; collision; LS-DYNA simulation

中国知网 https://www.cnki.net