

# 汽车碰撞仿真研究进展

赵 华, 吴英龙, 王 萌

(西南交通大学 力学与工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 针对碰撞仿真技术已广泛用于汽车碰撞安全性能预测和优化设计中的情况,对国内外碰撞仿真实理论、技术及经验的研究成果进行了综述.介绍了多时间尺度算法、非对称性有限单元法、ASI-GAUSS法、BWH和RTCL准则及碰撞下焊接属性的设置.总结了碰撞仿真技术的经验及碰撞仿真建模过程中关键问题的处理方式.简述了依据碰撞法规开展整车碰撞仿真分析及其改进的研究成果.阐述了零部件碰撞仿真分析和优化设计的研究成果.指出可应用仿真工具进行碰撞概念性设计,开发多域接触技术,构建瞬态本构关系材料库,开发对碰撞过程进行优化设计的有限元优化模块等.

**关键词:** 碰撞; 有限元仿真; 综述

**中图分类号:** O302

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-2683(2012)04-0027-07

## The Status Quo of Fem Simulation on Vehicle Collision

ZHAO Hua, WU Ying-long, WANG Meng

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Because finite element simulation method had been widely used in predicting vehicle's crash performance and conducting optimization, we summarized the new theories, techniques and experiences in crash simulation. Theories like multi-scale method, asymmetric finite element method, ASI-GAUSS method, BWH and RTCL criterion, weld's setting under crash were discussed. We summarized experiences and key questions' handling on crash simulation. Achievements on whole vehicle's crash simulation and its improvements were generalized. We also elaborated achievements on parts' designing and its optimization. We points out that some technologies, such as implying simulation at concept design, developing multi-scale contact method, constructing the transient constitution model of novel materials and designing optimization modular, are prospective in the future.

**Key words:** collision; finite element simulation; summary

## 0 引 言

目前,中国已拥有发达的汽车工业,但在汽车的安全性设计方面仍有较大的不足之处.随着计算机

软硬件的飞速发展,碰撞仿真技术成为降低碰撞研究成本和提高汽车碰撞性能的最好手段.对此,本文对汽车碰撞仿真研究最新的进展(图1)进行了综述.主要涉及碰撞仿真实理论及技术、碰撞仿真经验、整车碰撞仿真研究的内容、汽车部件及各种吸能件

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11172249)

作者简介: 赵 华(1957—),男,教授,博士生导师, E-mail: hzhao@home.swjtu.edu.cn;

吴英龙(1984—),男,博士研究生;

王 萌(1985—),女,博士研究生.

的碰撞仿真设计.

## 1 碰撞仿真实论及技术最新成果

汽车碰撞仿真研究最新进展如图1所示.

汽车碰撞是一个复杂的瞬态物理过程,它包含

以大应变为特征的几何非线性,以材料弹塑性变形为特征的材料非线性和以接触摩擦为特征的边界非线性.汽车碰撞仿真基于有限元方法的空间域离散技术和基于有限差分法的时间域离散技术.通过有限差分的方式将质量矩阵对角化而获得显式算法.

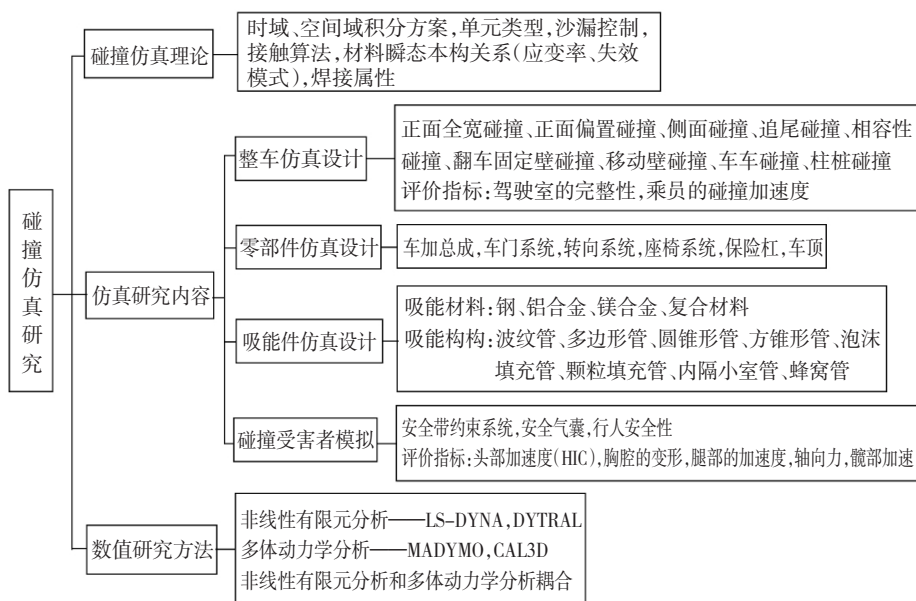


图1 汽车碰撞仿真研究层次示意图

碰撞的瞬时性与结构的大变形使得材料经常处于弹塑性状态,应变不仅依赖于当时的应力状态而且还依赖于整个加载的历史.因此,计算中必须采用很小的积分时间步长.网格密度对计算精确度影响很大,而最小网格尺寸又决定全局时间步长.于是,如何在一定精确度要求下增大时间步长具有重要意义.文[1]提议了一种用于处理单侧接触的显式动态、多时间尺寸计算方法,不同于传统只能处理有固定连接的两子域的多时间尺寸分解技术.该方法基于罚则接触模型和主从表述,赋予各子域最大解耦,使它们可以拥有各自稳定的时间步.对拷贝节点和原节点在碰撞后产生加速度不一致的问题,作者提出强迫拷贝节点与原节点位移一致.作者就多时间尺寸计算实现的流程进行了描述,并通过雨刷器的行人保护设计应用,指出该方法能提高了大部分雨刷器单元的最小时间步,大大减少了雨刷器行人保护设计的计算时间,且由其获得的HIC值、内能、接触力与单一时间尺寸获得的值差别很小.进一步的研究可对以原节点加速度值为真值的加速度修正的误差进行探讨.非对称性有限元公式在测试方程(test function)中使用参数化方程(parametric func-

tion)使连续性条件得到满足,在试用方程(trial function)中使用标准的形状方程(metric shape function)确保有限元计算中应力以最合适的方式得到表达.它可对扭曲单元进行有效预测.然而,这个公式只在学术领域用于静力问题,而未涉及复合材料结构的动力学问题.对此,Surendra<sup>[2]</sup>研究了使用非对称性有限单元法进行层状复合材料的碰撞分析.通过使用20节点层状六面体非对称性有限元公式,研究了层状复合材料-石墨/环氧层(平面和球状)遭受金属横向撞击下的反应.通过与传统的8节点、20节点六面体对称有限单元的比较,确定了该非对称单元有优异的性能.通过在两个连续单元上设置数值积分点形成一个弹性变形杆件并在二单元杆件的高斯积分点上计算应力、应变,文[3]将应用于线性Timoshenko梁单元的自适应转换积分(ASI)技术修改成ASI-Gauss技术,并应用了ASI-Gauss法对冲击载荷下框式结构的压溃进行了分析.本文就弹性范围内ASI-Gauss法的效率和精确度,使用单元间的接触替换以节点力的方式施加碰撞力下杆件的断裂进行了研究.该研究有利于提高在汽车碰撞概念设计阶段仿真的效率和精确度.文[5-7]研究

了对薄片金属进行碰撞断裂预测的 BWH 不稳定准则和 RTCL 破坏准则. BWH 准则基于薄片金属的断裂以当地颈缩为特征. BWH 准则通过在  $\beta \leq 0$  时使用 Hill 准则; 在正值范围内使用 BW 剪应力不稳定准则, 来确定当地颈缩的开始. Hill 准则把片状金属的过度塑性流动形成的窄带(局部颈缩)作为失效的开始. BW 准则假定在任何可预见的局部颈缩开始之前, 会发生厚度方向的剪应力不稳定. BWH 准则是基于膜应力和应变寻找当地不稳定, 未考虑弯曲的影响. 因而, 当该准则应用于有限元编码时, 只通过壳单元厚度方向的中间积分点寻找壳单元的失效. 为此, 作者提出通过指数  $n$  进行修正. RTCL 破坏准则综合了修正的 CL 破坏准则和 RT 破坏准则. RTCL 准则基于壳单元, 而现实的裂隙是一个三维过程. 对此, 作者提议将厚度方向裂隙的发展用抵抗力和强度的降低来描述, 当所有厚度方向的积分点的破坏满足失效准则时去除单元. 由于作者未就该提议进行深入研究, 因此, 需进一步建立三维裂隙的破坏准则并研究 RTCL 准则在体单元中的应用. 为准确模拟 T 结构横臂上焊接区受碰撞弯曲荷载作用时的失效, 文 [8-10] 使用了经属性修正的壳单元(考虑焊接作用及动态作用)模拟了焊接区. 通过 DOE 优化研究, 作者确定了焊接单元的属性, 保证了峰值荷载和能量吸收与试验值相差最小. 但是, 忽略应变率影响, 使用准静态试验获得焊接区属性会给仿真带来较大的误差. 同时, 就仿真和试验中焊接区破坏形式不一致问题, 作者只指出这是由于焊接区未使用 3D 单元所致. 因此, 需进一步探讨 3D 单元下焊接区破坏的形成.

## 2 碰撞仿真技术经验总结

文 [5-16] 就模型的修正和精细化过程, 如: 可忽略部件、连接问题(焊接, 螺栓连接, 粘结, 弹簧连接, 阻尼器)、初始穿透、大变形和泡沫的高度非线性进行了讨论. 作者指出, 一维单元需要注意自由端, 刚性圈, 连接关系和重复等问题; 二维单元需要注意翘曲, 长宽比, 倾斜角和锥度等问题. 对于由泡沫、可变形防护栏等的大变形造成的负体积问题, 作者指出可以通过合理设置的单元尺寸、材料属性、内部接触设置、沙漏控制来改进. 对于由附加质量的增长比例达到了规定的限值造成的节点射出, 作者指出影响因素有网格质量、降积分单元和沙漏, 可以通过设置塑性失效或最小时间步来自动删除节点射

出. 通过大致运动、加速度反应、测试后的观察(如一些地方的永久变形)和整个模型的能量平衡可以确定有限元模拟的有效性. 部件本身和部件间的摩擦接触是导致变形和失效的主要原因. 准确描述和计算接触摩擦能提高碰撞仿真的精确度和计算效率. 在车辆与障碍区防护的碰撞中, 接触摩擦决定了前悬挂弹簧的变形, 进而决定了车辆能否成功转向. 为使汽车稳定改变方向, 文 [7] 通过设置弹簧初始偏置、去掉控制臂与刚性板的接触, 合理地修改了只应用于前碰撞等车体结构大变形的有限元模型的悬挂系统. 作者将轮胎和障碍间的摩擦定义为速度的函数  $\mu = \alpha + \beta e^{-\gamma v}$ ,  $v$  代表滑行. 通过应用预期摩擦值的上下界及一条很低的摩擦值曲线  $\mu_{0.2 \times \text{下界值}}$  进行的仿真分析, 表明, 摩擦系数对能否成功预测车辆转向起重要作用. 对于降积分单元造成的沙漏, 进而导致模拟失真问题, 作者提出在关键区域使用全积分单元, 对降积分单元使用沙漏控制技术并进行能量监视. 由于未考虑皮卡载货的影响, 同时, 采用前后轮平均分配车重, 会给模拟带来误差, 甚至错误. 同时, 有必要就考虑速度影响的摩擦设置对计算速度的影响进行深入讨论. 为解决模型过于庞大而无法计算的问题, 文 [8] 提出了 G/L 方法. 该方法由全域模型生成局域模型的边界条件; 接着由局域模型获取分析的主要结果. 通过全域分析, 作者获得了飞行器在碰撞下的行为; 通过局域分析, 获得了飞行员的行为; 全域和局域模型通过椅子重心处的加速度来联系. 该技术降低汽车碰撞模型的分析规模, 或者能使关键部位的网格得到加密. 但全域和局域模型联系需满足一定的要求, 否则仿真会有失真. 雷正保 [9-21] 提出了汽车碰撞仿真中壳单元畸变、单元积分的阶、材料的开裂准则及冲压成形过程对材料性能的影响等几个没有解决好的问题. 作者提出的问题很深入, 且指出了一定的处理对策, 但在具体实施中还需进一步研究解决.

## 3 整车碰撞仿真研究

依据碰撞法规进行车辆抗碰撞性能分析和乘员安全性研究是汽车抗碰撞设计的最终目的. 赵广耀等 [22-24] 就整车正面和侧面碰撞进行了数值分析, 获得了碰撞时整车位移、速度和加速度的变化历程, 指出了主要吸能件的吸能效果及能量与力的传播途径、假人的伤害程度, 并提出了相应的改进措施. 由于缺少与试验结果的对比验证, 因此, 需进一步探讨

仿真模型的合理性. 通过全正面、偏置正面碰撞数值仿真结果与实车碰撞结果的对比, 文 [25-30] 指出了原车耐撞性能不足之处. 通过对主要吸能件进行结构改进和材料替换, 使得整车变形、关键零件吸能时间序列、整车碰撞加速度、零件对乘员舱侵入以及发动机舱吸能百分比等得到合理的设置. 李碧浩<sup>[31]</sup>探讨了侧面碰撞安全性能的评价及设计指导原则, 提出可以通过约束系统的合理匹配和结构设计的优化(增加加强部件, 合理设计防撞梁、中部加强板, 优化横梁接头)、提高材料性能和增加填充物质, 使撞击力由撞击侧传递到非撞击侧, 从而有效减少乘员的伤害. 在验证了某车型侧面碰撞模型的有效性之后, 通过一系列改进措施使得 R 点、腹部位置、肋骨位置的侵入量和侵入速度有明显的降低, 从而达到了轿车侧面碰撞安全性能的要求. 这些仿真工作往往是在设计工作后期进行的, 宜发展概念设计阶段的碰撞仿真分析.

#### 4 零部件仿真研究

在强化铝质底盘与刚性护栏的碰撞仿真设计中, 文 [8, 35] 开展了对焊接带属性、单元尺寸、前门水平长度和对角线长的 DOE(实验设计) 仿真试验, 寻找到了使目标函数  $O_v$  最小的最优组合. 但将  $O_v$  建立在平均加速度和压缩长度同等重要的基础上尚欠科学考虑. 因此, 有必要先探讨最合理的目标函数形式. 通过张拉试验、标准摆锤试验、微观敏感性分析, 以及数值模拟试验, William Altenhof<sup>[8]</sup> 建立和验证了 AM50A 镁合金材料的属性, 如图 2 所示, 并对该材质的方向盘进行了碰撞仿真分析. 通过对钢质、铝合金质、镁合金质汽车前保险杠的对比仿真研究, 文 [38-40] 发现铝合金质的刚度最小, 导致它达到最大变形的时刻最迟, 塑性变形最大, 碰撞力发展最缓慢、最大值最小, 碰撞后碰撞锤与车体的速度差最大, 即铝合金质保险杠从碰撞锤转移更多的动能. 通过对三种不同屈服强度的铝合金质保险杠的对比研究, 发现屈服强度越小, 最大变形、最大残余变形最大. 但对文中速度-时间历程图显示车体的最终速度以及达到最终速度的时刻都一致尚留有疑问. 对于复合材料, 作者发现经局部加强的 SMC 质保险杠重量小, 生产工艺简单, 且能使结构最大位移增加 9%, 从而使得最大碰撞力比 GMT 小、碰撞力的发展缓慢且持续时间长.

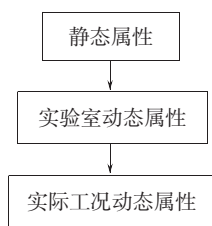


图2 材料碰撞属性建立

以底直径、锥角、锥高、壳厚、材料类型和屈服应力为设计变量, 文 [41] 使用 DOE 对圆锥壳结构进行了碰撞试验和数值模拟, 并用 RSM 建立了碰撞能量和变形的反应面方程. 以该方程为优化设计的目标函数, 预测了能量吸收和变形(图 3), 并选择了合理的参数. 同时, 就无约束、顶端被帽住、底端放置在沟槽中、底端被夹住 4 种边界条件的影响进行了研究. 但该文尚缺仿真分析偏离的解释和改进措施, 且由模拟数据得出的反应面(只建立了变形的反应面方程)未与由试验得出的反应面(只建立了能量的反应面方程)进行对比. 同时, 还需就反应面的可靠度, 进行反应面误差分析.

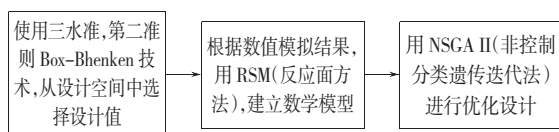


图3 碰撞仿真优化设计流程

在系统研究了三种小室结构件在碰撞作用下的能量吸收、承载力变化和特征屈曲的波长后, Herzl Chai<sup>[42]</sup> 指出了各结构单位质量或体积上的平均应力、压缩能量、密实化应变与小室半宽  $h$ 、摩擦的关系; 能量吸收率  $U^*$  随  $m$ (独立的-竖向隔室件的个数) 的变化. 聚合物的屈服与压力、加载率密切相关, 但是该文未加以考虑, 且假设了材料不可压缩、刚塑性, 未精确设置流动准则. 为此, 有必要进一步研究该聚合物的瞬态本构关系, 及研究单位质量或者单位体积下何种拓扑结构在何种尺寸下能吸收最多的能量、能带来最平顺的吸能过程. 以三种不同密度的铝泡沫管的真实应力-真实应变曲线为样本, 并以  $\rho = 292 \text{ kg/m}^3$  为基准, 文 [43-45] 建立了另两种密度的铝泡沫管的相对应力  $\Delta\sigma(\rho, \varepsilon)$  函数.  $\Delta\sigma(\rho, \varepsilon)$  函数被用来预测另外 10 种不同密度的铝泡沫的真实应力-真实应变. 进而通过重物坠落碰撞仿真, 参数化研究了泡沫密度、碰撞速度以及网格划分质量对泡沫碰撞性能的影响. 但尚需深入考虑: ①在  $\rho$  一定情况下,  $\Delta\sigma$  是否与  $\varepsilon$  成线性关系; ②建立

在三种密度上的  $\Delta\sigma(\rho, \varepsilon)$  函数是否足以推广到其他密度的铝泡沫; ③放弃通过试验获得的各密度铝泡沫的曲线是否合适. 以螺纹的剪切宽度、剪切高度及螺纹齿高为变量, 李素霞、雷正<sup>[64]</sup>对螺纹剪切吸能结构进行了系列仿真实验及正交优化设计, 获得了最优参数. 研究同时考虑了材料的硬化、摩擦、侵蚀性接触和自接触等问题. 该吸能结构非常新颖, 应用前景广阔. 在进一步的研究中有必要开展试验验证, 并考虑螺距变化、螺纹材料选用与结构吸能、剪切套筒损伤的关系等问题.

文 [47] 理论推导了颗粒填充管的等效厚度公式, 并与 LS-DYNA 仿真获得的轴向变形、弯曲变形量作了对比验证. 但是, 文中对接触面积和中性轴的假设尚有不合理. 接触面积为一变量, 且不同材料的颗粒其接触面积的变化情况不一样. 在弯曲情况下, 部分颗粒参与受压、无颗粒参与受拉, 因此, 中性轴会随着载荷而发生变化. 文 [51] 研究了波长  $2\lambda$ 、波幅  $a$ 、 $E_h/E$  和壁厚  $t$  对铝合金 A5052 波纹圆管碰撞性能的影响. 研究指出, 波纹管有 P 模式和 S 模式两种屈曲变形模式; 为了使压应力尽量平缓, 应该选用使点落在变形模式分界处的  $2\lambda$  和  $a$ . 由于试样数组过少, 很多结论, 如不同变形模式的分界、不同变形模式下能量吸收的特点, 需进一步验证. 通过试验, 文 [52-53] 指出了四边形管渐进屈曲模式的分界条件, 并仿真研究了不同壁厚和碰撞速度下屈曲的永久变形和平均力. 通过多边形铝合金管轴向碰撞下变形屈曲的仿真研究, 作者指出, 边数越多, 轴向压缩力越大、永久变形越小. 这使得更多边的多边形管可以在较小的壁厚下获得相同的性能. 以壁厚、锥角、撞击质量和撞击速度为变量, NAGEL G M<sup>[54]</sup>研究了薄壁直方管和薄壁锥形方管在准静态和动态轴压下能量的吸收. 结果发现, 碰撞速度对锥形管动态反应的影响比锥角大. 但尚需进一步探讨如何控制壁厚和锥角, 使能量吸收最大化. 通过对铝泡沫和聚合物泡沫增强的复合材料矩形薄壁管进行碰撞失效试验和仿真研究, 文 [55-56] 发现薄壁复合管的失效模式与纤维分布、基质和纤维材料的属性、管的几何尺寸、应变率有关. 复合材料微观破裂的失效模式呈渐进压缩, ①吸收大量能量; ②复合材料脆断则吸收很少能量; 渐进折叠则吸收中等能量. ③泡沫均为相似的压实失效. 试验结果发现无几何设置、无填充的管发生脆性外围断裂, 有变形引发设置无填充的管则以渐进压缩、分层方式失效. 抵抗力的生成机制是复合材料的微观破坏, 聚合物泡沫增强管与无

几何设置无填充管相近, 能量吸收差, 铝泡沫增强管能量吸收很高, 呈现塑性的方式. 最后, 从单位质量能量吸收率、单位体积能量吸收率、初始塑性变形载荷、单位欧元能量吸收率等方面评价了各类管的应用前景.

## 5 结 语

本文对国内外碰撞仿真实理论和技术的最新研究成果、有限元碰撞模拟的经验、整车碰撞仿真和部件碰撞性能仿真设计及应用多目标优化技术实现碰撞模型参数合理化的研究成果进行了综述. 研究显示, 有限元碰撞理论已趋于完善, 有限元仿真技术业已成熟, 碰撞仿真中本构关系、接触、摩擦等内容已有较深入的研究, 整车及部件级的碰撞开发已大量运用仿真分析. 碰撞仿真研究的热点集中在新型材料和新型吸能结构的碰撞仿真设计上.

同时, 还需加强下列方面的研究: 汽车概念性设计阶段的碰撞仿真设计; 碰撞的行人保护仿真设计; 多域接触技术的国产化开发; 构建新型材料的瞬态特性, 并建立相应的材料库; 开发一种能对整车碰撞性能进行优化的有限元模块; 进一步研究焊接部位瞬态属性; 考虑应力波对零部件碰撞屈曲的影响等.

## 参 考 文 献:

- [1] BOUREL B. Handling Contact in Multi-domain Simulation of Automobile Crashes [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 766-779.
- [2] LIQUAN Meia, THOLE C A. Data Analysis for Parallel Car-crash Simulation Results and Model Optimization [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2008, 16: 329-337.
- [3] KUMAR Surendra. Use of Unsymmetric Finite Element Method in Impact Analysis of Composite Laminates [J]. Finite Element in Analysis and Design, 2011, 47: 373-377.
- [4] LYNN K M, ISOBE D. Structural Collapse Analysis of Framed Structures under Impact Loads Using ASI-Gauss Finite Element method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1500-1516.
- [5] HAGBART S. Alsos. On the Resistance to Penetration of Stiffened plates, Part II: Numerical Analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(7): 875-887.
- [6] WILLIAM Altenhof. Numerical Simulation of AM50A Magnesium Alloy under Large Deformation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 117-142.
- [7] IVÁNYI P. On the Simulation of Failure Mechanisms in Steel Structures [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40: 871-882.

- [8] DEB A. Design of an Aluminium-based Vehicle Platform for Front Impact Safety [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 1055 – 1079.
- [9] 施亮, 朱平, 沈利冰, 等. 基于汽车碰撞仿真的点焊连接关系有限元模拟方法 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 227 – 231.
- [10] DONDERA S. The Robustness of Dynamic Vehicle Performance to Spot Weld Failures [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 670 – 682.
- [11] VELECELA O. Prediction of Crushing Morphology of GRP Composite Sandwich Panels under Compression [J]. Composites, 2007, 38: 914 – 923.
- [12] XIAO Xinran, MCGREGON Carla. Progress in Braided Composite Tube Crush Simulation [J]. International Journal of impact engineering, 2009, 36: 711 – 719.
- [13] AGHDAM M M, FALAHATGAR S R. Micromechanical Consideration of Interface Damage in Fiber Reinforced Ti-alloy under Various Combined Loading Conditions [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 3406 – 3411.
- [14] DONDERA S, TAKAHASHIA Y. A Reduced Beam and Joint Concept Modeling Approach to Optimize Global Vehicle Body Dynamics [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2009, 45: 439 – 455.
- [15] CHENGA Z Q. Experiences in Reverse-engineering of a Finite Element Automobile Crash Model [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37: 843 – 860.
- [16] VANGI Dario. Simplified Method for Evaluating Energy Loss in Vehicle Collisions [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41: 633 – 641.
- [17] GARY R. Impact Simulation and Full Scale Crash Testing of a Low Profile Concrete Work Zone Barrier [J]. Computers and Structures, 2003, 81: 1359 – 1374.
- [18] BOSSAK M. Global/local Analysis of Composite Light Aircraft Crash landing [J]. Computers and Structures, 2003, 81: 503 – 514.
- [19] 雷正保, 龙建强. 汽车碰撞 CAE 技术中几个尚未解决的问题 [J]. 长沙交通学院学报, 2003, 19(3): 415 – 417.
- [20] 高晖, 李光耀, 韩旭. 基于遗传算法和碰撞仿真的材料参数反求. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2714 – 2717.
- [21] ANGHILERI M, CHIRWA E C. An Inverse Approach to Identify the Constitutive Model Parameters for Crashworthiness Modeling of Composite Structures [J]. Composite Structure, 2005, 68: 65 – 67.
- [22] 赵广耀, 樊新华, 郎建伟, 等. 车辆碰撞计算机模拟分析与评价 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 7: 42 – 45.
- [23] 雷正保, 彭子荣. 微型客车的碰撞安全性设计与改进技术研究 [J]. 长沙理工大学学报, 2004, 1(1): 18 – 23.
- [24] HUGHES K. Application of the Finite Element Method to Predict the Crashworthy Response of a Metallic Helicopter under Floor Structure Onto Water [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 347 – 362.
- [25] 赵欣超, 朱平. 基于两种正面碰撞的轿车耐撞性能仿真与改进研究 [J]. 汽车工程, 2007, 29(10): 842 – 846.
- [26] 王立志. 基于乘员保护的汽车正面碰撞结构设计及变形控制研究 [D]. 博士毕业论文, 清华大学, 2001: 18 – 78.
- [27] 陈晓东. 基于行人碰撞小腿保护的汽车保险杠研究 [J]. 汽车技术, 2009, 12: 50 – 54.
- [28] SIEFERT A, PANKOKE S. Virtual Optimization of Car Passenger seats: Simulation of Static and Dynamic Effects on Drivers' Seating Comfort [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38: 410 – 415.
- [29] 雷正保, 钟志华. 汽车碰撞过程中乘员冲击响应的分析方法及应用 [J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 115 – 118.
- [30] 江建, 陈宗渝, 段广洪, 等. 汽车偏置正面碰撞的数值仿真及结构改进 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 118 – 120.
- [31] 李碧浩, 杜汉斌, 卓鹏, 等. 轿车侧面碰撞安全性能改进措施探讨 [J]. 汽车工程, 2008, 30(11): 23 – 26.
- [32] 朱海涛, 孙振东. 侧面柱碰撞的研究 [J]. 交通标准化, 2006, 7: 34 – 37.
- [33] REN Z. Computational and Experimental Crash Analysis of the road Safety Barrier [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(6): 963 – 973.
- [34] BOROVINSEK M. Simulation of Crash Tests for High Containment Levels of Road Safety Barriers [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1711 – 1718.
- [35] 陈昌明, 伍腾飞. 某轿车前纵梁碰撞性能的仿真优化 [J]. 北京汽车, 2008, 6: 54 – 57.
- [36] 王登峰, 曾迎立. 汽车吸能转向机构与驾驶员碰撞的仿真与试验 [J]. 汽车工程, 2003, 25(1): 18 – 25.
- [37] 孟庆雨, 陈明, 郑昆. 汽车转向管柱支撑结构碰撞过程分析与改进设计 [J]. 机械制造, 2003, 41(9): 82 – 86.
- [38] MARZBANRAD Javad. Design and Analysis of an Automotive Bumper Beam in Low-speed Frontal Crashes [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47: 902 – 911.
- [39] 于英华, 郎国. 基于 LS-DYNA 的汽车保险杠碰撞仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 2(1): 25 – 28.
- [40] XIAO Xinran, BOTKIN Mark E. Axial Crush Simulation of Braided Carbon Tubes Using MAT58 in LS-DYNA [J]. Thin-walled Structures, 2009, 47: 740 – 749.
- [41] SHERIFFA N. Mohamed. Optimization of Thin Conical Frusta for Impact Energy Absorption [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 46: 653 – 666.
- [42] CHAI Herzl. On Optimizing Crash Energy and Load-bearing Capacity in Cellular Structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 528 – 539.
- [43] RAJENDRAN R. Numerical Simulation of Drop Weight Impact Behavior of Closed Cell Aluminium Foam [J]. Materials and Design, 2009, 30(8): 2823 – 2830.
- [44] ZAREI H R. Bending Behavior of Empty and Foam-filled Beams: Structural Optimization [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 521 – 529.
- [45] ZAREI H R. Optimization of the Foam-filled Aluminum Tubes for Crush Box Application [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 48: 214 – 221.
- [46] 李素霞, 雷正保. 面向中级轿车的低成本螺线剪切吸能结构

- 优化设计 [J]. 长沙理工大学学报, 2009, 6(2): 51–55.
- [47] LEE Dong Wook. FOA( first-order analysis) Model of a Granule-Filled Tube for Vehicle Crash Energy Absorption [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41: 684–690.
- [48] 孙德强. 双壁厚蜂窝铝芯的共面冲击力学性能 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 69–74.
- [49] 母玲, 郭英男. 蜂窝夹芯雷达罩结构的鸟撞数值分析 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(6): 642–646.
- [50] 张宗华. 轻质吸能材料和结构的耐撞性分析与设计优化 [J]. 大连理工大学, 2001: 25–89.
- [51] CHEN D H, OZAKI S. Numerical Study of Axially Crushed Cylindrical Tubes with Corrugated Surface [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47: 1387–1396.
- [52] ROSSI A. Numerical Simulation of the Axial Collapse of Thin-walled Polygonal Section Tubes [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43: 1646–1661.
- [53] ALA Tabiei. Axial Crushing of Tubes as an Energy Dissipating Mechanism for Reduction of Acceleration Induced Injuries from Mine Blasts Underneath Infantry Vehicles [J]. International Journal of Absorption, Thin-Walled Structures, 2008, 36: 729–736.
- [54] NAGEL G M. A Numerical Study on the Impact Response and Energy Absorption of Tapered Thin-walled Tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46: 201–216.
- [55] MAMALIS A G. On the Crashworthiness of Composite Rectangular thin-walled Tubes Internally Reinforced with Aluminium or Polymeric foams: Experimental and Numerical Simulation [J]. Composite Structures, 2009, 89(3): 416–423.
- [56] 郭颖, 曾涛, 陆夏美. 等. 层状化增韧层合复合材料低速冲击有限元分析 [J]. 哈尔滨理工大学, 2009, 14(3): 94–97.
- [57] OZGUC Ozgur. A Comparative Study on the Structural Integrity of single and Double Side Skin Bulk Carriers under Collision Damage [J]. Marine Structures, 2005, 18: 511–547.

(编辑: 付长缨)

## (上接第26页)

- [6] 南金瑞, 孙逢春, 王建群. 纯电动车电池管理系统的设计及应用 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(S2): 1831–1834.
- [7] 黄文华, 韩晓东, 陈世全. 电动汽车 SOC 估计算法与电池管理系统研究 [J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 198–202.
- [8] PICHLER Peter. Dr. Lithium-ion for Hybrid Vehicles and Electric Vehicles [C] // USA: International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2009: 13–16.
- [9] 刘金琨. 智能控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009, 01: 33–89.
- [10] MICHELA Antonelli, PIETRO Ducange, BEATEICE Lazzerini. Multi-objective Evolutionary Learning of Granularity, Membership Function Parameters and Rules of Mamdani fuzzy systems [J]. USA: Evolutionary Intelligence, 2009, 1(2): 21–37.
- [11] ANTONIO A Márquez, Francisco A Márquez, Antonio Peregrín. Rule Base and Adaptive Fuzzy Operators Cooperative Learning of Mamdani Fuzzy Systems with Multi-objective Genetic Algorithms [J]. Evolutionary Intelligence, 2009, 1(2): 39–51.
- [12] XINYU Du, NAIYAO Zhang, HAO Ying. Structure Analysis and System Design for a Class of Mamdani Fuzzy Controllers [J]. International Journal of General Systems, 2007, 10(2): 42–61.
- [13] 武俊峰, 王世明. 一种基于模糊控制的两步法预测控制方法 [J]. 电机理论与控制, 2010, 07: 75–80.
- [14] 唐少先, 张泰山, 陈建二. 基于三角模糊集划分的 MISO Mamdani 模糊系统参数关联性分析 [J]. 模糊系统与数学, 2005, 19(3): 136–141.
- [15] 吴晓刚, 王旭东, 井济民. 混合动力汽车电子节气门的模糊自适应 PID 控制 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010(1): 1–4.

(编辑: 王 萍)