

Establishment and Verification Advanced European Mobile Deformable Barrier Model Based on Shell Element

Li Qihui, Shi Aimin, Zhang Jian

China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd, Chongqing, China, 401122

Email: liqihui@caeri.com.cn

Abstract: According to the requirement of EURO-NCAP AE-MDB Specification and referring to the honeycomb structure, a new version of Mobile Deformable Barrier AE-MDB(Advanced European Mobile Deformable Barrier)finite element Ls-Dyna model based on shell element technology was developed by using Ls-Dyna shell element technology. In order to reduce the number of element and calculation time, the size of the aperture of the finite element honeycomb model is doubled. The air bubbles in the honeycomb holes were simulated by the simple airbag. The glue in the honeycomb was simulated with the Ls-Dyna keyword. And the failure of glue, aluminum foil and honeycomb blocks was simulated by setting material failure. The AE-MDB finite element model can meet the requirements of energy absorption, force-displacement curve and crushing displacement through dynamic test simulation.

Keywords:side impact, AE-MDB barrier ,shell element, establishment and verification model

侧面移动壁障 AE-MDB 壳单元模型建立与验证

李气辉, 史爱民, 张健

中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

Email: liqihui@caeri.com.cn

摘要: 根据 EURO-NCAP AE-MDB Specification 的要求, 采用 Ls-Dyna 壳单元技术, 参照壁障蜂窝铝真实窝孔结构, 建立了基于壳单元技术的新版侧面碰撞移动可变形壁障 AE-MDB(Advanced European Mobile Deformable Barrier)有限元 Ls-Dyna 模型; 为了减少模型网格数量和计算时间, 有限元蜂窝铝模型孔径的尺寸按照与真实尺寸 2:1 的比例进行扩大; 通过简易气囊的模型来模拟蜂窝铝窝孔中空气受挤压的现象; 蜂窝铝中的胶粘用 Ls-Dyna 关键字来模拟, 并通过设置材料失效的方式来模拟胶粘、铝箔和蜂窝铝块的失效现象。通过动态试验模拟验证, AE-MDB 有限元模型在吸能、力-位移曲线和压溃位移等方面都符合要求。

关键字: 侧面, AE-MDB 壁障, 壳单元, 模型建立与验证

1 引言

蜂窝铝材料在结构上属于二维的多孔各项异性材料, 具有质轻、高比刚度和比强度、以及良好的能量吸收能力, 广泛应用于航空、建筑、包装、军事和交通运输等领域^[1]。在正面偏置碰撞和侧面碰撞中, 用蜂窝铝材料制成的可变形壁障来模拟目标车与实车相撞。蜂窝铝材料具有明显的各向异性, 在有限元仿真中壁障的材料特性模拟较为复杂, 壁障模型的仿真精度对仿真结果具有很大的影响。

欧阳昊、成伟等人用 Ls-Dyna 仿真研究了在不同冲击载荷作用下双壁厚蜂窝铝变形模式和能量吸收特性^[1]; 李霖、朱西产等人通过准静态压缩、动态冲击、铝箔拉伸等试验, 对 EEVC 的侧面碰撞移动变形壁障(MDB)蜂窝铝材料力学特性进行了研究^[2]; 周清、Robert R. Mayer 等人通过一系列静态及动态试验对蜂窝铝的压缩、剪切和撕裂性能进行研究^[3]; 车建业、何立东等人建立了蜂窝铝芯和蜂窝铝板的有限元模型, 模拟计算了薄壁蜂窝铝芯

在深度、对边距不同时受共面载荷作用下的应力强度和实验验证^[4]。

范体强、张维刚等人用实体单元建立了 ECE R95 侧面碰撞移动台车有限元模型^[5]；杨辉、余良福和李霖等人在试验数据的基础上，借鉴国外模型的优点，开发出实体单元侧碰 MDB 蜂窝铝 CAE 模型^[6]。有限元侧碰壁障模型实体蜂窝铝模型网格数量少，模型计算较快，但是结构形式和材料模型较为复杂，横向稳定性不好，计算中容易出现局部变形不准确、沙漏能过大等现象。随着计算机能力的提升，越来越多的研究人员用壳体模型来模拟蜂窝铝壁障。T. Yasuki 和 S. Kojima 等人用壳单元建立了偏置碰撞蜂窝铝壁障模型^[7]；赵敏和钟志华等人采用壳单元技术，参照蜂窝铝的真实窝孔结构建立基于壳单元的侧碰移动可变形壁障有限元模型，进行侧碰移动可变形壁障研究^[8]。

基于前人的研究本文利用壳单元建立了新型侧面碰撞壁障 AE-MDB(Advanced European Mobile Deformable Barrier)有限元模型，进行动态标定分析使其满足侧面碰撞安全开发需求。

2 新型欧洲移动可变形壁障 AE-MDB

ECE R95 侧面碰撞移动可变形壁障 EEVC 2000 自从 20 世纪 90 年代推出来后一直未曾改变，近些年来整车前部结构刚度和整车重量都有了很大的变化，EEVC 2000 移动可变形壁障已经无法与现在车辆前端结构刚度和车辆参数相匹配了，无法真实的代替车辆进行测试和开发了。自 2001 年起 EEVC WG13 工作组开始研究开发新型可变形移动壁障 AE-MDB(Advanced European Mobile Deformable Barrier)，AE-MDB 和 EEVC 2000 MDB 在强度、结构和重量等方面都发生了较大的变化，经过多轮的讨论和改进现在已经推出了正式的 AE-MDB V3.9 版本，并且已经用于 2015 版 E-NCAP。

AE-MDB 壁障由台车和冲击器两部分构成，总质量为 $1300 \pm 20\text{kg}$ ；壁障的重心位置：距离纵向中垂面的距离不超过 10mm，距离前轴 $1000 \pm 30\text{mm}$ ，地面向上 $500 \pm 30\text{mm}$ ；冲击器的前表面距离重心 $2000 \pm 30\text{mm}$ ；碰撞前静态测量时，壁障的高度：最上面零件的前表面的梁单元(上下排块的交叉位置)高度是 $550\text{mm} \pm 5\text{mm}$ ；台车前后轮距为 $1500 \pm 10\text{mm}$ ，轴距为 $3000 \pm 10\text{mm}$ 。冲击器是由 6 个被加工成型的蜂窝铝块 A、B、C、D、E 和 F 组成，蜂窝铝材料被设计成一个随着变形的增大，力在可控范围内增大的形式。在下层蜂窝铝块的前部额外增加了一个 60mm 厚的单元(凸出 60mm，用于车辆前部保险杠的模拟)，蜂窝铝前后部用铝板包裹安装，边角区域用铝板包裹，具体如图 1 所示。

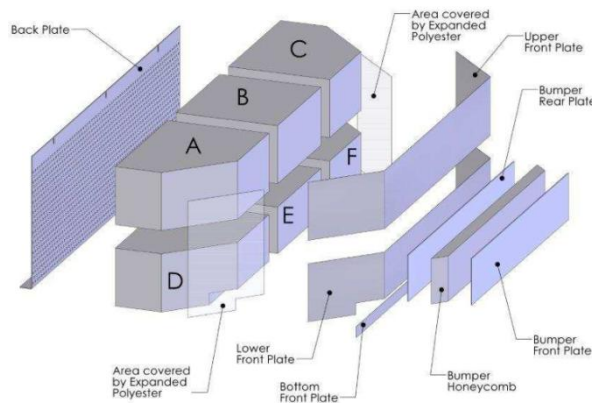


Figure 1. Explosion of AE-MDB
图 1. AE-MDB 冲击器爆炸图

冲击器的整体尺寸为 $1700 \pm 2.5\text{mm}$ ，宽度和深度都为 $500 \pm 2.5\text{mm}$ 。块 B 和 E 的主要尺寸为 $500 \pm 5\text{mm} \times 250 \pm 3\text{mm}$ ，块 A、C、D、F 的主要尺寸为 $600 \pm 5\text{mm} \times 250 \pm 3\text{mm}$ 。冲击器被分为两排，每排都是高 $250 \pm 3\text{mm}$ 深 $440 \pm 2\text{mm}$ ，A、B、C、D、E、F 块的孔径单元尺寸为 19mm，保险杠单元的孔径尺寸为 6.35mm。所有的蜂窝铝材料都是 3003 铝，具体尺寸信息如图 2 所示。

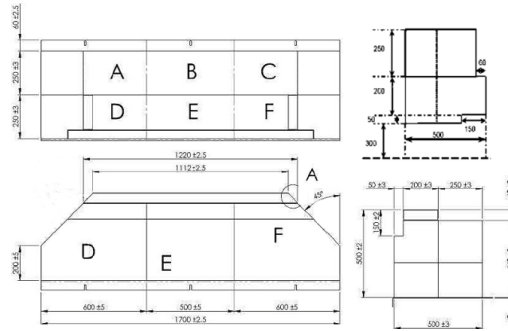


Figure 2. AE-MDB Dimensions
图 2. AE-MDB 冲击器尺寸图

AE-MDB 壁障在几何尺寸、重量、材料、刚度和强度方面都有较大的变化。相对于 EEVC 2000 MDB, AE-MDB 的重量由 950kg 增加到 1300kg; 前端由方形改为梯形左右两侧增加了长宽为 300mm 的 45° 倒角, 更符合车辆前端的造型特点; 壁障的宽度由原来的 1500mm 增加到 1700mm, AE-MDB 壁障前端各蜂窝铝块刚度也提高了, 更好的表征当前车辆前端的刚度特性。

3 新型移动可变形壁障 AE-MDB 有限元模型建立

蜂窝铝实体单元模型主要是利用体积等效材料*MAT_HONEYCOMB 材料模型和增加了成角度压缩的力学特性的材料模型*MAT_MODIFIED_HONEYCOMB, 在计算中容易出现局部变形模式不准确和沙漏能过大的现象。故本文采用壳单元来模拟蜂窝铝的正六面体结构, 可以精确地体现蜂窝铝的结构特点, 并且可以采用简单的弹塑性材料来模拟其材料特点。

3.1 单元尺寸和窝孔孔径的确认

依照蜂窝铝结构特点由壳单元构建有限元模型, 孔径直径为 19mm 的正六面体, 在两个铝箔蜂窝铝相连的垂向方向由两层网格来替代, 网格尺寸大小为 5mm。前端冲击器有限元网格搭建完成后整体网格数量为 370 多万, 节点数为 160 多万个, 在现有计算机硬件水平上模型还是偏大了, 计算时间较长。因此需要扩大孔径, 增大网格单元尺寸, 减小整个模型的规模。将蜂窝铝正六面体的孔径扩大为 38mm, 网格单元尺寸大小改为 10mm。扩大孔径和网格单元尺寸后蜂窝铝冲击器的网格数量变为了 46 万个, 节点数为 21 万个, 模型大小变成了原来的 1/8, 计算时间大大缩小, 适合硬件水平。

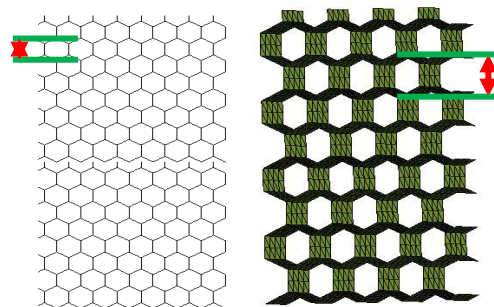


Figure 3. Aluminum honeycomb diameter enlargement before and after
图 3. 蜂窝铝孔径扩大前后对比

3.2 材料模型和参数的建立

在蜂窝铝试件的异面压缩试验中，压缩过程先后分为线弹性变形阶段、逐步塑性折叠阶段和密实化阶段，在逐步塑性折叠阶段，压缩应力维持稳定状态^[3]。此处将逐步塑性折叠阶段的压缩应力定义为蜂窝铝的异面抗压强度。扩大孔径和网格尺寸能大幅度减小单元规模，但是会造成模型的抗压强度与原尺寸模型强度不一致，如图 4 所示的静态异面压缩曲线，真实窝孔尺寸仿真结果的抗压强度与试验一致，而窝孔尺寸放大后压缩强度明显下降^[8]。因此需要依据扩大前后的抗压强度变化情况，合理的匹配壳单元的厚度、对材料曲线进行适当地缩放以及对材料参数进行研究和拟合，使有限元模型孔径扩大前后的静态压缩强度与实际强度是基本一致的。

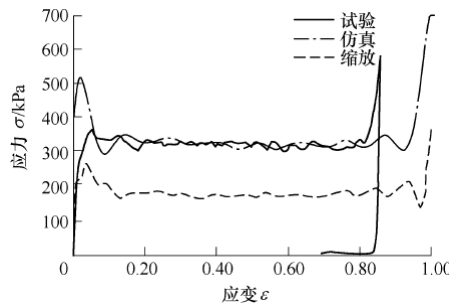


Figure 4. Comparison of differential compression curves between honeycomb aluminum
图 4. 蜂窝铝孔径扩大前后异面压缩曲线对比

AE-MDB 壁障蜂窝铝冲击器的所有材料都要求是 3003 铝，由铝箔构成的正六面体通过粘合剂粘贴成一个大的模块。铝箔和铝板等部件都是用壳单元来模拟，材料选用 Ls-dyna 中的 24 号材料 (*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY)---分段线性弹塑性材料模型，铝箔的材料参数如密度、弹性模量、屈服强度和剪切模量等都是参照各种文献的^{[1][2][3][7][8]}，并对材料参数进行适当地缩放使其动态压缩强度满足标准要求。

蜂窝铝块在冲击中铝箔容易出现挤压变形、撕裂和剪切失效等现象，为了更好的模拟蜂窝铝的特性本文的蜂窝铝材料设置应变失效，失效参数的选取参考了文献^[6,8]。粘合剂相对于铝箔强度和厚度都很小，在建模的过程中就将其忽略掉了，用关键字 *Contact_Nodes_To_Surface 来模拟，将各个铝箔与前后铝板连在一起，在仿真中能有效的将材料失效和撕裂等现象模拟出来。

3.3 简易气囊的建立和铝箔厚度调整

壁障在侧面碰撞过程中会承受瞬间的冲击力，所受的冲击载荷应变率很大，蜂窝铝粘合剂强度较高，窝孔之间的密封性很好。在冲击过程中蜂窝铝内部的空气来不及泄露出去而受到挤压，而蜂窝铝内部的残余空气在高应变率冲击载荷的作用下产生的压力将对蜂窝铝块的力学性能起到加强的作用。在蜂窝铝静态压缩过程中得到的力学性能无法满足要求，因此不能忽略动态压缩性能，本文采用简易气囊模型 (*AIRBAG_SIMPLE_AIRBAG_MODEL)来模拟气体受到动态压缩时的力学性能。

AE-MDB 壁障蜂窝铝冲击器的铝箔是不等厚的，为了模拟汽车前端强度由弱变强的特性，每块蜂窝铝铝箔在制造过程中通过酸蚀处理使其由前至后逐渐变厚。铝箔的最后一段是厚度不变的，压溃强度也是从前到后逐渐升高的，达到一定值后保持不变。为了匹配蜂窝铝孔径扩大后强度降低的情况，对每一模块的铝箔厚度从前到后的厚度进行了适当地调整，具体如图 5 所示。最终建立的 AE-MDB 可变形移动壁障有限元模型如图 6 所示。

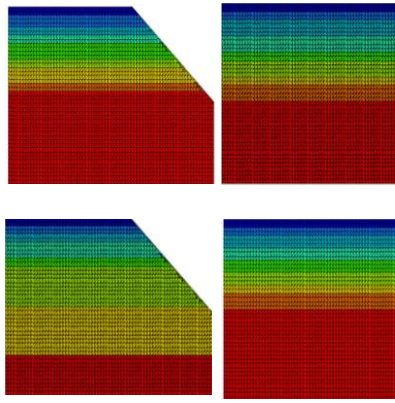


Figure 5. The thickness of each model changes
图 5. 各模块厚度变化示意图

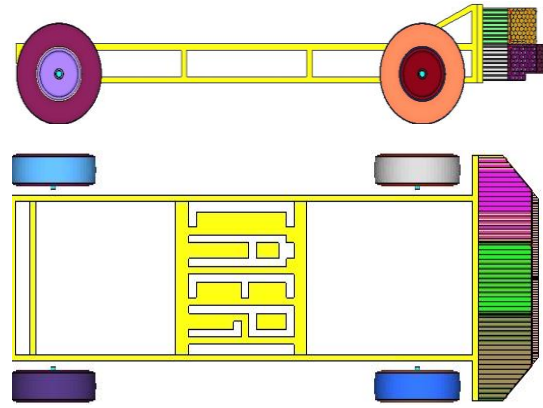


Figure 6. The finite element model of AE-MDB model
图 6. AE-MDB 壁障有限元模型图

4 AE-MDB 移动可变形壁障模型验证

4.1 壁障验证测试方法

依据规则要求 AE-MDB 可移动壁障需要进行静态和动态测试,对其力学性能、压溃位移和吸能都有要求。静态测试方法为从 A、B、C、D、E 和 F 六个模块中取大小为 250mm x 500mm x 440mm 的测试样件,用两块平行的平板以 100mm/min 的速度压缩样件,压缩量至少为 300mm,用传感器记录样件所受的力,做出各个样件的力-位移曲线。

动态测试方法是 AE-MDB 壁障以 35km/h 的速度垂直撞击刚性测力壁障,刚性壁障的宽度不低于 3m、高度不低于 1.5m,刚性壁障的总重量不得低于 70T。通过测力壁障上的传感器记录每一模块撞击中的碰撞力,提取台车重心周围的位移曲线,考察每一模块和壁障的力-位移曲线是否达到要求。同时对壁障的吸能和压溃位移都有一定的要求,碰撞完毕后通过力-位移关系求出各个模块的吸能。其中 A、C 块吸收的能量为 $5 \pm 1\text{KJ}$,块 B 吸收的能量为 $4.6 \pm 2\text{KJ}$,块 E 吸收的能量为 $17.3 \pm 2\text{KJ}$,块 D、F 吸收的能量为 $14.7 \pm 2\text{KJ}$,吸收的总能量为 $61.5 \pm 5\text{KJ}$ 。壁障的最大压溃位移为 $346 \pm 20\text{mm}$,在地面往上 425mm 处沿着 MDB 的中心线处测量的变形量为 $340 \pm 20\text{mm}$ 。

4.2 AE-MDB 动态验证结果

本文采用动态测试方法对建立的 AE-MDB 可变形壁障进行分析和验证。AE-MDB 壁障有限元模型以 35km/h 的速度撞击刚性墙,碰撞结束后由图 7 可以看出壁障前端蜂窝铝变形有序,压溃充分,壁障模型的最大压溃位移为 328mm,在地面往上 425mm 处沿着 MDB 的中心线处的最大压溃位移为 326mm,两者均满足要求。

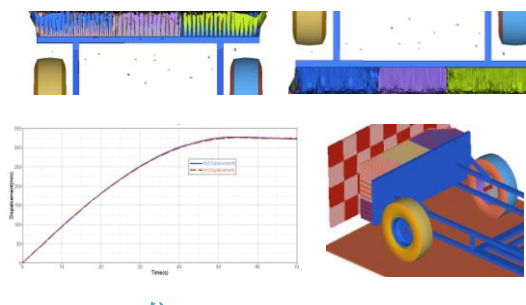


Figure 7. AE-MDB Barrier Model Deformation and Crush Displacement
图 7. AE-MDB 壁障模型变形和压溃位移图

Table 1. AE-MDB Barrier Crush Displacement

表 1. AE-MDB 最大压溃位移

项目	整个壁障	地面往上 425mm 处
标准	346±20mm	340±20mm
仿真	328mm	326mm

壁障 6 个模块各个模块和总壁障的力学性能曲线如图 8 所示, 由图可知各个模块的力-位移曲线都是在标准要求的上下界限范围之内, 壁障模型整体的刚度曲线也是在要求的界限之内, 说明壁障模型仿真分析力学性能结果满足要求。

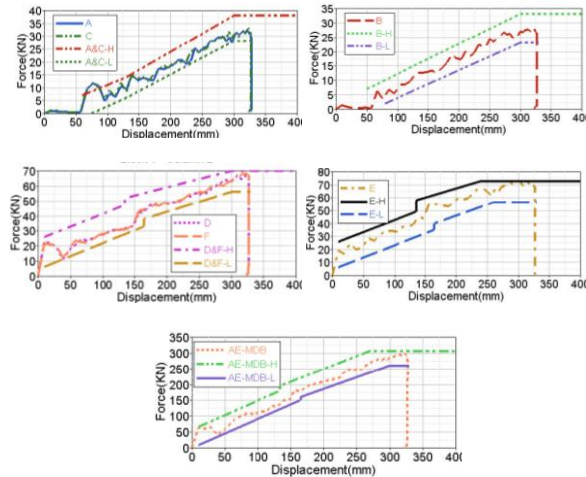


Figure 8. Force Displacement Curve of AE-MDB Barrier Model

图 8. AE-MDB 壁障模型力学性能曲线图

各个模块吸收的能量分别为: A 模块 5.0kj, B 模块 4.6kj, C 模块 5.0kj, D 模块 13.2kj, E 模块 15.5kj, F 模块 13.2kj, 壁障总共吸收了 56.5kj 能量, 各子模块吸能和壁障总体吸能均满足标准要求, 具体如表 2 所示。

Table 2. Each model and the total energy absorption of AE-MDB

表 2. AE-MDB 各模块和总吸能

项目	A	B	C	D	E	F	总模块
标准	5±1	4.6±2	5±1	14.7±2	17.3±2	14.7±2	61.5±5
仿真	5.0	4.6	5.0	13.2	15.5	13.2	56.5

5 结论

(1)用壳单元来模拟蜂窝铝结构模型, 建立侧面碰撞新型壁障 AE-MDB, 壳单元壁障相对于实体单元壁障无需精准的材料模型, 计算中不容易出现局部不稳和沙漏的现象, 仿真模型也更为精确。

(2)在仿真模型的建立过程中充分考虑了孔径扩大对抗压强度的影响, 以及应变失效、铝箔挤压变形、撕裂的状况, 并且用气囊模拟气体挤压对壁障的影响, 用壳单元厚度变化的方法来模拟实际铝箔厚度变化的情况。

(3)通过变形、压溃位移、力-位移刚度曲线和吸能等参数评价指标地对比分析可知, 新建的 AE-MDB 壁障模型各个评价指标均满足动态测试标准要求。

(4)壳单元 AE-MDB 壁障模型虽然满足了动态测试标准要求, 但是吸能和压溃位移这两个评价指标都只是比标准下限高一点, 域度不宽, 壁障模型相对偏硬了一点; 另外本文未曾进行静态测试仿真, 在后续的研究中可以通过材料试验来获取更加准确真实的材料参数, 在对标验证过程中可以加入静态测试仿真和整车侧面碰撞试验的对比, 对模型进行修正。

参考文献 (References)

- [1] 欧阳昊, 成伟. 基于 Ls-Dyna 的双壁厚蜂窝铝变形模式和能量吸收[J]. 材料导报, 2015, 9(26): 160-163.
- [2] 李霖, 杨辉, 陈励, 朱西产等. 汽车碰撞 MDB 蜂窝铝材料力学特性试验研究[J]. 汽车技术, 2012(3): 53-57.
- [3] Qing Zhou, Robert R. Mayer. Characterization of Aluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear, and Tearing[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2002, 124: 412-420.
- [4] 车建业, 何立东, 俞龙. 蜂窝铝的材料性能模拟计算与试验研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 100-103.
- [5] 范体强, 张维刚. 汽车侧碰移动变形壁障仿真模型的开发研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(9): 250-254.
- [6] 杨辉, 余良富, 李霖. EEVC 侧碰蜂窝铝 CAE 模型的开发与验证[J]. 上海汽车, 2011.08: 24-27.
- [7] T. Yasuki, S. Kojima. Application of aluminium honeycomb model using shell elements to offset deformable barrier model[J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(5): 449-456.
- [8] 赵敏, 钟志华, 周泽等. 基于壳单元的侧碰移动可变形壁障研究[J]. 机械工程学报, 2011,47(22): 112-111