

Study of Air Effect in Aluminum Honeycomb Barrier under High Speed Crash

Enze HE^{1,2}, Zhi FU^{1,2}, Jinzhou DING^{1,2}, Weizhao GAO³, Feng PAN³

¹State Key Laboratory of Intelligent Vehicle Safety Technology, Chongqing, China, 401122

¹ China Automotive Research Institute Co., Ltd., Chongqing, China, 401122

² ShareFEA Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, China, 201821

Email: heenze@caeri.com.cn

Abstract: The deformable honeycomb aluminium barrier shows a certain air enhancement effect during high-speed crash and their stiffness characteristics are significantly different from those of quasi-static crush tests. This effect needs to be taken into account in the development of numerical barriers to better improve the accuracy of the model. In this paper, the AC-MDB barrier, coming from the C-IASI regulation, was utilized to carry out the air effect study through the introduction of airbag simulation methods and the method of the material constitutive model containing air effect. The results are compared with physical barrier crash test to verify the validity of modeling methods.

Keywords: Deformable barrier; Aluminum honeycomb; Air effect; Numerical barrier

高速碰撞中可变形蜂窝铝壁障的空气增强效应模拟研究

何恩泽^{1,2}, 符志^{1,2}, 丁进舟^{1,2}, 高伟钊³, 潘锋³

¹智能汽车安全技术全国重点实验室, 重庆 401122

¹ 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

³ 迅仿科技(上海)有限公司, 上海, 中国, 201821

Email: heenze@caeri.com.cn

摘要: 可变形蜂窝铝壁障在高速冲击过程中呈现一定的空气增强效应, 其刚度特性与准静态压溃试验有明显差异。数字壁障开发中需要考虑该效应更好的提升模型的精度。本文以 C-IAIS 测评体系中 AC-MDB 壁障为研究对象, 通过引入气囊模拟方法和含空气效应材料本构模型方法表征空气增强效应的应用研究, 从原理上阐述各自的优缺点, 并与物理壁障试验进行对比验证方法有效性。

关键词: 可变形壁障; 铝蜂窝; 空气增强效应; 数字壁障

1 前言

汽车正面碰撞和侧面碰撞中, 均有可变形壁障碰撞工况, 以代替真实交通事故场景中的车-车碰撞事故^[1,2], 评估车辆结构和约束系统安全配置对车内乘员的保护效果。可变形壁障通常由刚性台车和一系列吸能块组成。由于铝蜂窝结构具有优异的吸能和可设计特性^[3], 常被用于可变形壁障吸能块的开发^[4,5], 以表征撞击车辆沿碰撞方向的结构刚度特性。

对于铝蜂窝结构吸能特性的相关研究发现, 封闭的铝蜂窝结构在沿轴向高速冲击试验中呈现出一定的强化效应^[6,7], 而开口铝蜂窝结构这一现象并不明显^[8-9]。有团队在对于上述问题研究中发现铝材自身的应变率强化效应对试验中出现的载荷强化贡献较小, 并指出宏观的强化效应主要是由于高速冲击过程中, 铝蜂窝结构腔体存在初始气体, 冲击过程中, 腔体体积快速压缩时, 气体无法及时溢出产生较高的气压, 导致载荷增加^[7,9-12]。

尽管物理壁障的吸能块为铝蜂窝结构, 但在过去的很长时间内, 由于整车级有限元仿真的整体精度偏低, 通用

数字壁障开发多采用六面体实体或六面体壳单元建模,通过材料参数逆向标定的方法进行刚度特性匹配,以降低网格数量并兼顾计算效率和精度。随着各企业算力的提升,产品研发对碰撞仿真精度要求的进一步提高,整车碰撞模型的精细化程度越来越高,进一步对可变形数字壁障精度提出了更高的要求,可变形数字壁障开始了精细化铝蜂窝结构建模转型,这要求数字壁障在开发过程中需要兼顾高速碰撞中的空气增强效应。

针对铝蜂窝结构的空气效应补偿,现有的研究中多采用理论手段,通过对材料本构方程增加空气效应修正项的方法实现^[1]。然而,由于商用有限元软件中自定义材料本构使用便利性较差,采用自定义材料本构的方法会影响数字壁障在客户端的通用性,为了较为便利地实现空气效应模拟,刘原杰等基于 LS-DYNA 软件将气囊模拟技术应用 ODB 壁障单个铝蜂窝块动态落锤仿真中,验证了结构与气囊模拟技术相结合的方法有效性^[3];除此之外,碰撞安全性能开发常用的有限元分析软件 LS-DYNA 中,*MAT_CLOSED_CELL_FOAM 材料本构模型亦具有同时兼顾材料塑性特性和空气效应的能力,但其在壁障开发中的相关应用研究较少。

为进一步探索上述两种方法的特点,本文先从原理上进行了阐述,基于 C-IAIS 规程的 AC-MDB 壁障,开展了相关技术应用研究,通过对比标定后壁障模型与高速碰撞试验结果的一致性,验证了上述两种方法的有效性。

2 蜂窝铝空气增强效应模拟技术

2.1 气囊模拟方法

气囊模拟技术在车里研发中常被用于轮胎气室和安全气囊的性能表征,尤其在安全气囊模拟领域,相关的气室、气压、气体发生器、充气、保压、泄气等技术从理论到功能已十分完善。碰撞安全仿真中气室压力模拟主要使用均压法或粒子法^[4],其各自原理如下。

1) 均压法:假设单一封闭气室内,气压在各位置压力相同;不考虑泄气时,气体压力与体积成反比;可通过引入泄气参数控制实现对气室刚度特性的进一步调节。

2) 粒子法:使用虚拟粒子模拟气室中的空气分子,通过粒子与腔体内表面的碰撞模拟气压,通常分为充气、保压和泄气三个阶段。一定数量的虚拟粒子在充气阶段由虚拟的气体发生器喷入气室,在布朗运动的规则下,一定计算时间内完成空气粒子和压力的均匀分布。使用粒子法时,气室各位置压力非绝对均匀,与充气位置、虚拟粒子数量和充气后的平衡时间等因素强相关,对工程经验有较强的依赖性。

相比较而言,粒子法具有更灵活的调节空间,气压的非均匀分布也更加符合真实的物理状态,特别适用于有明确充气过程的应用场景,如安全气囊、侧气帘模拟等。均压法的调节自由度较低,但计算效率高,对于初始压力均匀的气室具有优异的模拟效果,如整车碰撞过程中的轮胎气室模拟等。

2.2 含空气效应的泡沫材料本构

铝泡沫材质作为结构件填充物^[5],在轻量化结构设计中发挥着重要作用。这类材料制作过程中,由于结构中存在初始孔洞,在变形过程中存在空气效应。为更好地模拟此类材料的力学特性,Neilsen 等开发出了一种适用于含空气效应的泡沫材料本构模型^[6],并在 LS-DYNA 软件中进行了程序实现*MAT_CLOSED_CELL_FOAM。该力学本构进行单元应力张量计算时,引入了空气应力张量分量,以兼顾空气效应,如式(1)所示。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{sk} - \delta_{ij}\sigma^{air} \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 为单元的综合应力张量, σ_{ij}^{sk} 为单元的结构应力张量分量, $\delta_{ij}\sigma^{air}$ 为单元的空气应力张量分量, σ^{air} 如式(2)所示。

$$\sigma^{air} = \frac{-p_0\gamma}{1+\gamma-\phi} \quad (2)$$

式中, p_0 为材料孔洞的初始气压, ϕ 为泡沫密度与基材密度比(通常 ≤ 1.0), γ 为单元的体积应变,如式(3)所示。

$$\gamma = V - 1 + \gamma_0 \quad (3)$$

式中, V 为有限元计算过程中使用该材料本构各单元瞬时体积与初始体积比, γ_0 为初始体积应变(通常为0)。

该材料本构中,单元的屈服准则作用于结构应力张量分量 σ_{ij}^{sk} 中,可通过应力-应变曲线定义其在受压和受拉状态中的屈服表征。由式(1)可知,当 p_0 不为0时,计算过程中单元应力张量 σ_{ij} 始终存在空气效应张量分量,

其载荷计算原理与均压法一致。由于该本构模型中无泄气参数定义，当 p_0 不为0时，碰撞过程的回弹阶段，将呈现出一定的空气弹簧效应；当 p_0 为0时，由于该材料本构中无应变率效应，仅适用于单一碰撞速度下的性能标定。

3 AC-MDB 壁障模型与空气效应模拟

3.1 AC-MDB 壁障模型

AC-MDB 数字壁障组成与物理壁障一致^[1]，分为刚性台车、吸能块和封板等结构，如图1所示。数字壁障的质量、质心、和各组成部分的几何尺寸参考文献^[1]中进行建模，吸能块和封板采用与实物一致的分区方法，同时为了提升计算效率，采用等效扩胞原理对铝蜂窝网格和零件属性进行了重构^[17]。

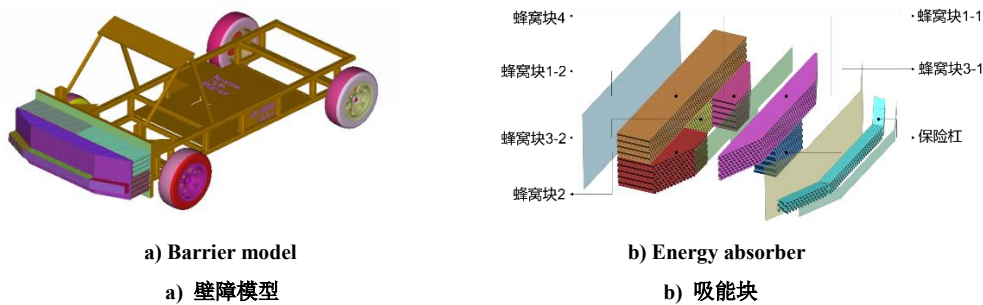


Figure 1. AC-MDB numerical barrier and its energy absorber parts

图 1. AC-MDB 数字壁障及其各吸能块分区

3.2 空气效应的等效建模

使用虚拟气室模拟方法对可变形壁障数字模型进行空气效应等效建模时，由于等效气囊无真实的充气位置和充气过程，粒子法不太容易调整。本文使用均压法气室模拟理论，在基于空气参数的均压法气囊基础上，引入泄气参数，通过仿真与试验对标，采用二分法对气囊泄气孔面积参数进行回归，完成壁障模型修正。壁障模型使用壳单元模拟，如图2-a所示，气室等效模型如图2-b所示，由于AC-MDB壁障有4个主要吸能区，且各自均有独立的刚度特性要求^[1]，在实际模拟过程中分别对其构建气室，进行气囊泄气孔面积参数标定。气室网格采用共节点方法实现与壁障吸能块和封板结构连接。在图2-b的基础上，可将气囊定义删除，在不改变节点数量和坐标的前提下，进行六面体单元替换，如图2-c所示，使用*MAT_CLOSED_CELL_FOAM材料本构进行模拟，采用试错法开展气压和应力应变曲线参数对标，实现另一种空气效应模块的等效建模。

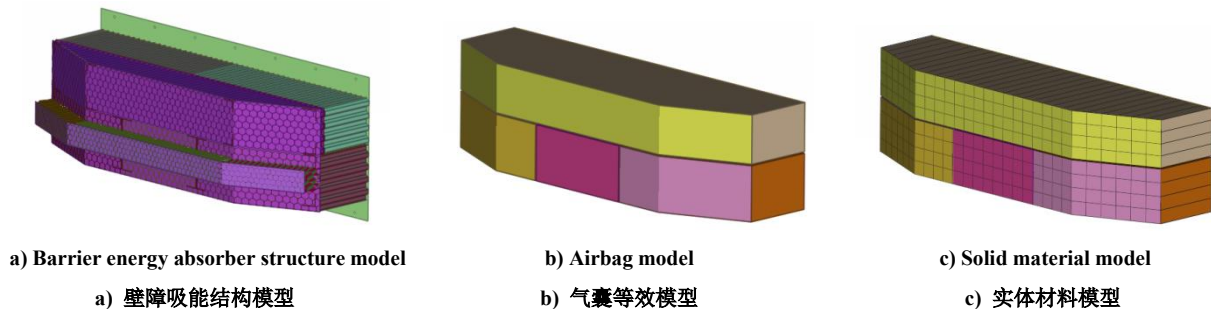


Figure 2. Air effect modeling illustration

图 2. 空气效应建模图示

4 试验验证与结果对比

4.1 壁障开发工况描述

AC-MDB 物理壁障开发过程, 采用了从材料级、部件级到台车级的立体开发策略。在台车级性能开发过程中, 使用碰撞速度为 50km/h 的 100%重叠刚性墙碰撞试验 (LCW) 作为标准工况, 分区域测量刚性墙法向载荷时间曲线, 如图 3 所示, 与台车沿撞击方向上的位移时间曲线组合, 获得各区域沿碰撞方向的刚度特性曲线, 并基于预设的刚度特性带宽, 指导物理壁障结构设计。数字壁障采用了相同的开发策略, 先基于材料试验和部件试验结果开发基础数字壁障模型, 并通过标定空气效应模拟方法参数, 完成数字壁障开发。

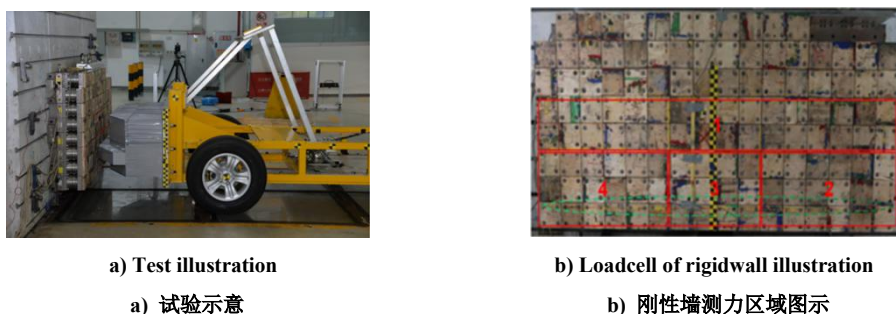


Figure 3. 50km/h 100% overlap rigidwall crash loadcase

图 3. 50km/h 的 100%重叠刚性墙碰撞工况

4.2 结果分析

不含空气效应的基础数字壁障模型在 LCW 工况中的仿真结果与试验对比如图 4 所示。未考虑空气效应模块时, 各测力区域刚度特性曲线均低于物理试验结果, 紧贴壁障刚度特性带宽下限, 且在变形后期各区域载荷水平已不满足法规设定的带宽要求。

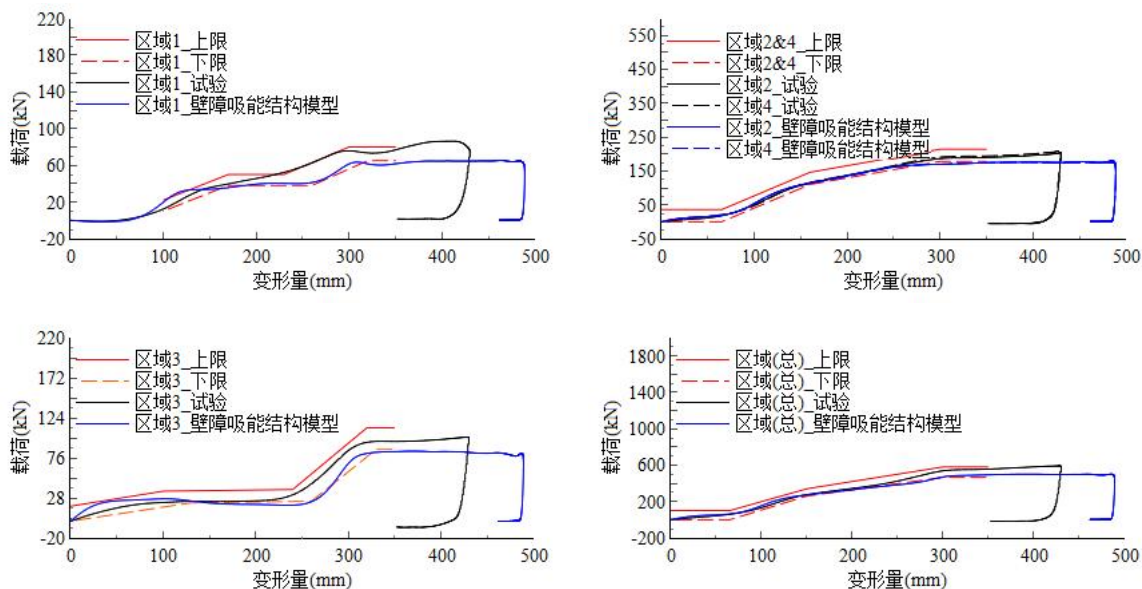


图 4. 无空气效应结果对比

我们基于图 2-b 和图 2-c 两种空气效应等效建模方法，基于图 4 中试验数据与仿真数据的差异，对两种模拟方法中的参数进行了回归标定，标定后各测力区域载荷位移曲线对比结果如图 5 所示。尽管在全局载荷位移曲线上这两种方法结果差异较小，气囊模拟方法在局部区域居具有更高的精度。其次，从图 6 的台车加速度和速度信号结果对比可知，在数字壁障中增加对空气效应的模拟，可以有效提升壁障撞击过程中的动力学响应精度。从结果也不难看出，尽管标定后壁障模型精度有所提升，但与物理试验相比，在最大变形量上，仍存在约 6% 的差异。根据物理壁障刚度设定规则可知^[1]，各个区域的刚度特性在变形量达到 300mm-330mm 时达到最大，文献 [18]指出侧面碰撞壁障的主要变形区为 100mm-400mm，事实上大多数车辆的 AC-MDB 碰撞工况试验测试中，壁障的真实变形量远小于 400mm，由此可知上述差异对该数字壁障的实际使用影响较小。

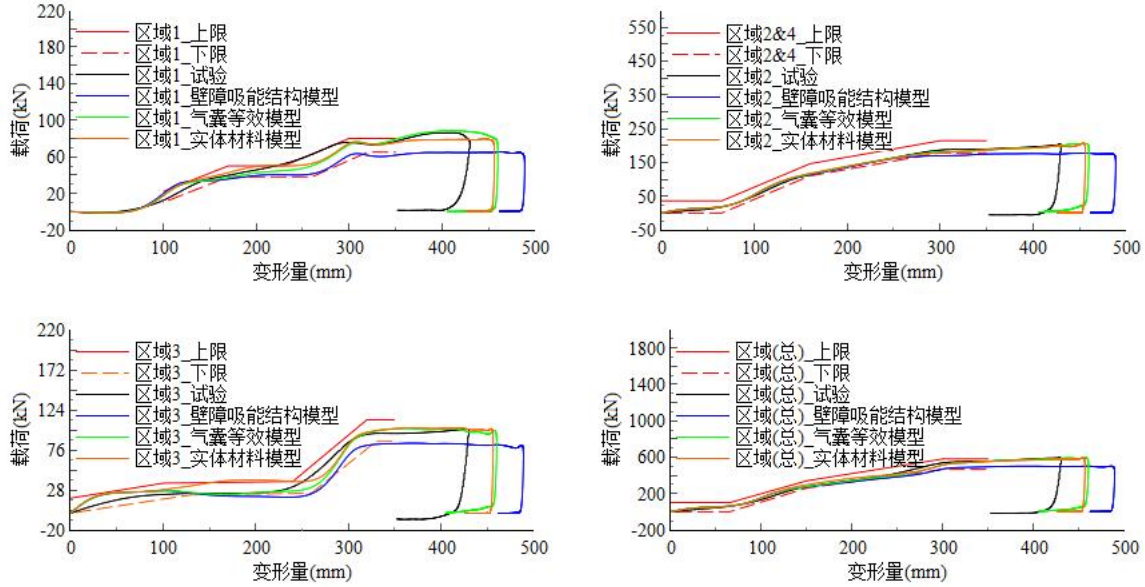


Figure 5. Results comparison with air effect after correlation

图 5. 增加空气效应标定结果对比

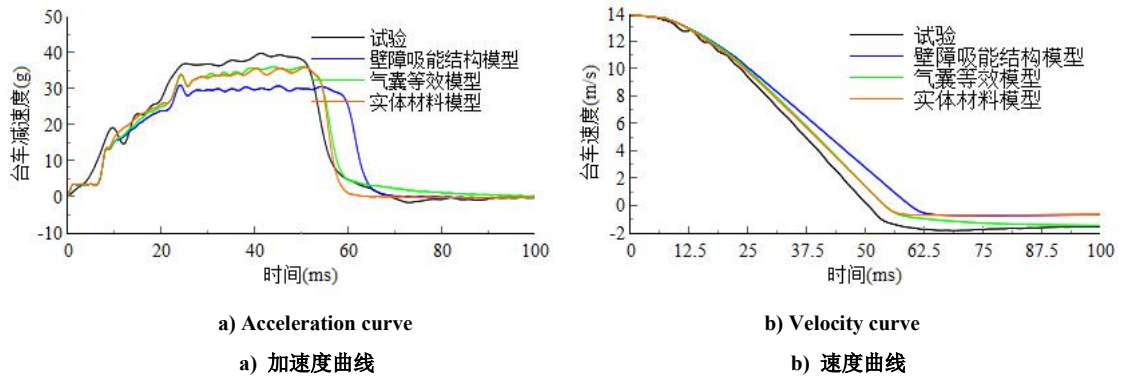


Figure 6. Results comparison of trolley acceleration and velocity

图 6. 台车加速度和速度信号对比

为了进一步说明数字壁障中空气效应对精度提升的贡献，本文使用 ISO/TS 18571 标准^[19]，从通道、相位、振幅、斜率 4 个方面，对数字壁障精度进行了定量评价。其数学表达式如下：

$$R = 0.4Z + 0.2E_p + 0.2E_m + 0.2E_s \quad (4)$$

式中， R 为精度值， Z 、 E_p 、 E_m 和 E_s 分别为基准曲线和预测曲线的通道相关性、相位相关性、振幅相关性

和斜率相关性。

以图 4 至图 6 中的试验数据为基准，对不同状态数字壁障性能曲线使用式(4)指标进行 R 值计算（其中图 4 和图 5 在 400mm 进行了截断），结果如表 1 所示。结果显示，两种方法相比较不含空气效应的壁障模型，精度有显著提升；其次，气囊模拟技术在区域 2 和 4 的载荷位移曲线精度与空气效应材料模拟技术几乎相当，但在其它区域前者均较优。除此之外，壁障各区域刚度特性精度提升进一步改善了刚体台车的加速度和速度曲线响应精度，尤其是加速度曲线，R 值提升幅度高于 0.2，再次验证了上文中的结论。

Table 1. R value of numerical barrier
表 1. 数字壁障仿真精度 R 值

数字壁障状态	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 all	加速度	速度
结构	0.776	0.825	0.811	0.802	0.835	0.617	0.886
气囊模拟	0.937	0.853	0.844	0.835	0.935	0.843	0.981
空气效应材料	0.833	0.855	0.811	0.838	0.855	0.822	0.974

5 结论与展望

针对可变形壁障蜂窝铝结构在高速碰撞中的空气增强效应问题，阐述了气囊模拟技术和含空气效应材料本构模拟方法的基本原理，基于 C-IAIS 规程的 AC-MDB 数字壁障，探索了上述两种方法的实用性，研究结论表明：

- 1) 基于原理分析，均压法气囊模拟技术与本文应用场景匹配度较好，调参和标定过程也相对简便，通过寻优后的数字壁障模型基本可以满足标定要求；
- 2) 含空气效应的材料本构*`MAT_CLOSED_CELL_FOAM`，由于无法定义泄气特性参数，且材料本构无应变率效应，相比较气囊模拟技术的适用性略显逊色；
- 3) 通过在数字壁障中增加空气效应模拟，可有效提升其仿真精度，且气囊模拟技术具有更优异的表现。

然而，尽管气囊模拟技术在 AC-MDB 数字壁障的精度提升有一定的相对优势，但仍有一定的局限性，尤其是对于其在非标定碰撞速度工况的精度表现，仍需开展进一步的试验和仿真研究。除此之外，对于 MPDB 壁障而言，其数字壁障模拟精度除需要在压溃段满足要求外，仍需兼顾回弹过程中的模拟精度，这对空气效应模拟技术精度要求更高，关于如何改善空气效应在回弹阶段的模拟精度问题仍需开展相应的研究探索。

参考文献 (References)

- [1] 中国保险汽车安全指数. 车内乘员安全指数-侧面碰撞试验规程[G]. 2023.
- [2] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP 管理规则(2024 年版)[G]. 2024.
- [3] 高广军, 吴小伟, 于尧. 减轻乘员二次碰撞损伤的列车铝蜂窝吸能桌耐撞性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 299-309.
- [4] 蜂窝铝壁障及其设计方法和应用[P]. 中国专利. CN114047001A. 2022.02.15
- [5] 朱海涛, 杨佳璘, 段丙旭. 一种侧面碰撞用蜂窝铝壁障性能开发与验证[J]. 汽车技术, 2023(2): 43-55.
- [6] H. Zhao, G. Gary, Crushing behavior of aluminum honeycombs under impact loading, Int. J. Impact Eng. 21(10) (1998) 827-836. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00034-7.
- [7] A. Ashab, D. Ruan, G. Lu, S. Xu, C. Wen. Experimental investigation of the mechanical behavior of aluminum honeycombs under quasi-static and dynamic indentation. Mater. Des. 74 (2015):138-149. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.03.004.
- [8] A. Paul, U. Ramaury, Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam, Mater. Sci. Eng., A, 281(2000) 1-7. DOI: 10.1016/S0921-5003(99)00750-9.
- [9] V.S. Deshpande, N.A. Fleck, High strain rate compressive behaviour of aluminum alloy foams, Int. J. Impact Eng., 24(2000) 277-289. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00153-0.
- [10] S. Xu, J.H. Beynon, D. Ruan, G. Lu, Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs, Compos. Struct. 94(8) (2012) 2326-2336. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.02.024.
- [11] S. Xu, J.H. Beynon, D. Ruan, T.X. Yu, Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane

- compression, Int. J. Impact Eng. 2012, 47(4) 1-13. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.02.008.
- [12] Xu S, Ruan D, Lu G. Strength Enhancement of Aluminium Foams and Honeycombs by Entrapped Air under Dynamic Loadings, International Journal of Impact Engineering (2014), DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.03.007.
- [13] Yuanjie Liu, Qing Zhou, Xinqi Wei, Yong Xia. Testing and modeling tearing and air effect of aluminum honeycomb under out-of-plane impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering (2019), DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103402.
- [14] 田钰楠, 郝琪, 刘宇, 崔宏伟. 正面碰撞条件下驾驶员安全气囊的匹配优化[J]. 汽车技术, 2022(4): 38-43.
- [15] 李思超, 杨旭东, 安涛, 郑远兴. 泡沫铝填充薄壁管复合结构压缩与吸能性能[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 120-127.
- [16] Neilsen M.K., Morgan H.S., a Krieg R.D. A Phenomenological Constitutive Model for Low Density Polyurethane Foams. Rept. SAND86-2927, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM(1987). DOI: [10.2172/6633017](https://doi.org/10.2172/6633017).
- [17] 一种侧面碰撞壁障蜂窝模型的等效方法[P]. 中国专利. CN 115270429A. 2022.11.01
- [18] 李学言, 祁志南, 崔东, 胡帛涛, 孙庆浩. 整车侧碰壁障性能分析与结构耐撞性设计[J]. 测试试验, 2024(11): 86-91.
- [19] ISO. Road Vehicles - Objective Rating Metric for Non-Ambiguous Signals: ISO/TS 18571: 2014[S]. Switzerland:ISO, 2014.