

# Study of MPDB Accuracy Enhancement based on Failure Prediction of Cladding Plate

Tao JIANG<sup>1</sup>, Zhi FU<sup>2</sup>, Enze HE<sup>2</sup>, Jinzhou DING<sup>2</sup>, Feng PAN<sup>1</sup>, Tiqiang FAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ShareFEA Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, China

<sup>2</sup>China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing, China

Email: fuzhi@caeri.com.cn

**Abstract:** The MPDB crash condition is mainly used to evaluate the vehicle compatibility, and the index also takes the deformation model of the barrier after crash into account. Therefore, the accuracy of finite element model of barrier has a crucial influence on the MPDB compatibility evaluation. Taking the aluminum cladding plate as research object, GISSMO material card is developed and validated based on CrachFEM shear failure criterion and necking instability criterion and the systematic material tests. The benefits of GISSMO model to improve the accuracy of MPDB barrier is analyzed through the comparison of the Tube dynamic crash test and simulation.

**Keywords:** MPDB Barrier; Cladding plate; GISSMO model; Simulation accuracy

## 基于壁障封板失效模拟的 MPDB 模型精度提升研究

江涛<sup>1</sup>, 符志<sup>2</sup>, 何恩泽<sup>2</sup>, 丁进舟<sup>2</sup>, 潘锋<sup>1</sup>, 范体强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>迅仿科技(上海)有限公司, 上海, 中国, 201821

<sup>2</sup>中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

Email: fuzhi@caeri.com.cn

**摘要:** MPDB 工况主要用于考察车辆的碰撞兼容性, 评价指标也会兼顾碰撞后的壁障变形模式, 因此壁障有限元模型的仿真精度对 MPDB 工况的模拟可信度有着至关重要的影响。以铝合金封板为研究对象, 基于 CrachFEM 模型的剪切失效准则和颈缩失稳准则结合系统化材料力学试验开展封板 GISSMO 仿真卡片的开发与标定, 通过标准 Tube 动态台车试验和仿真的对比验证其对改善 MPDB 壁障模拟精度的有效性。

**关键词:** MPDB 壁障; 封板; GISSMO 失效模型; 模拟精度

## 1 引言

碰撞法规要求的不断升级使得新车型耐撞性能得到显著改善, 然而道路事故显示在车与车对碰中, 两车前部吸能结构不能充分接触, 使得乘员舱直接面对对方车辆的侵害<sup>[1]</sup>。要进一步减少实际事故中的乘员伤亡概率, 近年来多项测评规程都增加了考察本方车辆对对方车辆造成的侵害程度, 即车辆的碰撞兼容性<sup>[2]</sup>。良好的碰撞兼容性可以使两车在保障乘员舱完整的前提下, 不对对方乘员舱造成侵害, 且同时满足双方乘员保护要求<sup>[3]</sup>。

正面 50% 重叠移动渐进式可变形壁障碰撞工况 (MPDB) 已经成为 Euro-NCAP、C-IASI 的标准工况, 目的是考察车辆的碰撞兼容性, 主要评价指标有壁障变形量标准差 (SD)、壁障触底、壁障的乘员载荷准则 (OLC)<sup>[4]</sup>。MPDB 壁障主要由多块渐变刚度的蜂窝铝组成, 由铝封板粘胶固定。MPDB 壁障模型的测试中发现, 铝封板在冲击过程中会发生破坏撕裂并影响整个 MPDB 壁障模型的变形模式和 SD 指标。因此, MPDB 壁障有限元模型要求能够准确模拟封板受到不同形式碰撞加载下的失效行为, 与试验表现更为贴近, 进而确保仿真分析中 MPDB 蜂窝铝的变形更逼近于试验。

目前主流碰撞蜂窝铝壁障模型采用壳单元模拟, 图 1 为迅仿开发的适用于 LS-DYNA 求解器的 MPDB 壁障有

有限元模型组成及爆炸视图。蜂窝铝块多数采用节点变厚度、材料参数匹配等进行整个蜂窝铝块的刚度和强度等效，封板与蜂窝铝块使用粘胶连接，铝合金封板使用壳单元建模<sup>[5]</sup>，可以通过 Adhesive 结构胶或 \*CONSTRAINED\_SPOTWELD 等实现粘胶的无形或隐式等效<sup>[6]</sup>。本文重点研究 MPDB 壁障模型中铝制封板的建模，尤其是失效模拟对 MPDB 模型的精度影响，通过更加精确的材料模型提升铝板的弹塑性变形和断裂失效预测能力，进一步提高 MPDB 壁障有限元模型的准确性。

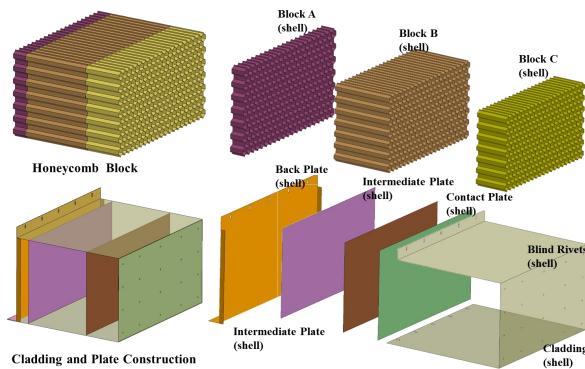


Figure 1. MPDB Finite Element Model and Exploded View  
图 1. MPDB 壁障有限元模型组成及爆炸视图

常用失效准则有常应变失效、Jonson-Cook(JC)失效模型、GISSMO 失效模型和 CrashFEM 失效模型<sup>[7-9]</sup>，其中最为简单的是常应变失效准则，是一种基于单一应力状态的失效应变作为材料发生断裂时的主要依据，适用于应力状态变化较窄的工况，预测精度较低。JC 模型旨在描述材料在高温和高应变率下的动态响应，是考虑应力三轴度的损伤演化模型，但其失效应变随着应力三轴度单调变化，并且以线性方式计算损伤累积。为了克服上述破坏模型的缺点，Neukammf 等人提出了 GISSMO 破坏模型，该模型是非线性损伤累积的幂律函数，可以描述由孔隙成核和聚集引起的延性损伤<sup>[10]</sup>。GISSMO 模型考虑了材料失稳、应力软化和断裂，并使用三个方程分别进行描述，能够准确地描述不同应变路径下材料的非线性损伤过程<sup>[11]</sup>。CrashFEM 失效模型是一种用于预测材料在动态载荷作用下失效行为的数值模拟方法<sup>[12-14]</sup>。该模型通过考虑材料的微观结构和宏观力学性能，能够较为准确地模拟材料在冲击、爆炸等极端条件下的破坏过程<sup>[15]</sup>。CrashFEM 模型的核心在于其能够捕捉材料内部裂纹的萌生、扩展以及最终断裂的全过程，为工程设计和材料选择提供重要的理论依据<sup>[16]</sup>。MPDB 模型中封板材料的变形和失效是一个非常复杂的过程，若使用简单的常应变或者 JC 模型很难准确模拟材料的失效，本文基于 CrashFEM 准则的剪切失效曲线和颈缩失稳曲线，并与 GISSMO 模型进行耦合来表征 MPDB 壁障封板材料的失效参数，通过提高封板失效模拟的能力进一步改善 MPDB 壁障模型的仿真精度。

## 2 封板材料的系统化力学试验

### 2.1 力学试验设计

MPDB 壁障封板为铝合金材料，其材料弹塑性与加载速率相关性小，但断裂失效与应变率有一定的敏感性。本研究设计了五种应力状态的材料试验，精确获取铝合金在不同受力条件下的应力流动和失效特性。实验材料来自 MPDB 壁障封板，实验类型包括六种静态测试，全面覆盖了材料可能遇到的应力环境。为探究不同应变率下的性能差异，特别设计了动态缺口实验，要求开展三次重复测试。试验类型和加载条件如表 1 所示，相应的试验样件尺寸如图 2 所示。考虑到铝合金材料的热敏感性，测试样品通过 CNC 冷切割制造，避免影响材料性能。试验在 Zwick 型万能试验机和 Zwick 型高速拉伸试验机上进行，并通过非接触式数字图像相关 (DIC) 方法测量变形位移，确保位移的测量精度。

## 2.2 试验结果

图3为各种试验工况下的载荷力-位移曲线。基于单轴拉伸试验的力-位移曲线,可以得到封板材料的工程应力应变曲线。单轴拉伸试验中,三次结果具有良好的一致性。材料的屈服强度为173MPa,抗拉强度为218MPa。当材料塑性应变达到8%时,会发生颈缩现象,载荷开始下降。应变在10%时,材料发生断裂并失去承载能力。对比静态与动态缺口试验的力-位移曲线,发现该材料的强度随应变率增加变化不大,但在高应变率下,材料的韧性显著优于准静态条件。

Table 1. Experimental matrix

表 1. 试验矩阵

试验类型	试验条件	加载速率
单轴拉伸	准静态	3.6mm/min
缺口拉伸	准静态	0.3mm/min
三点弯曲	准静态	1mm/min
穿孔	准静态	1mm/min
剪切	准静态	0.3mm/min
圆孔拉伸	准静态	0.3mm/min
缺口拉伸	动态	1m/s

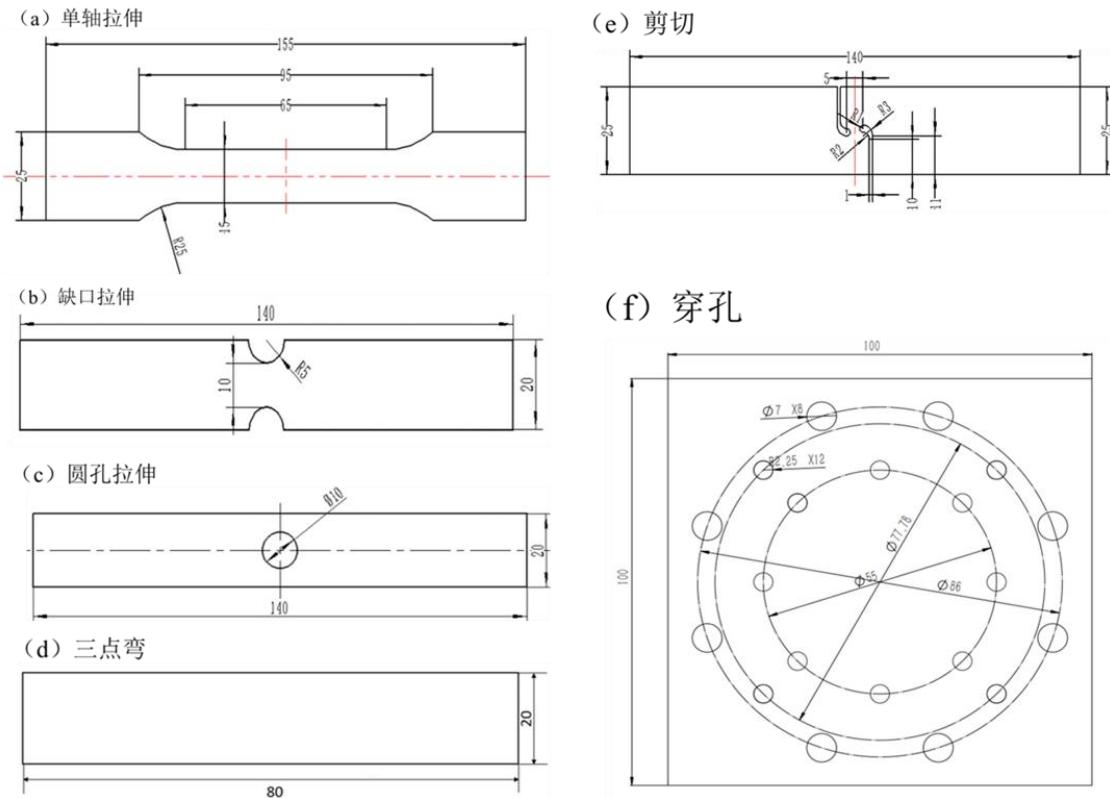


Figure 2. Sizing of test specimens

图 2. 试验样件尺寸

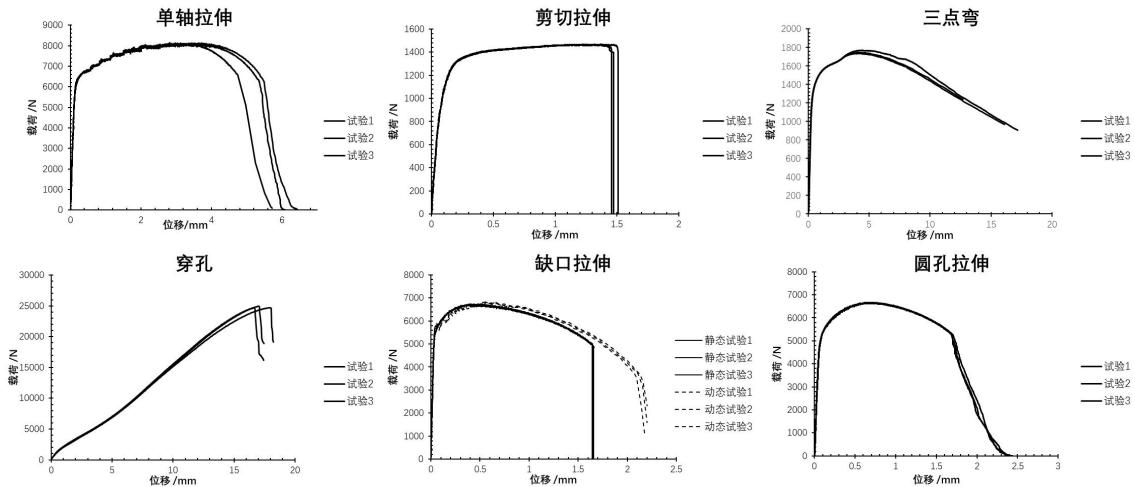


Figure 3. Material test results

图 3. 材料试验结果

### 3 封板材料模型建立

#### 3.1 弹塑性模型拟合

利用 LS-DYNA 软件 MAT133 本构模型, 对铝合金材料的弹塑性行为进行描述。当材料进入颈缩阶段, 应力状态会由单轴拉伸应力状态 ( $\eta=0.333$ ) 转变为平面应变应力状态 ( $\eta=0.577$ ), 此时需要借助硬化公式对真实应力-应变曲线进行外推, 以获得颈缩后的真实应力-应变曲线。本文采用 Swift 和 Hockett-Sherby 的联合公式, 将颈缩后的数据外推至应变 1.5。

$$\sigma = \left\{ C \cdot (\varepsilon_{pl} + \varepsilon_d)^m \right\} + \left[ \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i) e^{-\alpha \varepsilon_{pl}^p} \right] \quad (1)$$

其中  $\sigma$  是有效应力,  $\varepsilon_{pl}$  是塑性应变,  $\varepsilon_d$  是屈服应变。 $m$  表示加工硬化系数,  $\sigma_{sat}$  指饱和应力,  $p$  和  $C$  是材料常数, 外插后的硬化曲线如图 4 所示。

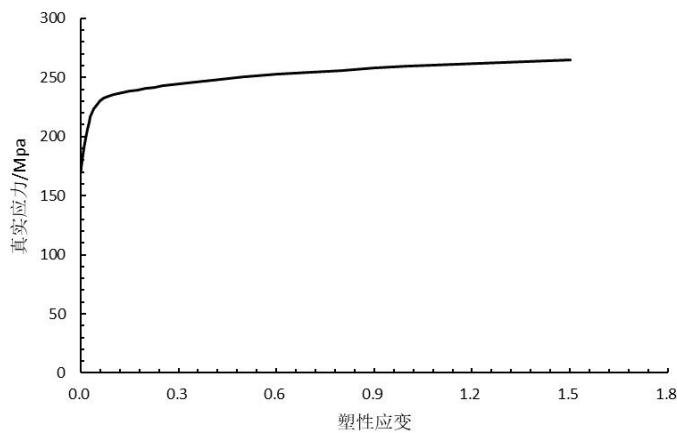


Figure 4. Hardening curve for uniaxial tensile

图 4. 单轴拉伸硬化曲线

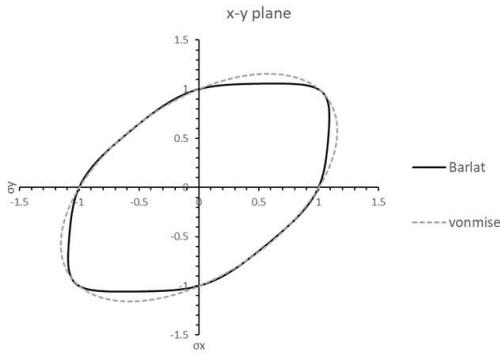


Figure 5. Yield locus comparison

图 5. 屈服轨迹对比

与常用 MAT24 各向同性材料模型相比, 使用 MAT133 屈服轨迹 (Barlat\_YLD2000) 能更好模拟铝合金材料的各向异性, 并且能够基于实际材料特性来修正不同应力状态下的材料初始屈服应力。图 5 为 Barlat\_YLD2000 和 vonMises 两种屈服轨迹的差异。

### 3.2 断裂失效曲线拟合

GISSMO 损伤模型是预测失效行为的可靠有效模型。它以非线性方式表征损伤累积过程, 并与多种材料模型兼容。GISSMO 模型包括断裂应变曲线、等效失稳应变曲线、非线性损伤累积和应力衰减四个关键条件, 其中断裂应变曲线和失稳应变曲线与应力三轴度相关, 能较为准确的预测材料在不同受力状态下的裂纹生成和扩展过程, 其应力三轴度表达式如下

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (2)$$

其中  $\eta$  是应力三轴度,  $\sigma_m$  为三个方向主应力的平均值,  $\sigma_e$  为等效应力。 $\sigma_m$  和  $\sigma_e$  的表达公式如下

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (4)$$

基于六组实验样件尺寸和边界条件搭建仿真数值模型, 弹塑性参数使用标定好的硬化曲线和屈服面, 在不考虑断裂失效模型的情况下进行仿真模拟, 并根据六组实验的断裂位移, 在仿真结果中提取相同位移下单元的等效失效应变以及应力三轴度, 具体数值如表 2 所示。

Table 2. Failure strain and stress triaxiality  
表 2. 失效应变和应力三轴度

试验类型	应力三轴度	等效塑性应变
单轴拉伸	0.473	0.863
圆孔	0.345	1.38
缺口	0.545	0.495
剪切	0.04	1.94
三点弯曲	0.614	0.514
穿孔	0.666	1.33

基于不同应力状态下的材料的断裂应变，结合 CrachFEM 失效准则的剪切断裂失效模型，对 GISSMO 失效曲线进行拟合。剪切断裂失效函数公式如下

$$\varepsilon_{eq}^{**} = \frac{\varepsilon_{sf}^+ \cdot \sinh(f \cdot (\theta^- - \theta)) + \varepsilon_{sf}^- \cdot \sinh(f \cdot (\theta - \theta^+))}{\sinh(f \cdot (\theta^- - \theta^+))} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1 - k_{sf} \cdot \eta}{w} \quad (6)$$

$$w = \frac{\tau_{max}}{\sigma_M} \quad (7)$$

其中  $\varepsilon_{sf}^+$  为双轴拉伸状态下的断裂应变， $\varepsilon_{sf}^-$  为双轴压缩状态下的断裂应变， $f$  为待定系数， $k_{sf}$  为三轴度权重系数。基于表 2 中不同应力状态所对应的断裂应变为目标函数，通过规划求解，迭代优化获取三轴度-等效塑性应变曲线，即断裂失效曲线，如图 6 所示。

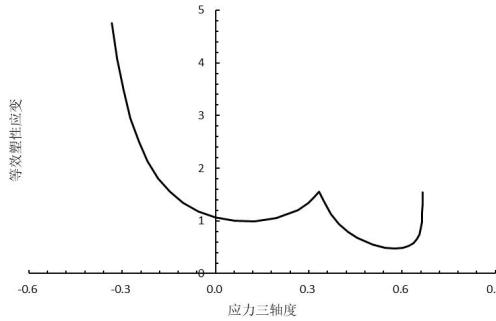


Figure 6. Fracture limit curve

图 6. 断裂失效曲线

### 3.3 极限失稳曲线拟合

塑性失稳（即颈缩）准则用于预测金属材料在拉伸载荷下的颈缩和失稳，对于颈缩风险的评估通常使用成形极限图（FLD）进行，在 FLD 中，主应变空间中的极限曲线称为成形极限曲线（FLC），表示与颈缩失稳相关的允许应变的上限。对于临界应变与应力三轴度的失稳曲线，目前还没有明确的表征方法，本文基于 CrachFEM 失效准则的 Crach 核心算法，通过对材料塑性硬化、各向异性、以及应变率相关性的分析描述来逆向计算出材料的 FLC 曲线，其表达式如下

$$\alpha = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \quad (8)$$

$$\varepsilon_M^{FLC} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{(0)} \cdot \sqrt{1 + k_1 \cdot \alpha + (k_1 \cdot \alpha)^2}}{1 + k_1 \cdot \alpha} & \alpha \leq 0 \text{ (left branch)} \\ \varepsilon_{(0)} + (k_2 - \varepsilon_{(0)}) \cdot \alpha^{\frac{3}{2}} + (\varepsilon_{(1)} - k_2) \cdot \alpha^2 & \alpha > 0 \text{ (right branch)} \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{1 + \alpha}{\sqrt{3(1 + \alpha + \alpha^2)}} \quad (10)$$

其中， $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  是主应变和次应变， $\alpha$  是用于评估应力状态的主应变比。 $\varepsilon_{(0)}$  和  $\varepsilon_{(1)}$  分别表示平面应变拉伸 ( $\alpha = 0$ ) 和等轴拉伸 ( $\alpha = 1$ ) 的应变极限值。 $k_1$  和  $k_2$  是拟合曲线的系数。 $\eta$  是应力三轴度，平面应变状态 ( $\alpha = 0$ ) 时  $\eta$  为 0.577，双轴拉伸状态 ( $\alpha = 1$ ) 时  $\eta$  为 0.667，剪切状态 ( $\alpha = -1$ ) 时  $\eta$  为 0，单轴状态 ( $\alpha = -0.5$ ) 时  $\eta$  为 0.333。图 7 为临界失稳应变和三轴度关系曲线。

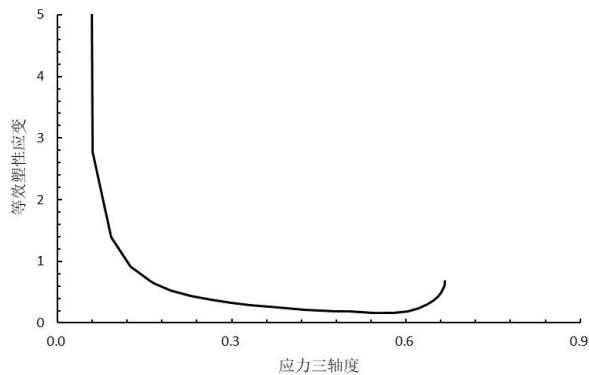


Figure 7. Instability limit curve

图 7. 临界失稳曲线

### 3.4 网格尺寸和应变率对材料断裂失效的影响

当前,有限元计算以连续体理论为基础,该理论假定每个材料点均处于无限小的状态。在有限元模拟实践中,这一理想状态难以实现,导致了网格依赖性问题。通常而言,单元尺寸越小,模拟的精确度越高。当单元尺寸过小时,其对精度的提升作用趋于饱和,但计算成本却会急剧上升。为确保计算结果的准确性,对模型进行网格灵敏度分析显得尤为重要。在 LS-DYNA 中,通过引入网格尺寸与断裂失效曲线缩放系数的关系曲线,根据单元尺寸的变化来修正断裂应变值,降低模拟误差。分别采用 1mm、2mm、4mm 和 6mm 的单元尺寸进行了单轴拉伸模拟。我们在模拟过程中设定了初始的韧性缩放因子以捕捉力-位移数据。通过逆向迭代优化方法调整因子,使得力-位移数据与 2mm 单元尺寸下的情况保持一致。最终获得网格正则化曲线,即单元尺寸缩放因子与单元尺寸之间的关系曲线,如图 8 所示。

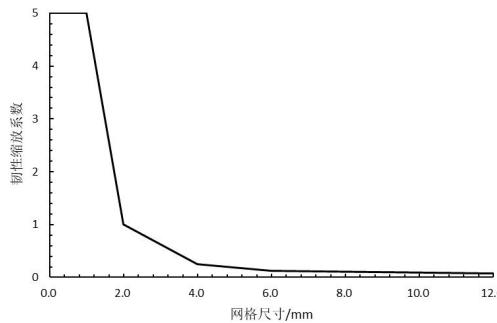


Figure 8. Scaling factor for mesh sizing and failure strain

图 8. 网格尺寸和失效应变缩放系数

铝合金的断裂失效与应变率存在较为明显的相关性。当应变率不同时,材料的相应断裂破坏应变也不同。为了减小模拟误差,需要考虑应变率对失效应变的影响。利用两组不同速度下的缺口拉伸试验,将模拟结果和实验进行比较,得到了应变率标度因子与应变率的关系曲线,如图 9 所示。

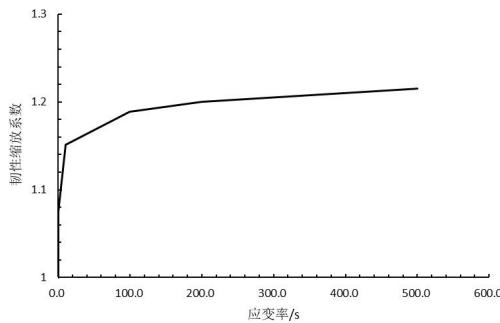
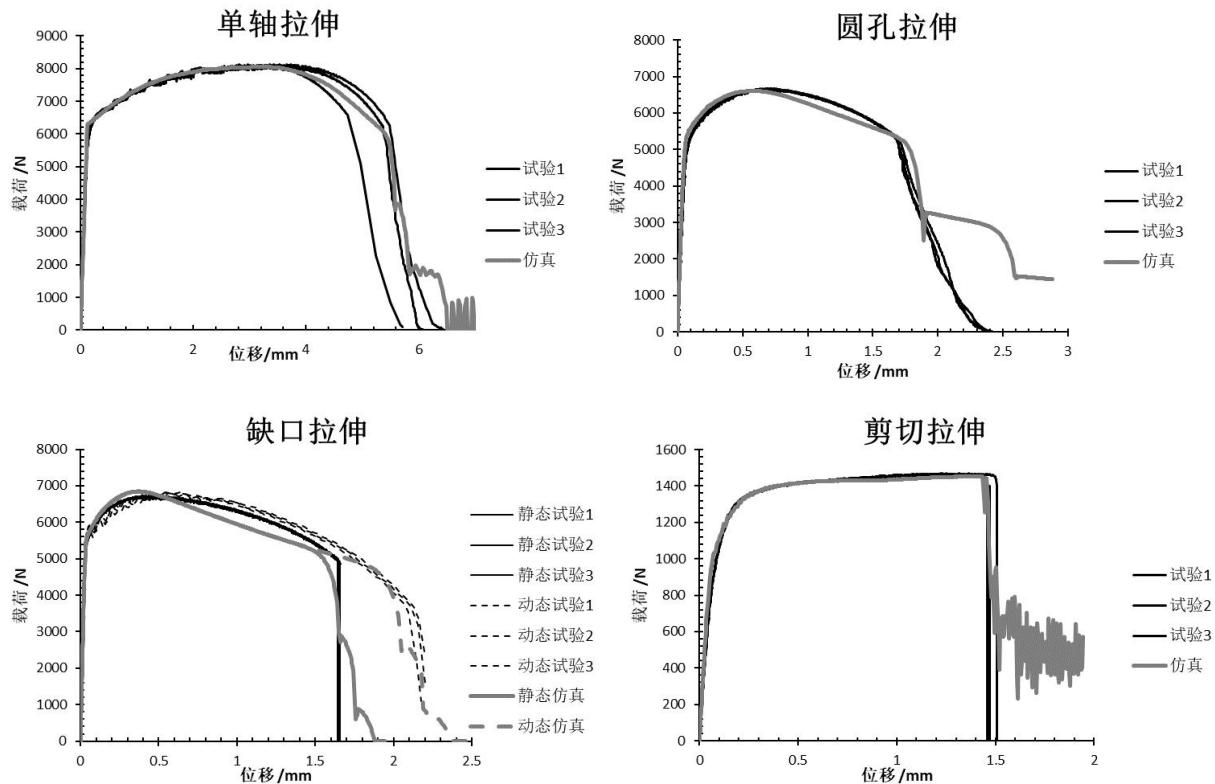


Figure 9. Scaling factor for strain rate and failure strain

图 9. 应变率和失效应变缩放系数

### 3.5 封板 GISSMO 材料卡片标定

基于 MAT133 弹塑性本构和 GISSMO 失效参数, 预测不同应力状态下材料的变形及失效模式, 如图 10 所示, 标定结果表明仿真与实验的力-位移曲线重合度较高, 验证了 GISSMO 失效参数的准确性。



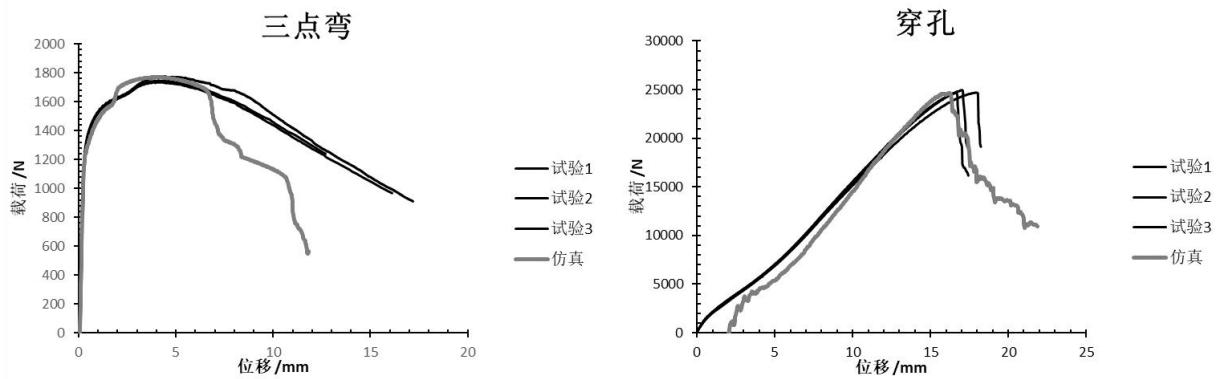


Figure 10. Material tests and simulation calibration results

图 10. 材料级试验和仿真标定结果

## 4 MPDB 动态台车仿真验证

### 4.1 动态台车对标工况

参考 Euro-NCAP TB-022-v12 版本规程进行标准动态 Tube 冲击试验和仿真，评价基于 GISSMO 失效模拟的铝合金封板对整个 MPDB 壁障模型的精度改进效果。试验和仿真中，壁障（包括台车）的总质量为 1400kg，壁障的重心位置在壁障中心线，距离台车前轮轴 950mm，离地高度 500mm。圆管横梁的尺寸和摆放根据法规要求设定，测试速度为 60km/h。图 11 为 MPDB 标定工况中 MPDB 壁障模型和 Tube 圆管的相对位置图。

MPDB 壁障模型基于 LS-DYNA R7.1.2 版本开发，模型共 51 万单元。结构主要包括蜂窝铝和封板两个部分，原有模型中封板材料使用 MAT24 加常应变失效的设置，经过多轮标定后失效应变定义为 0.1。同时使用本文开发的 MAT133+GISSMO 的封板材料卡片进行应用，对比分析其对 MPDB 壁障模型的精度改进。

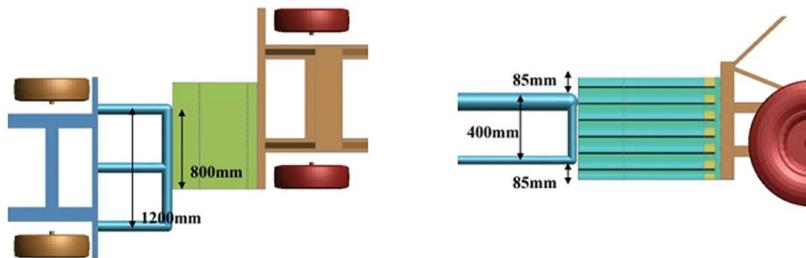


Figure 11. Relative position for calibration loadcase

图 11. 标定工况的相对位置图

### 4.3 结果对比

图 12 为封板常应变失效定义、封板 GISSMO 失效定义和 MPDB 标定工况试验后的壁障变形情况对比。图 13 为相应的载荷力-位移曲线，其中两条斜线为标准规定的 Tube 动态标定工况下 MPDB 壁障模型的载荷力上下限，不管是常应变失效还是 GISSMO 失效，其载荷力-位移曲线都落在区间带宽内，模型均满足规范要求。



Figure 12. Barrier deformation comparison

图 12. 壁障变形对比

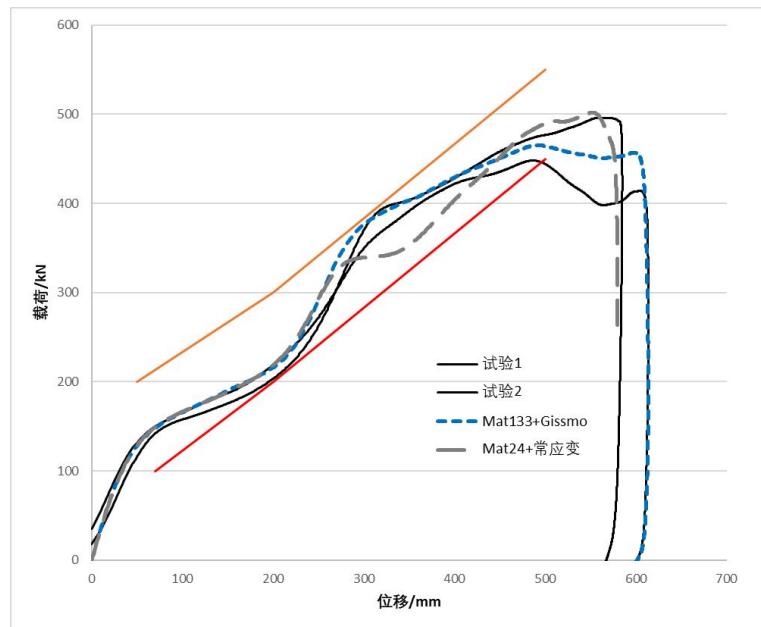


Figure 13. Force-displacement curves for dynamic tube crash

图 13. 动态 Tube 工况的载荷力-位移曲线

对比图 13 曲线趋势，我们发现壁障变形量在 260mm 前，常应变失效和 GISSMO 失效的仿真结果基本一致，并且与试验数据吻合度很高，此时前封板有明显大变形但均未发生材料破坏失效。在 265mm 时，常应变模型封板有破坏发生，造成载荷力下降，与两次试验的载荷力有明显的差别，也就是常应变定义相比于实际试验会提前失效，使得壁障偏软进而影响 MPDB 整车仿真精度。但 GISSMO 模型封板此刻未出现失效，力值继续上升，与试验曲线更加贴合，当侵入位移达到 303mm 时 GISSMO 模型内板有撕裂发生。当位移量达到 500mm 时 GISSMO 模型的载荷力下降，其最终的变形和失效模式与试验更为接近。

通过引入更高精度的 GISSMO 材料失效模型，能够更好的模拟 MPDB 壁障封板在受到冲击载荷下的大变形和失效预测，可以进一步提升 MPDB 壁障模型的模拟精度。

## 5 结论

- 1) MPDB 壁障封板的模拟准确性对模型的精度有一定程度的影响，且不同区域壁障封板在碰撞过程中所受到的应力状态的不相同，建议选择更加复杂且精确的材料模型进行表征；
- 2) 基于 CrashFEM 模型的剪切失效准则和颈缩失稳准则能够对铝合金封板系统化试验数据进行参数拟合，得到相对准确的 GISSMO 模型的失效参数，材料级仿真标定验证了 GISSMO 材料卡片的可靠性；

- 3) MPDB 标准 Tube 动态工况的仿真对比表面, GISSMO 模型可以更好的表征封板在不同形式冲击载荷下的变形和失效预测, 比传统常应变失效模拟更优, 尤其在壁障变形量处于 300-400mm 阶段的刚度表征更为准确, 提升 MPDB 壁障模型精度的同时也可以提升整车仿真结果的可信度。

## 参考文献 (References)

- [1] 张瑞雨, 马春生, 许述财, 等. 有质量差异的辆车碰撞时车辆前端刚度的相容性匹配[J]. 汽车安全与节能学报, 2018,9(3):295-302.
- [2] 郑捷, 彭炫权, 杨军, 等. MPDB 工况下碰撞兼容性的基本问题与车体设计原则[J]. 中国公路学报, 2022,35(4): 313-324.
- [3] Zobel R, Schwarz T. Development of Criteria and Standards for Vehicle Compatibility[J]. SAE Technical Paper 2001-06-0060.
- [4] 宋和平, 徐伟涛, 刘广喜, 等. 一种针对 C-NCAP 中 MPDB 工况碰撞兼容性的优化方法[J]. 汽车工况, 2021, 43(1):94-98,112.
- [5] 白中浩, 郭厚锐, 白芳华, 等. 偏置可变形壁障及其有限元模型的开发与验证[J]. 汽车安全与节能学报, 2014,5(3):276-281.
- [6] Robert R. Mayer, Qing Zhou. Characterization of Aluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear, and Tearing[J]. Journal of Engineering Materials & Technology. 2002, 124(4).
- [7] 唐人寰, 纪铮, 梁枫, 等. 基于 GISSMO 失效模型的动力电池包底部碰撞仿真分析[J]. 北京汽车, 2024(4):17-21.
- [8] 夏卿, 杨云, 张永学. 基于 GISSMO 失效准则的 1500 Mpa 热成形钢断裂失效模型分析[J]. 塑性工程学报, 2024,31(9):207-214.
- [9] 陈自凯, 张骥超, 徐晨阳. 考虑成形损伤的 DP980 钢板 GISSMO 失效模型开发及试验验证[J]. 锻压技术, 2022,47(4):110-118.
- [10] 戴明华, 胡平, 盈亮, 等. 考虑损伤的热成形淬硬硼钢失效行为建模研究[J]. 机械工程学报, 2024,60(6):216-226.
- [11] JING GUO, HONGLIANG LIU, XIAODONG LI, et al. Fracture Behavior of the Hot-Stamped PHS2000 Steel Based on GISSMO Failure Model[J]. Metals, 2023, 13(8).
- [12] A. HEATH, H. GESE, G. OBERHOFER, et al. Modeling Failure For Nonlinear Strain Paths With CrashFEM[C]. //NUMISHEET 2014: The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Part B: Melbourne (AU). 6-10 January 2014.:Curran Associates, Inc., 2014:587-590.
- [13] DUC-TOAN NGUYEN, VAN-CANH TONG. A numerical and experimental study on the hold-edge conditions and hole-expansion ratio of hole-blanking and hole-expansion tests for ferrite bainite steel (FB590) sheets[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(8):986-994.
- [14] 李伟, 郑颢, 刘彦梅, 等. 汽车副车架安装螺栓碰撞断裂的数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2022,33(19):2388-2393.
- [15] 郑颢, 欧阳俊, 王玉超, 等. 考虑焊接热影响区的 DP590 高强钢焊点碰撞失效模拟[J]. 机械工程材料, 2021, 45(7):57-62,68.
- [16] 崖文瀚, 曾逸如, 贾丽刚, 等. 某微型电动车侧碰条件下的 B 柱轻量化研究[J]. 汽车零部件, 2024(1):62-65.