

基于 LS-DYNA 和 CrachFem 材料的碰撞分析轮辋模型对标研究

王鹏翔，杨洪，廖慧红，黄卫，丁智

(宁波吉利汽车研究开发有限公司，宁波，315336)

摘要：在整车碰撞尤其是小偏置碰撞过程中，轮辋刚度对碰撞结果的影响非常大，因此准确可靠的轮辋模型会极大提升整车碰撞的仿真精度。而轮辋仿真的精确程度取决于建模方式和材料。此处基于 LS-DYNA 和 CrachFEM 材料模型，首先根据轮辋静压试验方案搭建轮辋有限元模型，提取仿真过程中压板与轮辋之间的位移-载荷曲线，接着将仿真结果与试验结果进行比较，获得基础的结果。最后分析产生差异的原因并修正有限元材料参数，得到轮辋最终精确仿真模型。

关键词：碰撞；仿真轮辋模型；位移-载荷曲线；LS-DYNA；

据统计，小偏置碰撞人员死亡事故约占正面碰撞死亡事故的 25%^[1]。CAE 仿真过程中，所采用轮辋的材料参数与真实的样件可能存在较大差别，这就会影响到轮胎的刚度，从而降低小偏置碰撞的仿真精度。

因而本文基于 CrachFem 材料，建立轮辋有限元模型，进行轮辋静压试验的仿真对标研究，并通过修正材料参数，得到真实有效的轮辋材料参数。

1 CrachFEM 失效模型

1.1 材料卡片

图 1 所示为 LS-DYNA 用户自定义材料卡片^[2]

```

*MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS_TITLE
$
MP GenYld + CrachFEM: AlMeNo Example
MID      RHO      RT      LMC      RHV      IORTHO    IS      IS
0        2.8e-09  48      40      95      1         11
IVEC     IPAIL    ITHRMAL  IHYPFR  IED3
1        1        0        0        0
ADPT     VAXC     XP      YP      ZP      A1        A2
2        0.0      0.0      0.0      0.0      1.0      0.0
V1       V2       V3      D1      D2      D3      BETA
0.0      0.0      0.0      1.0      0.0      0.0
FRELIM   DTMIN    NF      VELSC
1.0      50      1.0
-----
70000.0  0.3  58333.3  26923.1  0.8333
PL_HARDE PL_ORTHO PL_ISKIN PL_ASYMM PL_WAIST PL_BIAXF PL_COMPR PL_DAMA
1001     2020  2023
NF_CURVE NF_PARAM NF_PCRIIT SF_CURVE SF_PARAM SF_PCRIIT NF_ORTHO SF_ORTHO
6001     6002  7001  7002
CR_HARDE CR_ORTHO CR_ISKIN CR_PCRIIT CR_PARAM CR_CHECK GL_PARAM USERINI
9004     9007  9008  9010
    
```

图 1 材料参数

Fig. 1 Material parameter

材料卡片中 1-2 行为 Dyna UMAT 自定义参数项；3-4 行为材料正交异性定义项；5-9 行为 CrachFEM 参数项。在后期的对标过程中，主要是调整 5-9 行的参数。本文中的 crachfem 材料卡片基于 LS-DYNA 开发。

1.2 失效

现在比较常见的失效准则往往是从单方面评判材料失效，而这种评判方法比较简单而且准确程度不高，而 CrachFEM 材料提供了几种静拉失效模型和剪切失效模型，在此只罗列了一种静拉失效。在仿真计

算过程中，会自动选取其中最优的失效模型进行模拟。

比较常见、简单的失效准则：

应力准则：

- 最大静水压力准则： $P \geq P_{max}$; (1)

- 最小静水压力准则： $p \leq P_{min}$; (2)

- 最大第一主应力准则： $\sigma_1 \geq \sigma_{max}$; (3)

应变准则：

- 最小主应变准则： $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{min}$; (4)

- 最大主应变准则： $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{max}$; (5)

- 最大剪应变准则： $\gamma_1 \geq \gamma_{max}$; (6)

CrachFEM 材料静拉失效：

$$\varepsilon_{eq}^{**} = \frac{\varepsilon_{SF}^+ \cdot \sinh(c \cdot (\eta^- - \eta)) + \varepsilon_{NF}^- \cdot \sinh(c \cdot (\eta - \eta^+))}{\sinh(c \cdot (\eta^- - \eta^+))} \quad (7)$$

式中： ε_{SF}^+ 为单轴静拉时的失效应变； ε_{NF}^- 为单轴压缩时的失效应变； c 为系数， h 为系数； η 为应力三轴度；

2 轮辋静压试验

为了获取比较真实可靠的仿真模型参数，进行了轮辋的静压试验，以获取位移-载荷曲线和轮辋的失效形式。

2.1 静压试验

如图 2 所示为轮辋的样件图。挤压设备为 200KN 压力机。



图 2 轮辋样件

Fig. 2 Rim samples

首先将轮辋水平放置在压力机上，如图 3 所示。用一平整压头沿垂直方向以 200mm/min 恒定速度向下挤压轮辋区域，至轮辋破坏，破坏后继续下压 20mm，停止加载，试验结束。压头的尺寸为长 450mm，宽 250mm，高 30mm。压板的中心应与轮辋中心在同一竖直方向。



图 3 轮辋位置

Fig. 3 Rim position

试验输出物的完整性和准确性是后期对标的关键，试验条件的一致性又是试验输出物一致性的关键，因此在试验过程中一定要确保每组试验的一致性。

2.2 试验结果

试验共进行了三组，在保证三组试验一致性的情况下得到三组试验数据，如图 4。

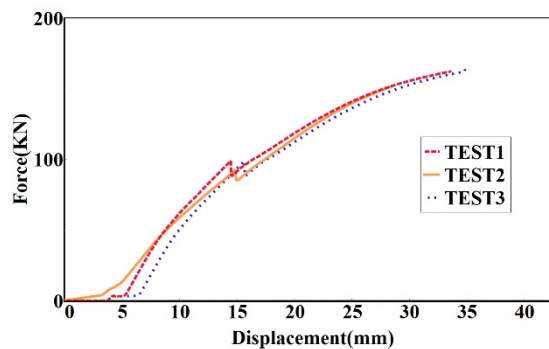


图 4 试验曲线

Fig. 4 Experiment curves

如图 4 所示，三组试验曲线一致性较好，无论是轮辋被挤压的弹性阶段，塑性阶段还是破坏阶段，试验结果吻合程度比较高，因而可以用于后期的仿真对标工作。

根据试验曲线可以看出，加载 15mm 左右时会出现力的卸载情况，之后力继续增加，最大载荷出现在 33mm 左右。再继续挤压，轮辋出现了非常大的开裂，试验停止。

最终的挤压破坏情况如图 5 所示。通过比较三组试验最后样件的破坏情况。可以发现，最终的破坏区域都是轮毂和轮辋的链接区域。



图 5 最终状态
Fig. 5 The last state

3 基于 LS-DYNA 有限元仿真对标

轮辋静压试验包括轮辋、固定装置和试验设备，因而基于 LS-DYNA 和 CrachFEM 材料卡片建立轮辋仿真模型，建立轮辋和试验设备之间的接触以及轮辋的约束，对比试验结果与仿真结果的差异，修正材料的参数，获取真实的轮辋材料参数。

3.1 模型建立

起始分析时，轮圈和轮毂材料保持了一致。由于实验过程中轮辋与压头接触，因而将轮辋的网格进行细化，采用四面体单元，材料选用铝材料，最终轮辋的有限元模型如图 6 所示。



图 6 优化前轮辋仿真模型
Fig. 6 Simulation model of the rim before optimize

将压板简化为刚性板，如图 7 所示，尺寸与试验保持一致。压力机压头只允许竖直方向运动，使轮辋在竖直方向挤压运动，而不发任何转动。

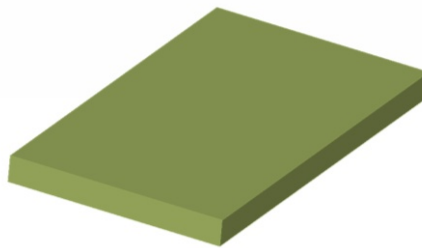


图 7 压力机仿真模型
Fig. 7 Simulation model of the extruder

在试验过程中，轮辋处于自由状态，没有发生移动，因而在仿真过程中采用与试验相同的方式，轮辋处于自由状态。

3.2 仿真结果

仿真过程中轮辋直接采用 CrachFEM 材料库中的轮辋材料；而试验过程中压板没有发生任何变形因此压力机平板材料采用刚性材料，获得现有材料参数的仿真基础结果。图 8 所示为位移-载荷曲线；图 9 为轮辋破坏情况。

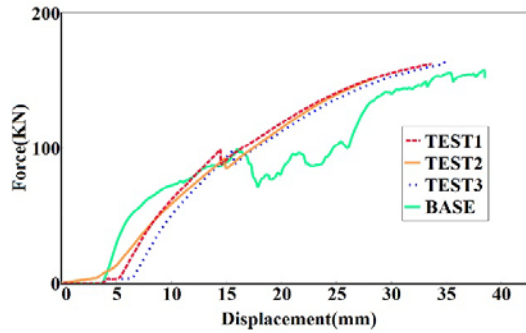


图 8 位移-载荷曲线

Fig. 8 Displacement-Force curve



图 9 优化前轮辋失效

Fig. 9 The failure of rim before optimize

在对现有材料修正前，仿真的位移-载荷曲线与试验吻合程度不高，结果差别主要表现在 15mm 前后。15mm 以前，载荷上升比较快而 15mm 以后载荷又比试验小。根据图 9 所示，压板移动 15mm 时轮辋的破坏情况。轮辐在 15mm 左右开始发生失效，载荷有所下降，而试验过程中并没有发生破坏情况，因而优化的方向是降低初段载荷提升后段载荷。

3.3 对标优化

根据测试真实的轮辋刚度发现，轮毂的刚度要比轮圈的硬度大很多，因而通过将两者设置为相同的材料显然与实际情况不符，所以将轮毂和轮圈的材料分开考虑，如图 10 所示，对标过程中分别修改两个的材料参数。



图 10 优化后轮辋模型

Fig. 10 The model of rim after optimize

图 1 为轮辋 CrachFEM 材料参数卡片，卡片中包括材料的密度、杨氏模量、硬化曲线、失效曲线等等。针对现有材料仿真结果出现的问题：轮毂材料失效破坏时刻过早，这就造成了位移量 15mm 以后的载荷下降过快，因而修正材料中的失效参数。

通过试验与仿真比较，提升轮毂材料曲线中的参数，输出位移-载荷曲线，如图 11。

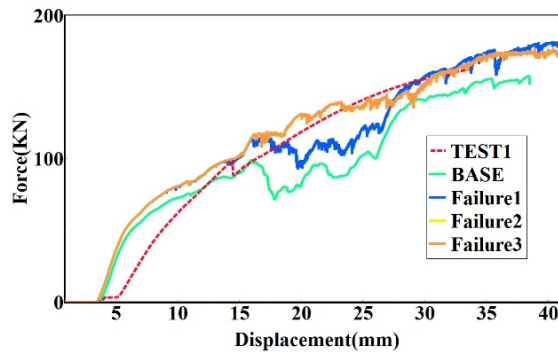


图 11 位移-载荷曲线

Fig. 11 Displacement-Force curve

根据图 11 所示，提升轮毂材料的失效参数可以有效的防止材料失效，提升材料的刚度。failure2 中的参数为 failure1 中的 1.5 倍，failure3 中的参数是 failure2 中的 1.5 倍。从曲线可以看出曲线 failure2 和 failure3 时 15mm 以后的曲线拟合程度比较高。曲线 failure2 和曲线 failure3 重合，说明曲线参数增加到一定程度时，单纯的修正材料中的失效参数已经不是决定载荷的关键。通过试验与新仿真结果比较，选取曲线 failure2 的参数进行继续修正。

通过分析尝试得到，引起初段载荷上升过快的原因是工装刚度不足，试验过程中工装产生变形，因而在挤压板上建立一弹簧单元，并调节其变形刚度，以模拟压板的变形如图 12。

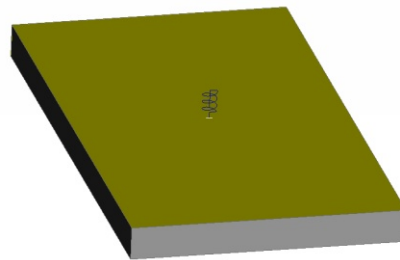


图 12 压板模型

Fig. 12 The model of the plate

修改弹簧的刚度，选取了几组不同数值进行研究。输出位移-载荷曲线与试验和 BASE 结果进行比较，如图 13 所示。

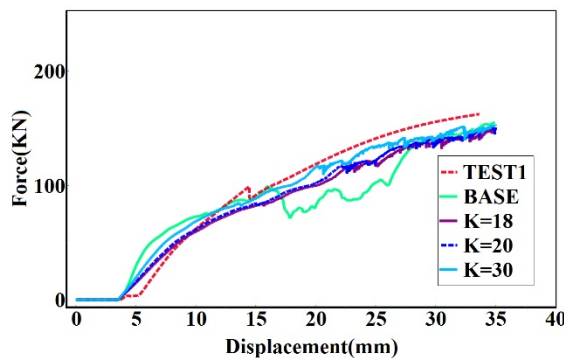


图 13 位移-载荷曲线

Fig. 13 Displacement-Force curve

相比所有的弹簧刚度 K 值，K 为 18 时，可以有效的消除工装刚度对试验的影响。但由于初段载荷的降低造成了后段载荷也比试验低，因而提升材料的硬化曲线。

根据位移-载荷曲线，提高轮毂材料参数，轮圈材料不变获得最终的位移-载荷曲线，如图 14。

虽然初段载荷与试验还是有点差别，但最终拟合出的位移-载荷曲线与试验的结果吻合程度比高。通过上面一系列的分析就获得了真实的材料参数和力学性能。通过参数的修正可以有效的提升碰撞仿真的精度，为以后整车碰撞中轮辋的仿真材料提供一定的参考。

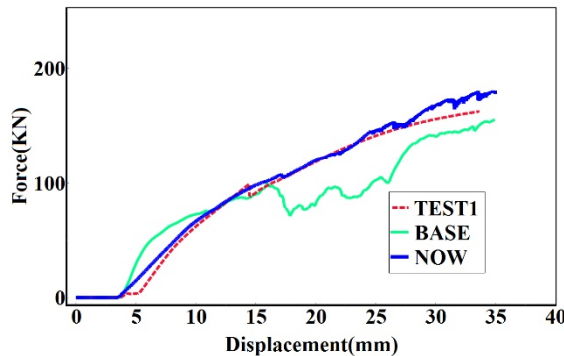


图 14 位移-载荷曲线

Fig. 14 Displacement-Force curve

4 总结

通过本文的分析，可以为整车碰撞中轮辋的材料问题提供一定的参考，具体内容小结如下：

- a) 基于 LS-DYNA 开发 Crachfem 材料卡片，介绍了 CrachFem 材料失效模型，列出了一种材料在计算过程中的静拉失效模型。
- b) 传统的轮辋建模方式只是单纯的将轮辋附一个材料，但是根据试验轮毂比轮圈的刚度要大很多，本文将轮毂和轮圈分开考虑，并分别修正参数，获得比较可靠的轮辋材料参数。
- c) 基于 LS-DYNA，通过对比试验和仿真曲线，分析出造成两者之间差异的原因在于材料参数中的硬化参数、失效参数和试验设备刚度。优化各个材料参数，修正出贴近实际的材料。

References:

- [1] Sherwood C P, Nolan J M, Zuby D S. Characteristics of Small Overlap Crashes[C]//Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhance Safety of Vehicles. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2009:1-7.
- [2] MFGenYld_CrachFEM_430_Users_Manual_LS-Dyna.

Abstract

In the process of vehicle crash especially in small offset crash, the stiffness of rim has big influence, so reliable rim will improve the simulation accuracy. So the accurate simulation of rim depend on modeling method and material. The material of rim use CrachFem and the software use LS-DYNA. First based on the test of rim static pressure, modeled the finite-element of rim a. Secondly extracted the curve of displacement-force between plate and rim, obtained the base result. Last analyzed the reason of difference curve, revised material parameter, obtained the real simulation model.