

Research of Simulation and Experimental on the Junction Failure of Front Subframe Based on Crach FEM

Yingjun ZHANG¹,JingangXU², Linbo ZHANG³,Ximing WANG⁴,Yong XIAO⁵,Feng PAN⁶

¹Advanced Engineering & Core Technology, Chery automobile Co.,Ltd.Wuhu,Chin, 241009

²shanghai shareFEA Engineering Technology Co.,Ltd .Shanghai 20110)

Emial: zhangyingjun1@mychery.com, feng.pan@sharefea.com

Abstract:A crash deceleration pulse with a late high peak is a common problem in automobile front impact. The front subframe shedding from body in white(BIW) in front impact can increase the vehicle crush space, thus a relatively low vehicle deceleration pulse is achieved, which is of great importance to passive safety. By using front subframe load characteristics gotten by automobile front impact simulation with LS-dyna, a original design of the front subframe shedding mechanism and component testing scheme are proposed. Then, CrachFEM fracture model is used to carry out the tensile simulation, specially considering the influence of heat affected zone(HAZ) between the welding nut and metal sheet bracket. Comparison of results between quasi-static tensile tests and simulation shows that CrachFEM fracture model can accurately reproduce the metal sheet-tearing process mechanism of the front subframe shedding from BIW, the prediction error is less than 10% in fracture load amplitude, which is a good idea and method to simulate the failure of similar structure in automobile design.

Keywords: front subframe;failuresimulation;metalsheet-tearing;heat affected zone(HAZ);crachFEM;

基于 CrachFEM 的前副车架连接点失效仿真与试验的研究

张迎军¹, 涂金刚², 张林波³, 王锡铭⁴, 肖勇⁵, 潘锋⁶

¹预研和基础技术研究院, 奇瑞汽车股份有限公司, 芜湖, 241009

²上海迅仿工程技术有限公司,上海, 201100

Emial: zhangyingjun1@mychery.com, feng.pan@sharefea.com

摘要:在汽车前部碰撞中加速度高是一个普遍存在的问题。若在碰撞中有效控制前副车架脱落则能间接增加碰撞空间,从而降低整车加速度,对被动安全开发具有重要意义。本文从 LS-DYNA 整车前部碰撞模拟结果中提取前副车架载荷特性,独创性设计了前副车架脱落方式及零部件试验方案,并采用 CrachFEM 失效模型进行仿真分析。仿真中特别考虑了凸焊螺母与连接支架焊接的热影响区效应,通过拉伸试验和仿真结果对比发现,CrachFEM 失效模型能准确再现前副车架脱落结构的钣金撕裂过程,失效载荷幅值预测误差控制在 10% 以内,为汽车类似结构失效设计提供一种很好的思路和仿真方法。

关键词: 前副车架;失效仿真;钣金撕裂;热影响区;CrachFEM;

1.引言

当前,国内在售主流家用轿车一般采用前置前驱的动力总成布置形式,在应对日趋严格的碰撞安全法规和标准时,由于前部高速碰撞发生时前舱可供变形吸能的有效空间(简称“碰撞空间”)不足,常常表现为整车加速度后段均值偏高,乘员伤害值偏大,从而给新车型安全 C-NCAP 五星级开发目标的实现带来很大挑战。

汽车设计师一方面竭力优化总布置方案,希望能尽可能多的争取“碰撞空间”;另一方面,通过悉心构思的结构设计,使得某些刚度较大(如前副车架、动力总成)的零部件能够在碰撞过程中适时脱落,从而有效增大

实际“碰撞空间”。

基于钣金撕裂方案的前副车架脱落结构开发正是基于上述第二种思路，通过将副车架与车身的连接部件设计成在特定受力条件下可以自行脱落的方式，使得前碰发生时，前副车架从车身的安装支架脱落之后，因自身重力的作用而向下移动，同时带动与之相连的动力总成系统下沉，实质上增大了在前碰过程中的前纵梁的压溃空间，从而实现加速度峰值的有效降低。

本文通过完善的材料属性和韧性断裂试验获得 DP590 钢板的材料力学性能，基于 CrachFEM 失效模型建立用户自定义材料模型^[1,2]，然后通过准静态角度拉伸试验证明该材料模型用于双相钢板的断裂过程及结果预测的有效性。

2.DP 钢材料力学性能相关试验

本文以厚度为 2.0mm 的 DP590 为例，其准静态单轴拉伸下材料基本力学性能和工程应力-应变曲线如图 1 所示，其中，屈服强度为 390Mpa，抗拉强度 659Mpa，均匀延伸率（颈缩点对应的工程应变）为 17.0%，断后延伸率为 26%。

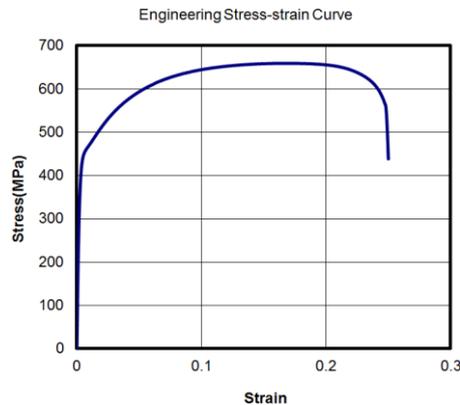


Figure 1.The quasi-static uniaxial tensile test of DP590 material
图 1.DP590 材料的准静态单轴拉伸力学试验

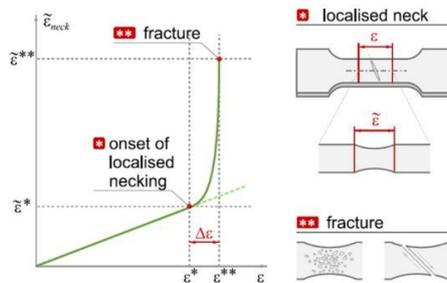


Figure 2. Schematic diagram of strain under the condition of neck contraction and fracture
图 2.颈缩与断裂状态下应变示意图

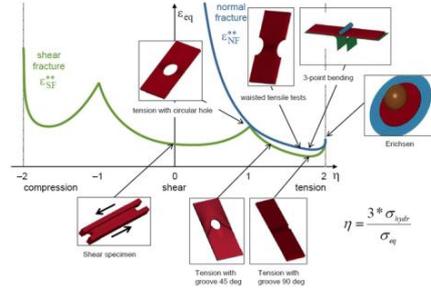


Figure 3. Fracture failure strain correlation tes
图 3. 断裂失效应变相关试验

直接使用标准单轴拉伸的断裂延伸率（26%）来评价材料失效的传统方法会使碰撞断裂预测结果不可靠，并且会导致过于保守的设计。单轴拉伸的均匀延伸率由材料的应变硬化来控制，并非衡量材料韧性的指标。同样，断裂延伸率也不能作为衡量材料的韧性指标，断裂位置的应变通常远高于断裂延伸率，如图 2 所示。颈缩发生到断裂过程中全局的断裂延伸率变化并不明显（x 轴），但颈缩区域的局部应变将会急剧上升（y 轴）。

金属材料的断裂极限应变依赖于局部应力状态，可以用主应变比 α 来描述，描述材料在不同应力状态下的失效应变。主流的韧性失效模型有 Johnson-Cook 模型、最大剪切应力模型、Xue-Wierzbicki 模型和 CrachFEM 模型，其中 CrachFEM 模型把失效分为韧性剪切失效和韧性正向失效。为了获得材料在不同应变比下的极限失效应变，需要进行材料力学试验，基于典型试验数据拟合断裂极限曲线。CrachFEM 失效模型可以有效减少材料试验类型与数量，只需要 6 种类型试验即可完整描述材料的正向失效和剪切失效曲线，包括杯突试验和圆孔样条试验、缺口样条试验、直角开槽样条试验、斜 45 度角圆孔开槽样条试验、剪切试验，如图 3 所示，其中失效应变通过厚度变化和 GOM Aramis 软件系统测量。表 1 为 6 种类型试验下的试验类型与应力应变状态参数的对应关系，

中主应变比 α 和应力三轴度 η 定义为：

$$\alpha = \dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2 (1)$$

$$\eta = -3 \cdot \frac{p}{\sigma_M} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_M (2)$$

Table 1. Correspondence between test types and stress - strain state parameters

表 1 试验类型与应力应变状态参数的对应关系

试验类型	主应变比 α	应力三轴度 η
杯突试验 (Erichsen)	1	2
圆孔样条试验	-0.5	1
缺口样条试验	0	$\sqrt{3}$
直角开槽样条试验	0	$\sqrt{3}$
斜 45 度角圆孔开槽试验	-0.2	1.5
剪切试验	-1	0

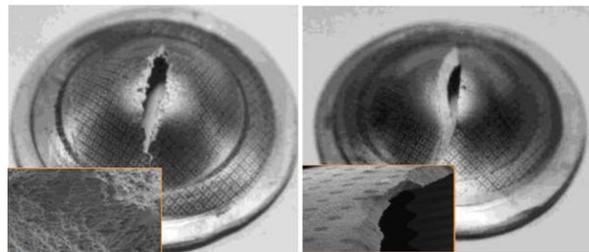
3. CrachFEM 材料失效模型

基于单轴拉伸试验和断裂失效试验，进行 CrachFEM 失效模型参数拟合。

3.1 CrachFEM 材料失效模型简介

CrachFEM 失效模型是用户自定义材料本构模型，可以与 LS-DYNA, ABAQUS, Radioss, Pam-crash 等非线性显示求解器结合使用。CrachFEM 采用模块化方式描述材料某一物理特性，模块彼此互相独立，可以根据材料的力学性能进行自由组合^[3]，包括：

- 丰富的屈服准则，如 Hill1948, Hill1990, Barlat1996, Barlat2000, Barlat-Lian1989, Barlat-Lege-Brem1991, Bron-Besson, Vegter 等;
- 随动硬化模型, Kinematic hardening model;
- 塑性硬化准则, 如 Swift, Voce (1), Voce (2), Ghosh, Hockett-Sherby, Hardening model for polymers 等, 也可以直接输入硬化曲线点;
- 动态应变率效应模型, 如 Constant strain-rate 模型, Cowper-Symonds, Polymer strain-rate 模型, Square strain-rate 模型等, 也可以直接输入不同应变率下的塑性硬化曲线;
- 可以考虑多阶段过程的材料非线性应变路径行为;
- 用于描述金属薄板断裂的成型极限曲线 (FLC) 与颈缩后模型;
- 面向 2D 壳单元和 3D 实体单元的断裂失效模型, 即应力三轴度 (或主应变比) 与失效应变关系曲线, 分为韧性正向断裂 (Ductile Normal Fracture, DNF) 和韧性剪切断裂 (Ductile Shear Fracture, DSF), 其中 DNF 为裂纹尖端张开产生的断裂, DSF 描述沿滑移面的剪切失效, 如下图 4 所示。



(a) DNF forward fracture (b) DSF shear fracture
(a) DNF 正向断裂 (b) DSF 剪切断裂

Figure 4. CrachFEM failure model
图 4. CrachFEM 失效模型

3.2 断裂极限曲线 (DNF, DSF) 拟合

平面应力状态下, 采用应力三轴度 η 描述单元应力状态具有唯一性。但三维应力状态下基于应力三轴度的正向断裂失效模型不再具备唯一性。为此, 引入应力状态参数 β , 与所有试验数值具有很好的一致性^[4]。参数与应力三轴度, 以及最大主应力与 von Mises 应力比 ν 相关。

$$\varepsilon_{eq}^{**} = d \cdot e^{q \cdot \beta} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1 - s_{NF} \eta}{\nu} \quad (4)$$

$$\eta = -3 * \frac{p}{\sigma_M}, \nu = \sigma_1 / \sigma_M \quad (5)$$

通过三组试验下的失效应编制, 可以拟合正向失效模型中的变量 d , q , s_{NF} 分别为 0.055、3.0、0.017。

剪切失效模型中也引入新应力状态参数 θ , θ 与应力三轴度 η , 以及最大剪切应力与 von mises 应力比 ω 相关。

$$\varepsilon_{eq}^{**} = \frac{\varepsilon_{SF}^+ \sinh(f(\theta - \theta^-)) + \varepsilon_{SF}^- \sinh(f(\theta^+ - \theta))}{\sinh(f(\theta^+ - \theta^-))} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1 - k_{SF} \eta}{\omega} \quad (7)$$

$$\eta = -3 * \frac{p}{\sigma_M}, \omega = \frac{\tau_{max}}{\sigma_M} \quad (8)$$

可见, 剪切失效模型中共有 4 个变量: ε_{SF}^+ , ε_{SF}^- , f 和 k_{SF} , 拟合值分别为 0.951、2.124、2.459、0.047。剪切失效曲线可以在 LS-DYNA 中定义如下, 并在用自定义材料模型对应的卡片位置应用 ID 号定义, 如:

```
*DEFINE_CURVE
```

8002

\$Ductile Shear Fracture

\$*SF Parameters(Rate 1:ev+,ev-,f,k)

1	-1
2	0.951
3	2.124
4	2.459
5	0.047

3.3 材料塑性硬化模型

DP590 材料在标准单轴拉伸试验下的工程应力-应变曲线，均匀延伸率为 17.0%，有限模拟中要求塑性硬化曲线为真实应力-真实应变曲线，颈缩点后的试验曲线则为无效，需要通过硬化准则对材料的塑性硬化行为进行外推。外推处理后的 DP590 材料的真实应力-真实应变曲线如图 5 所示。

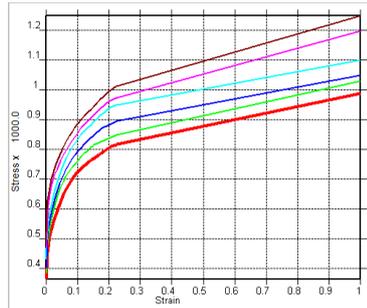


Figure 5. The extrapolated curve of DP590 material
图 5. P590 材料的外推曲线

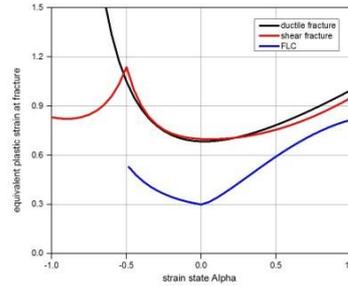


Figure 6. FLC and Two Fracture Failure Curves
图 6. FLC 与两种断裂失效曲线

3.4 DP590 材料成型极限曲线 FLC

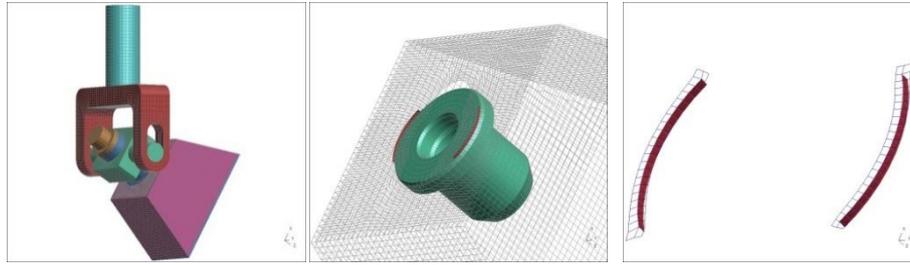
CrachFEM 失效模型同时包含 Crach 算法，用于金属材料受拉载荷下的颈缩和失稳预测。Crach 算法使用成形极限曲线 FLC 来描述非线性应变路径，支持不同网格大小模型的结果映射，如将冲压仿真结果（含失效行为）映射到碰撞分析模型中，提高碰撞仿真精度。Crach 算法有 PIS 模块(Post-Instability-Strain)用于描述发生颈缩后的失效预测，通过平面应变、剪切失效极限曲线和单元长度等计算失效应变。

Crach 算法只需要提供三个方向准静态单轴拉伸（各向异性、塑性硬化行为）和断面非均匀性参数 d 则可计算 FLC 曲线。使用较为广泛的塑性硬化准则为 Swift 模型，也有使用加权 Swift 和 Hockett-Sherby 准则。

图 6 为 DP590 的主应变比与正向断裂极限、剪切断裂极限和 FLC 失稳关系曲线。用于 CrachFEM 失效模型的定义并作为失效判据。

4.静态拉伸试验与失效仿真

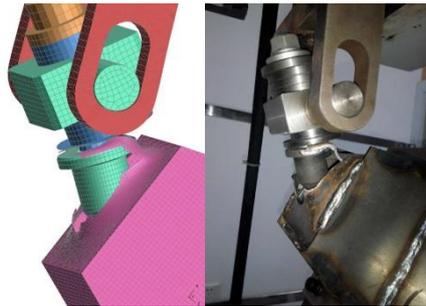
基于 CrachFEM 失效模型，建立前副车架脱落机构准静态角度拉伸有限元仿真模型如图 7，副车架连接位置钣金厚度为 2.0mm，材料 DP 590,网格大小 1mm，模型包括两道长 20mm 的对称烧焊焊缝，焊点采用节点重合的方式与前副车架连接位置钣金连接，焊接位置建模考虑热影响区，通过 INITIAL_STRESS_SHELL 对涉及材料塑性硬化、FLC、剪切失效曲线 DSF 和正向失效曲线 DNF 进行适当缩放实现，以牺牲焊点自身精度来实现焊点热影响区的断裂失效模拟^[5]。



(a)Finite element model (b)Model of nut ojection welding (c) Model of Heat Affected Zone in Welding Position
 (a)有限元模型 (b)螺母凸焊焊点模型 (c) 焊接位置热影响区模型

Figure 7. The finite element model of the angle of the front sub frame shedding mechanism
 图 7. 前副车架脱落机构角度拉伸有限元模型

如图 8，准静态角度拉伸仿真与试验变形对比，二者整体变形吻合良好，螺栓缺口位置的钣金撕裂裂纹萌生位置和钣金撕裂最终形貌一致性良好。



(a) Simulation deformation diagram (b) Test deformation diagram
 (a) 仿真变形图 (b) 试验变形图

Figure 8. Comparison of quasi-static angle tension simulation and test deformation
 图 8. 准静态角度拉伸仿真与试验变形对比

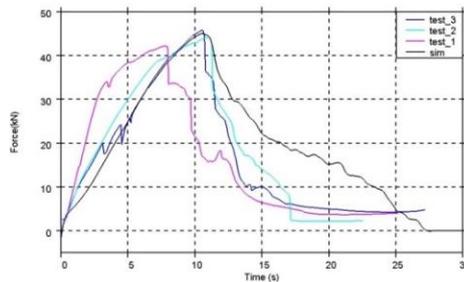


Figure 9. Force - Displacement Curve of Quasi - static Angle Stretch Simulation and Experiment
 图 9. 准静态角度拉伸仿真与试验的力-位移曲线

如图 9，准静态角度拉伸仿真与试验的拉伸力-位移对比，由于套筒与夹具间在试验前期摩擦力的改变，导致拉伸力出现局部抖动，仿真中无法模拟，从失效载荷幅值(相对于实验均值，仿真结果误差仅为 1.03%)、最大位移量和曲线走势看仿真结果是可靠，合理的。

如图 10，CrachFEM 失效模型包括正向失效、剪切失效和局部颈缩引起的失稳失效，后处理中我们可以通过查看单元的失效指标来判断引起失效的原因。

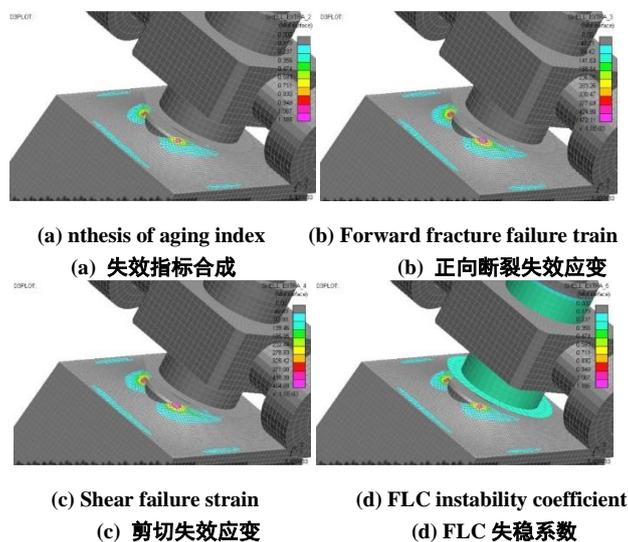


Figure 10. Post - treatment of aging index
 图 10. 失效指标后处理

5. 结论

借助 CrachFEM 失效模型，在完善的材料力学性能试验基础上，建立能够“正向”准确预测材料失效的本构模型，并将其用于前副车架脱落机构准静态角度拉伸的试验和仿真中，对比结果发现：CrachFEM 失效模型能准确再现螺栓缺口位置的钣金撕裂过程；仿真钣金裂纹萌生起始位置、最终撕裂形貌与试验高度吻合；仿真和试验拉伸力-位移曲线具有良好的一致性。因此，CrachFEM 失效模型在模拟碰撞过程中普遍存在的钣金断裂失效现象领域大有用武之地，可以为车身高强度钢零部件的开发设计提供合理有效的评价手段。

参考文献

- [1] Helmut R, David P and Hartwig T. Calibration and application of fracture models for modern high strength steel materials. 3rdMATFEM User Conference, 2014.
- [2] Horst L, Aleksandar B, Gernot O and Helmut G. Failure prediction of boron steels in crash. Transactions of SAE International, 2007-01-0989.
- [3] Feng PAN, Research on collision failure prediction of hot formed steel plate, China Automotive Safety Technology Conference. 2015
潘锋. 热成型钢板的碰撞失效预测研究. 2015 中国汽车安全技术学术会议.
- [4] Dell H, Helmut G, Gernot O. CrachFEM-A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications. Part 1 Numiform 2007. American Institute of Physics, 2007, 105-170.
- [5] Johan J. Prediction material and spotweld failure at Volvo Cars Safety Centre. LS-DYNA Nordic Users's Forum 2012, Goteborg.