

轻合金精密成形专题

基于 GISSMO 断裂准则的 6016 铝合金 断裂行为研究

孔婕¹, 邓璐璐², 刘亿¹, 闵峻英¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201206)

摘要: **目的** 研究零部件在成形与碰撞过程中, 6016 铝合金在不同应力状态下的断裂行为。**方法** 通过准静态拉伸实验, 获得了 6016 铝合金的基本力学性能。利用 Nakajima 成形极限实验, 获得了 6016 铝合金材料的断裂成形极限曲线。设计了 7 种涵盖成形及碰撞过程中应力状态的断裂极限测试试样, 采用数字图像相关技术 (DIC) 记录了试样在变形过程中的全场应变。利用实验-有限元反求方法标定了 6016 铝合金的 GISSMO 断裂准则的参数, 并用帽形件三点弯曲实验验证了模型的合理性。**结果** 相比于传统断裂成形极限图的预测结果, 基于 GISSMO 断裂准则的仿真结果与实验具有更好的一致性。**结论** 所建立的 GISSMO 模型可以用于预测 6016 铝合金在复杂应力状态下的断裂行为。

关键词: GISSMO; 断裂极限; 6016 铝合金; 失效准则

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.04.001

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2022)04-0001-10

Fracture Behavior of 6016 Aluminum Alloy Based on GISSMO Criterion

KONG Jie¹, DENG Lu-lu², LIU Yi¹, MIN Jun-ying¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

ABSTRACT: The work aims to study the fracture behavior of 6016 aluminum alloy in forming and crashing simulation. The mechanical property of 6016 aluminum alloy was obtained by quasi-static uniaxial tension experiment and the fracture forming limit curves (FFLC) of 6016 aluminum alloy were obtained by conducting Nakajima experiment. Seven types of specimens were designed to obtain the fracture limits under different stress states which commonly occur during forming and crashing. The strain field of the specimens was recorded by digital image correlation (DIC) method. The hybrid experimental-numerical method was used to calculate the parameters of GISSMO criterion. The reasonability of the model was verified by the three-point bending experiment of hat-shaped parts. The results showed that the prediction results of GISSMO model were in better agreement with the experimental results compared with that of the conventional FFLC. The GISSMO model established in this paper is proved to be suitable for predicting the fracture behavior of 6016 aluminum alloy under complex stress states.

KEY WORDS: GISSMO; fracture limit; 6016 aluminum alloy; fracture criterion

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51805375)

作者简介: 孔婕 (1998—), 女, 硕士生, 主要研究方向为金属材料断裂表征。

通讯作者: 闵峻英 (1986—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车轻量化与先进成形制造技术。

近些年来,中国提出在 2030 年前与 2060 年前分别实现“碳达峰”与“碳中和”的目标。在汽车车身制造中使用汽车轻量化材料是实现“双碳”目标的重要途径,铝合金因其塑性好、密度小、比强度高等优点被广泛应用于车身零部件的制造^[1]。随着汽车零部件制造工艺的不断发展,材料的断裂问题在成形过程中变得尤为突出,在碰撞过程中材料的断裂行为也更加复杂。断裂极限作为评价板材成形和碰撞性能的重要指标,是指导汽车零部件设计及优化的重要依据,因此对材料断裂极限的精准预测显得尤为重要。

成形极限图(Forming Limit Diagram, FLD)最早由 Keeler^[2]提出,经过 M. G. Goodwin^[3]进一步补充和完善,成为判断板料成形性能最简便和最直观的方法。FLD 可以定量衡量材料的极限变形能力,有助于分析薄板成形及碰撞过程中的断裂失效问题。Nakajima 和 Marciniak 实验是测定板材成形极限常用的实验方法,可以获得线性应变路径下的断裂极限数据,被工业和学术界广泛采用。Graf 等^[4]发现 2008-T4 铝合金板材在几种典型预应变加载条件下的成形极限曲线与无预应变时测量得到的成形极限曲线相比发生了很大的变化,材料的成形极限表现出应变路径依赖性。材料在成形及碰撞的过程中通常会经历复杂应变路径,因此使用成形极限图对断裂材料的断裂行为进行预测并不准确。金属材料断裂准则为预测材料的断裂行为提供了有力途径,根据材料在变形过程中损伤的累积是否与材料的塑性行为相耦合,可以将断裂准则分为耦合与非耦合 2 种。耦合断裂准则的 2 个重要分支是连续损伤力模型(Continuum Damage Mechanics, CDM)和以 Gurson 模型^[5]为代表的细观力学损伤模型。非耦合断裂准则假设材料在变形过程中的损伤累积对材料的本构模型参数没有影响,且形式简单、参数标定容易,因此在金属塑性成形领域得到了广泛应用^[6]。Neukamm 等^[7]在 2009 年提出了一种广义增量应力状态相关模型(Generalized Incremental Stress State Dependent Model, GISSMO),GISSMO 非耦合韧性断裂准则考虑了不同应力状态下材料失效行为的差异及非线性损伤累积方式^[8],已被广泛应用于预测成形与碰撞过程中的材料损伤与失效行为^[9-12]。

文中以 6016 铝合金为研究对象,通过单向拉伸和表征不同应力状态的韧性断裂实验,分别获得了材料基本力学性能参数及断裂极限。基于数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)获得的实验数据,采用实验-有限元参数反求方法标定了 GISSMO 韧性断裂准则的参数,通过帽形件三点弯曲实验进行了验证,并对比了传统成形极限方法与 GISSMO 韧性断裂准则的预测精度,验证了该韧性断裂准则的合理性,为金属板材失效行为的预测提供一定的指导。

1 材料与实验方法

1.1 基本力学性能实验

实验采用厚度为 0.8 mm 的 6016 铝合金板材,根据 GB/T 228.1—2010,在板材上取与轧制方向成 0°、45°、90°的试样进行准静态单向拉伸实验,拉伸试样尺寸如图 1 所示。拉伸试样采用线切割方式进行加工并使用砂纸打磨消除加工产生的毛刺。准静态拉伸实验在 MTS E45.105-ATBC 万能材料实验机上进行,拉伸速度为 3 mm/min,名义应变速率约为 0.001 s^{-1} ,拉伸直至试样断裂为止。

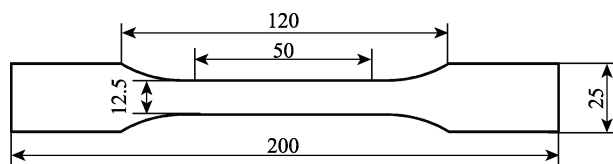


图 1 准静态单向拉伸试样尺寸

Fig.1 Geometry of quasi-static uniaxial tensile specimen

1.2 成形极限实验

Nakajima 实验方法^[13]常用来评价板材的成形性能,被广泛应用于工业和学术界。实验试样通常为哑铃形(见图 2),通过改变试样尺寸可以得到不同应力状态下材料的成形极限。根据 ISO 标准,外圆直径为 180 mm 的试样尺寸如表 1 所示。为了表征 6016 铝合金的成形性能,对哑铃形的试样(尺寸见表 1)进行 Nakajima 成形极限实验。试样使用激光切割方式沿板材轧制方向切下,利用 YAW4605-K 电液伺服成形极限实验机对 6016 铝合金进行成形极限实验,实验冲头半径为 50.8 mm,冲头上升速率为 20 mm/min,每组实验进行 3 次保证重复性,采用 DIC 技术记录试样变形过程中的全场应变,实验装备示意图如图 3 所示。

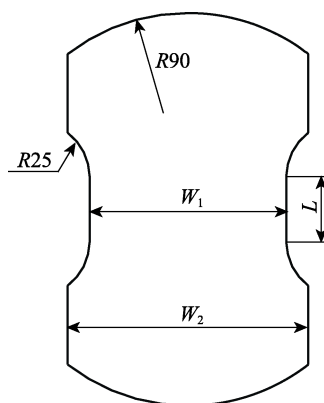


图 2 用于成形极限实验的哑铃形试样

Fig.2 Diagram of dumbbell specimen used in forming limit experiment

表 1 哑铃形试样尺寸参数

Tab.1 Geometry parameters of dumbbell specimens

试样	W_1/mm	W_2/mm	L/mm
1 [#]	40	55	80
2 [#]	60	80	60
3 [#]	80	100	40
4 [#]	100	120	20
5 [#]	126	126	0
6 [#]	140	140	0
7 [#]	160	160	0
8 [#]	180	180	0

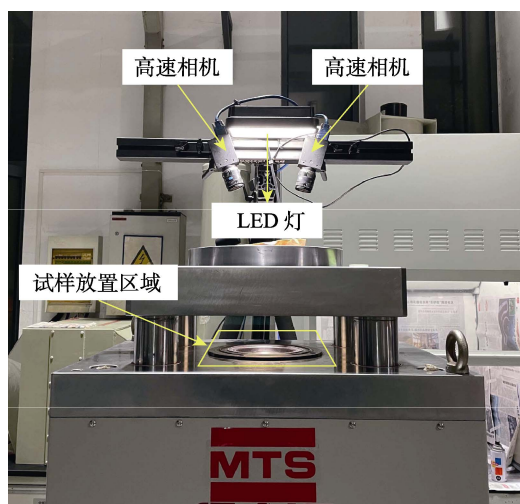


图 3 成形极限应变测试系统

Fig.3 A strain measurement system for forming limit experiment

1.3 韧性断裂测试

1.3.1 应力状态的表征

Bao 等^[14]利用不同几何尺寸试样进行实验, 量化

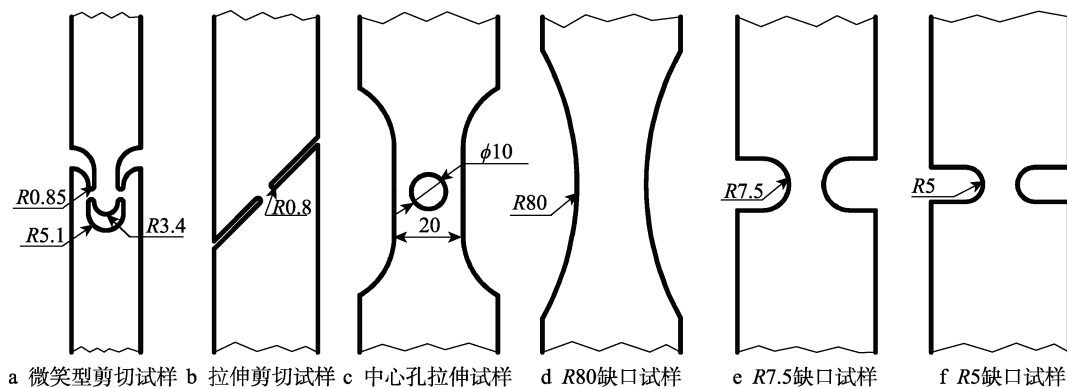


图 4 不同应力状态韧性断裂试样关键尺寸

Fig.4 Geometries of the specimens for fracture experiment under different stress states

2 实验结果

2.1 单向拉伸实验结果与硬化模型标定

经单向拉伸实验数据处理后, 6016 铝合金的基

了应力状态对铝合金 2024-T351 断裂等效应变的影响, 在韧性断裂的表征中, 应力三轴度 η 通常在断裂模型中用以表征应力状态。应力三轴度 η 的定义是试样静水应力与等效应力的比值:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vM}} \quad (1)$$

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

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

式中: σ_m 为试样静水应力; σ_{vM} 为米塞斯等效应力; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为 3 个主应力分量。

综上所述, 应力三轴度 η 能用以表征材料在变形过程中的应力状态。在板材成形与碰撞的过程中, 试样的应力状态通常涵盖了从简单剪切到等双向拉伸。板材成形与碰撞通常基于平面应力假设, 常见应力状态有简单剪切、单向拉伸、平面应变和等双向拉伸状态, 与之对应的应力三轴度 η 数值分别为 0、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 、 $\frac{2}{3}$ 。

1.3.2 试样设计及韧性断裂实验

为了测定 6016 铝合金在不同应力状态下的断裂极限, 文中设计了 7 种不同受力状态的试样进行准静态韧性断裂测试, 其中 6 种试样的关键位置尺寸如图 4 所示^[15], 而等双向拉伸实验采用直径为 180 mm 的圆盘形试样, 实验在 MTS 电液伺服成形极限机上进行, 实验冲头速度为 20 mm/min, 其余试样则在 MTS E45.105-ATBC 万能材料实验机上进行准静态拉伸, 拉伸速度为 1 mm/min。使用 DIC 技术记录试样变形过程中的全场应变, 每种实验进行 3 次以保证重复性原则。

本力学性能如表 2 所示。

材料 3 个方向的真实应力-应变曲线如图 5 所示, 由于材料成形时的应变远大于单向拉伸实验的应变范围, 因此需要根据实验得到的真实应力-应变曲线外推更大应变范围内的真实应力-应变曲线。

表 2 6016 铝合金基本力学性能
Tab.2 Basic mechanical property of 6016 aluminum alloy

试样方向/(°)	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	均匀伸长率/%	断裂伸长率/%	各向异性系数
0	77 605	227.99	110.71	24.89	30.60	0.85
45	70 587	227.29	108.69	27.76	31.54	0.65
90	69 248	219.49	104.58	25.11	28.93	0.72

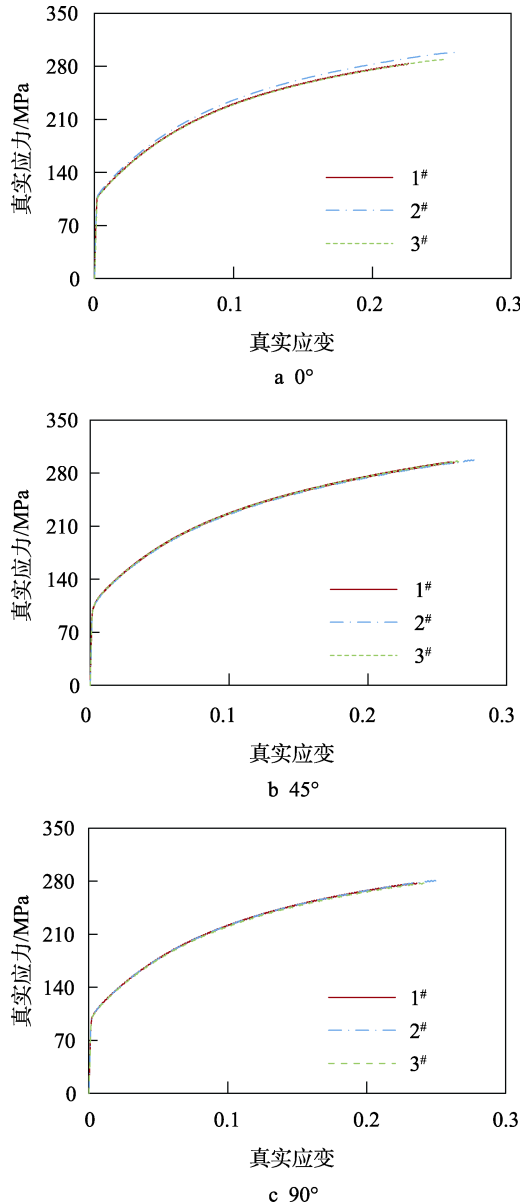


图 5 6016 铝合金在不同方向的真实应力-应变曲线

Fig.5 True stress-strain curves of 6016 aluminum alloy along 0°, 45°, and 90° from the rolling direction

Barnwal 等^[16]使用混合硬化模型准确描述了 TRIP1180 与 DP980 材料的硬化行为,结果显示,混合硬化模型综合了饱和与非饱和型硬化模型的优点,能更加灵活地描述材料的硬化行为。因此,文中采用混合 Swift-Hockett_Sherby (SHS) 硬化模型,外推 6016 铝合金在 0°、45°、90°这 3 个方向的真实应力-应变曲线。Swift 硬化模型见式(4),Hockett_Sherby

硬化模型见式(5),混合 SHS 硬化模型见式(6)。

$$\sigma = K(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_s - \exp(-N\varepsilon_p)^p (\sigma_s - \sigma_y) \quad (5)$$

$$\sigma = \alpha K(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n + (1 - \alpha)[\sigma_s - \exp(-N\varepsilon_p)^p (\sigma_s - \sigma_y)] \quad (6)$$

式中 α 为 Swift 模型在混合 SHS 模型中的权重; ε_p 为剔除弹性段数据后的塑性应变值; σ_y 为材料的屈服强度; ε_0 、 α 、 K 、 n 、 σ_s 、 N 和 p 为模型参数,其标定结果分别为 0.002、0.9、440.29、0.31、329.41、9.38、0.94。

2.2 成形极限实验结果

实验结束后使用 Vic-3D 8 软件对试样的应变分布做后处理,提取试样断裂前一帧的面内主、次应变值绘制材料的断裂成形极限图。8 种试样的等效断裂塑性应变值依次为 0.436、0.428、0.408、0.393、0.413、0.493、0.538、0.584,成形极限图如图 6 所示。

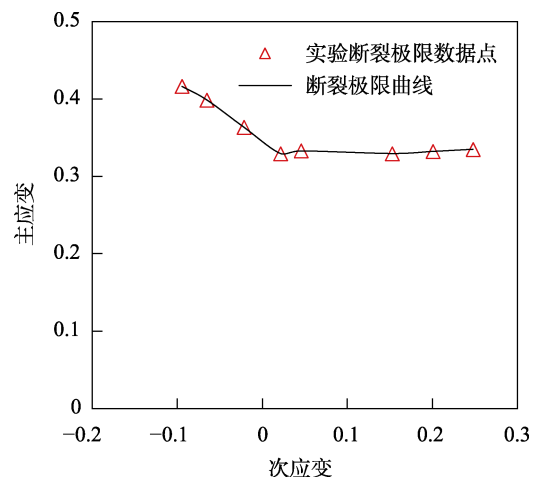


图 6 6016 铝合金断裂成形极限图

Fig.6 Fracture forming limit diagram of 6016 aluminum alloy

2.3 韧性断裂测试实验结果

不同应力状态下韧性断裂实验得到的载荷-位移曲线如图 7 所示,每组实验的重复性较好,除等双向拉伸外,各组实验的载荷在断裂前均出现了“软化”现象,表明铝合金的断裂模式为韧性断裂。

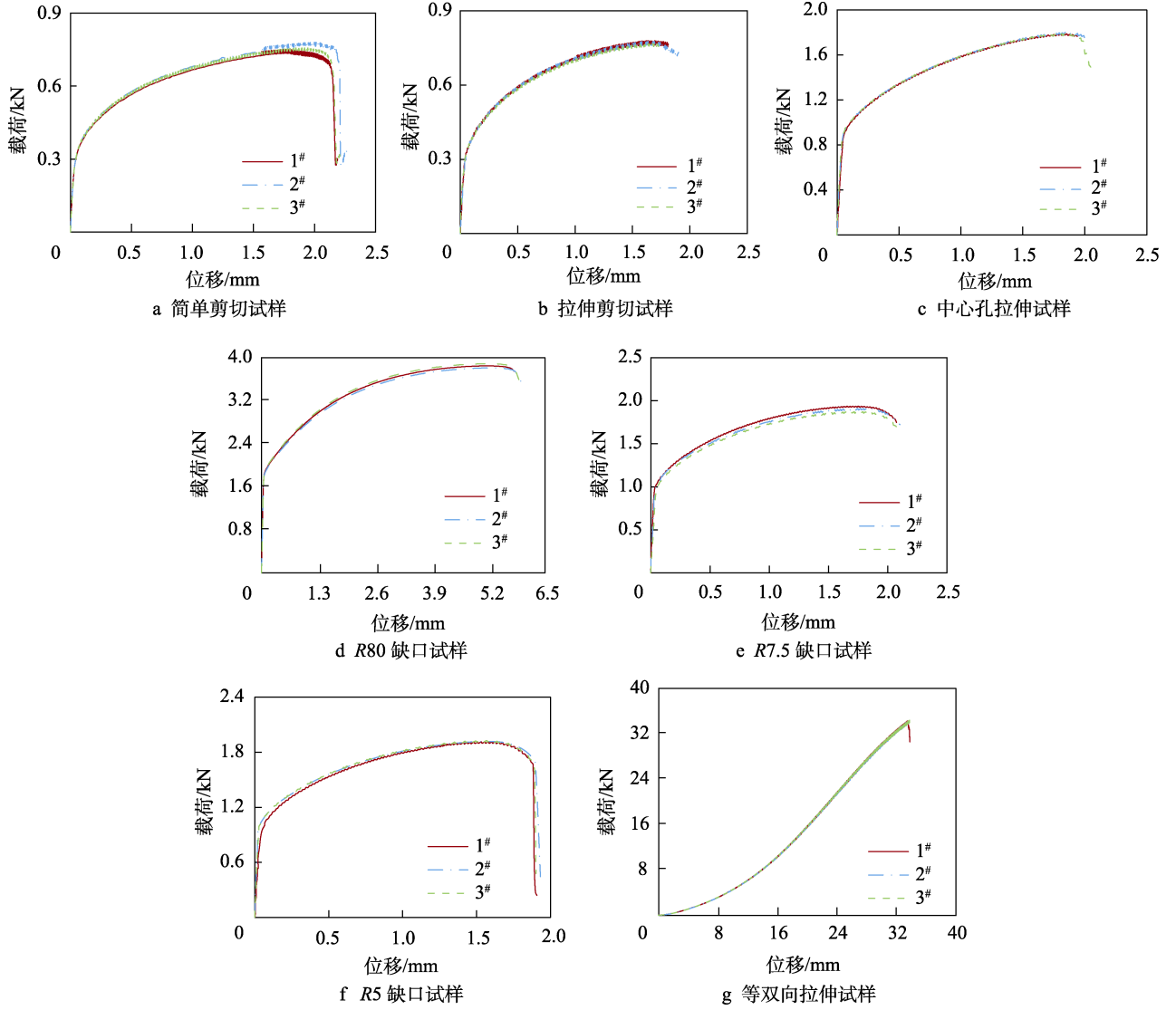


图 7 不同试样实验载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of different specimens in experiment

3 GISSMO 韧性断裂准则的标定

GISSMO 韧性断裂准则与工程中常用的 Johnson-Cook 断裂模型的不同点在于, 该模型考虑了材料从受损、非线性损伤累积到材料断裂失效的全过程, 并且能预测材料在不同应力状态下的失效行为, 适于分析与预测金属板材碰撞与成形过程中的断裂问题。

3.1 GISSMO 韧性断裂准则简介

GISSMO 韧性断裂准则主要使用非线性损伤累积方式定义材料的失效行为, 如式 (7) 所示。在唯象断裂模型中, 通常定义不与本构模型耦合的外部变量 D 来描述材料的损伤行为。当仿真中单元的 D 值达到 1 时, 在仿真中就会被删除。

$$\Delta D = \frac{n}{\bar{\varepsilon}_p^{\text{ins}}(\eta)} D^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \bar{\varepsilon}_p \quad (7)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变; $\bar{\varepsilon}_p^{\text{f}}$ 为材料发生断裂时的等效塑性应变, 其数值与应力状态相关; n 为损伤系数。

GISSMO 模型除了能够表征不同应力状态下材料的断裂行为, 还将韧性断裂中材料的失稳现象也考虑其中。材料的软化行为由变量 F 定义, 如式 (8) 所示:

$$\Delta F = \frac{n}{\bar{\varepsilon}_p^{\text{ins}}(\eta)} F^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \bar{\varepsilon}_p \quad (8)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_p^{\text{ins}}$ 为不同应力状态下的等效失稳塑性应变。

当单元的 F 值达到 1 时, 其应力会发生软化现象, 软化后的单元应力由式 (9) 计算得到。

$$\sigma^* = \sigma \left[1 - \left(\frac{D - D_{\text{crit}}}{1 - D_{\text{crit}}} \right)^m \right] \quad (9)$$

式中: σ^* 为发生软化后的应力; σ 为软化前应力; D_{crit} 为 $F=1$ 时变量 D 的临界值; m 为衰减系数。

3.2 GISSMO 韧性断裂准则参数确定

由 3.1 中 GISSMO 韧性断裂准则简介可知, 需要输入模型中的参数有等效断裂塑性应变 $\bar{\epsilon}_p^f$ 、等效失稳塑性应变 $\bar{\epsilon}_p^{ins}$ 、衰减系数 m 及损伤系数 n 。对于等效断裂塑性应变来说, 通常提取断裂前一帧的应变数值作为等效断裂塑性应变。但对局部变形较大的简单剪切和拉伸剪切实验来说, 变形后期试样表面的云图破裂导致无法得到断裂前的最大应变值, 且剪切变形并不会出现韧性断裂模式中的剪切软化现象, 其失稳等效塑性应变通常设置为较大值而不需要求解。对其他模型中的等效失稳塑性应变 $\bar{\epsilon}_p^{ins}$ 、衰减系数 m 及损伤系数 n 来说, 实验中无法准确测得上述参数值。因此, 学者们^[17-18]采用实验-有限元混合方法反求模型参数。文中采用 LS-OPT 软件对 6016 铝合金 GISSMO 模型参数进行反求, 输出仿真载荷-位移曲线与实验进行对比, 反求流程如图 8 所示。

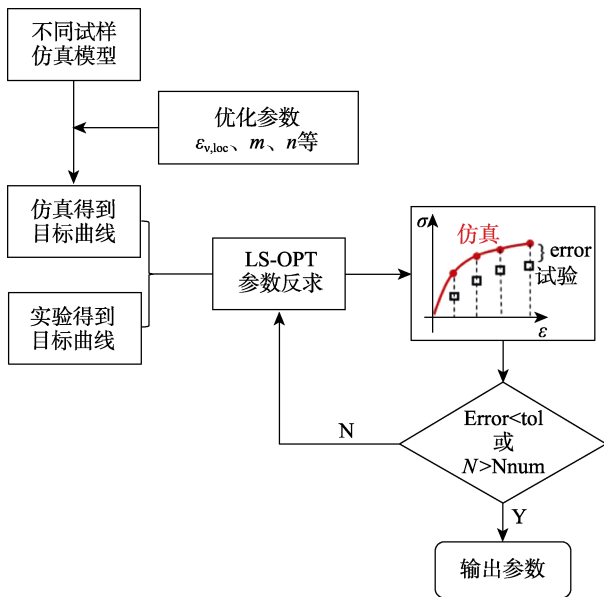


图 8 LS-OPT 参数反求流程

Fig.8 Parameter reverse processing using LS-OPT

在对 6016 铝合金进行参数反求的过程中, 考虑到材料的各向异性, 为提高仿真精度, 选择 LS_DYNA 材料库中的 MAT_36_3-PARAMETER_BARLAT_NLP 材料模型, 输入 0° 、 45° 、 90° 这 3 个方向上外推后的真实应力-应变曲线。为了保证仿真精度, 目标区域网格大小划分为 0.5 mm。

3.3 有限元仿真与实验结果对比

经 LS-OPT 软件优化后的 GISSMO 断裂模型参数如表 3 所示, 对应得到的断裂及失稳曲线如图 9 所示。

图 10 为使用优化后的 6016 铝合金 GISSMO 韧性断裂模型参数进行实验后, 各组实验与仿真的载荷-位移曲线对比, 仿真峰值力数值与断裂位移数据均与实验结果相吻合, 且仿真断裂位移误差与实验值的误差均小于 5%, 满足工程使用要求, 验证了 6016 铝合金 GISSMO 模型的有效性。

3.4 网格正则化过程

网格划分情况同样会影响有限元仿真的结果, 在整车碰撞与汽车零件成形仿真中, 为了兼顾仿真准确性与仿真效率, GISSMO 韧性断裂准则通过引入网格依赖性因子来考虑尺寸效应的影响, 使同一应力状态、不同网格尺寸的仿真结果相同。

为了校准不同网格尺寸下的网格依赖性因子值, 建立了 0.5、1、2.5、5、10 mm 网格尺寸的单向拉伸实验仿真模型 (见图 11)。在未对不同网格大小的仿真模型进行归一化处理前, 仿真结果如图 12a 所示, 试样断裂位移随网格尺寸的增加而加大, 导致仿真累积误差增加。通过参数反求的方式获取相应的因子值 (见图 13), 使不同网格尺寸的模型均能得到与实验一致的载荷-位移曲线, 如图 12b 所示。

表 3 6016 铝合金 GISSMO 韧性断裂模型参数
Tab.3 Parameters of GISSMO ductile fracture model for 6016 aluminum alloy

实验	$\bar{\epsilon}_p^{ins}$ 值	$\bar{\epsilon}_p^f$ 值	m 值	n 值
简单剪切	2	0.65	3	2
拉伸剪切	0.24	0.47	3	2
中心孔拉伸	0.11	0.55	3	2
R80 缺口拉伸	0.32	0.53	3	2
R7.5 缺口拉伸	0.16	0.48	3	2
R5 缺口拉伸	0.21	0.47	3	2
等双向拉伸	0.24	0.57	3	2

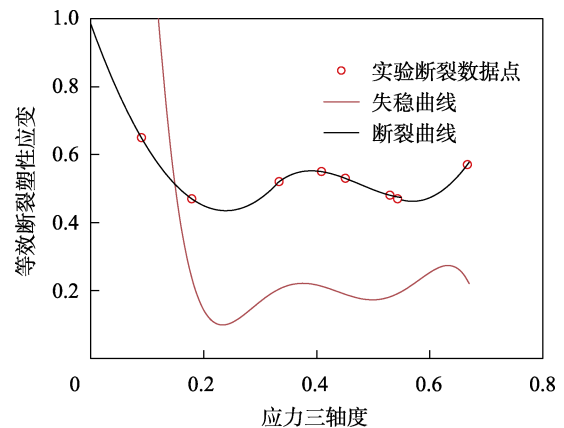


图 9 输入 GISSMO 模型的 6016 铝合金断裂及失稳曲线

Fig.9 Fracture and instability curves of 6016 aluminum alloy in GISSMO model

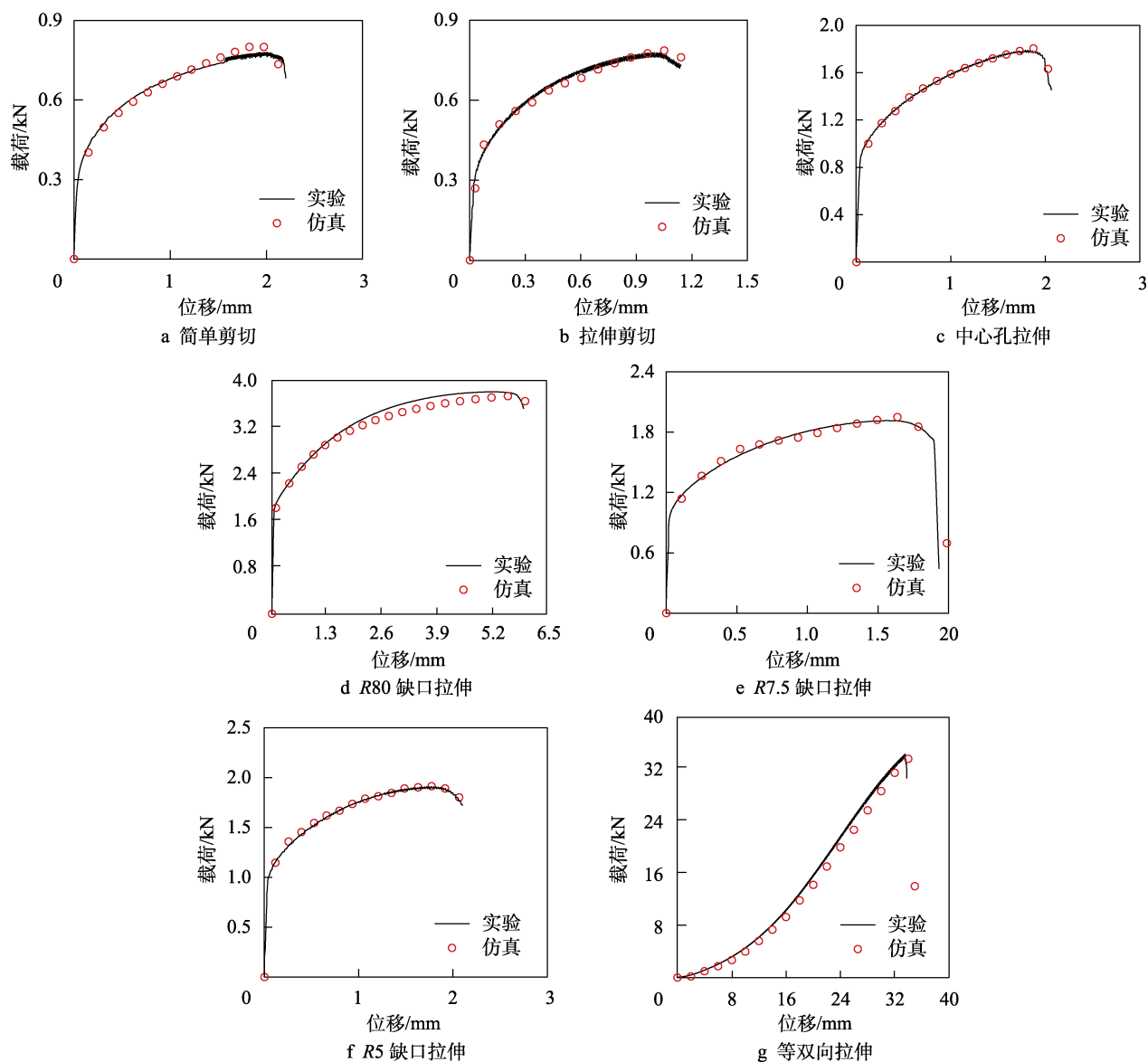


图 10 试样仿真与实验载荷-位移曲线结果

Fig.10 Comparison of experimental and simulated load-displacement curves

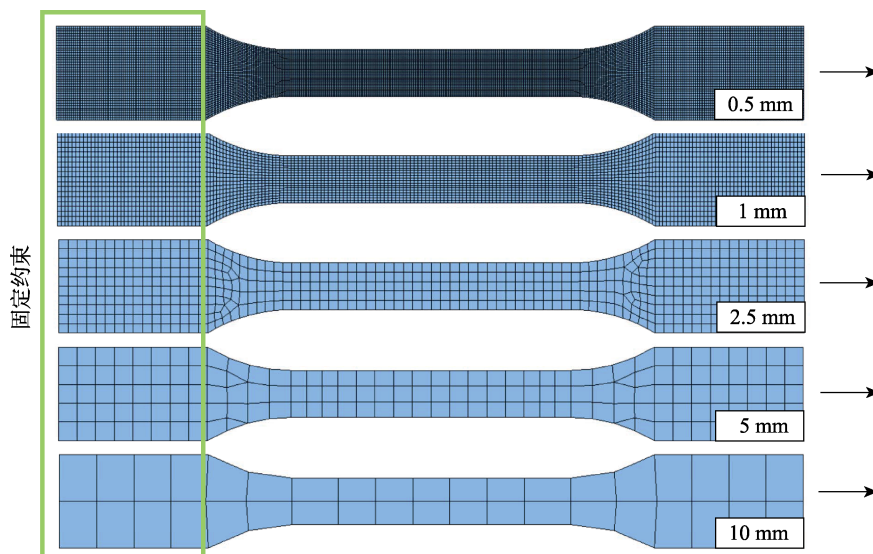


图 11 不同网格大小的单向拉伸仿真模型

Fig.11 Uniaxial tension simulation model of different mesh sizes

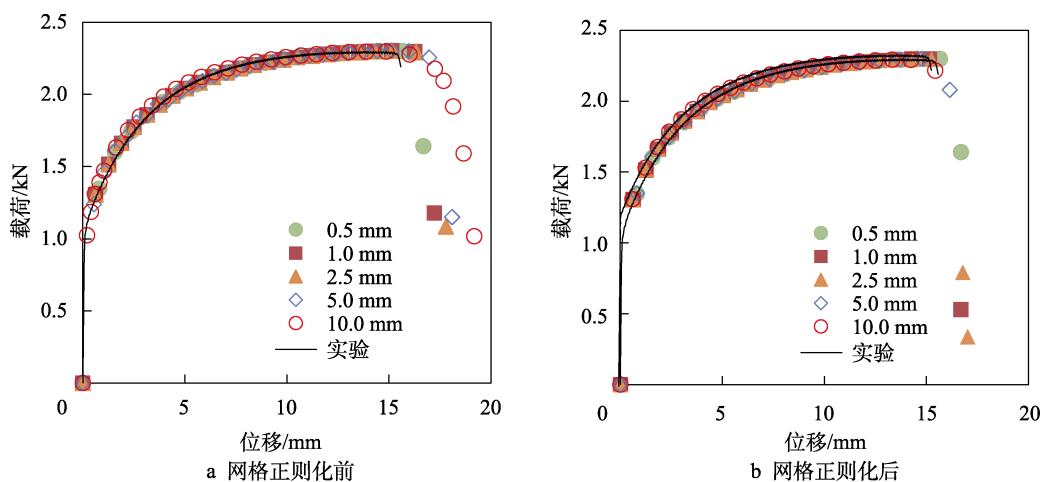


图 12 不同网格尺寸下单向拉伸工况载荷-位移曲线

Fig.12 Load-displacement curves of uniaxial tension experiment with different mesh sizes

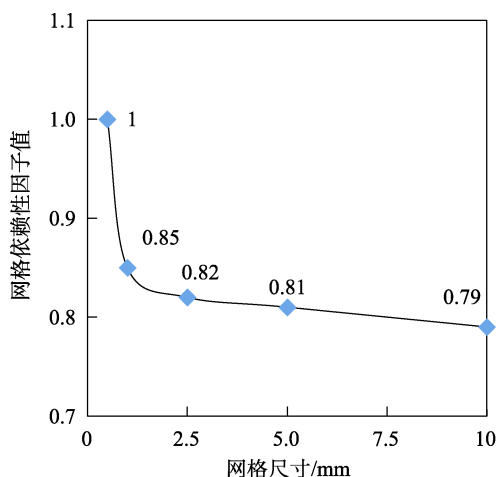
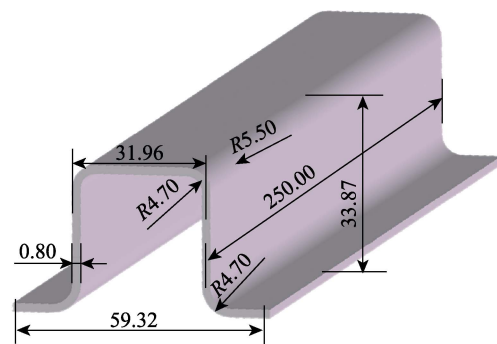
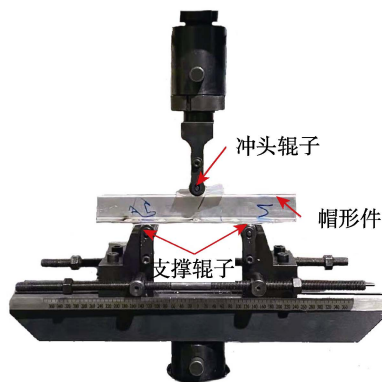


图 13 网格依赖性因子曲线

Fig.13 Dependence of mesh-independent factor on mesh size



a 用于三点弯曲实验的帽形零件



b 三点弯曲实验装备

图 14 三点弯曲实验零件尺寸与实验装备

Fig.14 Dimension diagram and experimental equipment of three-point bending experiment

4 GISSMO 韧性断裂准则的验证

4.1 帽形件三点弯曲实验

为了验证文中标定的 6016 铝合金 GISSMO 韧性断裂准则卡片的准确性,设计了如图 14a 所示的帽形件用于三点弯曲工况实验验证。使用折弯工艺加工零件,尽量消除初始损伤对零件的影响。加工好的帽形件与垫板焊接在一起后置于三点弯曲实验工装上(见图 14b),实验工装的支撑辊子间距为 110 mm,冲头与支撑辊子的直径为 20 mm,实验时冲头下压速度为 4 mm/min。

建立与实验工况相同的帽形件有限元模型对三点弯曲实验结果进行模拟,使用前文标定好的材料模型和断裂模型描述帽形件与垫板的变形行为,支撑辊子与冲头辊子设为刚性体。仿真模型中帽形件网格尺寸为 2.5 mm,对变形较大的圆角区域进行网格细化确保仿真精度。

4.2 仿真与实验结果对比

图 15a 为帽形件经三点弯曲实验后的变形情况,由于 6016 铝合金塑性较好,实验结束并未出现明显的开裂情况。但零件变形后期,其载荷出现了“软化”现象,即零件承载能力降低,图 15b 为冲头下压与实验相同距离时的仿真结果,与实验较为吻合。图 16 展示了三点弯曲工况下实验与仿真的载荷-位移对比情况,发现 GISSMO 模型能够准确预测材料的变形

行为, 预测结果尤其与材料变形后期时的软化行为较为吻合。

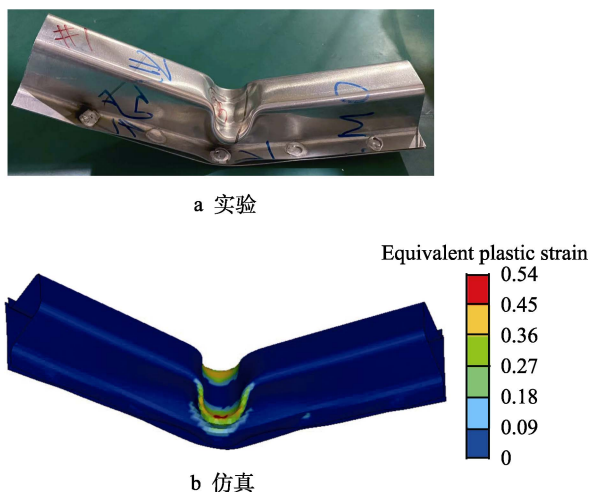


图 15 帽形件三点弯曲实验变形情况

Fig.15 Deformation of the hat-shaped specimen under three-point bending experiment

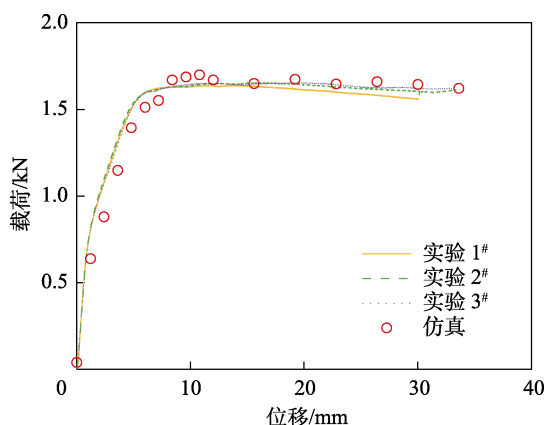


图 16 基于 GISSMO 模型的三点弯曲实验载荷-位移实验与仿真对比结果

Fig.16 Comparison of load-displacement results of three-point bending experiment based on GISSMO model in experiment and simulation

成形极限曲线同样可以输入到 MAT_36 材料模型中用以预测材料的失效行为, 由于 6016 铝合金的颈缩现象并不明显, 因此输入 Nakajima 实验得到的断裂极限曲线用以预测三点弯曲实验结果。当仿真模型中单元的历史变量为 1, 即成形性能指数 (Formability Index, FI) 数值达到 1 时, 材料即达到成形极限发生断裂。从图 17 可以看出, 与冲头接触的圆角位置单元 FI 值在下压距离为 25.6 mm 时已经达到 1, 即材料已经发生了断裂现象。实验时冲头下压距离为 35 mm 时, 材料尚未发生断裂, 仅出现了承载能力的下降。因此, 当使用传统成形极限曲线对材料的断裂行为进行预测时, 会低估材料的断裂应变值, 导致在仿真中发生提前开裂的情况。基于成形极限预测的结果进行零件设计时也会导致材料的浪费,

不论是预测精度还是预测效率, GISSMO 模型相较于成形极限图有较高的实用性。

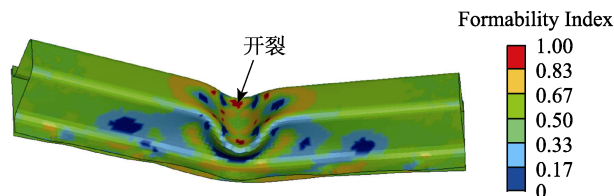


图 17 基于成形极限曲线的帽形件成形指数分布云图

Fig.17 Contour of formability index distribution of hat-shaped part based on forming limit curve result

5 结论

对 6016 铝合金进行了准静态单向拉伸实验与成形极限实验, 得到了 6016 铝合金基本力学性能参数并对其成形性能做出了评价。设计了 7 种涵盖成形与碰撞过程中应力状态的韧性断裂试样, 使用有限元-实验混合方法反求了 GISSMO 韧性断裂参数并设计了三点击弯工况进行了验证, 得到的结论如下。

1) 提出的 GISSMO 断裂模型标定方法能够准确描述 6016 铝合金在不同应变路径下的断裂极限, 仿真预测的断裂应变与实验误差在 5% 以内。

2) 基于 GISSMO 的断裂模型对 6016 铝合金的断裂行为进行预测相较于采用传统断裂成形极限曲线进行预测具有更高的精度, 能够为预测汽车铝合金构件失效行为提供一定的技术参考。

参考文献:

- [1] 汤蓉蓉, 唐学帮. 铝合金汽车轻量化与焊接技术探究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 105-107.
TANG Rong-rong, TANG Xue-bang. Research on Aluminum Alloy Automobile Lightweight and Welding Technology[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(12): 105-107.
- [2] KEELER S P. Plastic Instability and Fracture in Sheet Stretched over Rigid Punches[J]. ASM Transactions Quarterly, 1963, 56(11): 25-48.
- [3] GOODWIN G M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24: 380-387.
- [4] GRAF A, HOSFORD W. Effect of Changing Strain Paths on Forming Limit Diagrams of Al 2008-T4[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1993, 24(11): 2503-2512.
- [5] GURSON A L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2-15.
- [6] 杨婷, 熊自柳, 孙力, 等. 汽车用先进高强钢韧性断

- 裂模型的研究与应用进展[J]. 锻压技术, 2021, 46(1): 10-16.
- YANG Ting, XIONG Zi-liu, SUN Li, et al. Research and Application Progress on Ductile Fracture Model of Advanced High-Strength Steel (AHSS) for Automotive[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(1): 10-16.
- [7] NEUKAMM F, FEUCHT M, HAUF A. Considering Damage History in Crashworthiness Simulations[C]// Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, 2009.
- [8] 梁宾, 赵岩, 赵清江, 等. 基于 Gissmo 失效模型的 6016 铝合金板材断裂行为研究及应用[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 53-62.
- LIANG Bin, ZHAO Yan, ZHAO Qing-jiang, et al. On the Prediction of Failure in 6016 Aluminum Alloy Sheet by Gissmo Damage Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 53-62.
- [9] 张骥超, 连昌伟, 韩非. 第三代超高强钢 QP1180 硬化与失效行为研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57: 1-9.
- ZHANG Ji-chao, LIAN Chang-wei, HAN Fei. Study on Hardening and Failure Behavior of the 3rd Generation Ultra-High Strength Steel QP1180[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57: 1-9.
- [10] 徐晨阳, 张骥超, 连昌伟. 基于 GISSMO 损伤模型的 DH590 高强钢断裂失效行为研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(6): 68-74.
- XU Chen-yang, ZHANG Ji-chao, LIAN Chang-wei. Study on Fracture Failure Behavior of DH590 High Strength Steel Based on GISSMO Damage Model[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(6): 68-74.
- [11] 徐宽, 夏明生, 刘靖宝, 等. 基于 Gissmo 材料失效准则的圆盘剪刃应力模拟[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(9): 110-116.
- XU Kuan, XIA Ming-sheng, LIU Jing-bao, et al. Simulation of Stress on Shear Blade of Disc Shear Based on Gissmo Material Failure Criterion[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(9): 110-116.
- [12] OTROSHI M, ROSSEL M, MESCHUT G. Stress State Dependent Damage Modeling of Self-Pierce Riveting Process Simulation Using GISSMO Damage Model[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100015.
- [13] NAKAZIMA K, KIKUMA T, HASUKA K. Study on the Formability of Steel Sheets[J]. Yamata Technical Report, 1968, 264: 8517-8530.
- [14] BAO Y, WIERZBICKI T. On Fracture Locus in the Equivalent Strain and Stress Triaxiality Space[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(1): 81-98.
- [15] GORJI M B, MOHR D. Micro-Tension and Micro-Shear Experiments to Characterize Stress-State Dependent Ductile Fracture[J]. Acta Materialia, 2017, 131: 65-76.
- [16] BARNWAL V K, LEE S, KIM J, et al. Failure Characteristics of Advanced High Strength Steels at Macro and Micro Scales[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 411-427.
- [17] MOHR D, HENN S. Calibration of Stress-Triaxiality Dependent Crack Formation Criteria: A New Hybrid Experimental-Numerical Method[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(6): 805-820.
- [18] ZHANG Zhi-qiang, CUI Yue-jie, YU Ge. Damaged and Failure Characterization of 7075-T6 Al Alloy Based on GISSMO Model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(3): 1209-1214.

责任编辑：蒋红晨