

高强度双相钢 DP780D+Z 断裂失效性能表征模型

杨 浩¹, 韩中海²

(1. 重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 401520; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 针对高强度双相钢 DP780D+Z 的断裂失效性能和表征模型开展研究。基于不同硬化模型拟合结果, 引入调节系数搭建组合硬化模型; 基于 GISSMO 和 DIEM 断裂失效模型, 通过试验和仿真相结合的方法, 获取不同失效形式下的应力三轴度和极限塑性应变; 以仿真模型输出的力-位移曲线与试验测试曲线间的误差最小作为目标, 获取最优组合硬化模型; 根据不同失效试样参数, 拟合获取两种断裂失效模型曲线; 通过 5 种不同试样的仿真与试验之间的误差分析, 获取综合精度较高的断裂失效表征模型。结果表明: 调节系数为 0.527 时, Voce++ 和 Hockett-Sherby 组成的混合硬化模型的精度最高; 断裂失效区域的应力三轴度随试样变形而发生变化, 但变化幅度较小; DIEM 和 GISSMO 两种模型的综合精度均较高, 但 DIEM 模型的精度达到了 97%, 而 GISSMO 则在 94% 左右。综合分析, DIEM 断裂失效模型表征的精度更高, 可作为材料断裂失效表征模型应用于整车仿真分析。

关键词: 高强双相钢; 断裂失效; 应力三轴度; 塑性应变; 碰撞仿真; DIEM 模型; GISSMO 模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.01.031

中图分类号: TG142.1; TG333.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 01-0249-12

Characterization model of fracture failure performance for high strength dual-phase steel DP780D+Z

Yang Hao¹, Han Zhonghai²

(1. College of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China;
2. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: The fracture failure performance and characterization model of high strength dual-phase steel DP780D+Z were studied. Based on fitting results of different hardening models, the combined hardening model was built by introducing the adjustment coefficient, and based on GISSMO and DIEM fracture failure models, the stress triaxiality and ultimate plastic strain under different failure modes were obtained by the combination of test and simulation methods. The optimal combined hardening model was obtained by taking the minimum error between the force-displacement curve output by the simulation model and the experimental test curve as the goal. According to different failure sample parameters, two fracture failure model curves were obtained by fitting, and through the error analysis between simulation and test of five different samples, a fracture failure characterization model with high comprehensive accuracy was obtained. The results show that when the adjustment coefficient is 0.527, the combined hardening model composed of Voce++ and Hockett-Sherby has the highest accuracy. The stress triaxiality in the fracture failure zone changes with the deformation of the sample, but the magnitude of the change is small. The comprehensive accuracy of both DIEM and GISSMO models is relatively high, but the accuracy of DIEM model reaches 97%, while that of GISSMO is 94%. Thus, based on comprehensive analysis, the DIEM fracture failure model has higher accuracy in characterization and can be used as a material fracture failure characterization model for vehicle simulation analysis.

Key words: high strength dual-phase steel; fracture failure; stress triaxiality; plastic strain; collision simulation; DIEM model; GISSMO model

高强度双相钢的基体组织以铁素体和马氏体为主, 使得材料在具有较高强度的同时, 表现出良好

的成形性能。此材料的屈强比较低, 且具有良好的均匀伸长率和烘烤硬化性能, 无室温时效^[1], 因此成为了乘用车白车身应用较多的一类高强钢材料, 主要应用于车身重要的结构件, 如前纵梁、门槛梁、B 柱内板等^[2]。高强钢材料在碰撞过程中经历弹性、塑性、失稳和失效等过程, 其中的失稳和失效过程

收稿日期: 2024-05-15; 修订日期: 2024-08-25

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202304013)

作者简介: 杨 浩 (1989-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: yhao059333@163.com

主要是材料基体组织中的裂纹萌生、长大至断裂的过程，这直接影响到材料碰撞过程中的承载性能和整个零件的失效形式，最终影响车型的安全性评价。随着高精度计算机辅助工程（Computer Aided Engineering, CAE）仿真技术的应用，碰撞仿真的分析也对材料力学性能表征和断裂失效性能表征提出了更高的要求。传统的常应变模型，即通过单向拉伸确定失效的临界应变，无法表征碰撞过程复杂的应力应变状态，表征的结果精度较低。近些年，以应力三轴度和断裂失效应变为主要参数的断裂失效参数已被普遍应用于碰撞仿真分析，其考虑了应力状态对材料断裂失效的影响^[3]。选取高强度双相钢的断裂失效性能表征模型开展研究具有重要的应用价值，学者们已开展了一定的相关研究：周佳等^[4]研究 DP780 双相钢在典型应变状态下的断裂失效行为，并通过 MMC 断裂失效模型对断裂失效参数进行拟合，采用 B 柱三点弯曲试验对模型进行验证；朱建琳等^[5]采用 6 种不同的试样对 DP590 双相钢和热成形钢非线性损伤的 GISSMO 失效模型参数进行拟合，最后采用 60°拉剪和 R6 缺口工况的仿真模拟与试验对标，验证了模型的正确性；孔玉强等^[6]应用 GISSMO 断裂失效模型，设计了 5 种不同试样，拟合相关参数，采用落锤压溃分析验证了模型的准确性；张伟等^[7]采用 MMC 断裂失效模型，获取关键特征参数，并采用 90°V 型弯曲试验对模型进行验证，同时分析了组织对断裂失效性能的影响；方新文等^[8]采用 Johnson-Cook 断裂失效模型，设计不同缺口尺寸的测试试样，采用试验和有限元仿真相结合的方法获取测试关键特征参数，对失效模型进行拟合，并通过对比试验和仿真结果验证了模型精度。根据上述研究发现，表征断裂失效的模型较多，如 GISSMO、MMC、Johnson-Cook 等，通过模型参数拟合即可获得断裂失效表征曲线，而模型之间的差异较大，因此，对同种材料不同模型的适用性进行研究，可有效提升模型的预测精度。

本文选取高强度双相钢 DP780D+Z 开展研究。基于不同硬化模型对材料的有效应力-有效应变曲线进行外延拟合，引入调节系数搭建组合硬化模型；针对 GISSMO 和 DIEM 断裂失效模型进行分析，设计 5 种不同应力状态的试验试样，开展相关试验测试，获取极限塑性应变和力-位移曲线；搭建各失效试样测试的仿真分析模型，以力-位移拟合度最高作为目标，获取最优组合硬化模型；依托于最优仿真模型提取应力三轴度的变化曲线，积分获取平

均应力三轴度；以不同试样的特征值作为输入，拟合获取模型相关参数和曲线；通过 5 种试样不同断裂失效模型输入，对比仿真与试验得到的力-位移曲线之间的误差，获取综合精度较高的模型作为材料的断裂失效模型。

1 力学性能分析

研究选取材料为白车身最常用的高强双相钢 DP780D+Z，厚度为 1.2 mm，沿钢板轧制方向取样，基于静态拉伸试验机，参照 GB/T 228.1—2021^[9]测试方法，采用 A50 拉伸试样，在常温下开展试验测试。获取的材料的拉伸性能曲线如图 1 所示，并提取关键参数，如表 1 所示。

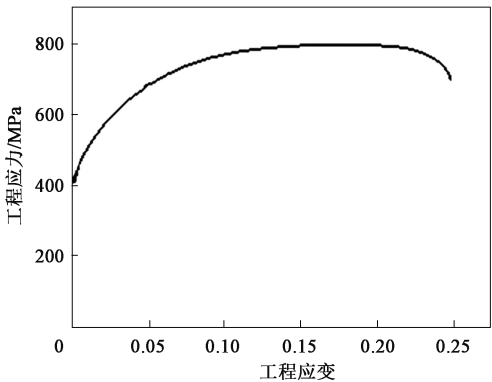


图 1 高强双相钢 DP780D+Z 工程应力-工程应变曲线
Fig. 1 Engineering stress-engineering strain curve of high strength dual-phase steel DP780D+Z

表 1 高强双相钢 DP780D+Z 的力学性能参数
Table 1 Mechanical property parameters of high strength dual-phase steel DP780D+Z

参数	数值
屈服强度 R_{eL} /MPa	447
抗拉强度 R_m /MPa	802
断后伸长率/%	25.5

在图 1 所示工程应力-工程应变曲线的基础上，获取有效应力-有效应变曲线，如图 2 所示。

实际仿真应用过程中，需要对材料的硬化曲线外延至有效应变达到 1.00，常用的硬化模型包括 Swift、Gosh、Voce++、Hockett-Sherby 以及 Voce 等，各模型的结果如图 3 所示。

在 Swift、Gosh 和 Voce++、Hockett-Sherby、Voce 硬化模型中选择拟合误差较小的 Voce++模型、

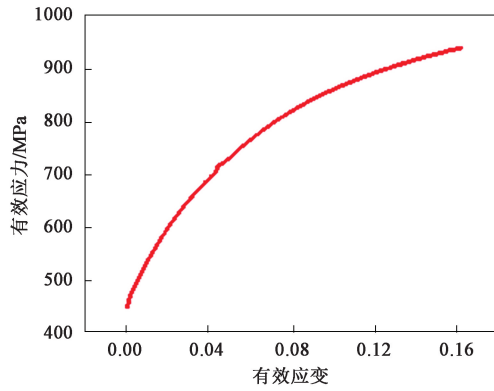


图 2 有效应力-有效应变曲线

Fig. 2 Effective stress-effective strain curve

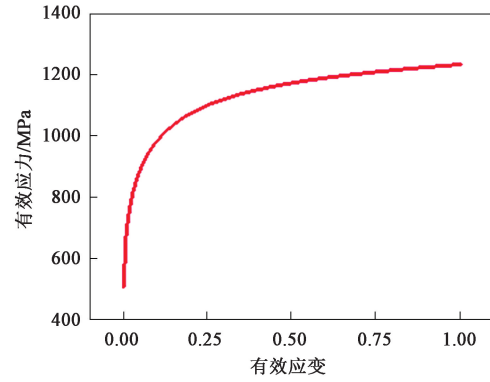


图 4 优化后的有效应力-有效应变外延曲线

Fig. 4 Effective stress-effective strain epitaxial curve after optimization

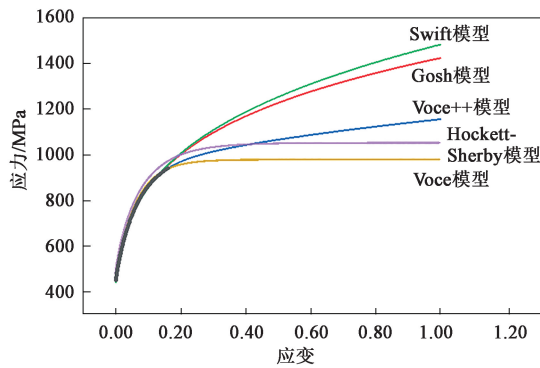


图 3 不同硬化模型拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of different hardening models

Hockett-Sherby 模型，二者组成混合硬化模型，如式 (1) 所示：

$$\sigma = \alpha \times \{R_{eL} + a[1 - \exp(-b \times \varepsilon)] + c\varepsilon^{0.5}\} + (1 - \alpha) \times \{R_{eL} + d[1 - \exp(-e \times \varepsilon^f)]\} \quad (1)$$

式中： σ 为应力； ε 为应变； α 为调节系数； a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 均为待拟合系数。

根据有效应力-有效应变曲线，对式 (1) 中的系数进行拟合，获取有效应力-有效应变曲线最终的外延结果，如图 4 所示。

2 断裂失效性能测试

2.1 断裂失效表征模型

2.1.1 DIEM 断裂失效模型

该模型表征失效的基础依托于材料内部组织损伤的变化，从形核、长大、失效到断裂的过程，主要涉及损伤的产生和变化^[10]。对于失稳判断的准则包括正向准则和剪切准则，其中正向准则为：

$$\varepsilon_f = g e^{q\beta} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1 - k_{NF}\eta}{\nu} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\sigma_1}{\tilde{\sigma}} \quad (4)$$

式中： ε_f 为不同应力状态下材料发生不稳定性变形时的等效塑性应变； g 、 q 、 k_{NF} 均为材料参数； β 为应力状态表征参数； ν 为第一主应力表征参数； η 为应力三轴度； σ_1 为第一主应力； $\tilde{\sigma}$ 为等效应力。

剪切准则为：

$$\tilde{\varepsilon}_f = \frac{\varepsilon_{SF}^+ \sinh[h(\theta - \theta^-)] + \varepsilon_{SF}^- \sinh[h(\theta^+ - \theta)]}{\sinh[h(\theta^+ - \theta^-)]} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1 - k_{SF}\eta}{\omega} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{\tau_{\max}}{\tilde{\sigma}} \quad (7)$$

式中： $\tilde{\varepsilon}_f$ 为剪切应变； θ 为应力状态表征参数； θ^+ 和 θ^- 分别为大应变和小应变表征参数； ω 为最大剪应力表征参数； ε_{SF}^+ 、 ε_{SF}^- 、 h 、 k_{SF} 为材料参数； τ_{\max} 为最大剪切应力。

失效模型的损伤产生因子为：

$$\omega_D = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (8)$$

式中： ω_D 为损伤产生因子； ε_p 为累积塑性应变。

当 ω_D 为 1 时，材料发生失稳变形，之后损伤进一步累积，DIEM 模型的损伤因子 D_{DIEM} 的表达式为：

$$\dot{D}_{DIEM} = \frac{\dot{u}^p}{\frac{\partial u_f^p}{\partial D_{DIEM}}} \quad (9)$$

式中： u^p 为当前塑性位移； u_f^p 为不同应力状态的失效塑性位移。

当 $D_{DIEM} = 1$ 时, 材料断裂失效。

2.1.2 GISSMO 断裂失效模型

GISSMO 断裂准则模型中, 假设损伤演化及断裂与应力三轴度有关^[11-12]。损伤以非线性方式进行积累, GISSMO 模型的损伤因子 D_{GISSMO} 为:

$$D_{GISSMO} = \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \right)^n \quad (10)$$

式中: n 为损伤指数。

对式 (10) 求导, 得到损伤增量 ΔD_{GISSMO} :

$$\Delta D_{GISSMO} = \frac{n \times D_{GISSMO}^{(1-\frac{1}{n})}}{\varepsilon_f} \Delta \varepsilon_p \quad (11)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为累积塑性应变的增量。

当 $D_{GISSMO} = 1$ 时, 单元失效。

GISSMO 断裂失效模型中假设损伤会影响应力, 为了描述材料变形损伤后出现的应力衰减, 引入了不稳定性变形因子 F ^[13]。

D_{crit} 为 $F=1$ 时的损伤因子, 用于实现材料发生不稳定变形时应力和损伤的耦合响应, m 为应力衰减指数。当 $F=1$ 时标志着材料开始发生局部不稳定变形, 此时, 应力将按式 (12) 进行衰减。

$$\sigma^* = \sigma \left[1 - \left(\frac{D_{GISSMO} - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \right] \quad (12)$$

$$\Delta F = \frac{n \times F^{(1-\frac{1}{n})}}{\varepsilon_{crit}} \Delta \varepsilon_p \quad (13)$$

式中: σ^* 为考虑损伤因子后的应力值; ΔF 为不稳

定性变形因子变化量; ε_{crit} 为损伤因子达到 D_{crit} 时的应变。

由以上失效模型分析可以发现, 断裂失效表征模型通过非线性累积的方式, 表征材料从失稳到失效的过程, 其中的拟合系数可以通过对不同应力形式的失效试样开展测试获得, 主要获取断裂失效区域的应力三轴度和极限塑性应变。根据待拟合的系数, 需要至少 5 组不同的设计试样, 包括拉伸、剪切、平面应变等不同的应力失效形式。因此, 这里设计了剪切、中心孔拉伸、R10 缺口拉伸、R5 缺口拉伸和胀形这 5 种试验形式, 表征不同形式的断裂失效。

2.2 断裂失效试验测试

根据设计尺寸加工完试样后, 采用万能拉伸试验机和成形试验机完成各测试, 其中, 拉伸试验中虚拟标距为 20 mm, 所有试验的加载速度为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 每个试样重复试验 3 次, 提取各试样的力-位移曲线, 如图 5 所示。开展试验重复性分析时, 选取其中一次测试作为基准数据, 误差分析结果如表 2 所示。

根据力-位移曲线和误差分析结果可知, 不同断裂失效试样测试结果的重复度较高, 整体误差均不超过 5%。

2.3 断裂失效试验仿真分析

由于断裂失效试样的应力三轴度无法通过试验测试提取, 因此, 需要搭建高精度的断裂失效试验仿真分析模型, 仿真模型的加载条件和约束情况与试

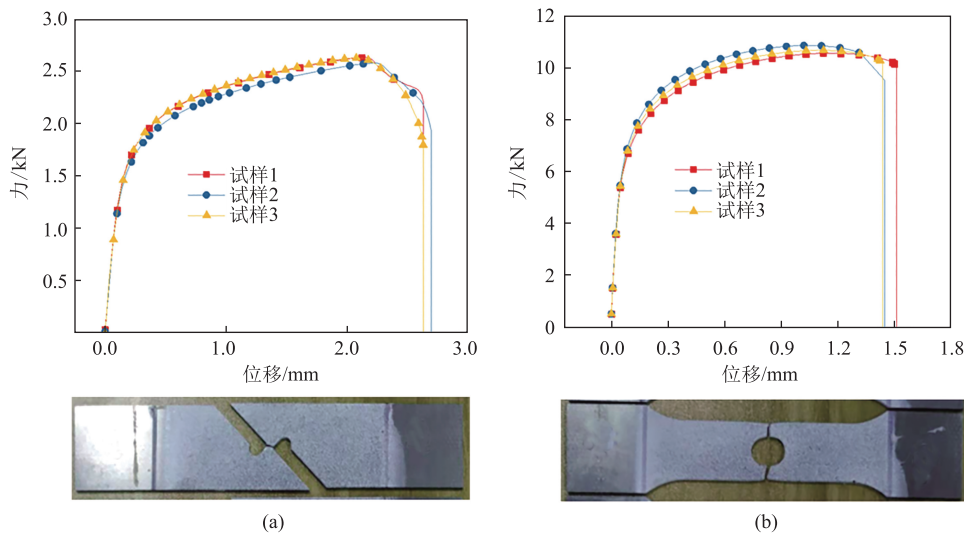


图 5 各试样的承载力-位移曲线和断裂实物图

(a) 剪切试验 (b) 中心孔拉伸试验 (c) R10 缺口拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 5 Bearing force-displacement curves and physical pictures of fracture for each specimen

(a) Shear test (b) Center hole tensile test (c) R10 notch tensile test (d) R5 notch tensile test (e) Bulging test

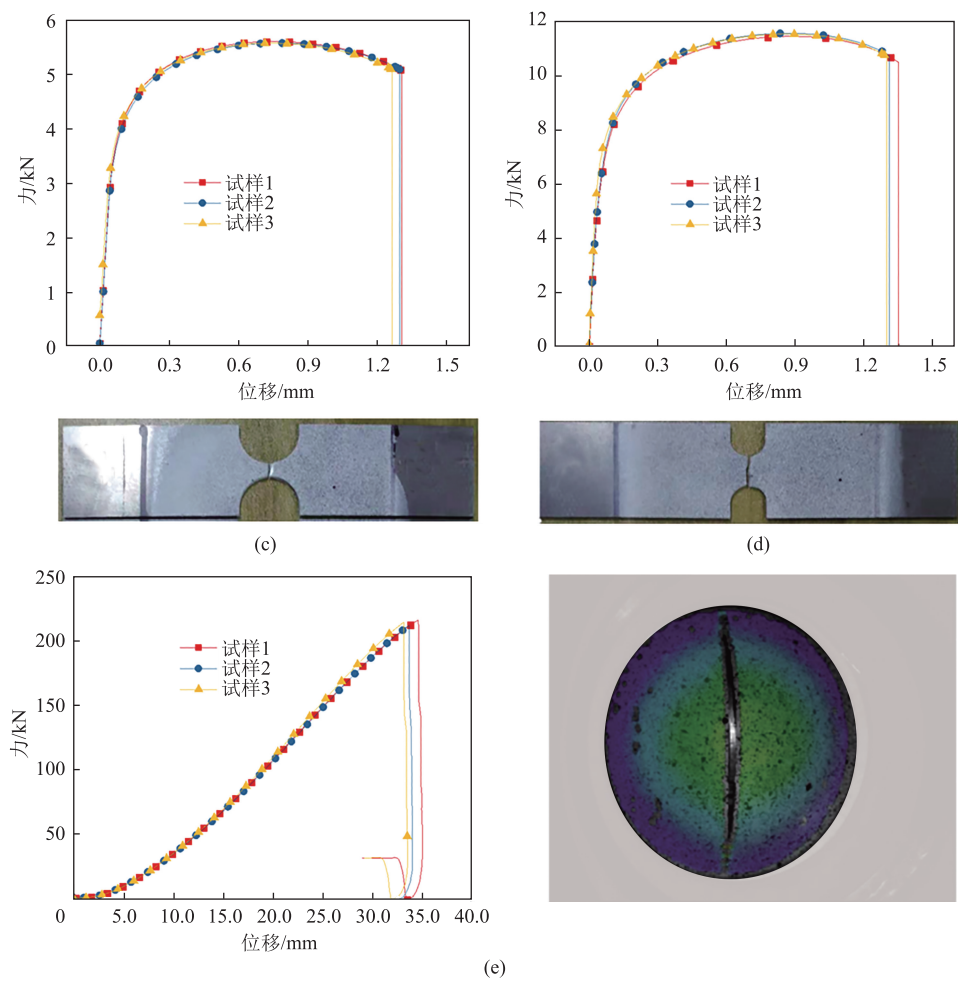


图 5 （续）
Fig. 5 （Continuous）

表 2 重复性试验误差分析结果（%）				
Table 2 Error analysis results of repetitive test（%）				
试验	试样	断裂位移	积分面积	最大力值
剪切	1	基准		
	2	2.39	-0.33	-2.02
	3	-0.02	-0.61	-0.18
中心孔拉伸	1	4.83	3.83	-1.03
	2	-4.11	-4.40	1.74
	3	基准		
R10 缺口拉伸	1	0.73	1.41	0.49
	2	基准		
	3	-2.56	-1.98	-0.07
R5 缺口拉伸	1	2.91	1.81	-0.98
	2	基准		
	3	-1.03	-0.79	-0.25
胀形	1	2.74	4.49	2.05
	2	基准		
	3	-1.60	-1.21	1.24

验测试保持一致，而材料模型参数的定义需应用到 LS-DYNA 中的 MAT 24 材料卡片^[14-15]，材料的硬化模型则如式（1）所示，以仿真模型输出的力-位移曲线与试验结果的误差最小为目标，通过迭代优化获取组合硬化模型的调节系数 α 的最优值，最终获得的对比曲线如图 6 所示，仿真与试验的最大力值误差如表 3 所示。

由图 6 和表 3 可知，模型仿真结果的精度较高，各试样与实测结果的平均误差不超过 3%，单个测试试样的最大误差不超过 5%，仿真模型可以应用于下一步应力三轴度的提取，此时的最优值为 0.527，外延曲线如图 4 所示。

2.4 断裂失效参数提取

各试验提取的应力三轴度 η 的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知，测试过程中，断裂失效区域的应力三轴度随试样变形而发生变化，但变化幅度较小，因此，需要通过积分获取整个区域的平均应力

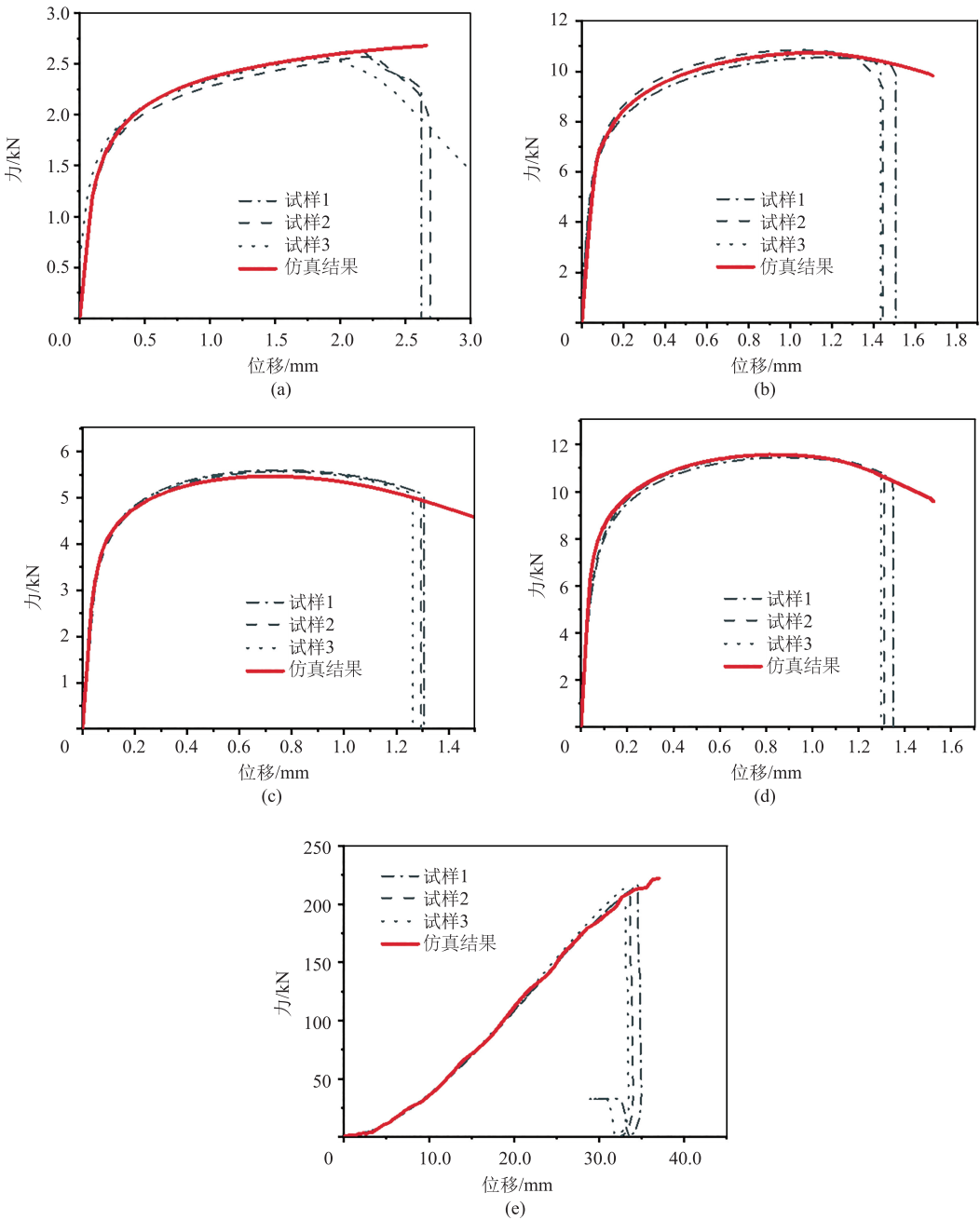


图6 仿真与试验的力-位移曲线对比

(a) 剪切试验 (b) 中心孔拉伸试验 (c) R10 缺口拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 6 Comparison of force-displacement curves between simulation and test

(a) Shear test (b) Center hole tensile test (c) R10 notch tensile test (d) R5 notch tensile test (e) Bulging test

表 3 仿真与试验的最大力值误差分析结果 (%)

Table 3 Error analysis results on maximum force value between simulation and test (%)

试验	试样 1	试样 2	试样 3	平均误差
剪切	1.90	4.15	1.97	2.67
中心孔拉伸	1.80	-0.98	0.75	1.18
R10 缺口拉伸	-2.36	-1.88	-1.81	2.02
R5 缺口拉伸	1.10	0.10	0.36	0.52
胀形	-1.49	-1.01	-3.25	1.92

三轴度值,由此获得断裂失效模型拟合所需要的参数,如表 4 所示。

3 断裂失效表征模型分析

3.1 DIEM 断裂失效模型参数标定

基于表 4 中的断裂失效参数及式 (5),拟合获得的 DIEM 模型失效曲线如图 8 所示。

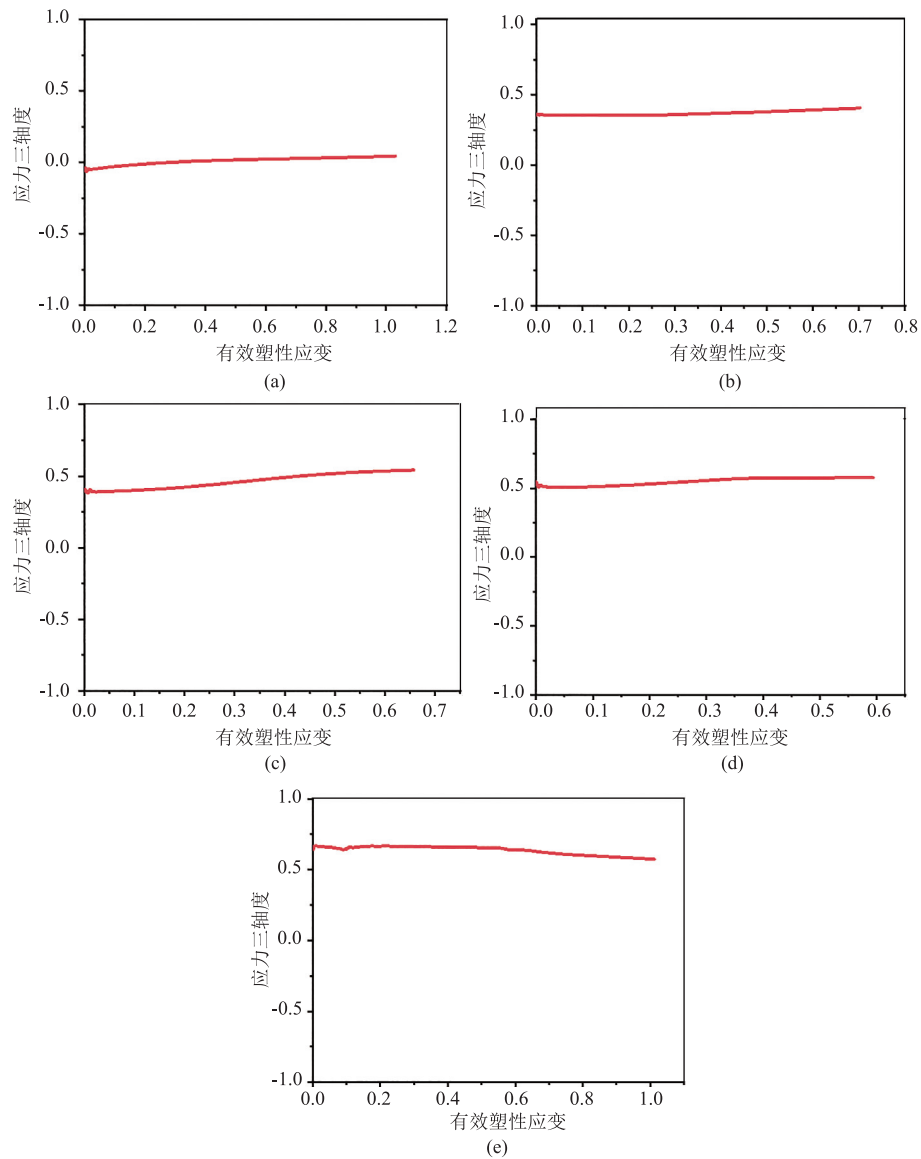


图 7 各试验提取的应力三轴度

(a) 剪切试验 (b) 中心孔拉伸试验 (c) R10 缺口拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 7 Stress triaxiality extracted from each test

(a) Shear test (b) Center hole tensile test (c) R10 notch tensile test (d) R5 notch tensile test (e) Bulging test

表 4 断裂失效参数值		
Table 4 Parameter values of fracture failure		
试验	应力三轴度	极限塑性应变
剪切	0.0086	0.9336
中心孔拉伸	0.3641	0.5736
R10 缺口拉伸	0.4398	0.4660
R5 缺口拉伸	0.5390	0.4458
胀形	0.6594	0.5812

将材料组合硬化模型及 DIEM 断裂失效模型应用到 LS-DYNA 各试样分析的 MAT 24 材料模型中,开展不同失效试样的断裂失效试验仿真。获取仿真和试验的力-位移曲线和断裂形貌对比,如图 9 所示,误差分析如表 5 所示。

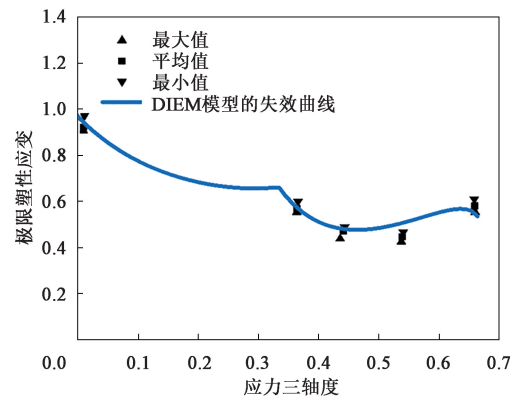


图 8 DIEM 断裂失效模型二维失效曲线

Fig. 8 Two-dimensional failure curve of DIEM fracture failure model

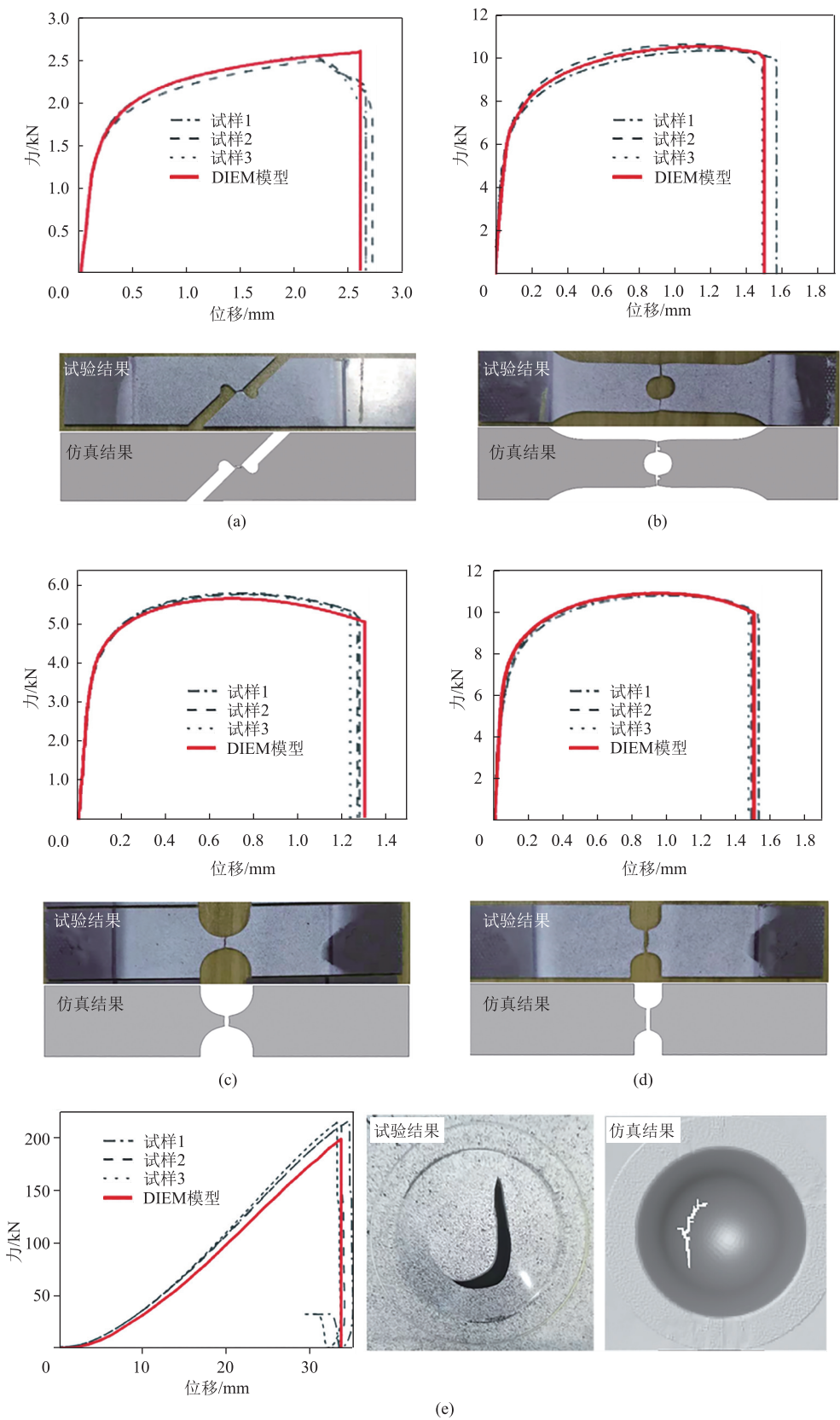


图 9 DIEM 断裂失效模型仿真与试验的力-位移曲线和断裂试样的对比

(a) 剪切试验 (b) 中心孔拉伸试验 (c) R10 缺口拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 9 Comparison of force-displacement curves and fracture specimens between DIEM fracture failure model simulation and test
(a) Shear test (b) Center hole tensile test (c) R10 notch tensile test (d) R5 notch tensile test (e) Bulging test

表 5 DIEM 断裂失效模型仿真误差 (%)

Table 5 Simulation errors of DIEM fracture failure model (%)

试验	断裂位移			平均误差
	试样 1	试样 2	试样 3	
剪切	-1.90	-4.09	-1.90	2.63
中心孔拉伸	-6.62	6.02	-1.40	4.68
R10 缺口拉伸	2.31	2.31	5.56	3.39
R5 缺口拉伸	-1.48	1.53	2.31	1.77
胀形	-2.89	-0.15	1.45	1.50

试验	曲线积分面积（断裂能量）			平均误差
	试样 1	试样 2	试样 3	
剪切	-0.70	0.25	-0.10	0.35
中心孔拉伸	-6.89	3.01	-2.82	4.24
R10 缺口拉伸	-1.63	-0.60	1.64	1.29
R5 缺口拉伸	0.03	1.87	2.68	1.53
胀形	-7.56	-6.59	-5.47	-6.54

由图 9 中试验和仿真的力-位移曲线对比及关键参数误差分析可以发现，DIEM 断裂失效模型的预测精度比较高，最大误差出现于胀形试验的积分面积，平均误差达到了 6.54%，其次为中心孔拉伸试验，其断裂位移和积分面积误差均超过了 4%，其他参数的误差均未超过 4%，表明模型预测的精度较高，与实测结果一致性较高。

3.2 GISSMO 断裂模型参数标定

完整的 GISSMO 断裂失效模型包括多条曲线和参数^[16]，采用 LS_OPT 进行迭代优化，经过 21 轮迭代优化，获得最优结果，此时的损伤累积指数为 4，应力衰减指数为 1.5，应用优化结果，获得平滑的断裂失效曲线和失稳曲线，如图 10 所示。

将材料组合硬化模型和 GISSMO 断裂失效模型应用到 LS-DYNA 仿真模型中，定义材料的性能参数，结果对比如图 11 所示，误差对比如表 6 所示。

由图 11 和表 6 可以发现，GISSMO 断裂失效模型的预测精度比较高，最大误差出现在 R10 缺口拉伸的断裂位移，平均误差达到了 5.73%，其次为胀形试验的积分面积，达到了 5.59%。

3.3 两种断裂失效模型标定结果对比

将两种断裂失效模型分别与试验测试结果进行断裂位移和断裂能量（曲线积分面积）误差对比，

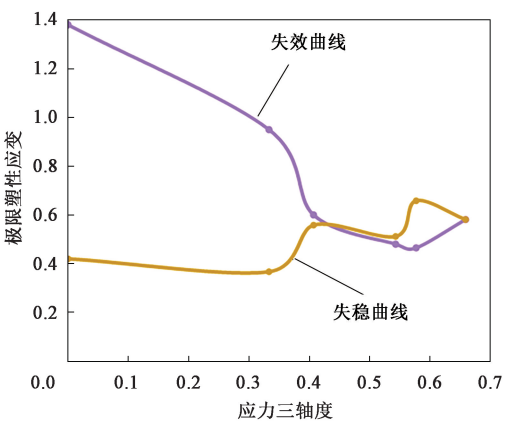


图 10 GISSMO 断裂失效模型的失效曲线和失稳曲线

Fig. 10 Failure and instability curves of GISSMO fracture failure model

结果如表 7 所示。

从对比结果可以看出，DIEM 和 GISSMO 两种断裂失效模型的综合精度均较高，但 DIEM 模型的精度略高于 GISSMO 模型，达到了 97% 左右，而 GISSMO 模型则在 94% 左右；由不同试样的误差对比可以看出，整体而言 DIEM 模型的断裂位移和曲线积分面积的误差略低于 GISSMO 模型，DIEM 模型的各项试样误差波动较大，而 GISSMO 模型则相对均衡，这主要与模型参数的获取方式有关，GISSMO 模型通过迭代优化获取相关参数，各试样的误差分布相对均衡。

4 结论

(1) 采用 Voce++ 和 Hockett-Sherby 组成混合硬化模型，调节系数为 0.527，高强度双相钢 DP780D+Z 外延模型的精度最高，各试样与实测结果的平均误差不超过 3%。

(2) 断裂失效区域的应力三轴度随试样变形而发生变化，但变化幅度较小，因此，需要通过积分获取整个区域的平均应力三轴度值。

(3) DIEM 模型的断裂位移和曲线积分面积的误差略低于 GISSMO 模型，但 DIEM 模型的各项试样误差波动较大，而 GISSMO 模型则相对均衡。

(4) DIEM 和 GISSMO 两种断裂失效模型的综合精度均较高，但 DIEM 模型的精度略高于 GISSMO 模型，达到了 97% 左右，而 GISSMO 模型则在 94% 左右；DIEM 断裂失效模型的表征精度更优。

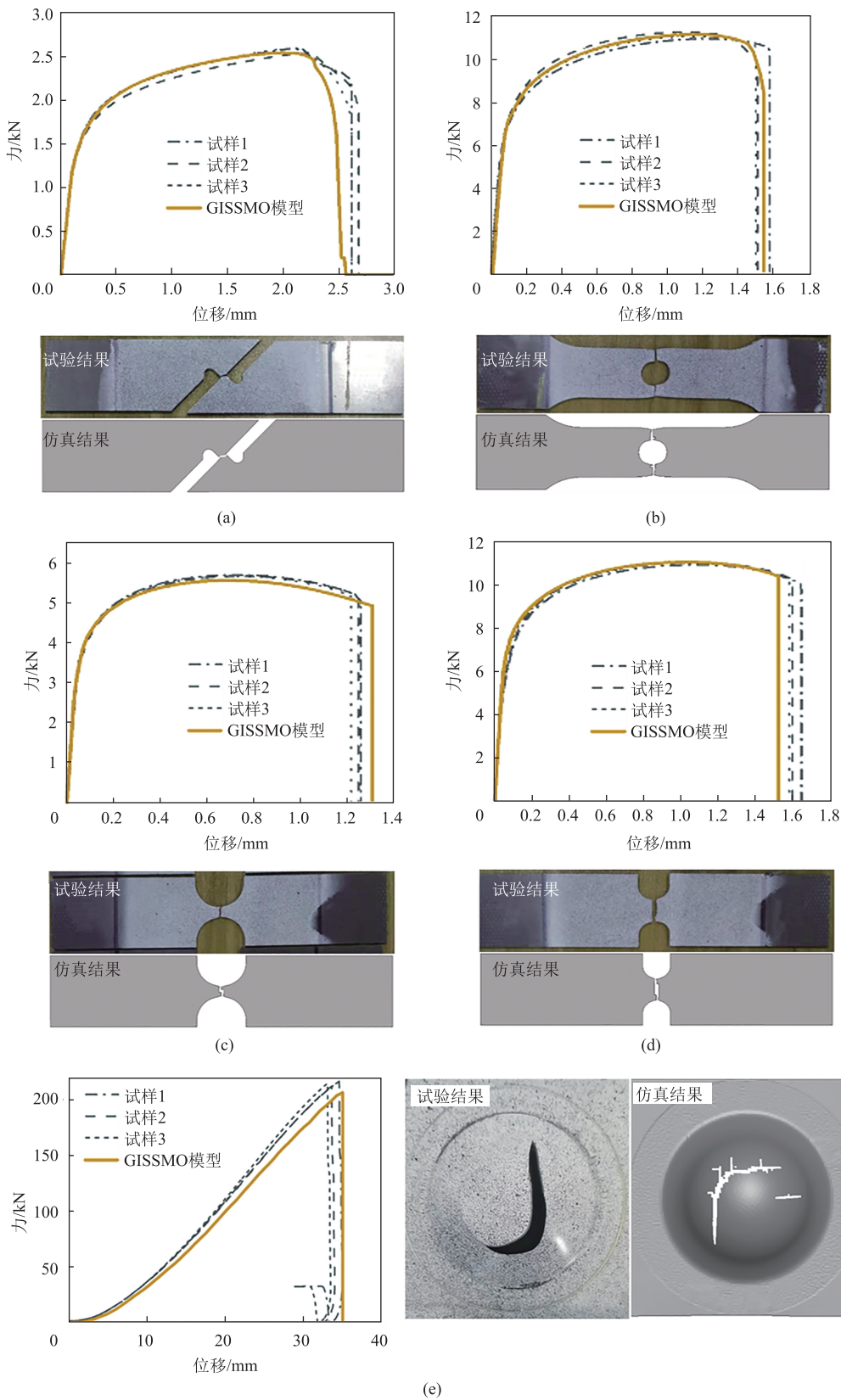


图 11 GISSMO 断裂失效模型仿真与试验的力-位移曲线和断裂试样的对比

(a) 剪切试验 (b) 中心孔拉伸试验 (c) R10 缺口拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 11 Comparison of force-displacement curves and fracture specimens between GISSMO fracture failure model simulation and test
(a) Shear test (b) Center hole tensile test (c) R10 notch tensile test (d) R5 notch tensile test (e) Bulging test

表 6 GISSMO 断裂失效模型仿真误差 (%)

Table 6 Simulation errors of GISSMO fracture failure model (%)

试验	断裂位移			平均误差
	试样 1	试样 2	试样 3	
剪切	-0.76	-2.97	-0.76	1.50
中心孔拉伸	-7.95	4.51	-2.80	5.09
R10 缺口拉伸	4.62	4.62	7.94	5.73
R5 缺口拉伸	-7.41	-4.58	-3.85	5.28
胀形	1.27	4.13	5.80	3.73

试验	曲线积分面积（断裂能量）			平均误差
	试样 1	试样 2	试样 3	
剪切	-1.38	-0.43	-0.78	0.86
中心孔拉伸	-8.70	1.00	-4.71	4.80
R10 缺口拉伸	2.11	3.18	5.50	3.60
R5 缺口拉伸	-5.99	-4.26	-3.51	4.59
胀形	-10.17	-3.89	-2.72	5.59

表 7 两种断裂失效模型误差对比 (%)

Table 7 Error comparison of two fracture failure models (%)

试验	断裂位移		曲线积分面积（断裂能量）	
	DIEM 模型	GISSMO 模型	DIEM 模型	GISSMO 模型
剪切	2.63	1.50	0.35	0.86
中心孔拉伸	4.68	5.09	4.24	4.80
R10 缺口拉伸	3.39	5.73	1.29	3.60
R5 缺口拉伸	1.77	5.28	1.53	4.59
胀形	1.50	3.73	6.54	5.59
综合精度	97.21	94.83	96.48	94.06

参考文献：

[1] 唐远寿, 司宇, 徐正萌, 等. 超高强度钢在汽车轻量化中的应用及研究进展 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (10): 247-254.

Tang Y S, Si Y, Xu Z M, et al. Application and research progress of ultra-high strength steel in automotive lightweight [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48 (10): 247-254.

[2] 徐莉, 郑崇嵩, 侯聚英, 等. 车用双相高强钢的动态力学性能及本构模型的对比 [J]. 机械工程材料, 2023, 47 (11): 74-80.

Xu L, Zheng C S, Hou J Y, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model contrast of dual-phase high strength steel for vehicles [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47 (11): 74-80.

[3] 冯毅, 万鑫铭, 周佳, 等. 汽车用先进高强钢板材断裂性能研究进展 [J]. 汽车工程学报, 2023, 13 (3): 273-297.

Feng Y, Wan X M, Zhou J, et al. Research progress on fracture

properties of advanced high-strength steel sheet for automobiles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13 (3): 273-297.

[4] 周佳, 梁宾, 万鑫铭, 等. 汽车用金属板材的材料动态响应与断裂性能研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (20): 339-349.

Zhou J, Liang B, Wan X M, et al. Research on dynamic response and fracture properties of metal materials for vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (20): 339-349.

[5] 朱建琳, 王超超, 王秋月. 基于 GISSMO 失效准则的 DP590 双相钢和热成形钢的断裂特性研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (2): 163-172.

Zhu J L, Wang C C, Wang Q Y, et al. Research on fracture characteristics of DP590 double-phase steel and hot-formed steel based on GISSMO failure criterion [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (2): 163-172.

[6] 孔玉强, 张晓莹, 段朋, 等. 基于 GISSMO 断裂失效模型的高强钢落锤压溃仿真分析 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 230-239.

Kong Y Q, Zhang X Y, Duan P, et al. Simulation analysis of high strength steel drop test based on GISSMO fracture failure model [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 230-239.

[7] 张伟, 刘华赛, 桑贺, 等. 残余奥氏体对双相钢断裂失效性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (11): 185-193.

Zhang W, Liu H S, Sang H, et al. Effects of retained austenite on fracture failure properties of dual-phase steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (11): 185-193.

[8] 方新文, 管佳佳. TC4 钛合金在准静态拉伸下的本构模型及失效参数 [J]. 机械强度, 2022, 44 (4): 831-836.

Fang X W, Guan J J. Constitutive model and failure parameters of TC4 titanium alloy under quasi-static tensile [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44 (4): 831-836.

[9] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].

GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

[10] 梁宾, 张冲, 范吉富, 等. 金属板材高精度断裂卡片研发及应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2022 (8): 28-40.

Liang B, Zhang C, Fan J F, et al. Development and application of high-precision fracture card for sheet metal [J]. Automobile Technology & Material, 2022 (8): 28-40.

[11] 巢成新, 于强, 李秋. 汽车用先进高强钢本构模型与韧性断裂模型研究进展 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (1): 77-86.

Chao C X, Yu Q, Li Q. Research progress on constitutive model and ductile fracture model of advanced high strength steel for automotive applications [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16 (1): 77-86.

[12] 张骥超, 连昌伟, 韩非. 超高强钢材料碰撞失效行为仿真预测技术研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2023 (8): 15-20.