

# 基于 GISSMO 失效模型的 750L 大梁钢断裂失效行为研究

殷继丽, 丁明凯, 展英姿, 金光宇, 曹光明, 孙 鹏

(山东钢铁集团日照有限公司 钢铁研究院, 山东 日照 276826)

**摘要:** 为研究 750L 大梁钢的断裂失效行为, 对其进行动态拉伸试验, 采用 Swift-Hockett-Sherby 模型处理得到真实应力-真实应变曲线, 采用多线性弹塑性材料本构模型来有效表征材料的塑性流动行为。并对剪切、单向拉伸、中心孔、R5 缺口及胀形 5 种典型应力状态下的断裂失效行为进行试验分析, 得到断裂失效应变与平均应力三轴度并拟合出 GISSMO 曲线。最后, 基于试验数据通过有限元仿真进行 GISSMO 断裂失效模型对标。结果表明: 采用基于 GISSMO 断裂准则建立的 750L 大梁钢的 GISSMO 断裂准则模型对各试样拉伸过程进行仿真, 抗拉力与断裂位移的误差均不超过 2.67%, 仿真结果与试验结果相吻合, 说明该材料卡片能够有效预测 750L 大梁钢的断裂失效过程。

**关键词:** 750L 大梁钢; 断裂失效; 本构模型; GISSMO 断裂失效模型; 应力三轴度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.031

**中图分类号:** TG146

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 02-0250-06

## Research on fracture failure behavior for 750L large beam steel based on GISSMO failure model

Yin Jili, Ding Mingkai, Zhan Yingzi, Jin Guangyu, Cao Guangming, Sun Peng

(Research Institute of Iron and Steel, Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276826, China)

**Abstract:** The dynamic tensile experiments of 750L large beam steel were conducted to investigate its fracture failure behavior, the true stress-true strain curves were obtained by the Swift-Hockett-Sherby model and the plastic flow behavior of the material was effectively characterized by a multi-linear elastic-plastic material constitutive model. Then, the experimental analysis on the fracture failure behavior under five typical stress states was conducted, including shear, uniaxial tension, center hole, R5 notch and bulging. Furthermore, the fracture failure strain and the average stress triaxiality were obtained, and the GISSMO curve was fitted. Finally, based on the experimental data, the GISSMO fracture model was benchmarked by finite element simulation. The results show that when the tensile process of each specimen is simulated by the GISSMO fracture criterion model of 750L large beam steel based on the GISSMO fracture criterion, the error between tensile force and fracture displacement does not exceed 2.67%, and the simulation results are consistent with the experimental results, indicating that the material card can effectively predict the fracture failure process of 750L large beam steel.

**Key words:** 750L large beam steel; fracture failure; constitutive mode; GISSMO fracture failure model; stress triaxiality

随着计算机技术的发展及仿真软件应用的逐渐提升, 通过计算机仿真汽车碰撞安全性能的 CAE (Computer Aided Engineering) 仿真分析已成为一大趋势<sup>[1]</sup>。断裂卡片的发展及精度提升是提高碰撞安全分析的重要一环。本构模型及断裂模型的选用又是断裂卡片开发成功的关键。近年来, 技术人员对断裂卡片相关准则进行了大量的研究。赵清江等<sup>[1]</sup>采用 Swift-Hockett-Sherby 硬化准则及 MMC (Modi-

fied Mohr-Coulomb) 断裂准则有效地预测了 22MnB5 高强度钢的塑性流体力学行为和断裂失效过程。郭鹤等<sup>[2]</sup>对超高强双相钢 HC820/1180DPD+Z 的断裂失效行为进行了研究, 结果表明, Swift-Hockett-Sherby 混合模型对 HC820/1180DPD+Z 钢硬化曲线的拟合精度较高, 应用 MMC 断裂失效模型后, 断裂形貌与试验结果一致。刘立熙等<sup>[3]</sup>研究了基于应力三轴度和洛德参数的 6061 和 7075 铝合金的断裂过程, 结果表明, 应力三轴度的演变与试样形状及材料性质相关; 材料的失效应变受应力三轴度和洛德参数的影响。朱建琳等<sup>[4]</sup>基于 GISSMO 失效模型分别建立了 DP590 双相钢和热成形钢的材料模型, 并采用 60°拉剪和 R6 缺口工况进行对标, 仿

收稿日期: 2024-08-06; 修订日期: 2024-11-09

基金项目: 山东泰山产业领军人才专项 (tscx202312011)

作者简介: 殷继丽 (1993-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 2803708366@qq.com

真结果与试验结果相符。徐晨阳等<sup>[5]</sup>对 DH590 高强钢的断裂失效行为进行研究发现,修正的幂函数硬化模型 (Modified Power Law, MPL) 与试验结果吻合度更好,且在 R20 缺口拉伸试验中,GISSMO 模型相较于 J-C (Johnson-Cook) 损伤模型能更好地预测断裂失效行为。梁宾等<sup>[6]</sup>以 6016 铝合金板材为研究对象,发现与传统成形极限图相比,GISSMO 失效模型更贴近试验结果,具有更高的准确性。马浩林<sup>[7]</sup>成功开发了热成形钢的 GISSMO 失效模型,并将其引入至热冲压薄壁结构的压溃仿真过程中,探究了损伤对热冲压薄壁结构抗撞性能的影响。通过大量研究发现,相较于成形极限图 (Forming Limit Diagram, FLD) 和 J-C 失效准则,GISSMO 断裂失效模型将材料断裂应变值变化、非线性应变路径依赖及非线性损伤累积均考虑在内,符合材料在不同受力状态下的断裂失效特征,在复杂工况下更适用于断裂失效表征<sup>[8-9]</sup>。目前,板材的断裂失效研究主要应用于铝合金、高强度钢等材料,对于厚规格大梁钢的研究较少,因此,本文对 750L 大梁钢的断裂失效行为进行分析,对开展高精度断裂失效模型研究具有重要意义。

本文基于 GISSMO 断裂失效模型对 750L 大梁钢进行断裂失效研究。通过力学性能试验得到材料在不同应变速率下的拉伸试验数据,通过 Swift-Hockett-Sherby 模型处理得到真实应力-真实应变曲线,基于试验数据通过有限元仿真进行材料本构模型参数标定。基于材料断裂失效试验,得到材料在不同应力三轴度下的断裂失效应变,进而对 GISSMO 断裂失效模型进行断裂参数标定,得到材料断裂失效模型。分别对剪切、单向拉伸、中心孔、R5 缺口及胀形试样进行拉伸过程仿真,与试验结果进行对比,从而验证断裂模型的准确性。该方法能够为大梁钢断裂模型的研究提供一定的参考。

## 1 试验准备

### 1.1 试验材料

750L 大梁钢作为一种汽车大梁钢板,主要用于制造汽车纵梁、横梁等零件,具有较高的强度、冷弯性能、高冲击韧性及良好的冲压成形性能。试验材料选用山东钢铁集团日照有限公司生产的厚度为 3.1 mm 的 750L 大梁钢,其主要力学性能如表 1 所示。

表 1 750L 大梁钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 750L large beam steel

参数	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
数值	758	844	22.5

### 1.2 试验方法

试验内容包括动态拉伸试验及断裂失效试验。动态拉伸试验采用 Zwick HTM 5020 型高速拉伸试验机,试验机量程为 50 kN。试验参考 GB/T 30069.2—2016<sup>[10]</sup>进行。试样尺寸如图 1a 所示,试验应变速率分别为 0.1、1、10、100、200、500 和 1000 s<sup>-1</sup>,每个应变速率下拉伸试验不少于 3 次。为得到不同应力三轴度下材料的断裂应变,断裂失效试验采用剪切试样、单向拉伸试样、中心孔试样、R5 缺口试样及胀形试样等不同形状的样件进行拉伸,试样形状及尺寸如图 1b~图 1f 所示。断裂失效试验均按照 GB/T 228.1—2021<sup>[11]</sup>进行。采用 Zwick 50 拉伸试验机,试验量程为 50 kN,试验应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>,每个试样拉伸试验不少于 3 次。其中单向拉伸试验获得的工程应力-工程应变数据可用于补充动态拉伸试验中应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>的数据。

使用 DIC (Digital Image Correlation) 光学测量方法系统记录材料的动态拉伸试验以及断裂失效试验过程,通过软件计算和分析样件的变形,并提取剪切试样、单向拉伸试样、中心孔试样、R5 缺口试样及胀形试样的断裂失效应变。

## 2 本构模型

通过单向拉伸试验和动态拉伸试验获得 750L 大梁钢在不同应变速率下的工程应力-工程应变曲线,对其进行处理后获得真实应力-真实应变曲线,剔除颈缩点之后的数据,然后采用 Swift-Hockett-Sherby 模型对多应变速率曲线进行统一拟合外推至真实应变为 1。Swift-Hockett-Sherby 模型<sup>[12]</sup>综合了 Swift 模型和 Hockett-Sherby 模型拟合应变硬化强度的特点,通过设置加权系数调整硬化曲线,符合 750L 大梁钢的性能特征。拟合后不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线如图 2 所示。

750L 大梁钢的本构模型采用多线性弹塑性材料模型 (MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY),多线性弹塑性材料模型是常用的各向同性本构模型,常用于钢质材料。通过输入材料密度、弹性模量、泊松比以及真实应力-真实应变曲线定义材料的塑

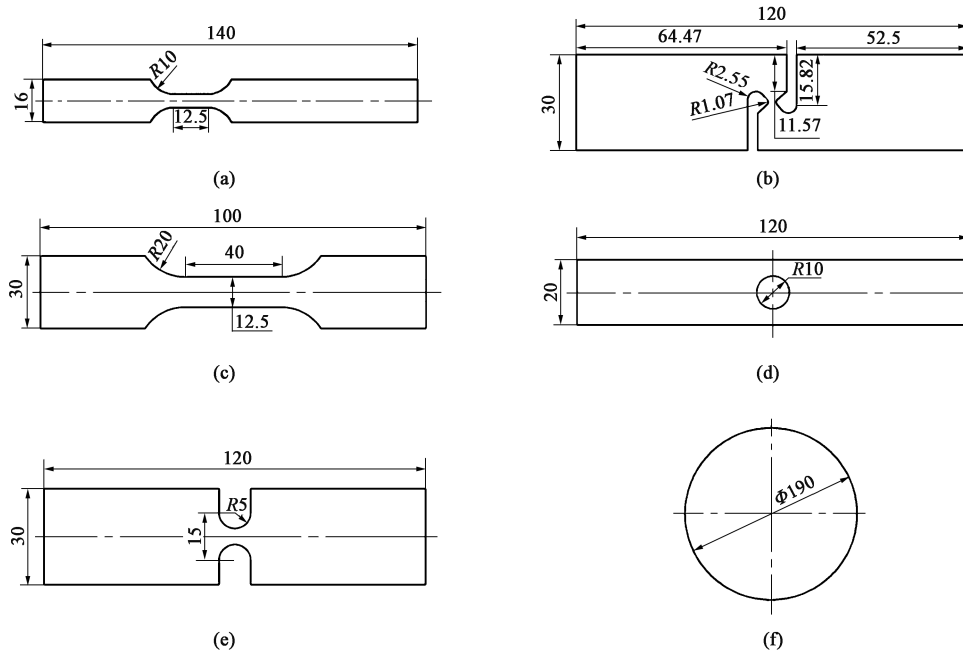


图 1 试样形状及尺寸

- (a) 动态拉伸试样 (b) 剪切拉伸试样 (c) 单向拉伸试样 (d) 中心孔拉伸试样 (e) R5 缺口拉伸试样 (f) 胀形试样
- Fig. 1 Shape and dimensions of specimens
- (a) Dynamic tension specimen (b) Shear tension specimen (c) Uniaxial tension specimen (d) Tension specimen with center hole  
(e) Tension specimen with R5 notch (f) Bulging specimen

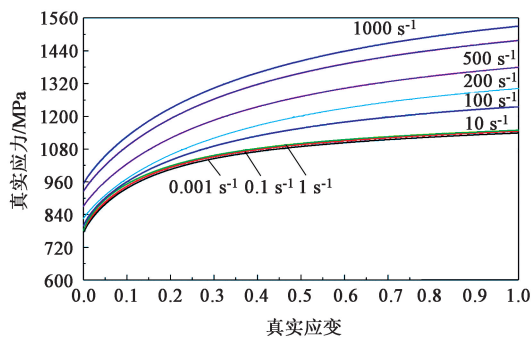


图 2 不同应变速率下的真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves under different strain rates

性变形行为。由图 2 可知,随着应变速率的提高,750L 大梁钢的力学性能具有一定的差异,因此,标定本构模型时需要考虑应变速率的影响。在本构模型设置界面不再输入单一速率下的真实应力-真实应变曲线,而是通过设置 Table 命令,将应变速率与各真实应力-真实应变曲线进行关联,从而提高材料在不同应变速率下变形的准确度。

### 3 断裂失效模型

GISSMO 断裂失效模型将板料在不同应力状态下的断裂应变、板料变形的非线性应变路径及非线性

性的损伤累积方式均考虑在内,更适用于复杂工况下板材断裂失效现象的表征,因此,选择 GISSMO 断裂失效模型表征材料断裂失效行为。

应力三轴度与材料的形状息息相关,在材料变形过程中应力三轴度并非恒定不变,而是随着变形过程中材料形状的不同发生变化,因此,采用初始应力三轴度并不能准确表述断裂时刻的应力三轴度,通过平均应力三轴度来表述材料断裂时的应力三轴度更加合理。平均应力三轴度采用仿真得到的应力三轴度与等效塑性应变的积分来表示<sup>[13-15]</sup>,公式如式 (1) 所示,结果如表 2 所示。

$$\sigma_{av}^* = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^* d\varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{av}^*$  为平均应力三轴度;  $\varepsilon_f$  为断裂应变;  $\sigma^*$  为应力三轴度;  $\varepsilon$  为等效塑性应变。

采用 DIC 光学测量方法系统记录断裂失效试验过程,通过分析软件对样件散斑进行处理,并提取各断裂失效试样断裂前一帧的等效塑性应变作为断裂失效应变,试验结果如表 2 所示。GISSMO 失效曲线为断裂失效应变与应力三轴度的拟合曲线,根据表 2 中的平均应力三轴度和断裂失效应变,采用数据拟合的方式拟合出 GISSMO 失效曲线。拟合后的



表 2 750L 大梁钢的平均应力三轴度及断裂应变值

Table 2 Mean stress triaxiality and fracture strain values of 750L large beam steel

试验	平均应力三轴度	断裂失效应变
剪切	0.025	0.747
单向拉伸	0.334	1.265
中心孔拉伸	0.403	1.072
R5 缺口拉伸	0.504	0.926
胀形	0.667	0.810

断裂失效曲线如图 3 所示。并通过 LS-OPT 优化软件对材料的损伤累积指数、临界应变、应力退化指数等参数进行优化标定。

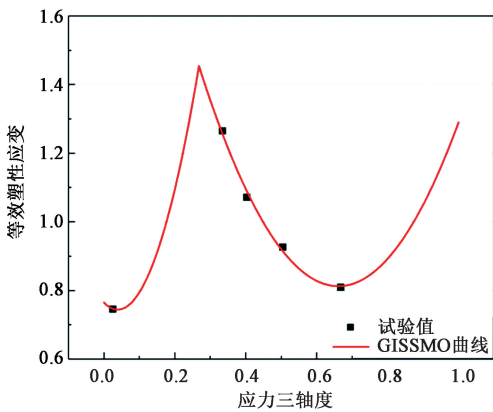


图 3 GISSMO 断裂失效曲线

Fig. 3 GISSMO fracture failure curve

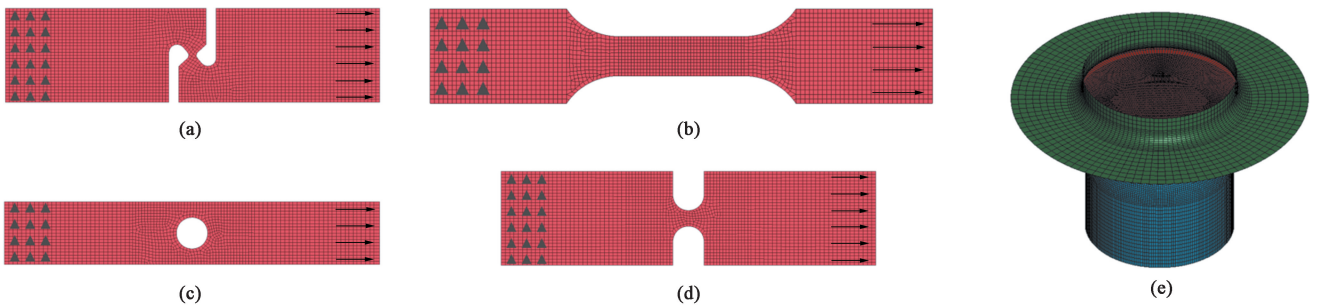


图 4 不同拉伸试验的仿真模型

(a) 剪切拉伸模型 (b) 单向拉伸模型 (c) 中心孔拉伸模型 (d) R5 缺口拉伸模型 (e) 胀形试验模型

Fig. 4 Simulation models for different tension experiments

(a) Shear tension model (b) Uniaxial tension model (c) Center hole tension model (d) R5 notch tension model (e) Bulging experiment model

5 结论

(1) 750L 大梁钢采用 Swift-Hockett-Sherby 模型对应力-应变曲线进行处理，并建立了不同应变速率下的多线性弹塑性本构模型，仿真结果与试验结

4 模型验证

为验证多线性弹塑性材料本构模型及 GISSMO 断裂失效模型的准确度，建立剪切拉伸、单向拉伸、中心孔拉伸、R5 缺口拉伸及胀形试验等 5 种不同应力状态下的拉伸试验过程的仿真模型。对剪切拉伸模型、单向拉伸模型、中心孔拉伸模型及 R5 缺口拉伸模型采用一侧固定、另一侧匀速运动的方式模拟拉伸过程。胀形试验模型包括板料、冲头和压板，在板料边部建立固定区，冲头在板料中心向上匀速运动。以上模型均采用壳单元，单元类型采用三角形和四边形混合的方式，在主要变形区域采用 1 mm 的网格，而在非主要变形区域采用 1.5 mm 的网格，分区划分网格有助于提高计算效率。建立的仿真模型如图 4 所示。

材料卡片采用 \* MAT\_ PIECEWISE\_ LINEAR\_ PLASTICITY 本构模型及 \* MAT\_ ADD\_ DAMAGE\_ GISSMO 断裂失效模型，采用该断裂材料卡片对各应力状态下的仿真模型进行仿真，得到力-位移曲线与试验结果对比如图 5 所示，计算得到抗拉力与断裂时刻的位移误差率分别如表 3 和表 4 所示。可以发现，抗拉力的误差率低于 1.00%，断裂位移的误差率低于 2.67%，说明该断裂材料模型能够有效预测 750L 大梁钢的断裂失效特征。

果相符，表明该本构模型可以预测 750L 大梁钢的塑性流动特征。

(2) 通过 5 种不同应力状态下的拉伸试验，采用 DIC 光学测量方法系统地获得了 750L 大梁钢材料在不同应力状态下的断裂失效应变，结合平均应力三轴度建立 GISSMO 断裂失效曲线，对材料的断

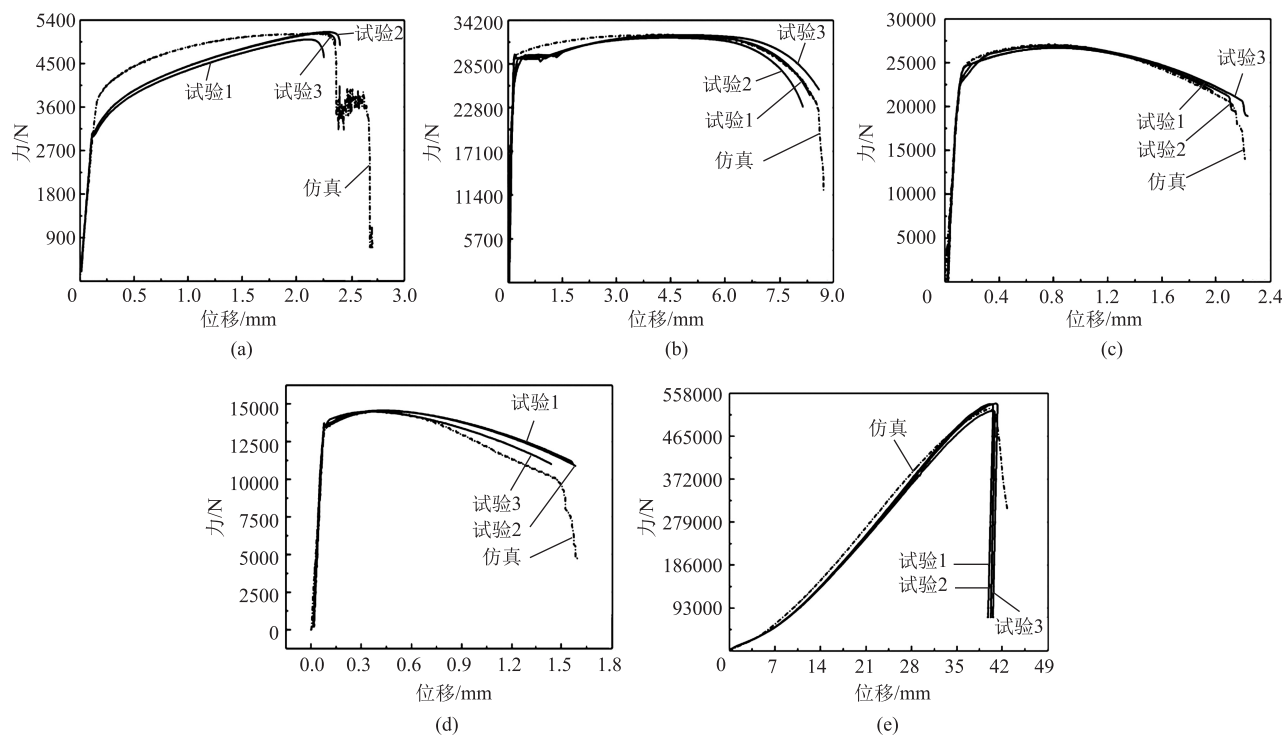


图5 不同拉伸试验的力-位移曲线

(a) 剪切拉伸试验 (b) 单向拉伸试验 (c) 中心孔拉伸试验 (d) R5 缺口拉伸试验 (e) 胀形试验

Fig. 5 Force-displacement curves for different tension experiments

(a) Shear tension experiment (b) Uniaxial tension experiment (c) Center hole tension experiment  
(d) R5 notch tension experiment (e) Bulging experiment

表 3 断裂失效试验抗拉力的误差率汇总

Table 3 Error rate summary of tensile resistance for fracture failure experiments

试验	抗拉力/N					误差率/ %
	试验 1	试验 2	试验 3	平均值	仿真值	
剪切拉伸	5152	5124	4998	5091	5110	0.37
单向拉伸	32062	32247	31900	32070	32200	0.41
中心孔拉伸	26966	26753	26675	26798	27000	0.75
R5 缺口拉伸	14516	14573	14525	14538	14500	-0.26
胀形	534529	535449	519637	529872	525000	-0.92

表 4 断裂失效试验断裂位移的误差率汇总

Table 4 Error rate summary of fracture displacement for fracture failure experiments

试验	断裂位移/mm					误差率/ %
	试验 1	试验 2	试验 3	平均值	仿真值	
剪切拉伸	2.26	2.41	2.36	2.34	2.37	1.14
单向拉伸	8.35	8.17	8.61	8.38	8.60	2.67
中心孔拉伸	1.98	2.10	2.19	2.09	2.14	2.39
R5 缺口拉伸	1.57	1.58	1.44	1.53	1.52	-0.65
胀形	40.82	41.21	40.52	40.85	41.00	0.37

裂模型参数进行优化标定。

(3) 基于多线性弹塑性材料本构模型与 GISSMO 断裂准则，建立了 750L 大梁钢的断裂材料卡片。通过对 5 种不同应力状态下的仿真模型进行断裂仿真分析，仿真结果与试验结果吻合良好，抗拉力与断裂位移的误差率均不超过 2.67%，证明该材料模型能够有效预测 750L 大梁钢的断裂失效行为。

参考文献：

[1] 赵清江, 郭怡晖, 梁宾, 等. 22MnB5 高强度钢板材的断裂失效准则研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 132-137.  
Zhao Q J, Guo Y H, Liang B, et al. Research on fracture criterion of 22MnB5 high-strength steel plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 132-137.

[2] 郭鹤, 张玉华. 基于 MMC 准则的双相高强钢 HC820/1180DP+Z 断裂失效模型分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 235-244.  
Guo H, Zhang Y H. Analysis on fracture failure model for dual-phase high-strength steel HC820/1180DP+Z based on MMC criterion [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 235-244.

[3] 刘立熙, 朱健, 李志强. 基于应力三轴度和罗德参数的 6061 和 7075 铝合金材料断裂失效分析 [J]. 实验力学, 2017, 32

- (3): 342-350.
- Liu L X, Zhu J, Li Z Q. Fracture failure analysis of 6061 and 7075 aluminum alloy based on stress triaxiality and Lode parameter [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32 (3): 342-350.
- [4] 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. 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.
- [5] 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 C Y, Zhang J C, Lian C W. 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.
- [6] 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 B, Zhao Y, Zhao Q J, 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.
- [7] 马浩林. 考虑损伤的热冲压薄壁结构抗撞性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- Ma H L. The Investigation of Crash Worthiness for Hot Stamping Thin-wall Structure Considering Damage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [8] Neukamm F, Feucht M, Bischoff M. On the application of continuum damage models to sheet metal forming simulations [J]. Ibai Publishing, 2008 (4): 616-629.
- [9] 黄建科. 金属成形过程的细观损伤力学模型及韧性断裂准则研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Huang J K. Study on Meso-damage Model and Ductile Fracture Criterion in Metal Forming Processes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [10] GB/T 30069.2—2016, 金属材料 高应变速率拉伸试验 第2部分: 液压伺服型与其他类型试验系统 [S].
- GB/T 30069.2—2016, Metallic materials—Tensile testing at high strain rates—Part 2: Servo-hydraulic and other test systems [S].
- [11] 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].
- [12] 王连轩, 张秀宏, 牛月鹏. 高强 IF 钢应变硬化模型研究及在仿真对标中的应用 [J]. 四川冶金, 2021, 43 (4): 38-41.
- Wang L X, Zhang X H, Niu Y P. Study on strain hardening models of HS-IF steel and application in simulation correlation [J]. Sichuan Metallurgy, 2021, 43 (4): 38-41.
- [13] 陈继恩. 基于应力三轴度的材料失效研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- Chen J E. Research of Material Failure Basic on Stress Triaxiality [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [14] Børvik T, Hopperstad O S, Berstad T. On the influence of stress triaxiality and strain rate on the behavior of a structural steel. Part II. Numerical study [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2003, 22 (1): 15-32.
- [15] Teng X, Wierzbicki T. Evaluation of six fracture models in high velocity perforation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73 (12): 1653-1678.

## 《锻压技术》杂志 2025 年广告征订

**2025 年广告征集工作火热进行中。**本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧)等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652-804 Http: //www.fstjournal.net



锻压技术微信公众号



锻压技术网站