

# 考虑成形损伤的 DP980 钢板 GISSMO 失效模型开发及试验验证

陈自凯<sup>1,2</sup>, 张骥超<sup>1,2</sup>, 徐晨阳<sup>1,2</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司 中央研究院, 上海 201900; 2. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室 (宝钢), 上海 201900)

**摘要:** 以第 3 代超高强钢 DP980 为研究对象, 设计 6 种特征拉伸试样来获取不同的应力状态, 以及应变路径下的极限应变, 开发 GISSMO 失效模型并完成试样级别的仿真标定, 同时基于单向拉伸试样的对标获取网格尺寸修正系数。以理论推导的方式计算帽形梁的折弯损伤, 确定折弯半径, 设计帽形梁准静态三点弯曲试验和帽形梁动态轴向压溃试验, 基于已开发的 GISSMO 失效模型, 利用 DYNA 完成帽形梁折弯仿真并获取折弯后的初始损伤, 最后引入初始损伤并完成试验的仿真对标。结果表明, 考虑初始损伤后, GISSMO 失效模型的仿真结果与试验结果更吻合, 表明在发生较大的加工初始损伤时必须考虑成形初始损伤。

**关键词:** 成形损伤; GISSMO 失效模型; 应力状态; DP980 钢板; 断裂失效

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.015

**中图分类号:** TG146

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0110-09

## Development on failure model GISSMO of DP980 steel sheet and experimental verification considering forming damage

Chen Zikai<sup>1,2</sup>, Zhang Jichao<sup>1,2</sup>, Xu Chenyang<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute (R&D Center), Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

2. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (BAOSTEEL), Shanghai 201900, China)

**Abstract:** For the third generation ultra-high strength steel DP980, six kinds of characteristic tensile specimens were designed to obtain different stress states and ultimate strains under different strain paths, and the failure model GISSMO was developed. Then, the simulation calibration of specimen level was completed, and the grid size correction coefficient was obtained based on the benchmarking of unidirectional tensile specimens. Furthermore, the bending damage of cap-shaped beam was calculated by theoretical derivation, and the bending radius was determined. In addition, the quasi static three-point bending experiment and dynamic axial collapse experiment of cap-shaped beam were designed, based on the developed failure model GISSMO, the bending simulation of cap-shaped beam was completed by DYNA to obtain the initial damage value after bending. Finally, the simulation benchmarking was completed by introducing the initial damage. The results show that the simulation results of failure model GISSMO are more consistent with the experimental results after considering initial damage, which indicates that the forming initial damage must be considered when the larger machining initial damage occurs.

**Key words:** forming damage; failure model GISSMO; stress state; DP980 steel sheet; fracture failure

超高强钢材料作为结构轻量化的解决方案之一, 近年来在汽车行业需求的推动下得到了广泛应用, 材料强度不断提高。与传统钢种相比, 超高强钢材料的塑性存在不同程度的下降, 超高强钢成形过程中的损伤累积更显著。在新的安全法规测试工况下, 采用超高强钢材料的车身关键结构件将承受更大的碰撞能量, 在碰撞过程中发生断裂失效的风险大大增加。

在超高强钢材料碰撞失效的预测方面, 国外金

属材料供应商和主机厂开展了持续的研究工作。德国奔驰汽车率先与 DYNAmore 联合开发了 GIS-SMO 与 DIEM 损伤模型, 并将其植入到通用的显示动力学求解器 DYNA 中, 在行业内产生了很大的影响力, 该方法在福特、菲亚特-克莱斯勒以及通用汽车等多家汽车厂中得到了应用<sup>[1]</sup>。Ar-elorMittal 联合福特汽车完成了 USIBOR 热成形钢材料的 GISSMO 失效模型标定, 通过试验验证了该方法的有效性<sup>[2]</sup>。

除热成形钢以外, GISSMO 失效模型在冷轧超高强钢上也有广泛应用。美钢联采用 GISSMO 失效模型, 针对两种 980 MPa 级别的超高强钢材料进行试验<sup>[3]</sup>。试验结果表明, 在合理的参数设定下,

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2022-01-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0304403)

作者简介: 陈自凯 (1988-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: chenzikai@baosteel.com

GISSMO 失效模型可以较好地模拟高强钢材料的断裂失效行为。

GISSMO 失效模型可以考虑不同应力状态下的失效应变,以及非线性应变路径下的失稳效应以及损伤累积,并且引入了网格尺寸效应来修正参数和冲击动态效应,可以比较准确地预测金属材料的碰撞断裂失效。实际中车身零件经加工成形后一般会有一定的初始损伤、厚度减薄和残余应力及残余应变,而相对于板材减薄和残余应力而言,初始损伤对零件的断裂行为的影响最显著。然而,以往的研究和应用未考虑成形初始损伤,一般只考虑初始应力和厚度减薄<sup>[4-8]</sup>。当有较大的成形初始损伤时,如果不考虑成形初始损伤,会导致仿真预测的结果比实际偏安全,进而失去了断裂失效预测的意义。

本文以第3代超高强钢 DP980 薄板为研究对象,设计6种不同的特征拉伸试样来获取不同应力状态以及应变路径下的极限应变,获取关键的断裂失效曲线,并通过仿真对标获取失稳曲线和网格尺寸修正曲线,完成 GISSMO 失效模型的开发;设计帽形梁准静态三点弯曲试验和帽形梁动态轴向压溃试验,并基于已开发的 GISSMO 失效模型,利用 DYNA 完成帽形梁折弯仿真并获取折弯后的初始损伤,最后引入初始损伤完成帽形梁试验的仿真对标。

## 1 不同应力状态的试验方案

研究对象为厚度  $T=1.2$  mm 的 DP980 钢裸板,首先进行基础力学性能试验,包括标准准静态单向拉伸试验和高速拉伸试验,分别获取准静态硬化曲线和动态硬化曲线,然后开展其他5种不同应力状态和应变路径下的特征试样拉伸试验,获取 GISSMO 失效模型所需的各项关键参数。

### 1.1 基础力学性能试验

标准准静态单向拉伸试样的拉伸方向与轧制方向的夹角为  $0^\circ$ , DIC 数据处理长度为 1.0 mm。实测弹性模量为 191 GPa,屈服强度为 686 MPa,抗拉强度为 1018 MPa,均匀伸长率为 0.086,断裂伸长率为 15.6%。由于标准准静态单向拉伸试验所能获取的极限应变较低,而实际中其他应力状态下的失效应变较高,因此,需要在标准准静态单向拉伸试验硬化曲线的基础上进行适当外推,采用 MPL 外推方程<sup>[9]</sup>并结合单拉有限元仿真,标定的完整的准静态硬化曲线如图1所示。

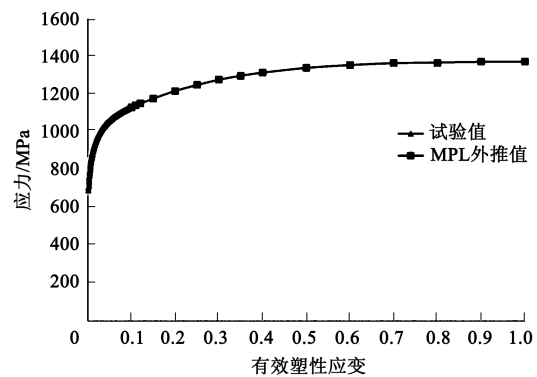


图1 DP980 钢的准静态硬化曲线

Fig. 1 Quasi static hardening curve of DP980 steel

在高速拉伸试验机上分别测试了  $0.001$ 、 $1$ 、 $10$ 、 $100$ 、 $200$  和  $500$   $\text{s}^{-1}$  应变速率下的 DP980 钢的力学性能,以准静态硬化曲线为基础,经处理后得到高速硬化曲线,如图2所示。

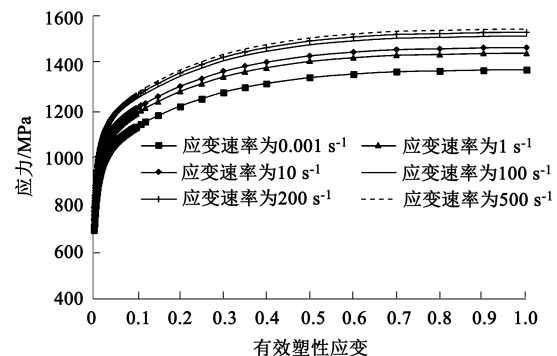


图2 不同应变速率下 DP980 钢的高速硬化曲线

Fig. 2 High speed hardening curves of DP980 steel under different strain rates

### 1.2 特征试样拉伸试验

金属材料在不同应力状态下的断裂失效应变不同<sup>[10]</sup>,应力状态可以用应力三轴度  $\eta$  表征<sup>[11]</sup>,如式(1)所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta &= \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \\ \sigma_v &= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中:  $\sigma_m$  为静水压力;  $\sigma_v$  为等效应力;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一、第二、第三主应力。

设计了5种特征试样 DIC 试验,加上标准准静态单向拉伸试样,共6组试验,各试样如图3所示,

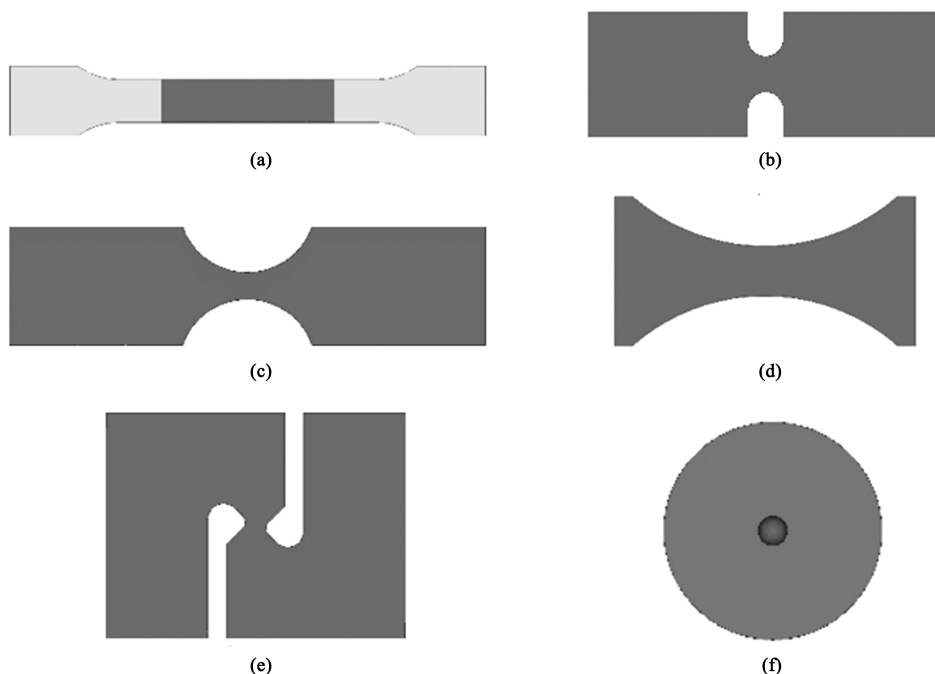


图 3 不同应力状态下的试样

(a) 标准准静态单向拉伸试样 (b) R5 缺口拉伸试样 (c) R20 缺口拉伸试样 (d) R80 缺口拉伸试样  
(e) 纯剪切拉伸试样 (f) 穿孔拉伸试样

Fig. 3 Specimens under different stress states

(a) Standard quasi static uniaxial tensile specimen (b) R5 notched tensile specimen (c) R20 notched tensile specimen  
(d) R80 notched tensile specimen (e) Pure shear tensile specimen (f) Perforated tensile specimen

其中 R5、R20 和 R80 试样为带缺口试样，缺口半径分别为 5、20 和 80 mm。各组试样的初始应力三轴度  $\eta_0$ 、断裂时刻应力三轴度  $\eta_f$  以及断裂失效应变  $\varepsilon_f$  如表 1 所示。以 R5 缺口拉伸 DIC 试验为例，图 4 为断裂前最后一帧的等效塑性应变云图，记录主次应变以计算其应力状态。DIC 图像处理的参考尺寸为 1 mm。

表 1 各试验的应力状态及失效应变

Table 1 Stress states and failure strains of each experiment

试样	$\eta_0$	$\eta_f$	$\varepsilon_f$
标准准静态单向拉伸试样	0.333	0.572	0.493
R5 缺口拉伸试样	0.513	0.584	0.395
R20 缺口拉伸试样	0.383	0.501	0.422
R80 缺口拉伸试样	0.369	0.482	0.445
纯剪切拉伸试样	0.000	0.004	0.562
穿孔拉伸试样	0.667	0.665	0.623

## 2 GISSMO 失效模型开发

### 2.1 MMC 断裂极限准则及标定

采用 MMC (Modified Mohr Coulomb) 断裂极限准则，其本构方程<sup>[12]</sup>如式 (2) 所示：

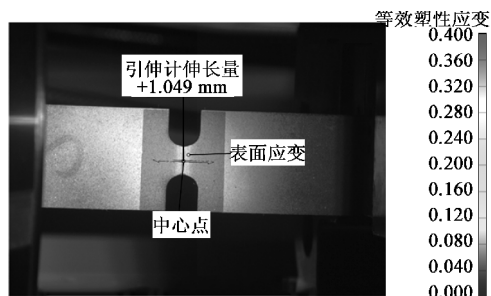


图 4 R5 缺口拉伸试验断裂前最后一帧等效塑性应变分布云图

Fig. 4 Equivalent plastic strain distribution nephogram in the last frame before fracture of R5 notched tensile test

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_f(\eta, \theta) &= \left( \frac{a}{c_2} \times B \times C \right)^{-\frac{1}{b}} \\ B &= c_3 + \frac{\sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} (1 - c_3) \left( \sec \frac{\theta\pi}{6} - 1 \right) \\ C &= \sqrt{\frac{1 + c_1^2}{3}} \cos \frac{\theta\pi}{6} + c_1 \left( \eta + \frac{1}{3} \sin \frac{\theta\pi}{6} \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为待定系数，需要通过试验与仿真进行标定； $\theta$  为洛德角。

MMC 本构方程共有 5 个待定参数，因此，需要至少 5 个试验样本点才能完成参数的标定。以 6 个试验样本点为基础，采用最小二乘法拟合 MMC

失效曲线, 如图 5 所示。试验样本点取断裂前最后一帧, 等效塑性应变的计算区域大小为 1 mm。限于 DIC 采样频率, 以及部分试样在断裂点发生散斑剥离, 导致不能捕捉到断裂的最后一刻, 因此, 最终标定的拟合失效曲线比试验值高。

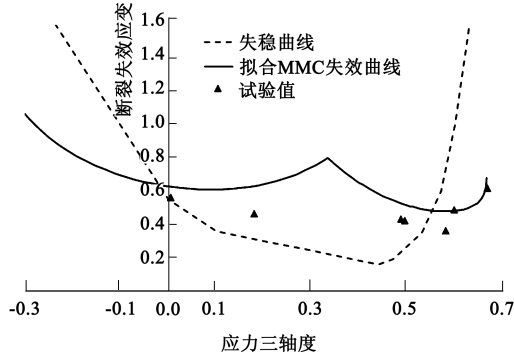


图 5 DP980 钢的失效曲线和失稳曲线

Fig. 5 Failure curve and instability curve of DP980 steel

## 2.2 GISSMO 失效模型原理及参数标定

GISSMO 是一种可以描述损伤累积的唯像失效模型, 包括失稳软化和失效两个过程, 可以与 DYNA 的 \*MAT\_024 号材料和 \*MAT\_036 号材料等配合使用<sup>[13]</sup>。失效模型的参数输入基于试验数据和仿真标定。

损伤值  $D$  的累积方程如式 (3) 所示:

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_f} D^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \varepsilon_p \quad (3)$$

式中:  $\Delta D$  为损伤增量;  $n$  为损伤积累指数;  $\Delta \varepsilon_p$  为等效塑性应变增量。当损伤值  $D=1$  时, 材料失效, 单元删除。

金属材料在发生断裂失效前一般会先发生局部失稳。GISSMO 失效模型采用失稳因子来判断发生失稳的时刻, 失稳因子  $F$  的增量  $\Delta F$  的表达式如式 (4) 所示:

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{p, loc}} F^{(1-\frac{1}{n})} \Delta \varepsilon_p \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_{p, loc}$  为用户定义的失稳有效塑性应变, 如图 5 所示的失稳曲线。失稳曲线目前没有明确的表征方法, 其具体值需要根据各个钢种的材料特性并结合仿真标定才能确定。

当  $F=1$  时, 失稳开始, 记录此时的损伤值  $D_0$ , 此时应力开始退化, 如式 (5) 所示:

$$\sigma = \sigma^* \left( 1 - \left( \frac{D - D_0}{1 - D_0} \right)^m \right) \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  为退化后的应力值;  $\sigma^*$  为当前的应力值;

$m$  为应力退化指数, 当损伤值达到 1 时, 应力退化指数为 0。

利用 LS-OPT 进行参数反求<sup>[14]</sup>, 确定损伤累积指数  $n$ 、应力退化指数  $m$  以及失稳曲线,  $n$  和  $m$  值分别为 2 和 1.5。试样标定的仿真模型的网格尺寸均为 1 mm, 采用 DYNA 显式计算, 选用 \*MAT\_024 号材料并调用 GISSMO 失效模型。图 6 为各组试样的仿真与试验的拉力-引伸计位移曲线对比结果。每组试样取 3 次重复试验, 可以看出试验的重复精度非常高。对比仿真曲线与试验曲线, 可以看出无论是拉力的峰值还是断裂时刻的引伸计位移, 二者的拟合度很高, 表明所开发的失效模型在试样级别的精度可以满足要求。

## 2.3 网格尺寸修正

当发生较明显的局部颈缩现象时, 有限元方法计算的单元应变值依赖于网格尺寸, 相应地必然导致失效模型依赖于网格尺寸。为了保证在大网格条件下仿真预测的精度, 需要修正失效模型参数, 引入网格尺寸修正曲线, 如图 7 所示。

受限于试样尺寸大小, 仅能对标准准静态单向拉伸试样划分较大网格, 如图 8 所示, 修正后不同网格尺寸下的断裂时刻一致, 保证了所开发的失效模型在网格尺寸为 2~3 mm 条件下的有效性。

## 3 成形损伤试验设计与验证

实际车身零件经加工成形后一般会有一定的初始损伤、厚度减薄和残余应力及残余应变, 为了进一步研究成形历史对实际零件断裂失效的影响, 设计了准静态三点弯曲试验和轴向动态压溃试验, 一方面验证所开发的失效模型的精度, 另一方面探究、考虑成形初始损伤的仿真方法。

### 3.1 折弯损伤理论计算及帽形梁设计

圆角处截面如图 9 所示, 其中  $R$  为外圆角半径, 厚度方向有 5 个积分点, 中性面为 1#积分点, 处于截面中心, 靠近外表面为 5#积分点<sup>[13]</sup>, 处于受拉状态, 最容易失效。

以 5#积分点为例, 可以根据式 (6) 来计算工程应变  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{R - \frac{T}{2} + \frac{T}{2} \times 0.906}{R - \frac{T}{2}} - 1 \quad (6)$$

工程应变  $\varepsilon$  可以进一步换算为真实应变, 在这



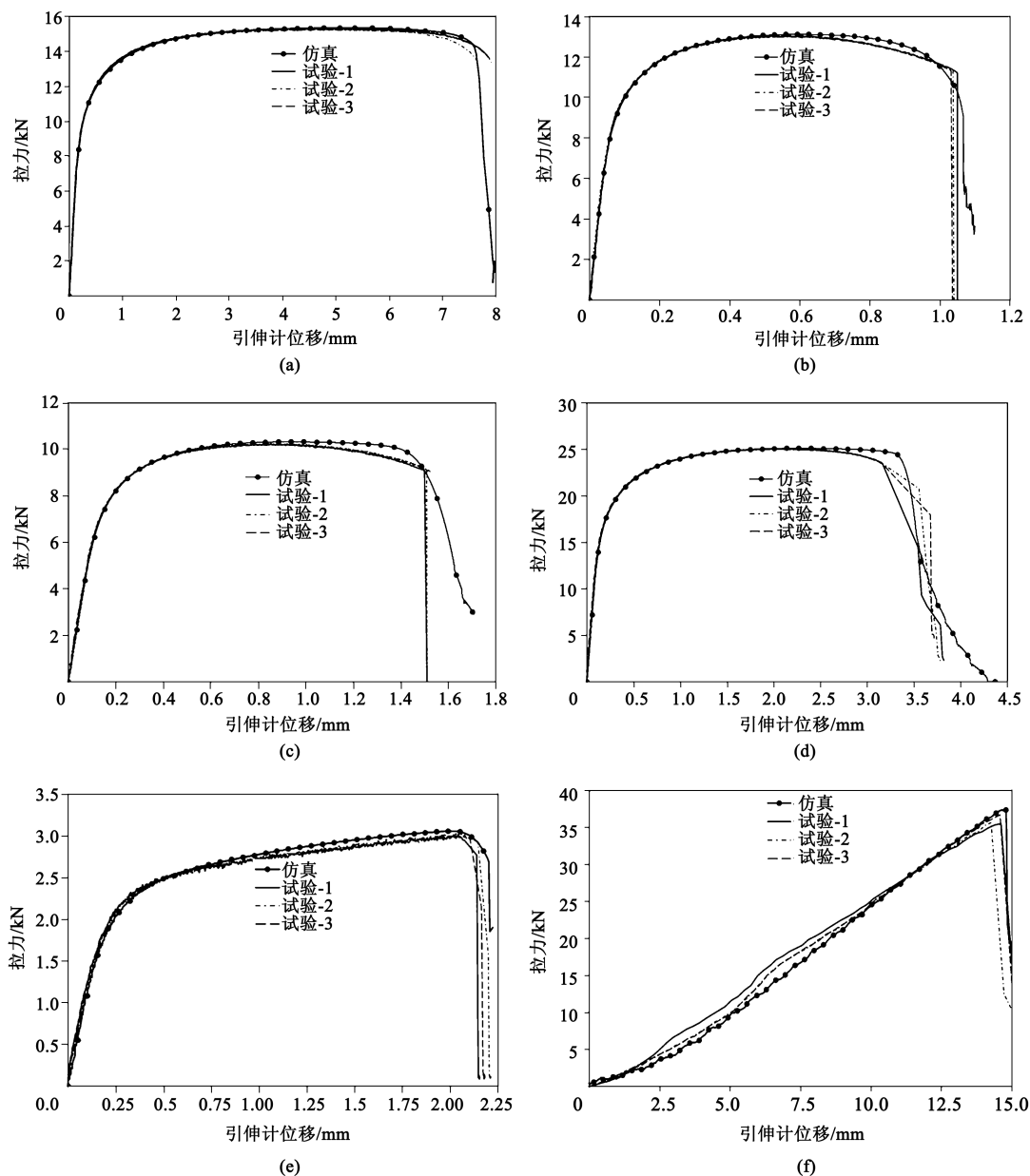


图 6 试验与仿真的拉力-引伸计位移曲线对比

(a) 标准准静态单向拉伸试验 (b) R5 缺口拉伸试样 (c) R20 缺口拉伸试样 (d) R80 缺口拉伸试样  
(e) 纯剪切拉伸试样 (f) 穿孔拉伸试样

Fig. 6 Comparison of tensile force-extensometer displacement curves between experiment and simulation

(a) Standard quasi static uniaxial tensile specimen (b) R5 notched tensile specimen (c) R20 notched tensile specimen  
(d) R80 notched tensile specimen (e) Pure shear tensile specimen (f) Perforated tensile specimen

里近似认为等效塑性应变  $\varepsilon_p$  等于真实应变。折弯工况下, 圆角处的应力三轴度稳定在 0.57 左右<sup>[15]</sup>, 则式 (3) 退化式为式 (7):

$$D = \left( \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \right)^n \quad (7)$$

如前文所述, 在应力三轴度为 0.57 时, 尺寸为 1 mm 的网格对应的 MMC 失效应变为 0.480, 标定

的失效应变比例系数为 0.700, 则可以计算得到尺寸为 2 mm 网格对应的失效应变为 0.336。

当  $R=3$  mm 时, 根据式 (6) 计算得到 5# 积分点的工程应变为 0.227, 近似换算得到等效塑性应变为 0.204。根据式 (7) 计算得到损伤值为 0.369。确定帽形梁截面设计如图 10 所示, 帽形梁上下板采用点焊拼接。准静态三点弯曲帽形梁和动态轴向压溃帽形梁的唯一差别是长度不同。

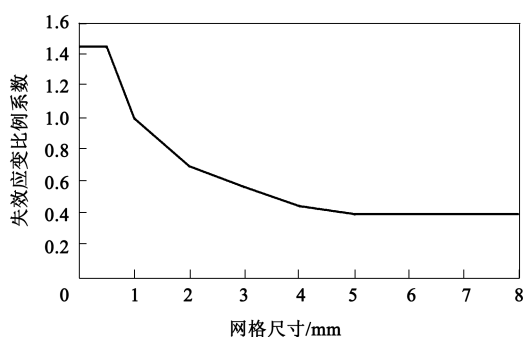


图7 网格尺寸修正曲线

Fig. 7 Correction curve of mesh size

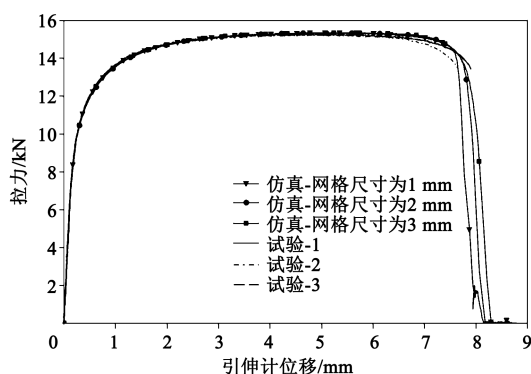


图8 网格尺寸修正后效果

Fig. 8 Correction effect of mesh size

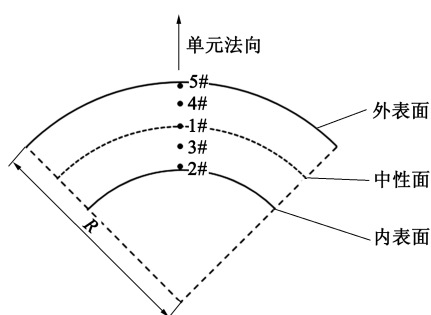


图9 圆角处截面

Fig. 9 Section of fillet

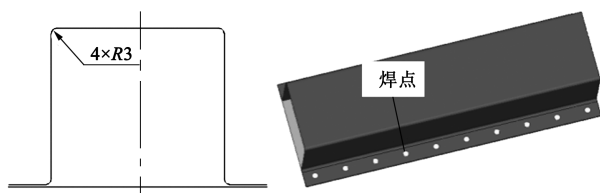


图10 帽形梁截面设计

Fig. 10 Section design of cap-shaped beam

### 3.2 帽形梁折弯损伤仿真计算及损伤映射

帽形梁折弯在专用设备上实现，图11为折弯过程的简化仿真模型，其中凹模固定，凸模往下运动

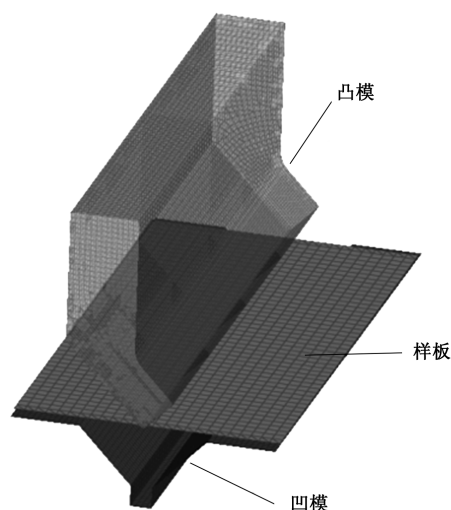


图11 帽形梁折弯仿真简化模型

Fig. 11 Simplified model for bending simulation of cap-shaped beam

至限位后保压一定时间，随后脱模。折弯仿真、帽形梁准静态三点弯曲仿真以及动态轴向压溃仿真均采用 DYNA 显式求解器进行计算，选用 \* MAT\_024 号材料并调用所开发的 GISSMO 失效模型，网格基本尺寸均为 2 mm，厚度方向 5 个积分点。折弯仿真和准静态三点弯曲仿真关闭动态效应，帽形梁动态轴向压溃仿真开启动态效应。

图12折弯仿真结果显示，圆角处共形成3排网格，最中间一排网格的损伤值最大，两侧网格的损伤值略小且基本相等。以中间排为例，5#积分点的损伤值为 0.366，与理论计算值非常接近。

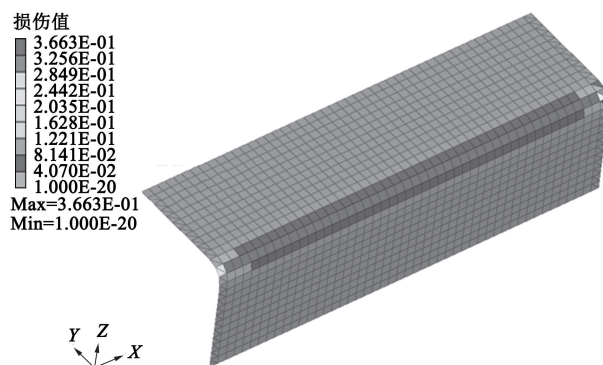


图12 帽形梁折弯后圆角处损伤值分布

Fig. 12 Distribution of damage values at fillet of cap-shaped beam after bending

将初始损伤、厚度减薄和残余应力与残余应变映射到帽形梁圆角中，采用关键字 \* INITIAL\_STRESS\_SHELL 实现。

### 3.3 帽形梁准静态三点弯曲试验及仿真对标

帽形梁准静态三点弯曲试验装置如图 13 所示。帽形梁对称、自由放置于支撑辊上，压头的加载速度为  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，下压行程为 55 mm。

图 14 为仿真结果与试验结果的裂纹对比。3 次重复试验均在帽形梁圆角处出现微裂纹，仿真裂纹同样出现在圆角处，但与试验的裂纹相貌有一定差异，这可能是折弯仿真与实际折弯过程存在一定的差异而导致的。同时仿真结果显示，如果不引入圆角处的初始损伤，则不能复现裂纹。



图 13 帽形梁准静态三点弯曲试验装置

Fig. 13 Device for quasi static three-point bending experiment of cap-shaped beam

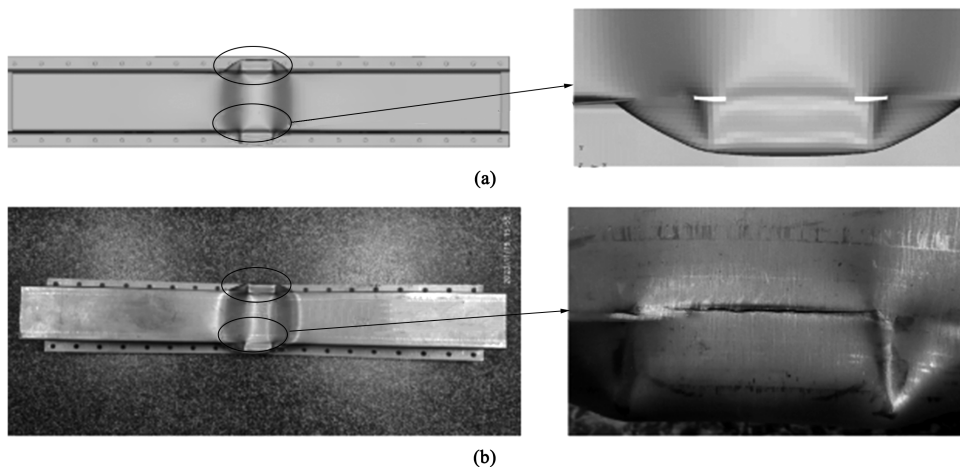


图 14 准静态三点弯曲仿真 (a) 与试验 (b) 裂纹对比

Fig. 14 Comparison of cracks between quasi static three-point bending simulation (a) and experiment (b)

图 15 为仿真结果与试验结果的拉力-引伸计位移曲线对比。取 3 次重复试验，试验的拉力-引伸计位移曲线的重复精度非常高，仿真曲线与试验曲线的拟合度很高。由于试验本身的整体裂纹较小，未引入初始损伤的仿真曲线与试验曲线的拟合度也较高。

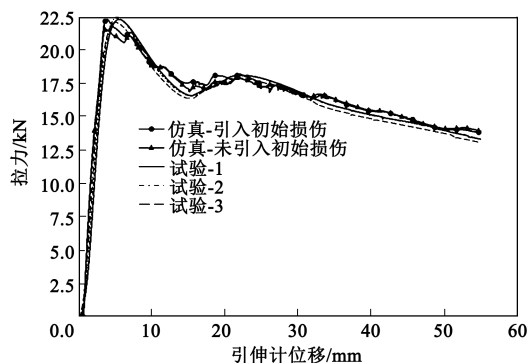


图 15 准静态三点弯曲试验与仿真的拉力-引伸计位移曲线对比

Fig. 15 Comparison of tensile force-extensometer displacement curves between quasi static three-point bending experiment and simulation

### 3.4 帽形梁动态轴向压溃试验及仿真对标

帽形梁动态轴向压溃试验在落锤设备上，如图 16 所示。



图 16 帽形梁动态轴向压溃试验

Fig. 16 Dynamic axial collapse experiment of cap-shaped beam

图 17 分别为不带 GISSMO 失效模型、带 GISSMO 失效模型（不考虑圆角初始损伤）以及带 GISSMO 失效模型并考虑圆角初始损伤的仿真结果对比。

可以看出，失效与圆角初始损伤对变形模式以及压溃量的影响均很显著，考虑圆角处初始损伤后结构的承载能力大幅降低。

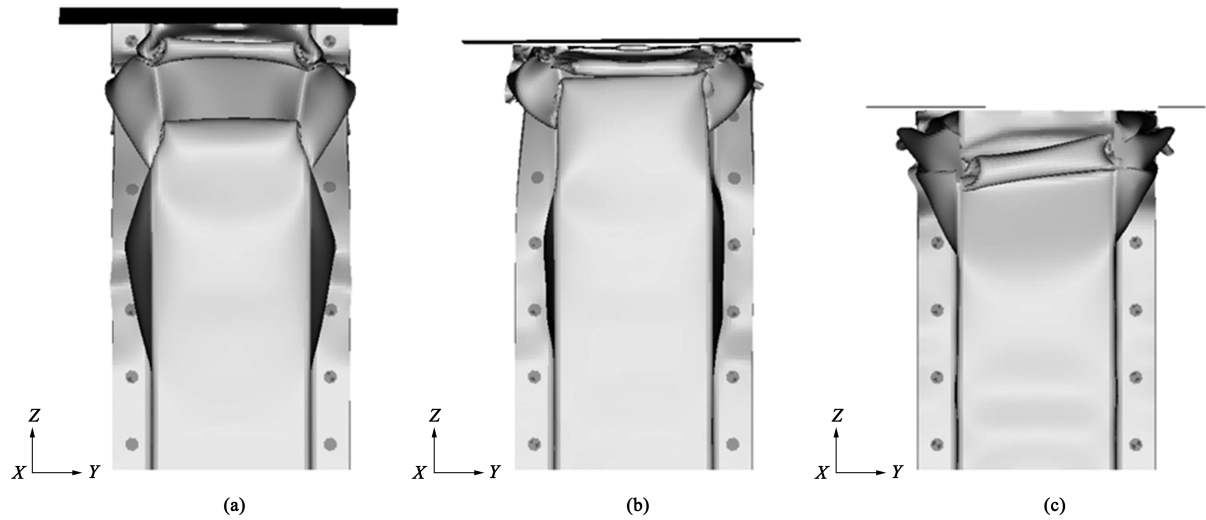


图 17 失效和初始损伤对结构承载能力的影响  
(a) 无失效 (b) 带 GISSMO 失效模型 (c) 带 GISSMO 失效模型及圆角初始损伤

Fig. 17 Influences of failure and initial damage on bearing capacity of structure  
(a) Without failure (b) With GISSMO failure model (c) With GISSMO failure model and initial damage

图 18 为动态轴向压溃试验仿真结果与试验结果的拉力-引伸计位移曲线对比。试验的拉力-引伸计位移曲线的重复精度较高，最大压溃量引伸计位移平均值为 179 mm。不带 GISSMO 失效仿真模型时最大压溃量为 132 mm，带 GISSMO 失效模型（不考虑圆角初始损伤）时最大压溃量为 144 mm，带 GISSMO 失效模型并考虑圆角初始损伤时最大压溃量为 178 mm，与试验的压溃量最接近，而且仿真曲线与试验曲线的整体拟合度最高，充分说明了考虑初始损伤的必要性。

杂性，仿真与试验的变形模式和裂纹形貌存在一定的差异。

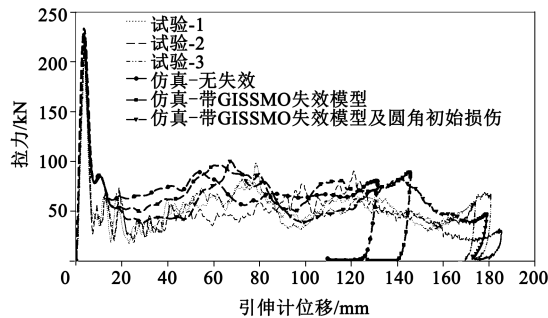


图 18 动态轴向压溃试验和仿真的拉力-引伸计位移曲线对比  
Fig. 18 Comparison of tensile force-extensometer displacement curves between dynamic axial collapse experiment and simulation

图 19 对比了仿真与试验的裂纹形貌，均在圆角处发生明显的整体撕裂。由于动态工况的复



(a)



(b)

图 19 动态轴向压溃试验 (a) 与仿真 (b) 的裂纹形貌对比  
Fig. 19 Comparison of cracks morphologies between dynamic axial collapse experiment (a) and simulation (b)



## 4 结 论

(1) 以 DP980 钢薄板为研究对象设计了特征拉伸试样, 开发了 GISSMO 失效模型, 完成了试样级别的仿真对标。

(2) 完成了失效模型的网格尺寸效应修正, 保证了所开发的失效模型在网格尺寸为 2~3 mm 条件下的有效性。

(3) 基于折弯理论计算, 结合所开发的 GISSMO 失效模型准确预测了帽形梁圆角处的折弯初始损伤, 确定了帽形梁的截面设计。

(4) 设计了帽形梁准静态三点弯曲试验和帽形梁动态轴向压溃试验, 一方面验证了失效模型的有效性, 另一方面首次考虑了成形初始损伤对金属材料断裂行为的影响。

(5) 研究表明, 考虑成形初始损伤后, GISSMO 失效模型的仿真结果与试验结果更吻合, 表明在发生较大的初始损伤时必须考虑成形初始损伤。

### 参考文献:

- [1] Anantharam Sheshadri, Hamid Keshthar, Ashutosh Patil, et al. Experience with material and fracture modeling at FCA US LLC [A]. The 15<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference [C]. Koblenz, 2018.
- [2] Gang Huang, Sriram Sadagopan, Hong Zhu, et al. Fracture prediction and correlation of alsi hot stamped steels with different models in LS DYNA [A]. The 15<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference [C]. Koblenz, 2018.
- [3] Chen X, Chen G, Huang L. Validation of Gismo model for fracture prediction of a third generation advanced high strength steel [A]. WCX World Congress Experience [C]. Detroit, 2018.
- [4] 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 T, Xiong Z L, Sun L, 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.
- [5] 潘利波, 左治江, 周文强, 等. 双相钢的成形与断裂极限性能分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 185-189.  
Pan L B, Zuo Z J, Zhou W Q, et al. Analysis on forming and fracture limit properties for dual phase steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 185-189.
- [6] Qian L Y, Fang G, Zeng P, et al. Experimental and numerical investigations into the ductile fracture during the forming of flat-rolled 5083-O aluminum alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 264-275.
- [7] Basaran M. Stress State Dependent Damage Modeling with a Focus on the Lode Angle Influence [D]. Aachen: Rheinisch-Westf Lischen Technischen Hochschule Aachen, 2011.
- [8] Mattiasson K, Jergeus J, Dubois P. On the prediction of failure in metal sheets with special reference to strain path dependence [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88: 175-191.
- [9] Lian C W, Lin J P, Hu W L, et al. Accurate modeling of experimental strain-hardening characteristics for series of high strength steel [A]. Proceedings of NUMIFORM 2019 [C]. Portsmouth, 2019.
- [10] 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.
- [11] 祁爽, 蔡力勋, 包陈, 等. 基于应力三轴度的材料颈缩和破断行为分析 [J]. 机械强度, 2015, 182 (6): 1152-1158.  
Qi S, Cai L X, Bao C, et al. Analysis of necking and breaking behavior of materials based on stress triaxiality [J]. Mechanical Strength, 2015, 182 (6): 1152-1158.
- [12] 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.
- [13] Effelsberg J, Haufe A, Feucht M, et al. On parameter identification for the GISSMO damage model [A]. Proceedings of the 12th International LS-DYNA Users Conference [C]. Dearborn, 2012.
- [14] Livermore Software Technology Corporation. LS-Dyna keyword user's manual [R]. California: LSTC, 2013.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.  
Xu Z L. Elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.

## 更 正

2022 年第 3 期“步进电机外壳零件多工位级进模设计”一文中, 第 174 页做如下更正:

(1) 将摘要中的“此外, 该模具的材料利用率高达 85%, 节省了材料”删除;

(2) 将第 1 段中“SECD 钢是碳素工具钢”改为“SECD 钢是一种电镀镀锌冷轧低碳钢”;

(3) 将第 1 段中“因制品较薄”改为“因制品拉深比大”。