

团体标准

XXX

汽车用金属材料本构及 断裂失效参数标定方法

Calibration method of constitutive and fracture failure parameter
for automotive metal materials

(报批稿)

2025-xx-xx 发布

2025-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

目 录

前 言	II
1 范围	- 3 -
2 规范性引用文件	- 3 -
3 术语和定义	- 3 -
4 参数标定原理	- 4 -
5 试验数据评估	- 5 -
6 材料本构模型参数标定	- 7 -
7 材料断裂失效参数标定	- 8 -
附录 A（资料性）常用硬化模型及应变速率效应模型	- 10 -
附录 B（资料性）材料本构模型参数标定案例	- 12 -
附录 C（资料性）常用断裂失效模型及网格尺寸效应模型	- 16 -
附录 D（资料性）材料断裂失效参数标定案例	- 20 -
参考文献	- 25 -

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国汽车工程学会汽车材料分会提出。

本标准由中国汽车工程学会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：重庆长安汽车股份有限公司、重庆数元道科技有限公司、中信金属股份有限公司、北京理工大学重庆创新中心、吉利汽车研究院(宁波)有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、首钢集团有限公司、苏州渭蓝汽车材料科技有限公司、迅仿科技(上海)有限公司、攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司、马鞍山钢铁有限公司、重庆大学、蔚来汽车科技(安徽)有限公司、赛力斯汽车有限公司、广州汽车集团股份有限公司、清华大学苏州汽车研究院(相城)、鞍钢神钢冷轧高强汽车钢板有限公司、鞍钢股份有限公司、河钢股份有限公司邯郸分公司、北京科技大学、招商局检测车辆技术研究院有限公司、湖南华菱涟源钢铁有限公司、中铝材料应用研究院有限公司、上海汇众汽车制造有限公司。

本文件主要起草人：姜亚洲、梁宾、范吉富、赵岩、路洪洲、崔泰松、李根、张钧萍、张伟、高峰、吴仕超、葛宇龙、姜子涵、胡晓、冯毅、姜发同、王腾腾、史方圆、张彬、潘锋、刘珂、董志华、杨琴、刘鹏鹏、向文财、杜盟相、赵杨、周海、张龙柱、周佳、袁超、高翔、王亮赟、梁笑、刘波、张科峰、李伟、计遥遥、方刚、李春光、顾斌、李学涛、冉序、李会、冯光烁、徐志强、尹若霞、王连轩、徐鑫、郝旭、王韬、刘旭辉等。

汽车用金属材料本构及断裂失效参数标定方法

1 范围

本文件描述了汽车用金属材料在不同应力状态和加载条件下的本构及断裂失效参数标定方法。
本文件适用于厚度 0.7mm~3.5mm 的金属板材、型材、薄壁铸件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 30069.2 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

T/CSAE 444-2025 汽车用金属材料断裂应变测试方法

3 术语和定义

GB/T 10623界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

变形行为试验 deformation behavior test

用于表征金属材料在不同应力状态及加载条件下应力-应变（-应变速率）关系的试验方法。

3.2

断裂行为试验 fracture behavior test

用于评估金属材料在不同应力状态和加载条件下断裂行为与断裂抗力的试验方法。

3.3

反演法 inverse method

在已知试验工况及响应结果的基础上，采用有限元方法对试验过程进行建模与仿真，提取与试验响应等效的力学信息，构建描述试验与仿真差异的目标函数，并通过优化算法最小化该目标函数，以反推出材料本构关系、断裂准则或其他物理模型参数的数值分析方法。

3.4

DIC 测量法 digital image correlation (DIC) method

基于数字图像相关原理，通过分析材料试样表面在加载过程中的图像序列变化，获取位移场与应变场信息的非接触式全场测量方法。

3.5

应变速率效应 strain rate effect

金属材料的力学响应（如屈服强度、应力-应变关系、断裂应变等）随加载速率（即应变速率）变化而发生变化的现象。

3.6

网格尺寸效应 mesh size effect

在有限元离散化数值模拟中，计算结果对所选网格单元尺寸（大小）敏感的现象。

3.7

断裂等效塑性应变 equivalent plastic strain to fracture

材料在给定应力三轴度和洛德角参数条件下，发生断裂时所累积的等效塑性应变。

3.8

断裂时刻等效塑性应变 equivalent plastic strain at fracture

材料在特定加载路径下，于断裂时刻所测得的等效塑性应变。

4 参数标定原理

采用试验结合仿真反演法，标定汽车用金属材料在不同应力状态和加载条件下的本构及断裂失效参数。变形行为与断裂行为试验数据经分散度与偏差评估，在满足数据质量要求的前提下，通过模型拟合与仿真反演，标定确定本构模型（硬化模型及应变速率效应模型）参数，及断裂失效（断裂模型及网格尺寸效应模型）参数，该方法可支持汽车用金属材料在复杂载荷条件下的高精度数值仿真。参数标定过程示意图见图1。

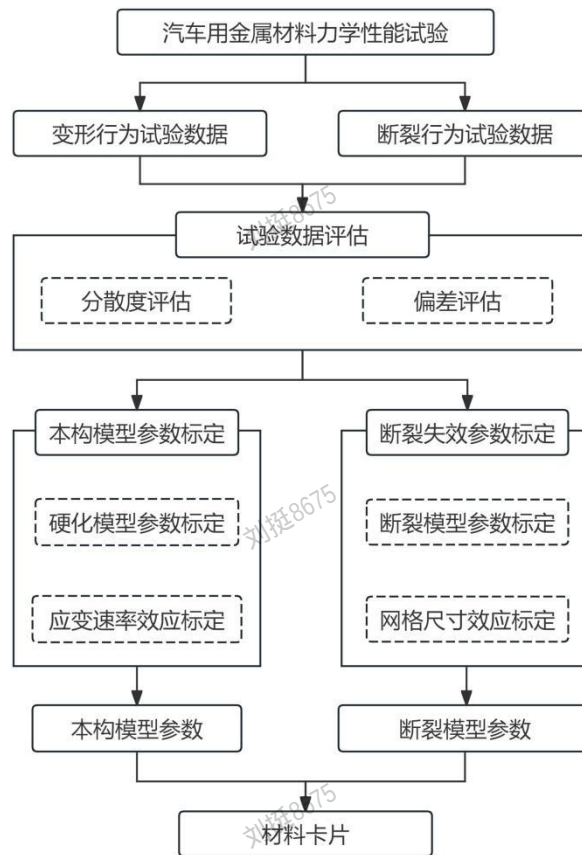


图1 参数标定过程示意图

5 试验数据评估

5.1 评估要求

变形行为及断裂行为试验应满足 GB/T 228.1、GB/T 30069.2、T/CSAE 444-2025 中的技术要求，试验数据的分散度应在 5% 范围内、偏差应在 $\pm 10\%$ 范围内。

5.2 分散度评估

5.2.1 横坐标插值计算

选取三条曲线中最大横坐标（即曲线有效部分右边界点横坐标的最大值） X 为统一的横坐标右边界，设插值后曲线点对总数为 N ，插值间隔为 $N/(N-1)$ ，在 $0 \sim X$ 范围内对所有三条曲线进行插值；当曲线右边界横坐标小于 X 时，该右边界与 X 之间的所有插值点的函数值取该条曲线第一个点的纵坐标值。

5.2.2 计算分散度

插值后，设统一化的取样序列号为，统一化的取样点为 (x_k, y_k^j) ，其中， j 为试验编号，取值为 1、2、3，对应三次重复实验。对于每一个取样序号 k ，求该位置纵坐标的平均值，得到一组新数据 $(x_k, \bar{y}_k)$ ，

其中 $\bar{y}_k = \frac{1}{3}(y_k^1 + y_k^2 + y_k^3)$ 。宜采用公式（1）计算曲线分散度。

$$D = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{X}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^3 (y_k^j - \bar{y}_k)^2 / 2}}{\sum_{k=1}^N \frac{X}{N} |\bar{y}_k|} = \frac{\sum_{k=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^3 (y_k^j - \bar{y}_k)^2 / 2}}{\sum_{k=1}^N |\bar{y}_k|} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- D ——分散度, 单位为百分数(%);
- N ——统一化取样序列总数 (正整数, 宜选 1000);
- X ——横坐标评估范围 (一般为有理数);
- k ——统一化插值后的第 k 个取样序号, 值从 1 到 N ;
- j ——试验编号, 范围从 1 到 3;
- $\bar{y}_k$ ——三个试验的纵坐标在第 k 个取样序号处的平均值。

5.3 偏差评估

5.3.1 偏差的评估宜从伸长相对误差、最大力相对误差、面积相对误差三个方面进行量化评估, 可根据需求选择其他评价指标。

5.3.2 伸长相对误差

各试验中断裂时刻对应伸长计算获得的相对偏差与相对误差, 具体宜按公式 (2)、公式 (3) 计算。

$$H_{Ei} = \left(\frac{E_i - E_{ref}}{E_{ref}} \right) \cdot 100\% \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- H_{Ei} ——单根试验伸长相对偏差, 单位为百分数(%);
- E_i ——每次试验伸长, 单位为毫米(mm);
- E_{ref} ——参考试验伸长, 多次重复试验的平均值, 单位为毫米(mm)。

$$H_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - E_{ref}}{E_{ref}} \right| \cdot 100\% \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- H_E ——伸长量平均相对误差, 单位为百分数(%);
- N ——试验次数, 无量纲;
- E_i ——每次试验伸长, 单位为毫米(mm);
- E_{ref} ——参考试验伸长, 多次重复试验的平均值, 单位为毫米(mm)。

5.3.3 最大力相对误差

各试验中最大力计算获得的相对偏差与相对误差, 具体宜按公式 (4)、公式 (5) 计算。

$$H_{Fi} = \left(\frac{F_i - F_{ref}}{F_{ref}} \right) \cdot 100\% \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- H_{Fi} ——单根试验最大力相对偏差, 单位为百分数(%);
- F_i ——每次试验最大力, 单位为牛顿(N);
- F_{ref} ——参考试验最大力, 多次重复试验的平均值, 单位为牛顿(N)。

$$H_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_i - F_{ref}}{F_{ref}} \right| \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

H_F ——最大力平均相对误差, 单位为百分数(%);

N ——试验次数, 无量纲;

F_i ——每次试验最大力, 单位为牛顿(N);

F_{ref} ——参考试验最大力, 多次重复试验的平均值, 单位为牛顿(N)。

5.3.4 面积相对误差

各试验中载荷-位移(伸长)曲线围成的面积计算获得的相对偏差和相对误差, 具体宜按公式(6)、公式(7)计算。

$$H_{Wi} = \left(\frac{W_i - W_{ref}}{W_{ref}} \right) \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

H_{Wi} ——单根试验面积相对偏差, 单位为百分数(%);

W_i ——每次试验曲线载荷-位移曲线围成的面积, 单位为焦耳(J);

W_{ref} ——参考试验曲线载荷-位移曲线围成的面积, 取多次重复试验的平均值, 单位为焦耳(J)。

$$H_W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{W_i - W_{ref}}{W_{ref}} \right| \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

H_W ——面积平均相对误差, 单位为百分数(%);

N ——试验次数, 无量纲;

W_i ——每次试验曲线载荷-位移曲线围成的面积, 单位为焦耳(J);

W_{ref} ——参考试验曲线载荷-位移曲线围成的面积, 取多次重复试验的平均值, 单位为焦耳(J)。

6 材料本构模型参数标定

6.1 硬化模型参数标定

6.1.1 应力-应变曲线处理

基于变形行为试验中的准静态单向拉伸数据, 根据 GB/T 228.1 中的方法处理获得工程应力-工程应变曲线、真应力-真应变曲线、真应力-塑性应变曲线。

6.1.2 硬化模型拟合

基于真应力-塑性应变曲线, 采用硬化模型(见附录A)进行拟合外延, 获得外延的准静态硬化曲线, 该曲线的塑性应变值应外延到1。

6.1.3 仿真模型建立

基于变形行为试验中的各准静态试验工况, 采用有限元软件建立仿真模型, 模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm(可根据需求调整网格尺寸), 将外延后的准静态硬化曲线添加到本构模型中。

6.1.4 硬化模型参数反演法优化

选择硬化模型待优化参数并设置其取值范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间最大力平均相对误差为目标函数（见附录B），当最大力平均相对误差不大于10%（可根据需求调整误差阈值），输出最优准静态硬化曲线。

6.2 应变速率效应参数标定

6.2.1 应力-应变曲线处理

基于变形行为试验中的动态单向拉伸数据，根据 GB/T 30069.2 中的方法处理获得各应变速率下的工程应力-工程应变曲线、真应力-真应变曲线、真应力-塑性应变曲线。根据 GB/T 30069.2 中的方法判断是否有明显的应变速率效应，若无则不进行动态本构参数标定。

6.2.2 应变速率效应因子拟合

基于各应变速率下的真应力-塑性应变曲线，采用应变速率效应模型（见附录 A）进行拟合外延，获得外延的动态硬化曲线，该曲线的塑性应变值应外延到 1，曲线间应无交叉。

6.2.3 仿真模型建立

基于变形行为试验中的各动态试验工况，采用有限元软件建立仿真模型，模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm（可根据需求调整网格尺寸），将外延后的动态硬化曲线添加到本构模型中。

6.2.4 应变速率效应模型参数反演法优化

选择应变速率效应模型待优化参数并设置其取值范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间最大力平均相对误差为目标函数，当最大力平均相对误差不大于10%（可根据需求调整误差阈值），输出最优动态硬化曲线。

6.2.5 本构模型参数输出

将最优准静态硬化曲线及最优动态硬化曲线组合，获得本构模型参数。

7 材料断裂失效参数标定

7.1 断裂模型参数标定

7.1.1 仿真模型建立

基于各断裂行为试验工况（准静态及动态），采用有限元软件建立仿真模型，模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm（可根据需求调整网格尺寸），添加本构模型参数。

7.1.2 断裂时刻等效塑性应变确认

7.1.2.1 DIC测量法确认

根据T/CSAE 444-2025中的DIC测量法，处理获得各断裂行为试验的断裂时刻等效塑性应变。

7.1.2.2 仿真确认

根据各断裂行为试验结果确定仿真断裂时刻，基于仿真结果确定断裂时刻主要变形区域单元的最大等效塑性应变。

7.1.3 应力状态参数确认

基于断裂行为试验仿真结果，选择断裂时刻最大等效塑性应变单元，提取该单元从变形起始到断裂时刻的应力三轴度及洛德角参数信息，宜按公式（8）、公式（9）计算，获得各试验的平均应力三轴度及平均洛德角参数值。

$$\eta_w = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\bar{\varepsilon}} \eta(\bar{\varepsilon}_p) d\bar{\varepsilon}_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中：

η_w ——平均应力三轴度，无量纲；

$\bar{\varepsilon}$ ——所选单元断裂时刻等效塑性应变，无量纲；

η ——应力三轴度，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变，无量纲。

$$\xi_w = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\bar{\varepsilon}} \xi(\bar{\varepsilon}_p) d\bar{\varepsilon}_p \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中：

ξ_w ——平均洛德角参数，无量纲；

$\bar{\varepsilon}$ ——所选单元断裂时刻等效塑性应变，无量纲；

ξ ——洛德角参数，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变，无量纲。

7.1.4 断裂模型拟合

基于各断裂行为试验的断裂时刻等效塑性应变及应力状态参数，采用断裂模型（见附录C）进行拟合，获得断裂模型拟合曲线。

7.1.5 断裂模型参数反演法优化

将断裂模型拟合曲线添加到断裂行为试验仿真中，选择断裂模型待优化参数并设置其取值范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间面积及断裂位移平均相对误差为目标函数（见附录D），当面积及断裂位移平均相对误差均不大于10%（可根据需求调整误差阈值），输出最优断裂模型曲线及参数值。

7.2 网格尺寸效应参数标定

7.2.1 仿真模型建立

基于准静态单向拉伸试验工况，采用有限元软件建立多组网格尺寸的仿真模型，模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm、1mm、3mm、4mm、6mm（可根据需求调整网格尺寸），添加本构模型参数及断裂模型参数进行仿真计算。

7.2.2 网格尺寸效应因子拟合

基于不同网格尺寸仿真结果，提取主要变形区域单元的断裂时刻等效塑性应变，采用网格尺寸效应模型（见附录C）进行拟合，获得网格正则化拟合曲线。

7.2.3 网格尺寸效应参数反演法优化

将网格正则化拟合曲线添加到准静态单向拉伸的多组网格尺寸仿真模型中，选择网格尺寸效应模型待优化参数并设置其取值范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间面积及断裂位移平均相对误差为目标函数，当面积及断裂位移平均相对误差均不大于10%（可根据需求调整误差阈值），输出最优网格正则化曲线及参数值。

7.2.4 断裂失效参数输出

将最优断裂模型参数及最优网格正则化参数值组合，获得断裂失效参数。

附录 A

(资料性)

常用硬化模型及应变速率效应模型

A.1 常用硬化模型

A.1.1 在材料本构参数标定过程中,宜采用如下模型进行拟合(可根据需求选择其他模型)。

A.1.2 Hollomon-Ludwik非饱和硬化模型见公式(A.1):

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + K(\bar{\varepsilon}_p)^n \quad \text{.....(A.1)}$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力,单位为兆帕(MPa);

σ_0 ——初始屈服等效应力,单位为兆帕(MPa);

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变,无量纲;

K ——材料常数,单位为兆帕(MPa);

n ——材料常数,无量纲。

A.1.3 Swift 非饱和硬化模型见公式(A.2):

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n \quad \text{.....(A.2)}$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力,单位为兆帕(MPa);

ε_0 ——初始屈服应变,无量纲;

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变,无量纲;

K ——材料常数,单位为兆帕(MPa);

n ——材料常数,无量纲。

A.1.4 Voce+非饱和硬化模型见公式(A.3):

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + A(1 - e^{-B\bar{\varepsilon}_p}) + C\bar{\varepsilon}_p^{0.5} \quad \text{.....(A.3)}$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力,单位为兆帕(MPa);

σ_0 ——初始屈服等效应力,单位为兆帕(MPa);

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变,无量纲;

A, B, C ——材料常数,单位为兆帕(MPa)。

A.1.5 Hockett-Sherby 饱和硬化模型见公式(A.4):

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + A(1 - e^{-B\bar{\varepsilon}_p^n}) \quad \text{.....(A.4)}$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力,单位为兆帕(MPa);

σ_0 ——初始屈服等效应力,单位为兆帕(MPa);

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变,无量纲;

A, B ——材料常数,单位为兆帕(MPa);

n ——材料常数,无量纲。

A.1.6 Voce 饱和硬化模型见公式 (A.5) :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + A(1 - e^{-B\bar{\varepsilon}_p}) \quad \dots\dots\dots(A.5)$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa) ;

σ_0 ——初始屈服等效应力, 单位为兆帕(MPa);

$\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变, 无量纲;

A, B ——材料常数, 单位为兆帕(MPa)。

A.1.7 Hockett-Sherby 与 Swift 加权硬化模型见公式 (A.6) :

$$\bar{\sigma} = \alpha \cdot \left[\sigma_0 + A(1 - e^{-B\bar{\varepsilon}_p^n}) \right] + (1 - \alpha) \cdot [K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^{n'}] \quad \dots\dots\dots(A.6)$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa) ;

α ——加权系数, 无量纲;

σ_0 ——初始屈服等效应力, 单位为兆帕(MPa);

ε_0 ——初始屈服应变, 无量纲;

A, B, K ——材料常数, 单位为兆帕(MPa);

n, n' ——材料常数, 无量纲。

A.2 常用应变速率效应模型

A.2.1 在材料应变速率效应参数标定过程中, 宜采用如下模型进行拟合 (可根据需求选择其他模型)。

A.2.2 Johnson-Cook应变速率效应模型见公式 (A.7) :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \left[1 + C_1 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(A.7)$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa) ;

σ_0 ——初始屈服应力, 单位为兆帕(MPa);

$\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ ——等效塑性应变速率, 单位为每秒 (/s) ;

$\dot{\varepsilon}_0$ ——临界或参考应变速率, 低于此值时无应变速率效应, 单位为每秒 (/s) ;

C_1 ——材料常数, 无量纲。

A.2.3 Cowper-Symonds应变速率效应模型见公式 (A.8) :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \left(1 + \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_p}{C_2} \right)^{\frac{1}{p}} \quad \dots\dots\dots(A.8)$$

式中:

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa) ;

σ_0 ——初始屈服应力, 单位为兆帕(MPa);

$\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ ——等效塑性应变速率, 单位为每秒 (/s) ;

C_2 ——材料常数, 单位为每秒 (/s) ;

p ——材料常数, 无量纲。

附录 B

(资料性)

材料本构模型参数标定案例

B.1 标定流程

B.1.1 材料本构模型参数标定过程示意图见图B.1。

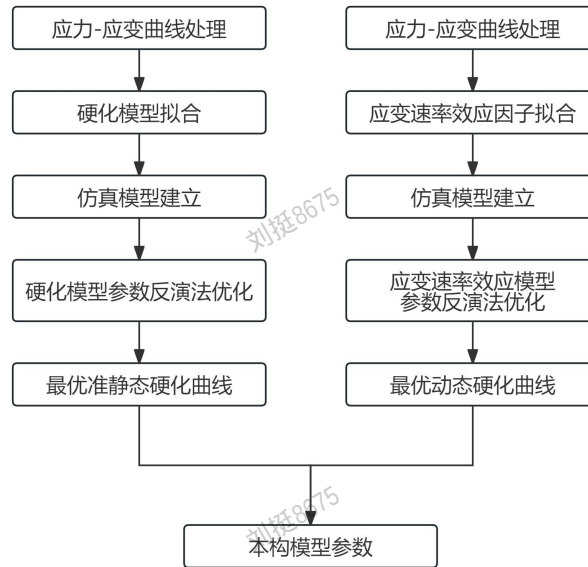


图 B.1 本构参数标定过程示意图

B.2 硬化模型参数标定结果

B.2.1 基于变形行为试验中的准静态单向拉伸数据，根据 GB/T 228.1 中的方法处理获得真应力-塑性应变曲线（见图 B.2）。

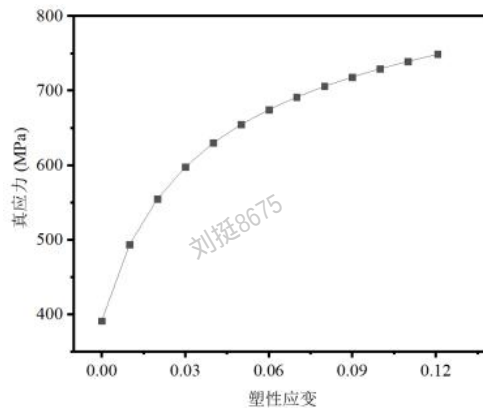
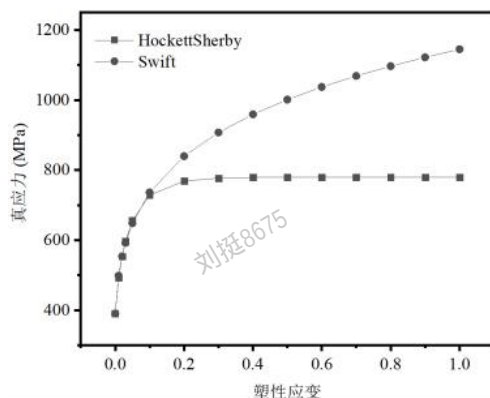


图 B.2 真应力-塑性应变曲线图

B.2.2 基于真应力-塑性应变曲线，采用Hockett-Sherby与Swift加权硬化模型进行拟合外延，获得外延的准静态硬化曲线（见图B.3）。



图B.3 外延准静态硬化曲线图

B.2.3 基于变形行为试验中的各准静态试验工况，采用有限元软件建立仿真模型（见图B.4），模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm。

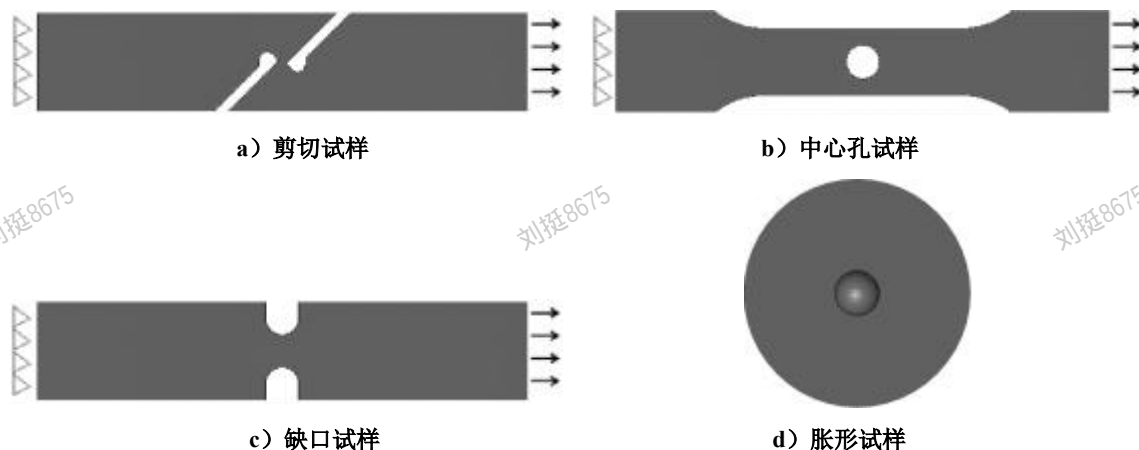
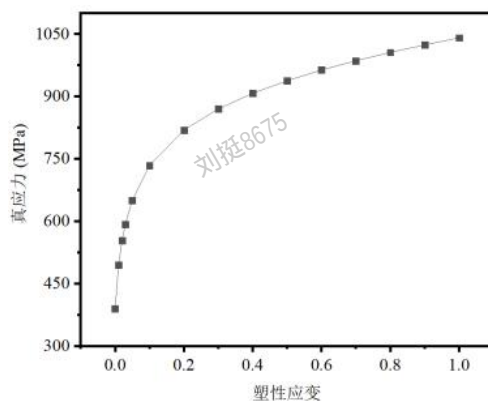


图 B.4 变形行为试验仿真模型图

B.2.4 选择加权系数 a 为待优化参数并设置其参数范围为 0 到 1，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间最大力平均相对误差为目标函数，当最大力平均相对误差不大于 10%，输出最优准静态硬化曲线（见图 B.5）。最大力平均相对误差宜按公式（B.1）计算，计算示意图见图 B.6。



图B.5 最优准静态硬化曲线图

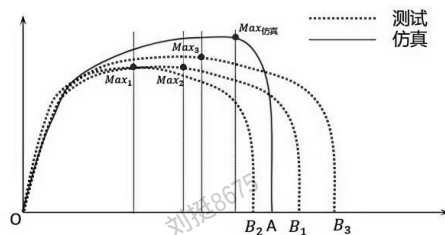


图 B.6 最大力平均相对误差计算示意图

$$H_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_i - F_s}{F_s} \right| \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

H_F ——最大力平均相对误差, 单位为百分数(%);

N ——试验次数, 无量纲;

F_i ——每次试验最大力, 单位为牛顿(N);

F_s ——仿真最大力, 单位为牛顿(N)。

B.3 应变速率效应参数标定结果

B.3.1 基于变形行为试验中的动态单向拉伸数据, 根据 GB/T 30069.2 中的方法处理获得各应变速率下的真应力-塑性应变曲线 (见图 B.7)。

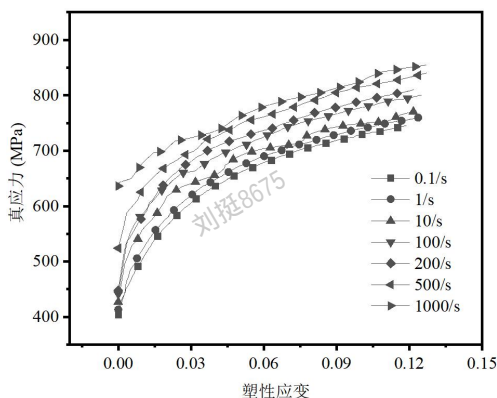
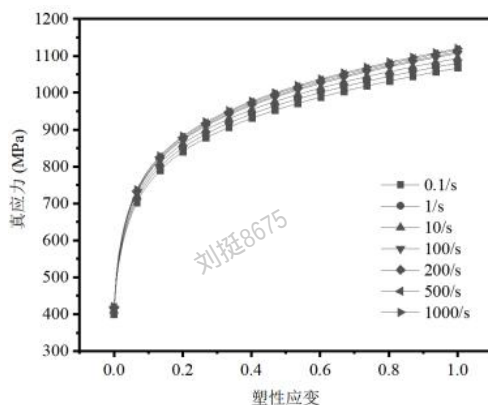


图 B.7 各应变速率下的真应力-塑性应变曲线图

B.3.2 基于各应变速率下的真应力-塑性应变曲线, 采用 Johnson-Cook 应变速率效应模型进行拟合外延, 获得外延的动态硬化曲线 (见图 B.8)。



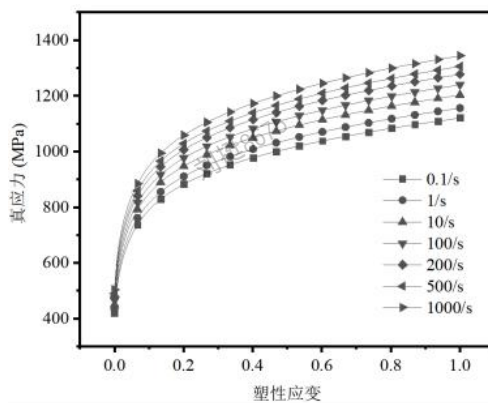
图B.8 外延动态硬化曲线图

B.3.3 基于变形行为试验中的各动态试验工况，采用有限元软件建立仿真模型（见图B.9），模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm。



图B.9 高速拉伸仿真模型图

B.3.4 设置材料常数 C_I 为待优化参数并设置其参数范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间最大力平均相对误差为目标函数，当最大力平均相对误差不大于 10%，输出最优动态硬化曲线（见图 B.10）。



图B.10 最优动态硬化曲线图

B.4 本构模型参数标定结果

B.4.1 将最优准静态硬化曲线及最优动态硬化曲线组合，获得本构模型参数。

附录 C

(资料性)

常用断裂失效模型及网格尺寸效应模型

C.1 常用断裂失效模型

C.1.1 在材料断裂失效参数标定过程中, 宜采用如下模型进行拟合 (可根据需求选择其他模型)。

C.1.2 MMC断裂模型

MMC断裂模型假设材料断裂等效塑性应变是应力三轴度和洛德角参数的函数, 见公式 (C.1):

$$\bar{\varepsilon}_f = \left\{ \frac{K}{C} \left[C_\theta^s + \frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}} (1-C_\theta^s) (\sec(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}) - 1) \right] \left[\sqrt{\frac{1+f^2}{3}} \cos(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}) + f(\eta + \frac{1}{3} \sin(\frac{\pi\bar{\theta}}{6})) \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad \text{.....(C.1)}$$

式中:

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲;

η ——应力三轴度, 无量纲;

$\bar{\theta}$ ——洛德角参数, 无量纲;

K 、 C 、 C_θ^s 、 f 、 n ——材料常数, 无量纲。

假设损伤按照线性进行累积, 损伤因子 $D=1$ 时, 材料发生断裂, 见公式 (C.2):

$$D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f} \quad \text{.....(C.2)}$$

式中:

D ——损伤因子, 无量纲;

$d\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变增量, 无量纲;

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲。

C.1.3 GISSMO断裂模型

GISSMO断裂模型是一种唯象损伤力学模型, 以非线性损伤累积的方式描述材料从变形到断裂失效的整个过程, 包含路径相关断裂准则和不稳定性准则。

路径相关断裂准则中, 假设损伤按照线性或非线性进行累积, 损伤因子 $D=1$ 时, 材料发生断裂, 见公式 (C.3):

$$\Delta D = \frac{n'}{\bar{\varepsilon}_f} D^{(1-\frac{1}{n'})} \Delta \bar{\varepsilon}_p \quad \text{.....(C.3)}$$

式中:

D ——损伤因子, 无量纲;

n' ——损伤累积指数, 无量纲;

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲;

$\Delta \bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变增量, 无量纲。

路径相关不稳定性准则中, 假设损伤按照线性或非线性进行累积, 不稳定性因子 $F=1$ 时, 材料发生不稳定性变形, 见公式 (C.4):

$$\Delta F = \frac{n'}{\bar{\varepsilon}_{p,loc}} F^{(1-\frac{1}{n'})} \Delta \bar{\varepsilon}_p \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

F ——不稳定性因子, 无量纲;

n' ——损伤累积指数, 无量纲;

$\bar{\varepsilon}_{p,loc}$ ——失稳等效塑性应变, 无量纲;

$\Delta \bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变增量, 无量纲。

材料发生不稳定性变形后, 对真应力进行修正, 见公式 (C.5):

$$\bar{\sigma}^* = \bar{\sigma} \left[1 - \left(\frac{D - D_c}{1 - D_c} \right)^{m'} \right] \quad D \geq D_c \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

$\bar{\sigma}^*$ ——修正后米塞斯等效应力, 单位为兆帕(MPa);

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa);

D ——损伤因子, 无量纲;

D_c ——不稳定性变形时刻损伤因子, 无量纲;

m' ——应力衰减指数, 无量纲。

C.1.4 DIEM断裂模型

DIEM 断裂模型包含损伤产生准则和损伤演化准则, 其中损伤产生准则用于判断材料何时发生不稳定性变形, 损伤演化准则用于判断材料何时发生断裂。

损伤产生准则分为正向准则和剪切准则。正向准则见公式 (C.6):

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_f &= d e^{q\beta} \\ \beta &= \frac{1 - k_{NF}\eta}{\nu} \dots\dots\dots (C.6) \\ \nu &= \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \end{aligned}$$

式中:

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲;

η ——应力三轴度, 无量纲;

σ_1 ——第一主应力, 单位为兆帕(MPa);

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa);

d 、 q 、 k_{NF} ——材料常数, 无量纲。

剪切准则见公式 (C.7) :

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_f &= \frac{\varepsilon_{SF}^+ \sinh(f(\theta - \theta^-)) + \varepsilon_{SF}^- \sinh(f(\theta^+ - \theta))}{\sinh(f(\theta^+ - \theta^-))} \\ \theta &= \frac{1 - k_{SF} \eta}{\omega} \\ \omega &= \frac{\tau_{\max}}{\bar{\sigma}}\end{aligned} \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲;

η ——应力三轴度, 无量纲;

$\tau_{\max}$ ——最大剪应力, 单位为兆帕(MPa);

$\bar{\sigma}$ ——米塞斯等效应力, 单位为兆帕 (MPa);

ε_{SF}^+ 、 ε_{SF}^- 、 f 、 k_{SF} ——材料常数, 无量纲。

损伤产生准则中, 假设损伤按照线性进行累积, 损伤产生因子 $\omega_D=1$ 时, 材料发生不稳定性变形, 见公式 (C.8) :

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

式中:

ω_D ——损伤产生因子, 无量纲;

$d\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变增量, 无量纲;

$\bar{\varepsilon}_f$ ——断裂等效塑性应变, 无量纲。

材料发生不稳定性变形后, 损伤开始演化和累积。损伤演化准则中, 假设损伤按照线性进行累积, 损伤演化因子 $D=1$ 时, 材料发生断裂, 见公式 (C.9) :

$$\dot{D} = \frac{\dot{u}^p}{\frac{\partial u_f^p}{\partial D}} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

式中:

$\dot{D}$ ——损伤演化率, 单位为/秒(s^{-1});

$\dot{u}^p$ ——塑性位移率, 单位为毫米/秒(mm/s);

u_f^p ——断裂时刻塑性位移, 单位为毫米(mm);

D ——损伤演化因子, 无量纲。

C.2 网格尺寸效应模型

C.2.1 在材料网格尺寸效应参数标定过程中, 宜采用如下模型进行拟合 (可根据需求选择其他模型), 见公式 (C.10) :

$$\delta_{mesh} = \frac{\bar{\varepsilon}_{f,mesh}}{\bar{\varepsilon}_f^0} \dots\dots\dots (C.10)$$

式中：

δ_{mesh} ——网格正则化因子，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_{f,mesh}$ ——不同网格对应断裂等效塑性应变，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_f^0$ ——参考网格对应断裂等效塑性应变，无量纲。

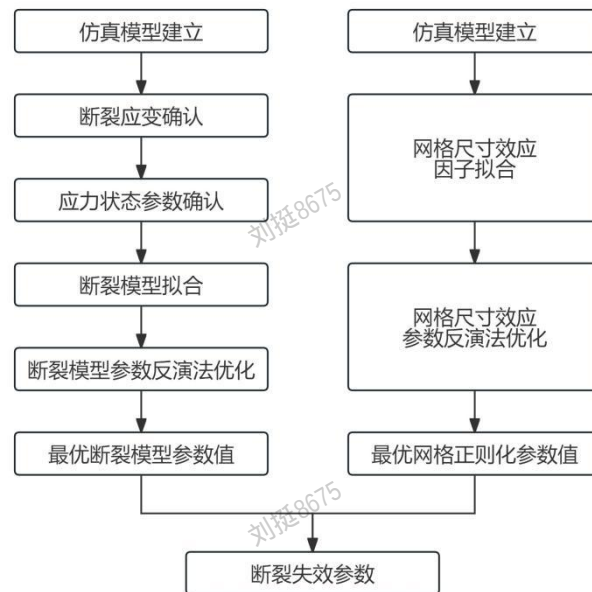
附录 D

(资料性)

材料断裂失效参数标定案例

D.1 标定流程

D.1.1 材料断裂失效参数标定过程示意图见图D.1。



图D.1 断裂失效参数标定过程示意图

D.2 断裂模型参数标定结果

D.2.1 基于各断裂行为试验工况，采用有限元软件建立仿真模型（见图D.2），模型中主要变形区域网格尺寸宜为0.5mm。

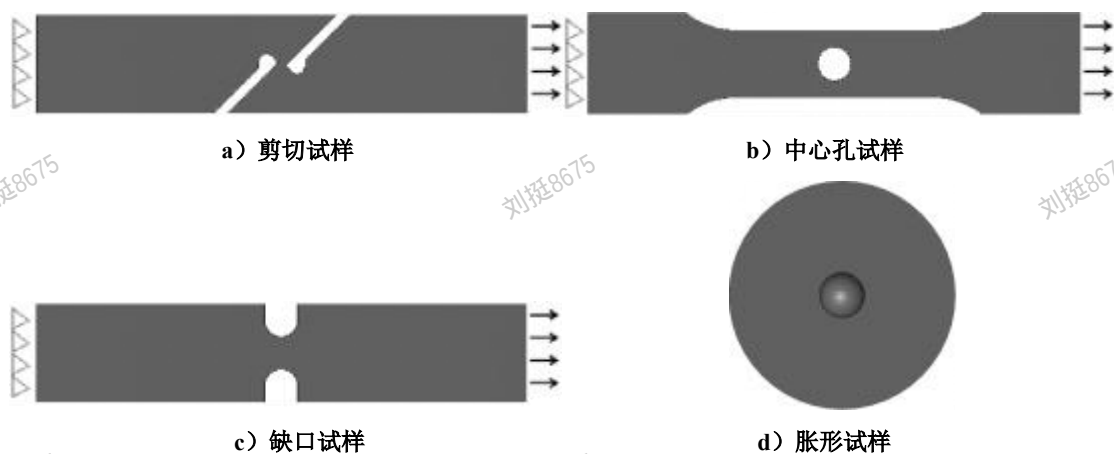


图 D.2 断裂行为试验仿真模型图

D.2.2 根据各断裂行为试验结果确定仿真断裂时刻，基于仿真结果确定断裂时刻主要变形区域单元的最大等效塑性应变（如表D.1）。

表 D.1 不同试验断裂时刻等效塑性应变

序号	试验名称	断裂时刻等效塑性应变
1	剪切	0.82
2	中心孔拉伸	0.84
3	缺口	0.53
4	胀形	1.08

D.2.3 基于断裂行为试验仿真结果，选择断裂时刻最大等效塑性应变单元，计算获得该单元从变形起始到断裂时刻的平均应力三轴度（如表D.2）。

D.2 不同试验的平均应力三轴度

序号	试验名称	平均应力三轴度
1	剪切	0.025
2	中心孔拉伸	0.371
3	缺口	0.535
4	胀形	0.638

D.2.4 基于各断裂行为试验的断裂时刻等效塑性应变及平均应力三轴度，采用MMC断裂模型进行拟合，获得断裂模型拟合曲线（见图D.3）。

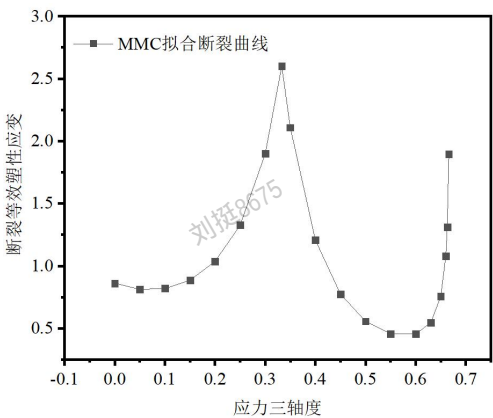
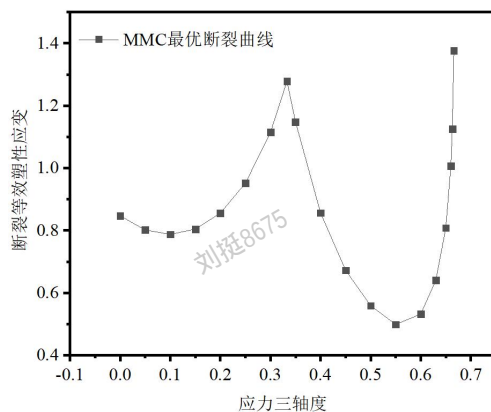
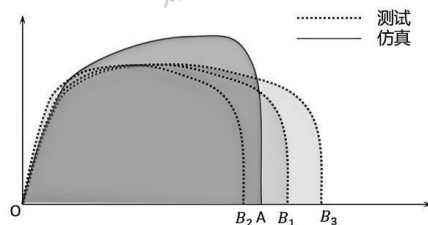


图 D.3 MMC 断裂模型拟合曲线

D.2.5 将断裂模型拟合曲线添加到断裂行为试验仿真中，设置典型应力状态的断裂应变值为待优化参数并设置其参数范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间面积及断裂位移平均相对误差为目标函数，当面积及断裂位移平均相对误差不大于 10%，输出最优断裂模型曲线（见图 D.4）。面积平均相对误差及断裂位移平均相对误差宜按公式（D.1）、公式（D.2）计算，计算过程示意图见图 D.5、图 D.6。



图D.4 最优断裂模型曲线



图D.5 面积平均相对误差计算示意图

$$H_W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{W_i - W_s}{W_s} \right| \cdot 100\% \quad \text{.....(D.1)}$$

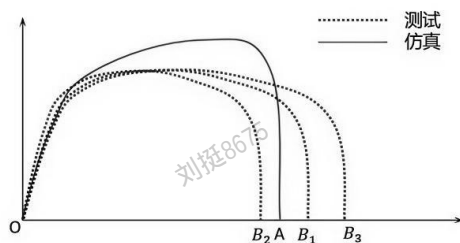
式中:

H_W ——面积平均相对误差, 单位为百分数(%);

N ——试验次数, 无量纲;

W_i ——每次试验力-位移曲线的面积, 单位为焦耳(J);

W_s ——仿真力-位移曲线的面积, 单位为焦耳(J)。



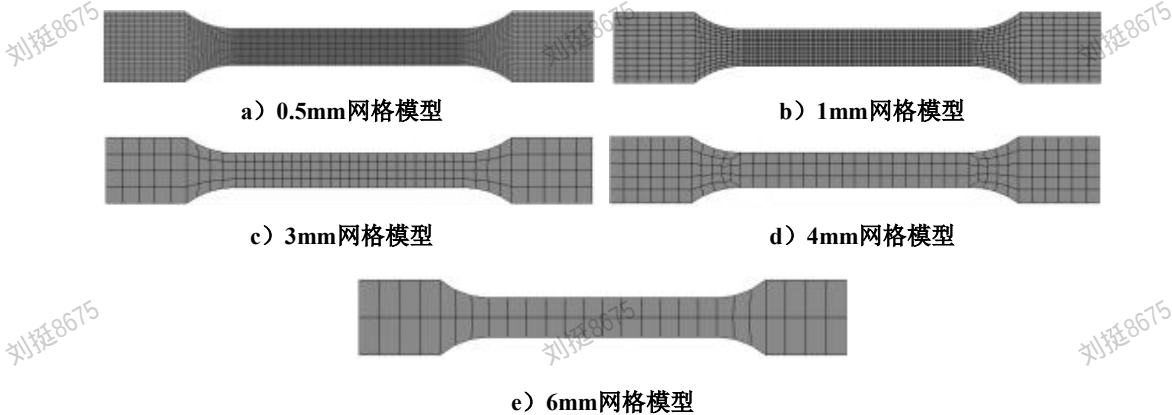
图D.6 断裂位移平均相对误差计算示意图

$$H_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - E_s}{E_s} \right| \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：
 H_E ——断裂位移平均相对误差，单位为百分数(%)；
 N ——试验次数，无量纲；
 E_i ——每次试验断裂位移，单位为毫米(mm)；
 E_s ——仿真断裂位移，单位为毫米(mm)。

D.3 网格尺寸效应参数标定结果

D.3.1 基于准静态单向拉伸试验工况，采用有限元软件建立多组网格尺寸的仿真模型（见图 D.7），模型中主要变形区域网格尺寸宜为 0.5mm、1mm、3mm、4mm、6mm。

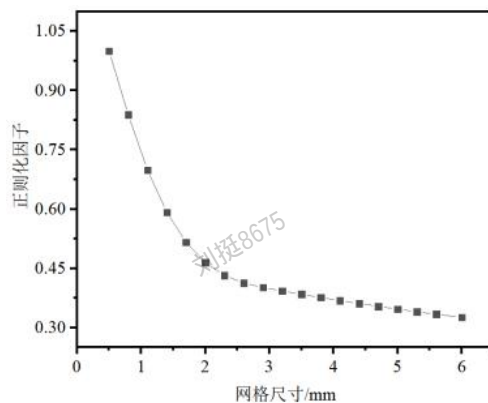


图D.7 多组网格尺寸的仿真模型图

D.3.2 基于不同网格尺寸仿真结果，提取主要变形区域单元的断裂时刻等效塑性应变（如表 D.3），采用网格尺寸效应模型进行拟合，获得网格正则化拟合曲线（见图 D.8）。

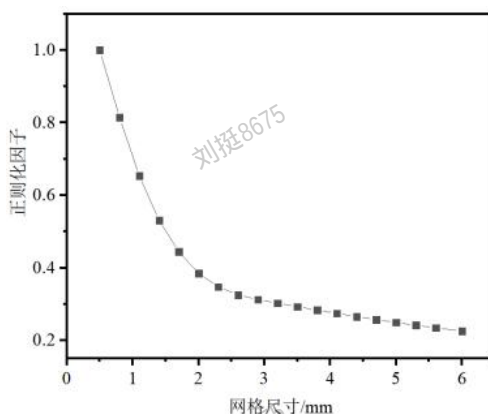
表D.3 不同网格尺寸仿真断裂时刻等效塑性应变

序号	网格大小（mm）	断裂时刻等效塑性应变
1	0.5	0.943
2	1	0.699
3	3	0.376
4	4	0.350
5	6	0.307



图D.8 网格正则化拟合曲线图

D.3.3 将网格正则化拟合曲线添加到准静态单向拉伸的多组网格尺寸仿真模型中，选择正则化因子为待优化参数并设置取值范围，提取仿真与试验的力-位移曲线，构建曲线间面积及断裂位移平均相对误差为目标函数，当面积及断裂位移平均相对误差不大于10%，输出最优网格正则化曲线及参数值（见图D.9）。



图D.9 最优网格正则化曲线图

D.4 断裂失效参数标定结果

D.4.1 将最优断裂模型参数及最优网格正则化参数值组合，获得断裂失效参数。

参考文献

- [1] Ludwik P. Elemente der technologischen Mechanik[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1909.
 - [2] Swift H W. Plastic instability under plane stress[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1952, 1(1): 1-18.
 - [3] 王哲君, 强洪夫, 王学仁. 新型亚稳 β 钛合金 Ti2448 的温变形行为及本构模型[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1295-1300.
 - [4] Hockett J E, Sherby O D. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1975, 23(2): 87-98.
 - [5] Voce E. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation[J]. Journal of the Institute of Metals, 1948, 74(1): 537-562.
 - [6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983: 541-547.
 - [7] Cowper G R, Symonds P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams[R]. Brown University, Division of Applied Mathematics, Report No. 28, 1958: 1-46.
 - [8] Bai Y, Wierzbicki T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture[J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1-20.
 - [9] Effelsberg J, Haufe A, Feucht M, et al. On parameter identification for the GISSMO damage model[C]// Proceedings of the 12th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn, USA, 2012: 1-10.
 - [10] Borrvall T. A general damage initiation and evolution model (DIEM) in LS-DYNA[C]// Proceedings of the European LS-DYNA Conference. 2013.
-