

DOI: 10.11918/201912028

韧性断裂准则参数标定及其在 DP590 中的应用

张赛军, 李康镇, 张 昆, 周 驰

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 为研究 DP590 高强钢板材的韧性断裂力学性能, 以 DF2012 韧性断裂准则为理论基础, 设计 6 种包含不同应力状态的拉伸试样来获取材料的塑性流动和断裂参数, 采用一种实验-模拟混合方法标定韧性断裂准则的参数。准确地描述材料发生断裂前的塑性行为是韧性断裂准则参数标定的关键, 以新提出的各向异性 Drucker 屈服准则和一种修正的 Voce 硬化准则表征 DP590 的塑性行为, 使用 Fortran 语言将该本构模型编译为 VUMAT 子程序嵌入 ABAQUS 仿真软件中进行试样的拉伸模拟。实验和模拟对比表明, 所构建的本构模型可以准确地预测不同试样沿着轧制方向各个角度的力程曲线。在拉伸实验和标定的本构模型基础上, 标定 DF2012 韧性断裂准则的参数并构建 DP590 在应力三轴度和断裂应变二维空间中的断裂轨迹。与 3 种经典的韧性断裂准则 Cockcroft-Latham、Clift 和 Rice-Tracey 进行比较, 使用 Fortran 语言将 DF2012 韧性断裂准则和本构模型一起嵌入 ABAQUS 仿真软件对不同试样的断裂进行模拟, 结果表明: 基于实验-模拟混合法标定的 DF2012 韧性断裂准则能够合理地构建 DP590 的断裂轨迹曲线和准确地预测不同应力状态下拉伸试样断裂的发生。

关键词: 韧性断裂准则; 本构模型; DP590; 高强钢; 参数标定; 实验-模拟混合法

中图分类号: O346.1; TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)01-0063-07

Parameter calibration of ductile fracture criterion and its application on DP590

ZHANG Saijun, LI Kangzhen, ZHANG Kun, ZHOU Chi

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To study the ductile fracture mechanical properties of DP590 high-strength steel sheet, based on the DF2012 ductile fracture criterion, six types of tensile specimens under different stress states were designed to obtain the plastic flow and fracture parameters of the materials. In this study, an experiment-simulation hybrid method was used to calibrate the parameters of the ductile fracture criterion, for which accurately describing the plastic behavior before fracture is the key to calibrate the parameters of ductile fracture criterion. A newly proposed anisotropic Drucker yield criterion and a modified Voce hardening criterion were used to characterize the plastic behavior of DP590, and the constitutive model was compiled into a VUMAT subroutine by Fortran language and embedded into ABAQUS simulation software for tensile simulation of specimens. The experimental and simulation results show that the constitutive model can accurately predict the force curves of different specimens at different angles along the rolling direction. Based on the tensile experiments and the calibrated constitutive model, the parameters of DF2012 ductile fracture criterion were calibrated and the fracture locus of DP590 in two-dimensional space of stress triaxiality and fracture strain was constructed. And three typical ductile fracture criteria (Cockcroft-Latham, Clift and Rice-Tracey) were used for comparison. The results show that DF2012 ductile fracture criterion calibrated based on experiment-simulation hybrid method can reasonably construct the fracture locus of DP590 and accurately predict the fracture occurrence of tensile specimens under different stress states.

Keywords: ductile fracture criterion; constitutive model; DP590; high-strength steel; parameter calibration; experimental-simulation hybrid method

研究表明, 汽车质量每减轻 10%, 汽车油耗和排放可以降低 6%~8%^[1]。在节能减排和汽车轻量化的背景下, DP590 高强钢因比强度高等优点在汽车车身中的使用越来越广泛。高强钢成形过程中的

破裂是阻碍其在汽车车身中推广应用的主要问题之一, 因此研究韧性断裂准则在 DP590 高强钢破裂预测中的应用具有重要的意义。韧性断裂准则是一种建立在韧性损伤力学基础上, 以微观孔洞的成核、生长、联合引起的累积损伤为判据的破裂预测方法。韧性断裂准则主要分为两大类: 耦合韧性断裂准则和非耦合韧性断裂准则。耦合断裂准则考虑了损伤对材料带来的软化作用, 而非耦合断裂准则没有考

收稿日期: 2019-12-05

基金项目: 广东省自然科学基金 (2016A030313453, 2016A030313519)

作者简介: 张赛军 (1978—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 张赛军, mesjzhang@scut.edu.cn

虑该因素. 最著名的耦合断裂准则是由 Gurson^[2]、Tvergaard 等^[3]提出的 GTN 模型. 耦合韧性断裂准则形式通常比较复杂, 而非耦合韧性断裂准则形式简洁, 计算简单, 在工业生产中应用更加广泛. 在前人的不断探索中, 发展出了很多成熟的非耦合韧性断裂准则. Cockcroft 等^[4]实验观察到韧性断裂往往发生在最大拉应力区域, 提出了一种基于最大主应力的非耦合韧性断裂准则. 随后, Oh、Clift 和 Ko 等^[5-7]分别在 Cockcroft-Latham 准则的基础上提出了一些新的修正模型. Rice 等^[8]通过应力三轴度的指数函数来近似描述单个球形孔洞的生长, 由于简化了分析结果, 使 Rice-Tracey 模型在板材成形中得到广泛的应用. 随后, Oyane 等^[9]根据多孔材料的塑性理论方程推导出了新的韧性断裂准则. 考虑到孔洞的成核、生长和聚结效应, Lou 等^[10]提出了应力三轴度截断值为 $-1/3$ 的 DF2012 准则. 为了描述金属在低应力三轴度下的韧性断裂, Cao 等^[11]基于 Lemaitre 模型提出了修正的断裂准则; 而 Mohr 等^[12]提出了唯象 Hosford-Coulomb 模型. 近年来, 为了适应新材料和新成形工艺的应用, 出现了一些新的非耦合韧性断裂准则^[13-15].

随着韧性断裂准则理论的发展, 其已经被广泛应用于金属板材破裂的预测. Lou 等^[16]使用 DF2012 韧性断裂准则成功预测了 DP980 高强钢的破裂. 以 DP780 高强钢为例, Wang 等^[17]比较了 Brozzo、McClintock、Rice-Tracey 和 Oyane 等 4 种韧性断裂准则对高强钢破裂预测的精度. 陈劫实等^[18]使用 Clift 等 4 种韧性断裂准则分别预测了 HS 钢、IF 钢以及 6111-T4 铝合金的成形极限. 王在林等^[19]将常用的 6 种韧性断裂准则用于超高强钢辊弯成形破裂预测, 并验证了 Brozzo 韧性断裂准则在超高强钢破裂预测中的准确性. 此外, 余心宏等^[20]使用 Oyane 韧性断裂准则成功预测了铝合金 A5182-O 和 SPCC 的成形极限.

随着 DP590 高强钢在工业中应用越来越广泛, 探索一种更加灵活、准确的韧性断裂准则在其成形模拟中的应用具有重要的研究价值. 本文将 DP590 高强钢为研究对象, 设计 6 种单向加载试样获取材料的断裂参数, 运用实验-模拟混合方法标定一种灵活的 DF2012 韧性断裂准则并嵌入 ABAQUS 软件中进行断裂预测模拟.

1 实验研究

1.1 实验材料和试样制备

本研究以厚度为 1.5 mm 的 DP590 高强钢板材为研究对象. 为了探究 DP590 高强钢的塑性和断裂性能, 设计了 6 种不同形状和尺寸的单向加载试样,

如图 1 所示. 其中, 图 1 中试样 I 是狗骨试样, 用于测定 DP590 的塑性性能; 其余分别是圆孔试样、R5 缺口试样、R10 缺口试样、R20 缺口试样和剪切试样, 这些试样包含纯剪切到平面应变的应力状态, 用于测定 DP590 的材料断裂参数.

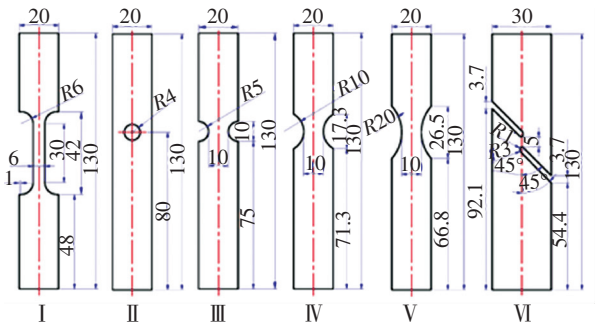


图 1 试样形状与尺寸 (mm)

Fig.1 Shapes and dimensions of specimens

为研究 DP590 高强钢板的塑性各向异性, 每种试样均制备了与轧制方向成 0° 、 45° 和 90° 的 3 个试样.

1.2 实验过程

本研究中, 6 种试样的拉伸实验均可在同一台岛津 AG-X Plus 100 kN 万能试验机上完成, 拉伸速度设置为 2 mm/min, 数据采样频率为 100 Hz. 为避免实验数据的偶然性, 每组实验均重复进行 3 次并取平均值. 实验中材料的变形过程通过高清单反相机进行记录, 图像采样频率为 10 Hz, 最后使用数字图像相关 (DIC) 软件 Ncorr^[21] 计算试样的全场应变. 以狗骨试样为例, 通过实验得到 3 个取向的工程应力-工程应变曲线如图 2 所示.

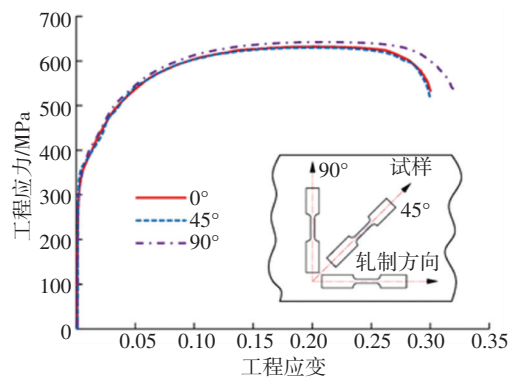


图 2 狗骨试样的工程应力-应变曲线

Fig.2 Engineering stress-strain curves of dog-bone specimen

2 本构模型

2.1 各向异性屈服函数

本研究标定断裂准则参数采用的是一种实验-模拟混合方法, 选用由 Lou 等^[22]提出的各向异性 Drucker 屈服函数, 该屈服函数已被验证可以准确地表征面心立方和体心立方晶体结构金属的各向异性

塑性, 并且该屈服函数相对其他经典屈服函数可以大大提高仿真模拟的计算效率. 各向异性 Drucker 屈服函数的基本形式为

$$\bar{\sigma} = (J_2'^3 - c J_3'^2)^{1/6}$$

式中: 参数 c 是经验常数, 这里 c 取建议值 1.226^[22], J_2' 和 J_3' 是应力张量 s' 的第 2 和第 3 应力不变量, 这两个应力不变量的计算表达式如下:

$$J_2' = (1/2) s' : s' = -s'_{11} s'_{22} - s'_{22} s'_{33} - s'_{11} s'_{33} + s'_{12}^2 + s'_{23}^2 + s'_{13}^2, \quad (1)$$

$$J_3' = \det(s') = -s'_{11} s'_{22} s'_{33} + 2 s'_{12} s'_{23} s'_{13} - s'_{11} s'_{23}^2 - s'_{22} s'_{13}^2 - s'_{33} s'_{12}^2. \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中应力张量 s' 的应力分量计算如下:

$$s' \equiv \begin{bmatrix} s'_{11} \\ s'_{22} \\ s'_{33} \\ s'_{23} \\ s'_{13} \\ s'_{12} \end{bmatrix} = L' \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix},$$

$$L' = \begin{bmatrix} \frac{c'_2 + c'_3}{3} & -\frac{c'_3}{3} & -\frac{c'_2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c'_3}{3} & \frac{c'_3 + c'_1}{3} & -\frac{c'_1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c'_2}{3} & -\frac{c'_1}{3} & \frac{c'_1 + c'_2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c'_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c'_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c'_6 \end{bmatrix}$$

在各向异性 Drucker 屈服函数中, 共有 6 个各向异性参数. 其中, c'_1, c'_2, c'_3, c'_6 是面内各向异性塑性参数, 可用 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 方向的拉伸屈服应力以及等双拉的屈服应力 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$ 进行标定. 因为厚度方向的材料属性难以通过实验测得, 所以厚向塑性参数 c'_4, c'_5 通常取值与 c'_6 相等^[22].

表 1 为实验测定的 DP590 沿轧制方向各个角度的屈服应力和厚向异性系数 r 值. 由于实验条件的限制, 本研究未进行等双向拉伸实验, 而采用一种等效的方法获得 σ_b 和 r_b .

表 1 DP590 的屈服应力和 r 值

Tab.1 Yield stress and r value of DP590

拉伸方向/ $(^\circ)$	屈服应力/MPa	r
0	355.72	0.90
45	357.92	0.73
90	360.32	1.42
等双拉	357.97	1.86

结合表 1 和图 2 可知, DP590 初始屈服应力的各向异性不明显, 因此等双拉屈服应力 σ_b 使用理论公式 $\sigma_b = (\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90})/4$ 进行求解, 屈服应力各向异性不明显时, 采用该方法可以同时兼顾参数求解的效率和理论预测值的精度; 因为厚向异性系数 r 值的各向异性较为明显, 采用各向异性屈服函数 Yld1996 对 r_b 进行预测, 尽可能使得 r_b 预测值更加准确. 使用屈服应力标定各向异性 Drucker 屈服函数, 参数标定结果如表 2 中 Drucker_y 对应数据所示. 为了增加各向异性 Drucker 屈服准则的灵活性, 数值模拟中使用了非相关塑性流动法则, 材料的塑性势函数形式与屈服面的函数形式一致, 改用厚向异性系数 r 值对塑性面的参数进行标定, 标定结果如表 2 中 Drucker_p 对应数据所示.

本文还比较了 Hill48 屈服函数与各向异性 Drucker 屈服函数对 DP590 塑性各向异性的预测精度. Hill48 屈服函数基本形式如式 (3) 所示:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 2\bar{\sigma}^2. \quad (3)$$

使用厚向异性系数 r 值对其参数进行标定, 结果如表 2 所示.

表 2 屈服函数的标定结果

Tab.2 Calibration results of yield functions

屈服函数	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4	参数 5	参数 6
Drucker_y	1.757	1.803	1.779	1.780	1.780	1.780
Drucker_p	1.547	1.828	1.753	1.567	1.567	1.567
Hill48	0.667	1.053	0.947	3.000	3.000	2.115

根据表 2 中屈服函数的参数, 绘制屈服函数的面内屈服轨迹如图 3 所示. 由图 3 可知, 各向异性 Drucker 屈服函数预测的屈服轨迹与实验结果十分吻合; 而 Hill48 屈服准则未能准确预测除轧制方向外的其他两个方向的屈服应力.

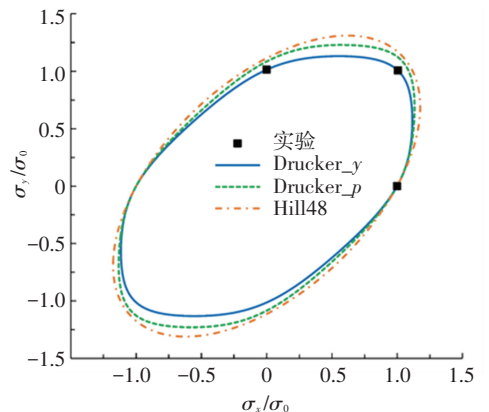


图 3 DP590 的实验和理论屈服轨迹比较

Fig.3 Comparison of experimental and theoretical yield loci of DP590

2.2 硬化准则

试样变形过程中,断裂应变通常显著高于最大均匀应变.为了表征 DP590 的硬化行为,需要建立合适的硬化模型来准确预测大应变下的真实应力.常用的 Swift 非饱和型硬化模型和 Voce 饱和型硬化模型均不能很好地预测 DP590 在大应变下的应力,因此研究中使用了修正的 Voce 硬化准则(指数型 Voce+Voce 硬化准则)表征 DP590 的硬化行为,其硬化方程为

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_Y + A_1(1 - e^{-\beta_1\varepsilon}) + A_2(-e^{-\beta_2\varepsilon}).$$

式中: ε 是等效塑性应变, σ_Y 是初始屈服应力, A_1 、 β_1 、 A_2 、 β_2 是 4 个硬化常数.

使用轧制方向的狗骨试样实验数据拟合硬化参数,用最小二乘法求得: $\sigma_Y = 347.53$ MPa, $A_1 = 313.17$ MPa, $\beta_1 = 18.66$, $A_2 = 377.36$ MPa, $\beta_2 = 1.84$.

为验证硬化准则的准确性,将其用于剪切试样的仿真模拟,并与 Swift、Voce 硬化准则进行对比,模拟和实验结果如图 4 所示.由图 4 可知,Voce+Voce 硬化准则可以准确表征 DP590 高强钢的硬化行为,而 Swift 和 Voce 硬化方程分别高估和低估了 DP590 在大应变下的应力.

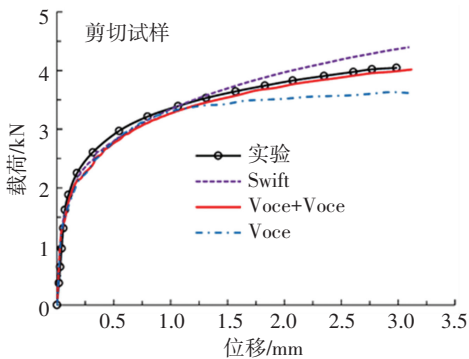


图 4 剪切试样实验和模拟载荷-位移曲线的比较

Fig.4 Comparison of experimental and simulated load-stroke curves of shear specimen

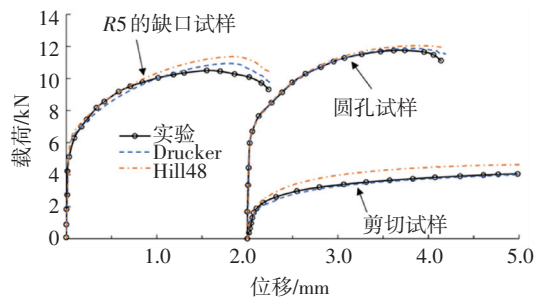
2.3 本构模型的验证

为进一步验证各向异性 Drucker 屈服函数和 Voce+Voce 硬化方程对 DP590 高强钢塑性行为预测的准确性,将该本构模型通过 Fortran 语言编译为 VUMAT 子程序后嵌入 ABAQUS 有限元软件,用于模拟不同应力状态下 DP590 板材的加载过程.模拟选用了 R5 缺口、圆孔和剪切试样 3 种试样.

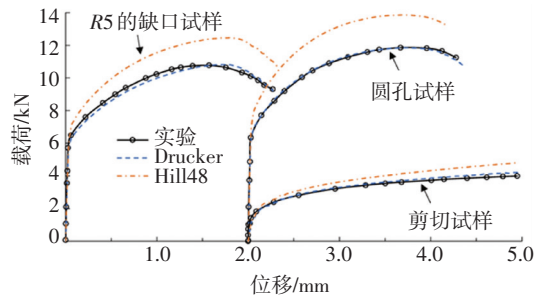
首先,根据各个试样的几何尺寸建立有限元模型.为提高模拟的计算效率,利用试样的对称性,针对缺口试样和圆孔试样均建立了 1/8 对称模型;针对剪切试样建立了厚向对称的 1/2 模型.此外,为兼顾模拟的精度和计算效率,划分网格时在塑性变形较大的区域划分较细的网格,并逐渐增大过渡到

弹性变形为主的区域.经过网格敏感性测试后,各试样大变形区域均划分大小约为 0.05 mm 的网格.

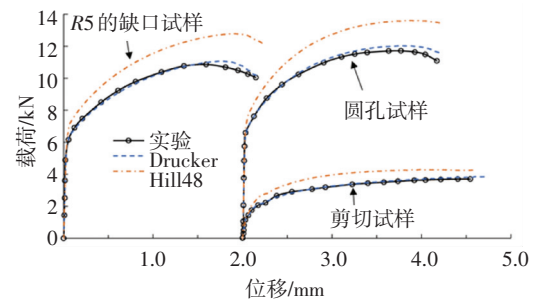
图 5 是各试样 3 个不同取向(0° , 45° , 90°)的实验和模拟载荷-位移曲线对比,为便于区分,圆孔试样和剪切试样曲线的横坐标同时向右平移了 2 mm.由图 5 可知,各向异性 Drucker 屈服函数很好地再现了 DP590 的 3 种试样不同取向的载荷-位移曲线,而且表现出了比 Hill48 屈服函数更好的预测精度.因此,各向异性 Drucker 屈服函数与 Voce+Voce 硬化准则较好地表征了 DP590 高强钢的塑性行为,可以用于标定韧性断裂准则.



(a) 沿轧制方向 0° 的实验和模拟结果



(b) 沿轧制方向 45° 的实验和模拟结果



(c) 沿轧制方向 90° 的实验和模拟结果

图 5 不同角度的实验和模拟载荷-位移曲线比较

Fig.5 Comparison of experimental and simulated load-stroke curves at different angles

3 韧性断裂准则

3.1 韧性断裂准则表达式

在众多韧性断裂准则中,本研究以 DF2012 韧性断裂准则^[10]为理论基础,这是一种基于应力三轴度、罗德参数和等效塑性应变构建断裂判据的准则,其表达式如表 3 所示.将 3 种经典韧性断裂准则

Cockcroft-Latham (C-L)^[4]、Clift^[6] 和 Rice-Tracey (R-T)^[8] 与 DF2012 准则进行对比. 由于应力状态和应变强度是控制韧性断裂萌生的最重要因素, 所有模型均表示为应力三轴度、罗德参数和等效塑性应变的形式.

表 3 DF2012 与其他 3 种韧性断裂准则

Tab.3 DF2012 and other three ductile fracture criteria

韧性断裂准则	表达式
DF2012	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{2}{\sqrt{L^2 + 3}} \right) a_1 \left(\frac{1 + 3\eta}{2} \right) a_2 d\bar{\epsilon} = a_3,$ $\langle x \rangle = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
C-L	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma(\bar{\epsilon}) * \left(\eta + \frac{3-L}{3\sqrt{L^2 + 3}} \right) d\bar{\epsilon} = b$
Clift	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma(\bar{\epsilon}) d\bar{\epsilon} = c$
R-T	$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} 0.283 \exp\left(\frac{3\eta}{2}\right) d\bar{\epsilon} = d$

3.2 韧性断裂准则参数标定

本研究选用 R10 缺口试样、圆孔试样和剪切试样标定断裂准则的参数. 由于实验难以直接获得应力三轴度、罗德参数和断裂应变, 因此, 在单拉实验结果和标定的本构模型基础上, 采用实验-模拟混合法标定韧性断裂准则.

以 R10 缺口试样为例, 阐述实验-模拟混合法确定断裂参数的过程. 首先, 根据图 6 中试样断裂位置对应表层单元 A 的实验-模拟应变演化对比以及试样的力程曲线对比来验证模拟模型的准确性. 然后, 使用试样的实验断裂位置处对应单元(即中心层单元 B)的等效塑性应变模拟结果预测断裂应变. 值得注意的是, 本研究将实验中试样承载能力急剧下降的时刻等效为断裂开始时刻, 将断裂单元在该时刻的等效塑性应变作为断裂应变. 使用同样的方法, 可以分别获得各试样的断裂应变, 如表 4 所示.

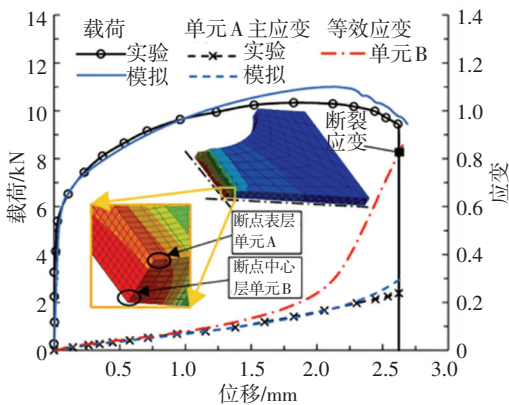


图 6 实验-模拟混合法确定 R10 缺口试样断裂应变

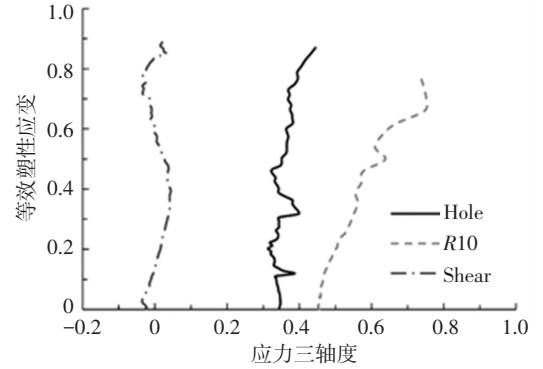
Fig.6 Determination of fracture strain of specimen R10 using experiment-simulation hybrid method

表 4 标定断裂准则用参数

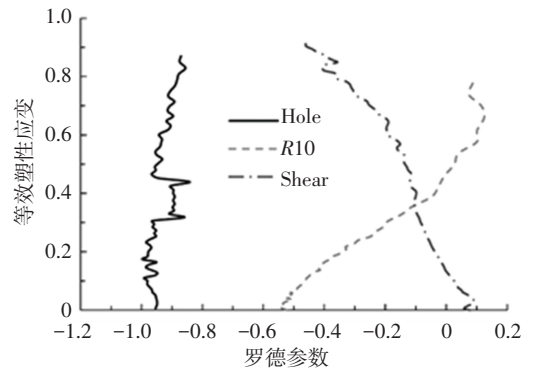
Tab.4 Parameters for calibration of fracture criteria

试样类型	断裂应变	应力三轴度	罗德参数
圆孔试样	0.890	0.364	-0.928
R10 缺口试样	0.817	0.591	-0.126
剪切试样	0.921	0.007	-0.150

除了断裂应变, 参数标定还需要获得试样断裂单元处的应力三轴度和罗德参数. 图 7 是通过模拟获得的 3 种试样的应力三轴度和罗德参数.



(a) 应力三轴度演化



(b) 罗德参数演化

图 7 各试样的应力三轴度和罗德参数演化

Fig.7 Stress triaxiality and Lode parameter evolution of each specimen

分别计算各试样的应力三轴度和罗德参数均值:

$$\eta_{avg} = \frac{1}{\bar{\epsilon}_f^p} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \eta(\bar{\epsilon}^p) d\bar{\epsilon}^p, \quad (8)$$

$$L_{avg} = \frac{1}{\bar{\epsilon}_f^p} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} L(\bar{\epsilon}^p) d\bar{\epsilon}^p. \quad (9)$$

计算结果如表 4 所示.

根据表 4, 用优化方法求解韧性断裂准则参数, 结果见表 5. 使用 DF2012 构建 DP590 高强钢在应力三轴度和等效塑性应变 ($\eta, \bar{\epsilon}$) 二维空间下的断裂轨迹, 如图 8 所示, 这是 DP590 的断裂判据. 图 8 还比较了 C-L、Clift 和 R-T 等 3 种准则构建的断裂轨迹. 由图 8 中断裂轨迹与实验数据的对比可知,

DF2012 韧性断裂准则具有足够的灵活性,为 DP590 构建了合理的断裂轨迹.

表 5 断裂准则标定结果

Tab.5 Calibration results of fracture criteria

韧性断裂准则	参数 1	参数 2	参数 3
DF2012	0.42	0.12	0.90
C-L	747.40		
Clift	779.10		
R-T	0.46		

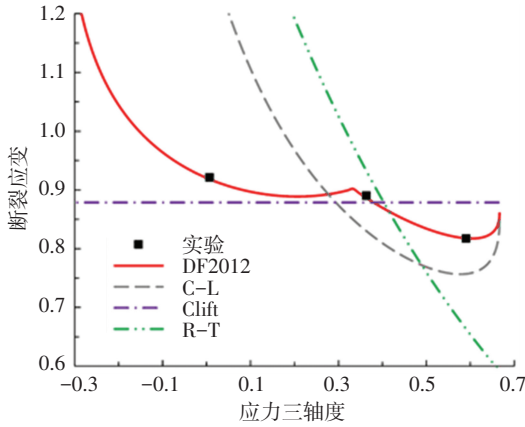


图 8 DP590 在 $(\eta, \bar{\epsilon})$ 空间下的断裂轨迹

Fig.8 Fracture loci of DP590 in the space of $(\eta, \bar{\epsilon})$

3.3 韧性断裂准则的验证

为了验证构建的断裂轨迹的准确性,使用 Fortran 语言将韧性断裂准则编译后嵌入 ABAQUS 仿真软件,并作为断裂判据用于 DP590 高强钢的拉伸仿真模拟.除了狗骨试样,本研究中其余 5 种试样均用于断裂模拟中,其中圆孔、R10 缺口和剪切试样参与了断裂准则的参数标定,R5 和 R20 缺口试样并未参与过参数标定.以圆孔和 R20 试样为例,对比了实验和模拟的试样断裂形貌,结果如图 9 所示.

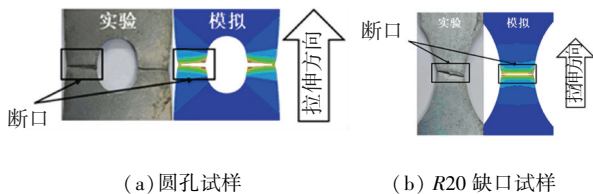


图 9 实验和模拟断裂形貌对比

Fig.9 Comparison of experimental and simulated fracture morphology

由图 9 可知,有限元模拟较好地还原了试样的断裂形式.为进一步验证韧性断裂准则的准确性,同样以圆孔和 R20 试样为例,绘制实验和模拟载荷-位移对比曲线如图 10 所示.将所有试样的实验和模拟断裂位移进行汇总和比较,如图 11 所示.

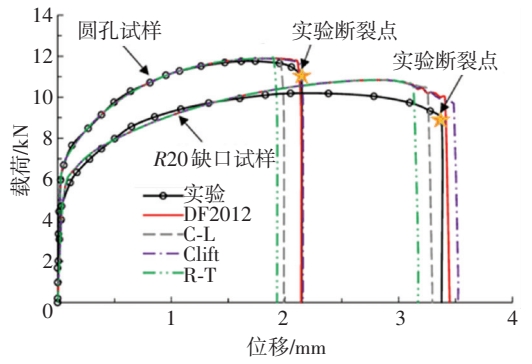


图 10 实验和模拟载荷-位移曲线对比

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

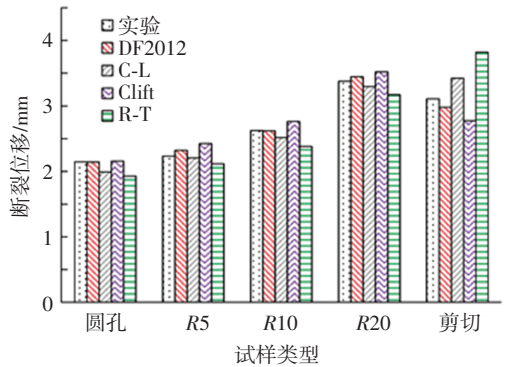


图 11 5 种试样的实验-模拟断裂位移汇总

Fig.11 Summary of experimental-simulated fracture displacement for five types of specimens

由图 11 可知,DF2012 韧性断裂准则较为准确地预测了各试样断裂的发生,比 C-L、Clift 和 R-T 准则精度更高. DF2012 韧性断裂准则对剪切试样断裂位移的预测精度明显高于其他准则.模拟结果验证了 DF2012 韧性断裂准则的灵活性和对 DP590 断裂预测的准确性,至少在应力三轴度值为 $(0 \sim 0.66)$ 的应力状态范围内得以验证.这是因为 DF2012 韧性断裂准则同时考虑了应力三轴度和罗德参数在断裂发生中的作用,并合理构建了应力三轴度、罗德参数和断裂应变之间的关系.

4 结论

基于 DP590 高强钢 6 种不同试样的单向加载实验,本文首先研究了 DP590 的塑性各向异性并确定本构模型,然后使用实验-模拟混合法标定了 DF2012 韧性断裂准则,并用于预测 DP590 高强钢板材的断裂,主要得出以下结论:

1) 对比试样沿轧制方向的 0° 、 45° 和 90° 等 3 个取向的实验和模拟载荷-位移曲线可知,与 Hill48 屈服函数相比,各向异性 Drucker 屈服函数可以准确地表征 DP590 的各向异性塑性行为.

2) Voce+Voce, Swift 和 Voce 等 3 种硬化准则对

DP590 在大应变下硬化行为的预测结果差异较大。对比剪切试样的实验和模拟载荷-位移曲线可知, Voce+Voce 硬化方程相对其他两者, 能正确表征 DP590 高强钢的硬化行为。

3) 采用实验-模拟混合法可以方便、准确地标定韧性断裂准则参数。由理论断裂轨迹与实验值对比可知, DF2012 韧性断裂准则具有足够的灵活性, 可以很好地构建 DP590 的断裂判据。

4) 将 DF2012 韧性断裂准则用于 DP590 的拉伸断裂模拟, 可以准确地预测不同应力状态试样断裂的发生, 验证了 DF2012 韧性断裂准则对 DP590 断裂预测具有足够的精度。

参考文献

- [1] SUN Wenlong, CHEN Xiaokai, WANG Lu. Analysis of energy saving and emission reduction of vehicles using light weight materials [J]. Energy Procedia, 2016, 88: 891. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.106
- [2] 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): 4. DOI: 10.1115/1.3443401
- [3] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 159. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90213-X
- [4] COCKROFT M G, LATHAM D J. Ductility and the workability of metals [J]. Journal Institute of Metals, 1968, 96: 33.
- [5] OH S I, CHEN C C, KOBAYASHI S. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing: part 2: workability in extrusion and drawing [J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 101(1): 36. DOI: 10.1115/1.3439471
- [6] CLIFT S E, HARTLEY P, STURGESS C E, et al. Fracture prediction in plastic deformation processes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1990, 32(1): 3. DOI: 10.1016/0020-7403(90)90148-C
- [7] KO Y K, LEE J, HUH H, et al. Prediction of fracture in hub-hole expanding process using a new ductile fracture criterion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 361. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.071
- [8] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3): 202. DOI: 10.1016/0022-5096(69)90033-7
- [9] OYANE M, SATO T, OKIMOTO K, et al. Criteria for ductile fracture and their applications [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1980, 4(1): 66. DOI: 10.1016/0378-3804(80)90006-6
- [10] LOU Yanshan, HUH H, LIM S J, et al. New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(25): 3607. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.02.016
- [11] CAO T S, GACHET J M, MONTMITONNET P, et al. A Lode-dependent enhanced Lemaitre model for ductile fracture prediction at low stress triaxiality [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 124/125: 83. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.03.021
- [12] MOHR D, MARCADET S J. Micromechanically-motivated phenomenological Hosford-Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities [J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 67/68: 43. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.02.024
- [13] LEE J Y, LEE M G, BARLAT F, et al. Piecewise linear approximation of nonlinear unloading-reloading behaviors using a multi-surface approach [J]. International Journal of Plasticity, 2017, 93: 114. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.02.004
- [14] LOU Yanshan, YOON J W. Anisotropic ductile fracture criterion based on linear transformation [J]. International Journal of Plasticity, 2017, 93: 10. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.04.008
- [15] CAO Jun, LI Fuguo, MA Xinkai, et al. A modified elliptical fracture criterion to predict fracture forming limit diagrams for sheet metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 117. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.018
- [16] LOU Yanshan, HUH H. Prediction of ductile fracture for advanced high strength steel with a new criterion: Experiments and simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1298. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.001
- [17] WANG Changsheng, CHEN Jun, XIA C, et al. A new method to calculate threshold values of ductile fracture criteria for advanced high-strength sheet blanking [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(4): 1304. DOI: 10.1007/s11665-013-0861-z
- [18] 陈劫实, 周贤宾. 成形极限预测韧性断裂准则及屈服准则的影响 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 972
CHEN Jieshi, ZHOU Xianbin. The influence of ductile fracture criterion and yield criterion on forming limit prediction [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 972. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5965.2006.08.023
- [19] 王在林, 韩飞, 刘继英, 等. 韧性断裂准则在超高强钢辊弯成形工艺中的应用 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 19
WANG Zailin, HAN Fei, LIU Jiying, et al. Application of ductile fracture criterion in roll forming process of ultra-high strength steel [J]. Journal of Plastic Engineering, 2012, 19(4): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2012.04.004
- [20] 余心宏, 翟妮芝, 翟江波. 应用韧性断裂准则预测板料的成形极限图 [J]. 锻压技术, 2007, 32(5): 46
YU Xinhong, ZHAI Nizhi, ZHAI Jiangbo. The forming limit diagram of sheet metal is predicted by ductile fracture criterion [J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(5): 46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2007.05.012
- [21] BLABER J A, ADAIR B, ANTONIOU A, et al. Ncorr: Open-source 2D Digital Image Correlation Matlab software [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6): 1106. DOI: 10.1007/s11340-015-0009-1
- [22] LOU Yanshan, YOON J W. Anisotropic yield function based on stress invariants for BCC and FCC metals and its extension to ductile fracture criterion [J]. International Journal of Plasticity, 2018, 101: 133. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.10.012

(编辑 杨波)