

建模预测

基于塑性演化的非关联 Hill48 屈服准则及其在超高强 DP 钢板中的应用

周兵营¹, 崔学习², 关铂镔³, 吴向东¹, 万敏¹

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 北京航天试验技术研究所 运载试验技术事业部, 北京 100074; 3. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘要: 针对超高强 DP 钢板在复杂加载条件下的塑性行为, 采用一种考虑塑性演化的非关联 Hill48 屈服准则, 实现了以较简单的屈服方程准确地预测 DP 钢屈服及后继屈服轨迹的目的。通过 0°、45° 和 90° 方向的单拉实验和复杂加载比例的十字形试件双拉实验, 获得了超高强 DP1180 钢板的基本力学性能参数和拉伸屈服轨迹, 采用不同的屈服准则对实验屈服轨迹进行预测。研究表明, 考虑塑性演化的非关联 Hill48 屈服准则对 DP1180 钢板初始屈服轨迹的预测精度与 Yld2000-2d 屈服准则预测精度相近, 而且还能以同等的精度预测后继屈服轨迹, 可以超高强 DP 钢板屈服及后继屈服行为的精确表征, 可应用于超高强 DP 钢板材冲压成形过程的有限元分析、模具设计和工艺优化。

关键词: 超高强 DP 钢板; 屈服准则; 非关联流动法则; 塑性演化; 屈服轨迹

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.07.023

中图分类号: TG301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 07-0217-09

Non-associated Hill48 yield criterion based on plastic evolution and its application in ultra-high strength DP steel sheet

Zhou Bingying¹, Cui Xuexi², Guan Bobin³, Wu Xiangdong¹, Wan Min¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Department of Launch Vehicle Testing Technology, Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

3. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: For the plastic behavior of ultra-high strength DP steel sheet under complex loading condition, based on a non-associated Hill48 yield criterion considering plastic evolution, the initial and subsequent yield locus of DP steel predicted accurately by a simple yield equation were realized. Then, the basic mechanical properties and tensile yield locus of ultra-high strength DP1180 steel sheet were obtained by uniaxial tensile tests in 0°, 45° and 90° directions and biaxial tensile tests of cross-shaped specimens with complex proportional loading, and the experimental yield locus was predicted by using different yield criteria. The results show that the prediction accuracy of the non-associated Hill48 yield criterion considering plastic evolution for the initial yield locus of DP1180 steel sheet is similar to that of Yld2000-2d yield criterion, which can also predict the subsequent yield locus with the same highest accuracy and realize the precise characterization of the initial and subsequent yield behaviors of ultra-high strength DP1180 steel sheet, and can be applied to finite element analysis, die design and process optimization of stamping process for ultra-high strength DP steel sheet.

Key words: ultra-high strength DP steel sheet; yield criterion; non-associated flow rule; plastic evolution; yield locus

近 30 年来, 中国在塑性成形领域取得了诸多成

果, 但是屈服和本构模型等关键问题未能突破, 导致数值仿真精度偏低, 难以作为重大工程项目决策提供理论依据^[1]。先进高强钢 (Advanced High Strength Steel, AHSS) 由于其较高的强度和良好的塑性, 广泛应用于汽车轻量化等领域。然而, 由于超高强钢复杂的多相组织结构, 及其零部件形状和成形工艺日趋复杂, 实现其在复杂加载条件下的塑性变形、成形性能乃至韧性断裂行为的精确预测,

收稿日期: 2024-05-29; 修订日期: 2024-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875027); 宝钢汽车用钢
开发与应用技术国家重点实验室基金资助项目 (2021090602)

作者简介: 周兵营 (1994-), 男, 博士研究生

E-mail: zhoubingying@buaa.edu.cn

通信作者: 吴向东 (1970-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wuxiangdongbuaa@163.com

成为学者们普遍关心的重要难题之一^[2-7]。

屈服准则是描述材料塑性行为的关键,贯穿整个塑性力学的发展史。在塑性变形过程中,屈服准则决定了材料的应力和应变的大小及其演化过程。将高精度的屈服准则嵌入有限元软件,可以更精确地模拟材料的塑性变形过程,以达到指导模具设计和实现工艺优化的目的^[8]。为了更准确地描述金属材料的各向异性屈服行为,近一个世纪以来,各向同性的 Tresca 和 von Mises 屈服准则,发展到各向异性屈服的 Hill 系列、Hosford 系列和 Drucker 系列等。屈服准则的形式越来越复杂,所需的材料参数越来越多,例如 Yld2000-2d 屈服准则所需材料参数为 8 个,而 Yld2004-18p 屈服函数的材料参数达到了 18 个,导致不仅需要规划更多的实验,还增加了模型参数求解和数值实现的难度^[9]。屈服函数变得越来越复杂,大大增加了实验和人力成本,限制了其在工程中的应用。

常用于描述金属材料的关联流动法则 (Associated Flow Rule, AFR) 在描述一些各向异性显著的材料时,其适用性受到了一定的质疑^[10-11]。为了保证屈服行为的预测精度,同时更准确地预测材料的塑性流动,学者们开始尝试使用非关联流动法则 (non-Associated Flow Rule, non-AFR),并取得了一定的进展^[9]。2002 年,Stoughton T B^[12]将 non-AFR 引入到金属板材各向异性表征之中,塑性势函数和屈服函数均使用 Hill48 的形式,但是参数的值却不相同。这一方案自提出以来,因其参数标定容易、灵活性高,已经得到了大量研究者的使用。钱小磊^[13]和 Wang G 等^[14]采用非关联 Hill48 屈服准则研究了 AZ31 镁合金热轧过程中的压缩各向异性行为,结果表明仿真与实验数据吻合较好。朱俊儿等^[15-16]采用非关联 Hill48 屈服准则,研究了 DP780 钢板的力学行为,并进行了实验验证。方刚等^[9]综述了关联和非关联本构模型的研究现状,对比分析了关联和非关联 Hill48 和 Yld2000-3d 屈服准则的有限元模拟精度。

一般情况下,屈服准则无法描述各向异性程度随塑性应变增长而变化的趋势,即只能表征材料屈服轨迹大小的变化,而无法表征形状的改变,强化模型可用来表征这一塑性规律。Safaei M 等^[17]采用考虑塑性演化的非关联 Yld2000-2d 屈服准则,研究了无间隙 DC06 钢板的屈服轨迹演化规律。Cai Z 等^[18]提出一种考虑塑性演化的 Yld2000-2d 屈服准则,并将其嵌入 Abaqus/Explicit 中,针对 DP590、

DP780 和 DP980 3 种先进高强钢板进行了研究和验证。Lian J 等^[19]提出了基于 Hill48 屈服准则的演化型非关联塑性模型,并使用该模型预测了铝合金的成形极限曲线。Shen F 等^[20-21]将其扩展并使其适用于不同温度和应变速率等条件,此外,还结合 M-K 模型,评估了板材塑性演化特征对板材冷成形性预测的影响。Mu Z 等^[22]基于演化型非关联 Hill48 屈服准则,研究了 DC06 钢板的各向异性屈服、厚向异性系数 r 值的演化以及后继屈服轨迹。王逸涵等^[23]基于演化型非关联 Hill48 屈服准则,研究了 TC1 钛合金板的屈服轨迹。上述研究表明,考虑塑性演化的非关联屈服准则可能是一个在较低的实验和人力成本下,实现精确表征金属板材的各向异性行为及其演化的方法,其中 Hill48 屈服准则因其形式简单,得到了更广泛的研究和应用。

本文结合非关联流动法则和 Hill48 屈服准则,使用应力标定法确定屈服准则的参数,使用应变标定法确定塑性势函数的参数。采用单拉和双拉试验机分别做与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 方向的单拉实验和加载比例从 4:0 到 0:4 的双拉实验。基于等效塑性应变相关的屈服应力和 r 值,确定塑性演化的非关联 Hill48 屈服准则的参数,将该模型应用于超高强 DP1180 钢板的屈服轨迹的预测,并与 Mises、Hill48、Barlat89、Yld2000-2d 屈服准则进行对比。

1 基于塑性演化的非关联 Hill48 屈服准则

1948 年, Hill R^[24]通过向 Mises 屈服函数中引入 6 个各向异性系数,开创性地提出了正交各向异性 Hill48 屈服准则:

$$\bar{\sigma}^2 = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效应力; F 、 G 、 H 、 L 、 M 和 N 为 Hill48 屈服准则的 6 个各向异性系数,当 $F=G=H=0.5$ 且 $L=M=N=1.5$ 时,即退化为 Mises 各向同性屈服准则; x 、 y 和 z 为材料的各向异性主轴; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 分别为 x 、 y 、 z 方向的正应力分量; σ_{xy} 、 σ_{zx} 、 σ_{yz} 分别为 xy 、 zx 、 yz 平面的剪应力分量。通常情况下,等效应力等价于轧制方向 (x 方向) 的单拉屈服应力,此时 $G+H=1$ 。

由于板材在成形过程中往往处于平面应力状态,即 $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$, 则 Hill48 屈服准则可简化为:

$$\bar{\sigma}^2 = (G + H)\sigma_{xx}^2 + (F + H)\sigma_{yy}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (2)$$

确定各向异性参数 F 、 G 、 H 和 N ，一般有两种方法：应变法和应力法^[9]。应变法标定参数采用下标 ε ，应力法标定参数采用下标 σ ，以板材轧制方向作为基准参考方向。

为了更加精确地描述超高强 DP 钢板的塑性变形行为，同时降低屈服函数的复杂程度，本文在 Hill48 屈服准则的参数求解过程中，考虑了塑性演化的影响，即将厚向异性系数 r 值和屈服应力 σ 值变为随等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 而变化的函数，分别用 $r(\bar{\varepsilon}_p)$ 和 $\sigma(\bar{\varepsilon}_p)$ 表示，这一修正称为塑性演化型 Hill48 屈服准则。建立 non-AFR 模型的一种常用思路是使塑性势函数和屈服函数保持相同的函数形式，然后前者采用应变法标定的参数，后者采用应力法标定的参数。

采用单拉实验获取与轧制方向呈 0° 、 45° 、 90° 方向的厚向异性系数 r 值，分别以 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 表示，则采用应变法的参数标定公式为：

$$\begin{cases} F_\varepsilon = \frac{r_0(\bar{\varepsilon}_p)}{r_{90}(\bar{\varepsilon}_p)[r_0(\bar{\varepsilon}_p) + 1]} \\ G_\varepsilon = \frac{1}{r_0(\bar{\varepsilon}_p) + 1} \\ H_\varepsilon = \frac{r_0(\bar{\varepsilon}_p)}{r_0(\bar{\varepsilon}_p) + 1} \\ N_\varepsilon = \frac{[r_0(\bar{\varepsilon}_p) + r_{90}(\bar{\varepsilon}_p)][2r_{45}(\bar{\varepsilon}_p) + 1]}{2r_{90}(\bar{\varepsilon}_p)[r_0(\bar{\varepsilon}_p) + 1]} \end{cases} \quad (3)$$

采用单拉实验获取与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 方向的屈服应力（分别以 σ_0 、 σ_{45} 和 σ_{90} 表示），以及等双拉（载荷相等）实验得到的等双拉屈服应力 σ_b ，则采用应力法的参数标定公式为：

$$\begin{cases} F_\sigma = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_{90}(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_b(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 - 1 \right] \\ G_\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_{90}(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_b(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 \right] \\ H_\sigma = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_{90}(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_b(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 \right] \\ N_\sigma = 2 \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_{45}(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_0(\bar{\varepsilon}_p)}{\sigma_b(\bar{\varepsilon}_p)} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

根据不同取向试件的单拉实验获得 r 值随等效

塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 的变化趋势，以及等效塑性功原理，确定单拉和等双拉条件下的屈服应力随等效塑性应变的变化趋势，进一步可求得 Hill48 屈服准则的 4 个参数随等效塑性应变的变化趋势，且屈服函数所需参数采用应力法标定，塑性势函数所需参数采用应变法标定，即可得到塑性演化型的非关联 Hill48 屈服准则。为了方便，参考 Lian J 等^[19] 相关研究工作，将该模型命名为 enHill48（evolving non-associated Hill48）屈服准则。

2 实验及理论模型的建立与对比

2.1 单拉与双拉实验

实验材料为超高强 DP1180 钢板，厚度为 1.4 mm。根据 GB/T 228.1—2021^[25] 和 GB/T 36024—2018^[26] 分别设计了单拉和双拉试件形状及尺寸，并采用激光切割技术进行试件的加工。采用 MTS 多功能试验机 and 北京航空航天大学自主研发的多轴同步双向加载试验系统进行 DP1180 钢板的单拉和双拉实验。采用数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）方法获得试件表面的全场应变。图 1a、图 1b、图 1c 和图 1d 分别为 MTS 多功能试验机、双向加载试验机、单拉试件加工方向和十字形双拉试件尺寸。其中 F_x 和 F_y 分别为 x 轴和 y 轴方向的加载力。

为了获取应力空间的实验屈服轨迹，采用载荷控制方法，即轧制方向 RD 与垂直于轧制方向 TD 方向的载荷比例分别设置为 4 : 0、4 : 1、4 : 2、4 : 3、4 : 4、3 : 4、2 : 4、1 : 4 和 0 : 4，一共 9 种载荷比例^[27-28]。采用 DIC 和载荷传感器获得单拉和双拉实验过程中的全场应变和载荷，进而得到单拉和双拉的应力-应变曲线，分别如图 2 和图 3 所示。由单拉实验获得的 DP1180 钢的基本力学性能如表 1 所示，其中，屈服应力取自塑性应变为 0.2% 时的真实应力， r 值和加工硬化指数 n 值取自屈服点至抗拉点之间的均值。

由图 2 可知，DP1180 钢板的强度在 TD (0°) 方向最高，伸长率最低， 45° 方向的强度中等，伸长率最高，而 RD (90°) 方向的强度相对最低，伸长率中等，DP1180 钢板表现出比较明显的各向异性。对比单拉和双拉的应力-应变曲线可知，DP1180 钢板在双拉状态下中心区所能测得的应变范围较小，这也在一定程度上限制了屈服准则对大变形阶段变形行为的预测精度。

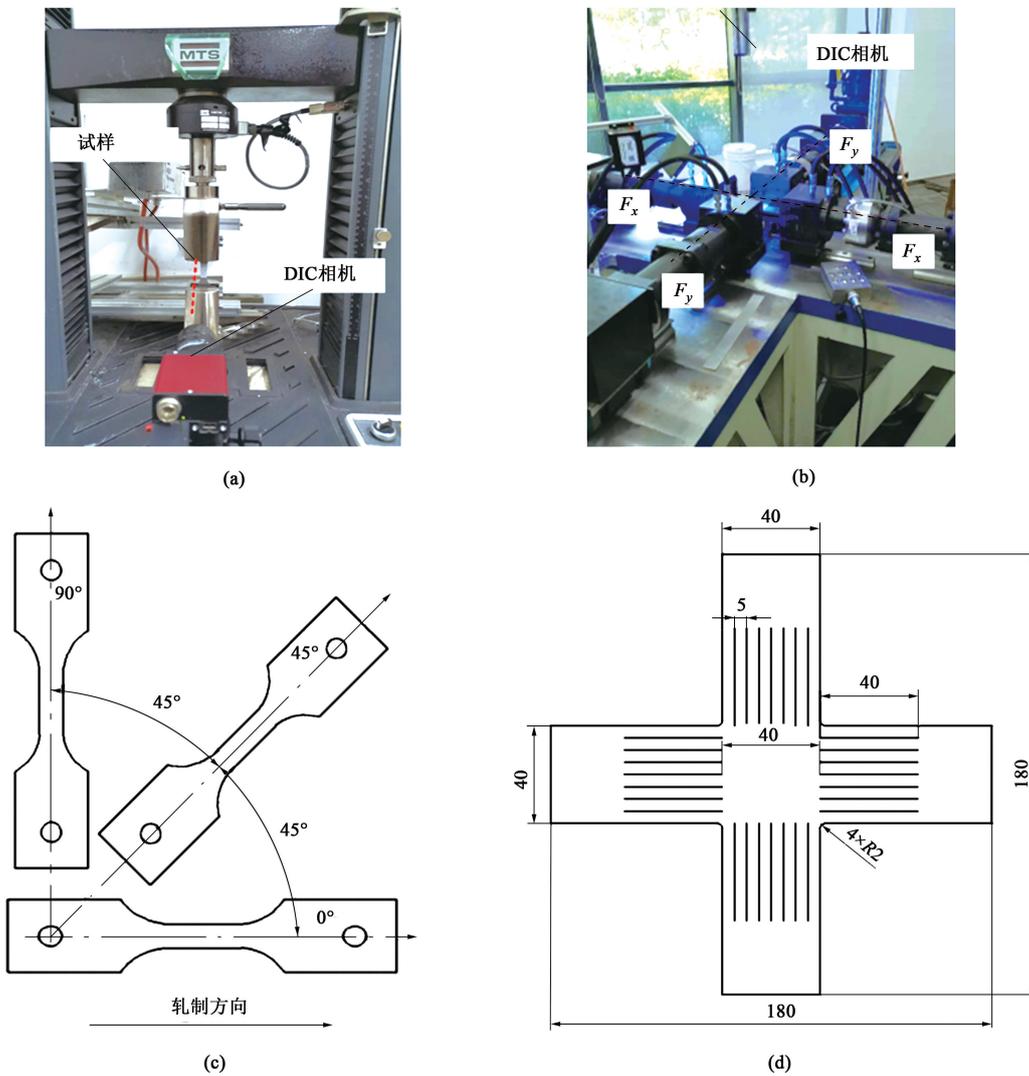


图 1 单拉及双拉试验机及试件

(a) MTS 多功能试验机 (b) 双向加载试验机 (c) 单拉试件加工方向 (d) 十字形双拉试件尺寸

Fig. 1 Uniaxial and biaxial tension testing machines and specimens

(a) MTS testing machine (b) Biaxial tension testing machine (c) Orientation of uniaxial tension specimen

(d) Sizes of cruciform biaxial tension specimen

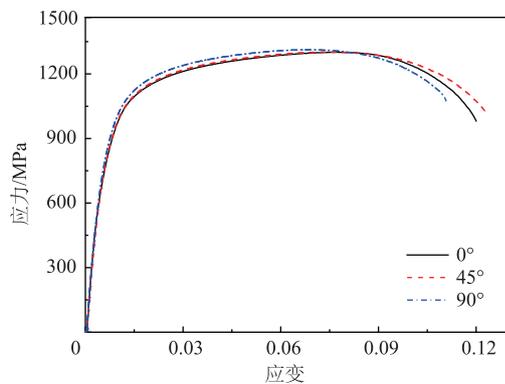


图 2 单拉应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of uniaxial tension

2.2 参数标定

2.2.1 应力标定法

基于上述实验得到 0° 、 45° 和 90° 方向的单拉以及等双拉条件下的应力-应变曲线，通过去除弹性应变，得到塑性应变-应力曲线。采用单位体积塑性功相等的原理，积分得到不同等效塑性应变对应的 3 个方向的单拉及等双拉条件下的屈服应力，演化曲线如图 4 所示。进一步，由式 (4) 可求得 Hill48 屈服准则中 F 、 G 、 H 和 N 随等效塑性应变的变化趋势，如图 5 所示。由图 5 可知，在平面应力条件下的 Hill48 屈服准则 4 个参数在塑性变形前期波动较大，但随着等效塑性应变的增大，变化趋势趋于平缓。

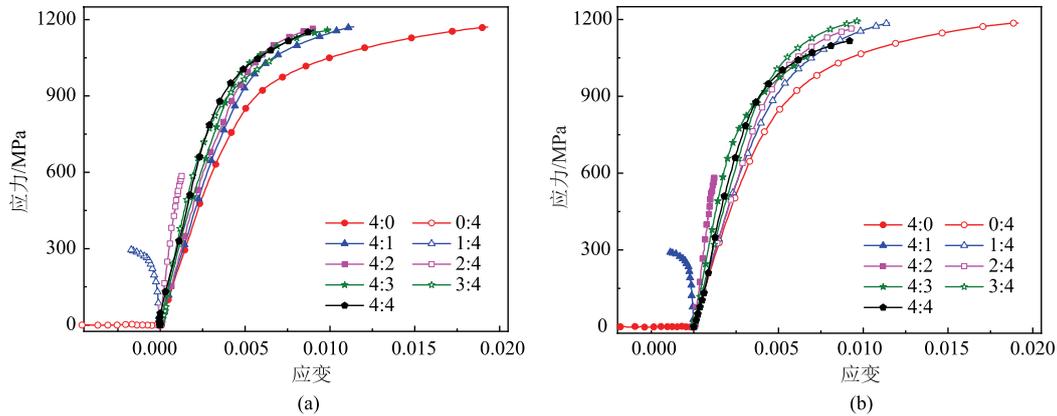


图 3 双拉应力-应变曲线
(a) RD (b) TD

Fig. 3 Stress-strain curves of biaxial tension

表 1 单拉实验获得的 DP1180 钢板的基本力学性能

Table 1 Basic mechanical properties of DP1180 steel sheet obtained by uniaxial tension tests

参数	厚度/ mm	拉伸 方向	杨氏模 量/GPa	屈服应 力/MPa	抗拉强 度/MPa	n	r
数值	1.4	0°	198.79	769.55	1212.11	0.138	0.769
		45°	196.07	768.21	1216.97	0.128	0.839
		90°	195.59	753.78	1233.54	0.126	0.819

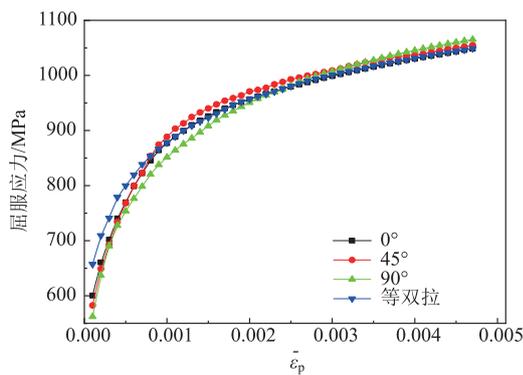


图 4 单拉及等双拉下的屈服应力演化曲线

Fig. 4 Evolution curves of yield stress for uniaxial and equal-biaxial tension

选取单位体积塑性功 W_p 分别为 0.3350×10^6 、 0.7506×10^6 、 1.6737×10^6 、 $4.3958 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的实验屈服轨迹，与 enHill48 屈服准则的理论屈服轨迹进行对比，结果如图 6 所示，其中 σ_x 、 σ_y 分别为 RD 和 TD 方向的屈服应力。由图 6 可知，enHill48 屈服准则采用应力标定方法，所得到的屈服轨迹严格经过 0° 和 90° 单拉和等双拉屈服应力点，因此其预测精度相对较高。

2.2.2 应变标定法

基于上述实验，求得 3 个方向的厚向异性系数 r 值，其随等效塑性应变的演化曲线如图 7 所示。等双拉过程中的 r 值近乎恒定，因此取恒定值 1.15。进一步，由式 (3) 可求得 Hill48 屈服准则中 F 、 G 、 H 和 N 随等效塑性应变的变化趋势，如图 8 所示。由图 8 可知，在平面应力条件下的 Hill48 屈服准则 4 个参数随等效塑性应变近似线性变化，因此可采用线性函数进行表征。

同样，对比单位体积塑性功分别为 0.3350×10^6 、 0.7506×10^6 、 1.6737×10^6 、 $4.3958 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，采用应力和应变标定方法得到屈服轨迹，结果如图 9 所示。由图 9 可知，采用应力和应变标定方法所得的屈服轨迹相差较大，应变标定方法的屈服轨迹在双拉区域，尤其是等双拉区域，远小于应力标定方法得到的屈服轨迹。由此也说明在这种屈服和塑性流动相差较大的情况下，使用非关联流动法则的必要性。

2.3 理论与实验屈服轨迹的对比

采用 Mises、应变标定的 Hill48 (命名为 Hill48-r)、Barlat89、Yld2000-2d 和塑性演化非关联 Hill48 屈服准则 (命名为 enHill48) 对单位体积塑性功分别为 0.3350×10^6 、 0.7506×10^6 、 1.6737×10^6 、 $4.3958 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的屈服轨迹进行预测，并与实验屈服轨迹点进行对比，结果如图 10 所示。由图 10 可知，不同屈服准则所得的理论屈服轨迹相差较大，初始屈服阶段，实验屈服轨迹各向异性较强，导致 Mises、Hill48-r 和 Barlat89 屈服准则的预测结果偏差较大，但 Yld2000-2d 和 enHill48 预测的理论屈服轨迹均经过等双拉屈服实验点，其误差均较小。

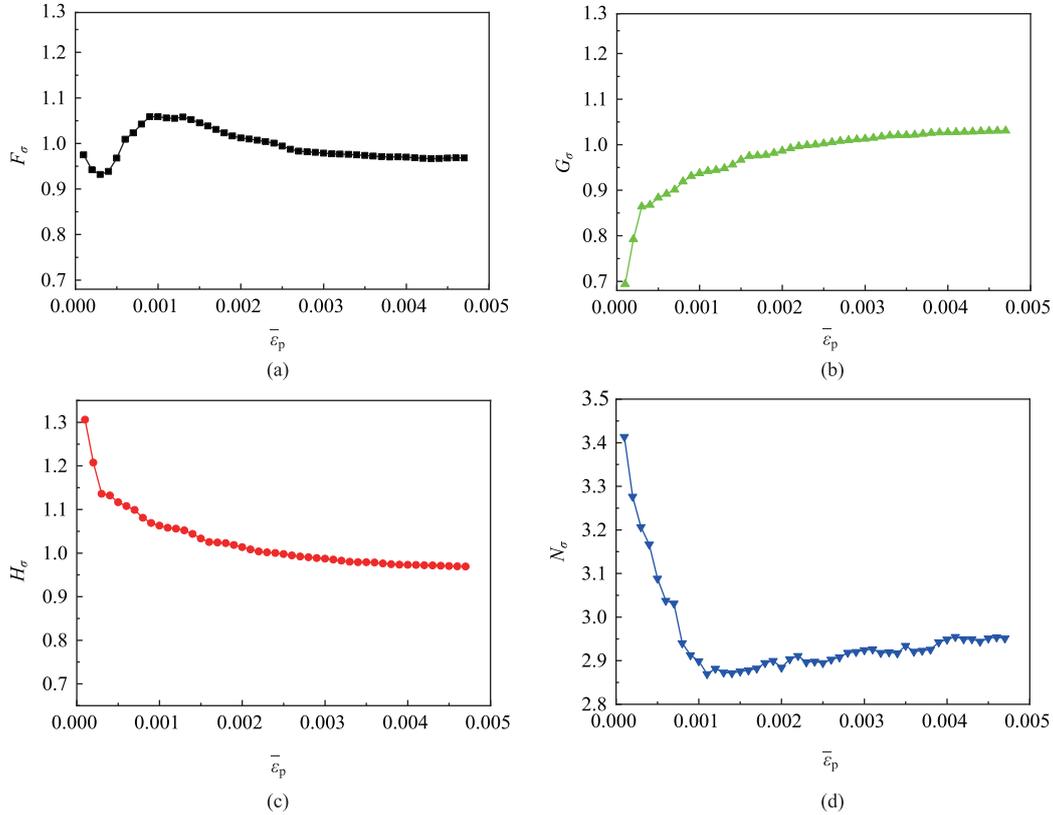


图 5 基于应力标定方法的 Hill48 屈服准则参数的演化曲线

(a) F_σ (b) G_σ (c) H_σ (d) N_σ

Fig. 5 Evolution curves of Hill48 yield criterion parameters based on stress calibration method

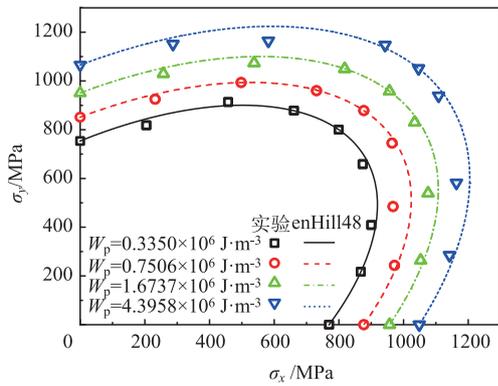


图 6 基于应力标定方法的理论屈服轨迹与实验的对比
 Fig. 6 Comparison between theoretical yield locus based on stress calibration method and test ones

但是对于后继实验屈服轨迹，由于其各向异性逐渐减弱，使得 Mises 屈服准则的预测精度有所提高，而 Yld2000-2d 屈服准则未考虑屈服轨迹的塑性演化效应，导致其预测误差居高不下。而 enHill48 屈服准则充分考虑了塑性演化效应，其预测误差始终相对较小。

为了更准确地评价理论屈服准则与实验屈服点

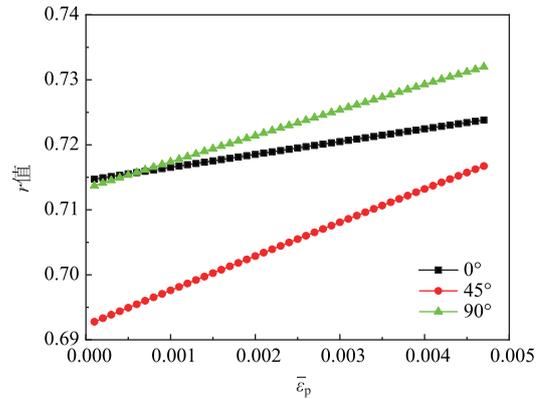


图 7 单拉实验下 r 值的演化曲线

Fig. 7 Evolution curves of r -value in uniaxial tension tests

的吻合程度，取误差 δ 作为定量评价依据，假设第 i 个实验点坐标为 (x_i, y_i) ，实验点和屈服曲线的法向距离为 d_i ，则^[29]：

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad (5)$$

式中： n 为实验点数量。

图 11 为 4 种单位体积塑性功条件下，理论屈服准则和实验屈服点的误差对比情况。由图 11 可知，

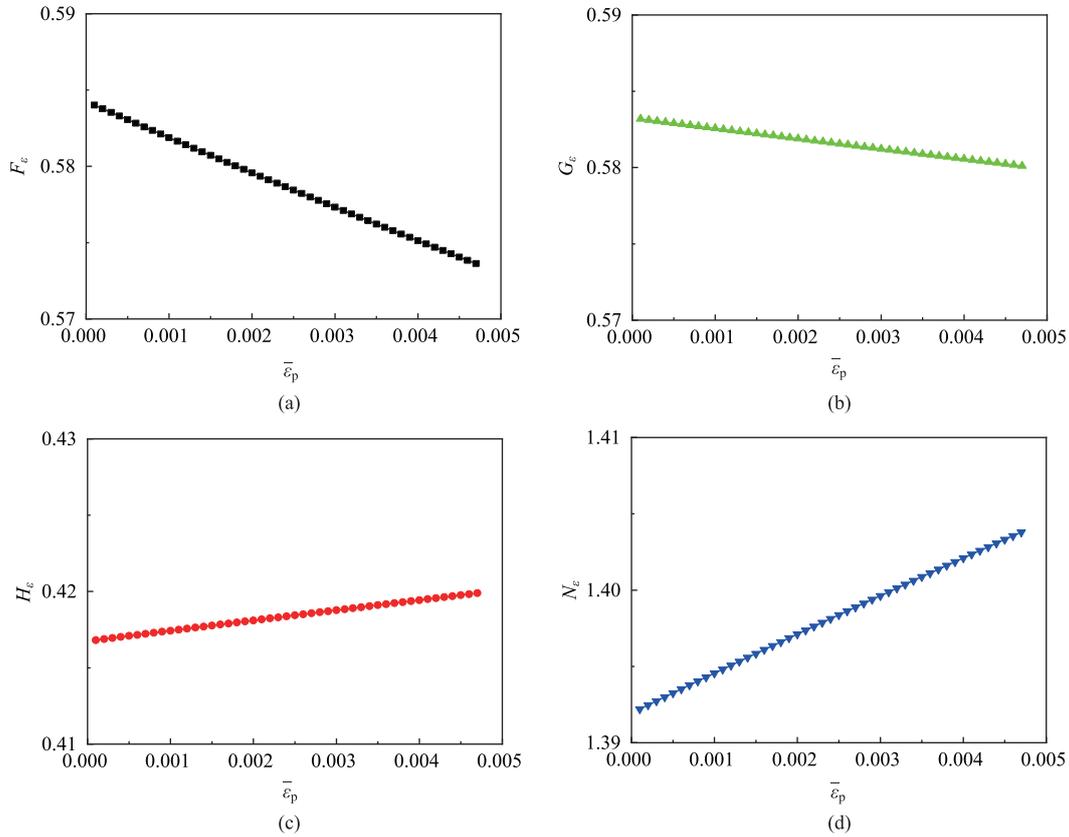


图 8 基于应变标定方法的 Hill48 屈服准则参数的演化曲线

(a) F_ϵ (b) G_ϵ (c) H_ϵ (d) N_ϵ

Fig. 8 Evolution curves of Hill48 yield criterion parameters based on strain calibration method

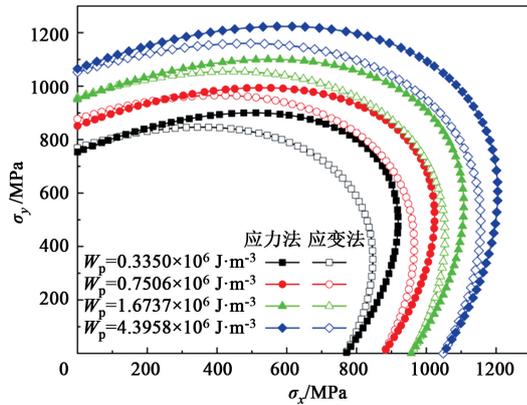


图 9 应力和应变标定所得理论屈服轨迹的对比

Fig. 9 Comparison between theoretical yield locus obtained by stress calibration and strain calibration

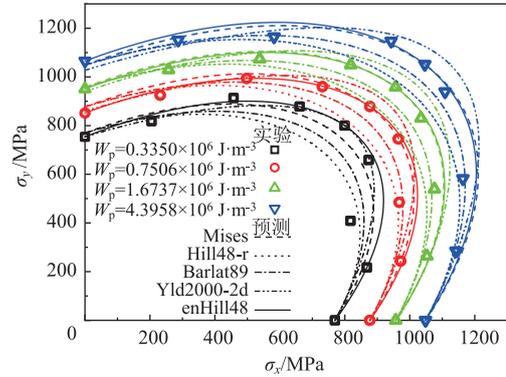


图 10 不同屈服准则预测的屈服轨迹与实验的对比

Fig. 10 Comparison between yield locus predicted by different yield criteria and test ones

在初始屈服轨迹的预测上，Yld2000-2d 和 enHill48 屈服准则的误差相对最低。在后继屈服轨迹的预测上，由于 enHill48 屈服准则考虑了塑性演化效应这一因素，使其始终保持着最高的预测精度，而其他屈服准则的预测精度则相对较低，其中 Mises 屈服准则对后继屈服轨迹的预测精度较高，这是因为超

高强 DP1180 钢在塑性演化过程中，各向异性特征逐渐减弱的缘故。

3 结论

(1) 采用单向和双拉实验，得到了超高强 DP1180 钢板沿 0° 、 45° 和 90° 方向的单拉应力-应变

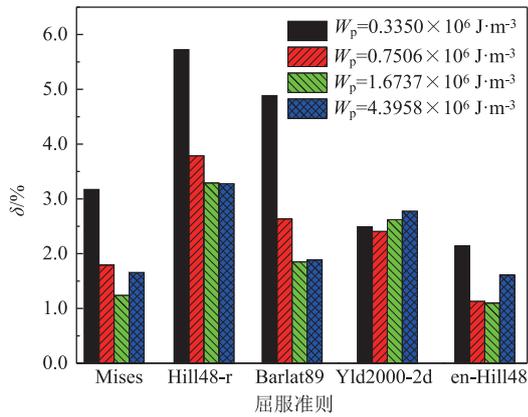


图 11 不同屈服准则预测的屈服轨迹与实验的误差

Fig. 11 Error between yield locus predicted by different yield criteria and test ones

曲线和加载比例从 4 : 0 到 0 : 4 的双拉应力-应变曲线, 确定了超高强 DP1180 钢板的基本力学性能, 进一步采用单位体积塑性功相等原理, 确定了 DP1180 钢板的实验屈服轨迹点。

(2) 基于实验数据, 采用应力标定方法确定了本构模型的屈服行为, 采用应变标定方法确定了本构模型的塑性流动行为, 进一步考虑本构参数随等效塑性应变的演化规律, 建立了 DP1180 钢板的塑性演化非关联的 enHill48 屈服准则。

(3) 对比 Mises、Hill48-r、Barlat89、Yld2000-2d 和 enHill48 屈服准则预测的理论屈服轨迹与 DP1180 钢板的实验屈服轨迹点, 结果表明, en-Hill48 屈服准则针对 DP1180 钢板的初始和后续屈服轨迹的预测精度表现最好, 且形式相对简单, 更容易嵌入有限元软件, 可以实现超高强 DP 钢板屈服及后续屈服行为的精确表征。

参考文献:

- [1] 林忠钦, 黄庆学, 苑世剑, 等. 中国塑性成形技术和装备 30 年的重大突破与进展 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (4): 2-45.
Lin Z Q, Huang Q X, Yuan S J, et al. Major breakthrough and progress in metal forming technology and equipment of China in the last 30 years [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (4): 2-45.
- [2] 陈锐. 基于 Yoshida-Uemori 模型的超高强钢板成形预测分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Chen R. Analysis of Forming Prediction of the Ultra-high Strength Steel Based on the Yoshida-Uemori Model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [3] 邹隆勋, 徐栋恺, 李细锋, 等. 脉冲电流对 MS1300 超高强钢拉伸变形行为的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (10): 196-201.

- Zou L X, Xu D K, Li X F, et al. Effect of pulse current on tensile deformation behavior of MS1300 ultrahigh strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (10): 196-201.
- [4] 程姣姣. 超高强钢非对称截面薄壁构件辊弯成形回弹及扭转问题研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
Cheng J J. Research on Springback and Twist of Ultra High Strength Steel Thin-walled Components with Asymmetric Section in Roll Forming Process [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [5] 孟伊帆. 超高强钢辊弯成形工艺与组织性能关系的研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
Meng Y F. Research on the Relationship Between Roll Forming Process and Microstructure and Properties of Ultra High Strength Steel [D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [6] 宋燕利, 刘煜键, 方志凌, 等. 超高强钢构件热冲压成形技术与应用 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (20): 154-178.
Song Y L, Liu Y J, Fang Z L, et al. Hot stamping technology and application of ultra-high strength steel components [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (20): 154-178.
- [7] 周珍林. 全过程数字化超高强钢成形质量控制方法 [J]. 模具制造, 2023, 23 (5): 5-9.
Zhou Z L. Digital quality control method for ultra-highstrength steel forming in the whole process [J]. Die & Mould Manufacture, 2023, 23 (5): 5-9.
- [8] 穆稼凯. 正交各向异性金属薄板后继屈服 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
Mu Z K. Subsequent Yield of Orthotropic Sheet Metal [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [9] 方刚, 陈祝, 雷丽萍. 非关联本构模型在铝合金板料成形有限元模拟中的应用 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 8-18.
Fang G, Chen Z, Lei L P. Application of non-associated constitutive models in finite elementsimulation of aluminum alloy sheet forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 8-18.
- [10] Stoughton T B, Yoon J W. Anisotropic hardening and non-associated flow in proportional loading of sheet metals [J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25 (9): 1777-1817.
- [11] Lee J H. Research note on a simple model for pressure-sensitive strain-hardening materials [J]. International Journal of Plasticity, 1988, 4 (3): 265-278.
- [12] Stoughton T B. A non-associated flow rule for sheet metal forming [J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18 (5): 687-714.
- [13] 钱小磊. 基于实验的镁合金本构模型及其在轧制数值模拟中的应用研究 [D]. 沈阳: 吉林大学, 2014.
Qian X L. Study on Experiment-based Constitutive Model of Magnesium Alloy and Its Application in Numerical Simulation of Rolling Process [D]. Shenyang: Jilin University, 2014.
- [14] Wang G, Qian X L, Li X, et al. A study on compressive anisotropy and nonassociated flow plasticity of the AZ31 magnesium alloy in hot rolling [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 256194.
- [15] 朱俊儿. 应变率相关的高强钢板材屈服准则与失效模型研究及应用 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
Zhu J E. Modeling the Strain-rate Dependent Yielding and Failure

Behavior of High Strength Steel Sheets [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[16] Zhu J E, Xia Y, Luo H, et al. Influence of flow rule and calibration approach on plasticity characterization of DP780 steel sheets using Hill48 model [J]. Int. J. Mech. Sci., 2014, 89: 148-157.

[17] Safaei M, Lee M G, Zang S L, et al. An evolutionary anisotropic model for sheet metals based on non-associated flow rule approach [J]. Comput. Mater Sci., 2014, 81: 15-29.

[18] Cai Z, Diao K, Wu X, et al. Constitutive modeling of evolving plasticity in high strength steel sheets [J]. Int. J. Mech. Sci., 2016, 107: 43-57.

[19] Lian J, Shen F, Jia X, et al. An evolving non-associated Hill48 plasticity model accounting for anisotropic hardening and r -value evolution and its application to forming limit prediction [J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 151: 20-44.

[20] Shen F, Münstermann S, Lian J. An evolving plasticity model considering anisotropy, thermal softening and dynamic strain aging [J]. International Journal of Plasticity, 2020, 132: 102747.

[21] Shen F, Münstermann S, Lian J. Forming limit prediction by the Marciniak-Kuczynski model coupled with the evolving non-associated Hill48 plasticity model [J]. J. Mater. Process. Technol., 2021, 287: 116384.

[22] Mu Z, Zhao J, Meng Q, et al. Anisotropic hardening and evolution of r -values for sheet metal based on evolving non-associated Hill48 model [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 171: 108791.

[23] 王逸涵, 董红瑞, 王海波, 等. 基于非关联 Hill48 塑性模型的 TC1 钛合金板本构模型 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 180-184.
Wang Y H, Dong H R, Wang H B, et al. Constitutive model of TC1 titanium alloy sheet based on non-associated Hill48 plastic model [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 180-184.

[24] Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193 (1033): 281-297.

[25] 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].

[26] GB/T 36024—2018, 金属材料 薄板和薄带 十字形试样双向拉伸试验方法 [S].
GB/T 36024—2018, Metallic materials—Sheet and strip—Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece [S].

[27] 周兵营, 豆远航, 吴向东, 等. TA4 纯钛带材各向异性屈服行为表征与研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (2): 11-18.
Zhou B Y, Dou Y H, Wu X D, et al. Characterization and study on anisotropic yield behavior of TA4 pure titanium strip [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (2): 11-18.

[28] 翟京. 双向拉压力学试验机的装备开发与实验研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2014.
Zhai J. Hardware Development and Experimental Research of Biaxial Tension and Compression Mechanical Testing Machine [D]. Beijing: North China University of Technology, 2014.

[29] 吴向东. 不同加载路径下各向异性板料塑性变形行为的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
Wu X D. Research on the Plastic Deformation Behavior of Anisotropic Sheet Metal under Different Loading Paths [D]. Beijing: Beihang University, 2003.

《锻压技术》全文获取通道全线开通!

方式1: 官方网站

3. 点击即可下载全文

方式2: 《锻压技术》杂志微信公众号

《锻压技术》编辑部版权所有
 中国机械工业联合会主管 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司 中国机械工程学会主办
 联系地址: 北京市海淀区学院路19号 邮编: 100083
 电话: +86-010-82415085 传真: +86-010-62920652
 E-mail: tsj@263.net (邮件) dtjournal@163.com (广告)