

考虑各向异性的铝合金型材辊弯断裂预测

刘纯国^{1,2}, 李紫桐^{1,2}, 张学广³, 李明^{1,2}

(1. 吉林大学 辊锻工艺研究所, 长春 130022; 2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程规划发展部, 长春 130051)

摘要:以 6005A 铝合金型材为例, 提出了一种考虑各向异性的铝合金型材辊弯断裂预测方法, 分别采用 von Mises、Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则描述铝合金的各向异性, 通过实验和晶体有限元模拟确定了模型参数。模拟结果与辊弯实验结果对比表明: 采用 Mises 屈服准则的预测误差大于 15%; 采用 Hill48 屈服准则的预测误差小于 5%; 采用 Yld2004-18p 屈服准则的预测误差小于 3%。说明使用各向异性屈服准则与连续损伤准则耦合的有限元模型, 比各向同性模型能更准确地预测铝合金型材辊弯成形中的断裂行为。

关键词:材料合成与加工工艺; 型材辊弯; 各向异性; 断裂准则; 晶体塑性

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)12-3388-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220084

Prediction of fracture of aluminum alloy profiles in roll bending considering anisotropy

LIU Chun-guo^{1,2}, LI Zi-tong^{1,2}, ZHANG Xue-guang³, LI Ming^{1,2}

(1. Roll-forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Engineering Planning and Development Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130051, China)

Abstract: An anisotropic roll bending fracture prediction method was proposed for 6005A aluminum alloy profile. Von Mises, Hill48 and Yld2004-18p yield criteria were used to describe the anisotropy of aluminum alloy respectively. Model parameters were determined by experiments and crystal finite element simulation. The results of simulation and roll bending test show that the predicted error of Mises yield criterion is more than 15%, Hill48 yield criterion is less than 5% and Yld2004-18p yield criterion is less than 3%. It shows that the finite element model coupled with the anisotropic yield criterion and the continuous damage criterion can predict the fracture behavior of aluminum alloy profiles in roll bending more accurately than the isotropic model.

Key words: material synthesis and processing technology; profiles roll bending; anisotropy; fracture criterion; crystal plasticity

收稿日期: 2022-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575231).

作者简介: 刘纯国(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 材料加工工程. E-mail: liucg@jlu.edu.cn

0 引言

6005A 铝合金型材具有质量轻、强度高、综合性能优异的特点^[1],成为高速列车的关键用材。辊弯成形具有节材、节能、生产效率高等优点^[2],在型材类零件成形中应用前景广阔。由于挤压成形后的 6005A 型材内部晶粒沿着挤压方向上呈现择优取向分布,具有各向异性,这影响到其在辊弯成形中的断裂预测^[3]。因此,想要准确地预测 6005A 型材辊弯的断裂情况,需要考虑其各向异性行为^[4]。

Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则能够描述材料的各向异性。Lian 等^[5]制定了一个演化的非关联 Hill48 各向异性塑性模型,应用于成形极限预测。Basak 等^[6]利用 Hill48 各向异性屈服函数校准了 Bao-Wierzbicki 断裂曲线,预测了原样和预应变板材在深拉伸过程中的成形性和断裂行为。Achani 等^[7]研究了 AA7003-T6 挤压板材的各向异性行为,结果表明,基于 Yld2004-18p 本构模型的预测结果与实验结果吻合较好。Dick 等^[8]通过对 AA3104-H19 材料进行可成形性和断裂表征,确定了 Yld2004-18p 模型的材料参数,利用有限元方法验证了极性空间中的断裂图。

晶体塑性有限元从塑性变形的物理本质出发,考虑了材料在微观尺度上的塑性变形过程,广泛应用于屈服函数的校准中^[9]。Grytten 等^[10]开发了一种新的晶体塑性模型,为 Yld2004-18p 屈服准则的校准提供了充分依据。Bate 等^[11]利用晶体塑性有限元方法,预测了 AA5005 中晶体织构引起的塑性各向异性。Wei 等^[12]建立了一种晶体塑性有限元模型,研究了(001)铝单晶在高压扭转作用下的各向异性塑性行为。

针对各向异性对辊弯成形断裂预测影响的研究较少,其规律尚不明确。本文首先基于晶体塑性有限元模型,研究了 6005A 铝合金型材立面与底面的各向异性;其次,确定了 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则的参数,建立了 6005A 铝合金型材辊弯的有限元模型;再次,在模拟中使用 Python 脚本引入考虑应力三轴度的连续损伤准则进行断裂预测;最后,进行了辊弯成形实验,并与模拟结果进行对比分析。

1 考虑各向异性的断裂预测方法

金属韧性断裂是损伤累积的结果^[13],细观损

伤力学认为,材料的破坏与应力三轴度密切相关,它表征了材料内部微孔洞的应力状态^[14]。Rice 等^[15]用解析方法研究了嵌入在理想塑性材料中的孤立球形孔洞在高应力三轴作用下的生长,从这些分析研究中提出了孔洞扩大与应力三轴度之间的指数关系,表达式如下:

$$C = \int_0^{\dot{\epsilon}_f} \exp(1.5\eta) d\dot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: C 为材料常数; $\dot{\epsilon}$ 为材料的等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_f$ 为临界断裂等效塑性应变; $\eta = \sigma_m / \dot{\sigma}$ 为应力三轴度,其中, $\dot{\sigma}$ 为等效应力,其计算方法根据所耦合的各向异性屈服准则决定, σ_m 为静水应力,其表达式如下。

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

本文分别使用 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则对 6005A 的辊弯成形过程进行模拟。Hill48 屈服准则等效应力表达式如下:

$$\dot{\sigma}^2 = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (3)$$

式中: F 、 G 、 H 、 L 、 M 和 N 可以根据沿与挤压方向成 0° 、 45° 和 90° 角的方向上进行拉伸实验或者模拟获得的 r 值计算; $F = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_{22}^2} + \frac{1}{r_{33}^2} - \frac{1}{r_{11}^2}\right)$; $G = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_{11}^2} + \frac{1}{r_{33}^2} - \frac{1}{r_{22}^2}\right)$; $H = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_{22}^2} + \frac{1}{r_{11}^2} - \frac{1}{r_{33}^2}\right)$; $L = \frac{3}{2r_{23}^2}$; $M = \frac{3}{2r_{13}^2}$; $N = \frac{3}{2r_{12}^2}$ 。

Yld2004-18p 屈服准则等效应力 φ 可表示为:

$$\varphi = \varphi(\tilde{S}', \tilde{S}'') = |\tilde{S}'_1 - \tilde{S}''_1|^a + |\tilde{S}'_1 - \tilde{S}''_2|^a + |\tilde{S}'_1 - \tilde{S}''_3|^a + |\tilde{S}'_2 - \tilde{S}''_1|^a + |\tilde{S}'_2 - \tilde{S}''_2|^a + |\tilde{S}'_2 - \tilde{S}''_3|^a + |\tilde{S}'_3 - \tilde{S}''_1|^a + |\tilde{S}'_3 - \tilde{S}''_2|^a + |\tilde{S}'_3 - \tilde{S}''_3|^a = 4\dot{\sigma}^a \quad (4)$$

式中:指数 a 的大小与材料的晶体结构有关,对铝合金而言, $a=8$ 。

式(4)基于应力偏差的两个线性变换,简要总结了一般应力状态下的平面各向异性,这两个线性变换可以表示为:

$$\tilde{S}' = C's = C'T\sigma = L'\sigma \quad (5)$$

$$\tilde{S}'' = C''s = C''T\sigma = L''\sigma \quad (6)$$

式中: T 为一个将柯西应力张量 σ 变换为其偏差 S

的矩阵; $\tilde{S}'$ 和 $\tilde{S}''$ 均为线性变换的应力偏差; C' 和 C'' (或 L' 和 L'')为包含各向异性系数的矩阵。

对于全应力状态,线性变换可以表示为:

$$C' = \begin{bmatrix} 0 & -c'_{12} & -c'_{13} & 0 & 0 & 0 \\ -c'_{21} & 0 & -c'_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -c'_{31} & -c'_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c'_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c'_{66} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C'' = \begin{bmatrix} 0 & -c''_{12} & -c''_{13} & 0 & 0 & 0 \\ -c''_{21} & 0 & -c''_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -c''_{31} & -c''_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c''_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c''_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c''_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

当 C' 和 C'' 的 18 个各向异性参数都等于 1,且 $\alpha=2$ 或 4 时,Yld2004-18p 各向异性屈服准则简化为 Mises 各向同性屈服准则。Yld2004-18p 屈

服准则的参数可通过寻优求解^[16]。

根据上述韧性断裂准则,推导出材料的断裂应变 ϵ_f 随应力三轴度 η 的增加呈指数下降,且该准则用一个特征参数 C 表征材料是否发生断裂,其数值大小与变形路径无关,与材料本身性能有关。本文采用单向拉伸实验与晶体有限元模拟相结合的方法确定 C 值。所选材料 6005A 铝合金型材的力学性能参数如下所示:密度 $\rho=2.70 \text{ g/cm}^3$;泊松比 $\nu=0.33$;弹性模量 $E=68.32 \text{ GPa}$;屈服强度 $\sigma_s=177.57 \text{ MPa}$;抗拉强度 $\sigma_b=308.85 \text{ MPa}$;伸长率 $\delta=19.76\%$ 。通过将屈服准则与损伤模型耦合,实现考虑各向异性和连续损伤的铝合金型材辊弯断裂预测。

2 6005A 铝合金型材各向异性表征

2.1 6005A 铝合金型材织构分析

图 1 和图 2 为 6005A 铝合金型材 EBSD 测量的晶粒和织构信息,由图 1(a)和图 2(a)可以看出:6005A 铝合金型材底面和立面的晶粒由于挤压作用都出现了不同程度的拉长,形成了晶粒的变形织构。从图 1(b)和图 2(b)中可以看到几处红色区域,说明 6005A 铝合金的晶粒在挤压过程中产生了择优取向,导致极图上出现了较强的峰值。

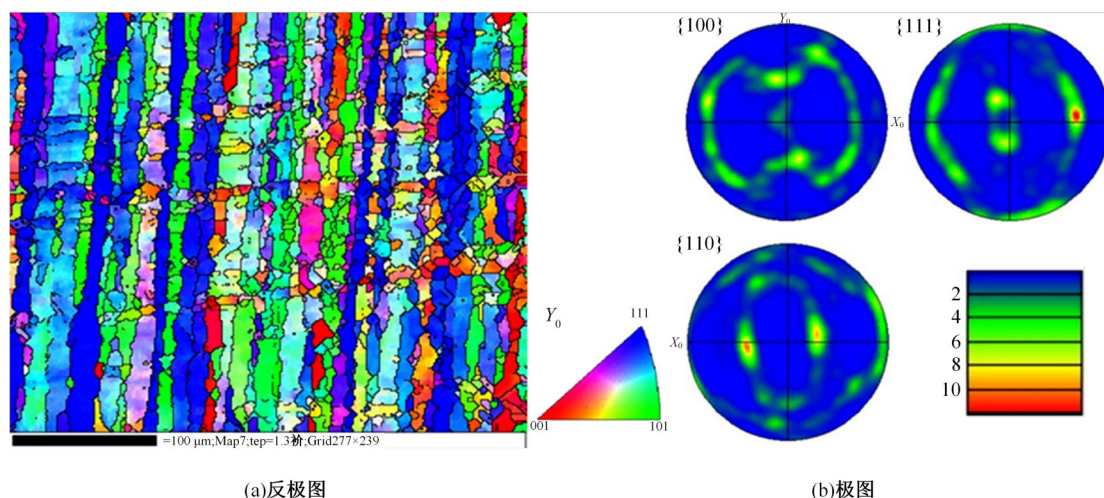


图 1 6005A 铝合金型材立面的反极图和极图

Fig. 1 Inverse pole figure (IPF) and pole figure of profile elevation

2.2 各向异性模型参数求解

根据有限应变理论,分别考虑晶格畸变和塑性滑移,变形梯度张量 F 可以分解为弹性分量 F^e 和塑性分量 F^p :

$$F = F^e F^p \quad (10)$$

式中: F^p 为滑移平面上位错的运动,使晶格保持

不变; F^e 为晶格的弹性拉伸和旋转运动。

利用运动学分解方法,将速度梯度 L^p 分解为:

$$L^p = \sum_{\alpha} \dot{\gamma}^{\alpha} S^{\alpha} \text{sign}(\tau^{\alpha}) \quad (11)$$

式中: $\dot{\gamma}^{\alpha}$ 为滑移系统 α 的剪切应变率; τ^{α} 为作用在滑移系统 α 上的剪应力; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

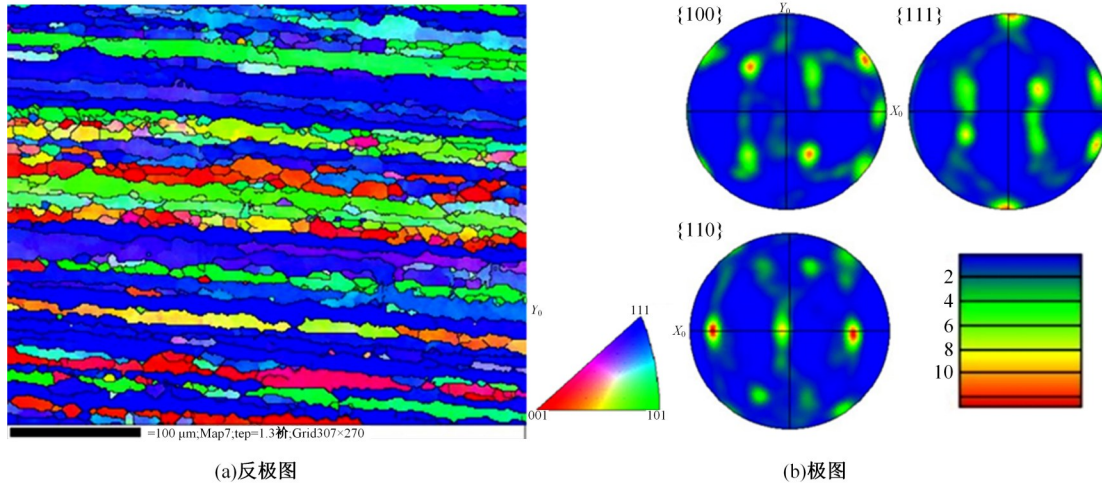


图 2 6005A 铝合金型材底面的反极图和极图

Fig. 2 Inverse pole figure (IPF) and pole figure of profile plane

单位向量(m^a, n^a)通过二元积施密德张量 S^a 定义 β_0 中 α 滑动系统的方向为:

$$S^a = m^a \otimes n^a \quad (12)$$

式中: m^a 和 n^a 分别为滑移平面方向和法线。

滑移系统的动力学假设 α 滑移系统上的解析剪应力可以分解为 τ^a :

$$\tau^a = \sigma \cdot S^a \quad (13)$$

式中: σ 为柯西应力张量。

在滑移系统 α 中,屈服面 f^a 可以表示为:

$$f^a = |\tau^a| - s^a \quad (14)$$

式中: s^a 为抗滑移性,它表征了晶体在当前结构中的应变硬化状态, s^a 的演化受以下因素控制。

$$\dot{s}^a = \sum_{\beta} h^{a\beta} \dot{\gamma}^{\beta} \quad (15)$$

式中: $s^a(0) = \tau_0$ 为每个晶粒滑移系统的初始硬度, $h^{a\beta}$ 为瞬时应变硬化矩阵。

$$h^{a\beta} = \begin{cases} h_0^{\beta} \left[1 - \frac{s^{\beta}}{s_s^{\beta}} \right]^{\theta^{\beta}}, & \text{if } \alpha = \beta \\ h_0^{\beta} q \left[1 - \frac{s^{\beta}}{s_s^{\beta}} \right]^{\theta^{\beta}}, & \text{if } \alpha \neq \beta \end{cases} \quad (16)$$

式中: q 为潜在硬化速率,对于共面滑移系统, $q=1$,而对于非共面滑移系统, $q=1.4$; h_0 、 α 、 θ 、 s 均为滑移系统的硬化参数,决定了所有滑移系的硬化行为。

本文基于滑移变形机制建立 6005A 铝合金晶体塑性本构模型,型材立面和底面的多晶体积单元(Representative volume element, RVE)分别由 800 颗随机放置的种子通过 Voronoi 曲面细分

法镶嵌而成,如图 3 所示。晶体塑性本构方程通过 ABAQUS/UMAT 用户子程序描述,模型参数如下:弹性常数为 $C_{11}=108$ GPa, $C_{12}=61$ GPa, $C_{44}=28$ GPa;参考剪切应变率 $\dot{\gamma}_0=0.001$ s $^{-1}$;初始硬化速率 $h_0=128$ MPa;初始屈服应力 $\tau_0=28$ MPa;饱和分切应力的临界值 $\tau_s=169$ MPa;率敏感因子 $m=0.01$;常数 $\theta=2$ 。模型中的 x 轴对应型材的挤压方向, y 轴对应挤压件的厚度方向, z 轴对应挤压件的横向。以挤压方向的拉伸模拟为例,固定 x 轴正方向的平面,在 x 轴负方向的平面上施加位移,应变速率设置为 0.02。

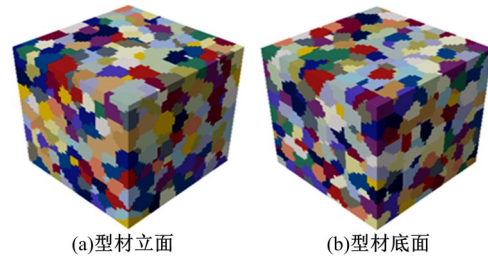


图 3 6005A 铝合金的代表性体积单元

Fig. 3 Representative volume element of 6005A

将通过 EBSD 测量得到的晶粒取向分布数据写入 Python 脚本,运行脚本为每个晶粒指定取向,分别对挤压方向(ED)、挤压的横向(TD)、挤压面的法向(ND)、与挤压方向呈 45° 的方向(ID)进行单向拉伸模拟,所得的模拟结果与实验结果对比如图 4 所示,由图可见,晶体有限元模拟结果与实验获得的真应力-应变曲线基本吻合。

获得 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则的参数后,构建的不同应力状态下的各向异性屈服面如图 5 所示。由图 5 可以看出,基于 Yld2004-18p 屈

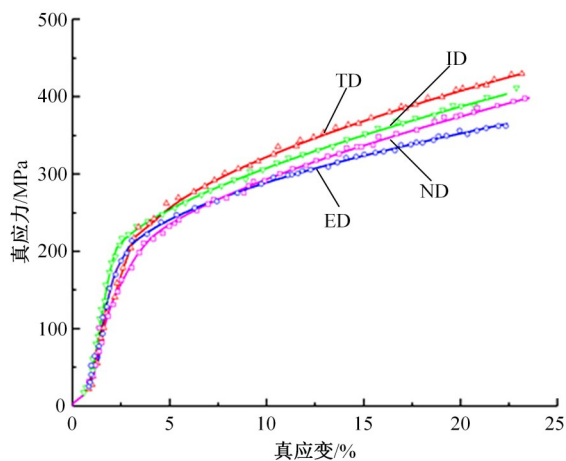
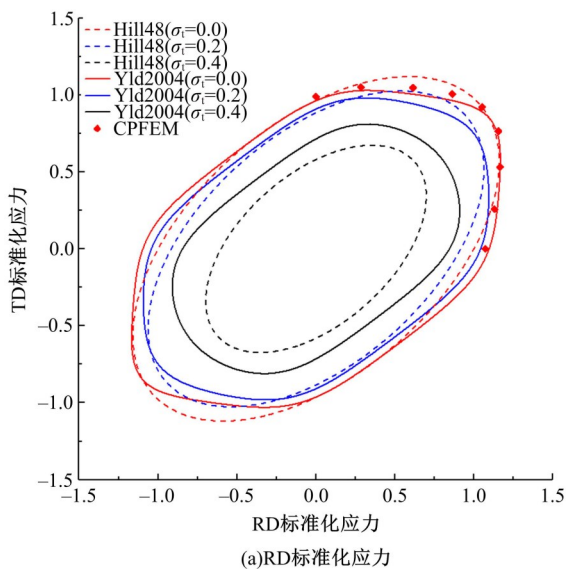
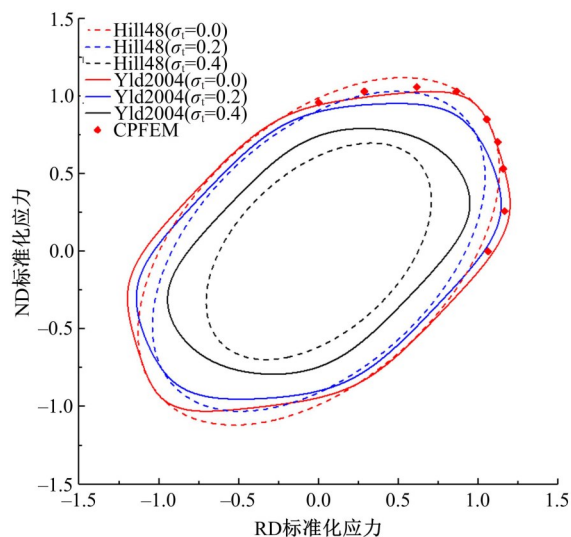


图 4 真应力-应变曲线与 CPFEM 结果对比

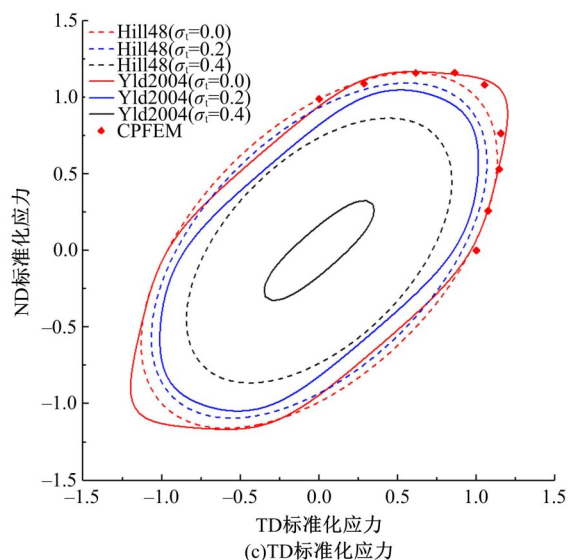
Fig. 4 Comparison of true stress-strain curves with CPFEM



(a)RD 标准化应力



(b)RD 标准化应力



(c)TD 标准化应力

图 5 不同平面内不同应力状态下的各向异性屈服面

Fig. 5 Anisotropic yield surfaces under different stress states in different planes

服准则构建的屈服面对 6005A 铝合金单轴应力下的屈服应力预测具有更好的精度。Hill48 屈服准则参数如下所示： $F=0.5482$ ； $G=0.4743$ ； $H=0.5258$ ； $L=1.3895$ ； $M=1.9109$ ； $N=1.9908$ 。Yld2004-18p 屈服准则参数如表 1 所示。

表 1 Yld2004-18p 屈服准则参数

Table 1 Yld2004-18p yield criterion parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
c'_{12}	1.0223	c'_{44}	0.9314	c''_{23}	0.9932
c'_{13}	0.8537	c'_{55}	1.0223	c''_{31}	0.9314
c'_{21}	0.8722	c'_{66}	0.8537	c''_{32}	0.9329
c'_{23}	1.1434	c'_{12}	0.8721	c''_{44}	1.0038
c'_{31}	1.0038	c'_{13}	1.1434	c''_{55}	0.8998
c'_{32}	0.9932	c'_{21}	1.0038	c''_{66}	1.4962

3 辊弯成形有限元模拟及实验

选取 T001、T002 和 T003 三种型材试件作为研究对象,其截面与有限元建模如图 6 所示。模型中,辊轮直径为 300 mm,上辊和下辊为刚体,选用 R3D4 单元类型,型材为可变形的实体,采用 C3D8R 单元类型。摩擦设定为罚函数模型,摩擦因数为 0.2。模拟中上辊先向下加压,压力设置为 4 t,型材受到持续的加载;再将上辊和中间辊位置固定,上辊转速设置为 9.5 r/min,通过摩擦力带动型材向前移动,同时对两侧辊施加向上的位移载荷,实现弯曲成形。

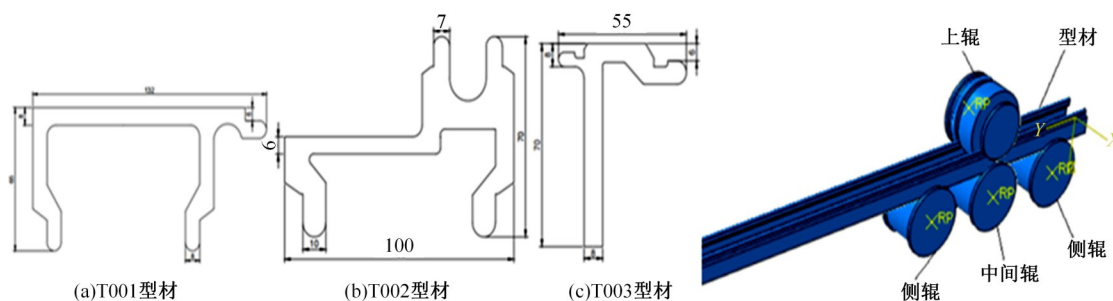


图 6 型材截面与有限元建模

Fig. 6 Sections of profiles and finite element modeling

模拟中,使用幂律模型描述材料的硬化规律,如下式所示:

$$\dot{\sigma} = 150.2 + 415.1 \cdot \dot{\epsilon}^{0.54} \quad (17)$$

辊弯成形实验使用 R-CNC-8030 型数控型材辊弯机。

4 结果及讨论

4.1 屈服准则对应力三轴度的影响

分别使用 Mises、Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则对 6005A 铝合金型材辊弯成形进行模拟分析,得到的最大等效应力值如图 7 所示。可以看出,应用 3 种屈服准则模拟的等效应力最大值不同,以 T001 型材为例,最大值分别为 368.77、338.36 和 389.73 MPa。

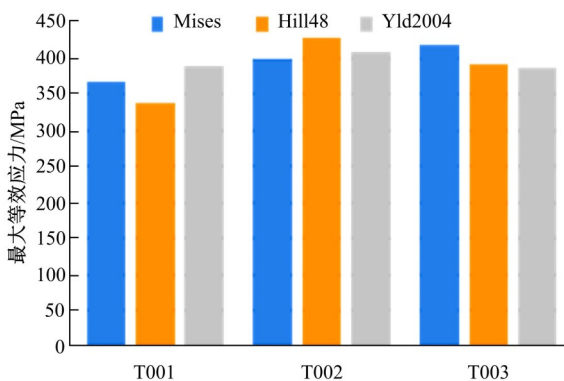


图 7 最大等效应力对比

Fig. 7 Comparison of maximum equivalent stress

等效塑性应变与应力三轴度的变化关系如图 8 所示。由图 8 可以看出:使用 3 种屈服准则得到的等效塑性应变与应力三轴度的变化关系趋势相同,但数值不同。随着等效塑性应变的增大,应力三轴度先从 0 增大到约 0.5,然后减小到负值,在 0~1.5 之间波动,说明型材在辊弯成形过程中受压应力为主。

通过上述对模拟结果中最大等效应力、等效塑性应变与应力三轴度关系的对比分析,发现屈

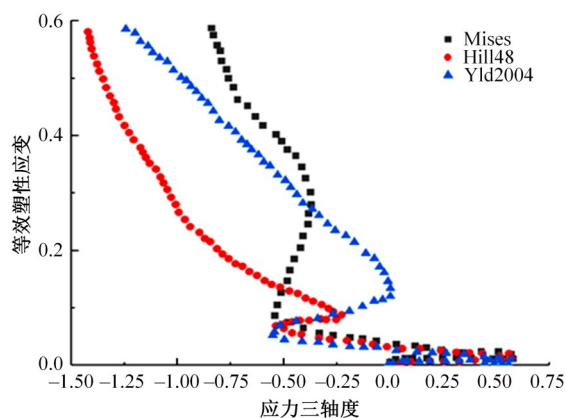


图 8 等效塑性应变与应力三轴度的变化关系

Fig. 8 Triaxiality-equivalent plastic strain curves

服函数影响数值模拟的精度。为了减小铝合金型材的各向异性对其数值模拟断裂预测的影响,需要选择合理的各向异性屈服函数。

4.2 屈服准则对型材断裂预测的影响

T001 型材在辊弯半径为 600 mm 时,发生起皱与出现裂纹的位置如图 9 所示。由图 9 可以看出:使用 3 种屈服准则获得的 I 值均在立面出现最大值,分别为 0.97、1.14 和 1.05,与实验出现裂纹的位置一致,说明 3 种模型对试件出现裂纹的位置预测准确,材料的各向异性力学性能不会影响裂纹出现的位置。在型材已经发生开裂时,使用 Mises 屈服准则获得的 I 值仍小于 1,说明使用各向同性屈服准则的预测结果具有滞后性。

型材起皱与出现裂纹的时刻如图 10 所示。当分析步时间在 0~3 s 时,型材处于弹性变形状态,使用 3 种屈服准则获得的 I 值一直接近于 0,型材基本未损伤。分析步时间在 3~8 s 时,型材由弹性变形进入塑性变形状态,使用 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则获得的 I 值快速增大到 1,预测型材损伤程度逐渐积累产生了宏观裂纹;使用 Mises 屈服准则获得的 I 值仍未达到 1,预测型材

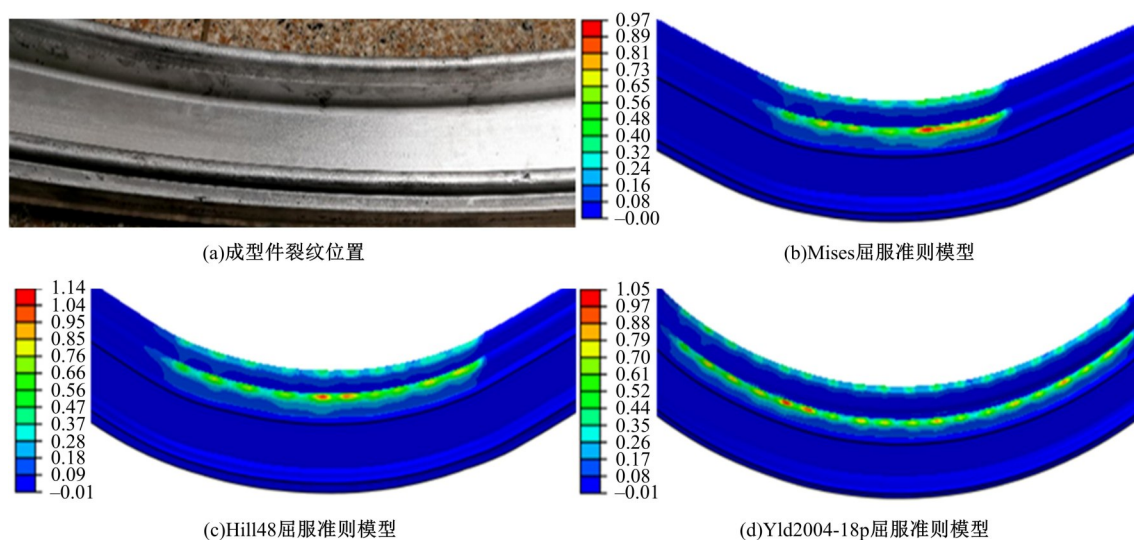
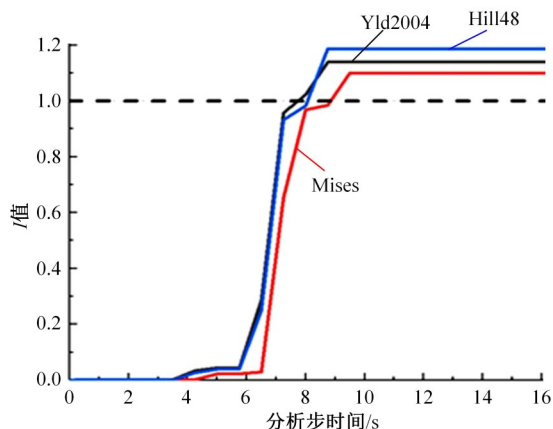


图9 T001型材辊弯成形断裂位置预测

Fig. 9 Fracture position on T001 profile in roll bending

图10 I 值随分析步时间的变化规律Fig. 10 Variation of I value with analysis step time

还未产生损伤。分析步时间在 8~10 s 时,使用 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则获得的 I 值由 1 继续增加,预测型材的损伤程度加快累积,裂纹迅速向外扩展,断裂区域扩大;使用 Mises 屈服准则获得的 I 值也增加达到 1,预测型材开始产生损伤。分析步时间在 10 s 以后,使用 3 种屈服准则获得的 I 值一直维持最大值不变,裂纹不再扩展,型材断裂区域趋于稳定。

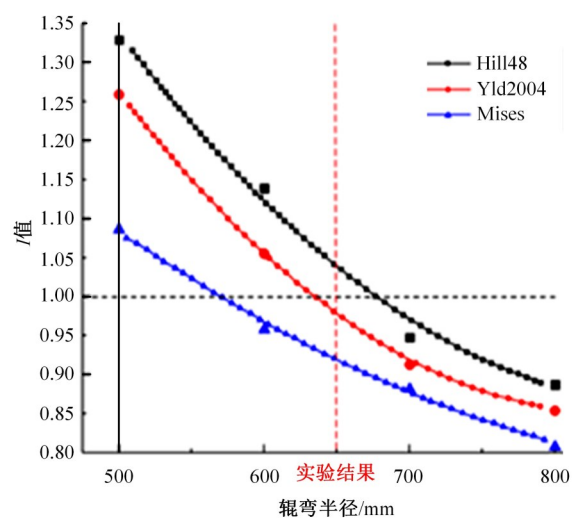
计算结果表明,使用 3 种屈服准则预测的辊弯断裂位置相同,但启裂时刻存在差异。金属材料在裂纹扩展前,裂纹尖端附近要先出现一个塑性变形区。当 I 值增大到临界值时,在裂纹尖端足够大的范围内应力达到材料的断裂强度。各向同性材料的裂纹尖端塑性区较大,裂纹扩展是在大范围屈服,甚至达到全面屈服后才断裂。因此,

将各向同性屈服准则应用于各向异性材料的断裂预测时,获取的 I 值具有滞后性,基于各向异性屈服准则构建的模型预测结果与实验结果更吻合。

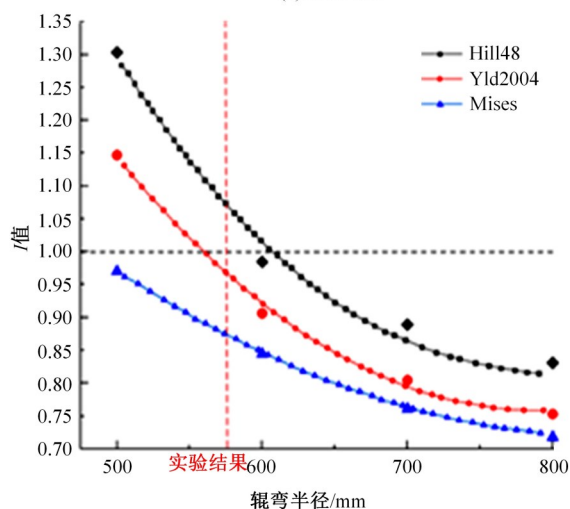
4.3 屈服准则对最小辊弯半径预测的影响

图 11 为不同型材断裂危险点处的 I 值随辊弯半径的变化关系。以 T001 型材为例,使用 Hill48 和 Yld2004-18p 屈服准则预测的最小辊弯半径为 600~700 mm,使用 Mises 屈服准则预测的最小辊弯半径为 550~600 mm。使用各向同性屈服准则预测的型材最小辊弯半径小于各向异性屈服准则的预测结果,另外两种型材也呈现相同的规律,说明各向异性会降低材料的成形性能。图中的曲线为将模拟的离散数据拟合后的插值数据,红色虚线为通过辊弯实验测得的 3 种型材的临界辊弯半径。

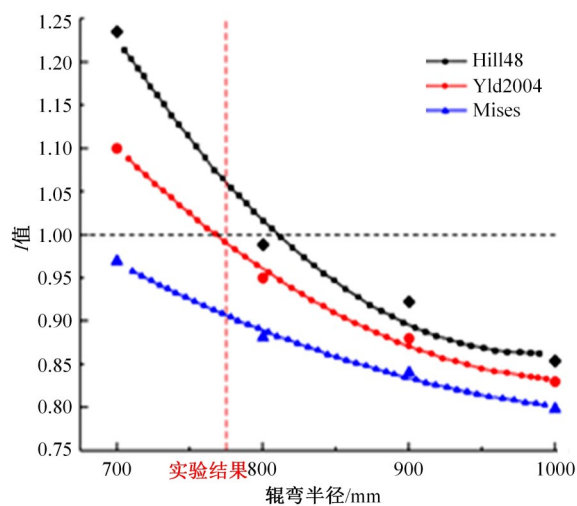
表 2 为实验获得的临界辊弯半径以及采用 3 种屈服准则的预测误差。与实验值相比较,采用 Mises 屈服准则的预测误差大于 15%,采用 Hill48 屈服准则的预测误差小于 5%,采用 Yld2004-18p 屈服准则的预测误差小于 3%。说明基于各向异性屈服准则构建的铝合金型材辊弯断裂模型比各向同性模型具有更好的精度。模拟预测的启裂时刻较实验结果有偏差,原因是受求解准则参数时的实验方式、材料性能以及型材断裂的受力状态等因素的影响。综上所述,使用各向异性屈服准则与连续损伤准则耦合的有限元模型,比各向同性模型能更准确地预测铝合金型材辊弯成形中的断裂行为。



(a) T001 型材



(b) T002 型材



(c) T003 型材

图 11 I 值随辊弯半径的变化规律Fig. 11 Relation between I value with radius in roll bending

表 2 最小辊弯半径预测精度评价

Table 2 Avaluation of accuracy of minimum radius in roll bending

型材	实验临界辊弯半径/mm	Mises	Hill48	Yld2004
		屈服准则 误差/%	屈服准则 误差/%	屈服准则 误差/%
T001	650	15.38	4.62	2.31
T002	575	17.39	4.35	2.61
T003	775	16.13	4.52	1.29

5 结 论

(1)使用晶体有限元和EBSD对6005A铝合金型材的力学性能进行了定量和定性分析。结果表明,各向异性对型材成形过程中的变形行为和损伤发展有影响。

(2)对比分析了采用3种屈服准则的断裂预测结果与辊弯实验的差异,结果表明,基于各向异性屈服准则构建的模型预测结果与实验更吻合,说明屈服函数的选择直接影响型材成形有限元模拟的精度。

(3)将本文构建的考虑了各向异性的铝合金型材辊弯断裂预测模型应用于3种不同截面的6005A铝合金型材辊弯成形中,成功预测了工件的最小辊弯半径,误差小于5%,其中,采用Yld2004-18p屈服准则预测的效果最好,误差小于3%。

参考文献:

- [1] Shi L, Wen J B, Ren C. The prediction of micro-structure evolution of 6005A aluminum alloy in a P-ECAP extrusion study[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(5): 2566-2575.
- [2] 韩飞, 刘继英, 艾正青, 等. 辊弯成型技术理论及应用研究现状[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5): 53-60. Han Fei, Liu Ji-ying, Ai Zheng-qing, et al. Research status of roll forming technology theory and application[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2010, 17(5): 53-60.
- [3] Yan Y, Wang H B, Li Q. The inverse parameter identification of Hill 48 yield criterion and its verification in press bending and roll forming process simulations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20(1): 46-53.
- [4] Li S, Engler O, Houtte P V. Plastic anisotropy and texture evolution during tensile testing of extruded aluminium profiles[J]. Modelling and Simulation in Ma-

- terials Science and Engineering, 2005, 13(5): 783-795.
- [5] 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.
- [6] Basak S, Panda S K, Lee M-G. Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 170: No. 105346.
- [7] Achani D, Hopperstad O S, Lademo O G. Influence of advanced yield criteria on predictions of plastic anisotropy for aluminium alloy sheets[J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(Sup. 1): 487-490.
- [8] Dick R E, Yoon J W. Plastic anisotropy and failure in thin metal: Material characterization and fracture prediction with an advanced constitutive model and polar EPS (effective plastic strain) fracture diagram for AA 3014-H19[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 151: 195-213.
- [9] Lou Y, Yoon J W. Alternative approach to model ductile fracture by incorporating anisotropic yield function[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 164: 12-24.
- [10] Grytten F, Holmedal B, Hopperstad O S, et al. Evaluation of identification methods for YLD2004-18p[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(12): 2248-2277.
- [11] Bate P, An Y. Plastic anisotropy in AA5005 Al-1Mg: predictions using crystal plasticity finite element analysis[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(10): 973-977.
- [12] Wei P, Lu C, Liu H, et al. Study of anisotropic plastic behavior in high pressure torsion of aluminum single crystal by crystal plasticity finite element method[J]. Crystals, 2017, 7(12): 362-372.
- [13] 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: 上海交通大学材料科学与工程学院, 2009.
- Huang Jian-ke. Research on meso-scale damage mechanics model and ductile fracture criterion of metal forming process[D]. Shanghai: School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [14] 高付海, 桂良进, 范子杰. 基于韧性准则的金属板料冲压成形断裂模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 204-208.
- Gao Fu-hai, Gui Liang-jin, Fan Zi-jie. Fracture simulation of sheet metal stamping based on toughness criterion[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 204-208.
- [15] 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): 201-217.
- [16] Liu C, Li M, Yue T. Thick anisotropy analysis for AA7B04 aluminum plate using CPFEM and its application for springback prediction in multi-point bending [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(4): 1139-1153.