

塑性成形

# 纯钼薄板温热条件下的各向异性及本构建模研究

代鹏<sup>1</sup>, 高晗菲<sup>2</sup>, 樊晓光<sup>2</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000; 2. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** **目的** 研究交叉轧制纯钼薄板温热条件下的各向异性和本构关系。**方法** 对纯钼薄板进行不同温度及方向下的拉伸实验, 根据各向异性的特征并基于 Hu2003 屈服准则, 以修正的 Johnson-Cook 模型对屈服准则的参数进行识别, 建立考虑温度和应变的屈服准则。**结果** 退火后的纯钼薄板具有一定的面内各向异性 and 显著的厚向异性, 面内各向异性随温度升高而减弱, 厚向异性对温度不敏感; 加入温度变量的 Hu2003 屈服准则对不同温度下的屈服面描述较为准确, 室温及 100 °C 时屈服面减小速率较大, 温度高于 300 °C 时, 屈服面减小速率减小并趋于稳定, 屈服面形状并未发生明显扭曲变形; 屈服面随应变增加未出现较为明显的扭曲强化现象。**结论** 对钼板各向异性和本构关系的研究可用于指导钼板件冲压成形。

**关键词:** 纯钼板; 各向异性; 屈服准则; 温度和应变相关性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.001

中图分类号: TG389 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2020)02-0001-07

## Anisotropy and Constitutive Modeling of Thin Pure Molybdenum Sheet at Room to Medium Temperature

DAI Peng<sup>1</sup>, GAO Han-fei<sup>2</sup>, FAN Xiao-guang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Vacuum Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Shaanxi Key Laboratory of High-Performance Precision Forming Technology and Equipment, School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the plastic anisotropy and constitutive relation of the cross-rolled pure molybdenum sheet at room to medium temperature. Tensile tests were carried out to the pure molybdenum sheet at different temperature and loading directions. Based on the anisotropy and Hu2003 yield criterion, a yield criterion considering the effect of temperature and strain was developed by identifying the parameters with modified Johnson-Cook model. It was found that the pure molybdenum sheet had moderate in-plane anisotropy and sound normal anisotropy. The in-plane anisotropy decreased with the increasing temperature, while the normal anisotropy was not sensitive to temperature. Hu2003 yield criterion with temperature variable was more accurate to describe the yield surface at different temperature. The reduction rate of yield surface was larger at room temperature and 100 °C. When the temperature was higher than 300 °C, the reduction rate of yield surface decreased and tended to be stable, and the shape of yield surface did not undergo obvious distortion. The yield surface did not show obvious distortion strengthening phenomenon with the increase of strain. The research on anisotropy and constitutive relation of molybdenum sheet can guide the stamping of molybdenum components.

**KEY WORDS:** molybdenum sheet; anisotropy; yield criterion; temperature and strain correlation

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 真空技术与物理重点实验室开放基金 (Y07-005)

作者简介: 代鹏 (1984—), 男, 博士, 主要研究方向为电推力器力学可靠性分析。

通讯作者: 樊晓光 (1985—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精确塑性成形。

纯铝是一种性能优异的难熔金属, 具有高的热导率、好的高温强度和低的热膨胀率, 在航空航天领域具有重要的应用需求<sup>[1-2]</sup>。冷/温热冲压是制造薄壁铝件的主要方式。冲压用铝板一般用粉末冶金和交叉轧制的方式, 其在塑性变形中会表现出各向异性, 即各个方向的初始屈服强度、硬化行为和厚向异性会有较大差异, 这种性质会给成形过程带来很大的影响<sup>[3-4]</sup>, 并且材料的各向异性会随着温度和应变的变化而有着明显的变化规律<sup>[5-7]</sup>。研究温热条件下的铝板各向异性并建立相应的预测模型, 对优化和控制薄壁铝件冷/温热冲压具有重要的意义。

国内外学者已对纯铝板的变形行为进行了一定的研究。Kleiser 等<sup>[8]</sup>分析了室温下轧制纯铝的各向异性, 指出其轧制方向强度最小, 断裂伸长率最大, 横向的强度较大, 断裂伸长率较小, 并建立了可以表征纯铝各向异性的本构方程, 但没有考虑温度的影响。Walde<sup>[9]</sup>分析了室温到 100 °C 范围内薄铝板各向异性随温度的变化, 发现轧制态铝板的塑性随温度升级迅速改善, 而厚向异性对温度不敏感, 但其温度范围没有覆盖温热成形的温度范围; Oertel 等<sup>[10]</sup>对轧制铝板的微观组织和织构进行了分析, 发现轧制铝板会存在不完整的  $\alpha$ -纤维织构, 轧制方式会影响织构的组成, 在一定程度上影响各向异性, 但不涉及温度的作用。可见, 温度对纯铝板各向异性的影响及建模还缺乏较为系统的研究。

文中通过室温到 500 °C 沿不同方向的拉伸实验, 对纯铝薄板的屈服以及应变硬化的各向异性及其随温度的变化规律进行研究, 在此基础上建立了考虑温度相关性的各向异性本构方程, 可为铝板温热成形提供指导。

## 1 实验

实验用纯铝板通过粉末冶金—交叉轧制—再结晶退火的方法制备。板材厚 0.5 mm, 热处理制度为: 1200 °C/1 h/炉冷。拉伸试样根据 ASTM E21 标准设计, 如图 1 所示。试样分别沿轧制(RD)、横向(TD)和 45°方向从铝板上切取。

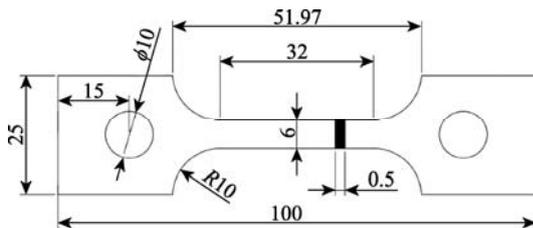


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Specimen for tensile test

温热拉伸在 E45.105 电子万能实验机上完成, 升

温速率为 30 °C/min, 达到设定温度后保温 20 min, 使炉内温度均匀, 并使用引出式高温引伸计测量其标距段轴向变形量。厚向异性通过轴向应变为 10% 时试样宽度方向和厚度方向的应变值获取, Walde<sup>[9]</sup>的研究表明在该应变下铝板的厚向异性指数达到温度, 随变形量基本不发生变化。实验分别在 25, 100, 300, 500 °C 下进行, 每个温度点下沿 RD、45°和 TD 等 3 个方向进行拉伸, 应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纯铝薄板温热条件下的各向异性

不同温度下铝板的真应力-真应变曲线如图 2 所示。通过对曲线的计算及拟合得到如表 1 所示的纯铝薄板 RD、45°和 TD 等 3 个方向上的力学性能参数。从图 2 可以看出, 退火后的纯铝薄板仍具有较明显的各向异性, 其各向异性随温度的升高有明显的变化。

室温下 TD 方向屈服强度最高, 45°方向最低, 与 Kleiser 等<sup>[8]</sup>的实验结果基本一致。在屈服后流动应力有明显减低, 这种现象在 RD 方向最为显著, 45°方向最弱。该现象一般认为受晶体取向和可动位错演化的共同作用。材料在达到下屈服点后迅速发生加工硬化。由硬化指数拟合可知, 45°方向硬化最为显著, 而其他两个方向的硬化指数基本一致。在变形后期, 铝板发生较为迅速的颈缩和断裂。RD 方向的塑性最好, 其伸长率可达 TD 方向的 4 倍以上, 45°方向伸长率与 TD 方向相当。材料的断裂强度由屈服强度和加工硬化共同决定, TD 方向伸长率高, 可以实现较大的加工硬化, 其断裂强度最高, 而 45°方向屈服强度最低, 加工硬化有限, 其断裂强度最低。

室温下铝板具有显著的厚向异性, RD 和 TD 方向的厚向异性指数( $r$ 值)约 0.2 左右, 45°方向约 0.6, 这种厚向异性指数随拉伸方向的变化是由板材的织构决定, Kleiser 等<sup>[8]</sup>和 Walde<sup>[9]</sup>等对轧制态铝板也报道了类似的结果, 其各向异性的变化较文中更为剧烈, 这说明退火不改变轧制板材的织构类型, 只改变其强度。

随着温度的升高, 各方向的屈服强度均有显著的下降, 在 100 °C 下 TD 方向仍有最高的屈服强度, 而 TD 和 45°方向屈服强度基本相同。屈服后流动应力的降低已基本消失, 取而代之的是一个小的屈服平台, 随后材料发生硬化。各方向的加工硬化率相似, 各方向的伸长率均显著提高, 而 45°方向塑性提高最快, 其伸长率接近 RD 拉伸。45°方向厚向异性指数有所降低, 其他两个厚向异性指数变化不大。

当温度增大到 300 °C 时, 各方向的屈服强度均继续显著下降, TD 方向仍略高, 但 3 个方向的屈服强度差距不大。屈服平台消失, 加工硬化指数较低温

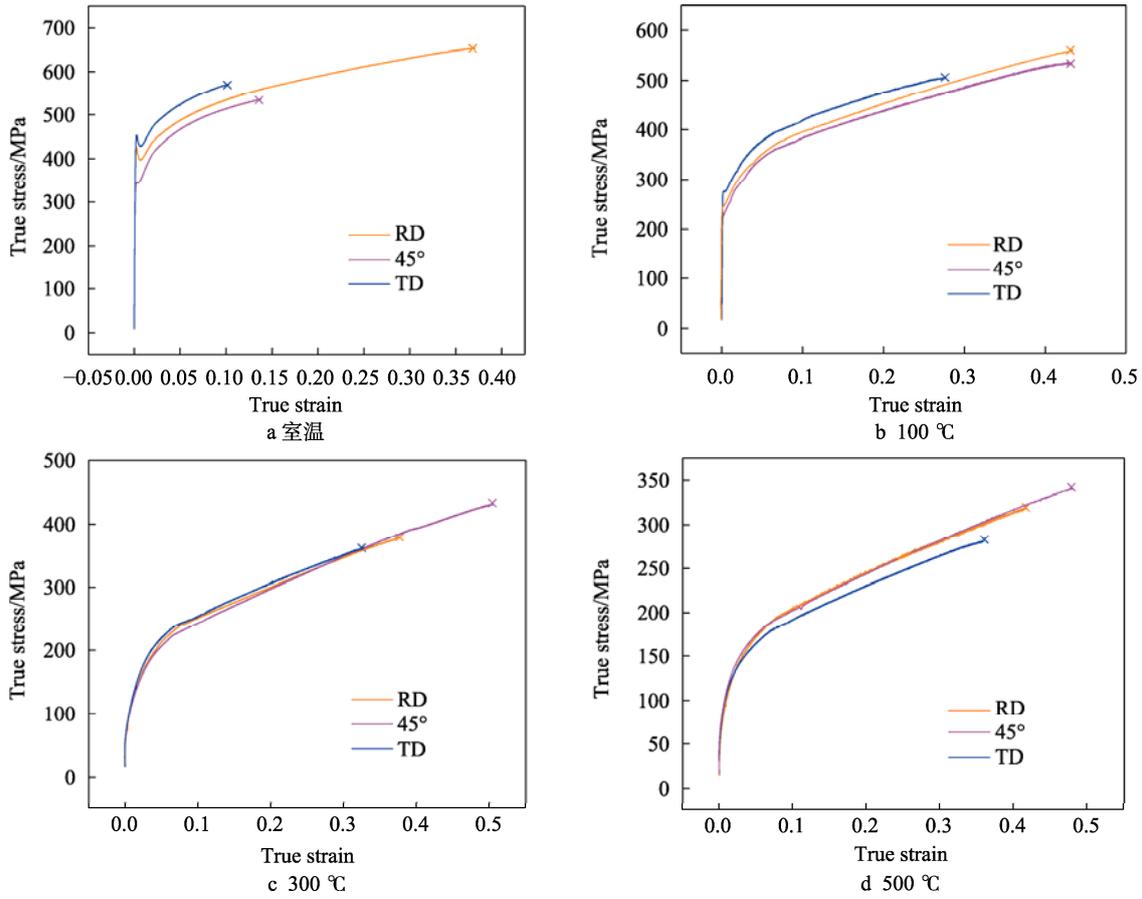


图 2 不同温度下的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves at different temperature

表 1 纯钼薄板不同方向上的力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of the pure molybdenum sheet in different directions

温度/°C	加载方向	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬化指数	厚向异性指数
25	RD	397.76	47.92	0.150	0.1641
	45°	343.27	14.95	0.169	0.6046
	TD	428.42	10.79	0.151	0.2311
100	RD	246.48	57.15	0.187	0.1340
	45°	229.27	57.32	0.209	0.4173
	TD	274.94	33.59	0.184	0.1725
300	RD	72.00	49.25	0.296	0.1148
	45°	77.98	68.73	0.315	0.3670
	TD	79.18	39.69	0.286	0.1317
500	RD	62.08	58.31	0.296	0.1189
	45°	76.25	65.60	0.275	0.3634
	TD	70.01	44.14	0.265	0.1046

显著升高，但各方向差异不大。45°和 TD 方向伸长率继续增大，RD 方向则有所下降。各方向厚向异性指数变化不大。在温度到达 500 °C 时，试样除屈服强度进一步降低外，其他力学行为变化不大。

### 2.2 各向异性屈服准则

为了提高数值模拟的精度，准确描述纯钼薄板

在面内各个方向上屈服行为的差异，需要建立相应的屈服准则表述屈服阶段应力分量的变化。Hu 于 2003 年<sup>[11]</sup>提出了一个形式简单的高阶平面应力屈服准则，可以很好地预测轧制板材平面拉伸的屈服应力，比较适合预测厚向异性显著的材料，被其他学者广泛使用<sup>[12-14]</sup>，其表达式如式(1)所示。在这个屈服准则中，板材的厚向异性指数是材料的独立变

量, 只对屈服轨迹的形状有影响。

$$A_x A_y \sigma_x^4 + (A_x C_y + A_y C_x) \sigma_x^3 \sigma_y + (A_x B_y + A_y B_x + C_x C_y) \sigma_x^2 \sigma_y^2 + (B_x C_y + B_y C_x) \sigma_x \sigma_y^3 + B_x B_y \sigma_y^4 + [(A_x D_y + A_y D_x) \sigma_x^2 + (B_x D_y + B_y D_x) \sigma_y^2 + (C_x D_y + C_y D_x) \sigma_x \sigma_y] \tau_{xy}^2 + D_x D_y \tau_{xy}^4 = 1 \quad (1)$$

假设  $x$  和  $y$  方向分别为 RD 和 TD 方向。使用 RD、TD 和  $45^\circ$  方向的实验数据来描述板材的各向异性。式 (1) 的前五项与 RD 和 TD 方向的实验数据相关, 可以表示为:

$$A_x A_y = \frac{1}{\sigma_0^4}$$

$$A_x C_y + A_y C_x = -\frac{4R_0}{(1+R_0)\sigma_0^4}$$

$$A_x B_y + A_y B_x + C_x C_y = \frac{1}{\sigma_b^4} - \frac{1}{\sigma_0^4} - \frac{1}{\sigma_{90}^4} + \frac{4R_0}{(1+R_0)\sigma_0^4} + \frac{4R_{90}}{(1+R_{90})\sigma_{90}^4} \quad (2)$$

$$B_x C_y + B_y C_x = -\frac{4R_{90}}{(1+R_{90})\sigma_{90}^4}$$

$$B_x B_y = \frac{1}{\sigma_{90}^4}$$

后两项的待定系数与  $45^\circ$  方向的实验数据有关。当  $x$  为  $45^\circ$  方向时, 第六项可以转变为:

$$(A_x D_y + A_y D_x) \sigma_x^2 + (B_x D_y + B_y D_x) \sigma_y^2 + (C_x D_y + C_y D_x) \sigma_x \sigma_y = \left( \frac{16}{(1+R_{45})\sigma_{45}^4} - \frac{2}{\sigma_b^4} \right) (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) \quad (3)$$

$$D_x D_y = \frac{16R_{45}}{(1+R_{45})\sigma_{45}^4} + \frac{1}{\sigma_b^4}$$

对 Hu2003 屈服准则参数的识别需要沿 RD、 $45^\circ$ 、TD 和厚度方向的屈服强度, 以及沿 RD、 $45^\circ$  和 TD 方向的厚向异性指数。通过厚向压缩测得 25, 100, 300, 500  $^\circ\text{C}$  下厚度方向的屈服强度分别为 366.6, 227.23, 68.77, 56.32 MPa。将所测得数据带入式 (1) 可以得到 Hu2003 屈服准则, 以 RD 和 TD 方向为主应力坐标轴, 可得屈服面如图 3 所示。图 4 为屈服应力随角度的变化曲线, 可以看出, 模型算得应力符合实验所得数据。

### 2.3 考虑温度和应变屈服准则的建立

在实际的材料变形中, 温度和应变通常会材料屈服面后继的演变产生影响。而常用的硬化法则无法描述屈服面后续的不规则扭曲演变过程, 因此, 为了实现后续屈服面演变的预测, 需要建立考虑温度和应变的屈服准则。文中通过将 Hu2003 屈服准则中的各向异性参数用温度和应变相关的函数来代替, 这样包含温度和应变变量的屈服准则就可以表示不同温

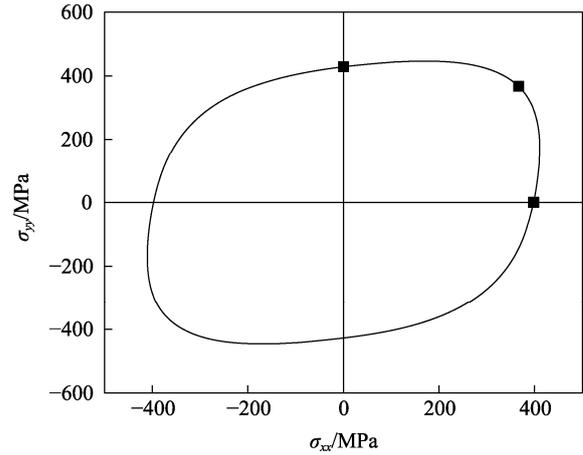


图3 室温下的屈服面

Fig.3 Yield surface at room temperature

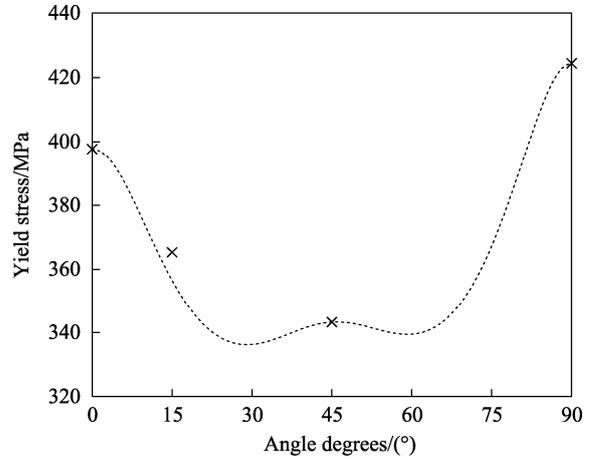


图4 屈服应力随角度的变化曲线

Fig.4 Variation of yield stress with loading angle

度和应变下的屈服轨迹。

Hu2003 中各向异性参数的识别需要 RD、 $45^\circ$ 、TD 屈服强度和厚向异性指数以及厚度方向屈服强度。由于不同温度下厚向异性指数变化不大, 通过考虑 4 个方向的屈服强度随温度和应变的变化, 可以表征屈服轨迹随温度和应变的变化规律, 所以需要建立 4 个方向的应力随温度和应变变化的方程。Johnson-Cook 本构模型<sup>[15]</sup>可以反映应力与温度、应变和应变速率的关系, 从而能够对不同条件下非线性应力应变关系进行预测, 因此被广泛应用到各种材料的热变形建模中<sup>[16-17]</sup>。文中采用修正的纯铝薄板 Johnson-Cook 本构方程, 如式 (4) 所示:

$$\sigma = [A(1-T^{*m}) + B(T^*)\varepsilon^n] \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon$  为塑性应变;  $\sigma$  为流动应力;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $T$  为变形温度;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变速率 (文中取  $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ );  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ , 其中  $T_r$  为参考温度 (文中取  $T_r = 25^\circ\text{C}$ ),  $T_m$  为材料熔点 (取  $T_m = 2610^\circ\text{C}$ ),  $A, n, C$  为材料参数。

对 4 个方向的应力应变曲线进行拟合,其中应变速率设为常数 ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )。将相关参数表示为式 (5) 所示的函数形式,沿 RD、45°、TD 和厚度 4 个方向拟合得到包含温度和应变变量的热变形本构方程,参数如表 3 所示。

$$m = a_1 + b_1 T^* + c_1 T^{*2} + d_1 T^{*3}$$

$$B(T^*) = \frac{\sigma_b - \sigma_{0.2}}{\varepsilon_b^n} \quad (5)$$

$$\sigma_b = \sigma_{br} (1 - T^{*a_2} + b_2 T^{*c_2} + d_2 T^{*3})$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{br} (1 + P_1 T^{*2} + P_2 T^{*2} - P_3 T^{*P_4})$$

式中： $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2, P_1, P_2, P_3, P_4$  为材料参数。

4 个方向拟合得到的 Johnson-Cook 模型对纯钼薄板温热变形的预测结果与实验曲线的对比如图 5 所示。可以看出,预测结果较好,对初始屈服强度以及最终的强化趋势预测较为准确,由于各个温度点之间的硬化方式差异明显,致使在同一方向对拉伸硬化过程进行预测时,某些温度点下实验结果的初始硬化阶段与模型有差异。

表 2 沿 4 个方向拉伸的材料参数  
Tab.2 Material parameters under tension in four directions

材料参数	加载方向			
	RD	45°	TD	厚度方向
$A$	397.8	343.27	428.42	366.63
$n$	0.6366	0.5140	0.4931	0.4990
$C$	0	0	0	0
$a_1$	0.5458	0.3259	0.5471	0.4692
$b_1$	-12.12	0.5572	-11.29	-8.236
$c_1$	101.7	-38.78	89.01	57.60
$d_1$	-266.5	167.5	-221.9	-129.0
$a_2$	0.7179	1.992	0.7907	0.4292
$b_2$	-7.200	-18.23	-7.911	2.441
$c_2$	50.97	71.79	60.53	-38.86
$d_2$	-116.0	-73.37	-158.5	135.3
$P_1$	127.8	-4712	-78.89	0
$P_2$	45.14	109.086	81.97	0
$P_3$	147.3	-4642	-47.42	0
$P_4$	1.049	0.9921	0.7107	1

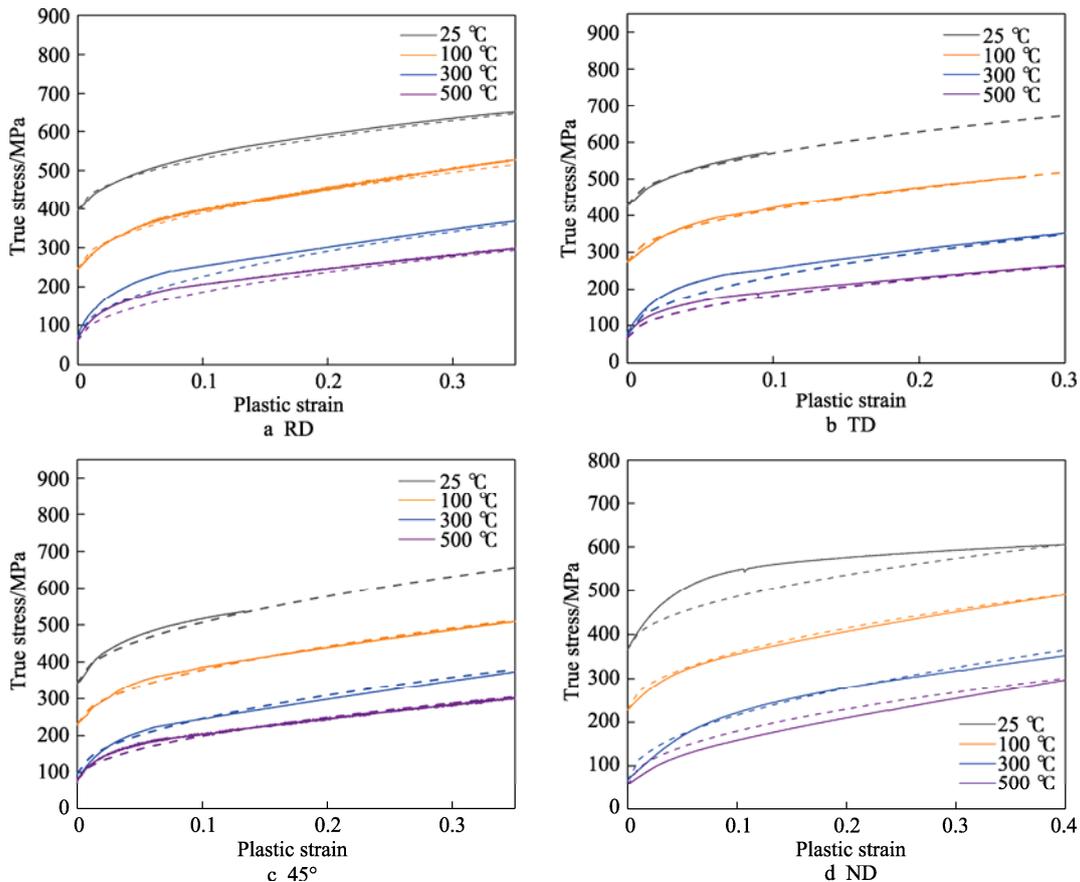


图 5 Johnson-Cook 模型对纯钼薄板温热变形的预测结果与实验曲线的对比

Fig.5 Comparison between Johnson-Cook Model's prediction results and experimental curves for thermal deformation of pure molybdenum sheet

用 RD、45°、TD 以及厚度方向上的纯钼薄板热变形 Johnson-Cook 本构模型分别代替 Hu2003 屈服准

则参数标定过程中所使用的  $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$ , 得到的 Hu2003 屈服准则就可以表示温度和应变对屈服轨迹

的影响。图6为不同温度下Hu2003在以RD和TD方向为主应力坐标轴上的屈服面和实验数据的对比,其中实心点为实验在不同温度下的屈服强度,可以看出,加入温度变量的Hu2003屈服准则对不同温度下的屈服面描述得较为准确。纯钼薄板屈服面随温度升高而缩小,室温及100℃时屈服面减小速率较大,温度高于300℃时,屈服面减小速率变小并趋于稳定,屈服面形状并未发生明显扭曲变形。

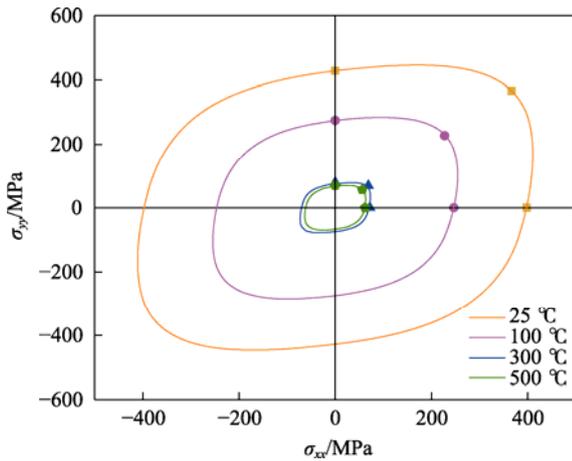


图6 不同温度下的屈服面

Fig.6 Yield surface at different temperature

与应变相关的Hu2003屈服准则在同一温度下可以反映屈服面随应变的变化规律,如图7所示。由于各方向加工硬化速率较为接近,未出现较为明显的扭曲强化现象。

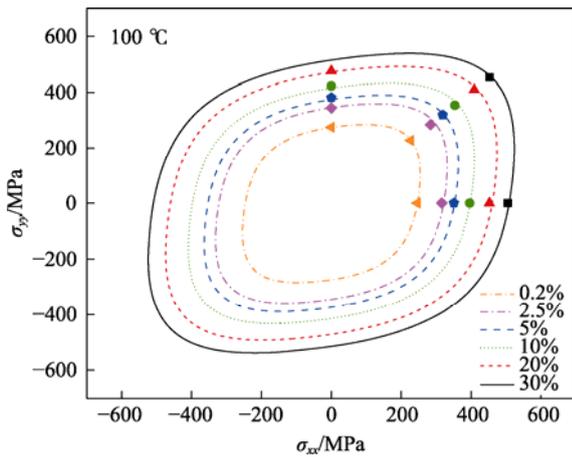


图7 不同塑性应变下的屈服面

Fig.7 Yield surface at different plastic strain

### 3 结论

1) 纯钼薄板具有一定的面内各向异性和显著的厚向异性,随变形温度的升高,各向屈服强度先迅速后缓慢减小,面内各向异性也随之减弱,而厚向异性对温度不敏感。钼板的加工硬化特性对加载方向不敏

感,但随温度升高硬化指数显著增加。

2) 使用Hu2003屈服准则建立了纯钼薄板的屈服准则,并利用RD、45°、TD以及ND这4个方向的单向加载实验对屈服准则的参数进行了标定。

3) 在RD、45°、TD以及ND这4个方向上建立了纯钼薄板Johnson-Cook温热变形本构方程;利用Johnson-Cook温热变形方程进行了Hu2003屈服准则参数的识别,完成了包含温度和应变屈服准则的建立。

#### 参考文献:

- [1] 程景峰, 余莉, 许洁瑜. 中国钼金属制品发展现状分析[J]. 中国钼业, 2009, 33(4): 16—20.  
CHENG Jing-feng, YU Li, XU Jie-yu. Analysis on the Development Status of Molybdenum Metal Products in China[J]. China Molybdenum Industry, 2009, 33(4): 16—20.
- [2] 刘强, 魏世忠, 徐流杰. 钼合金的发展概况及研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2011, 39(4): 50—52.  
LIU Qiang, WEI Shi-zhong, XU Liu-jie. Development and Research Status of Molybdenum Alloys[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2011, 39(4): 50—52.
- [3] 李超帅. 纯钼的高温热变形行为与交叉轧制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
LI Chao-shuai. Studies on Hot Deformation Behavior and Cross Rolling of Molybdenum[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [4] 李宏柏. 粉末冶金钼板轧制工艺有限元模拟与试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.  
LI Hong-bai. Fem Simulation and Experimental Study of Rolling Process for Powder Metallurgy Molybdenum Plate[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [5] ABEDRABBO N, POURBOGHRAT F, CARSLY J. Forming of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures—Part 1: Material Characterization[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(2): 314—341.
- [6] KHAN A S, YU S, LIU H. Deformation Induced Anisotropic Responses of Ti-6Al-4V Alloy Part II: A Strain Rate and Temperature Dependent Anisotropic Yield Criterion[J]. International Journal of Plasticity, 2012, 38: 14—26.
- [7] TARI D G, WORSWICK M J. Elevated Temperature Constitutive Behavior and Simulation of Warm Forming of AZ31B[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 40—55.
- [8] KLEISER G, REVIL-BAUDARD B, CAZACU O, et al. Plastic Deformation of Polycrystalline Molybdenum: Experimental Data and Macroscopic Model Accounting for Its Anisotropy and Tension-compression Asymmetry[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 75: 287—298.

- [9] WALDE T. Plastic Anisotropy of Thin Molybdenum Sheets[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2008, 26: 396—403.
- [10] OERTEL C G, HUENSCH I, SKROTZKI W, et al. Plastic Anisotropy of Straight and Cross Rolled Molybdenum Sheets[J]. *Materials Science & Engineering: A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2008, 483: 79—83.
- [11] HU Wei-long. Characterized Behaviors and Corresponding Yield Criterion of Anisotropic Sheet Metals[J]. *Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, 2003, 345: 139—144.
- [12] TONG W. An Improved Method of Determining Gotoh's Nine Material Constants for a Sheet Metal with only Seven or Less Experimental Inputs[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 140: 394—406.
- [13] TONG W, ALHARBI M. Comparative Evaluation of Non-associated Quadratic and Associated Quartic Plasticity Models for Orthotropic Sheet Metals[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 128: 133—148.
- [14] COGUN F, DARENDELILER H. Comparison of Different Yield Criteria in Various Deep Drawn Cups[J]. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10(1): 85—98.
- [15] JOHNSON, GORDON R. A Constitutive Model and Data for Materials Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures[J]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983: 541—547.
- [16] BOBBILI R, MADHU V. Constitutive Modeling of Dynamic Flow Behavior of Ti-5553 Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 787: 260—266.
- [17] ZHANG Wei, WANG Xiao-wei, CHEN Hao-feng, et al. A Modified Constitutive Model for Tensile Deformation of 9% Cr Steel under Prior Fatigue Loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2019: 103093.