

高温合金超薄带材屈服轨迹的晶粒尺度依赖性研究

王彦菊¹, 杨宇², 万敏², 贾崇林³, 沙爱学¹, 孟宝²

(1. 中国航发北京航空材料研究院 航空及发动机材料应用评价中心, 北京 100095)

(2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

(3. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

摘要: 为了研究高温合金超薄带材屈服轨迹的晶粒尺度依赖性, 通过单向拉伸试验和不同加载比例的双向拉伸试验获得了不同厚度和晶粒尺寸的高温合金超薄带材的实验屈服轨迹。结果表明, 随着高温合金带材晶粒尺寸的增大, 屈服轨迹整体向内收缩, 且形状由椭圆形向方形转变, 证明了高温合金带材屈服轨迹存在晶粒尺度依赖性。同时, 评估了 4 种典型宏观屈服准则 Mises、Hill48、Barlat89 和 Yld2000-2d 预测不同厚度与晶粒尺寸高温合金带材屈服轨迹的能力, 发现 Yld2000-2d 屈服准则预测精度最高, 可以较为精确地描述不同厚度与晶粒尺寸高温合金超薄带材的屈服行为。

关键词: 高温合金超薄带材; 双向拉伸试验; 屈服轨迹; 晶粒尺度效应

中图分类号: TG113

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)07-2591-08

微塑性成形技术因其高效率、低成本和制造的产品性能优良等优点, 广泛应用于微型构件的批量生产^[1-4]。高温合金超薄带材具有良好的抗辐射、抗疲劳、抗氧化和抗腐蚀性能, 在微成形技术中是制造航空发动机超薄壁功能构件的关键材料。带材的厚度非常小甚至接近于晶粒尺寸级别, 在成形过程中参与塑性变形的区域往往只有几个晶粒, 单个晶粒的属性对成形过程影响很大, 塑性流动行为具有明显的尺度效应, 从而给微塑性成形过程预测带来不可忽略的影响^[5-10]。因此, 为准确描述高温合金超薄带材的塑性变形行为, 带材厚度和晶粒尺度效应对材料屈服特性以及屈服准则有效性的影响规律亟待探索。

金属材料屈服特性和屈服准则一直是材料界、力学界和塑性成形领域的研究重点, 长期以来备受关注。深入研究微尺度下板料的屈服强化行为, 建立能够精确解析金属薄板微塑性变形行为的本构模型, 并结合有限元模拟技术实现对超薄板成形问题的精确预测是掌握超薄板成形机理、优化成形工艺参数和模具设计的基础。Chan 等^[11]通过对纯铜进行拉伸试验和数值模拟, 提出了基于表面层模型的流动应力表征方法, 认为表面层晶粒的体积分数随着 t/d (材料厚度/晶粒尺寸) 的增大而减小, 且该比值大于 18 时可忽略表面层晶粒的影响。

Zhang 等^[12]利用晶体塑性有限元方法对 AA3014 铝合金的屈服应力点进行了模拟, 预测出材料的屈服应力点, 获取了 Yld91、Yld2000-2d、Yld2004-18p 和 Yld2004-27p 等屈服准则中的材料参数。Dubos 等^[13]对镍、铜、钴箔材进行了微胀形试验, 发现尺度效应会影响材料的软化性能, 并用 Hill48 屈服准则计算了等效应力和等效应变。Adzima 等^[14]对 0.1 mm 厚的铜合金薄板进行了拉伸、剪切和等双拉试验, 采用唯象 Hill48 和 Bron & Besson 屈服准则以及 CPFEM 模型来描述其变形特性。结果表明, Bron & Besson 屈服准则拟合精度更高。Cheng 等^[15]对不锈钢箔材进行了双向拉伸试验, 发现 Yld2000-2d 屈服准则预测精度较高, 并且随着材料厚度方向晶粒数量的减少, 宏观尺度屈服准则的预测精度会降低, 屈服轨迹由 Mises 形演变为 Tresca 形。代鹏^[16]等对 0.5 mm 厚纯铝薄板进行了不同温度的单向拉伸试验, 以修正的 Johnson-Cook 本构模型对 Hu2003 屈服准则的参数进行识别。结果表明, 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。综上所述, 目前对于尺度效应的研究多集中于铝、铜和不锈钢等材料, 然而关于高温合金屈服行为的晶粒尺度效应研究很少。

本研究选用 3 种规格的 GH4169 和 GH738 超薄带

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51975031); 装备预先研究基金 (6141C26); 国防技术基础研究项目 (JD191381)

作者简介: 王彦菊, 女, 1981 年生, 博士, 高级工程师, 中国航发北京航空材料研究院, 航空及发动机材料应用评价中心, 北京 100095, E-mail: wyjbiam@163.com

材, 针对每一种材料分别制定不同的热处理工艺从而得到不同的晶粒尺寸, 通过单向拉伸试验和十字形试件双向拉伸试验获取了材料的试验屈服轨迹, 分析了晶粒尺度效应对屈服轨迹的影响规律, 并评估了常用宏观屈服准则对高温合金超薄带材屈服行为的适用性。

1 实验

以厚度为 0.2 和 0.25 mm 的 GH4169 带材, 以及厚度为 0.25 mm 的 GH738 带材作为研究对象。参考图 1 所示的高温合金带材在不同温度和保温时间下析出相的转化曲线^[17]及相关文献[18,19], 分别制定了 2 种厚度 GH4169 材料的 3 种热处理工艺路线和 GH738 带材的 2 种热处理工艺路线, 见表 1 所示, 随炉冷却时间均为

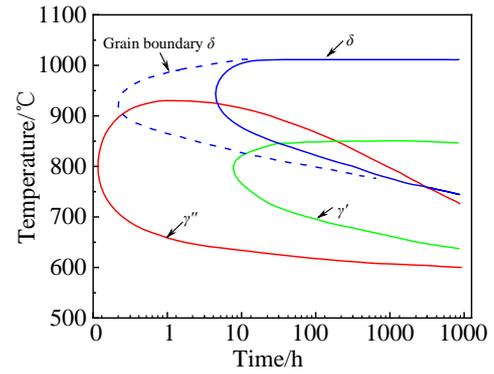


图 1 GH4169 高温合金第二相颗粒的析出温度与溶解温度
Fig.1 Precipitation temperature and dissolution temperature of the second phase particles of GH4169 superalloy^[17]

表 1 试验材料及热处理工艺

Table 1 Test materials and heat treatment process

Material	Thickness, t/mm	Annealing parameter			Average grain size, d/ μ m
		Number	Temperature/ $^{\circ}$ C	Holding time/min	
GH4169	0.2	A1	As-received	-	7.10 \pm 4.04
		A2	1000	25	29.09 \pm 7.23
		A3	1100	25	57.96 \pm 3.20
GH4169	0.25	B1	As-received	-	11.50 \pm 8.38
		B2	1000	25	51.83 \pm 7.95
		B3	1100	25	87.28 \pm 8.14
GH738	0.25	C1	1100	25	18.44 \pm 4.02
		C2	1150	20	50.42 \pm 6.00

2 h, 这时第二相颗粒析出的数量很少甚至趋近于零^[20], 因此可不考虑析出相对高温合金超薄带材力学性能的影响, 最终共获得了 8 种不同的初始晶粒状态。

分别对热处理材料和未热处理材料进行了微观组织测试, 通过截线法和概率分布直方图统计得到了不同材料的平均晶粒尺寸, 如表 1 所示。不同热处理条件下高

温合金带材的微观组织如图 2 所示。

单向拉伸试验在电子万能试验机上进行, 以获取高温合金带材的力学性能参数和应力-应变曲线, 从而为后续分析提供基础数据。试样分别沿着与轧制方向成 0 $^{\circ}$ (RD)、45 $^{\circ}$ (ND)、90 $^{\circ}$ (TD) 方向从带材上切割, 形状尺寸符合 ASTM E8-08 标准。试验中采用 DIC

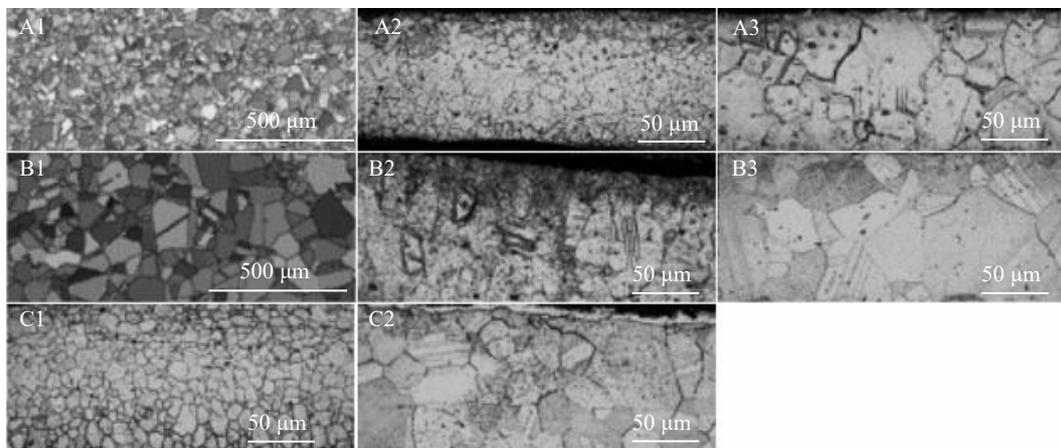


图 2 不同状态下高温合金带材的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of superalloy strip under different conditions

方法测量应变，每组试验重复进行 3 次。

十字形试样双向拉伸试样在北航自主研发的微尺度双向拉伸试验机上进行^[21]。试样尺寸按照 GB/T36024-2018 进行设计，考虑到在高温合金带材中心区域减薄厚度非常困难，本研究采用臂上开缝的方法进行十字形试样设计。综合考虑十字形试样中心区域变形程度和应力分布情况，臂部缝数最终确定为 5，试样尺寸如图 3 所示。由于所用材料厚度很薄，采用 DIC 测量方法来捕捉全场应变，避免引伸计夹持带来的影响。试验过程采用载荷比例控制方式，加载比例分别为 4:1、4:2、4:3、4:4、3:4、2:4 和 1:4。每一种材料状态和载荷比下的双向拉伸试验重复进行 3 次，以保证数据的重复性。

2 结果及分析

2.1 试验屈服轨迹晶粒尺度效应分析

对于金属材料，一般采用单位体积塑性功原理来定义其多轴应力状态下的屈服行为，其对应的塑性功等高线也被认为是材料的试验屈服轨迹。本工作基于单位体积塑性功相等原理来研究高温合金超薄带材的屈服行为。根据该方法，处于同一试验屈服轨迹上的塑性功都相等，计算原理如图 4 所示^[22]，即：

$$W_0 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int \sigma_e d\varepsilon_e \quad (1)$$

式中， W_0 为由沿轧制方向 (RD) 方向单拉应力-应变曲线所确定的塑性功， σ_1 和 σ_2 分别为沿着轴 1 (RD 方向) 和轴 2 (TD 方向，垂直于轧制方向) 的主应力； $d\varepsilon_1$ 和 $d\varepsilon_2$ 分别为对应的塑性应变增量， σ_e 和 $d\varepsilon_e$ 分别为等效应力和等效塑性应变增量。

基于单位体积塑性功原理，可以得到应力平面内的 9 个屈服试验点。其中轴 1 和轴 2 上的屈服点分别由与轧制方向成 0° 和 90° 夹角的单拉试样真应力-真应变曲

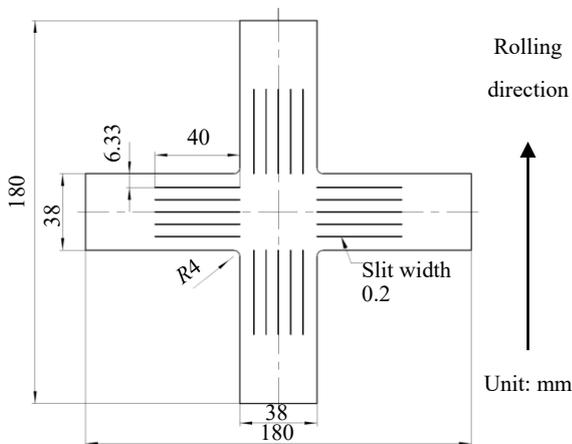


图 3 十字形试样尺寸

Fig.3 Cruciform specimen size

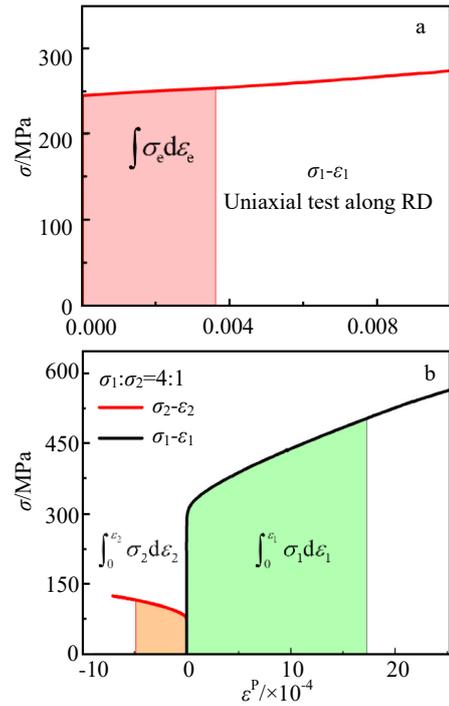


图 4 单位体积塑性功积分原理图

Fig.4 Principle diagram of plastic work integral per unit volume^[22].

(a) uniaxial and (b) biaxial

线上 0.2% 塑性应变对应的屈服应力获得，其余 7 个比例的屈服点由 RD 和 TD 不同加载比例的双向拉伸真应力-真应变曲线获得。

图 5 为 3 种材料在不同热处理状态下的屈服轨迹。屈服轨迹上的 9 个点按逆时针方向分别代表载荷比为 4:0、4:1、4:2、4:3、4:4、3:4、2:4、1:4 和 0:4 所对应的点。可以看出，对同一种材料而言，随着晶粒尺寸增大，屈服轨迹的大小和形状都发生了变化，呈现出明显的晶粒尺度依赖性。具体来说，随着晶粒尺寸增大，屈服轨迹总体呈现出向内收缩的趋势，这可以用经典的表面层模型^[23]进行解释。在微小尺度下，材料的流动应力可视为由表面层晶粒的流动应力和内部晶粒的流动应力 2 部分组成，而表面层晶粒由于自由表面的存在位错更容易逃逸而出，位错密度较低从而使得表面层晶粒的流动应力低于中心层。随着晶粒尺寸增大，表面层晶粒的占比也会增大，从而使得材料整体的流动应力下降。特别地，0.25 mm 厚的 GH4169 材料在 1100 °C 热处理后呈现非常明显的收缩幅度，这是因为厚度方向晶粒数由 22 减少为 2.86，表面层晶粒的占比显著增大，尺度效应体现得越发明显，这与 Cheng^[15]和 Keller^[24]等的研究结果是吻合的。

另一方面，可以看出对于每一种高温合金材料，随着晶粒尺寸的增大，不同应力状态下的屈服点向内收缩

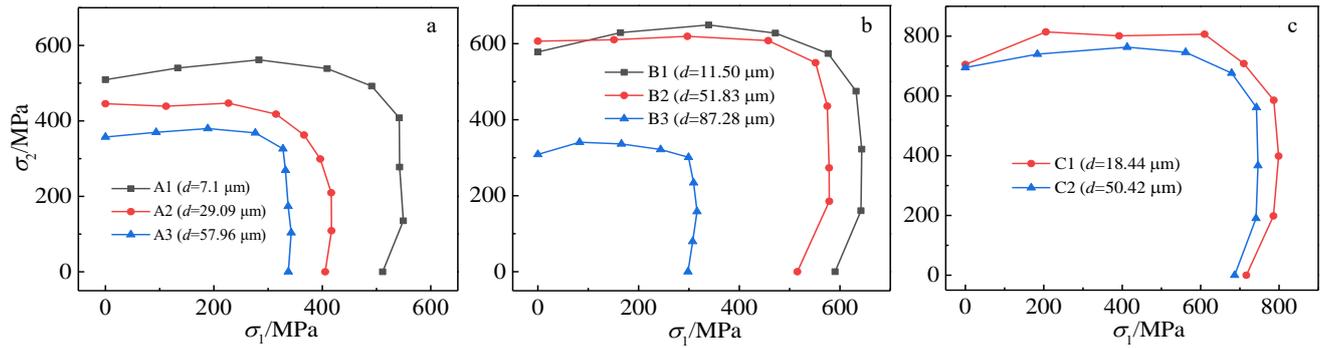


图 5 不同条件下超薄高温合金带材的屈服轨迹

Fig.5 Yield loci of ultrathin superalloy strip under different conditions: (a) GH4169-0.2 mm, (b) GH4169-0.25 mm, and (c) GH738-0.25 mm

的幅度并不一致，导致屈服轨迹的形状发生改变。对于 0.2 和 0.25 mm 厚的 GH4169 带材，当晶粒尺寸增大到一定程度，屈服轨迹有从 Mises 椭圆形向 Tresca 方形演化的趋势，这一点在 0.2 mm 厚的 GH4169 材料上体现得尤为突出，这表明屈服轨迹的形状也存在晶粒尺度依赖性。随着厚度方向晶粒数减少，织构的强度显著增大，可认为不同尺度效应下的织构演变是屈服轨迹形状发生变化的主要原因^[15]。

此外，同种材料在不同载荷比下屈服点的变化幅度均存在明显差异，在屈服轨迹上半区和下半区呈现出不对称演化的特点。从图中可以看出，随着晶粒尺寸增大，屈服轨迹下半区的收缩幅度要高于上半区，对 0.25 mm 厚的 GH4169 材料载荷比为 0:4 时还出现了未收缩的现象，表明尺度效应对材料的面内各向异性产生了影响。这主要是因为晶粒存在不同的择优取向，使得材料内部的织构密度发生了变化，并且随着厚度方向晶粒数量的减少，单个晶粒的取向和特性会显著影响材料的各向异性行为。

2.2 常用宏观屈服准则及参数求解

不同高温合金带材的实验屈服轨迹表明，高温合金带材屈服轨迹的形状和大小都表现出了晶粒尺度效应。为了评估现有宏观屈服准则对高温合金超薄带材的适用性，采用 4 种常用的屈服准则：Mises，Hill48，Barlat89 和 Yld2000-2d，通过对比理论屈服轨迹与实验屈服点来分析唯象学屈服准则的有效性。

2.2.1 Mises 屈服准则

1913 年，Mises 提出了二次各向同性屈服准则。在平面应力状态下，屈服准则可以表示为：

$$\sigma_e^2 = \sigma_{xx}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}^2 + 3\sigma_{xy}^2 \quad (2)$$

式中， σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{xy} 分别是全局坐标系下的应力张量分量； σ_e 是等效应力。由于 Mises 是各向同性屈服准则，其初始屈服轨迹的大小和形状很容易通过沿 RD 方向的屈服应力确定。

2.2.2 Hill48 屈服准则

Hill48 屈服准则假设材料的各向异性主轴平行于应力张量主轴。在平面应力状态下，Hill48 屈服准则可以表示为：

$$\sigma_e^2 = (G+H)\sigma_{xx}^2 + (F+H)\sigma_{yy}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (3)$$

式中， F 、 G 、 H 和 N 是材料的各向异性系数，可以通过厚向异性系数（ r 值）确定，即：

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_{90})}; G = \frac{1}{(1+r_0)}$$

$$H = \frac{r_0}{(1+r_0)}; N = \frac{(r_0+r_{90})(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (4)$$

式中， r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 分别为 0° 、 45° 和 90° 方向上的厚向异性指数。当 $F=G=H=0.5$ 且 $N=1.5$ 时，Hill48 屈服准则简化为 Mises 屈服准则。表 2 给出了不同材料状态下 Hill48 屈服准则各向异性系数。

2.2.3 Barlat89 屈服准则

1989 年，Barlat 和 Lian 为了描述金属板材面内各向异性行为，提出了 Barlat89 屈服准则，即：

$$a|k_1+k_2|^m + a|k_1-k_2|^m + (2-a)|2k_2|^m = 2\sigma_e^m \quad (5)$$

其中，

$$k_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, k_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2} \right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中，对于高温合金材料，Barlat89 屈服准则中的非二次项指数 m 确定为 8。各向异性系数 a 、 h 和 p 可以通过沿 RD、TD 和 ND 方向的厚向异性系数（ r 值）进行确定。表 2 列出了不同厚度和晶粒尺寸下 Barlat89 屈服准则各向异性系数。

2.2.4 Yld2000-2d 屈服准则

基于各向同性塑性等效（IPE）思想的启发，Barlat 等在 Hershey-Hosford 准则中通过对应力张量进行线性变换引入各向异性，进而提出 Yld2000-2d 屈服准则。该屈服准则可以描述平面应力状态下金属板材的屈服行为，表达式为：

表 2 Hill48 和 Barlat89 屈服准则各向异性系数

Table 2 Anisotropy coefficients of Hill48 and Barlat89 yield criteria

Number	Hill48				Barlat89		
	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>h</i>	<i>p</i>
A1	0.3697	0.5836	0.4164	1.5592	1.0929	0.9181	1.0057
A2	0.2979	0.6228	0.3772	1.5297	1.1290	0.8662	0.9938
A3	0.2418	0.6793	0.3207	1.6862	1.2024	0.8041	1.0233
B1	0.3636	0.5843	0.4157	1.6505	1.0915	0.9152	1.0225
B2	0.3760	0.5879	0.4121	1.6292	1.1029	0.9187	1.0208
B3	0.2230	0.6761	0.3239	1.6740	1.1857	0.7955	1.0161
C1	0.4395	0.5501	0.4499	1.4773	1.0629	0.9603	0.9941
C2	0.3948	0.5663	0.4337	1.4437	1.0733	0.9361	0.9834

$$\phi = \phi' + \phi'' = 2\sigma_e^m \tag{7}$$

式中， ϕ 为屈服函数， ϕ' 和 ϕ'' 为 2 个各向同性张量函数，其表达式为：

$$\phi' = Y_1' - Y_2'^m, \phi'' = 2Y_2'' + Y_1''^m + |2Y_1'' + Y_2''|^m \tag{8}$$

式中， Y_i' 和 Y_j'' 分别为矩阵 X' 和 X'' 的主值， $(i, j) = (1, 2)$ ，有：

$$\begin{cases} Y_i' = \frac{1}{2}(X_{11}' + X_{22}' \pm \sqrt{(X_{11}' - X_{22}')^2 + 4X_{12}'^2}) \\ Y_j'' = \frac{1}{2}(X_{11}'' + X_{22}'' \pm \sqrt{(X_{11}'' - X_{22}'')^2 + 4X_{12}''^2}) \end{cases} \tag{9}$$

x' 和 x'' 的元素可以通过应力张量的线性变化获得，即：

$$\begin{cases} X' = L'\sigma \\ X'' = L''\sigma \end{cases} \tag{10}$$

其中，

$$\begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\sigma = [\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}]^T \tag{13}$$

式中， m 是屈服准则的非二次项指数，与材料的晶体结构相关。Barlat 建议，对于体心立方结构的金属（bcc）， m 取值为 6；对于面心立方结构的金属（fcc）， m 取值为 8。 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 是 Yld2000-2d 屈服准则的 8 个独立各向异性系数，可以由 8 个材料特征参数进行确定： σ_0 、 σ_{45} 、 σ_{90} 、 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 、 σ_b （等双拉屈服应力）和 r_b （等双拉应力状态下塑性应变增量比 $d\epsilon_2^p/d\epsilon_1^p$ ）。由于各向异性系数 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 与材料特征参数之间并不存在简单的代数关系，本研究使用 Newton-Raphson 数值迭代算法进行求解，计算得到的不同材料状态下 Yld2000-2d 屈服准则各向异性系数如表 3 所示。

2.3 不同屈服准则适用性研究

根据上述 4 种屈服准则以及确定的各向异性系数，以 RD 方向单向拉伸试验屈服点为理论屈服轨迹的基准点，可以得到不同状态下高温合金材料的 Mises、Hill48、Barlat89 和 Yld2000-2d 理论屈服轨迹，如图 6~图 8 所示。可以看出，对于 2 种厚度的 GH4169 材料，Hill48 和 Barlat89 屈服准则对高温合金带材屈服轨迹上半区的预测明显偏大，Mises 屈服准则在下半区预测偏大，Yld2000-2d 屈服准则总体能较为准确地预测不同状态下的高温合金带材屈服行为。然而，对于 GH738 材料，不同屈服准则的预测精度则较为接近。

为了定量评估屈服准则对高温合金带材屈服轨迹的表征精度，本研究引入误差函数，即：

表 3 Yld2000-2d 屈服准则各向异性系数

Table 3 Anisotropy coefficients of Yld2000-2d yield criteria

Number	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
A1	0.9342	1.0603	1.0683	1.0188	1.0324	1.0683	1.0522	1.0578
A2	1.0776	0.8337	1.2715	0.9873	1.0705	1.2715	1.0709	0.9950
A3	0.9469	0.9559	1.0734	0.9718	1.0461	1.0734	0.9858	0.8649
B1	0.9177	1.0793	1.0345	1.0163	1.0264	1.0345	1.0493	1.0427
B2	1.1585	0.6601	0.9289	0.8753	0.9877	0.9289	0.9692	1.0012
B3	0.9056	0.9972	0.9866	0.9579	1.0296	0.9866	1.0056	0.9690
C1	0.9463	1.0524	1.0049	1.0129	1.0134	1.0049	1.0190	1.0533
C2	0.9748	0.9972	1.0258	0.9954	1.0183	1.0258	1.0059	1.0179

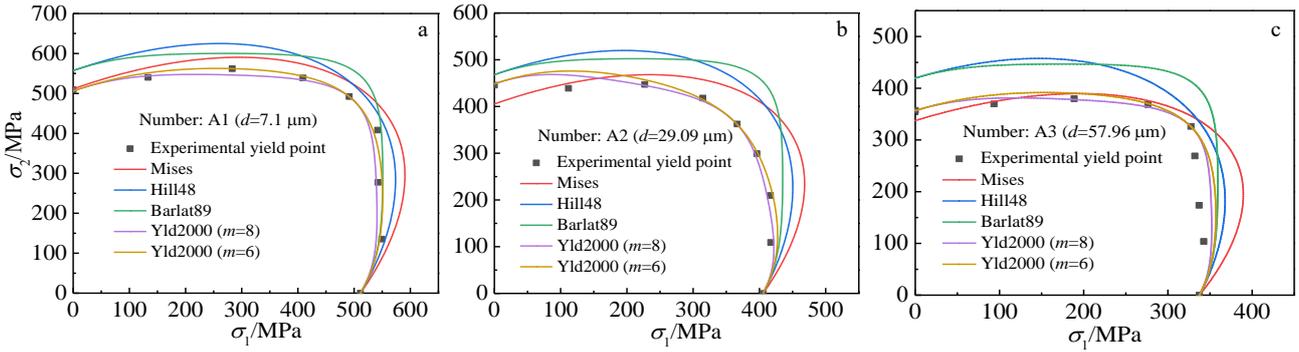


图 6 不同晶粒尺寸下 GH4169 ($t=0.2\text{ mm}$) 的实验和理论屈服轨迹

Fig.6 Experimental and theoretical yield loci of GH4169 ($t=0.2\text{ mm}$) with different grain sizes: (a) $d=7.1\text{ }\mu\text{m}$, (b) $d=29.09\text{ }\mu\text{m}$, and (c) $d=57.96\text{ }\mu\text{m}$

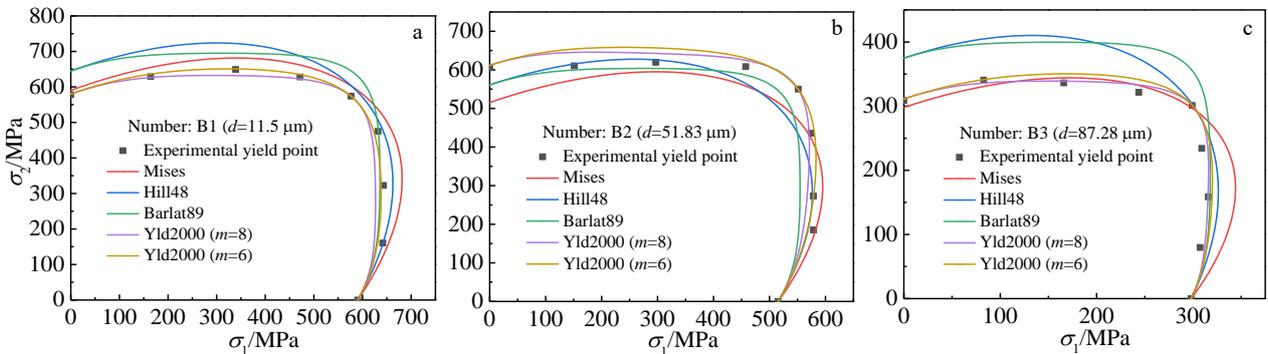


图 7 不同晶粒尺寸下 GH4169 ($t=0.25\text{ mm}$) 的实验和理论屈服轨迹

Fig.7 Experimental and theoretical yield loci of GH4169 ($t=0.25\text{ mm}$) with different grain sizes: (a) $d=11.5\text{ }\mu\text{m}$, (b) $d=51.83\text{ }\mu\text{m}$, and (c) $d=87.28\text{ }\mu\text{m}$

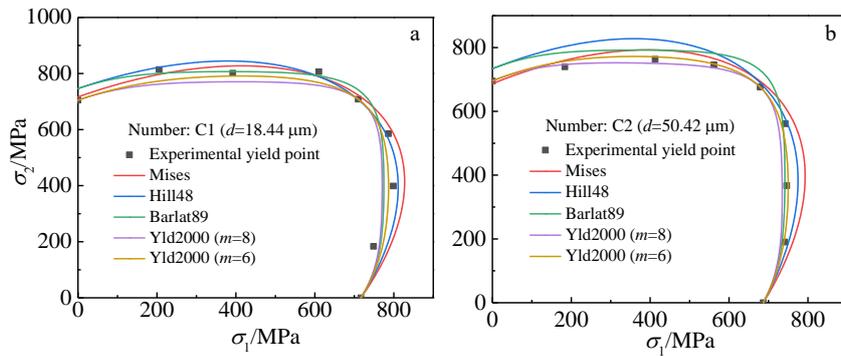


图 8 不同晶粒尺寸下 GH738 ($t=0.25\text{ mm}$) 的实验和理论屈服轨迹

Fig.8 Experimental and theoretical yield loci of GH738 ($t=0.25\text{ mm}$) with different grain sizes: (a) $d=18.44\text{ }\mu\text{m}$ and (b) $d=50.42\text{ }\mu\text{m}$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{(\sigma_1^i)^2 + (\sigma_2^i)^2}} \quad (14)$$

式中, σ_1^i 和 σ_2^i 分别为沿 RD 和 TD 方向的试验屈服点对应的主应力, L_i 为实验屈服点与相应载荷比下理论预测屈服点之间的距离, n 为每条实验屈服轨迹上屈服点数量。

根据引入的误差函数, 统计了实验屈服点与不同屈服准则所预测的理论屈服轨迹之间的误差, 如图 9 所

示。从图中能够看出, 不同屈服准则对于高温合金带材屈服行为的预测能力有明显的差异。具体来说, 对于未热处理的 2 种厚度的 GH4169 材料, Hill48 和 Barlat89 屈服准则的预测误差都在 4% 以上。然而, 随着晶粒尺寸增大到最大, Hill48 和 Barlat89 屈服准则误差增加到 10%, 说明这 2 种屈服准则无法准确描述粗晶条件下的 GH4169 带材屈服行为。另一方面, 在不同带材厚度及

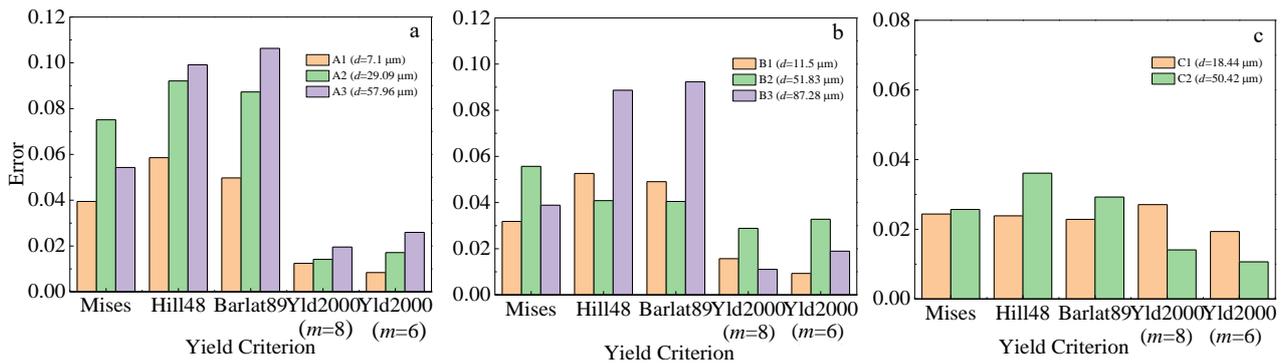


图 9 不同理论屈服准则预测误差对比

Fig.9 Comparison of prediction errors of different theoretical yield criteria: (a) GH4169-0.2 mm, (b) GH4169-0.25 mm, and (c) GH738-0.25 mm

晶粒尺寸下，Mises 屈服准则的预测误差均较高，表明高温合金带材的各向异性较强。此外，不同条件下 Yld2000-2d 屈服准则的误差都在 4% 以下，具有最高的预测精度。对于 0.25 mm 厚的 GH738 材料，不同屈服准则的预测误差都比较接近，且都在 4% 以下。

3 结论

1) 高温合金超薄带材屈服轨迹的大小和形状呈现明显的晶粒尺度依赖性，厚度不变时随着晶粒尺寸增大，高温合金带材屈服轨迹总体向内收缩，形状由椭圆形向方形转变，且屈服轨迹的上半区与下半区呈现出不对称演化现象；当厚度方向晶粒数减少到 2.86 个时，屈服轨迹的收缩幅度显著增大，尺度效应更加强烈。

2) 随着 GH4169 带材晶粒尺寸的增大，4 种屈服准则预测精度会逐渐下降。当 GH4169 合金晶粒尺寸增大到最大时，Hill48 和 Barlat89 准则的预测误差达到 10%，而不同屈服准则均能准确预测 GH738 带材的屈服特性。

3) Yld2000-2d 屈服准则对不同厚度和晶粒尺寸的高温合金带材都有较高的预测精度，预测误差在 4% 以内，能够准确描述高温合金带材的屈服行为。

参考文献 References

[1] Wan Min(万敏), Cheng Cheng(程诚), Meng Bao(孟宝) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2019, 11(3): 1

[2] Stachowicz F. *Acta Mechanica*[J], 2016, 227(1): 253

[3] Kim G Y, Ni J, Koc M. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2007, 129(3): 470

[4] Engel U, Eckstein R. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 125-126: 35

[5] Deng Y J, Peng L F, Lai X M et al. *International Journal of*

Plasticity[J], 2017, 89: 197

[6] Ma Z W, Tong G Q, Chen F. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(3): 616

[7] Zhang H M, Dong X H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 658: 450

[8] Ouyang J D, Chen M H, Wang N et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(4): 1114

[9] Anand D, Kumar D R. *Procedia Materials Science*[J], 2014, 6: 154

[10] Chen Wei(陈炜), Zhang Yang(张杨), Ding Yi(丁毅) et al. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2014, 21(6): 71

[11] Chan W L, Fu M W. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(25-26): 7674

[12] Zhang H M, Diehl M, Roters F et al. *International Journal of Plasticity*[J], 2016, 80: 111

[13] Dubos P A, Fleurier G, Hug E. *Materials Science Forum*[J], 2016, 879: 459

[14] Adzima F, Balan T, Manach P Y et al. *International Journal of Plasticity*[J], 2017, 94: 171

[15] Cheng C, Wan M, Meng B et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2019, 151: 760

[16] Dai Peng(代鹏), Gao Hanfei(高晗菲), Fan Xiaoguang(樊晓光). *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2020, 12(2): 1

[17] Brooks J W, Bridges P J. *Superalloys, 1988*[J], 1988, 88: 33

[18] Du Jinhui, Lv Xudong, Deng Qun. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(8): 1830

[19] Bian Fang(边舫), Su Guoyue(苏国跃), Kong Fanya(孔凡亚) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(8): 1338

[20] Zhu Qiang(朱强). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020

- [21] Xiong Jingzhou(熊晶洲), Wan Min(万敏), Meng Bao(孟宝) *et al. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*(北京航空航天大学学报)[J], 2019, 45(1): 174
- [22] Shi J J, Meng B, Cheng C *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 180: 105 686
- [23] Geiger M, Kleiner M, Eckstein R *et al. CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2001, 50(2): 445
- [24] Keller C, Hug E, Habraken A M *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2015, 64: 26

Research on Grain Size Effect on Yield Locus of Ultrathin Superalloy Strip

Wang Yanju¹, Yang Yu², Wan Min², Jia Chonglin³, Sha Aixue¹, Meng Bao²

(1. Materials Evaluation Center for Aeronautical and Aeroengine Application, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: To explore the size effect on the yielding behavior of ultrathin superalloy strip with different thicknesses and grain sizes, the experimental yield loci were obtained via uniaxial tensile and biaxial tensile tests under different loading ratios. The results indicate that the yield locus of ultrathin superalloy strip shrinks inward entirely with the increase of grain size, and the shape of yield locus also changes from ellipse to square, indicating the grain size dependence of yield locus of superalloy strip. In addition, the four typical macroscopic yield criteria (Mises, Hill48, Barlat89, Yld2000-2d) were selected for comparative analysis of the ability to predict yield loci for superalloy strips with different thicknesses and grain sizes. The results show that the Yld2000-2d yield criterion keeps the best prediction accuracy and can more accurately describe the yield behavior of ultrathin superalloy strip with different thicknesses and grain sizes.

Key words: superalloy ultrathin strip; biaxial tensile test; yield locus; grain size effect

Corresponding author: Meng Bao, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82338613, E-mail: mengbao@buaa.edu.cn