

超塑变形屈服准则的拉扭复合实验研究¹⁾

王仲仁 许言午 郭殿俭

(哈尔滨工业大学)

提要 本文首次用超塑材料Sn-38Pb的变截面及等截面薄壁管试件做了高精度拉扭复合实验.由实验结果建立了超塑变形屈服准则.从连续介质力学的角度分析,准则的物理意义是变形时比功率为常值;其几何形状为六曲面柱体,它介于Mises圆柱面和Tresca六棱柱面之间,更接近于后者.实验表明,随比功率或应变速率的增加,超塑屈服曲面均匀地向外扩张.

关键词 超塑性 屈服准则 拉扭复合实验 比功率 应变速率强化

一、引 言

随着超塑性的广泛应用,迫切需要发展相应的力学理论,以便为金属超塑成形的力学解析奠定可靠的基础.

众所周知,屈服准则是关于材料在不同应力状态下进入并保持塑性状态的学说.对于金属塑性加工领域,则是金属是否产生塑性变形的判据,历来为各国学者所重视.

目前对超塑变形屈服准则研究工作做的较少,本文部分作者曾做过轴向受拉(压)及内压的薄壁管($P-P$)实验来研究超塑变形屈服准则^[1];在文献[2]中也对超塑变形屈服准则进行了研究,它们都是在应力主轴不变的情况下进行的.本文运用MTS809拉扭复合材料试验机(MTS Model 809 Axial-Torsional Material Test System)对超塑材料在拉(压)扭复合应力状态下($P-M$ 实验)的屈服特征进行了详细的研究,其目的是研究主轴方向变化情况下的超塑变形屈服准则.

二、实 验 内 容

实验采用MTS809拉扭复合材料试验机,该机采用电液伺服系统,微机控制,可任意加载,并对实验数据自动采集,它是高精度材料试验机,对应力、应变参量的测量精度高于2%.

实验所用材料为超塑力学性能稳定,各向同性^[3],无应变硬化^[4]的Sn-38Pb共晶合金,它是典型的常温超塑性实验材料,通常,采用这种材料作为应变速率敏感性材料的一个代表,所得实验结果从规律上看仍不失普遍意义.试件形状为变截面和等截面薄壁管试件,如图1所示.考虑到该机使用的长头规格及测试仪器对试件规格的要求,设计了一套组合夹具,这样,既便于加工试件和测试,且节约了贵重金属材料.

1) 国家自然科学基金资助项目

本文于1988年5月5日收到,1988年10月收到修改稿.

本实验对应变速率进行了较为严格的控制. 应变是采用引伸仪和位移传感器测量. 对于变截面试件, 进行拉伸、扭转、拉扭复合实验; 对于等截面试件, 进行拉伸、压缩、拉扭复合、压扭复合和扭转实验, 如图3所示. 其力能参数用载荷传感器进行测量.

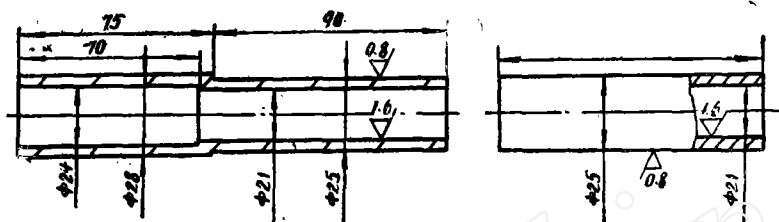


图1 薄壁管试件

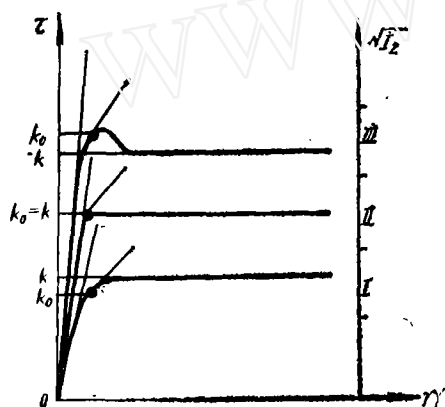
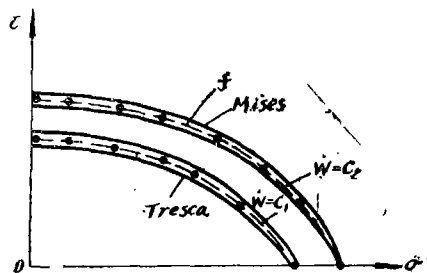


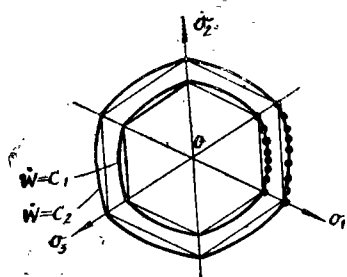
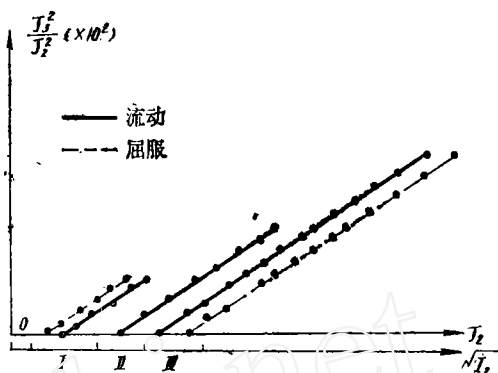
图2 屈服剪应力和流动剪应力

图3 在 σ - τ 坐标系中屈服点的分布图

三、屈服准则的研究

由于超塑变形具有粘弹塑性性质^[5], 随着应变速率的变化其应力应变曲线的形状也发生变化, 如图2所示. 又由于超塑变形具有无记忆性质, 因此, 在进入稳态变形时, 其流动应力不变. 但在小剪应变区, 由图2可以看出存在三种不同类型. 为了表示剪应变对屈服的影响, 在小应变处, 取 $\tau \sim \gamma$ 曲线某点切线的斜率与其弹性段斜率之比为5.5处的应力为屈服剪应力, 用 k_0 表示, 相应构成的曲面称为屈服曲面; 在大剪应变处, $\tau \sim \gamma$ 曲线呈水平状, 对应的 τ 值称为流动剪应力, 用 k 表示, 相应构成的曲面称之为流动曲面. 二者统称超塑屈服曲面.

由于在II区 ($\sqrt{\dot{I}_2} = 5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{S}^{-1}$, $\dot{I}_2$ 是应变速率偏张量第二不变量) 是典型的超塑变形区, 故以该区为基础研究超塑变形屈服准则. 将实测的 τ 、 σ 值综合整理, 得到如图3所示超塑变形屈服轨迹, 反映到 π 平面上如图4所示. 可以看出, 实验点介于Mises屈服轨迹和Tresca屈服轨迹之间, 更接近于Tresca屈服轨迹.

图4 在 π 平面上屈服点的分布图图5 在 $J_2 \sim \frac{J_3}{2}$ 坐标系中屈服点的分布

其实验点构成了六曲边形, 在 $J_2 \sim \frac{J_3}{2}$ 坐标系中的分布规律如图5所示, 无论在I区 ($\sqrt{\dot{I}_2} = 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-3} S^{-1}$)、II区、还是III区 ($\sqrt{\dot{I}_2} = 10^{-2} \sim 10^{-1} S^{-1}$), J_2 和 $\frac{J_3}{2}$ 之间的关系均呈直线, 且斜率一致, 故可用下述直线方程近似描述

$$f = J_2 \left(1 - A \frac{J_3}{J_2} \right) - k^2 = 0 \quad (1)$$

式中 A 为常数, 代表图7中的斜率, 与应力状态和应变速率均无关; J_2 、 J_3 为应力偏量第二、三不变量。其中 $k = k_r \dot{\gamma}^m$, k_r 为材料常数, m 是应变速率敏感性指数, 它与应力状态无关。流动曲面符合外凸性法则^[6]。

对于常规材料, 习惯用塑性势描述屈服函数, 对于应变速率敏感性材料, 此时宜取塑性比功率代替塑性势。相应地, 超塑变形屈服曲面(函数)应理解为比功率为常值。超塑成形时比功率可用下式表示

$$\dot{W} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2)$$

当不同应力状态下比功率满足式(2)、且为恒值时, 其对应点在同一超塑屈服曲面上。为了求得 A 值, 将式(1)改写成如下形式

$$A = \left(1 - \frac{k^2}{J_2} \right) / \left(\frac{J_3}{J_2} \right) \quad (1')$$

由于纯剪时 K 值已测出, 只需测出同一 $\dot{W}$ 值下非纯剪应力状态的应力值, 换算成 J_2 、 J_3 , 再代入式(1')中, 就可以求得 A 值。

由于试验机本身精度很高, 且系恒应变速率实验, 故当进入稳态超塑变形时, 采集的数据波动很小, 故选出一组典型数据, 如表1所示。把它代入式(1'), 并进行计算, 得到 $A = 1.477$ 。为了研究 A 值的特性, 假设 A 值不变, 任选几组实验数据代入式(1), 计算 K^2 值。其计算结果表明, 在同一比功率、不同应力状态下计算的 K^2 值基本相等, 与实测值相比, 误差很小($<1\%$)。也就是说, 实验证实式(1)所代表的屈服函数是满足恒比功率条件的。然而, 流动剪应力随应变速率的变化而变化, 几何图形显示为流动曲面随比功率或应

变速率的增加而均匀地向外扩张,实验结果和理论表达式吻合得很好.因此,超塑变形时,随应变速率的增加,产生了应变速率各向同性强化现象.

表1 实验数据

参 量 \ 试 件 号	PT05	TR01
$\dot{W} \times 10^3$	8.77785	8.77870
$J_2^0 \times 10^6$	2.2253	1.3927
$J_2^1 \times 10^6$	0.217996	0

实验结果表明,屈服曲面和流动曲面几何上相似,但不一定重合.在Ⅰ区,屈服曲面在流动曲面的内侧;在Ⅱ区,二者重合;在Ⅲ区,前者在后者的外侧,如图6所示.随比功率或应变速率的增加,对应流动应力出现了应变速率硬化(Ⅰ区)、应变速率无影响(Ⅱ区)和应变速率软化(Ⅲ区)效应,宏观上出现屈服曲面由滞后→赶上→超越流动曲面的现象,其二者间的变化规律如图7所示.实验结果表明,当 $\sqrt{\dot{J}_2} = 2.2 \times 10^{-4} S^{-1}$ 时, $|(l-l_0)/l_0| = |\Delta l/l_0| = 7\%$ (l, l_0 分别为对应流动曲面和屈服曲面的几何参量值);当 $\sqrt{\dot{J}_2} = 2.2 \times 10^{-3} S^{-1}$ 时, $|\Delta l/l_0| = 0$;当 $\sqrt{\dot{J}_2} = 2.2 \times 10^{-2} S^{-1}$ 时, $|\Delta l/l_0| = 10\%$.由此可知,在Ⅱ区屈服曲面和流动曲面重合,不必加以区分,实际上,超塑变形主要在Ⅱ区进行,这给使用该准则带来很大方便.

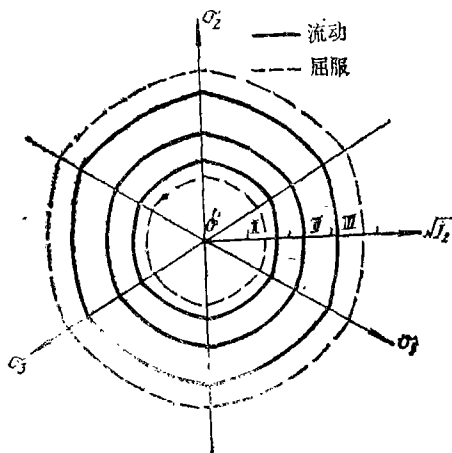


图6 屈服曲面和流动曲面关系图

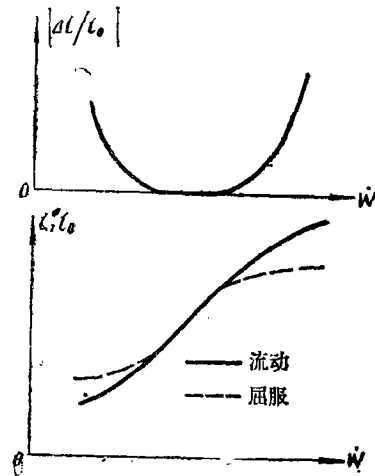


图7 屈服曲面和流动曲面间的变化规律

四、结 论

1. 本文首次对超塑材料薄壁管试件进行高精度拉(压)扭复合(P-M)实验,它较轴向拉(压)力及内压复合(P-p)实验的优点是可以得到应力主轴变化条件的结果.
2. 实验结果表明,超塑变形屈服准则(曲面)介于Mises曲面和Tresca曲面之间,更

接近于Tresca曲面。

3. 对于无应变硬化超塑变形, 其屈服准则为

$$f = J_2 \left(1 - A \frac{J_2^{\frac{2}{3}}}{J_2^{\frac{2}{3}}} \right) - K^2 = 0$$

它的几何意义是六曲面柱体; 物理意义是超塑变形时比功率为常值。随应变速率的增加, 屈服曲面由Ⅰ区滞后→Ⅱ区赶上→Ⅲ区超越流动曲面, 对于每个变形区, 流动曲面都是稳定的, 该准则能较好地描述超塑变形屈服特征。

4. 对于超塑变形, 运用比功率描述屈服特征比较恰当, 本文根据这一观点计算了A值, 它与实验结果吻合的较好。

本实验得到哈工大锻压研究室副主任尚秀田以及北京钢铁学院力学测试中心唐俊武、党紫久、王建国的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕王仲仁、朱宝泉, 哈尔滨工业大学学报, 2, (1981) 68
- 〔2〕王振源, 东北工学院学报, 2 (1983), 29
- 〔3〕许言午, 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, (1986)。
- 〔4〕J.W.Edington et al, *Prog.Mater.Sci*, 21 (1976), 61.
- 〔5〕王仲仁、许言午等, 日中超塑性シンポジウム'86论文集, (1986), 49
- 〔6〕D.C.Drucker, *Prog.1st U.S Nat.Congr.Appl.Mech*, (1952) 481,
- 〔7〕W.A.Backofen et al, *Trans.ASM*, 57 (1964), 980.
- 〔8〕德冈辰雄著, 理性连续介质力学入门, 赵镇等译, 科学出版社 (1982)。

An Experimental Study of Superplastic Yield Criteria under Tension-torsional Combined Loading

Wang Z.R, Xu Yanwu, Guo Dianjian

Harbin Institute of Technology

Abstract The high precision tension-torsional combined tests for superplastic material have been made first. The changed section and unique section thin walled tubes of typical room superplastic material sn-38Pb alloy are used. Depending on the experimental results, the superplastic yield criteria has been set out. That is (1) Analysed with continuum mechanics, its physical meaning is that the unit work-rate equals the constant value during superplastic forming. Its geometric meaning is curved-side hexagon cylinder. It is located between the loci of Mises and Tresca, and is nearer to Tresca locus. The experimental results also show that the yield loci expand out homogeneously with unit work-rate.

Key words Superplasticity, Yield criteria, Tensional-torsional combined experiment, unit work-rate, strain. rate hardening.