

塑性预应变对屈服条件影响的实验研究

刘信声 丁 科 宋国华 徐秉业

(清华大学)

提要 本文介绍了确定具有塑性予应变板材后继屈服条件的实验方法。铝合金板 LY12—M12 的实验研究表明：随着塑性予应变的增加，将依次出现各向同性强化、运动强化以及组合强化。

关键词 屈服，强化。

引言

在塑性力学中，初始屈服条件、强化规律和流动法则构成经典塑性本构关系的三个重要部分。关于强化规律的研究是目前研究工作中的一个重要内容^[1-4]。强化规律，即后继屈服面相对于初始屈服面的变化规律，通常认为有三种型式：各向同性强化（初始屈服面发生均匀膨胀）、运动强化（初始屈服面发生刚性移动）以及组合强化（初始屈服面既膨胀又移动）。对于组合强化，在应用中按各向同性强化和运动强化分别占一定比例而形成其即时的状态；但是，并没有考虑到达这个状态的具体过程。这些具体的过程对于结构的某些行为（例如安定性的形成等）是有影响的。本文通过铝合金板 LY12—M12 在不同的塑性予应变下对屈服条件影响的研究，讨论了强化的具体过程，并得到了一些有益的结论。

2 实验方法

在平面应力状态下， $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ ，Mises 屈服条件为^[4]

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma^2 \quad (1)$$

在以 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 为坐标轴的应力空间中，上式所表示的条件为一椭球（图1）。该椭球的一个轴与 τ_{xy} 轴重合，其余两个轴在 σ_x 、 σ_y 平面上，并且平分 σ_x 和 σ_y 之间的直角。对于实验中各种不同加载方式下的屈服条件，可由椭球表面上的不同曲线来表示。例如曲线 AB 表示以扭矩和在 X 方向上拉伸联合作用下的屈服条件。而曲线 BEC 则代表相对于 X 轴不同角度上单向拉伸时的屈服条件，是由平面 $\sigma_x + \sigma_y = \sigma$ ，正交于 $\sigma_x O \sigma_y$ ，而得到的。将 $\sigma_x + \sigma_y = \sigma$ ，代入式 (1) 可以得到在该曲线上应力分量所满足的条件为

本课题得到国家自然科学基金资助

1987年10月31日收到。

$$\sigma_x \sigma_y = \tau_{xy}^2 \quad (2)$$

上式所示应力状态中，其一个主应力为零。如果在相对于 X 轴的夹角为 φ 方向上加

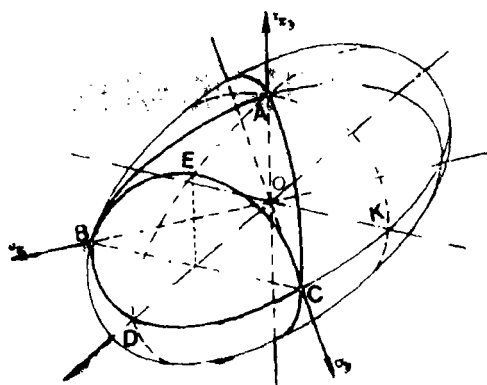


图 1

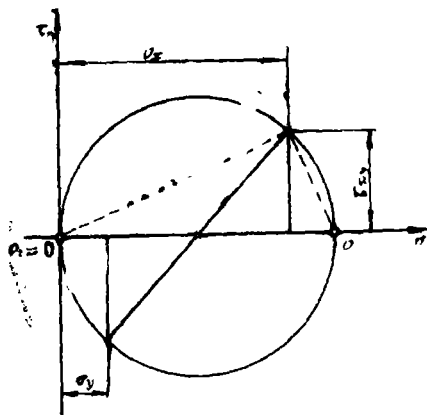


图 2

载，则由 Mohr 圆（图 2）上可得

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\varphi$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\varphi$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\varphi$$

取不同的 φ 值，则可以得到一系列的 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 的值。当材料服从于 Mises 屈服条件时，应力分量的各值均在曲线 BEC 上。研究曲线 BEC 在 AOK 面和 $\sigma_x O \sigma_y$ 面上投影的变化，就可以知道屈服面的变化规律。

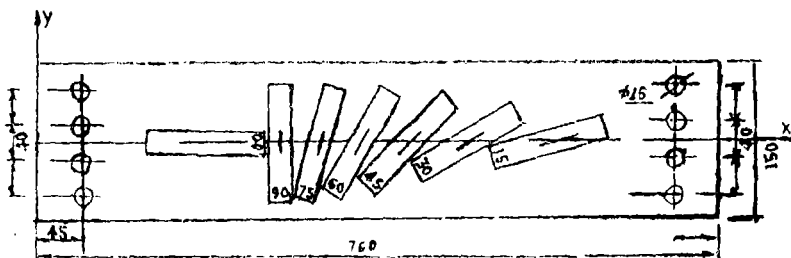


图 3

为了研究塑性予应变对屈服条件的影响，将铝合金板 LY12—M12 先作成如图 3 所示的大试件（单位：mm）沿其长度方向拉伸而具有塑性予应变。各试件所获得塑性予应变 ϵ_0 的值列入表 1 中。在九个大试件上，分别沿着与 X 轴成不同方向上取下七个小片（片上的数字表示与 X 轴夹角的度数），并加工成小试件，然后在试验机上拉伸至破坏，测得应力应变曲线。由应力应变曲线求得比例极限 σ_p ，以及残余应变分别为 0.2%、0.5% 和 0.6% 时的条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.5}$ 和 $\sigma_{0.6}$ 。将求得各个条件屈服极限值作为式 (3) 中的 σ_1 ，且由此

求得相应的 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 。最后，将求得 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 的值，绘制成 AOK 面和 σ_x - σ_y 面上的曲线。

表 1

试件编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ϵ_0 (%)	0	0	0.0125	0.05	0.117	0.167	0.33	0.5	1

3 实验结果

当取条件屈服极限为 $\sigma_{0.2}$ 时，由编号为 1、3、7、8 各组试件的 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 所绘制的曲线如图 4 所示，各应力值均位于直线与曲线的交点处。由图中可以看出，随着塑性子应变的增加，后继屈服面与初始屈服面相比较，已经发生了变化。为了更直观地观察曲线的变化，将绘制在透明纸上的曲线以 τ_{xy} 为对称轴进行对折，例如条件屈服极限为 $\sigma_{0.5}$ 的

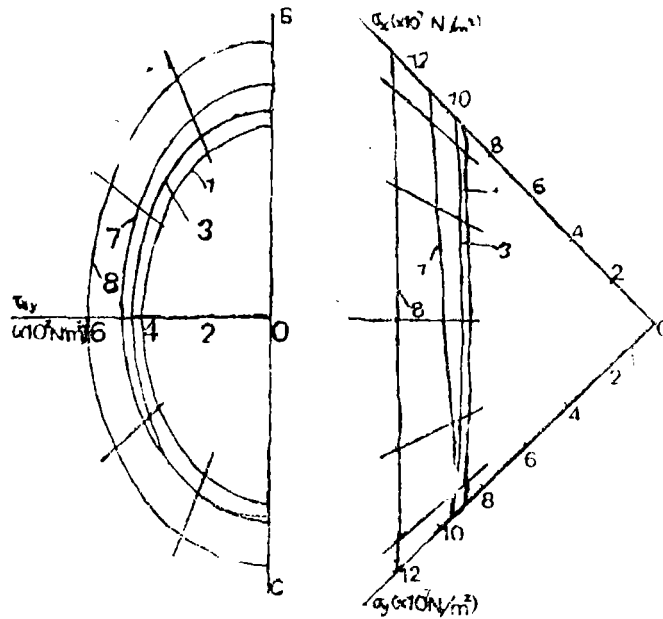


图 4 ϵ_0 : 1—0%, 3—0.05%, 7—0.5%, 8—1%

0.5、7 号试件的曲线对折后的形状如图 5 所示，其中在圆括号内所示数字的曲线则表示对折到该侧后的情况。同一条曲线对折后在 OB 轴上所形成的 l 值愈小，则表明该曲线的对称性愈好。在 0 号试件上的 l 反映了材料的初始各向异性，并且随着条件屈服极限的不同，各个值也稍有差别，为了清除这些因素的影响，将 0 号试件的各项值取为 1，由此所得无量纲 l 值列入表 2 中。表中的 l 值即为 0° 与 90° 试件所得点的坐标值之差与无塑性子应变的相应值之比，脚标则表示条件屈服极限所对应的残余应变的百分数。表中 6、7、8 号试件下括号内的各值则表示与 5 号试件的比值。在表中取 $\Delta l = l_{0.2} - l_{0.5}$, $\Delta l' = l_{0.2} - l_{0.5}$ 。若 $\Delta l > 0$, $\Delta l' > 0$ ，则表明用小的残余应变定义屈服极限时，其曲线的偏移量大于用较大的残余应变所得曲线的偏移量，反之亦然。在表 3 中给出了曲线对折后 $O\sigma_x$ 轴上的点和 $O\sigma_y$ 轴

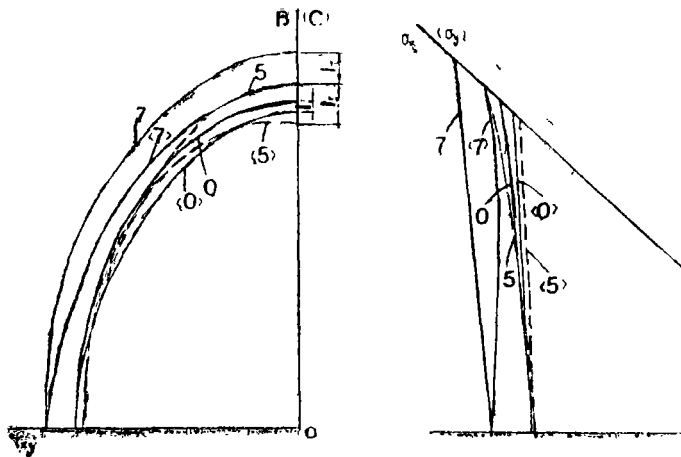


图 5

上的点的差别,其无量纲差值(取 0 号试件为 1)用 S 表示。该值愈大,则表明曲线 BEC 的变化愈大。

表 2

试件编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$l_{0.2}$	1	0.583	1.050	0.817	1.483	3.250 (1)	3.083 (0.949)	3.250 (1)	3.000 (0.923)
$l_{0.5}$	1	0.653	0.933	0.733	1.200	2.387 (1)	2.067 (0.866)	1.933 (0.810)	2.547 (1.067)
$l_{0.6}$	1	-0.217	0.855	0.217	0.855	1.841 (1)	2.899 (1.575)	2.000 (1.087)	1.580 (0.858)
Δl	0	0.800	0.195	0.600	0.628	0.409	0.184	1.250	1.420
$\Delta l'$	0	0.870	0.078	0.516	0.345	0.546	0.168	-0.067	0.967

表 3

试件编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$S_{0.2}$	1	-1.382	1.355	0.775	1.774	3.422 (1)	3.373 (0.986)	3.696 (1.080)	2.588 (0.756)
$S_{0.5}$	1	1.645	0.955	0.457	1.254	2.540 (1)	3.680 (1.449)	2.327 (0.916)	2.173 (0.856)
$S_{0.6}$	1	-1.907	1.137	0.486	1.268	3.087 (1)	4.560 (1.447)	2.525 (0.818)	5.670 (1.837)

4 主要结论

由塑性予应变为零的试件 (0,1) 的实验曲线可以看出,曲线的对称性很好,将它作为初始屈服曲线,并且与具有塑性予应变试件的实验结果进行比较,

1) 由2、3、4号试件($\epsilon_0 \leq 0.117\%$)的各实验曲线可以看出,图形的对称性很好,与初始屈服曲线相比较,它们都分别产生了一定的膨胀。因此,在塑性予应变值较小时,后继屈服曲线相对于初始屈服曲线产生均匀膨胀,即为各向同性强化。

2) 由表2和表3中的 l 和 S 值可以看出,5号试件($\epsilon_0 = 0.167\%$)与0-4号试件相比较,其值突然增大,这时椭圆长半轴OB与OC的长度之差增大,表明材料在某个塑性予应变值下产生了较大的移动,即为运动强化。

3) 由6、7、8号试件的 l 和 S 值与0-4号试件相比较可知,各值均比较大,并且与5号试件的值相接近(括号内的数值与1相接近)。这表明材料在运动强化的基础上又产生了各向同性强化,或者说,在塑性予应变值较大而产生各向同性强化时,材料并没有“遗忘”在 $\epsilon_0 = 0.167\%$ 时运动强化的性质。随着 ϵ_0 值的增加,后继屈服曲线的膨胀量也增大。与初始屈服曲线相比较,三个试件的实验曲线产生了组合强化(各向同性强化与运动强化的组合),并且随着塑性予应变值的增加,各向同性强化所占的比例也在增大。

因此,对于铝合金板Ly12—M12,随着塑性予应变值的增加,与初始屈服条件相比较,后继屈服条件将依次出现各向同性强化、运动强化和组合强化。在组合强化中,各向同性强化所占的比重将随着塑性予应变值的增大而增加。

还应指出,除了个别情况之外,有 $\Delta l > 0, \Delta l' > 0$ 。这表明在以小的残余应变定义屈服极限时,屈服面因运动强化而产生的偏移量大于按大的残余应变定义屈服极限时的偏移量。或者说,以大的残余应变定义屈服极限时,将使得后继屈服面具有向着各向同性强化发展的趋势。

参加实验工作的还有崔杰与张恺同志。

参 考 文 献

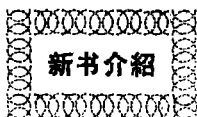
- [1] 张泽华、陈晓光,拉压强度不同材料塑性本构关系理论与实验研究,第一次全国塑性力学学术交流会论文,1986,杭州。
- [2] 姚希梦、陈安、高希正、陈昭平、王晓平,不同塑性变形路径下材料各向异性强化的研究,第一次全国塑性力学学术交流会论文,1986,杭州。
- [3] Eiryō Shiratori, Kozo Ikegami, and Kenji Kaneko, The Influence of the Bauschinger Effect on the Subsequent Yield Condition, *Bulletin of the JSME*, 16, No.100, Oct., 1973.
- [4] 沃·什彻平斯基著,徐秉业、刘信声、孙学伟译,金属塑性成型力学导论,31页至46页,机械工业出版社,1987。

The Effect of the Plastic Prestrain on the Yield Condition

Liu Xinsheng Ding Ke Song Guohua Xu Bingye
(Tsinghua University)

Abstract The experimental method for determine the subsequent yield condition of a sheet with plastic prestrain is introduced. A study of aluminium alloy sheet shows that, the isotropic hardening, the kinematic hardening and the combinative hardening would occur successively as the plastic prestrain increasing.

Key words Yielding, hardening.



《物理化学力学进展》问世

一个新创的热力学第二定律告成

《物理化学力学进展》刊登各种物质系统的物理、化学、力学、物理化学、物理力学、化学力学、物理化学力学等基础科学和技术科学两方面的创造性科学论文。每年一卷由湖南科技出版社出版。编委中有刘叔仪，蒋丽金，方励之，王仁，秦元勋，许顺生，赵敏光，龙期威，叶开源，赵伊君，彭景翠，王永久，伍小平，李如生，张临阳，方俊人，王礼立，郭其梯，黄明保等老中青三代基础科学家和技术科学家多人。

1988年卷的分部内容

热力学定律的状态场论：(Ⅲ)一个新创的热力学第二定律—耦合率及其可逆过程推演	刘叔仪
类星体吸收线的分布及其暗示(英文版)	方励之 褚耀泉 朱杏芬
由EPR谱确定超导化合物 $Y_1Ba_2Cu_2O_{7-y}$ 的晶体结构(英文版)	赵敏光
位错象力，裂端负位错和无位错区的形成	龙期威
混合价化合物分子内振荡频率的计算	彭景翠
Kerr-Newman-De Sitter时空中的中微子波	王永久 沈有根
地壳中岩石的变形机制和软化过程	王仁
一个新的有机硫自由基反应	颜达予 越柱流 薛得
结构材料科学的一个新变量 \dot{T} (温变速率) 与 $\sigma_r(T, \dot{T})$ 函数	王美英 张树堂 孙本荣
周期沉淀现象和扩散不稳定性	李如生
激光诱导自由基调聚反应的研究	张临阳 龚梦熊 王冬青
Nb_3Sn 微型电缆中的应力效应	方俊人 肖爱英 黎达荣

在世界科学潮流推动下，中国人首次研究出了一个新创的热力学第二定律，称为“耦合律”。本卷中用耦合律处理了可逆过程，得到了完全结果。1989年卷中将发表用耦合律处理不可逆过程所得的重要结果——一系列新旧不等式。与各种第二定律相较，耦合律能给出最多的结果而又与现象无矛盾。

凡有兴趣订购、代销与投稿者，请与湖南省长沙市湖南科技出版社《物理化学力学进展》编辑部负责人陈一心联系。
(刘叔仪供稿)