

屈服应力定义对纯铝L2屈服规律的影响¹⁾

张泽华 庞宝君

(哈尔滨工业大学)

提要 本文报导了工业纯铝L2薄壁圆管试件在比例加载时 P - p 复杂应力状态的实验研究结果。主要研究了: (1) 初始加载和预施塑性变形后加载时材料硬化特性的差异; (2) 不同屈服应力定义对初始屈服曲面的后继屈服曲面的影响; (3) 不同屈服应力定义对强化规律的影响; (4) 对相同加载路径、预变形不同的后继屈服曲面做了比较。此外, 还对后继屈服曲面的角点问题进行了初步讨论。

关键词 塑性、实验、屈服面。

一、引言

对金属材料在复杂应力状态下的塑性变形规律, 已进行过大量的研究, 但所得结果差异很大, 尤其是在后继屈服规律上反映更为明显, 如[1]~[5]取比例极限、名义应力和外推屈服点作为屈服应力, 研究了不同屈服应力定义对屈服曲面的影响。但是, 在这方面, 多数研究工作, 是关于屈服应力定义对初始屈服曲面的影响。至于不同的屈服应力定义对后继屈服曲面的大小, 形状以及在应力空间中的运动等的影响, 则讨论很少^[6]。通常, 对于拉压性能相同的金属材料, 可以认为单一曲线定理是成立的。但是, 很多研究结果表明^[6], 材料的硬化特性依赖于应力状态类型。特别是经过预施塑性变形之后, 即使对于初始加载时单一曲线定理成立的材料, 其硬化特性也完全可能与应力状态类型有关。上述问题都是塑性分析的重要基础。针对这些问题, 我们进行了 P - p 复合应力状态下工业纯铝L2薄壁圆管的实验研究。

二、实验方法

由工业纯铝L2棒料经退火后制成薄壁圆管试件, 尺寸如图1所示。通过DSS-10T试验机对试件施加轴向载荷 P , 内压 p 由一台试验机油泵提供。试验工作简图如图2所示。

对于薄壁圆管的 P - p 实验, 各应力分量的计算式为:

$$\sigma_z = \frac{4}{D^2 - d^2} \left(\frac{P}{\pi} + \frac{p d^2}{4} \right)$$

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12月21日收到修改稿。

载路径预施拉伸塑性变形后的硬化特性曲线.

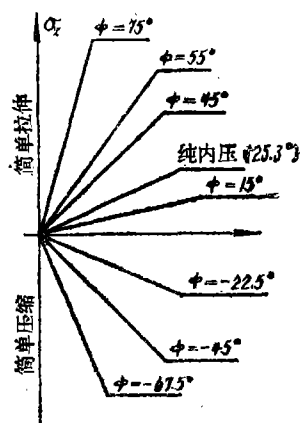


图3 加载路径图

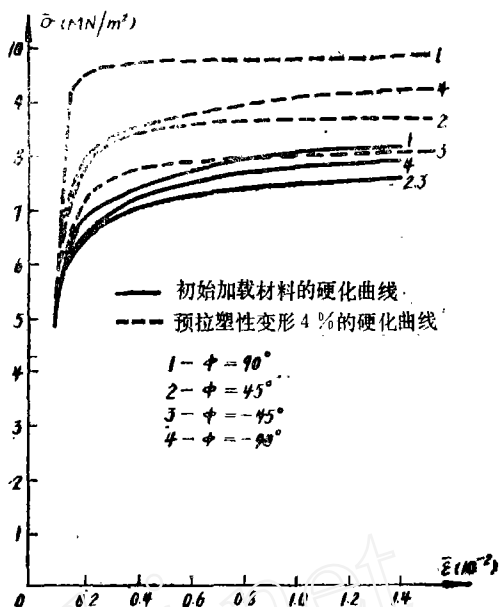


图4 初始加载和预施塑性变形后材料的硬化曲线

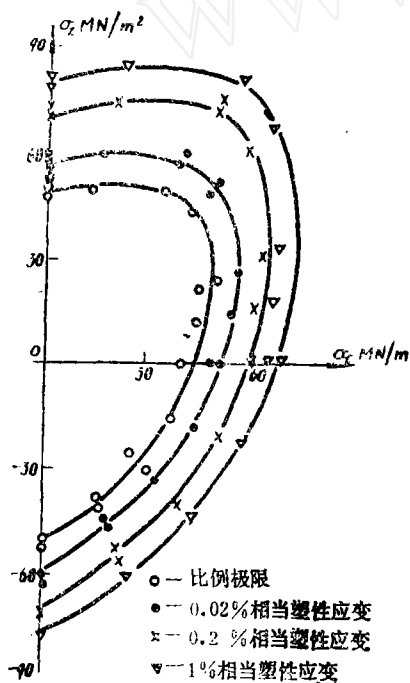


图5 初始屈服曲面

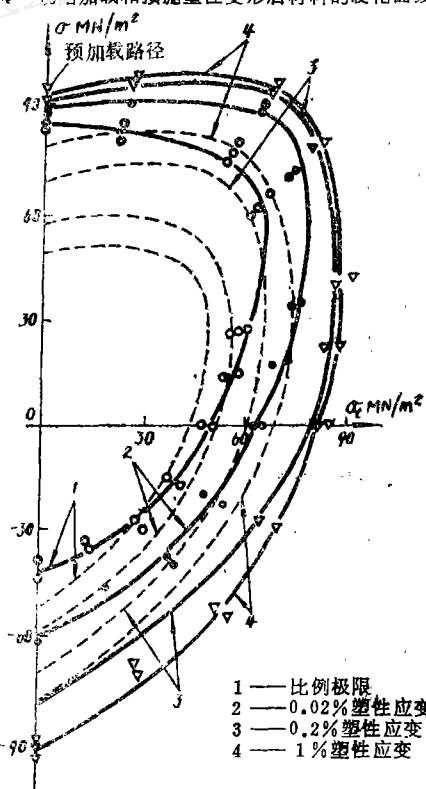


图6 不同屈服应力定义的后继屈服曲面(预拉伸)

2. 取不同屈服应力定义时的初始屈服曲面

图5为取不同屈服应力定义时的初始屈服曲面。定义屈服应力的残余应变变量分别为:
 $\bar{\varepsilon}^p = 0$ (比例极限)、0.02%、0.2%、1%。

3. 取不同屈服应力定义时的后继屈服曲面

图6及图下所示为预拉伸塑性应变为 $\varepsilon_0^p = 4\%$ 及预内压塑性应变 $\varepsilon_0^p = 0.866\%$ 时,取不同残余应变量的名义应力为屈服应力时的后继屈服面。

4. 屈服应力定义对强化规律的影响

为了比较在不同屈服应力定义下的初始屈服曲面和后继屈服曲面之间的特点,以便于探讨屈服应力定义对强化规律的影响,在图6及图7上用虚线画出了不同屈服应力定义所对应的初始屈服曲面。图8为以外推屈服应力为屈服应力时的初始屈服曲面和后继屈服曲面。

5. 同一加载路径预塑性变形程度不同时后继屈服曲面的比较

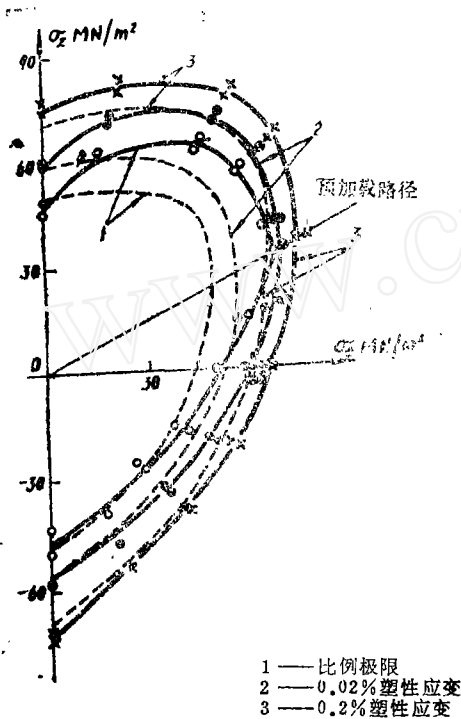


图7 不同屈服应力定义的后继屈服曲面(预内压)

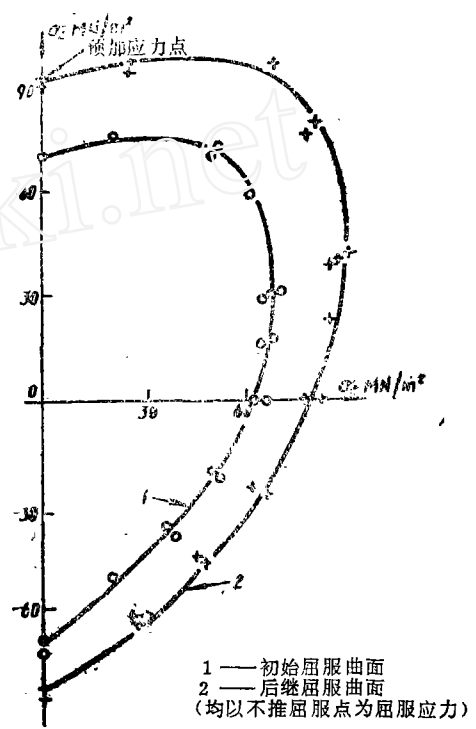


图8 以外推屈服点为屈服应力的屈服曲面

图9所示为经预内压加载,预施塑性变形分别为 $\varepsilon_0^p = 0.866\%$ 及 $\varepsilon_0^p = 0.433\%$ 时的两个后继屈服曲面(均以比例极限为屈服应力)。由图9可见,在预加载方向上,预施塑性变形量大的后继屈服曲面的曲率比预施塑性变形量小时要大。

6. 屈服应力定义对组合强化模型中移动张量影响的探讨

由图6、图7可见,如不计预应力点附近区域后继屈服曲面形状的变化,可以认为在应力空间中,采用不同屈服应力定义所确定的后继屈服曲面的形状和初始屈服曲面相似,即后继屈服曲面是由初始屈服曲面等向扩大和平移而形成,只是扩大和移动的程度随所取屈服应

力定义不同而异。

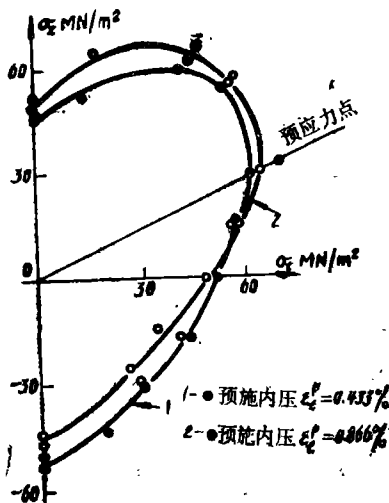


图9 预施塑性变形程度不同的后继屈服

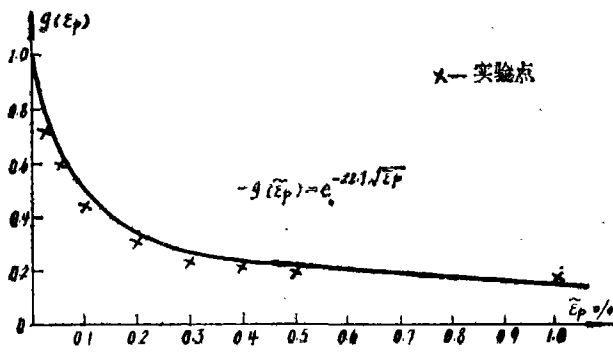


图10 $g(\epsilon_p)$ 与实验结果的比较

进一步的分析可见, 后继屈服曲面相对初始屈服曲面, 膨胀程度与屈服应力定义的选取基本无关, 但后继屈服曲面在应力空间的移动距离却显著地依赖于屈服应力定义的选取。因此, 可将组合强化规律写作:

$$f(\sigma_{ij} - \tilde{\sigma}_{ij}) - c(H_a) = 0$$

式中 $c(H_a)$ 与屈服应力定义的选取无关。后继屈服曲面中心的位移张量 $\tilde{\sigma}_{ij}$ 与屈服应力定义的选取有关。如假定此移动张量可分解如下:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = g(\tilde{\epsilon}_p) \cdot \tilde{\sigma}_{ij}^0$$

式中 $\tilde{\sigma}_{ij}^0$ 为取比例极限作屈服应力时, 屈服曲面中心的位移张量, $g(\tilde{\epsilon}_p)$ 为屈服应力定义的选取对移动张量的影响系数, $\tilde{\epsilon}_p$ 为与取作屈服应力的名义应力所对应的残余应变, $g(0) = 1$ 。不同 $\tilde{\epsilon}_p$ 的影响系数的实验数据示于图10上。如取 $g(\tilde{\epsilon}_p)$ 满足如下关系式

$$g(\tilde{\epsilon}_p) = e^{-\alpha\sqrt{\tilde{\epsilon}_p}}$$

则由实验结果用最小二乘法拟合得 $\alpha = 2.27$ 。

由图10可见, 上述表达式与实验结果吻合很好。

四、结 论

1. 材料的初始硬化特性曲线可以认为满足单一曲线定理。经预塑性变形后的硬化特性曲线与应力状态类型有关, 单一曲线定理不成立。
2. 屈服应力不同, 初始屈服曲面的形状虽然受到影响, 但随所定义的屈服应力值增大时, 大体上呈等向扩大的趋势。
3. 屈服应力定义不同, 对后继屈服曲面的大小及形状均有影响。定义屈服应力值越

小, 将导致后继屈服曲面在预加载方向的曲率增大。这种现象说明, 当取小残余应变量的名义应力作为屈服应力时, 似乎支持在加载方向存在尖点的理论。不同屈服应力定义所确定的后继屈服曲面在预加载方向方向相距最近。

4. 屈服应力定义不同明显影响后继屈服曲面在应力空间运动的规律。取小残余应变量的名义应力作为屈服应力时, 基本上支持组合强化模型。随所取残余应变增大所对应力的名义应力作为屈服应力, 则呈现支持等向强化模型的趋势。当所残余应变很小时, 还将引起屈服曲面形状的变化。

5. 后继屈服曲面在预加载方向附近的曲率, 不仅与屈服应力定义的选取有关, 而且还与预施塑性变形量大小有关。

6. 如不计在预加载方向附近后继屈服曲面形状的变化, 可以认为, 在不同屈服应力定义下, 材料服从组合强化模型。屈服应力定义不同对等向强化部分基本无影响, 而对移动强化部分影响显著, 其影响反映在移动张量上。此移动张量可近似取:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = e^{-\alpha \sqrt{\tilde{\sigma}_p}} \cdot \tilde{\sigma}_{ij}^0$$

参 考 文 献

- [1] Naghdi. P等, An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity. *J. Appl Mech.* 25. 2, (1958).
- [2] Ivey. J. H, Plastic stress-strain relations and yield surfaces for aluminium alloys. *J. Mech. Engng. Sci.* vol. 3 No1, 1961.
- [3] Mair. W. M等, Effect of prestrain on yield surfaces in copper. *J. Mech. Engin. Science.* 6. 2(1964).
- [4] 池上皓三、种种の前負荷後の降伏曲面について——その研究の発展と現状(1, 2), 材料, 24 261, 263 (1975).
- [5] T. C. HSU, Definition of the yield point in plasticity and its effect on the shape of the yield locus. *J. of Strain Analysis*, 1. 4(1966).
- [6] 张泽华、吕桂英, 球墨铸铁的屈服准则和强化规律的实验研究, 哈尔滨工业大学学报(1985) 增刊(工程力学专辑)。
- [7] 张泽华、吕桂英, 塑性本构关系的实验研究, 塑性力学进展, 铁道出版社(1988)。

EFFECT OF DEFINITION OF THE YIELD STRESS ON YIELD RULE OF PURE ALUMINIUM L2

Zhang Zehua and Pang Baojun

(Harbin Institute of Technology)

Abstract In this paper thin-walled tubes of pure aluminium L2 are investigated experimentally under the type of P-p in proportional loading. The main points are as follows:

1. The difference of hardening characters between preloading and non-preloading.
2. The effect of the definition of yield stress on the initial and subse-

quent yield surfaces.

3. The effect of the definition of yield stress on hardening rules.

4. The comparison between the subsequent yield surfaces in different amounts of prestrains at the same loading path.

Key words plasticity, test, yield surface.

www.cnki.net