

超塑性板料的成形极限*

杜志孝¹ 李森泉¹ 刘马宝¹ 吴诗惇¹

(钱伟长推荐, 1994年10月24日收到, 1995年3月7日收到修改稿)

摘 要

根据超塑变形过程中的损伤演变方程和超塑性变形的特点, 本文将基于粘塑性势的热粘塑性损伤势函数与Hill描述板料变形的各向异性材料屈服行为有机地结合起来, 考虑了超塑变形过程中损伤与失稳的交互作用. 将超塑变形全过程分为稳定变形、准稳定变形、应变路径飘移和集中性失稳发展四个阶段, 用数值方法建立了超塑性板料的损伤失稳模型. 然后在此基础上, 以集中性失稳发生($d\epsilon_2=0$)或临界空洞体积分数(f_c)作为破坏判据, 预测了板料超塑变形时的成形极限.

关键词 超塑性 损伤失稳 成形极限

一、引 言

板料在超塑状态下的优良加工性能, 使其在国民经济各部门受到了日益广泛的重视. 因此, 研究超塑性板料的失稳与成形极限具有重要的理论意义与应用价值.

众所周知, 超塑性材料基本上从变形一开始就呈现一种近似稳态流动的非稳态变形, 正是这种准稳态流动才使其具有较大的变形程度^[1], 而这种准稳态流动难以用现有的失稳理论加以描述. Chan^[2]和 Lian^[3]简单地将M-K模型^[4]从拉一拉应变场推广到拉一压应变场, 认为当厚向应变达到某一临界值时集中性失稳开始发生, 由于初始厚向不均度是不确定的, 事实上这个临界值也是不确定的. 一些研究^[5,6]还表明: 板料变形时的成形极限不仅依赖于材料的流变参数(应变速率敏感性指数 m , 应变硬化指数 n , 厚向异性指数 r), 而且还依赖于变形过程中材料受损伤的程度. Zhou^[7]根据R-T模型^[8], 用数值方法分析了超塑自由胀形过程, 而R-T模型是最初针对理想刚塑性材料而言的, 直接用于超塑性材料还有待于进一步完善.

二、超塑性板料的损伤失稳分析

根据文献[9], 板料超塑变形过程中的空洞损伤演变以空洞体积分数 f 可表示为:

* 国家自然科学基金和航空科学基金资助研究项目
1 西北工业大学402教研室, 西安 710072

$$f = f_0 \cdot \left\{ \frac{\exp[B_1(\sigma_m/\bar{\sigma} - 1/3)] \cdot \varepsilon_e - \varepsilon_{ut}}{\varepsilon_{uf} - \varepsilon_{ut}} \right\}^{B_2} \quad (2.1)$$

式中, ε_{ut} , ε_{uf} , f_0 分别为单向拉伸时损伤应变门槛值、极限应变、临界空洞体积分数; $\bar{\sigma}$ 为基体材料流动应力; σ_m , σ_e 分别为平均应力和Hill等效应力; $\dot{\varepsilon}_e$ 为等效应变; B_1 , B_2 为材料常数。

微分上式有

$$df = \frac{B_2 f \cdot \exp[B_1(\sigma_m/\bar{\sigma} - 1/3)] \cdot [d\varepsilon_e + B_1 \varepsilon_e d(\sigma_m/\bar{\sigma})]}{\exp[B_1(\sigma_m/\bar{\sigma} - 1/3)] \cdot \varepsilon_e - \varepsilon_{ut}} \quad (2.2)$$

超塑性变形通常被认为是一种粘塑性流动, 根据修正后的Gurson多孔材料本构模型^[10]与Hill二次屈服方程, 粘塑性损伤势函数为:

$$\Omega = \frac{\sigma_1^2 - [2r/(1+r)]\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}{\bar{\sigma}^2} + 2f^A \cosh\left(\frac{3}{2}A \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) - 1 - f^{2A} = 0 \quad (2.3)$$

式中, σ_1, σ_2 为板料在板平面内承受的主应力; $\bar{\sigma} = K \dot{\varepsilon}_e^m \varepsilon_e^n$ (K 为材料常数); $A = (2+m+n)/3$ 。

相应的应变分量增量 ($d\varepsilon_1$, $d\varepsilon_2$) 之间和它们与等效应变增量 ($d\varepsilon_e$) 之间的关系为:

$$d\varepsilon_e = \frac{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)}{c_1\varphi_1 + c_2\varphi} d\varepsilon_1 = \frac{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)}{c_1\varphi_2 + c_2\varphi} d\varepsilon_2 \quad (2.4)$$

式中,

$$c_1 = \sqrt{1 + f^{2A} - 2f^A \cosh\left(\frac{3}{2}A \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)}, \quad c_2 = Af^A \sinh\left(\frac{3}{2}A \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)$$

$$\varphi = \sqrt{1 - \frac{2r}{1+r}\alpha + \alpha^2}, \quad \varphi_1 = 2 - \frac{2r}{1+r}\alpha, \quad \varphi_2 = 2\alpha - \frac{2r}{1+r}$$

其中, $\alpha = \sigma_2/\sigma_1$ 。

在外力作用下, 板料中基体材料的应力增量为:

$$d\bar{\sigma} = \beta_1 d\sigma_1 + \beta_2 d\sigma_2 \quad (2.5)$$

$$\text{式中, } \beta_1 = \frac{c_1\varphi_1 + c_2\varphi}{2c_1^2\varphi}, \quad \beta_2 = \frac{c_1\varphi_2 + c_2\varphi}{2c_1^2\varphi}$$

超塑性变形开始时, 材料的变形抗力增量等于其所受的应力增量, 即:

$$\bar{\sigma} \left(\frac{m d\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_e} + \frac{n d\varepsilon_e}{\varepsilon_e} \right) = \beta_1 d\sigma_1 + \beta_2 d\sigma_2 \quad (2.6)$$

在简单加载条件下, 由第一主方向载荷增量 $dP_1 = 0$ (或 $d\sigma_1 = \sigma_1 d\varepsilon_1$) 可求得失稳开始时的临界等效应变 ε_d 和相应的主应变分量 ε_{1d} , ε_{2d} , 即:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_d &= \frac{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)}{c_1\varphi_1 + c_2\varphi} \cdot n \\ \varepsilon_{1d} &= \frac{2\varphi(c_1\varphi_1 + c_2\varphi)}{\varphi_1[2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)]} \cdot n \\ \varepsilon_{2d} &= \frac{2\varphi(c_1\varphi_2 + c_2\varphi)}{\varphi_2[2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)]} \cdot n \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

不同应变状态下的超塑性实验结果表明: 失稳开始后载荷 P_1 与等效应变 ε_e 之间的关系可表示为:

$$P_1 = \frac{2}{\pi} P_{1\max} \cdot \text{arcctg}[D(\varepsilon_e - \varepsilon_d)] \quad (2.8)$$

式中, $P_{1\max}$ 为相应条件下的拉伸最大载荷; $D = D_2 \ln(1+m)/(1+D_1\alpha)$ (式中, D_1, D_2 为材料特性常数).

由式(2.4)和式(2.8), 并利用 $P_1 = A_1\sigma_1$ (A_1 为与 σ_1 相对应的断面积) 有

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = \left\{ \frac{c_1\varphi_1 + c_2\varphi}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} - \frac{D}{[1+D^2(\varepsilon_e - \varepsilon_d)^2] \cdot \text{arcctg}[D(\varepsilon_e - \varepsilon_d)]} \right\} d\varepsilon_e \quad (2.9)$$

由式(2.3)、式(2.6)和式(2.9)可得

$$\frac{m d\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_e} = \frac{c_1}{\varphi} \left\{ \frac{\beta_2 d\sigma_2}{\sigma_1} + \frac{\beta_1(c_1\varphi_1 + c_2\varphi) d\varepsilon_e}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} - \frac{\beta_1 D d\varepsilon_e}{[1+D^2(\varepsilon_e - \varepsilon_d)^2] \cdot \text{arcctg}[D(\varepsilon_e - \varepsilon_d)]} \right\} - \frac{n d\varepsilon_e}{\varepsilon_e} \quad (2.10)$$

$$\frac{d\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{\beta_2} \left\{ \frac{\varphi}{c_1} \left(\frac{m d\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_e} + \frac{n d\varepsilon_e}{\varepsilon_e} \right) - \frac{\beta_1(c_1\varphi_1 + c_2\varphi) d\varepsilon_e}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} + \frac{\beta_1 D d\varepsilon_e}{[1+D^2(\varepsilon_e - \varepsilon_d)^2] \cdot \text{arcctg}[D(\varepsilon_e - \varepsilon_d)]} \right\} \quad (2.11)$$

由 $d\alpha = d\sigma_2/\sigma_1 - \alpha d\sigma_1/\sigma_1 = 0$, 并注意到式(2.9)和式(2.11)可得:

$$\frac{\varphi}{c_1\beta_2} \left(\frac{m d\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_e} + \frac{n d\varepsilon_e}{\varepsilon_e} \right) = \left(\alpha + \frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \cdot \left\{ \frac{c_1\varphi_1 + c_2\varphi}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} - \frac{D}{[1+D^2(\varepsilon_e - \varepsilon_d)^2] \cdot \text{arcctg}[D(\varepsilon_e - \varepsilon_d)]} \right\} d\varepsilon_e \quad (2.12)$$

用数值方法求解上式可得准稳定变形阶段的极限应变 ε_q 和相应的主应变 $\varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}$, 然后由式(2.1)可求得此时的空洞体积分数 f_q .

用迭代方法积分式(2.2), 式(2.9)~(2.11)即可求得应变路径漂移阶段中某一瞬时的等效应变速率、空洞体积分数, 主应力及其比值 α . 迭代的初始条件为: $(\sigma_2/\sigma_1)_0 = \alpha_0, \varepsilon_0 = \varepsilon_q, \dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}_q$.

参照文献[6]、[9], 可取 $B_1 = 1.5, D_1 = 6.0$. 现在只要知道材料的流变参数 (m, n, r) 和材料常数 ($B_2, \varepsilon_{u1}, \varepsilon_{uf}, f_c, D_2$) 以及初始应力比 α_0 , 并选取步长 ($d\varepsilon_e = 0.001$) 即可对式(2.2), 式(2.9)~(2.11)进行迭代计算, 直到局部性失稳的条件 ($d\varepsilon_2 = 0$) 被满足或空洞体积分数达到临界值 (f_c) 为止. 最后的总应变就是该初始应力场下的极限应变 ($\varepsilon_{1n}, \varepsilon_{2n}$). 以上计算过程可以写成:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1q} + \sum_{i=1}^{N-1} d\sigma_1, & \sigma_2 &= \sigma_{2q} + \sum_{i=1}^{N-1} d\sigma_2 \\ \alpha &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, & \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} &= \frac{c_1(1+\alpha)}{3\varphi} \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon_{1q} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{c_1\varphi_1 + c_2\varphi}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} \cdot d\varepsilon_e \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{2q} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{c_1\varphi_2 + c_2\varphi}{2c_1\varphi + c_2(1+\alpha)} \cdot d\varepsilon_e \\ \dot{\varepsilon}_e &= \dot{\varepsilon}_q + \sum_{i=1}^{N-1} d\dot{\varepsilon}_e, & f &= f_q + \sum_{i=1}^{N-1} df \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

在板料成形领域，人们很关心材料的最大均匀应变($\epsilon_{1u}, \epsilon_{2u}$)。可近似利用 $\epsilon_{2u} = \epsilon_{2n}$ 和 $\alpha = \alpha_0$ 的关系求出 ϵ_{1u} ，进而绘出由最大均匀应变($\epsilon_{1u}, \epsilon_{2u}$)构成的成形极限曲线。

三、实验验证

为了对本模型进行实验验证，采用不经任何预先处理的铝合金LY12CZ板 ($t=2\text{mm}$, $HB=131$, 晶粒尺寸: $18.3\mu\text{m}$) 和半硬态黄铜H62板 ($t=1.5\text{mm}$, $HB=60$, 晶粒尺寸: $14.2\mu\text{m}$) 作为实验材料进行了不同应变状态下的超塑性实验，实验条件如表1所示。拉伸 ($\alpha < 1/2$) 是用不同宽度的拉伸试样在Instron—1195机上进行的，其拉伸速度由初始应变速率($\dot{\epsilon}_0$)确定。不同长短轴比的椭圆形毛坯自由胀形时顶点的等效应变速率($\dot{\epsilon}_e$)则通过控制成形气压而保持恒定。

由单向拉伸实验和单向拉伸过程中的空洞损伤演变可确定材料的流变参数 (m, n, r) 和材料常数 ($B_2, \epsilon_{ui}, \epsilon_{uf}, f_0, D_2$) (见表1)。然后对式(2.2)、式(2.9)~(2.11)进行迭代计算。

表1 超塑性实验条件及材料常数

材 料	实 验 条 件		材 料 常 数							
	温度(°C)	$\dot{\epsilon}_0, \dot{\epsilon}_e (\text{s}^{-1})$	m	n	r	B_2	f_0	ϵ_{ui}	ϵ_{uf}	D_2
LY12CZ	490	1.67×10^{-4}	0.50	0.21	0.81	4.5	0.174	0	1.36	3.0
H62	750	1.33×10^{-3}	0.44	0.32	0.96	5.0	0.192	0	1.58	3.6

图1是计算值与实验结果的比较。从图中可以看出用本方法预测的超塑性板料的成形极限与实验结果吻合较好。

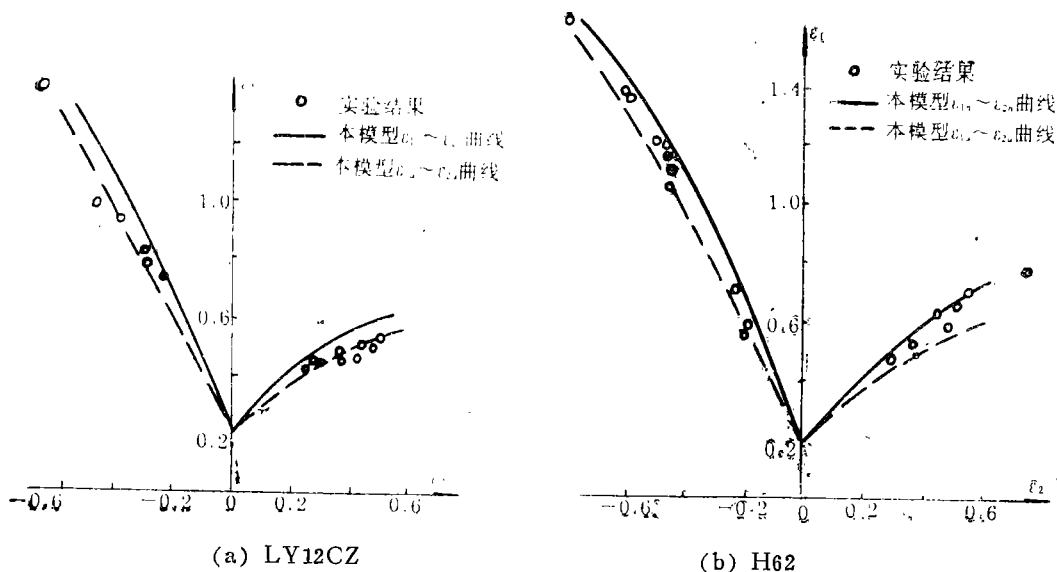


图1 用本失稳模型预测的超塑性板料的成形极限曲线与实验结果的比较

四、结 论

(1) 将修正后的Gurson多孔材料本构关系与Hill描述板料变形的二次屈服方程结合起

来的热粘塑性损伤模型很好地反映了板料超塑变形的实际情况。

(2) 本文提出的损伤失稳模型, 是建立在严密的理论基础与实验依据上的。用集中性失稳发生($d\epsilon_2=0$)或临界空洞体积分数(f_c)作为破坏判据是合理的, 实验结果表明它是比较可靠的。

参 考 文 献

- [1] 林兆荣, 《金属超塑性成形原理与实用》, 航空工业出版社, 北京(1990)。
- [2] K. S. Chan, D. A. Koss and A. K. Ghosh, Localized necking of sheet at negative minor strains, *Met. Trans. A.*, 15A (1984), 323—329.
- [3] J. Lian and B. Banerjee, Forming limit diagram of sheet metal in the negative minor strain region, *Mat. Sci. and Eng.*, 86 (1987), 137—144.
- [4] Z. Marciniak and K. Kuczynski, Limit strains in process of stretch-forming sheet metal, *Int. J. Mech. Sci.*, 9 (1967), 609—620.
- [5] M. H. A. Nawaz, Forming limit diagrams and damage in mild steel, *J. Mat. Sci. Letters*, 13 (1978), 1142—1145.
- [6] 杜志孝、李淼泉、吴诗悫, 损伤对LY12CZ 铝合金和H62黄铜板料超塑性可成形性的影响, 西北工业大学学报, 13(2) (1995), 323—324.
- [7] D. Zhou and J. Lian, Numerical analysis of superplastic bulging for cavity-sensitive materials, *Int. J. Mech. Sci.*, 29(8) (1987), 565—576.
- [8] J. R. Rice and D. M. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress field, *J. Mech. Phys. Solids*, 17 (1969), 201—217.
- [9] Du Zhixiao and Wu Shichun, A kinetic equation for damage during superplastic deformation, *J. Mater. Process. Technol.*, 52(2-4) (1995), 270—279.
- [10] W. A. Spitzig, R. E. Smelser and O. Richmond, The evolution of damage and fracture in iron compacts with various initial porosities, *Acta Metall.*, 36(5) (1988), 1201—1211.

Forming Limit during Superplastic Deformation of Sheet Metals

Du Zhixiao Li Miaoquan Liu Mabao Wu Shichun
(Faculty 402 of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072,
P. R. China)

Abstract

In the present paper, a thermo-viscoplastic damage potential and Hill's normal anisotropy (isotropy in plane) yield criterion to be quadratic in the stress components are combined to describe the interaction process of damage and instability during superplastic deformation, based on the kinetic equation for damage during superplastic deformation and the deformation features of superplastic materials. The superplastic deformation process is divided into four stages, namely, stable, quasistable, strain path drift to plane strain and plane strain stages, and a damage-instability model during superplastic deformation of sheet

metals is developed through numerical method. On the basis of the above results and taking the occurrence of localized instability ($d\varepsilon_2=0$) or the cavity volume fraction reaching the critical value(f_c) as a fracture criterion, the forming limit during superplastic deformation of sheet metals is predicted.

Key words superplasticity, damage-instability, forming limit