

金属超塑状态下正挤压变形力的工程计算*

胡士廉

北京科技大学金属压力加工系, 北京 100083

摘要 利用主应力法, 结合金属超塑性力学方程, 推出了金属超塑性正挤压变形力的计算式; 对 Tang S 提出的金属超塑性挤压模型进行了订正和改进. 采用锌铝共析合金对理论计算公式进行了实验验证.

关键词 超塑变形, 超塑性变形力学, 超塑性成型

中图分类号 TG302, TG113.2

Engineering Calculation about Deformation Force of Superplastic Extrusion

Hu Shilian

Department of Metal Forming, USTB, Beijing 100083, PRC

ABSTRACT Calculation formulae of superplastic extrusion are derived through the Sach's method in plastic analysis and Backofen's constitutive equation of superplasticity. Calculating formula and modle of Tang S are improved insuperplastic extrusion. Calculus of the theory are experimently studied through superplastic with Zn-22Al.

KEY WORDS superplastic deformation, superplastic deformation mechanics, superplastic forming

金属在超塑性正挤压时模具的尺寸、坯料尺寸、挤压速度及摩擦条件影响着挤压力的大小. 为了便于近似地估算变形力的大小和了解各参数间的关系, 采用主应力法导出其变形力的计算公式, 对 Tang S 提出的模型进行了订证和改进, 使之可以计算出挤压力的绝对值而不是相对值. 同时采用锌铝共析合金进行超塑性正挤压, 实测了挤压力, 结果表明理论计算与实测值接近.

1 金属在超塑性状态下变形的基本假定

假设:(1)超塑性材料是各向同性的, 无应变硬化现象发生, 弹性变形可忽略; (2)超塑性材料不可压缩, 即体积不变; (3)超塑性变形符合 Mises 准则, 应变速率与所加的静水压力无关.

金属超塑性的本构方程为:^[1]

$$\sigma'_{ij} = 2/3K(\dot{\epsilon})^{n-1} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}_{ij} = 3/2(\sigma/K)^{(1-m)/m} \sigma'_{ij}/K$; σ'_{ij} 为应力偏张量, $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_{KK}/3$; σ 为等效应力, $\bar{\sigma} = (3/2\sigma_{ij}\sigma_{ij})^{1/2}$; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为等效应变速率, $\dot{\bar{\varepsilon}} = (2/3\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij})^{1/2}$; σ_{ij} 为应力张量; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 为应变速率张量; δ_{ij} 是 Kroneker 记号; m 为应变速率敏感指数; K 为材料常数.

2 圆锥形模超塑性正挤压压力的计算式

对圆柱形坯料在圆锥模中正挤压的数学处理基于下列假定:

(1) 应变速率限定在 m 为常数的范围; (2) 金属流动的截面上应力均匀分布; (3) 模具与超塑性材料之间遵守库伦摩擦. 挤压变形区的单元体上的应力分析见图 1

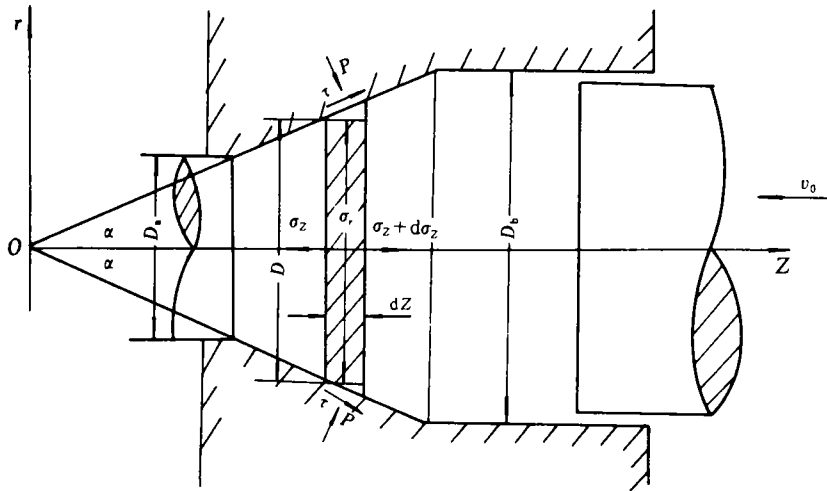


图 1 超塑性挤压锥形区单元体应力分析

在 z 方向单元体所受力的平衡方程式为:

$$d\sigma_z/dD + 2\sigma_z/D + 2P/D(1 + \mu/tg\alpha) = 0 \tag{2}$$

式中 μ 为库伦摩擦系数, 由 (1) 式得:

$$\sigma_z - \sigma_r = K \cdot \dot{\varepsilon}^{m-1} \cdot \dot{\varepsilon}_z \tag{3}$$

由体积不变条件可知, 在圆锥筒中任一截面的流速 v 与挤压筒内挤压速度 v_0 有下列关系:

$$v = -v_0(D_0/D)^2, \quad \dot{\varepsilon}_z = \partial v / \partial Z = 4v_0 D_0^2 tg\alpha / D^3 = \dot{\bar{\varepsilon}} \tag{4}$$

将 (4) 式代入 (3) 式得:

$$\sigma_z - \sigma_r = K \dot{\bar{\varepsilon}}^m \tag{5}$$

设: $\sigma_r = -P(1 - \mu tg\alpha)$ (6)

将 (5)、(6) 式代入 (2) 式得:

$$d\sigma_z/dD + A(\sigma_z/D) = B/D^{3m+1} \tag{7}$$

式中: $A = 2[1 - (1 + \mu ctg\alpha)/(1 - \mu tg\alpha)]$; $B = [-2K(1 + \mu ctg\alpha)(4v_0 D_0^2 tg\alpha)^m]/(1 - \mu tg\alpha)$.

由边界条件 $\sigma_z|_{D=D_0} = 0$, 解得 (7) 式为:

$$\sigma_z = B(D^{4-3m} - D_0^{4-3m}) / [(A - 3m)D^4] \tag{8}$$

此式即为挤压力的计算公式, 改变边界条件同样可以来计算拉拔问题. (9) 式中当 $D = D_0$

时即为超塑性单位流动压力的计算式即:

$$\sigma_{zb} = B(D_b^{4-3m} - D_a^{4-3m}) / [(A-3m)D_b^4] \quad (9)$$

仍用主应力法来计算坯料与挤压筒接触面间的摩擦抗力对挤压力的影响. 图2为挤压筒中坯料的单元体应力分析.

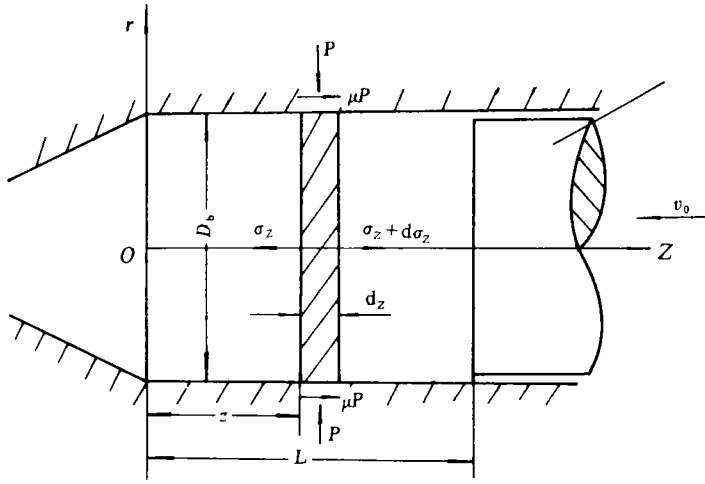


图2 挤压筒中坯料的单元体应力分析

单元体在 z 方向上的力平衡方程为:

$$d\sigma_z/dZ + 4\mu_0 P/D_b = 0 \quad (10)$$

式中 μ_0 为挤压筒中的库伦摩擦系数. 由(1)式有:

$$\sigma_z - \sigma_r = K\dot{\epsilon}_z \quad (11)$$

由体积不变和轴对称条件, 同时设 $\sigma_r = -P$; $\dot{\epsilon}_z = -v_0/Z$, 则(11)式可写为:

$$P = -K(v_0/Z)^m - \sigma_z \quad (12)$$

将(12)式代入(10)式有:

$$d\sigma_z/dZ + 4\mu_0 \sigma_z/D_b = 4\mu_0/D_b \cdot K \cdot (v_0/Z)^m \quad (13)$$

边界条件 $\sigma_z|_{Z=0} = \sigma_{zb}$. 解方程(13)得:

$$\sigma_z = e^{-4\mu_0 Z/D_b} \{ \sigma_{zb} + 4\mu_0/D_b \cdot K v_0^m \sum_{n=1}^{\infty} [(-4\mu_0/D_b)^{n-1} L^{n-m}] / [(n-1)!(n-m)] \} \quad (14)$$

式中 σ_{zb} 按(9)式确定, (14)式即为考虑了挤压筒对总挤压力影响的计算公式.

3 对 Tang 的挤压模型的订正和计算式的改进

Tang 在文献[1]中应用 Backofen 方程, 假定应变速率敏感指数 m 为常数, 金属向凹模顶作直线流动, 材料与模具间的摩擦为库伦摩擦, 变形为轴对称, 由连续介质力学的基本理论得:

$$\begin{cases} \sigma_{11}' = 2/3(\sigma_r - \sigma_\theta) \\ \dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_r = -2c_1/X^3 = -\dot{\epsilon} \end{cases} \quad (15)$$

图3所示为隔离球单元体的应力分析.

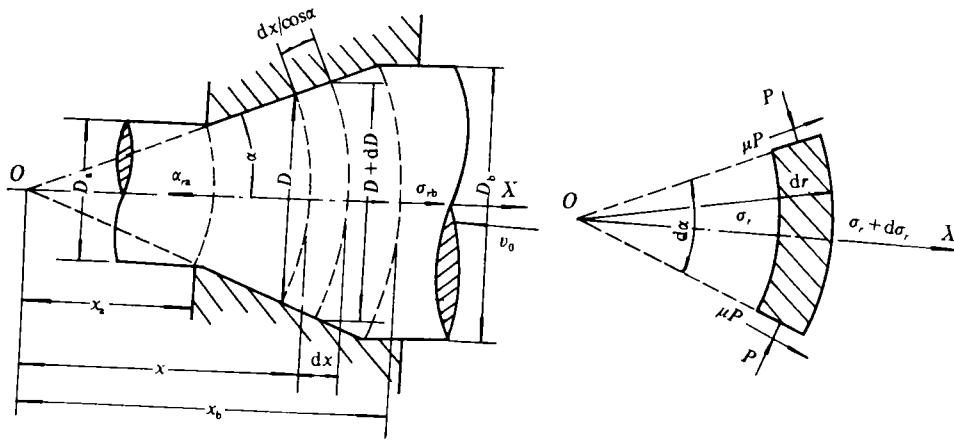


图3 Tang 挤压模型的单元体应力分析

Tang 在球单元体分析中假定了单元体厚度为 dx , 但在边界厚度上又误为 $dx/\cos\alpha$ 使计算错误^[2]. 在 (15) 式中 c_1 是一个变数, Tang 把 c_1 视为常数, 同时用应力边界条件确定常数, 只能给出应力的相对值. 对 c_1 作为通解来说只有用位移边界条件或速度边界条件确定, 才能给出变形区各量的绝对值, 一般说 c_1 是角度与时间的函数^[3].

作为近似处理利用应变速度的边界条件来确定 c_1 值, 当变形在锥形区开始时有^[4]:

$$\dot{\epsilon}_{r,b} = 4v_0 \sin\alpha / D_b \quad (16)$$

由 (15) 式得:

$$c_1 = (-v_0 D_b^2 \sin\alpha) / 4tg\alpha \quad (17)$$

对边界上的厚度进行改正得平衡方程:

$$d\sigma_r/dD + 2\sigma_r/D(1-A-AB) = -2A(1+B)K/D \cdot (16|c_1|tg^3\alpha/D^3)^m \quad (18)$$

式中 $A = 1/\cos\alpha$; $B = \mu ctg\alpha$, 由边界条件 $\sigma_r|_{D=D_a} = 0$, 代入 c_1 的值, 方程的解为:

$$\sigma_r = \{ -2A(1+B)K(4v_0 D_b^2 \sin\alpha)^m / [2(1-A-AB) - 3m] \cdot D^{-3m} \} \cdot [1 - (D/D_a)^{3m-2(1-A-AB)}] \quad (19)$$

所求单位挤压力即为 $D = D_b$ 时的 σ_b .

$$\sigma_b = \{ -2A(1+B)K(4v_0 D_b^2 \sin\alpha)^m / [2(1-A-AB) - 3m] \cdot D_b^{-3m} \} \cdot [1 - (D_b/D_a)^{3m-2(1-A-AB)}] \quad (20)$$

经上述改进得 (20) 式, 此式可计算变形区的应力绝对量, 因而更有意义. 另外 Tang 所提出扁坯通过锥形模的公式也可以做同样改进^[1].

4 理论计算公式的实验验证

实验在英国 MAYES-50E 材料实验机上进行, 试验材料为 Zn-Al 共析合金. 用压缩试样的方法所测材料参数 $K = 107.60 \text{ MPa} \cdot s^m$, $m = 0.43$, $\mu = 0.17$, 实验温度为 $250 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 润滑剂采用硅油. 超塑性正挤压实验的基本参数为: 挤压速度 $1/60\text{s}$, 挤压温度 $250 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 挤压试件的平均原始尺寸为 $\Phi 29.96 \text{ mm} \times 25.0 \text{ mm}$, 凹模尺寸为 $D_b = 29.96 \text{ mm}$, $D_a = 15.10 \text{ mm}$, $\alpha = 45(^\circ)$, 实测平均变形力 27.44 kN , 即单位压力 38.91 MPa , 将上述参数代入 (9) 式得 $\sigma_b = 33.71 \text{ MPa}$, 代入 (20) 式得 $\sigma_b = 42.14 \text{ MPa}$, 坯料挤压后在挤压筒中的平均长度为 17.5 mm , 取 $\mu_0 = 0.1$, 将 σ_b 代入 (14) 式得 $\sigma_{\alpha} = 39.98 \text{ MPa}$, 将 σ_b 代入 (14) 式有 $\sigma_{\alpha} = 50.57 \text{ MPa}$, 计算值与

实测值接近,按改进的 Tang 公式得到的计算值偏高的多一些.上述计算式可用于工程中近似估算变形力的大小,并便于分析各工艺参数间的关系.

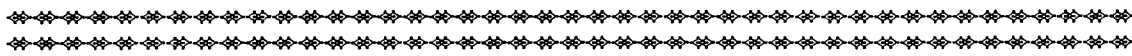
5 结论

本文用切块法得到的挤压力计算公式为(8)式,其单位挤压力计算式为(9)式,考虑了挤压筒的影响的变形力计算式为(14)式,按球面单元体推得的变形区挤压力的计算式为(19)式,单位挤压力为(20)式.上述计算式的理论计算值与实验值接近,可供工程中使用.

本文曾得到:刘载杰,刘渭贤,李培勋,郭殿俭等同志的帮助,在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Tang S. Mechanics of Superplasticity. New York: Rebert Krieger Publishing Co, 1979. 100
- 2 宋玉泉,张振军.超塑挤压力学的进展现状.吉林工业大学学报,1986, 4: 105 ~ 116
- 3 王祖唐.金属塑性加工工步的力学分析.北京:清华大学出版社,1987. 374
- 4 林治平.锻压变形力的工程计算.北京:机械工业出版社,1986. 287



(上接 537 页)

(2) 高精度型材轧制宽展模型必须分不同孔型系统和轧机布置形式,由现场统计回归得到.

(3) 本文通过大量现场实验,回归得到的模型 I 和模型 II 是分别适用于横列式和复二重小型、线材的高精度宽展模型.

参 考 文 献

- 1 王廷溥.轧钢工艺学.北京:冶金工业出版社,1980. 114
- 2 赵志业.金属塑性变形与轧制理论.北京:冶金工业出版社,1980. 335
- 3 上海冶金工业局孔型学习班.孔型设计.上海:上海人民出版社,1977. 69
- 4 斋藤好弘.线材,棒钢压延の变形,负荷の数式モデルとの孔型设计への应用.塑性と加工,1983, 24(10): 273
- 5 龚永平,苏敏文等.轧件在孔型中轧制时宽展模型的实验研究.塑性加工理论及新技术会议论文集,秦皇岛,1991. 311