

烧结材料塑性变形与致密^①

华 林 赵仲治

(武汉工学院)

摘 要

用实验确定了烧结材料的等效屈服强度,并以此为基础建立了烧结材料的后继屈服条件。用烧结铜进行了单向压缩、平面变形和闭式锻造粗试验,分析了预制坯变形抗力与致密的关系。提出了烧结材料塑性加工中预制坯的密度设计原则,并指出剪切塑性变形有利于致密。

关键词: 烧结材料 塑性理论 致密

随着粉末冶金工业的发展,烧结材料如高性能工程结构材料、硬质合金、摩擦材料、磁性材料、难熔材料、过滤材料以及新型超导材料等的应用日益广泛;相应的塑性加工工艺如锻造、挤压、轧制、等静压等在烧结制品的生产中变得越来越重要。在这种情况下,学者们已对烧结材料的塑性理论作了初步探讨^[1~4],并为烧结材料的生产工艺设计和质量分析控制提供了一定的理论依据。在此基础上,本文将对烧结材料成形工艺中的变形与致密行为作进一步研究。不过,由于篇幅所限,只准备对其烧结体变形的第一个阶段,即由烧结密度变化到理论密度的阶段,展开讨论。

1 塑性变形理论基础

1.1 质量不变条件

烧结材料通常包含 20 vol.-% 的内部孔洞,故塑性加工中,除了产生形变外,孔洞也被锻合,即在宏观上表现出体积缩小和密度提高。烧结材料在塑性变形中的这种密度提高的现象称为致密,它也是烧结材料能通过塑性加工提高其机械物理性能的主要原因。

烧结体变形的第一阶段可视为烧结材料与

孔洞内气体的两相机械混合物塑性变形过程,其气相的变形抗力极小,不冷作硬化,可压缩性大,可塑性强,故不遵守体积变形法则,但遵守质量不变法则,后者可表示如^[1~4]

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v + d\varepsilon_p &= 0 \\ \text{或 } d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 + \frac{d\rho}{\rho} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 $d\varepsilon_v$ 、 $d\varepsilon_p$ —体积应变和密度应变增量;

$d\varepsilon_1$ 、 $d\varepsilon_2$ 、 $d\varepsilon_3$ —主应变增量;

$d\rho$ 、 ρ —相对密度增量和相对密度

对于烧结材料预制坯,若经塑性加工后产生体积应变 ε_v ,则由(1)式积分得其相对密度和密度为

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_0 e^{-\varepsilon_v} \\ d &= d_0 e^{-\varepsilon_v} \end{aligned} \right\} (2)$$

式中 ρ_0 、 d_0 —预制坯变形前的相对密度和密度;

ρ 、 d —预制坯变形后的相对密度和密度

1.2 横向变形

横向变形可以用圆柱体试样单向压缩实验测定。对于熔铸致密材料,其单向压缩变形中,横向应变为轴向应变的二分之一,即泊松比 ν 为 0.5。对于烧结材料,由于塑性变形中

^①于 1992 年 5 月 16 日收到

内部孔洞的闭合, 其轴向变形不可能全部转化为两个横向变形, 所以它的横向变形能力较致密材料小, 亦即其泊松比小于 0.5。实验研究表明, 烧结材料塑性变形中的泊松比与材质及初始密度无关, 仅为变形瞬时相对密度的函数^[1,3], 其表达式为 $\gamma = 0.5\rho^a$, 且热变形中 $a=2$, 冷变形中 $a=1.92$ 。事实上根据作者的分析, 无论热变形还是冷变形都可取 $a=2$, 这样不仅能使计算方便, 误差也比较小^[4], 故本文在分析时取

$$\gamma = 0.5\rho^2 \quad (3)$$

1.3 屈服条件

烧结材料的屈服不仅与应力偏量有关, 也与应力球量有关, 这已为生产实践所证实。屈服条件的基本形式为^[1~3]

$$\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + (\alpha\sigma_m)^2 = (\beta y_0)^2 \quad (4)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —主应力;

σ_m —静水压力, $\sigma_m = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$;

y_0 —基体材料屈服强度;

α 、 β —与相对密度有关的、分别表示静水压和孔隙度对屈服强度的影响的系数

在冷态塑性变形中, 烧结材料基体材料的屈服强度 y_0 是一个变量, 故 (4) 式只能用于分析初始屈服状态, 而不便于研究塑性加工中的后继屈服和变形致密规律。为此, 作者用烧结材料后继等效屈服强度 y 代替该式的 βy_0 , 于是有

$$\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + (\alpha\sigma_m)^2 = y^2 \quad (5)$$

根据塑性势理论和屈服函数式 (5) 得应力-应变关系为

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon_1 &= d\lambda[\sigma_1 - (1 - \frac{2}{9}\alpha^2)\sigma_m] \\ d\epsilon_2 &= d\lambda[\sigma_2 - (1 - \frac{2}{9}\alpha^2)\sigma_m] \\ d\epsilon_3 &= d\lambda[\sigma_3 - (1 - \frac{2}{9}\alpha^2)\sigma_m] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $d\lambda$ —非负的常数

2 等效屈服强度的确定

数据确定烧结材料的等效屈服强度时, 采用圆桂试样单向压缩实验, 以直角坐标 1, 2, 3 分别表示径向、环向和轴向, 则在单向压缩变形中, 应力分量和应变分量分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 &= -\sigma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon_1 &= d\epsilon_2 = -\gamma d\epsilon_3 \\ d\epsilon_3 &= -d\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将 (7) 式代入 (5) 式和 (6) 式, 并考

虑到 $\gamma = -\frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_3} = 0.5\rho^2$ 整理得

$$y = (1 + \alpha^2/9)^{1/2} \cdot \sigma \quad (9)$$

$$\alpha = 3[(1 - \rho^2)/(2 + \rho^2)]^{1/2} \quad (10)$$

烧结材料单向压缩塑性变形的轴向屈服应力 σ 与材质、变形致密程度、变形温度以及初始密度等有关。为了确定 σ 和 y , 以烧结铜为例进行了室温单向压缩实验。烧结气氛为分解氨, 温度 $920^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 时间 2 h。试验设备为 WI-60 材料试验机。试样为圆柱体, 其端面经过平磨、抛光, 并涂以用酒精稀释的硬脂酸锌润滑剂。每个试样压缩十次, 每次都测量该次的压力和尺寸, 并通过数据处理获得其真实应力 σ 和真实应变 ϵ 。根据 σ - ϵ 实验曲线形状进行曲线拟合和回归分析得到各个试样的 σ - ϵ 回归方程, 如表 1 所示。

表 1 单向压缩试样原始参数和实验回归方程

样号	高度/mm	直径/mm	相对密度	回归方程
1	44.80	29.88	0.9049	$\sigma = 391.26\epsilon^{0.3645}$
2	45.08	29.74	0.8568	$\sigma = 384.78\epsilon^{0.4215}$
3	44.68	29.62	0.8211	$\sigma = 343.62\epsilon^{0.4061}$
4	45.28	29.72	0.9043	$\sigma = 395.71\epsilon^{0.3733}$
5	44.48	29.35	0.8393	$\sigma = 344.39\epsilon^{0.4072}$
6	45.08	29.65	0.8631	$\sigma = 337.97\epsilon^{0.3771}$
7	40.68	29.08	0.8729	$\sigma = 398.91\epsilon^{0.4273}$
8	40.60	29.22	0.8658	$\sigma = 372.09\epsilon^{0.3895}$
9	43.30	29.15	0.8566	$\sigma = 379.04\epsilon^{0.4304}$
10	43.44	29.20	0.8482	$\sigma = 353.26\epsilon^{0.4051}$

* σ 的单位为 MPa

从表 1 的回归方程看出, 不同初始密度的烧结铜试样的塑性系数 A 和硬化指数 n 是不同的。同样, 采用曲线拟合和回归分析得出 A 、 n 与 ρ_0 的函数关系如下

$$\left. \begin{aligned} A &= -196.81 + 656.69\rho_0 \\ n &= 0.9301 - 0.6171\rho_0 \end{aligned} \right\} (11)$$

于是烧结铜单向压缩变形时真实应力—应变关系为

$$\sigma = A\varepsilon^n \quad (12)$$

将 (8) 式代入 (1) 式, 并考虑到 $\varepsilon = 0.5\rho^2$ 得

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= d\rho / [\rho (1-\rho^2)] \\ \varepsilon &= \ln \left(\frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{\frac{1-\rho_0^2}{1-\rho^2}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式给出了烧结材料单向压缩时的轴向应变与相对密度的函数关系。将 (13) 式代入 (12) 式又得烧结材料单向压缩时轴向应力与相对密度的关系

$$\sigma = A \left(\ln \frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{\frac{1-\rho_0^2}{1-\rho^2}} \right)^n \quad (14)$$

将 (14) 式代入 (9) 式则得烧结材料的等效屈服强度

$$y = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{9}} A \left(\ln \frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{\frac{1-\rho_0^2}{1-\rho^2}} \right)^n \quad (15)$$

当烧结铜预制坯的初始密度为松装密度即 $\rho_0 \approx 0.3$ 时, 则该密度的预制坯将丧失机械强度。将 $\rho_0 = 0.3$ 代入 (11) 式得 $A = 0$, 这表明回归方程外推到最小相对密度时是正确的。当烧结铜预制坯的初始密度 $\rho_0 = 1$ 即烧结铜变为致密铜时, 则由 (11) 式得 $A = 460$ Mpa, $n = 0.313$, 分别接近于^[5]致密铜的塑性系数 448 Mpa 和硬化指数 0.443, 这表明回归方程外推到致密体也是合理的。

3 变形力与致密

烧结材料在塑性变形中致密到某一密度时, 所需的变形力不仅与成形工艺特点有关, 而且与预制坯的初始密度有关, 而预制坯的初

始密度取值对压制工艺和塑性加工工艺都有较大的影响。为此, 采用单向压缩, 平面变形和闭式镦粗实验 (图 1) 对预制坯变形抗力与致密关系进行研究。试样制备及实验条件与前述相同, 但平面变形采用矩形烧结铜试样, 其原始参数如表 2 所示。闭式镦粗采用圆柱体烧结铜试样, 其原始参数如表 3 所示。实验结果分别如图 2, 3, 4 所示。

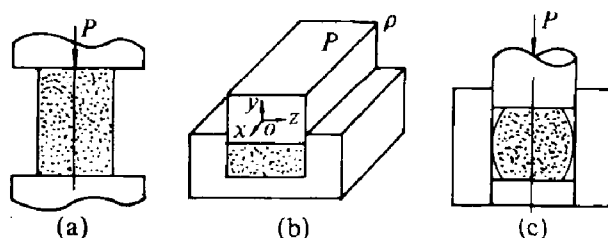


图 1 实验方式示意图

(a) —单向压缩; (b) —平面变形; (c) —闭式镦粗

表 2 平面变形试样原始数据

试样号	质量/g	长/mm	宽/mm	高/mm	相对密度
11	134.3	44.11	15.11	29.82	0.743
12	142.6	44.55	14.98	29.39	0.817

表 3 闭式镦粗试样原始数据

试样号	质量/g	直径/mm	高度/mm	相对密度
13	107.1	23.62	32.22	0.827
14	107.0	23.36	32.96	0.849

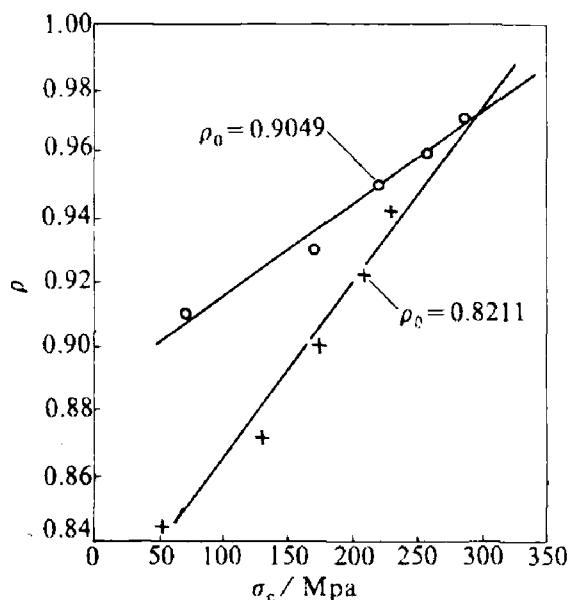


图 2 单向压缩实验结果

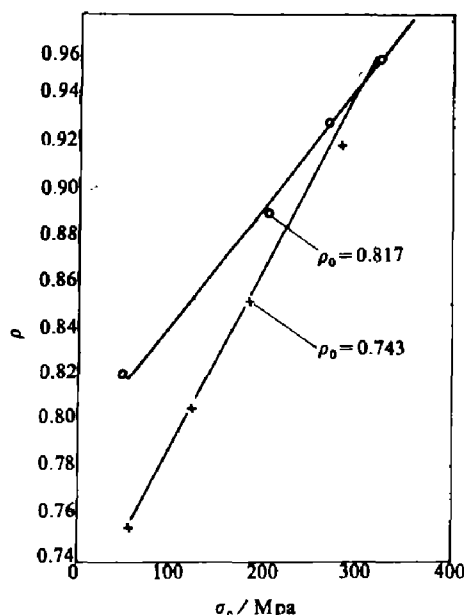


图3 平面变形实验结果

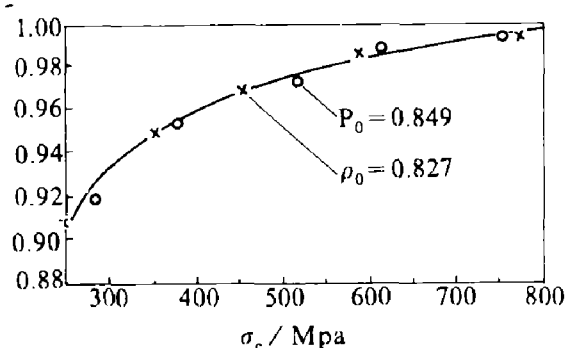


图4 闭式锻粗实验结果

由图1~3可知, 烧结材料的变形与致密有以下特点:

(1) 变形抗力 σ_c 随着预制坯的密度 (ρ) 增加而迅速增加。其中, 单向压缩和平面变形的 σ_c - ρ 曲线形式近似且斜率较大; 而闭式锻粗的 σ_c - ρ 曲线平缓, 斜率较小。这主要是由于单向压缩和平面变形中预制坯可以产生较大的剪切塑性变形, 并以此方式致密; 而闭式锻粗中预制坯主要以多向压缩的方式致密, 其剪切变形仅发生在预制坯的角部。可见剪切塑性

变形的致密效率较多向压缩的致密效率高;

(2) 初始密度较低的预制坯, 其 σ_c - ρ 曲线的斜率大, 即初始密度较低的预制坯致密速度较快;

(3) 若要通过塑性变形的方式使烧结材料致密到接近理论密度, 须选用初始密度较低的预制坯, 并使之产生较大的剪切塑性变形。因初始密度较小的预制坯既有利于压制工艺, 又易于在塑性加工中变形和致密。但应注意, 密度较小的预制坯塑性较差, 其最优密度应以满足成形塑性的要求为准。

4 结论

(1) 烧结铜的单向压缩应力与密度的关系为

$$\sigma = A \left[\ln \sqrt{\frac{(1-\rho_0^2)}{(1-\rho^2)}} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right]^n$$

(2) 烧结材料的后继等效屈服强度为

$$y = A \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{9} \ln \left[\sqrt{\frac{1-\rho_0^2}{1-\rho^2}} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right]^n}$$

(3) 根据本文的试验结果, 用较低密度的烧结坯进行单向压缩和平面变形加工, 致密效率比较高。

参考文献

- 1 Kubn H A, Downey C L. Int. J. Powder Metallurgy, 1971, 7 (1): 15~25.
- 2 Shima S, Oyane M. Int. J. Mechanical Science, 1976, 18: 285~291.
- 3 Doraivelu S M et al. Int. J. Mechanical Science, 1984, 26 (9110): 527~535.
- 4 Zhao Zhongzhi, Hua Lin, Wang Huachang. Int. J. Science of sintering, 1987, 19 (2): 65~80
- 5 黄明志. 金属力学性能. 西安: 西安交通大学出版社, 1986