

金属粉末的模压致密化特性^①

孙雪坤 苗雨阳 王国栋

(东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110006)

摘 要 分析了金属粉末模压下的致密化过程。将岩石力学中的 Cam-Clay 模型用于该过程的分析, 并与常用的 Felck 和 Shima 模型进行比较。经实验验证得知: Cam-Clay 模型能够较精确地分析金属粉末的模压致密化过程, 而 Felck 和 Shima 模型的分析误差较大。

关键词 金属粉末 模压 致密化特性 Cam-Clay 模型

中图法分类号 TF124.32

粉末材料冷压致密化过程分析中常用的是 Shima^[1]和 Fleck^[2]模型, Fleck 模型是一种理论模型, 而 Shima 模型是从铜粉冷压实验中总结出来的。Kwon^[3]将上述两模型用于不锈钢粉末模压过程的数值计算, 而 Kim^[4]认为 Fleck 模型适用于工具钢粉末的冷等静压分析。孙雪坤^[5]通过对金属粉末冷等静压过程的分析得出, 不考虑粉末基体材料塑性强化的 Fleck 模型是最佳的。近年来, 人们也试图将新的材料分析模型如岩石力学中的 Cam-Clay 模型^[6]引入陶瓷粉末的冷压过程分析^[7, 8]。本文针对 Brown^[9]的关于铜粉、铁粉的模压实验进行分析, 并再次用铜粉的模压实验进行验证, 结果表明: Cam-Clay 模型可较好地分析金属粉末的模压致密化过程。

1 多孔介质的塑性变形模型

1.1 Shima 模型

Shima^[1]用铜粉的模压实验数据总结出多孔介质的塑性变形模型—Shima 模型:

$$\begin{aligned} [q/\sigma_m]^2 + 2.49^2 \cdot (1-D)^{1.028} \cdot \\ [p/\sigma_m]^2 - D^5 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 p 是静水压力, q 是 Mises 等效应力, D 是多孔介质的相对密度 (多孔介质密度与基体材料密度之比), σ_m 为粉末基体的屈服应力。

Shima 的原始模型中, σ_m 为常数, 即不考虑塑性硬化。但 Kwon^[3]和 Kim^[4]却将有塑性硬化的 Shima 模型引入 ABAQUS 程序的 U-MAT 模块中。本文采用的塑性硬化规律与文献[3]中的相同, 具体如下:

$$\text{铁粉} \quad \sigma_m = 156 + 404.5 (\epsilon_m^p)^{0.4885}$$

$$\text{铜粉} \quad \sigma_m = 150 + 400 (\epsilon_m^p)^{0.4885}$$

该塑性硬化规律是从相应的基体材料的实验数据拟合得到的。

1.2 Fleck 模型

Fleck^[2]从理论上推导出多孔介质的塑性变形模型—Fleck 模型:

$$\left| \frac{\sqrt{5}p}{3p_y} \right|^2 + \left| \frac{5q}{18p_y} + \frac{2}{3} \right|^2 - 1 = 0 \quad (2)$$

式中 p_y 为粉末材料不同相对密度下的塑性参数, 且

$$p_y = 2.97 \cdot D^2 (D - D_0) / (1 - D_0) \cdot \sigma_m;$$

D_0 为多孔介质的初始相对密度。

1.3 Cam-Clay 模型

从 ABAQUS 手册^[6], 可将常用于岩石力学的 Cam-Clay 模型写为

① 辽宁省博士启动基金资助项目 971043 收稿日期: 1998-09-14; 修回日期: 1998-12-22
孙雪坤, 男, 32岁, 博士, 副教授

$$\frac{1}{\beta^2} \cdot (\frac{p}{a} - 1)^2 + (\frac{t}{Ma})^2 - 1 = 0 \tag{3}$$

而

$$t = q/g$$
$$g = 2K/[1 + K + (1 - K)(r/q)^3]$$

且

$$a = p/(1 + \beta)$$
$$p_c = p_c \epsilon_v^l$$

式中 K 是自定义常数, 且 $0.778 \leq K \leq 1.0$, r 是第三应力不变量, p_c 为多孔材料在静水压力下关于体积应变 ϵ_v^l 的硬化曲线, β 是形状参数, M 是 $p-t$ 平面上临界状态线的斜率。

本文采用如下参数:

$$t = q \quad \beta = 1$$

铁粉 $M = 6.7,$

$$p_c = -0.002 + 104.48 \epsilon_v^l - 115.37(\epsilon_v^l)^2 + 485.18(\epsilon_v^l)^3$$

铜粉 $M = 6.0,$

$$p_c = -0.11196 + 214.55 \epsilon_v^l - 1352.0(\epsilon_v^l)^2 + 1206.3(\epsilon_v^l)^3$$

M 和 p_c 是从文献[9]的实验数据拟合得出。

2 结果与分析讨论

本文首先分析文献[9]中的铜粉、铁粉模压实验数据, 粉末材料的性能见表 1。

图 1 为初始相对密度 $D_0 = 0.63$ 的铜粉模压下的相对密度随静水压力变化曲线, 图 2 为初始相对密度 $D_0 = 0.38$ 的铁粉模压下的相对密度随静水压力变化曲线, 图 3 为 Cam-Clay 模型中的相对密度随静水压力变化曲线。由图 1 可以看到, 考虑或不考虑粉末基体塑性硬化的 Shima 模型的分析结果与实验结果均相差较

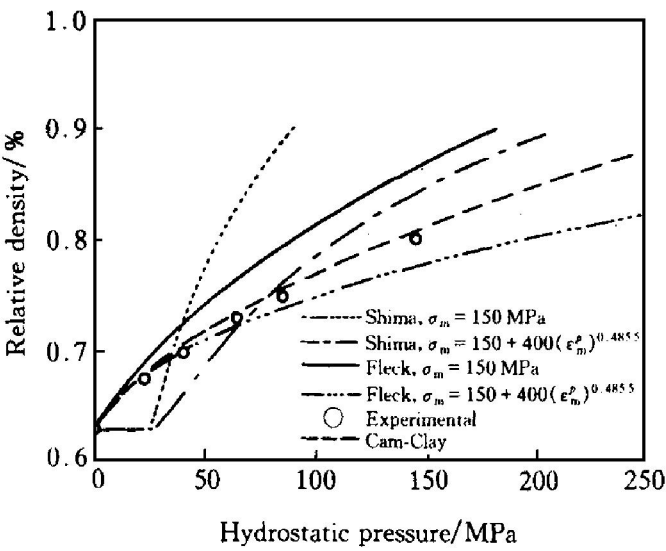


图 1 模压下铜粉的相对密度—静水压力曲线
($D_0 = 0.63$, Brown^[5]的实验数据)

Fig. 1 Curves of relative density—hydrostatic pressure of Cu powder after model compressed

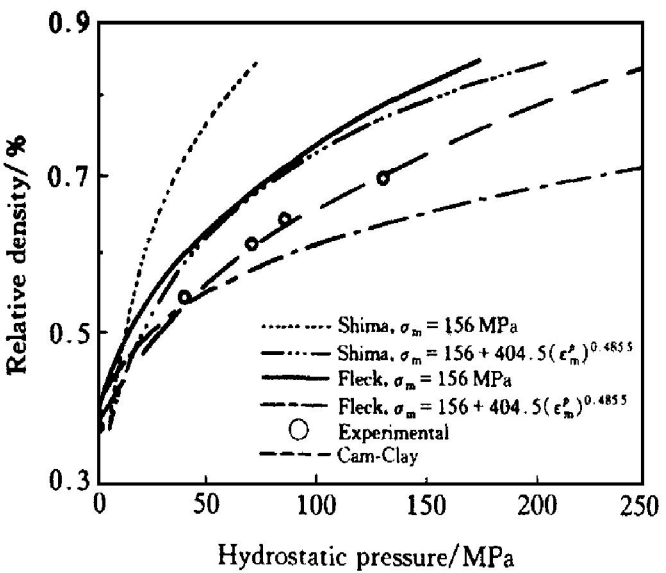


图 2 模压下铁粉的相对密度—静水压力曲线
($D_0 = 0.38$, Brown^[5]的实验数据)

Fig. 2 Curves of relative density—hydrostatic pressure of Fe powder after model compressed

表 1 粉末材料的性能

Table 1 Properties of powder materials

Alloy	Average particle size / μm	Approximate morphology	Production method	Maximum particle size / μm	Approximate loose packing relative density / %
MH-100Iron	45	Very irregular	Hydrogen reduction	150	0.38
Copper	150	Spherical	Gas atomization	180	0.63

大,特别是在载荷较小时,Shima模型存在较明显的相对密度不变区域,这与实际相背离。对于Fleck模型,若考虑基体塑性硬化,理论分析结果较实验结果低,而不考虑基体塑性硬化的分析结果较实验结果高。图1中还可以明显看出,Cam-Clay模型的分析结果与实验数据符合最好。

可以看到,考虑或不考虑粉末基体塑性硬化的Shima模型的分析结果均较实验结果高得

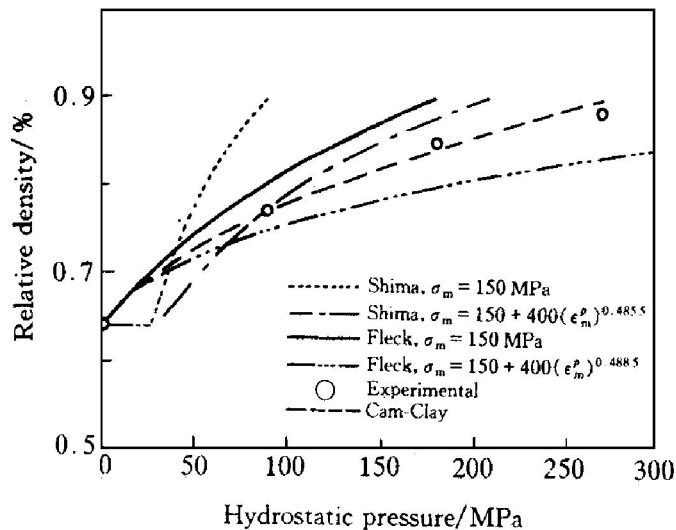


图3 模压下铜粉的相对密度—静水压力曲线($D_0 = 0.64$)

Fig. 3 Curves of relative density—hydrostatic pressure of Cu powder after model compressed

多,且Fleck模型的分析结果也不尽如人意,而只有Cam-Clay模型可较好地与实验相符。

为了进一步验证Cam-Clay模型的适用性,在韩国浦相工业大学机械系进行了初始相对密度为0.64的铜粉模压实验,由图3可以看到,Cam-Clay模型的分析结果与实验最相符。

REFERENCES

- 1 Shima S and Oyane M. *Int J Mech Sci*, 1976, 18: 285.
- 2 Fleck N A *et al.* *J Mech Phys Solids*, 1992, 40(5): 1139.
- 3 Kwon Y S *et al.* *Computers Geotech*, 1988, 5: 307.
- 4 Kim K T and Kim J S. *J Mech Phys Solids*, 1993, 40(1): 77.
- 5 Sun Xuekun(孙雪坤), Shen Yifu(沈以赴) and Kim Kitai. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*, 1998, 8(Suppl. 1): 132.
- 6 Hibbitt B *et al.* *ABAQUS Theory Manual*. Netherland: Elsevier Science Ltd, Ver 5, 1996, 5.
- 7 Hill J M and Wu Y H. *J Mech Phys Solids*, 1993, 40(1): 77.
- 8 Kim M K and Downey C L. *Computers Geotech*, 1988, 5: 307.
- 9 Stuart Brown *et al.* *J Mech Phys Solids*, 1994, 42(3): 383.

DIE COMPACTION DENSIFICATION BEHAVIOR OF METAL POWDERS

Sun Xuekun, Miao Yuyang and Wang Guodong
State Key Laboratory of Rolling & Automation,
Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China

ABSTRACT Die compaction densification behavior of metal powders was analyzed. Cam-Clay model in rock mechanics was introduced, and compared with often-used Shima model and Fleck model. From experimental comparison, it revealed that Cam-Clay model can simulate well die compaction densification behavior of metal powders, while Shima model and Fleck model can't.

Key words metal powder die compaction densification behavior Cam-Clay model

(编辑 黄劲松)