

文章编号:1007-2985(2011)04-0055-05

基于分形理论的高速压制粉末颗粒摩擦力分析*

谷成玲

(莱芜职业技术学院, 山东 莱芜 271100)

摘要:按 Bowden 和 Tabor 的原始处理, 基于分形理论将总黏着摩擦系数表示为弹性及塑性区中的黏着摩擦系数的组合, 建立了黏着摩擦系数的分形模型和粉末颗粒的内摩擦与分形维数的数学模型. 通过函数曲线分析了粉末颗粒的分形维数对总的黏着摩擦系数、粉末颗粒的内摩擦力的影响. 研究表明: 对于一定的分形维数, 总的黏着摩擦系数随归一接触面积的增大而急剧减小, 粉末颗粒的内摩擦力随粉末颗粒的分形维数的增大和温度的升高而很快达到材料的塑性剪切强度值.

关键词:分形维数; 高速压制; 黏着摩擦系数; 内摩擦

中图分类号: TB383; O29

文献标志码: A

2001 年瑞典的 Höganas AB 公司的 Paul Skoglund 提出了高速压制 (High Velocity Compaction, 简称 HVC) 技术, 其压制速度比传统压制高 500~1 000 倍, 压机锤头速度高达 2~30 m/s, 液压驱动的锤头重达 5~1 200 kg, 粉末在 0.02 s 之内通过高能量冲击进行压制. 锤头的质量和它在冲击瞬间的速度决定了压制能量的大小和材料致密的程度^[1-2]. HVC 中, 粉体因受到锤头的强烈冲击而高速运动, 粉末颗粒间以及颗粒与模具之间的相互碰撞和摩擦, 使粉末颗粒的接触点产生高温和大量的热能^[1-2], 且使得粉末颗粒易发生塑性变形, 而表现出明显的黏性性质. 目前, 分形几何作为一种工具用于表征表面构形已引起人们的关注^[3-4], Majumdar 和 Bhushan^[5]建立了粗糙表面间弹塑性接触的分形模型, 由于此模型忽略了接触斑点间的相互作用, 因此对于低载荷情况下有效, 而对于高载荷情况下并不适用. 陈大年, 陈建平^[6]研究了接触斑点的黏着摩擦系数, 总的粘着摩擦系数被表示为弹性接触区与塑性接触区的粘着摩擦系数的组合.

笔者利用分形几何方法研究分形参数与黏着摩擦系数的关系, 然后在此基础上推导粉末颗粒内摩擦的计算公式, 最后通过粉末颗粒内摩擦力计算公式的函数图像分析了分形参数对粉末颗粒内摩擦力的影响.

1 粉末颗粒的总黏着摩擦系数的计算

高速压制成形过程中, 既有弹性变形也有塑性变形, 故颗粒与颗粒间总的真实接触面积 A_c 为弹性接触面积 A_{ce} 与塑性接触面积 A_{cp} 之和, 即

$$A_c = A_{ce} + A_{cp}. \quad (1)$$

按 Bowden 和 Tabor 原始处理, 黏着摩擦系数 μ_A ^[6] 被定义为

* 收稿日期: 2011-03-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2006CB605207); 湖南省科技计划资助项目(2007RS4028); 中南大学博士后基金项目

作者简介: 谷成玲(1983-), 女, 山东莱芜人, 莱芜职业技术学院教师, 硕士, 主要从事分形理论及其应用研究.

$$\mu_A = \frac{A_c s}{W}, \quad (2)$$

其中: s 为粉末颗粒表面黏着的剪切应力; W 为作用于粉末颗粒表面的法向载荷. 真实接触面积 A_c 为

$$A_c = W/p, \quad (3)$$

其中 p 为法向应力.

先考虑弹性接触区域, A_{ce}, A_{cp} 为各弹塑性接触点面积 a 之累加, 即

$$A_{ce} = \int_{a_{e_1}}^{a_{e_2}} n(a) a da, A_{cp} = \int_{a_{p_1}}^{a_{p_2}} n(a) a da, \quad (4)$$

其中: $n(a)$ 为接触点的面积分布密度函数; $a_{e_1}, a_{e_2}, a_{p_1}, a_{p_2}$ 分别表示弹性接触区和塑性接触区的最小和最大接触点面积.

如果各个弹性接触点的泊松比 ν 都一样, 则弹性接触区域的黏着摩擦系数 μ_{Ae} 可以表示为

$$\mu_{Ae} = \frac{1-2\nu}{2}. \quad (5)$$

按照 Tabor 假设^[3], 塑性流动将发生时, 法向应力 p 和剪切应力 s 满足方程

$$p^2 + \gamma s^2 = p_m^2, \quad (6)$$

其中: p_m 为屈服压力, 也就是发生塑性接触的平均正应力; γ 为实验确定的常数, 其值介于 3 ~ 25. 将方程 (6) 代入 (2), (3) 式, 得到塑性接触区域中的黏着摩擦系数为

$$\mu_{Ap} = \frac{k}{p} = \frac{k}{\sqrt{p_m^2 - \gamma k^2}}, \quad (7)$$

其中 k 和 p_m 分别为塑性接触区域中的平均剪切流动应力和平均屈服压力.

因此, 粉末颗粒的总黏着摩擦系数 μ_A ^[7] 可以被表示为

$$\mu_A = \frac{\mu_{Ae} \int_{a_{e_1}}^{a_{e_2}} W_{ae}(a) n(a) da + \mu_{Ap} \int_{a_{p_1}}^{a_{p_2}} W_{ap}(a) n(a) da}{\int_{a_{e_1}}^{a_{e_2}} W_{ae}(a) n(a) da + \int_{a_{p_1}}^{a_{p_2}} W_{ap}(a) n(a) da}, \quad (8)$$

其中 $W_{ap}(a)$ 为作用于粉末颗粒塑性接触点 a 上的法向载荷.

假设 Tabor 的微粒作用与接合点增长模型能够被应用于单个塑性接触点, 且定义局部黏着摩擦系数为

$$\mu_{ap} = \left(\frac{k}{\sqrt{p_m^2 - \gamma k^2}} \right)_a. \quad (9)$$

按黏着摩擦理论, 有如下关系:

$$(s)_a = \mu_{ap} (p)_a, \quad (10)$$

将 (7) 式代入 (10) 式, 则

$$(p)_a = \frac{(p_m)_a}{(1 + \gamma \mu_{ap}^2)^{1/2}}. \quad (11)$$

当粉末颗粒的接触点处于弹性变形时, 接触点上的法向弹性载荷 $W_{ae}(a)$ 由 Hertzian 理论给定为

$$W_{ae}(a) = \frac{4Ea^{3/2}}{3\pi^{3/2}R}, \quad (12)$$

其中: E 为 Hertzian 分析的组合弹性模量; R 为粉末颗粒接触点微粒顶部的曲率半径.

Majumdar 和 Bhushan^[5] 已给出曲率半径 R 的表达式为

$$R = \frac{a^{D/2}}{\pi^2 G^{D-1}}, \quad (13)$$

其中: D 为粉末颗粒表面的分形维数; G 为粉末颗粒表面的一种特征长度.

将 (13) 式代入 (12) 式, 则

$$W_{ae}(a) = \frac{4\sqrt{\pi}EG^{D-1}a^{(3-D)/2}}{3}, \quad (14)$$

这样,如果接触点处于弹性变形,则

$$\frac{4\sqrt{\pi}EG^{D-1}a^{(3-D)/2}}{3} < \frac{(p_m)_a}{(1+\gamma_a\mu_{ap}^2)^{1/2}}, \quad (15)$$

从而得到区分弹性与塑性区域的临界面积 a_c ,将(15)式的小于号改为等于号,从而求出

$$a_c = \frac{G^2}{[3p_m^2/4\sqrt{\pi}E(1+\gamma_a\mu_{ap}^2)]^{2/(D-1)}}. \quad (16)$$

如果 $a > a_c$,接触点处于弹性变形状态,此时接触点上的弹性载荷 $W_w(a)$ 由(14)式确定.如果 $a < a_c$,那么接触点处于塑性变形状态,接触点上的载荷为

$$W_{ap}(a) = \frac{(p_m)_a a}{(1+\gamma_a\mu_{ap}^2)^{1/2}}, \quad (17)$$

结合(5),(14),(17)式可以将(8)式写为

$$\mu_A = \left[\frac{1-2\nu}{2} \int_{a_c}^{a_l} \frac{4\sqrt{\pi}EG^{D-1}a^{(3-D)/2}}{3} n(a) da + \mu_{Ap} \int_{a_s}^{a_c} \frac{(p_m)_a}{(1+\gamma_a\mu_{ap}^2)^{1/2}} an(a) da \right] / W, \quad (18)$$

其中:

$$W = \int_{a_c}^{a_l} \frac{4\sqrt{\pi}EG^{D-1}a^{(3-D)/2}}{3} n(a) da + \int_{a_s}^{a_c} \frac{(p_m)_a}{(1+\gamma_a\mu_{ap}^2)^{1/2}} an(a) da, \quad (19)$$

a_l 和 a_s 分别为最大和最小接触点的面积.接触点的面积分布函数 $n(a)$ 和真实接触面积 A_c 可由 $n(a) = \frac{Da_l^{D/2}}{2a^{(D/2+1)}}$ 和 $A_c = \frac{D}{2-D}(a_l^{D/2} - a_s^{D/2})$ ^[5,8] 给出.

为了简单起见,笔者考虑 $(p_m)_a, \gamma_a$ 及 μ_{ap} 不依赖于接触点且等于塑性接触区中相应平均值的情况.此时,黏着摩擦系数为

$$\mu_A = \begin{cases} \left(\frac{1-2\nu}{2} W_e + \frac{k}{p_m} W_p \right) / (W_e + \frac{(p_m^2 - \gamma k^2)^{1/2}}{p_m} W_p) & a_l > a_c, \\ \frac{k}{(p_m^2 - \gamma k^2)^{1/2}} & a_l < a_c, \end{cases} \quad (20)$$

其中:

$$W_p = p_m \left(\frac{D}{2-D} \right)^{(2-D)/2} \cdot (A_c^*)^{D/2} \cdot (a_c^*)^{(2-D)/2} \cdot A_a; \quad (21)$$

$$W_e = A_a E \cdot \frac{4\sqrt{\pi}}{3} (G^*)^{D-1} \frac{D}{(3-2D)} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{D/2} \cdot (A_c^*)^{D/2} \left[\left(\frac{(2-D)A_c^*}{D} \right)^{(3-2D)/2} - (a_c^*)^{(3-2D)/2} \right]; \quad (22)$$

$A_c^* = A_c/A; a_c^* = a_c/A_a; G^* = G/\sqrt{A_a}; A_a$ 为名义接触面积.

2 分形维数及归一接触面积对黏着摩擦系数的影响分析

Pullen 和 Williamson^[9] 研究了接触点的微粒间的相互作用,发现屈服压力 p_m 为

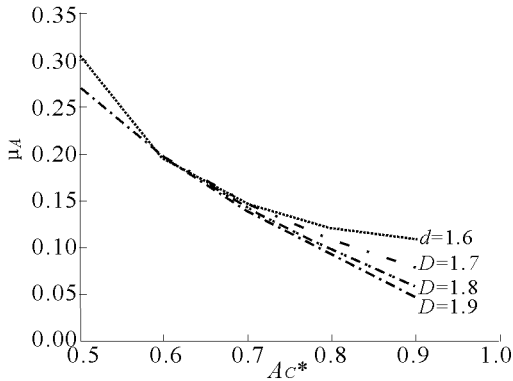
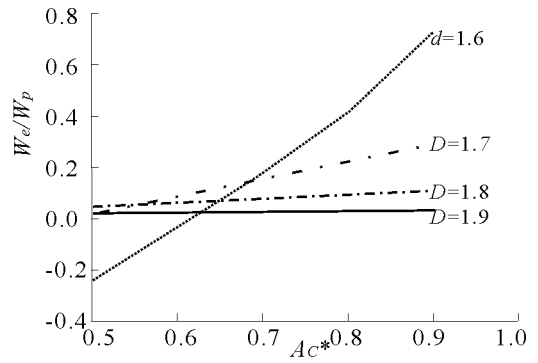
$$p_m = \frac{\sigma_y}{1-A_c^*}, \quad (23)$$

如果最大接触面积大于临界接触面积,那么(23)式为

$$p_m = \frac{\sigma_y}{1-A_{cp}^*}, \quad (24)$$

其中: $A_{cp}^* = \frac{D}{2-D}(a_l^*)^{D/2}(a_c^*)^{(2-D)/2}; a_l^* = a_l/A_a$.

为研究分形几何参数及归一的接触面积对黏着摩擦系数 μ_A 的影响,对于铁粉,取 $E = 206$ GPa, $\sigma_y = 0.355$ GPa, $k = 0.15$ GPa, $\nu = 0.3, r = 9.0, a_l = 10^{-6}$ m. 图 1, 2 表示了对于不同的 D , 当 $G^* = 10^{-5}$ 时, $W_e/W_p, \mu_A$ 随 A_c^* 的变化. 可以看到, W_e/W_p 随 A_c^* 增大而上升, 而 μ_A 随 A_c^* 急剧减小的规律. 对于 $D = 1.2 \sim 1.5$ 并不存在弹性接触区, 对于 $D = 1.6 \sim 1.9$, 不同的 D 值有不同的 $W_e/W_p - A_c^*$ 及 $\mu_A - A_c^*$ 曲线.

图 1 当 $G^* = 10^{-5}$ 时, μ_A 随 A_C^* 的变化图 2 当 $G^* = 10^{-5}$ 时, W_e/W_p 随 A_C^* 的变化

3 HVC 中粉末颗粒内摩擦力的计算

粉末颗粒的塑性变形以及颗粒间的相互碰撞、孔隙塌缩、颗粒表层的破坏导致颗粒表面的沉热和熔化并发生焊接. 摩擦首先使界面附近材料软化, 之后进入热塑性剪切失稳, 在界面处将出现绝热剪切现象. 在高速压制条件下粉末颗粒能否发生上述过程, 在很大程度上取决于粉末颗粒间摩擦力的大小和摩擦生热的多少.

3.1 粉末颗粒内摩擦力的数学模型

笔者采用如图 3 所示的粉末颗粒的密排球堆积模型, 其中灰色区域代表孔隙位置. 当冲击压力自上而下通过粉末颗粒后, 球 1 和球 4 将横向膨胀. 与此同时, 孔隙必然要发生塌缩. 在孔隙 ABC 的塌缩过程中 AB 边与 AC 边对称拉长, 而球 1 的 BC 边强烈的拉伸并且贯入孔隙 ABC 中, 如图 3 所示, 球 1 表现为强烈的塑性变形, 此时必然在 B 点和 C 点伴随着剧烈的摩擦发生.

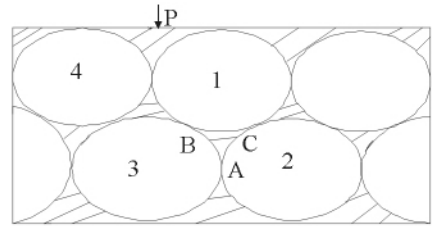


图 3 高速压制粉末的密排球堆积模型

根据摩擦的黏着理论, 两颗粒表面真实接触的面积很小, 接触处压力很高, 足以发生塑性变形, 并在接触区两表面发生冷焊. 当两表面相对滑动时, 这些黏着点被切断, 接着发生新的黏着. 因此, 粉末颗粒间的摩擦力应为真实接触面积 A_r 和材料剪切强度 τ_b 的乘积^[10], 即

$$F = A_r \cdot \tau_b. \quad (25)$$

一般情况下, 因材料表面有一定的粗糙度, 真实接触面积只占名义接触面积 (两表面为理想接触时的面积) 的很小一部分, 其计算公式为

$$A_r \cdot \tau_s = A \cdot P, \quad (26)$$

其中: σ_s 为材料屈服强度; A 为名义接触面积; P 为接触表面的正压力.

在 HVC 中, 因应变率升高, 粉末颗粒的塑性变形功随之升高. 由于压制时间仅为 0.02 s, 压坯的温度急剧升高, 从而该处的压坯被迫软化, 在软化处, 变形又增大, 使塑性功增加, 进一步使压坯软化, 直至进入塑性剪切. 当温度在 300 ~ 1 200 °C 变化时, 粉末的剪切强度 τ_b 与温度之间存在以下关系^[10]

$$\tau_b = \tau_0 (1 + \alpha \cdot T_*) \exp[-\beta(T - T_*)], \quad (27)$$

其中: τ_0 为粉末在常温下的剪切强度; α 为温度系数; β 表示粉末颗粒随温度上升而软化的系数; T 为粉末颗粒表面的当前温度; T_* 是与粉末有关的常数.

由 (24), (26) 式可以得到, 在高速压制情况下, 当温度变化时, 摩擦力随温度的变化表达式可表示为

$$F = A_r \tau_0 (1 + \alpha T_*) \exp[-\beta(T - T_*)], \quad (28)$$

将 A_r 代入 (28) 式, 则

$$F = A_r \tau_0 (1 + \alpha T_*) \exp[-\beta(T - T_*)] = \frac{D}{2} a_l^{D/2} (a_l^{D/2} - a_s^{D/2}) \tau_0 (1 + \alpha T_*) \exp[-\beta(T - T_*)]. \quad (29)$$

由(29)式可知,当材料种类确定后,2个颗粒间的摩擦力只取决于颗粒摩擦界面处的温度和2个颗粒的真实接触面积.但随着温度的升高,当材料强度下降到一定程度时,即使进一步加大塑性变形量,其塑性功也不再增加,从而摩擦力也就趋于一个稳定值.因此该摩擦力主要取决于2个颗粒的真实接触面积.在高速压制下,冲击压力很大,该面积将远大于自由接触时的面积.显然,表面光滑、粒度较大的颗粒,其摩擦力也将较大.

3.2 数值分析

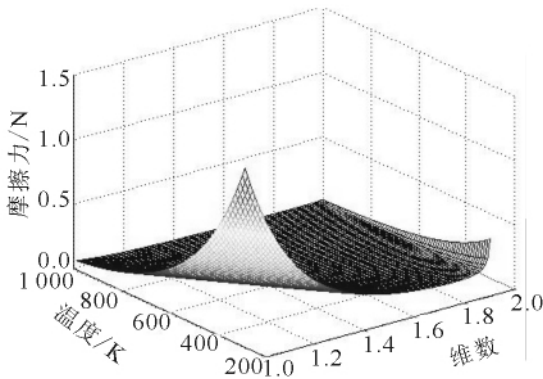


图 4 粉末颗粒间的摩擦力与粉末颗粒表面温度及粉末颗粒分形维数的关系曲线

以铁粉为例,实验所需数据取粉末颗粒间的最大接触面积 $a_t = 10^{-6}$ m,最小接触面积 $a_s = 0$,颗粒表面初始温度 $T_0 = 298$ K,粉末的特征温度 $T_* = 573$ K,剪切强度 $\tau_0 = 350$ MPa,温升系数 $\alpha = 0.00028$,粉末软化系数 $\beta = 0.0046$.

如图 4 所示,当粉末颗粒的分形维数、温度逐渐增大时,粉末颗粒间的摩擦力在最初阶段在很短的时间内变化很剧烈,达到一个峰值.这是因为粉末颗粒直径为微米量级或大于微米量级,在适当的冲击压力下,颗粒表面温度很容易达到其熔点,从而粉末更容易粘结,粉末颗粒间的摩擦力增速很快,达到一个顶点;而当颗粒直径降到纳米量级时,即使提高冲击压力,颗粒表面温升也很难达到其熔点,粉末颗粒间的摩擦力变化很缓慢.

冲击压力,颗粒表面温升也很难达到其熔点,粉末颗粒间的摩擦力变化很缓慢.

4 结论

对粉末颗粒的黏着摩擦系数和粉末颗粒的内摩擦力进行了研究,提出了黏着摩擦系数的分形几何模型,算例表明,对于一定的分形维数,总的黏着摩擦系数随归一接触面积的增大而急剧减小.从对 HVC 中粉末颗粒内摩擦的研究结果可知,随着冲击压力的提高和颗粒直径的增大,摩擦力很快就达到了材料的塑性剪切强度值,可见摩擦的最终效果是向塑性剪切转移.

参考文献:

- [1] 余 惺. 高速压制法制备 W-15Cu 合金工艺的研究 [D]. 长沙:中南大学冶金科学与工程学院,2010:21-24.
- [2] 邓三才,肖志瑜,陈进,等. 粉末冶金高速压制技术的研究现状及展望 [J]. 粉末冶金材料科学与工程,2009,8(15):19-23.
- [3] BOWDEN F P, TABOR D. Friction and Lubrication of Solids [M]. Oxford:Clarendon Press,1964:43-50.
- [4] LING F F. Fractals, Engineering Surfaces and Tribology [J]. Wear,1990,15(5):141-156.
- [5] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces [J]. Transactions of ASME, Tribology, 1991,12(3):113,1-11.
- [6] 陈大年,陈建平,俞宇颖,等. 粘着摩擦系数的分形几何研究 [J]. 力学学报,2003,35(3):297-300.
- [7] TABOR D. Junction Growth in Metallic Friction; the Role of Combined Stresses and Surface Contamination [J]. Proc. R. Soc. London, Ser A, 1959,25(4):378-396.
- [8] 张学良,黄玉美,韩颖. 基于接触分形理论的机械结合面法向接触刚度模型 [J]. 中国机械工程,2000,11(7):727.
- [9] PULLEN J, WILLIAMSON J B P. On the Plastic Contact of Rough Surfaces [J]. Proc. R. Soc. London, Ser A, 1972,32(7):159-173.
- [10] 王金相,李晓杰,李瑞勇,等. 基于尺寸效应的爆炸粉末烧结颗粒间摩擦升温计算 [J]. 工程力学,2005,22(9):52-57.

(下转第 67 页)

3 结语

基于 QNX 的测试系统,使用 C/C++ 作为开发语言,采用了 POSIX 应用程序接口、CPCI 技术以及大量的进程、线程通讯等比较主流的技术,对于实时领域中的应用开发都具有参考价值,且采用了模块化开发理念,也更易于日后维护和升级。

参考文献:

- [1] 魏永明. Linux 设备驱动程序 [M]. 第 2 版. 北京:中国电力出版社,2002:121-130.
- [2] 王 勇. GNU/Linux 编程指南 [M]. 北京:清华大学出版社,2000:97-114.
- [3] QNX Software Systems Ltd Limited. System Architecture [EB/OL]. [2011-05-21]. <http://www.qnx.com>.

Design and Implementation of Communication Test System for QNX Based on CPCI Boards

SHE Zhao-bing

(Zhangjiajie College, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China)

Abstract: This paper explores the design of communication test system based on the PC104 IPC processing platform. As for software, the popular QNX real-time operating system is used; as for hardware, the CPCI bus technology is used. Through fully using the greatest potential of both aspects, the test system with good performance is successfully designed and implemented. In addition, under the real-time system the methods described in this paper are also to provide reference for a variety of bus standards to achieve communication between the boards.

Key words: QNX; CPCI bus; real-time systems

(责任编辑 陈炳权)

(上接第 59 页)

Study of the Powder Particles' Friction in HVC Based on Fractal Theory

GU Cheng-ling

(Laiwu Vocational and Technical College, Laiwu 271100, China)

Abstract: According to the original proposal of Bowden and Tabor and based on the fractal theory, the total adhesive friction coefficient is expressed as a combination of the adhesive friction coefficient in elastic and plastic regime. Then a fractal model of adhesive friction coefficient is proposed. And a mathematical model of the relationship of powder particles' internal friction and fractal parameter is built. Through the function curves, it is analyzed that the fractal dimension of the surface of the powder particle has impact on the total adhesive friction coefficient and the inner friction. The study shows that for certain fractal dimension, the total adhesive friction coefficient reduces sharply as the normalized contact area increases and the inner friction can reach the value of plastic shearing intensity rapidly as the fractal dimension and the temperature of the surface of the powder particle increase.

Key words: fractal dimension; HVC; adhesive friction coefficient; internal friction

(责任编辑 陈炳权)