

球磨过程中的碰撞行为分析*

杨君友* 张同俊 崔 崑 胡镇华

(华中理工大学塑性成型模拟及模具技术国家实验室, 武汉 430074)

摘要 本文通过对行星球磨过程的分析,研究了行星球磨过程中的磨球碰撞行为,建立了球磨工艺参数(球料比、球磨转速、磨球半径)与磨球运动速度、平均自由程及碰撞频率的理论关系,结果表明:随球磨转速提高,磨球运动速度和碰撞频率将增大;装料量一定时,提高球料比,磨球运动速率和平均自由程都将减小,碰撞频率增大,装料量和球料比一定时,磨球半径愈小,磨球运动的平均自由程减小,碰撞频率增大。

关键词 球磨,机械合金化,平均自由程

机械合金化(Mechanical Alloying, 简称 MA)^[1]合成新材料的应用研究已取得了长足的进展^[2-4],与此相比,对 MA 法的微观机理方面的基础理论研究尚未取得明显进展,球磨过程中的磨球运动状况(如运动速率、平均自由程、碰撞频率等)决定了粉末的变形行为,内部组织结构和热效应,从而影响粉末内部的原子的扩散和合金化过程,因此分析球磨过程中的磨球碰撞行为,对深入研究机械合金化过程的微观机理具有重要的理论意义。

对球磨过程的磨球碰撞分析目前文献报道不多, Davis 及其合作者采用透明球磨容器和频闪观察,结合计算机数据处理的方法研究了振动球磨过程的磨球碰撞行为^[5],最近 Rydin 也报道了类似的工作^[6],这种方法虽然比较直观,但当磨球数量增多时就会存在很大的假象和臆测, Brun 和 Abdellaoui 都分别研究过行星球磨过程中的磨球运动情况^[7,8],但都只考虑了单个球的情况,撇开了具体球磨工艺条件,实际意义不大,本研究以行星球磨机为研究对象,通过对行星球磨过程的运动分析,建立了磨球运动速率、碰撞频率和平均自由程与球磨工艺条件的理论关系。

1 行星球磨的运动分析

1.1 自转角速度与公转角速度的关系

与振动式和搅拌式球磨机不同,行星球磨机可采用多罐同时运作,对不同球磨条件和不同成分的机械合金化极为方便,因而它是当前 MA 研究中被广泛采用的高能球磨机之一。

图 1 为球磨机运转部分的俯视示意图, A, B, C, D 分别为四个罐座,安装在公转盘上,设公转盘转速为 Ω ,自转转速 ω ,公转盘质量为 M ,每个罐体质量为 m ,在此行星运动系统中,所

* 湖北省自然科学基金资助项目

* 现为上海大学材料科学系博士后

收稿日期: 1996-03-18

本文通讯联系人: 张同俊, 副教授, 武汉(430074)华中理工大学材料科学与工程系

受外力均与转轴 OO' 平行, 故依据动量矩守恒定律可得

$$\frac{1}{2} M \Omega R_1^2 + 4 \left[\frac{1}{2} m \omega r^2 + m \left(\frac{r^2}{2} + R^2 \right) \Omega \right] = 0$$

即有

$$\omega = - \frac{M R_1^2 + 4 m r^2 + 8 m R^2}{4 m r^2} \Omega \tag{1}$$

式中负号说明自转角速度与公转方向相反, 可见 ω / Ω 的值不仅与球磨机几何结构 (R_1, R, r) 有关, 而且与 M / m 的比值有关. Ω 一定时, m 越大, ω 则愈小.

1.2 磨球的运动速度

如果球磨过程中磨球与罐的运转角速度相同, 则磨球运动的平均线速率可以表示为: $v_b \approx 0.5 \omega r_i$, r_i 为球磨罐的内半径, 当装料量为 m_p , 球料比为 R_{BP} , 以 $m = m_v + m_p(1 + R_{BP})$ 代入式(1), 其中 m_v 为球磨罐质量, 可得

$$v_b = \frac{M R_1^2 + 4 [m_v + m_p (1 + R_{BP})] (r^2 + 2 R^2)}{8 r^2 [m_v + m_p (1 + R_{BP})]} \Omega r_i \tag{2}$$

对于国产 QM-4H 超级行星球磨机, $M = 13.3 \text{ kg}$, $R_1 = 18.5 \text{ cm}$, $r = 5 \text{ cm}$, $R = 11.0 \text{ cm}$. 本研究采用球磨罐质量 $m_v = 5 \text{ kg}$, $r_i = 4 \text{ cm}$, 取 $m_p = 20 \text{ g}$ 时, 图 2 为由式(2)得出的 v_b 与 Ω 及 R_{BP} 的关系, 可见 R_{BP} 一定时, v_b 随 Ω 增大而增大, Ω 和 m_p 一定时, v_b 将随 R_{BP} 的增大而减小.

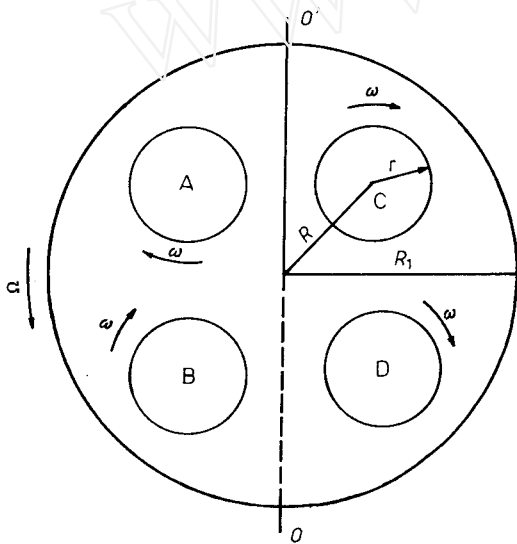


图 1 行星球磨机运转部分示意图

Fig.1 Schematic figure of revolving system of planetary ball mill

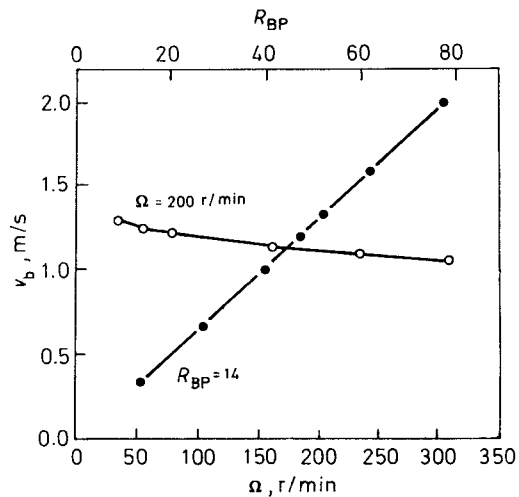


图 2 磨球运动速度与球料比和公转转速的关系图

Fig.2 Diagram of v_b vs R_{BP} and Ω

○ v_b vs R_{BP} ● v_b vs Ω

2 磨球运动的平均自由程

假设磨球以简单立方排列方式分布于球磨罐空间内, 如球磨罐体积为 V , 磨球半径为 r_b , 密度为 ρ , 则在体积 V 内由磨球构成的简单立方单胞数可表示为

$$n = \frac{3m_p R_{BP}}{4\pi\rho r_b^3} \quad (3)$$

则格胞边长可表示为

$$a = \sqrt[3]{\frac{V}{n}} = r_b \sqrt[3]{\frac{4\pi\rho V}{3R_{BP}m_p}} \quad (4)$$

定义磨球运动的平均自由程 S 为单胞 $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 三个方向的基矢长度平均值, 因此有

$$S = 2.228r_b \sqrt[3]{\rho V / R_{BP}m_p} \quad (5)$$

由式(5)可见, 当装料量 m_p 一定时, 球料比、磨球材料种类、磨球大小和球磨罐空间体积大小都将对磨球运动的平均自由程产生影响。磨球材料一定时, 增大球料比, 将增加磨球总质量, 平均自由程减小; m_p , R_{BP} 及 ρ 一定时, 选配大小不同的球, 平均自由程 S 亦不同, 选配大球, 球总数将减小, 平均自由程将增大。

3 磨球的碰撞频率

碰撞是球磨过程中最基本的现象, 定义碰撞频率为上一次碰撞结束到下一次碰撞结束所需时间的倒数, 则有

$$f = 1 / (T_1 + T_2) \quad (6)$$

式中 f 为碰撞频率, T_1 为上一次碰撞结束至下一次碰撞开始的时间, T_2 为碰撞持续时间。文献(9)报道将球磨过程中的碰撞可视作 Hertz 弹性接触⁽¹⁰⁾, 不致引入太大误差。 T_2 大约为 10^{-5} s, 与 T_1 相比可忽略, 因此 f 可近似表示为

$$f \approx v_b / S \quad (7)$$

将式(2), (5)代入(7)式得

$$f = \frac{MR_1^2 + 4[m_v + m_p(1 + R_{BP})](r^2 + 2R^2)}{17.824r^2[m_v + m_p(1 + R_{BP})]r_b} (R_{BP}m_p / \rho V)^{1/3} \Omega r_i \quad (8)$$

对于本研究采用的球磨罐和不锈钢球, 取 $\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$, $V = 502.4 \text{ cm}^3$ 算得的 f 与 Ω , R_{BP} 和 r_b 的关系如图 3, 4 所示。

由图 3, 4 可见, 碰撞频率与球磨工艺条件关系极大。它随球磨转速、磨球运动速度增大而

增大. 粉末量一定时, 增大球料比, 虽然减小磨球运动速率, 但平均自由程减小更快, 因而碰撞频率增大(图 3), 球料比一定时, 磨球半径愈小, 其数量愈多, 因而平均自由程减小, 碰撞频率增大(图 4).

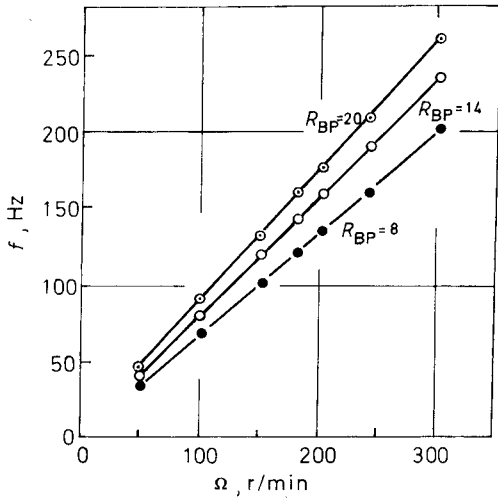


图 3 碰撞频率与转速及球料比关系图

Fig.3 Diagram of f vs Ω and R_{BP}

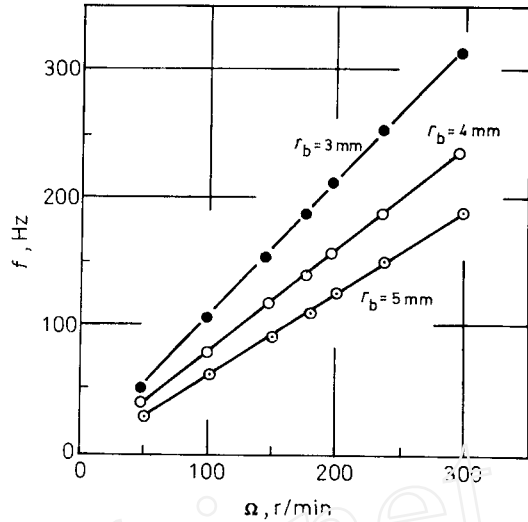


图 4 碰撞频率与球磨转速和磨球大小关系图

Fig.4 Diagram of f vs Ω and r_b

表 1 比较了文献〔5〕观察给出的振动球磨机中的碰撞数和本文所计算的行星球磨机中的碰撞数的比较, 从表中可知, 由于行星球磨过程中球磨罐体积小, 限制了磨球的运动速度, 当自转角速度与振动球磨速度相同时, 行星球磨的磨球运动速率仅为振动式中的 1/15, 因而尽管其磨球总数多, 单位时间内的碰撞总数仍低于振动球磨机. 提高球磨转速至两者磨球运动速度相当时, 从表中可见, 此时两种球磨机中 1 s 内每个球平均受到的碰撞数非常接近.

表 1 振动球磨碰撞次数和行星球磨碰撞次数比较(n_B : 球数, n_i 单位时间的碰撞数)

Table 1 Comparison of number of impacts for Spex 8000 Mixer mill with that of QM-4H planetary ball mill (n_B : number of balls, n_i : number of impacts during an unit time)

| R_{BP} | ω, s^{-1} | n_B | n_i | $v_b, m/s$ | n_i / n_B | Mill |
|----------|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----------|
| 6 | 60 | 15 | 1873 | 6.0 | 125 | Spex 8000 |
| 6 | 60 | 57 | 831 | 0.4 | 15 | QM-4H |
| 6 | 300 | 57 | 5985 | 6.0 | 105 | QM-4H |

4 结 论

- (1) 磨球运动速率随球磨转速增大而增大, m_p 一定时, R_{BP} 增大, 磨球运动速率将降低.
- (2) m_p 一定时 R_{BP} 增大, 平均自由程 S 减小; R_{BP} 和 m_p 一定时, 对于同种材质的磨球, 大

球的平均自由程大, 增大球磨罐体积可以增大 S .

(3) m_p 一定, R_{BP} 增大, 碰撞频率 f 增大; Ω 增大, f 增大; m_p 和 R_{BP} 一定时, 对于同种材质的磨球, 采用大球时的碰撞频率低于小球.

(4) 当磨球运动速度相同, 球料比相同时, 本文计算的行星球磨机的单位时间单个磨球所受的碰撞数与振动球磨机中的观察值基本一致.

参 考 文 献

- 1 Koch C C, Cavin O B, Mckamey C G, Scarbrough O J. *Appl Phys Lett*, 1983; 43: 1017
- 2 杨君友, 张同俊, 崔 崑. 材料导报, 1994; 2: 11
- 3 Ruuskane P, Heczke O. *PB 165108*, 1993
- 4 木村博, 小林信一. 粉体および粉末冶金, 1992; 39(1): 287
- 5 Davis R M, Mcdermott B, Koch C C. *Metall Trans*, 1988; 19A: 2867
- 6 Rydin R W, Maurice D R, Courtney T H. *Metall Trans*, 1993; 24A: 175
- 7 Brun P Le, Froyen L, Dalaey L. *Mater Sci Eng*, 1993; 161A: 75
- 8 Abdellaoui M, Gaffet E. *Acta Metall Mater*, 1993; 43: 1087
- 9 Maurice D R, Courtney T H. *Metall Trans*, 1990; 21A: 289
- 10 钱伟长, 叶开源. 弹性力学. 北京: 科学出版社, 1980: 327

ANALYSIS OF IMPACT BEHAVIOR DURING BALL MILLING

YANG Junyou, ZHANG Tongjun, CUI Kun, HU Zhenhua (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Manuscript received 1996-03-18)

ABSTRACT By analysing the kinetics of planetary ball milling, the impact behavior of milling ball is investigated, theoretical relationships between the technical parameters of ball milling (R_{BP} : ball to powder ratio, Ω : angular velocity of milling and r_b : radius of ball) and the velocity (v_b), average free path (S) and impact frequency (f) of milling ball are established in this paper. It shows that v_b and f increase with increasing angular velocity of milling; keeping the mass of powders invariable, f increases with increasing R_{BP} , however, v_b and S decrease; when m_p and R_{BP} are constant, S decreases and f increases with decreasing r_b .

KEY WORDS ball milling, mechanical alloying, average free path

Correspondent : ZHANG Tongjun, associate professor, Department of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074