

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.02.008

基于检测球的球磨机磨矿介质的力学研究

马道明¹, 李同清¹, 尹自信²

(1. 江苏海洋大学 机械工程学院, 江苏 连云港 222005;

2. 宿州学院 机械工程学院, 安徽 宿州 234000)

摘 要:以筒体直径为 305 mm、筒体长度为 150 mm 的球磨机作为研究对象, 利用检测球装置获取在 60%、70%、80% 转速率下磨矿介质的原始运动数据, 并通过运用姿态角算法排除原始数据中的重力因素, 以得出更接近真实运动数据进行研究。试验结果显示, 当转速率为 60% 时, 原始力平均值为 1.717 N, 其真实数据力平均值为 1.990 N, 平均角速度为 530.1 deg/s, 标准差则为 221.15; 转速率提升至 70% 时, 原始力平均值为 1.796 N, 真实数据力平均值为 2.079 N, 平均角速度为 628.9 deg/s, 标准差为 238.3; 然而在 80% 的转速率下, 原始力平均值则降至 0.826 N, 真实数据力平均值则为 1.377 N, 平均角速度为 656.3 deg/s, 标准差为 262.55。根据这些结果, 得出以下结论: 1) 磨矿介质的真实数据力平均值比原始力平均值要大; 2) 随着球磨机转速的提升, 磨矿介质受到的碰撞作用力呈现先增大后减小的变化趋势; 3) 随着球磨机转速的提升, 检测球的角速度持续增大。因为角速度可能影响磨矿介质的研磨效果, 说明在高转速率下, 筒体对磨矿介质提供的能量更多, 能够带来更佳的研磨效果; 4) 随着球磨机转速的提升, 检测球的角速度标准差也在持续增大, 说明在高转速率下, 磨矿介质的动能波动范围更大, 介质间的能量交换频率提高, 能够更明显地发挥出磨矿介质的研磨作用。

关键词:球磨机; 检测球; 姿态角算法; 转速率

中图分类号:TD954; TD925+.7

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)02-0049-07

Mechanical Study of Ball Mill Grinding Media Based on Instrumented Ball

MA Daoming¹, LI Tongqing¹, YIN Zixin²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China)

Abstract: A ball mill with a diameter of 305mm and a length of 150mm was used as the experimental object, the original movement data of grinding media at 60%, 70% and 80% of the critical rotational speeds were obtained by using the detection ball device. By using the attitude angle algorithm to eliminate the gravity factor in the original data, data obtained are closer to the real motion data. The experimental results show that when the rotation speed is 60%, the average value of the original force is 1.717 N, the average value of the true data force is 1.990 N, the average angular velocity is 530.1 deg/s, and the standard deviation is 221.15. When the rotation speed is increased to 70%, the rotation speed is increased to 70%, the average value of the original force is 1.796 N, the average value of the true data force is 2.079 N, the average angular velocity is 628.9 deg/s, and the standard deviation is 238.3. However, the average value of the original force decreases to 0.826 N at 80% speed, the true data force average is 1.377 N, the mean angular velocity is 656.3 deg/s, and the standard deviation is 262.55. According to these results, the following conclusions can be drawn: 1) The true data force average value of grinding medium is larger than the original force average value. 2) With the increase of the rotating speed of the ball mill, the impact force on the grinding medium increases at first and then decreases. 3) With the increase of ball mill speed, the angular velocity of the test ball increases continuously. Because the angular velocity may affect the grinding effect of grinding medium, it shows that the cylinder can provide more energy to the grinding medium and bring better grinding effect. 4) With the increase of the ball mill speed, the standard deviation of the angular velocity of the test ball also increases continuously, which shows that the fluctuation range of the

收稿日期: 2022-09-18

基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(2022AH051380)

作者简介: 马道明(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事球磨机颗粒破碎、离散单元算法研究。

kinetic energy of the grinding medium is larger and the frequency of the energy exchange between the media is increased under the high rotating speed, the grinding effect of grinding medium can be brought into play more obviously.

Key words: ball mill; instrumented ball; attitude angle algorithm; rotation rate

球磨机是一种利用钢球作为磨矿介质,通过衬板将磨矿介质提升至一定高度后脱离筒体进行自由落体运动,利用动能来完成颗粒破碎和研磨的设备。由于其结构简单且具有良好的粉碎效果,它被广泛应用于各种材料的机械合金化,以及制备药品、陶瓷和化工等粉末材料^[1-3]。作为不可或缺的粉碎设备,球磨机在使用过程中消耗巨大。据资料显示,球磨机的耗电量约占整个选矿厂用电量的四分之一到七分之一^[4]。因此,为了提高球磨机的效率并降低能耗,亟需对球磨机介质的运动状态进行研究。

针对这一问题,各学者纷纷采用直接或间接的方式展开研究。刘宇等^[5]运用理论分析方法,对磨矿介质的运动规律进行研究;王伟等^[6]利用 RockyDEM 软件研究球磨机衬板结构磨损问题;王晓等^[7]利用 EDEM 软件对不同球磨机填充率下的颗粒物碰撞能量变化进行分析;瞿铁等^[8]利用 EDEM 软件研究球磨机的填充率、转速率、衬板数量等对颗粒接触数量的比例及颗粒分布的影响;冯先丁^[9]通过采集磨音信号实时检测进行功率谱分析;KALALA 等^[10]通过自制衬板结构,利用应变片分析衬板的法相力和切向力;罗小燕等^[11]以筒体振动信号为基础,开发球磨机实时负荷参数检测系统。由于球磨机内部环境恶劣,目前尚无有效的方法直接测量磨矿介质的运动状态参数,因此, MARTINS^[12]将采用嵌入式微电子控制系统,对不同转速工况下磨矿介质的动能、接触力变化规律进行研究;刘军德^[13]将 MEMS 九轴传感器姿态算法作为球磨机介质运动测量的新方法,可提供球磨机相关研究的数量分析手段;姚光前^[14]在球磨机内放入

装有传感器的磨球,根据测试参数设定球磨机研究球磨机转速和磨球大小对磨矿效率的影响;WANG 等^[15]采用三轴加速度传感器输出结果,通过智能算法检测载荷状态;尹自信等^[16]以自制检测球装置为基础,分析磨矿介质的运动参数,提出离散元验证仿真方法。结果表明,角速度、加速度变化越大,磨料效率越高,冲击碰撞越明显。YIN 等^[17]用自制的检测球测量材料内的运动参数,结果显示磨机功率有一个最大值。

目前绝大多数方法都是基于间接测量或模拟,很少直接测量。常用的测量直接手段是基于九轴传感器的自制检测球测量球磨机磨矿介质运动参数,但这方面的研究人员由于时间跨度过大,在各自研究中没有相互联系,过去虽然创新性地采用姿态角算法研究球磨机磨矿介质参数,但使用的九轴传感器存在着检测频率低,且未使用卡尔曼滤波使姿态角动态误差达到 3° ,影响了球磨机介质参数的计算。虽然近年来论文中使用了目前较为先进的九轴传感器,检测频率较原来有所提高,并且传感器自带卡尔曼滤波算法使姿态角误差缩小到 0.1° ,但姿态角算法并没有被使用。因此本文将两者结合在一起,以姿态角算法为基础,利用维特智能九轴传感器测出球磨机磨矿介质的角速度、加速度的原始数据,再用姿态角算法算出磨矿介质的真实受力,分析其变化规律。

1 检测装置

1.1 球磨机

采用球磨机筒体尺寸是 $\Phi 305 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,该球磨机临界转速为 76.6 r/min ,具体装置如图 1 所示。

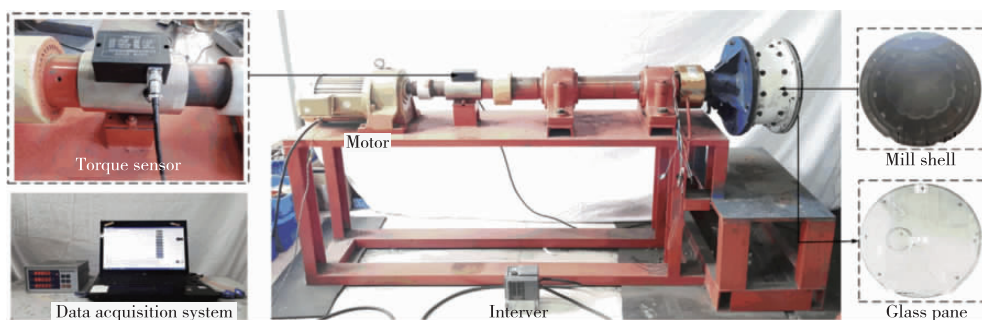


图 1 试验球磨机^[17]

Fig. 1 Experimental ball mill^[17]

该磨机主要由电机、逆变器、扭矩传感器、筒体和数据收集系统组成。将颗粒和检测球一起放入筒体中,利用逆变器控制电机,带动筒体旋转,当筒体旋转趋于稳定时,开始采集 40 s 左右检测球信号数据,之后进行下一步计算。球磨机具体磨矿介质运动参数如表 1 所示。

1.2 检测球

检测球装置如图 2 所示,主要由保护壳、密封垫和九轴传感器组成。保护壳和密封垫主要用来保护九轴传感器,九轴传感器主要由蓝牙进行实时传输数据,通过蓝牙适配器将数据实时传输给电脑。检测球质量为 0.116 kg。

九轴传感器主要由三轴陀螺仪、三轴加速度传感器和三轴磁感应传感器组成。陀螺仪用来检测三

表 1 磨矿介质运动参数

Table 1 Grinding media movement parameters

参数	数值
球磨机筒体直径/mm	305
球磨机筒体长度/mm	150
磨矿介质直径/mm	30
提升条形状	梯形
提升条数量	12
提升条角度/(°)	30
提升条高度/mm	10
转速率/%	60、70、80
填充率/%	25
铁矿石粒级/mm	0.6~0.85

轴角速度、加速度传感器用来检测三轴加速度,三轴磁感应传感器通过检测到的各轴南北磁极差异来确定各轴相对东北天坐标系的欧拉角。

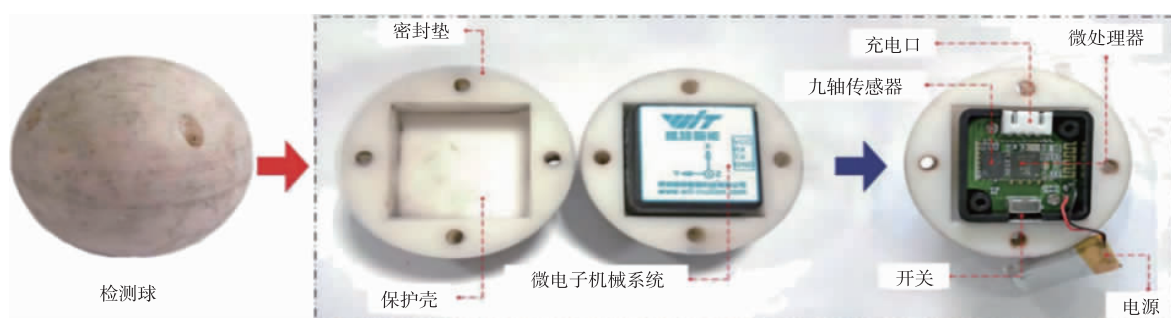


图 2 检测球示意图^[16]

Fig. 2 Schematic diagram of the detection sphere^[16]

2 检测坐标和姿态角算法

2.1 检测球坐标系

2.1.1 地理坐标系

常见地理坐标系有东北天坐标系,如图 3 所示,是以坐标原点为载体重心, ON 轴指向北, OE 轴指向东, UP 轴指向天。地理坐标系一般称为 t 系。

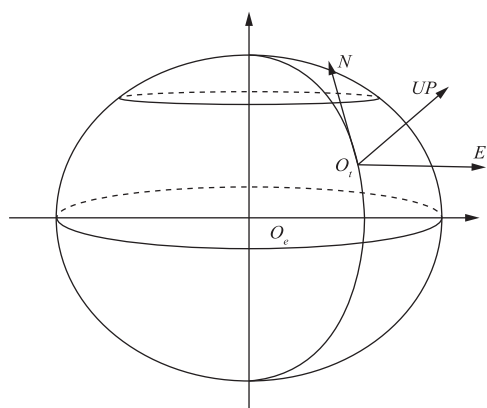


图 3 东北天坐标系

Fig. 3 Northeast sky coordinate system

2.1.2 载体坐标系

载体坐标系亦是一种在载体上的坐标系,其坐标原点在载体中心,但其三轴方向随载体的运动不断改变。一般称载体坐标系为 b 系。载体坐标系相对地理坐标系的方位关系就是载体的姿态角,即航向角、俯仰角和倾斜角。

如图 4 所示,是维特智能传感器所标定的载体坐标系,当载体坐标系与地理坐标系重合时维特智能的载体坐标 X 轴指向东, Y 轴指向北, Z 轴方向向上。

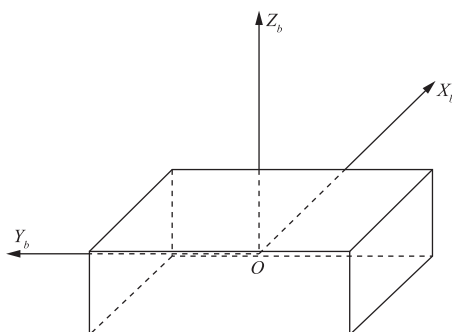


图 4 载体坐标系

Fig. 4 Carrier coordinate system

2.2 姿态角算法

本文基于九轴传感器采集来的数据,建立磨矿介质冲击力公式以及转动动能公式:

$$|\vec{F}_n| = m \sqrt{(\vec{a}_x)^2 + (\vec{a}_y)^2 + (\vec{a}_z)^2} \quad (1)$$

$$\vec{\omega}^n = \vec{\omega}_x^n + \vec{\omega}_y^n + \vec{\omega}_z^n \quad (2)$$

$$E_k = \frac{1}{2} J (\omega^n)^2 \quad (3)$$

式中, $\vec{F}_n$ 为检测球原始数据力, N; $\vec{a}_x$ 、 $\vec{a}_y$ 、 $\vec{a}_z$ 为九轴传感器收集的三轴加速度向量, 数量 g (重力加速度标量); m 为检测球质量, kg; E_k 为检测球转动动能, J; J 为检测球转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; $\vec{\omega}_x$ 、 $\vec{\omega}_y$ 、 $\vec{\omega}_z$ 为九轴传感器收集的三轴角速度向量, $(^\circ)/\text{s}$; $\vec{\omega}^n$ 为检测

球三轴加速度向量和, $(^\circ)/\text{s}$ 。

因加速度传感器测出的线运动数据中包含有重力场分量, 需要用姿态角算法减去九轴传感器测得数据的重力场分量才算出检测球实际的合力。根据姿态角定义知道坐标系 Z 轴旋转角度为航向角 ψ , X 轴旋转角度为横滚角 γ , Y 轴旋转角度为俯仰角 θ 。基于式(4), 坐标轴的三次翻转将地理坐标系翻转到载体坐标系^[13]。

$$x_t y_t z_t \xrightarrow{C_1^t} x_1 y_1 z_1 \xrightarrow{C_2^1} x_2 y_2 z_2 \xrightarrow{C_3^2} x_b y_b z_b \quad (4)$$

由此得到地理坐标系翻转为载体坐标系的变换矩阵 C_{tb} :

$$C_t^b = C_2^1 C_1^t C_t^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\theta\cos\psi\sin\gamma - \sin\psi\cos\gamma & \sin\theta\sin\psi\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma & \cos\theta\sin\gamma \\ \sin\theta\cos\psi\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \sin\theta\sin\psi\cos\gamma - \cos\psi\sin\gamma & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

设 $\vec{g} = [0 \ 0 \ 1]^T$, 由变换矩阵 C_{tb} 得出 $\vec{g}$ 在载体坐标系中三轴的分量。由公式(6)、(7)求出球磨介质真实力 $\vec{F}_r$ 大小。

$$\vec{G} = m C_{tb}^T \vec{g} \quad (6)$$

$$\vec{F}_r = \vec{F}_n - \vec{G} \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 检测球受力分析

基于公式(1), 计算检测球在各时刻的原始数据力, 如图5所示, 分别为60%、70%、80%转速率下的检测球原始数据力。然后, 应用公式(7)剔除各时刻原始数据力计算中的重力影响, 进而得到在不同转速率下, 检测球的真实数据力。如图6展示的是60%、70%、80%转速率下的检测球真实数据力。图7展示了不同转速率下, 检测球的原始数据力和真实数据力的平均值。

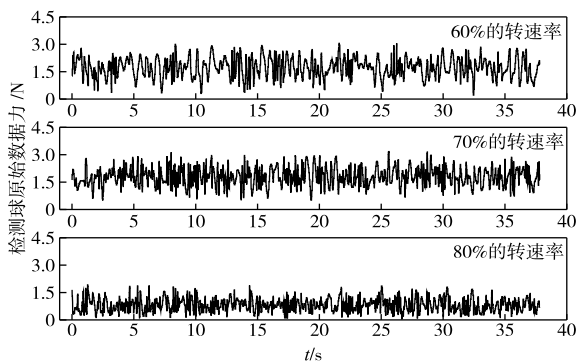


图5 原始力数据

Fig. 5 Original force measured by the instrumented ball

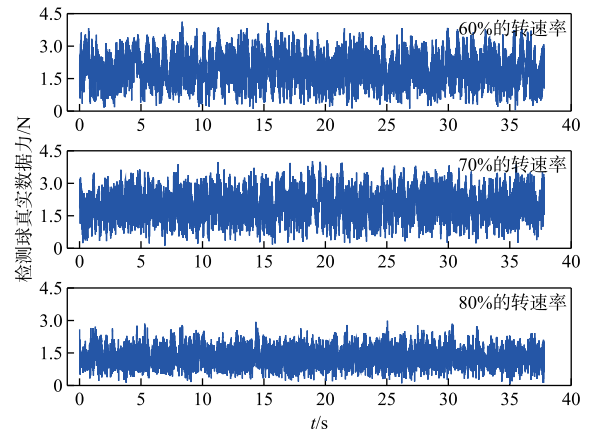


图6 检测球真实数据力

Fig. 6 The real force of the instrumented ball

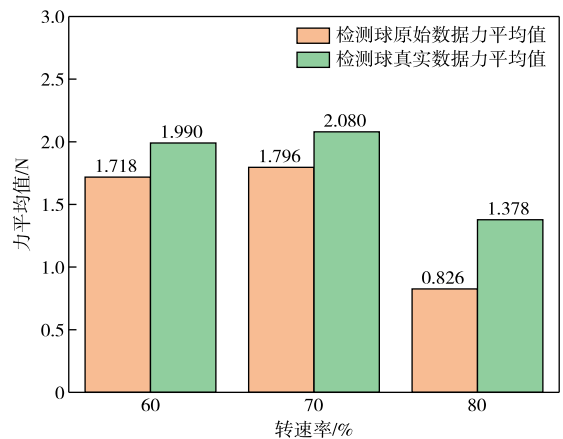


图7 力平均值

Fig. 7 The average force

通过对比图 5、6,可以观察到,检测球在剔除重力影响后,得到的真实合力变得更为密集,且与原始数据比较,真实合力数值曲线稍有抬升。通过图 7 可以观察到在 60% 的转速率下,检测球原始力的平均值为 1.717 N,而真实力的平均值为 1.990 N。在 70% 转速率下,检测球原始力平均值为 1.796 N,真实力平均值为 2.080 N。在 80% 的转速率下,检测球原始力平均值为 0.826 N,真实力平均值为 1.377 N。很明显,在相同的转速率下,检测球的真实力平均值大于原始力平均值。与此同时,随着转速率的提高,磨矿介质的受力先增大后减小。

从图 7 中可以观察到,在相同转速下,检测球的真实力平均值比原始力平均值更大。这与一般常理不同,因为我们认为减去重力影响的预期真实力平均值应比原始力平均值小。但经过数理推理后,我们发现这种现象是合理的。推理过程如下:在东北天坐标系下,检测球测得的原始力向量 $\mathbf{F}_n$ 与检测球的合力向量 $\mathbf{F}_r$ 可以表示为:

$$|\vec{F}_n| = m \sqrt{(\vec{a}_e^t)^2 + (\vec{a}_n^t)^2 + (\vec{a}_{up}^t)^2} \quad (8)$$

$$|\vec{F}_r| = m \sqrt{(\vec{a}_e^t)^2 + (\vec{a}_n^t)^2 + (\vec{a}_{up}^t - \vec{g})^2} \quad (9)$$

式中, $\vec{a}_e^t, \vec{a}_n^t, \vec{a}_{up}^t$ 分别是地理坐标系下三轴的加速度向量单位为 g(重力加速度标量),单位与地理坐标系下三轴的加速度向量单位相同,方向向上。

根据公式(8)和公式(9),我们可以得出结论,要推断出真实力比原始力大,需要:

$$\sqrt{(\vec{a}_e^t)^2 + (\vec{a}_n^t)^2 + (\vec{a}_{up}^t - \vec{g})^2} > \sqrt{(\vec{a}_e^t)^2 + (\vec{a}_n^t)^2 + (\vec{a}_{up}^t)^2} \quad (10)$$

结果化简可得:

$$\vec{a}_{up}^t < \frac{\vec{g}}{2} \quad (11)$$

由于检测球受到重力加速度的影响,我们可以得出以下结论:只要检测球在竖直方向上的下落加速度大于 0.5 个重力加速度(g),我们可以推断出真实力大于原始力,即:

$$|\vec{F}_r| > |\vec{F}_n| \quad (12)$$

图 8 是磨矿介质的运动受力示意图。图中 $\mathbf{G}$ 是重力, $\mathbf{F}_s$ 是磨矿介质受到的合力, $\mathbf{F}_x$ 是磨矿介质水平方向受到的力, $\mathbf{F}_y$ 是磨矿介质竖直方向受到的力。假设磨矿介质接触筒体时作匀速圆周运动,则磨矿介质受到的合力 $\mathbf{F}_s$ 始终指向筒体中心,由此得出磨矿介质在筒体底部时受到向上的力最大,随着不断的被抬升磨矿介质受到向上的力在不断变小甚至受到向下的力。当 $\mathbf{G} = \mathbf{F}_s$ 时,磨矿介质开始作抛物运动,此时磨矿介质受到的合力就是磨矿介质自身的

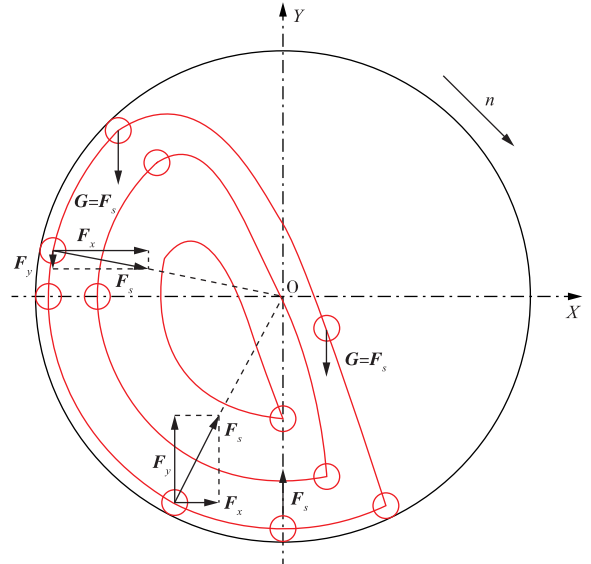


图 8 运动受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the motion forces 重力 $\mathbf{G}$ 。

因此可以看出检测球在一定高度位置以及做抛物运动时竖直方向上的下落加速度大于 0.5 g,此时真实力大于原始力。虽然当检测球在筒体低处时会有一些的真实力小于原始力情况,但在计算合力平均值时,二者情况相中和,最后结果是真实力平均值大于原始力平均值。

3.2 角速度分析

根据公式(2),可以计算出检测球在当前状态下的三轴角速度的总大小。通过总角速度的平均值,我们可以反映磨矿介质的转动动能大小。图 9 展示了检测球在不同转速率下的各时刻角速度。在图 10 中,点数据表示检测球的平均角速度,附近的误差棒表示该点平均角速度的标准差。根据图 10 的数据,我们可以得到以下结论:在 60% 填充率时,检测球的平均角速度为 530.1(°)/s,标准差为 221.15;在 70% 填充率时,检测球的平均角速度为 28.9(°)/s,

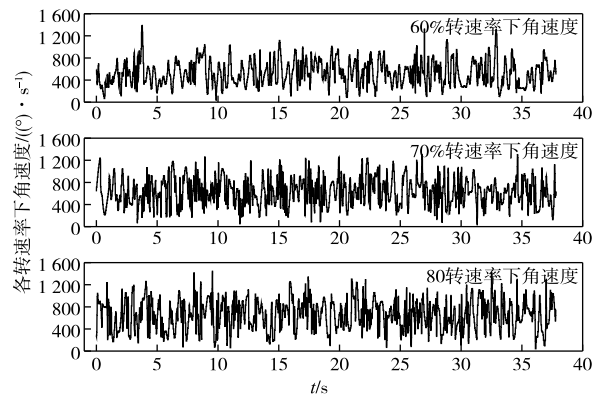


图 9 检测球角速度

Fig. 9 The angular velocity of instrumented ball

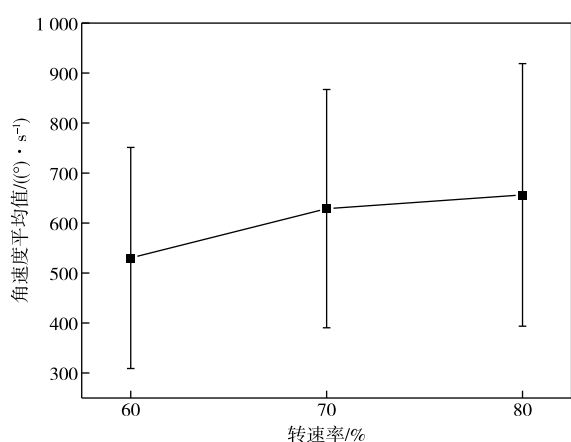


图 10 平均角速度

Fig. 10 Average angular velocity

标准差为 238.3;在 80%填充率时,检测球的平均角速度为 656.3(°)/s,标准差为 262.55。

球磨机通过将自身机械能传递给磨矿介质的方式来进行研磨。根据公式(3),我们可以计算出检测球的转动动能。因此,研究磨矿介质的角速度可以从侧面反映其研磨效果^[18]。根据之前得到的结果,我们可以得出结论:随着转速率的提高,检测球的角速度平均值也会增加。这说明球磨机的转速越高,筒体向磨矿介质提供的能量越大,磨矿介质的研磨效果也更好。

标准差可以反映数据集的离散程度,波动范围越大。在本文中,随着球磨机转速的提高,检测球的角速度标准差也增加。这意味着随着球磨机转速的增加,磨矿介质的转动动能波动范围变大,介质之间能量交换的频次也增加,磨矿介质的研磨作用也更加显著。

4 结论

本文对球磨机磨矿介质的角速度、加速度以及减去重力后的真实加速度的变化规律进行了分析,得出如下结论:

1)在 60%转速率时,检测球的原始力平均值为 1.717 N;在 70%转速率时,原始力平均值为 1.796 N;在 80%转速率时,原始力平均值为 0.826 N。通过姿态角算法,计算得到真实数据力在 60%、70%、80%转速率下的平均值分别为 1.990、2.079、1.377 N。根据结果可得,随着磨机转速的增加,磨介的平均碰撞作用力呈现先增大后减小的趋势。

2)对于检测球通过姿态角算法计算得到的真实力平均值比原始力平均值要大的现象,本文提出了一个相对合理的解释。

3)在 60%填充率下,检测球的平均角速度为

530.1(°)/s,标准差为 221.15;在 70%填充率下,检测球的平均角速度为 628.9(°)/s,标准差为 238.3;在 80%填充率下,检测球的平均角速度为 656.3(°)/s,标准差为 262.55。检测球角速度的平均值可以反映磨矿介质的转动动能大小,而标准差则可以反映磨矿介质的转动动能变化的幅度范围。随着转速率的增加,检测球角速度的平均值和标准差呈现上升趋势,这说明球磨机向磨矿介质提供了更多的能量,并导致研磨频率和效果增强。

参考文献

- [1] 尹自信,李同清.基于检测球的球磨机磨矿介质运动试验分析[J].有色金属(选矿部分),2022(1):124-129.
YIN Zixin, LI Tongqing. An experimental analysis on grinding media motion in ball mill by instrumented ball[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(1):124-129.
- [2] YAHYAEI M, BANISI S. Spreadsheet-based modelling of liner wear impact on charge motion in tumbling mills[J]. Minerals Engineering, 2010, 23 (15): 1213-1219.
- [3] YIN Z X, PENG Y X, ZHU Z C, et al. Experimental study of charge dynamics in a laboratory-scale ball mill[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(19):3491-3499.
- [4] 孙笑怡,李同清.球磨机介质运动学分析[J].有色金属工程,2022,12(11):85-93.
SUN Xiaoyi, LI Tongqing. Kinematic analysis of ball mill medium[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11):85-93.
- [5] 刘宇,万卉,刘丽萍,等.球磨机内单个研磨介质运动的理论分析[J].中国粉体技术,2010,16(4):61-64.
LIU Yu, WAN Hui, LIU Liping, et al. Theoretical analysis of movement of one single ball in ball mills[J]. China Powder Science and Technology, 2010, 16(4): 61-64.
- [6] 王伟,郝俊杰,杨兴权,等.基于 ROCKY-DEM 的球磨机衬板设计[J].纯碱工业,2022(4):30-32.
WANG Wei, HAO Junjie, YANG Xingquan, et al. Ball mill liner design based on ROCKY-DEM [J]. Soda Industry, 2022(4):30-32.
- [7] 王晓,张长献,薛玉君,等.基于 EDEM 的球磨机不同填充率下颗粒碰撞与能量变化探究[J].矿山机械,2019, 47(8):29-34.
WANG Xiao, ZHANG Changxian, XUE Yujun, et al. Research on particle collision and energy variation at various filling ratio of ball mill based on EDEM[J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(8):29-34.

- [8] 瞿铁,边强,唐必亮,等. 基于 EDEM 球磨机颗粒的分布与接触特性分析[J]. 有色金属(选矿部分),2022(6):135-140.
- QU Tie, BIAN Qiang, TANG Biliang, et al. Analysis of particle distribution and contact characteristics of ball mill based on EDEM[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(6):135-140.
- [9] 冯先丁,魏镜弢,吴张永,等. 基于 PCA-PSO-SVM 的球磨机负荷预测研究[J]. 电子科技,2022,35(1):29-34.
- FENG Xianding, WEI Jingtao, WU Zhangyong, et al. Research on load forecast of ball mill based on PCA-PSO-SVM[J]. Electronic Science and Technology, 2022,35(1):29-34.
- [10] KALALA J T, BWALYA M M, MOYS M H. Discrete element method (DEM) modelling of evolving mill liner profiles due to wear. Part I: DEM validation [J]. Minerals Engineering, 2005,18(15):1386-1391.
- [11] 罗小燕,黄耀锋,李波波,等. 基于 PSO-LSSVM 球磨机负荷参数预测及监测系统开发[J]. 噪声与振动控制, 2022,42(4):144-151.
- LUO Xiaoyan, HUANG Yaofeng, LI Bobo, et al. Ball mill load parameter prediction and monitoring system development based on PSO-LSSVM [J]. Noise and Vibration Control, 2022,42(4):144-151.
- [12] MARTINS S. Exploring tumbling mill dynamics through sensor development [D]. Montreal: McGill University, 2011.
- [13] 刘军德. 基于 MEMS 的球磨机介质运动测量技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.
- LIU Junde. The research of ball mill charge motion measurement based on MEMS[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [14] 姚光前. 球磨机转速、磨球尺寸对磨矿效率的影响[J]. 化工矿物与加工, 2015,44(7):18-20.
- YAO Guangqian. Influence of rotational speed of ball mill and grinding ball size on grinding efficiency[J]. Industrial Minerals & Processing, 2015,44(7):18-20.
- [15] WANG T, ZOU W J, XU R J, et al. Assessing load in ball mill using instrumented grinding media [J]. Minerals Engineering, 2021,173:107198.
- [16] 尹自信,李同清. 基于检测球的球磨机磨矿介质运动试验分析[J]. 有色金属(选矿部分),2022(1):124-129.
- YIN Zixin, LI Tongqing. Experimental analysis of grinding medium movement in ball mill based on detecting ball [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(1):124-129.
- [17] YIN Z X, PENG Y X, ZHU Z C, et al. Effect of mill speed and slurry filling on the charge dynamics by an instrumented ball[J]. Advanced Powder Technology, 2019,(30):1611-1616.
- [18] 尹自信,王楠. 不同转速率下球磨机介质运动状态分布行为研究[J]. 有色金属(选矿部分),2022(3):118-123.
- YIN Zixin, WANG Nan. Study on distribution behavior of medium motion state in ball mill at different rotation rate [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(3):118-123.

(本文编辑 刘水红)