

大型格子式球磨机物料动力学分析

张巍¹ 任聃¹ 刘宇男² 宋玉国¹

(1. 内蒙古科技大学 工程训练中心, 内蒙古 包头 014010;

2. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 由于进口大型球磨机资料的缺失, 工程上对该型号球磨机的最佳填充率和最佳球磨转速缺乏足够的认识, 以至于球磨机故障频发。为了研究球磨机转速与填充率对滚筒作用力的变化规律, 并延长球磨机寿命和提高球磨效率, 以球磨机滚筒内物料的运动为基础对球磨机受物料作用力进行分析, 通过分析不同的填充率、不同的转速下物料对滚筒的作用载荷和分布, 推导出脱离角和下落角的关系及其与滚筒受力面积的关系, 并计算了不同转速、不同填充率下物料对滚筒内壁的摩擦力的分布情况。分别建立了不同转速下的下落角和脱离角模型、受载荷面积模型和滚筒受摩擦力模型。最后针对选矿厂大型格子式球磨机进行分析, 并结合实际工况对各模型进行仿真分析。

关键词: 球磨机; 填充率; 下落角; 脱离角; 摩擦力

中图分类号: TF306 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.06.014

引言

球磨机是选矿厂粉碎矿石的重要设备, 其服役寿命和生产效率两个指标对企业的效益至关重要, 而大型球磨机的滚筒是其主要的力学承载部件。球磨机筒体受力复杂, 很大程度上与筒体内部物料和钢球的运动有关。钢球在滚筒内产生的冲、挤、磨作用使物料的粒度从粗到细, 从而达到工艺要求^[1-2]。在球磨机的使用中, 滚筒是最容易发生破坏的部件, 不合理地增加进料速度和进料量会使得球磨机滚筒在磨料过程中产生疲劳从而导致裂纹的产生, 造成重大经济损失^[3-4]。因此, 对滚筒的力学分析尤为重要。学者们针对球磨机的力学性能做了很多研究工作。姚一民^[5]推导了磨球做抛落运动时的运动轨迹方程及冲击速度、冲击角度等, 同时在磨球的运动学基础上, 探讨了磨球的运动状态和衬板结构形式之间的关系, 并得出了衬板结构设计的依据。田秋娟^[6]分析了起动过程中物料运动状态和力矩的动态变化规律, 以磨机稳定运行时的力矩和功率为

基准确定了起动过程中对力矩和功率的要求, 并综合考虑球磨机的比功率、衬板磨损速率和颗粒破碎概率对磨矿参数进行了优化。史国军^[7]分析了介质尺寸、磨机转速率、介质填充率等介质工作参数对球磨机介质运动规律以及有用功率的影响, 得到了介质填充率与磨机转速率对球磨机有用功率的影响的相关特性。Lu等^[8]提出了一种模拟行星球磨机单磨球轨迹的动力学模型和在无滑移条件下模拟球磨过程中局部能量转移的模型, 在球运动学的基础上, 描述了碰撞频率和碰撞功率。Huang等^[9]计算了不同填充情况下磨机壳体上最大振动点的角位置, 模拟了不同填充情况下磨机的电荷运动, 通过对钢球运动轨迹和轧机功率轨迹的比较, 验证了仿真结果的正确性。李媛华^[10]采用离散元的方法, 以提高球磨机单位时间内球磨效率为目的对优化球磨机参数进行了研究。陈黎明^[11]将有限元分析的结果与断裂力学中相关理论结合起来, 对球磨机筒体进行了裂纹扩展速度预测和剩余寿命预测。以上这些研究各有侧重点, 但并没有针对球磨机的最佳转速和最佳填充率的关系的分析研究。本文首先推导了球磨机内物料的下落轨迹方程, 利用下落点和起抛点的位置建立有限元分体模型, 基于有限元分体模型导入脱离角和下落角等参数与球磨机速度的关系, 然后在不同填充率和不同转速下对国外大型球磨机的滚筒进行了详细的分析, 并得到了最佳填充

收稿日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51505012); 北京市自然科学基金(3154029/KZ201410005010); 博士后科学基金(2016m591033)

第一作者: 男, 1979年生, 讲师, 博士生

E-mail: zhangwei2009035@163.com

率和最佳转速的范围。

1 球磨机内物料受力分析

1.1 球磨机滚筒及物料坐标系的建立

物料在离心力和摩擦力作用下随滚筒一起作逆时针旋转,随着物料沿滚筒内壁上升,物料所受到筒壁或周围物料的摩擦力的方向逐渐趋于水平,到达一定高度后,水平方向的受力平衡时,物料由于自重开始脱落。

图 1 为本文所研究球磨机的外观图。图 2 为滚筒内物料的坐标系和滚筒坐标系。在滚筒中心建立滚筒坐标系 O ,设在此坐标系下,滚筒作顺时针转动。假设物料的一个颗粒为一个球形,在物料的某一个瞬时状态下的球心建立物料坐标系 O_b 。

因滚筒中的物料随滚筒一起作圆周运动,物料所处的象限位置不同,对筒体的作用力规律也不同,因此将物料在滚筒中的位置划为 3 个象限分别进行分析。如图 3 所示,设 F_{a1} 、 F_{a2} 、 F_{a3} 分别为物料单元在滚筒坐标系 O 中的第四象限、第三象限、第二象限时,由于滚筒的旋转产生的离心力; α 、 β 、 γ 分别为物料单元在第四象限、第三象限、第二象限时,物料中心与滚筒中心的连线与坐标轴的夹角。 G 为物料单元的重力,方向为沿铅锤向下。



图 1 球磨机的外观图

Fig. 1 Appearance of the ball mill

1.2 物料单元坐标系的建立和受力分析

对落在 3 个象限的物料分别进行受力分析。设物料单元为一个球形均匀质量的钢球体,在每个象限内均取同质量的物料单元进行力学分析。在第二象限的物料单元的中心建立坐标系 C ,其 X_b 轴与坐标系 O 下的 X 轴平行, Y_b 轴与坐标系 O 下的 Y 轴平行。

图 3 所示为滚筒内物料的受力分解图。设 f_1 、 f_2 、 f_3 分别为处于重心位置的物料单元在第四象限、第三象限、第二象限时,所受的相邻单元的切向作用

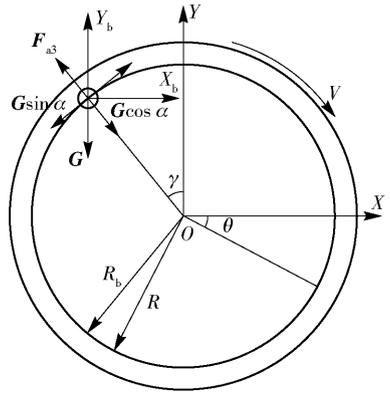


图 2 物料力学分解及滚筒坐标系

Fig. 2 Decomposition of the ball bearing and coordinate system of the cylinder

力。对 3 个象限的物料单元进行力学分析,建立第四象限物料单元力学平衡方程如式(1)

$$\begin{cases} f_1 = G \sin \alpha \\ F_{a1} + G \cos \alpha = F_{m1} \end{cases} \quad (1)$$

建立第三象限物料单元力学平衡方程如式(2)

$$\begin{cases} f_2 = G \cos \beta \\ F_{a2} + G \sin \beta = F_{m2} \end{cases} \quad (2)$$

建立第二象限物料单元力学平衡方程如式(3)

$$\begin{cases} f_3 - G \sin \gamma = F_3 \\ F_{a3} - G \cos \gamma = F_{m3} \end{cases} \quad (3)$$

对滚筒而言,物料间的摩擦力视为内力,只有最外层的物料对滚筒内壁产生磨损、磨蚀作用,因此,本文只分析外层物料对滚筒的摩擦力。

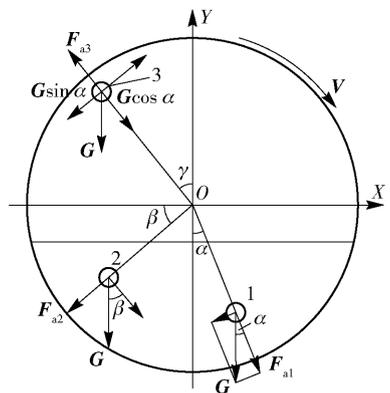


图 3 物料在 3 个象限的力学分解

Fig. 3 Force decomposition of the ball bearing in three quadrants

2 球磨机内物料运动分析

2.1 物料起抛点及下落点角度计算

根据滚筒的运动规律,为了便于分析,认为物料在一定转速下随着滚筒运动时,对滚筒的作用力集

中在下落角和脱离角的一个曲面矩形面上。物料在离心力和摩擦力作用下随滚筒一起旋转,到达一定高度后物料单元所受各力平衡,物料开始与滚筒内壁脱离作抛物线运动。

图4为滚筒内外层物料单元和内层物料单元的运动规律。球1代表最外侧物料,因为跟随滚筒的旋转获得了最大的速率,起落点最高;球2代表最内侧物料,因为旋转速率最小,因此球2起落点最低。

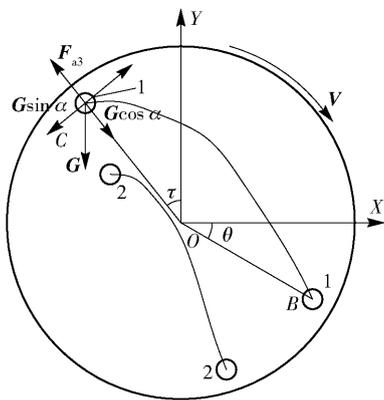


图4 滚筒内物料颗粒的运动轨迹

Fig. 4 Trajectories of the steel ball inside the drum

图4中 τ 表示脱离角, θ 表示下落角。滚筒以顺时针方向旋转。 C 点是钢球或物料颗粒合力为零的一点,假设 C 点在滚筒内壁上。如果筒内各球都以这样的脱离轨迹脱离滚筒,则在 C 点上的物料或小球单元受到的径向合力为零时,物料单元与滚筒内壁开始脱离,发生脱离时物料的受力见式(4)

$$F_{a3} = G \cos \alpha \quad (4)$$

滚筒在一定转速下旋转,设角速度为 ω ,外圈速度为 V ,则物料在滚筒的转动运动带动下,受到的离心力 F 为

$$F = m\omega^2 R \text{ 或 } F = \frac{mV^2}{R} \quad (5)$$

当物料受到的重力指向滚筒中心的分力和物料离心力恰好相同时,将式(5)代入式(4)得

$$V^2 = gR \cos \alpha \quad (6)$$

式(6)为球磨机内物料运动的基本方程式。将物料的运动速度 $V = 2\pi nR/60$ 代入式(6)可得

$$\cos \alpha = \frac{R}{g} \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 \quad (7)$$

从式(7)可以看出,滚筒转速 n 与筒内物料的脱离角 α 之间有固定的关系。分析可知,物料脱离角与滚筒转速 n 及滚筒内径 R 有关,而与磨球的质量和形状无关。

滚筒在某转速 n 下运行,在旋转一周范围内,随着滚筒转速 n 值的增加, α 逐渐减小,当转速 n 值增加到使 $\tau = 0$ 时球体或物料就进入离心运动状态。此时,球磨机不能起到研磨效果,转速仅仅与磨机内半径有关。大直径球磨机内钢球易离心化,转速应低一些,小直径磨机转速可相对高一些。本文研究的球磨机属于大型球磨机,理论上大型球磨机额定转速较低,因此,计算的有效转速应为低转速范围。

假设 C 点是介质开始脱离滚筒内壁的点,此时介质以初速度 v_0 与水平成一角度抛出后沿抛物线轨迹运动最后落到筒壁上的 B 点。 β 为下落角, B 点称为落点。以 C 点为原点建立坐标系,则可导出介质从 C 点落下后运动的轨迹曲线。

$$Y + \frac{gX^2}{2V^2 \cos^2 \alpha} = X \tan \alpha \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)可得

$$Y + \frac{X^2}{2R \cos^3 \alpha} = X \tan \alpha \quad (9)$$

在 C 点所在的物料坐标系中,滚筒内壁的回转圆周轨迹的数学方程为

$$(X - R \sin \alpha)^2 + (Y + R \cos \alpha)^2 = R^2 \quad (10)$$

将式(9)和式(10)两方程联立,求解即可得 B 点的坐标值 (X_B, Y_B) 。

$$\begin{cases} X_B = 4R \sin \alpha \cos^2 \alpha \\ Y_B = -4R \sin^2 \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad (11)$$

则 B 点的正弦值可表示为

$$R \sin \theta = -Y_B - R \cos \alpha \quad (12)$$

或者, B 点的余弦值可表示为

$$R \cos \theta = X_B - R \sin \alpha \quad (13)$$

将式(11)代入式(12)得

$$\sin \theta = \cos \alpha (4 \sin^2 \alpha - 1) \quad (14)$$

由式(14)可知脱离角和下落角的关系,可以通过填充率的大小计算出下落角的大小,从而计算出球磨机滚筒受力区域的范围。

2.2 填充率对滚筒受力区域变化的影响

对于旋转轴线水平式的球磨机而言,并不是填料越多球磨效果最好,而是存在一个最佳填充率的范围。这一点在生产中往往被忽略,因此有必要对大型球磨机的最佳填充率进行研究。填充率与滚筒的直径和滚筒的转速有关。设滚筒转速为零时,物料液面与滚筒中心距离为 d ,填充率 η 定义为物料体积与滚筒内腔体积之比,如图5所示。填充率也可表示为 S_1 与滚筒截面积的比值。

$$\eta = \frac{S_1}{\pi R^2} \tag{15}$$

由分析可知式(16)成立

$$\eta = \frac{\frac{\arccos(d/R)}{180} \pi R^2 - \frac{d}{2} \sqrt{R^2 - d^2}}{\pi R^2} \tag{16}$$

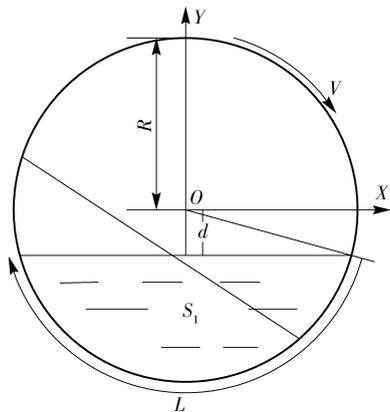


图5 物料填充率示意图

Fig.5 Schematic diagram of the material filling rate

设物料在静止时与滚筒作用的接触面的界面圆弧的长度为 L , 则有公式(17)成立

$$L = \frac{\arccos(d/R)}{90} \pi R \tag{17}$$

结合式(16)、(17)即可求出不同填充率下转速为零时,物料与滚筒的接触面积

$$\eta = \frac{L\pi R - d \sqrt{R^2 - d^2}}{2\pi R^2} \tag{18}$$

将式(17)、(18)联合即可以求解出一定填充率下 L 或 d 的值。将 1.2 节推导出的 3 个象限滚筒的受力(式(1)~式(3))与作用面积相比,即可求出 3 个象限的单位面积上的作用载荷。

2.3 物料与滚筒接触面积计算

设物料在球磨机滚筒内以泥浆状态存在,大颗粒及钢球之间没有空气间隔,金属颗粒与钢球的密度均匀分布。物料和空气的界面与滚筒的旋转轴线平行。则由 2.1 节对物料的脱离点和下落点的计算,可以进一步计算出物料与滚筒的接触面积,设某一填充率下的物料体积为 V_b ,

$$V_b = HS_1 = \eta \pi R^2 \tag{19}$$

本文研究的格子式球磨机滚筒有效长度为 6 m。该球磨机的填充料为流动状的混合金属矿料颗粒和钢制铁球,取平均密度为 6.8 kg/m^3 。经过计算可得出随着滚筒转速的增加物料对滚筒的作用面积的变化规律。

滚筒第四象限的受力面积为滚筒在下落角与 Y 轴负半轴之间所夹的区域,滚筒在第三象限的受力面积为第三象限 X 轴负半轴与 Y 轴负半轴的区域,滚筒在第二象限的受力面积为 X 轴负半轴与脱离角之间所夹的面积。

3 物料与滚筒摩擦力分布计算

在滚筒内物料单元之间存在摩擦力的作用,滚筒内壁和最外层物料单元之间的摩擦力较大。为了计算出摩擦力的分布,本文依然按照象限进行分析。

在第四象限,由 2.2 节分析可知摩擦力的作用区域为下落点与 Y 轴负方向所包含区域。由于物料是由滚筒作圆周运动带动的,因此只考虑圆周切向方向的摩擦力,而径向摩擦力视为内力不予考虑。设物料在滚筒圆周方向的平均摩擦系数为 μ ,则 3 个象限内物料单元的摩擦力分别

$$f_i = \mu F_{mi}, i = 1, 2, 3 \tag{20}$$

设径向合力为 F_i ,则根据式(1)~(3),可得

$$\begin{cases} F_1 = \mu(F_{a1} + G \cos \alpha) + G \sin \alpha \\ F_2 = \mu(F_{a2} + G \sin \beta) + G \cos \beta \\ F_3 = \mu(F_{a3} - G \cos \gamma) - G \cos \gamma \end{cases} \tag{21}$$

进一步,考虑滚筒转速对切向力的影响,可得到

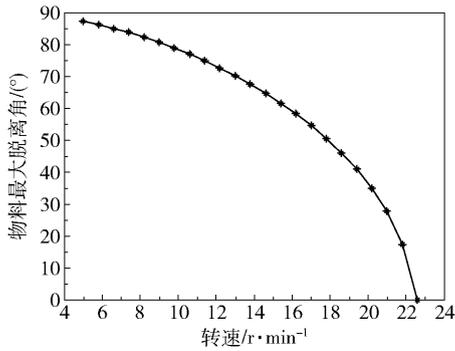
$$\begin{cases} F_1 = \mu(4\pi^2 n^2 mR + G \cos \alpha) + G \sin \alpha \\ F_2 = \mu(4\pi^2 n^2 mR + G \sin \beta) + G \cos \beta \\ F_3 = \mu(4\pi^2 n^2 mR - G \cos \gamma) - G \cos \gamma \end{cases} \tag{22}$$

4 计算与仿真

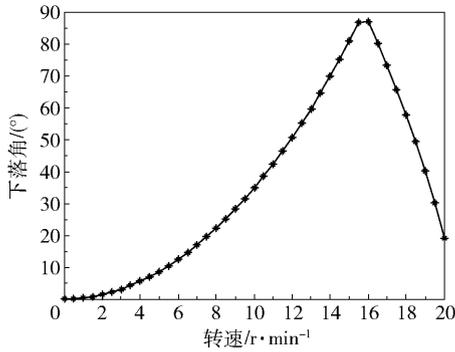
4.1 脱离角和下落角

本文研究的球磨机为格子式大型球磨机,滚筒直径为 4 m,壁厚 20 mm。取物料最大回转半径为 1.6 m,最小直径根据填充率来计算。利用数学仿真软件 MATLAB 对脱离角和转速的关系进行仿真如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,随着滚筒转速的提高,脱离角逐渐降低,当转速达到 22.6 r/min 时,脱离角为零。球磨机如果继续提高转速,物料单元则会处于离心运动状态,从而失去球磨作用。由此可知,该类型球磨机最高转速应当控制在 22.6 r/min 以下。

从图 6(b)中可以看出,随着滚筒转速的提高,下落角先是上升而后迅速下降,曲线最高峰值对应的转速在 15.5 r/min 到 16 r/min 之间。根据式(7),下落角与转速的关系与物料的质量无关。从分析可



(a) 最大脱离角与滚筒转速的关系



(b) 下落角与滚筒转速的关系

图 6 最大脱离角和下落角与滚筒转速的关系

Fig. 6 Relationship between maximum separation angles/falling angles and rotational speeds of the steel ball mill

知,物料的最佳抛起转速在 16 r/min 左右。滚筒转速超过 16 r/min 后,物料由于惯性会产生滑动,使得下落角减小。结合该球磨机实际运行效率统计数据,当球磨机正常运行转速超过 20 r/min 以上时,球磨质量明显下降,且驱动电机耗电量增加。但由于原始数据丢失,最佳运行转速一直难以掌握。从分析计算结果看,本文模型计算数据非常符合企业实际运行情况。

图 7 为下落角和脱离角之间的关系,可以很明显的看出图中曲线出现一个拐点。脱离角达到 88° 时,下落角开始减小。图 8 为不同转速下,滚筒直径对物料下落角的影响。

4.2 填充率与载荷作用面积

按照本文的计算方法对滚筒各个转速下物料与滚筒的接触面积进行仿真如图 9 所示。由图 9 可以看出,随着球磨机转速的提高,滚筒内物料作用于滚筒的作用面积随之增加。从实际情况看,转速的增加使得滚筒内物料产生分散,向着逃离滚动中心的趋势运动。

4.3 填充率、转速与滚筒受力

按照本文的计算方法对滚筒中物料脱离角和 3

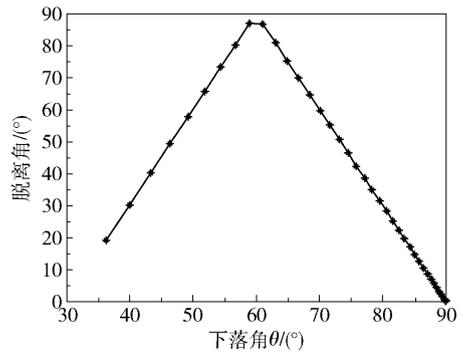


图 7 物料运动下落角与脱离角的关系

Fig. 7 Relationship between the maximum falling angles and the separation angles of the ball

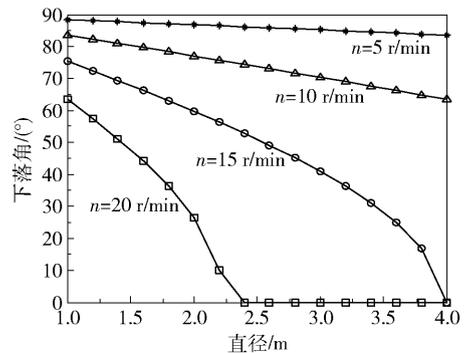


图 8 不同转速下物料下落角与滚筒直径的关系

Fig. 8 Relationship between the maximum falling angles and the diameter of the ball mill

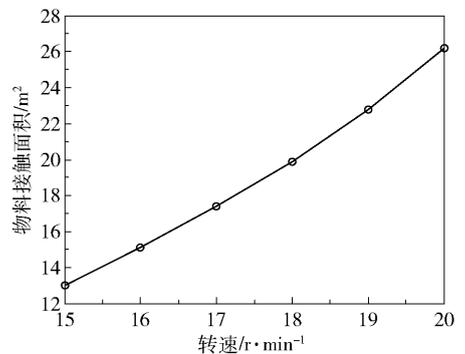
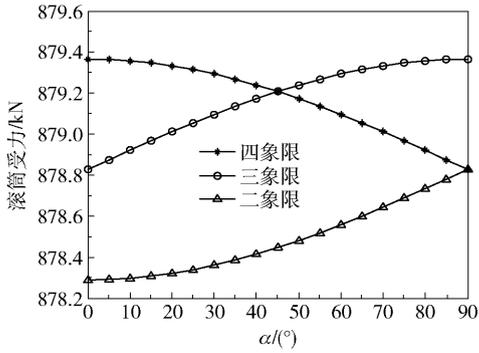


图 9 滚筒转速与接触面积的关系

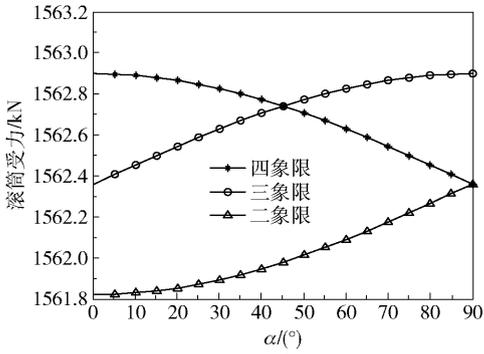
Fig. 9 Relationship between rotation speed and contact area

个象限的滚筒的作用力进行仿真,结果如图 10 所示。图 10(a) 绘制出了在滚筒转速为 15.5 r/min 时各象限的受力情况,图 10(b) 为滚筒转速 20 r/min 时的各象限受力情况。

图 11 描绘了填充率在 0.4, 转速为 15.5 r/min 时滚筒物料的受力情况。从图 10(a) 和图 11 的对比看,填充率的增加使得滚筒的受力增加了近 1.78 倍。



(a) $n=15.5$ r/min(填充率0.3, 转速15.5 r/min)



(b) $n=20.0$ r/min(填充率0.3, 转速20.0 r/min)

图 10 $n = 15.5$ r/min, 20 r/min 时, 物料各象限的受力情况

Fig. 10 Force on the material in each quadrant, when $n = 15.5$ r/min and 20 r/min

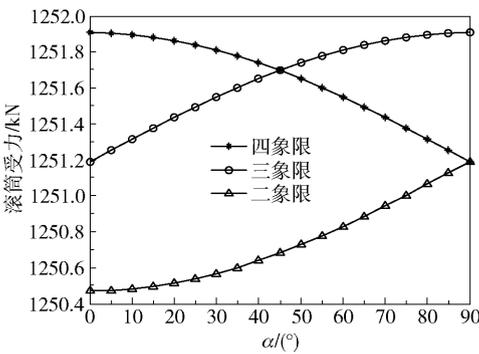


图 11 $\eta=0.4, n=15.5$ r/min 时, 物料各象限的受力情况

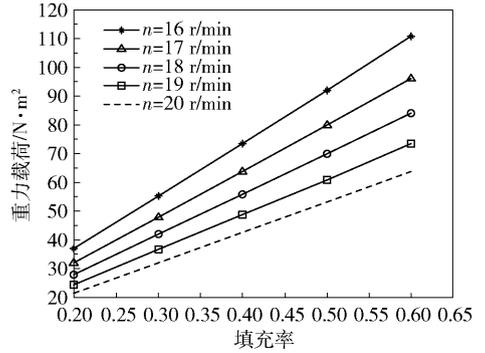
Fig. 11 Force on the material in each quadrant, when $\eta=0.4$ and $n=15.5$ r/min

4.4 填充率对物料离心力与重力载荷的影响

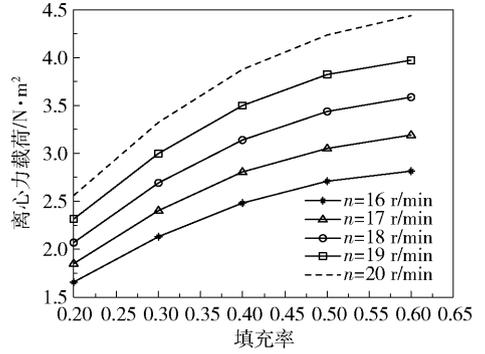
本文取物料在滚筒内的填充率为 0.2 ~ 0.6 之间, 分别计算在不同填充率下物料产生的重力载荷和离心力载荷。由于转速对作用面积的影响导致重力载荷对滚筒的作用力也为一个变化的值, 具体如图 12 所示。

4.5 物料对滚筒内壁的摩擦力

取摩擦系数为 0.1, 在转速为 15.5 r/min、填充率分别为 0.3 和 0.4 两种情况下, 对球磨机滚筒内壁所受摩擦力进行仿真分析, 如图 13 所示。由分



(a) 重力载荷



(b) 离心力载荷

图 12 不同转速、不同填充率下的物料重力载荷和离心力载荷

Fig. 12 Gravity and centrifugal force of the ball for different speeds and different fill rates

析可知, 滚筒壁在第二象限和第四象限的摩擦力随着转速的增加都呈现增加趋势, 这与物料随转速升高而分散有关。然而, 滚筒在第二象限摩擦力增加的速度要比第四象限快。在两种填充率下, 物料对滚筒壁的摩擦力在第三象限都随着转速增加而减小。对比图 13(a)、(b), 同等条件下, 填充率 0.4 时物料对滚筒内壁的摩擦力是填充率 0.3 时的 1.33 倍。

5 结论

(1) 球磨机运行时, 物料对滚筒内壁衬板的力学作用比较复杂, 在 3 个象限表现为不同的作用规律, 物料对滚筒的作用力及其分布受滚筒转速和填充率的影响。综合考虑本文分析结论, 该球磨机的最大运行转速应小于 22.6 r/min, 最佳运行转速控制在 16 r/min 对提高球磨效率比较有利。本文计算的有效转速范围符合大型球磨机额定转速较低的特点。

(2) 不同的球磨机有固定的外形要求, 设计一个球磨效率高的球磨机与物料本身的质量无关, 而只与球磨机滚筒转速和回转半径有关。在脱离角固

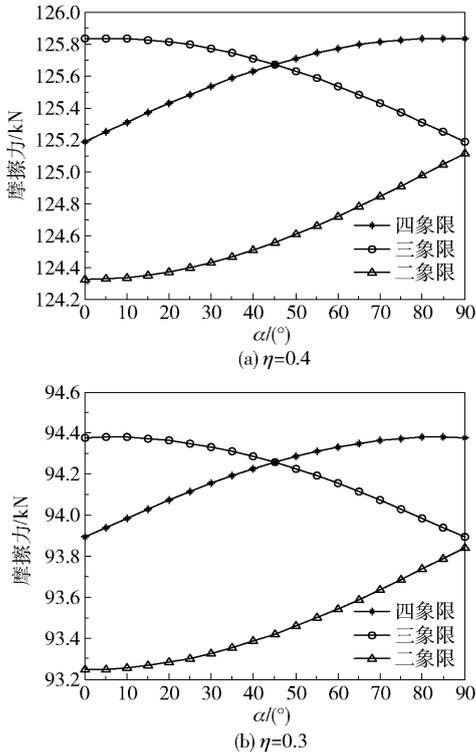


图 13 $n = 15.5 \text{ r/min}$ 、 $\eta = 0.4$ 和 0.3 时物料对滚筒的摩擦力

Fig. 13 Friction of the material on the cylinder when $n = 15.5 \text{ r/min}$, $\eta = 0.4$ and 0.3

定的前提下,球磨机的额定转速和滚筒的有效回转半径存在固定关系,滚筒直径越大额定转速越小,反之,滚筒直径越小额定转速越大。

(3)通过计算仿真得出,物料的填充率不是越大越好,在填充率超过 0.4 时,物料对滚筒总的作用载荷增高,此时球磨机如果运行在最佳转速附近势必会使得球磨机运行负担过重,不利于提高生产效率。为了提高进出料的速度,在填充率较大时(如填充率超过 0.4)可适当地降低转速,减小脱离角从而降低物料对滚筒的压力。

(4)物料对球磨机滚筒内衬板的摩擦力不容忽视,是球磨机耐用寿命的主要衡量指标,通过本文计算,摩擦力在球磨机滚筒 3 个象限内对内衬板的摩擦力的表现规律不尽相同,通过摩擦力的分布来看,转速在 16 r/min 时,摩擦力作用面积最大,此时恰恰是球磨机额定转速即球磨效率最高的时刻。因此综合考虑,在保证球磨效率的前提下,填充率应控制在 0.3 到 0.4 之间,滚筒转速控制在 16 r/min ,既可以减小滚筒的承载压力也可以保证有效的进料和出料速度,使得球磨的效率最大。

参考文献:

- [1] 张宁. 球磨机 CAE 技术应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Zhang N. The study of application of CAE technique on the ball mill[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [2] 袁哲. 球磨机磨矿介质运动分析与参数优化[D]. 辽宁鞍山: 辽宁科技大学, 2008.
Yuan Z. The motion analysis of grinding medium and the optimization of parameters on the ball mill[D]. Anshan, Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2008. (in Chinese)
- [3] 陈剑锋, 肖飞凤. 球磨机的发展方向综述[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 94-97.
Chen J F, Xiao F F. The summarization of the developing trend of ball-mills[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(8): 94-97. (in Chinese)
- [4] 李文亮, 杨涛, 于向军, 等. 国外大型球磨机发展现状[J]. 矿山机械, 2007, 35(1): 13-15.
Li W L, Yang T, Yu X J, et al. Current development status of foreign big-scale ball mill[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35(1): 13-15. (in Chinese)
- [5] 姚一民. 球磨机磨球运动学分析及对衬板影响的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Yao Y M. The study of motion analysis of milling ball and to the liner influence on the ball mill[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 田秋娟. 基于离散元方法的大型球磨机工作性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Tian Q J. Study on the working performances of large tumbling ball mill based on the discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [7] 史国军. 基于三维离散单元法的球磨机介质工作参数研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
Shi G J. Study on medium parameters based on three-dimensional discrete element method of ball mill [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] Lu S Y, Mao Q J, Peng Z, et al. Simulation of ball motion and energy transfer in a planetary ball mill[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(7): 078201.
- [9] Huang P, Jia M P, Zhong B L. New method to measure the fill level of the ball mill I—theoretical analysis and DEM simulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 4(23): 460-467.
- [10] 李媛华. 基于离散元技术的球磨机参数优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

Li Y H. Study on the parameter optimization of ball mills based on the technology of distinct element method[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

[11] 陈黎明. 球磨机滚筒应力的三维有限元分析及其剩余

寿命预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.

Chen L M. Research on ball mill roller stress of three dimensional finite element analyses and its residual life prediction [D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese)

Analysis of the material dynamics of a large lattice ball mill

ZHANG Wei¹ REN Chong¹ LIU YuNan² SONG YuGuo¹

(1. Engineering & Training Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010;

2. Advanced Manufacturing Technology of the Key Laboratory of Beijing Municipality, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Due to the lack of data for an imported large ball mill with grinding balls in a cylinder, there is insufficient reference material to allow the speed and filling rate of this type of ball mill to be optimized. This results in frequent failure of the ball mill. Therefore, it is necessary to study the influence of different filling rates and different speeds on the mechanical properties of the ball mill in order to obtain the relationship between the rotation speed and the filling rate, and extend the service life of the ball mill and improve its efficiency. In this paper, based on the movement inside the ball mill, the interactions between the steel balls in the ball mill are analyzed. By considering different speeds and different fill rates, the load conditions of the drum of the ball mill are analyzed, and the relationship between the separation angle and the falling angle are analyzed. By means of the above analysis, a falling angle and separation angle model, a load area model and a roller friction model were established. A simulation analysis of each model was carried out under the actual working conditions.

Key words: ball mill; filling ratio; falling angle; separation angle; friction

(责任编辑:吴万玲)