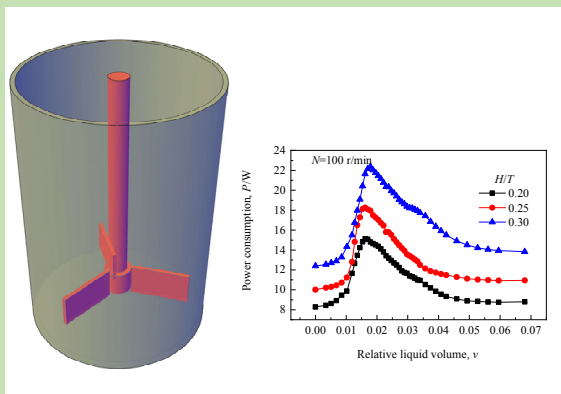


Power characteristic of adhesive particles mixing in a stirred tank

Hao XIONG, Yuyun BAO, Jing WANG, Ziqi CAI*

College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: Power consumption is an important parameter in the design and scale-up of stirred tank reactors. The effects of relative liquid volume, rotational speed and fill level on power consumption were experimentally investigated in a cylindrical stirred tank. The discrete element method (DEM) and Hertz-Mindlin with JKR model were used to investigate the effect of the adhesion force of particles with different relative liquid volumes on the power consumption. Results showed that the power consumption first increased and then decreased with the increase of the relative liquid volume, and reached a maximum



when the relative liquid volume was 0.0162. With the increase of the rotational speed, the power consumption increased faster, but the rotational speed influence index on the power consumption decreased first and then increased with the increase of the relative liquid volume. The maximum power consumption was about 1.8 times of the power consumption with saturated particles. A new method for indirect measurement of cohesion between particles was proposed, and a linear relationship between power consumption and cohesion was obtained.

Key words: adhesive particle; stirred tank; power consumption; adhesion force; discrete element method

收稿: 2020-02-10, 修回: 2020-03-02, 网络发表: 2020-03-10, Received: 2020-02-10, Revised: 2020-03-02, Published online: 2020-03-10

作者简介: 熊浩(1993-), 男, 江西省南昌市人, 硕士研究生, 化学工程与技术, E-mail: 2017200100@mail.buct.edu.cn; 蔡子琦, 通讯联系人, E-mail: caiziqi@mail.buct.edu.cn.

引用格式: 熊浩, 包雨云, 汪晶, 等. 具有黏结颗粒的搅拌槽功率特性. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1273-1280.

Xiong H, Bao Y Y, Wang J, et al. Power characteristic of adhesive particles mixing in a stirred tank (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(11): 1273-1280, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220040.

具有黏结颗粒的搅拌槽功率特性

熊浩, 包雨云, 汪晶, 蔡子琦*

北京化工大学化学工程学院, 北京 100029

摘要: 功耗是搅拌反应器设计和放大过程的重要参数。在圆柱形搅拌槽内通过实验研究了相对液体体积、转速和物料高度对功耗的影响, 采用离散元方法(DEM), 用 Hertz-Mindlin with JKR 模型模拟了不同相对液体体积颗粒的黏结对功耗的影响。结果表明, 随相对液体体积增大, 功耗呈先增大后减小的变化趋势, 在相对液体体积为 0.0162 时达到最大值。随转速增大, 功耗增长变快, 但随相对液体体积增大, 转速对功耗的影响指数呈先减小后增大的趋势。不同物料高度的功耗最大值均为饱和颗粒的 1.8 倍, 不同物料高度的单位质量功耗随相对液体体积的增长速率几乎一致。提出了新的间接测量颗粒间黏结力的方法, 发现功耗与黏结力呈线性关系。

关键词: 黏结颗粒; 搅拌槽; 功耗; 黏结力; 离散元方法

中图分类号: TQ460.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)11-1273-08

1 前言

搅拌单元操作在化工^[1]、制药^[2]和食品^[3]等行业均有广泛应用。搅拌可增强混合物中物质间或相间的传递, 达到促进均匀混合、加快传热和强化传质的效果。在搅拌器的设计过程中, 搅拌轴输入功率的计算是重要的一环, 对搅拌器的设计、选型及优化起指导性作用。

在过程工业中, 颗粒混合的应用广泛, 如在制药工程中, 为确保颗粒药物药效的稳定性, 须严格保证各组分的混合均匀度, 在混匀过程中, 均匀度又与混合过程的功耗直接相关。Boonkanokwong 等^[4]研究了无黏结性的玻璃珠颗粒在叶片式搅拌装置中, 桨叶的几何形状和转速、物料高度、颗粒摩擦系数和粒径对搅拌桨叶扭矩和功耗的影响, 发现功耗与颗粒物料高度的平方呈比例关系。但在不少工艺过程中还涉及颗粒间具有黏结力的情况, 如食品加工、湿法造粒和混凝土精加工过程等。因此, 有必要研究颗粒具有一定黏结性时搅拌器功耗的规律。Huang 等^[5]研究了秸秆颗粒在带式搅拌槽内物料高度、搅拌器转速和物料含水率对功耗的影响, 发现功耗和转速间呈线性关系, 但扭矩不受转速影响。随物料含水率增大, 功耗呈先增大后减小的变化趋势, 在物料含水率为 83% 的饱和含水状态时功耗达到极大值。Ritala 等^[6]发现高剪切混合器内不同黏结剂的表面张力和颗粒的孔隙率对功耗有一定影响, 且用朗普夫公式重新解释了表面张力对功耗的影响。此外, 固相和液相的加入方法也是功耗的影响因素^[7]。但在具有黏结性的颗粒的混合过程中, 直接研究黏结力对功耗影响的工作仍

较少。

为考察颗粒黏结对功耗的影响规律, 量化颗粒黏结力是首要任务, 现在主要的测量方法包括原子力显微镜法^[8]、离心力法^[9]、振动分离法^[10]和电场剥离法^[11]等。这些测量颗粒间黏结力的方法均存在一定局限性: 原子力显微镜法只能测量单个颗粒的黏结力; 离心力法和振动分离法一般适用于测定颗粒与平面间黏结力且不能忽略重力影响; 电场剥离法只能测量带电颗粒的黏结力。离散元方法(DEM)可描述颗粒间的碰撞, 从而获得颗粒动力学的关键特征及物理实验难以直接测量的参数, 成为研究颗粒间相互作用的重要方法^[12]。

为研究搅拌槽内颗粒黏结性对功耗的影响, 本工作采用实验方法研究了搅拌槽内相对液体体积、搅拌转速和物料高度对功耗的影响规律, 得出相应的功耗变化曲线, 用安息角表征不同相对液体体积下硅胶颗粒的黏结力, 运用 DEM 对具有黏结性的颗粒间的混合过程进行模拟, 获得与黏结力有比例关系的表面能参数及颗粒间黏结力与功耗的关系。

2 实验与模拟

2.1 实验设备

实验装置如图 1 所示。主要包括圆柱形搅拌槽、三叶直叶桨(北京迈士华混合设备有限公司)、交流电机(西门子电机公司)、变频器(丹麦丹弗斯公司)、扭矩传感器(航天空气动力研究所)、数据采集板(北京中泰研创有限公司)。实验所用搅拌槽和搅拌桨叶几何结构示意图如图 2 所示。

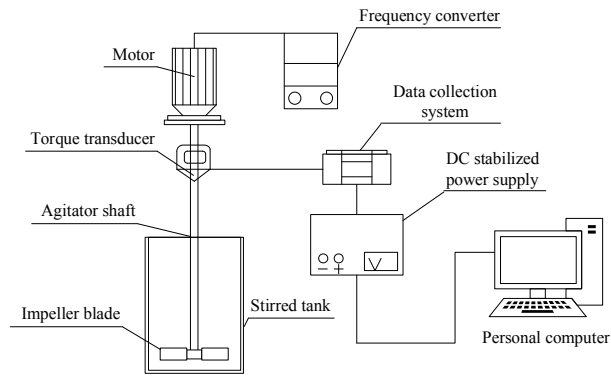


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

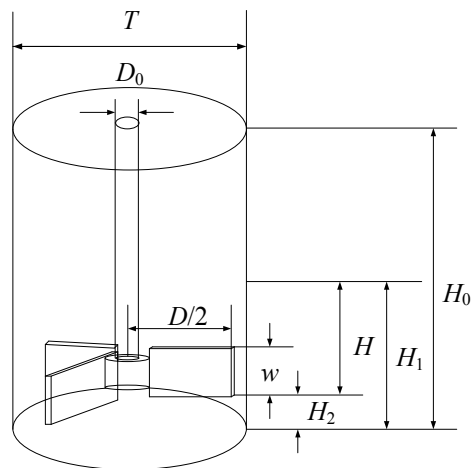


图 2 三叶直叶桨式搅拌槽示意图
Fig.2 Schematic diagram of stirred tank with 3-flat-blade impeller

搅拌槽和搅拌桨叶尺寸见表 1。搅拌槽内径 $T=210$ mm，高度 $H_0=310$ mm。搅拌桨轴直径 $D_0=23$ mm，桨叶直径 $D=180$ mm，桨叶宽度 $w=40$ mm。实验中用到的颗粒床层的填充高度 $H_1=63, 73.5$ 和 84 mm。桨叶离底高度 $H_2=21$ mm。 H 为颗粒填充高度与桨叶底端的距离(颗粒床层高度 H_1 与桨叶离槽底高度 H_2 之差)。

表 1 三叶直叶桨式搅拌槽尺寸
Table 1 Dimensions of stirred tank with 3-flat-blade impeller

| Dimension | Value/mm |
|-----------|------------|
| T | 210 |
| D_0 | 23 |
| D | 180 |
| H_0 | 310 |
| H_1 | 63/73.5/84 |
| H_2 | 21 |
| H | 42/52.5/63 |
| w | 40 |

2.2 功耗

桨叶所受扭矩采用非接触式扭矩传感器测量，测量范围为 $0\sim10\text{ N}\cdot\text{m}$ 。搅拌颗粒床层所需的扭矩 $M_T(\text{N}\cdot\text{m})$ 为

$$M_T = M - M_0 \tag{1}$$

其中， M 为搅拌槽负载时测得的平均扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$)， M_0 为空载时测得的平均扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$)。功耗和单位质量功耗的计算方程如下：

$$P = 2\pi N M_T \tag{2}$$

$$P_m = \frac{P}{m} \tag{3}$$

其中， P 为搅拌颗粒所消耗的功率(W)， P_m 为单位质量功耗(W/kg)， N 为搅拌桨叶的转速，由激光转速仪测得。实验中搅拌操作转速范围为 $60\sim140\text{ r/min}$ ， m 为搅拌槽内所有物料的总质量(kg)。

与 Boonkanokwong 等^[4]对物料高度的定义相同，在物料高度对搅拌功耗的影响研究中，由于颗粒的填充高度低于桨叶最底端时搅拌桨几乎不消耗功率，用 H 和搅拌槽直径 T 之比表征物料高度， $H/T=0.20, 0.25$ 和 0.30 。

2.3 实验物料

实验所用物料为白色球形 FNG 耐水硅胶颗粒(青岛鑫起来公司)，物性如表 2 所示。使用标准筛得到粒径为 $3\sim4\text{ mm}$ 的颗粒，使用体积法测量其堆积密度。由于硅胶颗粒具有吸水的性质，在达到饱和之前表面无水分，无黏结现象。在硅胶颗粒达到饱和之前增大硅胶颗粒含水率仅增大硅胶颗粒的密度。不同含水率的硅胶颗粒的配制方法：在搅拌槽内先加入一定质量的硅胶颗粒，逐渐加入相应比例的水，在一定搅拌转速下当扭矩不再变化时认为混合达到均匀。颗粒的含水率为

$$c = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{4}$$

其中， c 为硅胶颗粒的含水率($\%$)， m_0 和 m_1 分别为干硅胶颗粒的质量和加入的液相质量(kg)。

表 2 干硅胶颗粒的性质
Table 2 Properties of dry silicon particles

| Variable | Value |
|---|-------------|
| Particle diameter, d_p/mm | 3~4 |
| Particle real density, $\rho/(\text{kg/m}^3)$ | 850 |
| Particle bulk density, $\rho_b/(\text{kg/m}^3)$ | 476 |
| Mass of granular bed, m/kg | 1.040~1.385 |

图 3 为搅拌槽中功耗与颗粒含水率的关系。由图可知，当硅胶颗粒中含水率提高时，搅拌槽中功耗随之增加。当含水率小于 72% 时，功耗随含水率增大呈线性增加；当含水率大于 72% 时，功耗增幅变大，因此认为含

水率达到 72%时硅胶颗粒达到饱和。吸水达到饱和后,继续加入水会使颗粒之间出现黏结力,从而进一步增大功耗的增长速度,该现象类似于高黏度流体的搅拌。为考察流化床中颗粒团聚和黏结失流的现象, 安卓卿^[13]已通过类比液体黏度,提出了颗粒表观黏度的概念,用于表征颗粒间相互作用力,说明颗粒的黏结性与流体的黏度具有可比性。

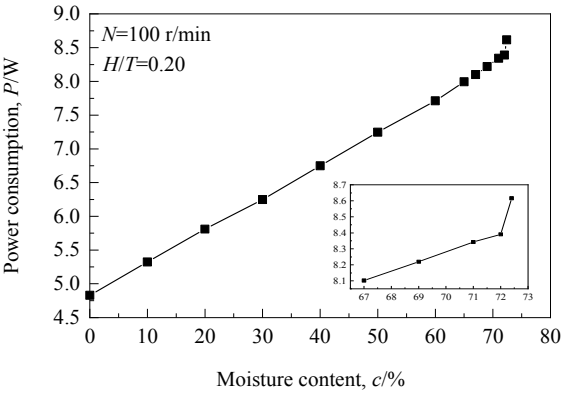


图 3 含水率对功耗的影响

Fig.3 Influence of moisture content on power consumption

将含水率达饱和之后继续加入的液相体积命名为自由液体体积,并用无因次化自由液体体积表示,命名为相对液体体积。

$$v = \frac{v_1}{v_0} \times 100\%$$
 (5)

其中, v 为相对液体体积, v_1 为颗粒饱和后继续加入液相的体积(m^3), v_0 为干颗粒体积(m^3)。

2.4 DEM 模拟

用 DEM 研究颗粒运动时,常用的表征颗粒间接触的模型为 Cundall 等^[14]提出的 Hertz-Mindlin (no slip)模型^[15-17],但该模型并不适用于颗粒之间具有黏结力的情况。考虑到硅胶颗粒之间形成基于毛细管力的黏结力,采用 Hertz-Mindlin with JKR (Johnson-Kendall-Roberts) 接触模型^[18]。该模型建立在 Johnson-Kendall-Roberts 理论^[19]基础上,可用于模拟具有黏结力的粉末或湿颗粒间的碰撞行为,在需要考虑黏结力的 DEM 模拟中应用广泛^[18,20,21]。

模拟中的搅拌装置尺寸与表 1 一致,干颗粒参数与表 2 一致。湿颗粒的密度均为饱和硅胶颗粒密度。颗粒粒径在模拟中设置为 3~4 mm 随机生成。

模拟中所需参数通过实验进行测定,其中弹性恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数可参考文献^[17]。表面能通过震荡安息角的方法获得,震荡的方法已经用于测量颗粒与壁面之间的黏结力^[10]。表面能是分离两个黏

结表面的单位接触面积所需的能量。该实验装置由一块边长为 0.5 m 的正方形平板和 0.1 m×0.1 m×0.12 m 的方盒组成。图 4 为湿硅胶颗粒的震荡安息角的实验和模拟的对比(相对液体体积 $v=0.0162$)。在方盒内填入 0.86 kg 硅胶颗粒,然后将方盒抬高 0.2 m,使方盒自由下落,在下落的起始时刻抽离方盒其中一面的钢板。待方盒自由落在平板之上,部分带有黏结性的硅胶颗粒由于惯性力而震落,从而形成安息角。不同含水率的硅胶颗粒由于黏结力差异而形成不同的安息角,在模拟中通过调节不同的表面能模拟该实验,当实验角度与模拟角度一致时,认为该表面能参数可信。

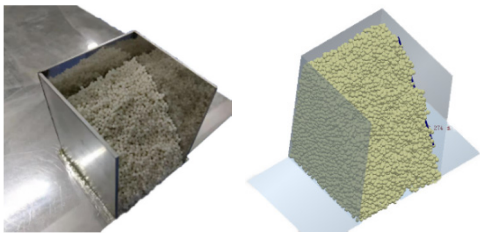


图 4 黏结颗粒的实验和模拟安息角的对比

Fig.4 Comparison of experimental and simulated rest angles of adhesive particles

不同相对液体体积硅胶颗粒安息角的实验值、模拟值和表面能见表 3。

表 3 不同相对液体体积颗粒的安息角的实验值、模拟值和表面能

Table 3 Experimental and simulated values of rest angle and surface energy of particles with different relative liquid volumes

| Relative liquid volume | Experimental rest angle/° | Simulated rest angle/° | Surface energy/(J/m ²) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 0 | 25.7 | 25.9 | 0 |
| 0.0034 | 26.8 | 27.2 | 0.05 |
| 0.0102 | 29.2 | 38.9 | 0.45 |
| 0.0128 | 42.2 | 42.3 | 2.90 |
| 0.0136 | 45.6 | 45.6 | 4.10 |
| 0.0145 | 47.8 | 47.5 | 5.50 |
| 0.0162 | 50.4 | 50.1 | 7.00 |
| 0.0204 | 49.1 | 48.9 | 6.00 |
| 0.0272 | 45.2 | 45.4 | 3.90 |
| 0.0306 | 41.8 | 41.9 | 2.70 |

DEM 模拟中所用颗粒特性和相关设置见表 4。

3 结果与讨论

3.1 相对液体体积对功耗的影响

在硅胶颗粒吸水达到饱和后,硅胶颗粒表面开始出现自由液体并与其他颗粒形成液桥,颗粒间开始出现黏

结现象。图 5 为物料高度 $H/T=0.20$, 转速 $N=100\text{ r/min}$ 时相对液体体积 v 与功耗 P 的关系。图中每个点的功耗

表 4 物料特性
Table 4 Material properties

| Variable | Value |
|---|---------------------|
| Time step/s | $<10^{-6}$ |
| Number of particles ($H/T=0.20$) | 61149 |
| Dry/saturated particle density/(kg/m^3) | 850/1462 |
| Density (steel)/(kg/m^3) | 7930 |
| Young's modulus (particle)/Pa | 1.21×10^9 |
| Young's modulus (steel)/Pa | 2.04×10^{11} |
| Poisson's ratio (particle) | 0.48 |
| Poisson's ratio (steel) | 0.285 |
| Particle diameter (random generation)/mm | 3~4 |
| Surface energy/(J/m^2) | 0~7 |
| Coefficient of rolling friction (particle-particle) | 0.028 |
| Coefficient of rolling friction (particle-steel) | 0.01 |
| Coefficient of static friction (particle-particle) | 0.49 |
| Coefficient of static friction (particle-steel) | 0.43 |
| Coefficient of restitution (particle-particle) | 0.376 |
| Coefficient of restitution (particle-steel) | 0.544 |

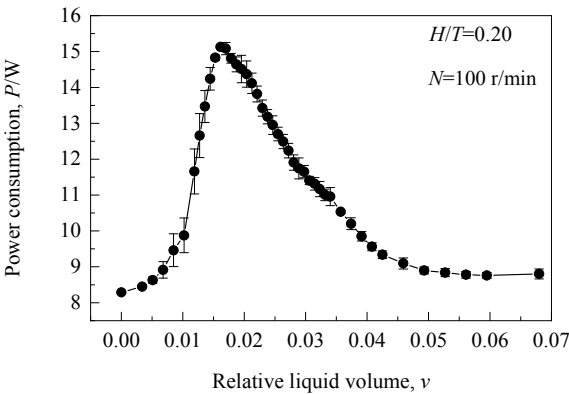


图 5 相对液体体积对功耗的影响
Fig.5 Influence of relative liquid volume on power consumption

平均值和标准偏差通过三次单独实验中的三次功耗计算所得。从图中可发现, 功耗峰值附近区域的标准偏差较大, 这是由于峰值附近区域是功耗的快速增长和下降区域, 对相对液体体积的变化非常敏感, 从而导致峰值附近区域实验数据波动较大。

由图可知, 随 v 增大, P 的变化趋势可分为四个阶段。第一阶段($v<0.0119$), P 随 v 增大而逐渐增大, 且增速加快。第二阶段($0.0119<v<0.0162$), P 仍随 v 增大而增大, 且在 v 为 0.0162 时达到最大值, 但该阶段 P 的增速已开始减小。采用原子力显微镜考察 SiO_2 基底与探针之间的黏结力随相对湿度的变化规律^[22], 发现黏结力随相对湿度增大而变化的趋势与本实验中所得到的 P 随 v 增大而变化的趋势相同, 从另一个角度说明了 P 增大来自颗粒间的黏结力。第三阶段($0.0162<v<0.0306$), P 随 v 增大而迅速下降。这主要是因为随 v 增大, 颗粒间的弯液面形态开始由凹液面向凸液面转化, 毛细管力中的拉普拉斯力逐渐由吸引力向排斥力转化, 颗粒间的黏结力迅速减弱^[23]。第四个阶段($0.0306<v<0.0680$), 随 v 进一步增大, P 减小的趋势变缓直至一个稳定值。这是由于液体逐渐覆盖硅胶的整个表面, 毛细管力逐渐消失^[24]。 v 增大时 P 先增后减的变化规律, 一方面可更准确地确定搅拌功耗的变化情况, 为反应釜的设计提供基础数据; 另一方面在对物料含水率有要求的搅拌操作中, 可通过功耗的变化间接反映物料含水率的变化, 指导生产操作。

3.2 转速对功耗的影响

图 6 为物料高度 $H/T=0.20\sim0.30$ 及相对液体体积 $v=0.0051\sim0.0680$ 时转速 N 对功耗 P 的影响。从图可看出, 随 N 增大, P 均逐渐增大, 且增长速度越来越快, 但不同物料高度下, P 受 N 的影响程度不同。

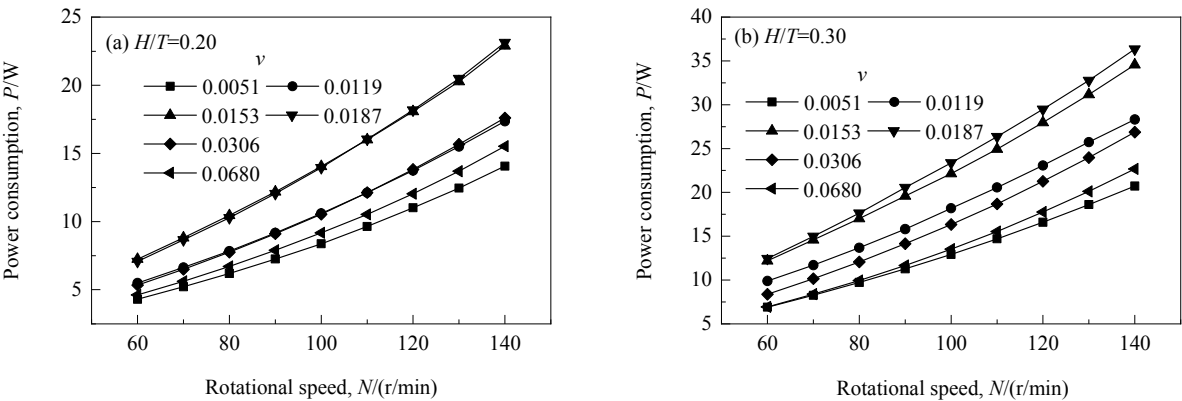


图 6 转速对功耗的影响
Fig.6 Influence of rotational speed on power consumption

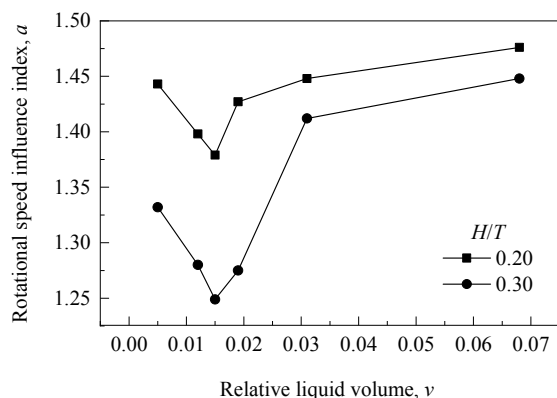


图7 转速影响指数与相对液体体积的关系

Fig.7 Relationship between rotational speed influence index and relative liquid volume

用方程 $P=kN^a$ 对所有曲线进行拟合, 转速 N 的影响指数 a 随 v 的变化如图7所示。由图可知, 随着 v 增大, 在两种物料高度下 N 对 P 的影响指数 a 均先减小后增大。桨叶驱动物料运动时, 需克服来自颗粒和搅拌桨叶之间的摩擦阻力和惯性阻力。转速和堆积密度越大时, 惯性阻力更大。而随 v 增大, 一方面颗粒间会因毛细管力作用趋向于团聚, 使颗粒堆积密度增大, 从而导致惯性阻力增大; 另一方面, 通过使用原子力显微镜对 SiO_2 基底的摩擦力进行测量, 发现在 v 增大的开始阶段, 摩擦力的增长速度比黏结力的增长速度快很多^[25]。

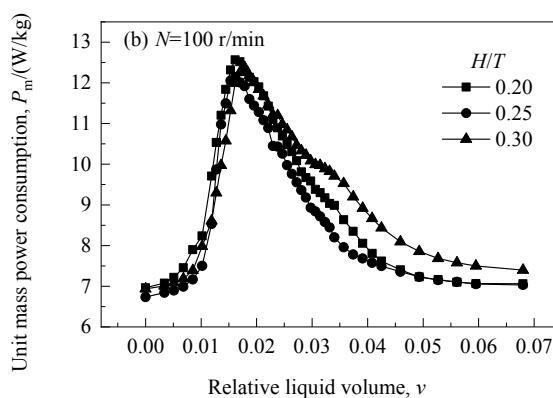
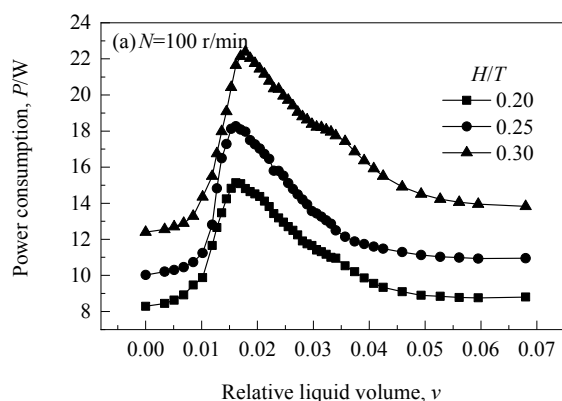


图8 物料高度对功耗和单位质量功耗的影响

Fig.8 Influences of H/T on power consumption and unit mass power consumption

表5 单位质量功耗的下降幅度

Table 5 Drop amplitude of unit mass power consumption

| H/T | $P_m^0/(W/kg)$ | $P_m^1/(W/kg)$ | $P_m^0 - P_m^1/(W/kg)$ |
|-------|----------------|----------------|------------------------|
| 0.20 | 12.56 | 7.06 | 5.50 |
| 0.25 | 12.14 | 7.03 | 5.11 |
| 0.30 | 12.38 | 7.40 | 4.98 |

对比所有 H/T 下降阶段的下降幅度可发现, H/T 越大, P_m 下降幅度越小, 表明 H/T 越大, P_m 的下降速率

越慢。这是因为 P 随 H/T 增大的增长速度大于颗粒质量随 H/T 增大的线性增长速度; 其次 H/T 越大, 非黏结力导致的功耗所占比例越大, 而下降阶段减少的为黏结力导致的功耗, 所以 H/T 越大, P_m 下降幅度越小。

3.3 物料高度对功耗的影响

物料高度 H/T 是功耗 P 的重要影响因素。当物料填充高度低于搅拌桨叶最底端时搅拌功耗几乎为0。图8(a)和8(b)分别为 $N=100$ r/min 且 $H/T=0.20, 0.25$ 和 0.30 时, 相对液体体积 v 对功耗 P 和单位质量功耗 P_m 的影响。图8(a)表明, 相同 v 下, P 随 H/T 增大而增大, 且增长的速度随 H/T 增大而明显加快, 最大功耗均为饱和和硅胶功耗的约1.8倍, 这可为确定不同物料高度条件下的最大功耗提供参考。图8(b)表明, 所有 H/T 下的 P_m 随 v 增大而增大阶段的曲线基本重合, 且 P_m 在所有 H/T 下的上升幅度基本一致。 P_m 随 v 增大而下降的阶段, P_m 在所有 H/T 条件下的下降趋势相同, 下降幅度不同, 不同 H/T 条件下, P_m 的下降幅度见表5, 其中, P_m^0 为最大 P_m , P_m^1 为下降至基本稳定时的 P_m 。

越慢。这是因为 P 随 H/T 增大的增长速度大于颗粒质量随 H/T 增大的线性增长速度; 其次 H/T 越大, 非黏结力导致的功耗所占比例越大, 而下降阶段减少的为黏结力导致的功耗, 所以 H/T 越大, P_m 下降幅度越小。

3.4 黏结力对功耗的影响

由以上研究可看出, 颗粒间的黏结力对搅拌功耗产生较大影响。本工作通过实验方法用安息角表征不同 v

时硅胶颗粒间黏结力, 采用 DEM 方法结合 Hertz-Mindlin with JKR 模型对安息角实验进行模拟, 获得与黏结力有比例关系的表面能。再利用所得表面能对不同 v 时硅胶颗粒在搅拌槽内的运动进行模拟, 获得搅拌桨的扭矩。

图 9 为 $H/T=0.20$, $N=100$ r/min 时, 不同 v 的硅胶颗粒扭矩的模拟值和实验值的对比, 总体上扭矩模拟值和实验值吻合良好。 $v>0.034$ 时, 扭矩模拟值明显大于实验值, 这是因为此时液体含量太大, 模拟使用的黏结力模型不再适用。由于黏结力与表面能之间具有如下关系^[21], 在获得表面能参数后, 可得出颗粒之间的黏结力 F_{ad} :

$$F_{ad}=3/2\pi\gamma R^* \quad (6)$$

其中, γ 为单位接触面积的能量(J/m²), R^* 为颗粒的当量半径:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (7)$$

其中, R_i 和 R_j 为球形颗粒的半径(mm)。两球形颗粒的接触情况在 JKR 理论中有详细描述^[19]。计算黏结力时 R_i 和 R_j 取 3~4 mm 的中间值 3.5 mm。

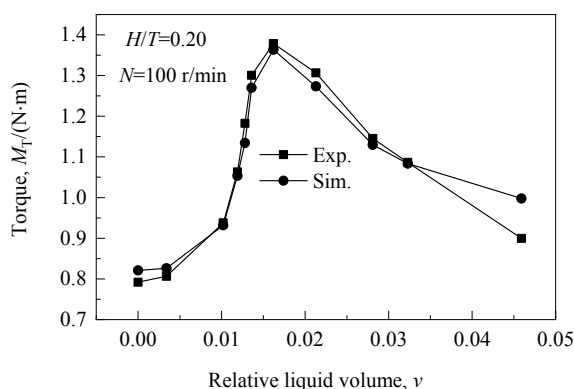


图 9 扭矩实验值和模拟值的对比

Fig.9 Comparison of experimental values and simulated values of torque

图 10 为 $H/T=0.20$, $N=100$ r/min 时黏结力 F_{ad} 对功耗 P 的影响。由图可知, P 随 F_{ad} 增大呈线性增大趋势, 与 JKR 模型推导的功耗与黏结力关系一致^[18], 证明用数值模拟结合实验标定的间接测量颗粒间黏结力的方法可靠, 是一种获取颗粒间黏结力的新方法。

4 结 论

通过实验研究了搅拌槽内相对液体体积、转速和物料高度对搅拌功耗的影响, 采用模拟和实验相结合的方法

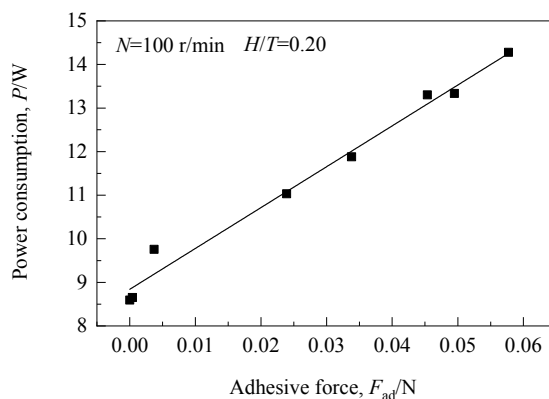


图 10 黏结力对功耗的影响

Fig.10 Influence of adhesive force on power consumption

法获得了颗粒间的黏结力及黏结力与功耗的关系, 得到如下结论:

(1) 随相对液体体积 v 增大, 功耗 P 逐渐增大, 且在 $v=0.0162$ 时达到最大值, 接着迅速下降, 在一定 v 值后达到稳定。

(2) 随转速 N 增大, 不同 v 下硅胶颗粒的 P 均增大, 且增长速度随 N 增大而变快。但相同物料高度 H/T 和 v 逐渐增大的条件下, N 对 P 的影响指数 a 呈先减后增的趋势。相同 v 下, H/T 越高, N 对 P 的影响指数 a 越小。

(3) 不同 H/T 下, P 随 v 的变化趋势一致, 且 P 最大值均约为饱和点 P 的 1.8 倍。 H/T 越高, 单位质量功耗 P_m 的下降幅度越小。

(4) 采用震荡实验以安息角为特征量可间接表征颗粒间黏结力, 将实验和数值模拟相结合可获得黏结颗粒的表面能。基于所得的颗粒表面能计算的搅拌槽中的搅拌扭矩的模拟值和实验值吻合良好, P 与 F_{ad} 成正比。这是一种可较准确地获取颗粒间黏结力的新方法。

参考文献

- [1] Halidan M, Chandratilleke G R, Dong K J, et al. Mixing performance of ribbon mixers: effects of operational parameters [J]. Powder Technology, 2018, 325: 92–106.
- [2] Weinekötter R. Compact and efficient continuous mixing processes for production of food and pharmaceutical powders [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20: 48–50.
- [3] Gijón-Arreortúa I, Tecante A. Mixing performance of a curved-ribbon impeller during blending of food powders [J]. Chemical Engineering & Technology, 2015, 38(4): 734–740.
- [4] Boonkanokwong V, Frank R P, Valliappan P, et al. Flow of granular materials in a bladed mixer: effect of particle properties and process parameters on impeller torque and power consumption [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(11): 2733–2752.
- [5] Huang J, Dai G. Granular flow of corn stover particles in a helical ribbon stirred tank [J]. International Journal of Chemical Reactor

- Engineering, 2017, 15: 1–9.
- [6] Ritala M, Holm P, Schaefer T, et al. Influence of liquid bonding strength on power consumption during granulation in a high shear mixer [J]. Drug Development Communications, 1988, 14(8): 1041–1060.
- [7] Collet R, Oulahna D, Ryck A D, et al. Mixing of a wet granular medium: influence of the liquid addition method [J]. Powder Technology, 2011, 208(2): 367–371.
- [8] Ma W B, Qi C L, Liu Q, et al. Adhesion force measurements between deep-sea soil particles and metals by *in situ* AFM [J]. Applied Clay Science, 2017, 148: 118–122.
- [9] Nguyen T T, Rambanapasi C, Boer A H, et al. A centrifuge method to measure particle cohesion forces to substrate surfaces: the use of a force distribution concept for data interpretation [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2010, 393(1/2): 89–96.
- [10] Zafar U, Hare C, Hassanpour A, et al. Drop test: a new method to measure the particle adhesion force [J]. Powder Technology, 2014, 264: 236–241.
- [11] Takeuchi M. Adhesion forces of charged particles [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 61(7): 2279–2289.
- [12] Shi Z H, Li W F, Wang Y, et al. DEM study of liquid-like granular film from granular jet impact [J]. Powder Technology, 2018, 336: 199–209.
- [13] 安 卓 卿. 颗粒流体粘性表征及流化床黏结失流行为预测分析 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018: 31–34.
- An Z Q. Characterization of apparent viscosity of solid particles and the prediction of defluidization in the fluidized bed [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018: 31–34.
- [14] Cundall P A, Strack O D L. Discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47–65.
- [15] Basinskas G, Sakai M. Numerical study of the mixing efficiency of a ribbon mixer using the discrete element method [J]. Powder Technology, 2016, 287: 380–394.
- [16] Bao Y Y, Lu Y, Cai Z Q, et al. Effects of rotational speed and fill level on particle mixing in a stirred tank with different impellers [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(6): 158–166.
- [17] Bao Y Y, Li T C, Wang D F, et al. Discrete element method study of effects of the impeller configuration and operating conditions on particle mixing in a cylindrical mixer [J]. Particuology, 2020, 49: 146–158.
- [18] Deng X L, Scicolone J V, Davé R N. Discrete element method simulation of cohesive particles mixing under magnetically assisted impaction [J]. Powder Technology, 2013, 243: 96–109.
- [19] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and contact of elastic solids [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1971, 324: 300–313.
- [20] Sebastian Escotet-Espinoza M, Foster C J, Ierapetritou M. Discrete element modeling (DEM) for mixing of cohesive solids in rotating cylinders [J]. Powder Technology, 2018, 335: 124–136.
- [21] Silva B B, Cunha E R, Carvalho R M, et al. Modeling and simulation of green iron ore pellet classification in a single deck roller screen using the discrete element method [J]. Powder Technology, 2018, 332: 359–370.
- [22] Xiao X D, Qian L. Investigation of humidity-dependent capillary force [J]. Langmuir, 2000, 16(21): 8153–8158.
- [23] Megias-Alguacil D, Gauckler L J. Analysis of the capillary forces between two small solid spheres bonded by a convex liquid bridge [J]. Powder Technology, 2010, 198(2): 211–218.
- [24] Megias-Alguacil D, Gauckler L J. Capillary forces between two solid spheres linked by a concave liquid bridge: regions of existence and forces mapping [J]. AIChE Journal, 2009, 55(5): 1103–1109.
- [25] Qian L M, Tian F, Xiao X D. Tribological properties of self-assembled monolayers and their substrates under various humid environments [J]. Tribology Letters, 2003, 15(3): 169–176.