**文章编号:**1000-8608(2024)02-0138-10

# 微米颗粒撞击液滴表面动力学行为特性研究

谢 俊\*1,赵冰姿1,李晨曦2,付 峥3,李润东1

(1. 沈阳航空航天大学 能源与环境学院,辽宁 沈阳 110136;
2. 河北燕山钢铁集团有限公司,河北 唐山 064403;
3. 国家电投集团东北电力开发有限公司,辽宁 沈阳 110181)

**摘要:**颗粒撞击液滴表面的过程广泛存在于日常生活和工业生产中,且国内外对微米颗粒 撞击液滴表面过程的研究较少,因此采用数值计算法对微米颗粒撞击液滴表面的行为进行了 研究.建立了颗粒撞击液滴表面的动力学模型,对颗粒的撞击过程进行研究,深入分析了不同 初始撞击速度下,撞击过程中颗粒受力、位移和三相接触角的变化情况.研究发现,颗粒在撞 击液滴表面的过程中,表面张力和形状阻力是最主要的作用力.对于10 μm颗粒,沉没和反弹 之间的临界速度为 9.080 m/s,反弹和振荡之间的临界速度为1.323 m/s,在沉没过程中,主 导作用力由形状阻力变为表面张力.在反弹和振荡过程中,其运动分为下沉和回弹两部分.下 沉过程中,主导作用力由形状阻力变为表面张力;回弹过程中,主导作用力先由表面张力变为 形状阻力,然后又变回表面张力.初始撞击速度越大,颗粒在撞击过程中受到的作用力越强, 速度、位移和三相接触角的变化速度越快,颗粒越容易沉没到液滴之中.

#### 0 引 言

颗粒物问题已经上升为大气污染研究中不可 忽视的问题.细颗粒物不仅会降低大气能见度,增 加人们出行难度,更会影响气候变化和身体健康. 细颗粒物虽然体积小,但比表面积大,能够携带大 量有毒有害物质[1-2]. 它能够使人产生呼吸系统和 皮肤疾病,而且会大大增加肺癌的发病率[3-6].研 究表明,大气中的细颗粒物很多来自煤炭燃烧和 工业污染[7-8]. 在燃煤电厂中,湿法脱硫协同除尘 技术可以在电厂原有除尘设备基础上对细颗粒物 的脱除起到很好的补充作用[9-11].现场测试及实 验研究结果表明,部分脱硫塔对细颗粒物的脱除 效率在80%以上[12].近年来,很多行业开始应用 湿法除尘[13-14]. 而且研究表明,降雨可以有效降低 大气中的细颗粒物数量[15-16].这些应用均是利用 液滴对细颗粒物进行捕集.在实际过程中,液滴一 般为毫米级,本文研究的细颗粒物为微米级,液滴 直径是颗粒直径的百倍,因此可以近似认为颗粒 直接撞击在液滴表面上.大气颗粒物中有很大部 分为疏水颗粒,疏水颗粒撞击液面后会出现3种 运动行为:沉没到液体中、反弹离开液面及在液体 中振荡<sup>[17]</sup>.不同的运动行为会直接影响液滴对细 颗粒物的捕集效率.当颗粒沉没到液滴中时,液滴 完成对颗粒物的捕集;当颗粒在液体中反弹时,液 滴未能捕集到颗粒;当颗粒在液体中振荡时,颗粒 可能会留在液滴内,也有可能漂浮在液滴表面上, 这取决于颗粒的受力情况.

很多学者对液滴捕集细颗粒物的过程进行了 研究.Bao等<sup>[18]</sup>利用实验研究湿法脱硫过程中颗 粒粒径和气液温差对脱硫浆液捕集细颗粒物的影 响.Ladino等<sup>[19]</sup>使用碰撞冰成核室对12.8~ 20 μm的液滴捕集0.05~0.33 μm 偏硼酸锂颗粒 的过程进行实验,并得到了液滴对颗粒的捕集效 率.Ardon-Dryer等<sup>[20]</sup>将一个稀硫酸铵水溶液液 滴滴入盛满气溶胶颗粒的装置中,计算得到单个

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-11-12.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51906164);科技部国家重点研发计划项目(2019YFC1903902).

作者简介:谢 俊\*(1987—),女,博士,副教授,E-mail:xiejun@sau.edu.cn.

液滴对气溶胶颗粒的捕集效率,并通过数值计算 分析得到不同作用力在液滴捕集不同粒径颗粒时 的作用情况.为深入分析液滴对细颗粒物的捕集 效率,必须要研究颗粒撞击液滴表面后影响颗粒 运动行为的因素.因此,很多学者对单颗粒撞击液 滴表面的过程进行了研究. Aristoff 等[21] 研究了 小疏水球入水后的运动情况以及水内空腔的形 状,并利用韦伯数 We 和邦德数 Bo 对不同碰撞条 件下产生的空腔类型进行了划分. Pawar 等<sup>[22]</sup>对 直径相差不大的玻璃珠和水滴碰撞过程进行了实 验,通过实验观察得到,由于表面张力的作用,液 滴不容易变形,可以在不破碎的情况下对颗粒进 行捕集. Lee 等[17] 发现毫米级疏水小球撞击液面 后会出现3种不同的运动行为,并结合势流理论 和拉普拉斯方程从理论上分析了小球的下沉运 动,通过缩放法得到了小球撞击液面后不同运动 行为之间的判定条件,得到在颗粒下沉过程中表 面张力为最主要作用力. Wang 等<sup>[23]</sup>在 Lee 等<sup>[17]</sup> 的实验基础上,建立颗粒撞击液面的动力学方程, 研究了颗粒粒径、接触角和液体表面张力系数对 颗粒撞击液面后运动行为的影响. 冀秉强[24] 用 Fluent 软件中的 UDF 编程结合动网格技术对颗 粒撞击液面的过程进行模拟,深入研究了液面的 变化情况和颗粒撞击液面后的受力情况.

本文基于燃煤电厂湿法脱硫协同去除细颗粒物的实际背景,分析颗粒撞击液滴表面后的受力 及运动情况,建立颗粒撞击液滴表面的动力学模型,利用实验对模型进行可行性验证.分析颗粒在 运动过程中受力、位移和三相接触角的动态变化 情况并对其进行研究,深入分析颗粒撞击液滴表 面的运动情况,希望为颗粒撞击液滴表面的过程 研究提供进一步的理论支撑,以提升液滴对细颗 粒物的捕集作用.

#### 1 颗粒动力学模型

#### 1.1 颗粒运动行为及液滴表面变形分析

为深入分析颗粒撞击液滴表面后的运动过程,本文充分考虑颗粒受力及液滴表面变形情况,结合牛顿第二定律,建立颗粒撞击液滴表面的动力学模型.在实际过程中,细颗粒物以一定的初速度撞击液滴表面后的示意图如图1所示.

颗粒撞击过程中会受到表面张力、重力和阻 力的作用,其中阻力包括形状阻力、浮力和附加质



图1 颗粒撞击液滴表面示意图



量力.各个力的表达式如下<sup>[17]</sup>:  
$$F_{-} = -2\pi r \delta \sin a \sin(\theta + a)$$
 (1)

$$F_{\rm g} = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\rm p} g \tag{2}$$

$$F_{\rm fd} = \frac{9}{16} \pi r^2 \rho_1 \dot{s} \sin^4 \alpha \tag{3}$$

$$F_{\rm b} = \frac{\pi}{3} r^2 \rho_1 g \left( 3s\cos^2 \alpha - 2r\cos^3 \alpha - 3s + 2r \right) \tag{4}$$

$$F_{\rm am} = -\frac{\pi}{6} r^3 \rho_1 \dot{s} \left( \cos^3 \alpha - 3\cos \alpha + 2 \right) \quad (5)$$

$$F_{d} = F_{fd} + F_{b} + F_{am} =$$

$$\frac{9}{16}\pi r^{2}\rho_{1}\dot{s}\sin^{4}\alpha + \frac{\pi}{3}r^{2}\rho_{1}g(3s\cos^{2}\alpha -$$

$$2r\cos^{3}\alpha - 3s + 2r) - \frac{\pi}{6}r^{3}\rho_{1}\dot{s}(\cos^{3}\alpha -$$

$$3\cos\alpha + 2) \qquad (6)$$

式中: $F_s$  为表面张力, $F_g$  为重力, $F_{fd}$ 为形状阻力,  $F_b$  为浮力, $F_{am}$ 为附加质量力, $F_d$  为阻力,r 为颗 粒半径, $\delta$  为表面张力系数, $\alpha$  为颗粒三相接触点 和颗粒中心所在直线与颗粒中心线形成的三相接 触角, $\theta$  为固液接触角,m 为颗粒的质量, $\rho_p$  为颗 粒的密度,g 为重力加速度, $\rho_1$  为液体密度,s 为颗 粒中心与液体水平面的距离.

根据牛顿第二定律得到颗粒撞击液滴表面后 的运动方程为

$$F = F_{\rm s} + F_{\rm d} + F_{\rm g} = ma \tag{7}$$

式中:a 为颗粒运动过程中的加速度.

由此可以得到颗粒运动过程中速度 v<sub>t</sub> 和位移 s 计算公式:

$$v_t = v + at \tag{8}$$

$$s = vt + 0.5at^2 \tag{9}$$

式中:v 为颗粒初始撞击速度,t 为颗粒撞击后的运动时间.

在颗粒撞击液滴表面的过程中,由于表面张 力的作用液滴表面会随着颗粒的位移变化而发生 形状变化,液滴表面的变形可以通过 YoungLaplace方程来描述. 当颗粒足够小时,根据 Young-Laplace方程计算得到,三相接触线的纵 向位移Z可以表示为<sup>[25]</sup>

$$Z = r_{\rm tpc} \sin \gamma \left( \ln \frac{4L/r_{\rm tpc}}{1 + \cos \gamma} - \lambda \right)$$
(10)

$$L = \sqrt{\frac{\delta}{(\rho_{\rm l} - \rho_{\rm g})g}} \tag{11}$$

$$r_{\rm tpc} = r \sin \alpha$$
 (12)

式中:L 为毛细管长度; $\rho_g$  为空气密度; $r_{tpe}$  为三相接触点处的半径; $\lambda$  为欧拉常数, $\lambda=0.57721;\gamma=$  $\theta-\alpha$ .根据颗粒撞击过程中的几何关系可以得到颗粒位移 s 的计算方法为

$$s = Z + r \cos \alpha$$
 (13)

#### 1.2 颗粒动力学模型建立

颗粒撞击液滴表面后的下沉和回弹过程也可 以看成是颗粒的润湿和去湿过程.在颗粒的整个 运动过程中,颗粒的固液接触角都发挥着重要的 作用.研究得到,在颗粒的润湿过程中,固液接触 角 $\theta$ 为前进角 $\theta_a$ .当颗粒下沉到极限位置后,开始 去湿过程.此时颗粒的前进角 $\theta_a$ 迅速变为后退角  $\theta_r$ .之后,颗粒固液接触角 $\theta$ 近似等于后退角 $\theta_r$ 且 保持不变,颗粒的前进角和后退角差值在 50°左 右<sup>[23,26]</sup>.本文在研究过程中,先忽略钉扎这一快 速变化过程,直接将接触角分为前进角 $\theta_a$ 和后退 角 $\theta_r$ .

一个颗粒撞击液滴表面后运动过程可分为 6个阶段,如图 2 所示. A 是颗粒运动到液滴表 面.B是颗粒撞击液滴表面后的快速润湿过程,三 相接触线向上弯曲,此时从 $\alpha = 0$ 开始,到 $\alpha = \pi \theta_{0}$ 结束, AB 为颗粒的抨击阶段. C 是液滴表面重 新变为水平,此时  $\alpha = \pi - \theta_a$ . D 是颗粒继续向下运 动,三相接触线随着颗粒的运动继续向下弯曲.E 为颗粒运动到极限位置,液滴表面即将失衡.通过 查阅文献得知,若颗粒运动到  $\alpha = \pi - \theta_a/2$  位置 后,仍具有继续下沉的动能,则颗粒会沉没到液体 之中<sup>[27]</sup>. CDE 为颗粒撞击空腔的发展阶段. F 为 颗粒继续向下运动,液滴表面失衡重新封闭,将颗 粒封锁在液体中. EF 为空腔坍塌阶段. 以上 6 个 阶段为单个颗粒从接触液滴表面开始到沉没的全 部过程.若颗粒还未运动到  $\alpha = \pi - \theta_a/2$ ,其动能在 作用力的消耗下变为零,则颗粒开始反向回弹.这 种情况下颗粒可能会反弹出液滴表面,也可能在 颗粒离开液滴表面之前,颗粒动能再次耗散到零, 此时颗粒将在液体中上下振荡,颗粒最终将留在 液体中,或漂浮在液滴表面上,具体运动结果要取 决于颗粒的受力情况.





本文基于以上对颗粒运动行为和液滴表面变 形的分析,建立了颗粒撞击液滴表面的动力学模型.首先确定本文的程序计算从液滴表面重新变 成水平液面后开始.此时颗粒受到的表面张力为 零,因此可以得到,此时颗粒的位置为 $\alpha = \pi - \theta_a$ 处.在颗粒的计算过程中按图 1 所示建立坐标系. 利用 C 语言编程对颗粒撞击液滴表面过程进行 数值计算.在程序计算之前确定颗粒初始撞击参 数,如颗粒初始撞击速度 v、位移 s、三相接触角 a、 前进角  $\theta_a$ 、颗粒半径 r、液体表面张力系数  $\delta$  和时 间 t 等数值.计算过程中时间步长越小,计算结果 越准确.充分考虑计算准确性和程序运行时间,本 文取定时间步长为 0.000 000 01 s,即时间间隔为 0.01  $\mu$ s.

颗粒不同运动行为的判定条件如下:沉没判 定条件为颗粒的三相接触角 $\alpha$ ,若颗粒运动到 $\alpha = \pi - \theta_a/2$ 后仍有继续下沉的动能,则颗粒沉没;若 颗粒未运动到 $\alpha = \pi - \theta_a/2$ 动能被完全耗散,则颗 粒在力的作用下开始回弹.颗粒回弹后,由颗粒位 移和速度共同决定颗粒的运动行为.若颗粒速度 再次为零时未能运动到液滴表面以上,则颗粒在 液体中进行阻尼振荡;若颗粒回弹到液滴表面以 上后仍然有继续向上运动的速度,则颗粒能够反 弹离开液滴表面.

#### 1.3 动力学模型验证

本文利用 Lee 等<sup>[17]</sup>的实验数据对动力学模 型进行验证.在文中为方便分析描述,撞击速度均 用绝对值代替,颗粒下沉时速度方向为竖直向下, 颗粒回弹时速度方向向上.在 Lee 等的研究过程 中,直接认为固液接触角等于静态接触角 154°,并 没有分为前进角和后退角.本文在模拟验证过程 中取前进角 θ<sub>a</sub> 为 154°,后退角 θ, 为 105°.具体参 数见表1和表2.

表1 Lee 等实验颗粒参数(沉没)

Tab. 1 Particle parameters in the experiment (sinking) of Lee *et al*.

$ ho_{\rm p}/({\rm kg}\cdot{\rm m}^{-3})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$r/\mathrm{mm}$	$\theta_{\rm a}/(^{\circ})$
1 990	0.73	0.87	154

表 2 Lee	等	实	验	颗	粒	参	数	(反	弾)	
---------	---	---	---	---	---	---	---	----	----	--

Tab. 2Particle parameters in the experiment (bounce)of Lee et al.

$ ho_{\rm p}/({\rm kg}\cdot{\rm m}^{-3})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	$r/\mathrm{mm}$	$ heta_{ m a}/(^{\circ})$	$\theta_{\rm r}/(^{\circ})$
1 320	0.89	0.96	154	105

将上述颗粒的基本参数输入动力学模型中, 计算得到的颗粒沉没和反弹位移变化情况与实验 中颗粒实际位移如图 3 所示.可以看出,模型较好 地预测出了颗粒撞击液滴表面后沉没和反弹行为 的位移变化过程.



图 3 颗粒运动过程中位移变化



根据文献可知,微米颗粒撞击液滴表面后最 主要的作用力为表面张力<sup>[17,28]</sup>.利用动力学模型 对颗粒撞击液滴表面后只考虑表面张力、考虑表 面张力和形状阻力共同作用以及考虑全部作用力 3种情况下颗粒运动情况进行计算,具体如图 4 所示.可以看出,当只考虑表面张力的作用时,图 像中只显示了部分颗粒下沉的位移情况,但能清 楚地看出,颗粒下沉位移明显大于颗粒的实际位 移.因此,表面张力虽然为颗粒撞击液滴表面后的 主要作用力,但是在研究过程中只考虑表面张力 的作用是不可行的.图中还显示了考虑表面张力 和形状阻力两种作用力下的颗粒位移情况,可以 看出,颗粒下沉及回弹时位移变化情况均与颗粒 实际位移的变化相同,但在颗粒位移变化较小即 颗粒速度很小的位置,表面张力和形状阻力的合 力对颗粒位移变化的描述效果不是很好.由此可 以得到,在颗粒撞击液滴表面的运动过程中,表面 张力和形状阻力在颗粒运动过程中的作用效果较 强,但在颗粒速度较小的位置,其他作用力也会发 挥很大的作用.因此,本文动力学模型中考虑了全 部作用力的共同影响,对颗粒撞击液滴表面后的 运动过程进行计算,分析不同作用力和初始撞击 速度对颗粒撞击液滴表面的影响.



图 4 颗粒撞击液滴表面后运动过程分析

Fig. 4 Moving process analysis after particle impacting on droplet surface

## 2 结果与讨论

#### 2.1 颗粒主要作用力分析

为了解煤灰颗粒撞击液滴表面后的动态行 为,对颗粒撞击液滴表面后沉没和反弹过程的受 力进行计算分析.首先利用动力学模型对粒径为 10 μm的煤灰颗粒不同运动行为之间的临界速度 进行计算,得到其沉没和反弹之间的临界速度为 9.080 m/s,反弹和振荡之间的临界速度为 1.323 m/s. 利用表面张力测试仪对实验室的去离子水进行测 试,得到其表面张力系数为 63.13 mN/m.

图 5 表示的是煤灰颗粒沉没过程受力变化. 此时煤灰颗粒粒径为 10 µm,颗粒的撞击速度为 9.080 m/s,方向向下,计算得到,煤灰颗粒撞击过 程中的重力  $F_g$  始终保持不变,为-8.50× 10<sup>-7</sup> mN,其附加质量力 F<sub>am</sub>从 0 开始逐渐减小到  $-1.09 \times 10^{-4}$  mN,浮力  $F_{\rm b}$  从 0 开始逐渐增大到 1.35×10<sup>-6</sup> mN,表面张力F<sub>s</sub>从0开始一直增大 到 2.97×10<sup>-3</sup> mN,形状阻力  $F_{ff}$ 先增大到最大值 8.57×10<sup>-3</sup> mN,然后再逐渐减小到 1.36× 10<sup>-7</sup> mN. 对于整个沉没过程,由图 5(a)可以看 出,阻力 F<sub>d</sub> 和表面张力 F<sub>s</sub> 为其主要作用力.由 图 5(b)可以看出,在 3 个阻力之中,形状阻力 F<sub>fd</sub> 起主要作用.因此可以得到,在煤灰颗粒沉没过程 中,颗粒的运动行为由表面张力 F。和形状阻力  $F_{\text{fd}}$ 共同主导.在 0.656 ms 时,颗粒的表面张力  $F_{\text{sd}}$ 和形状阻力 Fft大小相同,为 2.32×10<sup>-3</sup> mN.所 以,在 0.656 ms 之前,煤灰颗粒沉没过程的主导 作用力为形状阻力 F<sub>id</sub>,在 0.656 ms 之后,煤灰颗 粒沉没过程的主导作用力为表面张力 F...







根据冀秉强<sup>[24]</sup>实验研究工况 # 3.1 进行数值 计算对比,其将形状阻力和附加质量力之和定义 为水动力.图 6 是沉没过程中颗粒受力变化图.由 图 6 可得,在沉没过程中,颗粒所受到的作用力随 时间变化除抨击阶段外与本文基本相同.抨击阶 段由于颗粒撞击静止的液体,需要在短时间内将 其周围的流体加速,因此产生了很大的冲击力,本 文简化了这一阶段的受力,但是也同样观察到上 升趋势.并发现颗粒沉没过程前期和中后期的主 导力分别为水动力和表面张力,与冀秉强得到的 结论相同,同时验证了本文提出的动力学模型的 正确性.



图 6 沉没过程中颗粒受力随时间变化 Fig. 6 Variation of forces on particles with time in the sinking process

图 7 和图 8 表示的是煤灰颗粒反弹和振荡过 程的受力情况.此时煤灰颗粒粒径为 10 μm,颗粒 的撞击速度为 1.323 m/s,方向向下.将颗粒的反 弹和振荡过程分成下沉和回弹两个部分来分析, 颗粒的下沉为颗粒撞击液滴表面进入液体后向下 运动的过程,颗粒的回弹为颗粒撞击液滴表面进 入液体后向上运动的过程.

在下沉过程中,煤灰颗粒撞击过程中的重力  $F_g$ 始终保持不变,为-8.50×10<sup>-7</sup> mN,其附加 质量力 $F_{am}$ 从0开始逐渐减小到-9.00×  $10^{-8}$  mN,浮力 $F_b$ 从0开始逐渐增大到3.00×  $10^{-9}$  mN,表面张力 $F_s$ 从0开始一直增大到 8.33×10<sup>-4</sup> mN,形状阻力 $F_{fd}$ 先增大到1.76×  $10^{-4}$  mN,然后再逐渐减小到1.00×10<sup>-9</sup> mN.颗 粒在下沉时的受力情况和颗粒的沉没过程类似, 由图7(a)可以看出,阻力 $F_d$ 和表面张力 $F_s$ 为其 主要作用力.由图7(b)可以看出,在3个阻力之 中,形状阻力 $F_{fd}$ 起主要作用.因此可以得到,煤灰 颗粒在反弹和振荡过程的下沉部分时,颗粒的运动行为由表面张力  $F_s$ 和形状阻力  $F_{fd}$ 共同主导. 在 0.230 ms 时,颗粒的表面张力  $F_s$ 和形状阻力  $F_{fd}$ 大小相同,为 1.74×10<sup>-4</sup> mN.所以,在 0.230 ms之前,煤灰颗粒下沉过程的主导作用力 为形状阻力  $F_{fd}$ ,在 0.230 ms之后,煤灰颗粒下沉 过程的主导作用力为表面张力  $F_s$ .对比沉没颗粒 的受力情况,在反弹和振荡颗粒的下沉过程中,除 了重力  $F_s$ 外,颗粒的作用力均小于颗粒沉没时的 作用力,而且,阻力主导作用的时间明显缩短,表 面张力主导时间增多,表面张力的最大值达到形 状阻力最大值的 4.73 倍.



图 7 煤灰颗粒反弹和振荡过程中下沉时受力变化 Fig. 7 Evolution of each force exerted on the subsidence coal ash particle in the process of bounce and oscillation

在回弹时,煤灰颗粒运动过程中重力  $F_{g}$  依旧 保持不变,为-8.50×10<sup>-7</sup> mN,其附加质量力  $F_{sm}$ 从0开始逐渐减小到-2.00×10<sup>-9</sup> mN,浮力  $F_{b}$ 从-2.90×10<sup>-8</sup> mN开始逐渐增大到0,表面 张力  $F_{s}$ 从1.79×10<sup>-4</sup> mN开始一直减小到 -3.84×10<sup>-4</sup> mN,形状阻力  $F_{fd}$ 先从-1.00× 10<sup>-9</sup> mN 到最小值-4.81×10<sup>-5</sup> mN,然后再变 化到-3.10×10<sup>-5</sup> mN.由图 8(b)可以看出,阻力 中依旧是形状阻力  $F_{fd}$ 起主要作用.在整个回弹过 程中,从图 8(a)中可以发现,回弹初期,表面张力 F。起主导作用,在表面张力F。的作用下,颗粒向 上加速回弹,在此过程中,表面张力F。逐渐减小, 形状阻力 F<sub>ff</sub>的作用不断增强.到 5.353 ms 时,表 面张力F。和形状阻力F<sub>ff</sub>大小相等,方向相反,其 数值为 4.79×10<sup>-5</sup> mN.从此时开始,形状阻力 Fa成为颗粒运动过程中的最主要作用力.在此之 后,表面张力F。一直减小到0然后反向增大阻碍 颗粒离开液滴表面,此时形状阻力 Fat的作用慢慢 减小.到 5.622 ms 时,表面张力 F。和形状阻力  $F_{fd}$ 大小相等且方向相同,为-4.40×10<sup>-5</sup> mN,均 阻碍颗粒继续回弹;之后,表面张力F。的作用逐 渐增强,形状阻力 Fil 的作用逐渐减弱,表面张力 F。再次成为颗粒运动的主要作用力.在颗粒下沉 后期和回弹初期,与表面张力相比,其他力均很 小,但在颗粒运动过程中,这些力同样会对颗粒的 运动产生影响.





### 2.2 初始撞击速度对颗粒受力的影响

本节主要讨论粒径为 10 µm 的煤灰颗粒在 沉没、反弹和振荡 3 种运动行为下颗粒受力情况. 图 9 所示为颗粒初始撞击速度为 12、9、 1.3 m/s时,颗粒受到的合力随运动时间的变化. 可以看出,在 3 种运动行为下,颗粒在下沉过程中 受到的合力均先有一个增大的过程.在初始撞击 速度为 12 m/s时,颗粒的运动行为为沉没,颗粒 的合力最大值为 1.54×10<sup>-2</sup> mN,此时颗粒运动 时间为 0.068 ms.合力达到最大值后开始急剧减 小.根据本文中对主要作用力的分析可知,此时合 力的降低主要是由于形状阻力的减小.随着颗粒 的继续下沉,尽管形状阻力继续降低,但表面张力 逐渐增大,颗粒受到的合力下降速率变小.因此, 在颗粒的整个下沉过程中,合力先增大,然后快速 减小,最后缓慢减小,直至颗粒完全沉没到液滴之 中.在此沉没过程中,一共经历 0.88 ms.





初始撞击速度为 9 m/s 时,颗粒的运动行为 是反弹.在颗粒下沉过程中,颗粒受到的合力变化 情况与沉没颗粒相同.但在此情况下,颗粒的合力 最大值为 8.84×10<sup>-3</sup> mN,且达到最大值的时间 为0.103 ms,可以看出,颗粒受到的合力增大速率 变小.由图 9(a)也可以清楚地看出颗粒合力的增 大速度下降,在合力达到最大值之后,合力的下降 速率也低于沉没颗粒的下降速率.在此情况下反 弹颗粒的下沉过程一共经历1.599 ms.在其回弹 过程中,根据本文主要作用力的分析可知,形状阻 力主导作用的时间很短,所以,回弹过程中颗粒的 合力变化基本和表面张力的变化情况相同.颗粒 的合力先缓慢降低,直到合力为0,之后再反向增 大.整个反弹过程一共经历4.308 ms.

初始撞击速度为 1.3 m/s 时,颗粒的运动行 为是振荡.在颗粒下沉时,颗粒受到的合力始终在 增大,其合力最大值为 8.2×10<sup>-4</sup> mN,远小于沉 没和反弹颗粒的合力最大值,下沉过程一共经历 1.813 ms.在其回弹过程中,合力的变化情况和反 弹时的回弹过程相同,只是振荡情况下的合力小 于反弹时的合力,合力缓慢减小的时间远大于反 弹时合力缓慢减小的时间.整个振荡过程一共经 历 7.472 ms.

#### 2.3 初始撞击速度对颗粒运动的影响

在3种运动行为中各挑选不同初始撞击速 度,其中沉没行为下的速度为14、12、10 m/s,反 弹行为下的速度为6、4、2 m/s,振荡行为下的速 度为1.0、0.3 m/s.从图10中可以看出,在沉没 过程中,颗粒的初始撞击速度越大,颗粒沉没需要 的时间越短.在反弹过程中,颗粒的初始撞击速度 越大,颗粒的下沉过程越快,颗粒移动距离越大, 颗粒在回弹过程中反向速度越大.这是由于撞击 速度大的颗粒撞击液滴表面后的位移更大,受到 的表面张力作用更强,回弹时由表面张力提供的 反向加速度更大.所以,在反弹行为下,颗粒的初 始撞击速度越大,颗粒整个反弹过程所需的时间 越短.在振荡过程中,随着颗粒初始撞击速度增





Fig. 10 The variation curves of particle displacement with moving time

大,颗粒振荡所需的时间减少.这是由于小撞击速 度的颗粒受到的表面张力较小,所以由表面张力 提供的反向加速度较小,使得颗粒的回弹速度更 小,颗粒运动的时间也就更短.

图 11 所示为颗粒撞击液滴表面后位移和速 度的关系.可以看出,在沉没行为中,颗粒运动到 极限位置后仍有继续下沉的速度,此时颗粒能够 沉入液滴之中,颗粒能够被液滴捕集.在反弹行为 中,颗粒在离开液滴表面后仍有继续向上运动的 速度,此时颗粒能够离开液滴表面,颗粒不能被液 滴捕集.在颗粒未完全回弹到液滴表面上时,颗粒 的速度便被消耗为零,此时颗粒没有足够的动能 离开液滴.





#### 2.4 初始撞击速度对颗粒三相接触角的影响

在 1.2 的初始条件下,利用动力学模型计算 得到颗粒在不同初始撞击速度下三相接触角随运 动时间的变化情况.由图 12 可以看出,在颗粒下 沉过程中,三相接触角先快速增大,之后缓慢增



图 12 颗粒三相接触角随运动时间的变化曲线 Fig. 12 The variation curves of three-phase contact angle of particle with moving time

大,且颗粒的初始撞击速度越大,三相接触角的变 化速度越快.对于沉没颗粒,颗粒最终会沉没在液 滴之中,所以其最终的三相接触角相同.但对于反 弹和振荡过程,颗粒的初始撞击速度越大,颗粒下 沉达到的三相接触角越大.从图中可以看出,反弹 和振荡下颗粒三相接触角会有一个几乎不变的过 程,且颗粒的初始撞击速度越大,这个过程持续的 时间越短.这是由于颗粒的速度越大,颗粒受力越 大,颗粒的速度变化也就越快,所以颗粒的三相接 触角的变化也会加快.在颗粒回弹过程中,初始撞 击速度越大三相接触角变化越快.

# 3 结 论

(1)颗粒撞击液滴表面的整个过程中表面张 力和形状阻力起最主要作用.在颗粒下沉过程中, 颗粒主要作用力从形状阻力变化为表面张力.在 回弹时,主要作用力从表面张力变化为形状阻力 再变化为表面张力.表面张力是颗粒回弹的主要 原因.

(2)颗粒的初始撞击速度越大,颗粒受到的合 力作用越强,越容易沉没到液滴中.

(3)在下沉过程中,颗粒的初始撞击速度越 大,颗粒的速度、位移和三相接触角变化越快.在 回弹过程中,颗粒会有一个位移变化很小的区间, 颗粒的撞击速度越大,此区间持续时间越短,之后 颗粒的速度、位移和三相接触角变化越快.

# 参考文献:

- [1] LV Yang, ZHOU Yuwei, CHEN Xi, et al. Study on indoor and outdoor permeability coefficients and bacterial components, sources of fine particles in severe cold region of China [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102020.
- [2] FINKELMAN R B, TIAN L. The health impacts of coal use in China [J]. International Geology Review, 2018, 60(5/6): 579-589.
- [3] HE Chunyang, HAN Lijian, ZHANG R Q. More than 500 million Chinese urban residents (14% of the global urban population) are imperiled by fine particulate hazard [J]. Environmental Pollution, 2016, 218(16): 558-562.
- [4] 索丹凤,曾三武. 空气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 对人体各系统 危害的研究 [J]. 医学信息, 2019, **32**(18): 32-34.
   SUO Danfeng, ZENG Sanwu. Research on the

harm of air fine particulate matter PM<sub>2.5</sub> to various human systems [J]. Journal of Medical Information, 2019, **32**(18): 32-34. (in Chinese)

- [5] 樊 磊,刘 顺,包艳英,等.大气中细颗粒物对 肺癌细胞 A549 迁移和侵袭作用的影响 [J]. 生态 毒理学报,2018,13(2):91-98.
  FAN Lei, LIU Shun, BAO Yanying, *et al*. Effect of ambient PM<sub>2.5</sub> on migration and invasion in human A549 lung cancer cells [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2):91-98. (in Chinese)
- [6] JOO H S, BATMUNKH T, BORLAZA L J S, et al. Physicochemical properties and oxidative potential of fine particles produced from coal combustion [J]. Aerosol Science and Technology, 2018, 52(10): 1134-1144.
- [7] WANG Jiao, ZHOU Ming, LIU Baoshuang, et al. Characterization and source apportionment of size-segregated atmospheric particulate matter collected at ground level and from the urban canopy in Tianjin [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 982-992.
- [8] HU Zhongfa, WANG Xuebin, ZHANG Lan, et al. Emission characteristics of particulate matters from a 30 MW biomass-fired power plant in China [J].
   Renewable Energy, 2020, 155: 225-236.
- [9] PARK S H, JUNG C H, JUNG K R, et al. Wet scrubbing of polydisperse aerosols by freely falling droplets [J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 36(12): 1444-1458.
- [10] KORELL J, PAUR H-R, HELMUT S, et al. Simultaneous removal of mercury, PCDD/F, and fine particles from flue gas [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(21): 8308-8314.
- [11] 王军锋,李 金,徐惠斌,等.湿法脱硫协同去除 细颗粒物的研究进展[J].化工进展,2019,38(7): 3402-3411.
  WANG Junfeng, LI Jin, XU Huibin, et al. Advances in research on wet desulfurization and

synergistic removal of fine particles [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(7): 3402-3411. (in Chinese)

- [12] MEIJ R, TE WINKEL H. The emissions and environmental impact of PM10 and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6/7): 641-656.
- [13] 夏 珍,杨德全,程治良,等.润湿剂强化水力喷

射空气旋流器湿法脱除细颗粒物 [J]. 重庆理工大 学学报(自然科学), 2018, **32**(8): 130-136.

- XIA Zhen, YANG Dequan, CHENG Zhiliang, et al. Strengthening the effect of dust removal by wetting agents in a water-sparged aerocyclone [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32 (8): 130-136. (in Chinese)
- [14] 张立栋,李晓博,王 擎,等.多层喷雾洗涤塔对 粉尘颗粒的脱除特性[J].化工进展,2017,36(7): 2375-2380.
  - ZHANG Lidong, LI Xiaobo, WANG Qing, *et al.* Performance of dust removal in a multi-layer spray column scrubber [J]. **Chemical Industry and Engineering Progress**, 2017, **36**(7): 2375-2380. (in Chinese)
- [15] ELPERIN T, FOMINYKH A, KRASOVITOV B.
  Effect of raindrop size distribution on scavenging of aerosol particles from Gaussian air pollution plumes and puffs in turbulent atmosphere [J]. Process
  Safety and Environmental Protection, 2016, 102(Part B): 303-315.
- [16] BLANCO-ALEGRE C, CALVO A I, CASTRO A, et al. Scavenging of submicron aerosol particles in a suburban atmosphere: The raindrop size factor [J].
   Environmental Pollution, 2021, 285(525): 117371.
- [17] LEE D G, KIM H Y. Impact of a superhydrophobic sphere onto water [J]. Langmuir, 2008, 24(1): 142-145.
- [18] BAO Jingjing, YANG Linjun, YAN Jinpei, et al. Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas [J]. Fuel, 2013, 108: 73-79.
- [19] LADINO L, STETZER O, HATTENDORF B, et al. Experimental study of collection efficiencies between submicron aerosols and cloud droplets [J].
   Journal of the Atmospheric Sciences, 2011, 68(9): 1853-1864.
- [20] ARDON-DRYER K, HUANG Y W, CZICZO D J. Laboratory studies of collection efficiency of submicrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(16): 9159-9171.
- [21] ARISTOFF J M, BUSH J W M. Water entry of small hydrophobic spheres [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45-78.
- [22] PAWAR S K, HENRIKSON F, FINOTELLO G,

*et al.* An experimental study of droplet-particle collisions [J]. **Powder Technology**, 2016, **300**: 157-163.

[23] WANG Ao, SONG Qiang, YAO Qiang. Behavior of hydrophobic micron particles impacting on droplet surface [J]. Atmospheric Environment, 2015, 115(8): 1-8.

谢

- [24] 冀秉强. 微米级颗粒撞击液面行为与机制研究[D]. 北京:清华大学,2019.
  JI Bingqiang. Study on the behavior and mechanism of micron particle impact on liquid surfaces [D].
  Beijing: Tsinghua University, 2019. (in Chinese)
- [25] HUH C, SCRIVEN L E. Shapes of axisymmetric fluid interface of unbounded extent [J]. Journal of

**Colloid and Interface Science**, 1969, **30**(3): 323-337.

- [26] PITOIS O, CHATEAU X. Small particle at a fluid interface: Effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment [J]. Langmuir, 2002, 18(25): 9751-9756.
- [27] VELLA D, LEE D G, KIM H Y. The load supported by small floating objects [J]. Langmuir, 2006, 22(14): 5979-5981.
- [28] 王 翱. 单液滴捕集细颗粒物的行为与机制研究[D]. 北京:清华大学,2016.
  WANG Ao. Research on the capture behavior and mechanism of fine particles by a single droplet [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)

# Research on dynamic behavior characteristics of micron particle impacting on droplet surface

XIE Jun<sup>\*1</sup>, ZHAO Bingzi<sup>1</sup>, LI Chenxi<sup>2</sup>, FU Zheng<sup>3</sup>, LI Rundong<sup>1</sup>

- (1. School of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;2. Hebei Yanshan Iron & Steel Group Co. Ltd., Tangshan 064403, China;
  - 2. Hober Fahshar non a Greef aroup 60. Eta. ; Fahgshar 604463; Ohina;
  - 3. State Power Investment Group Northeast Power Development Co. LTD, Shenyang 110181, China )

**Abstract:** The processes of particles impacting on droplet surface are observed frequently in daily life and industrial applications. There are few researches on the impacting of micron particles on droplet surface all over the world. So the impact behavior of micron particles on droplet surface is studied by numerical calculation method. The dynamic model of particles impacting on droplet surface is established to study the impacting process. The changes of force, displacement and three-phase contact angle during particles impacting under different initial impacting velocities are analyzed. It is found that the surface tension and form drag are the main forces when particles impact on droplet surface. For 10  $\mu$ m particles, the critical velocity between sinking and bounce is 9.080 m/s, and that between bounce and oscillation is 1.323 m/s. During the sinking process, the dominant force changes from form drag to surface tension. In the process of bounce and oscillation, its motion is divided into two parts: subsidence and rebound. During the subsidence process, the dominant force changes from form drag to surface tension. In the rebound process, the dominant force changes from to form drag, then changes back to surface tension. The higher the initial impacting velocity, the greater the force, the faster the velocity, displacement, three-phase contact angle of particles change, and the easier the particles sink into the droplet.

Key words: particles; impact; droplet surface; surface tension; form drag