

# 室内细颗粒物碰撞模型及 碰撞结果讨论\*

王秀娟, 李 灿

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了研究室内细颗粒物凝并机理,基于统计平均及颗粒物随机运动的思想对室内细颗粒物碰壁数和细颗粒物之间发生对心碰撞的概率进行了总结计算,并对碰撞之后的结果进行了定量和定性的分析,得到了 $0.3\ \mu\text{m}$ 的DOP颗粒的最终压缩变形与碰撞发生初始速度以及碰撞效率随粒径变化曲线.颗粒物碰撞后凝并的可能性会随着颗粒碰撞初速度的增加而降低,小粒径颗粒发生碰撞后凝并的可能性一般会大于大粒径颗粒,碰撞效率随粒径的增大而减小.

**关键词:** 细颗粒物; 碰撞概率; 凝并

**中图分类号:** X513; O359      **文献标志码:** A

**doi:** 10.21656/1000-0887.360349

## 引 言

环境质量报告以及世界资源报告数据指出,我国68%的空气质量超标城市都存在可吸入颗粒物污染问题<sup>[1]</sup>.粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物被称为可吸入颗粒物,粒径越小的颗粒物,对人体造成的危害越大.而细颗粒物的碰撞凝并是可以改变颗粒物尺寸的一个重要途径,从理论和实验角度共同掌握细颗粒物的碰撞凝并规律,可以在一定程度上对细颗粒物污染的控制提供显著的帮助.

现有的研究中所提出的细颗粒物相互碰撞模型主要有两大类.其中一类是基于气固两相流中的颗粒间的碰撞,它类似于空气动力学中对于空气分子间相互碰撞的假设,其中代表性的为Kitron<sup>[2]</sup>模型和Lun<sup>[3]</sup>模型.另一类则是在Lagrange(拉格朗日)轨道的基础上所建立起来的颗粒间碰撞模型,具有代表性的为Tanaka<sup>[4]</sup>模型和Oesterle<sup>[5]</sup>模型.近些年来,亦有相关研究对颗粒物的碰撞模型进行了总结和改进<sup>[6-15]</sup>.

在前人研究成果的基础上,本文分别利用统计平均及颗粒物随机运动的思想对细颗粒物碰壁数和细颗粒物之间发生碰撞的概率进行了总结分析,并从颗粒物所受Van der Waals(范德华)力与弹性形变力相对大小的角度结合运动学方程对同粒径颗粒物对心碰撞之后的结果进行了简单讨论.

\* 收稿日期: 2015-12-16; 修订日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51246008)

作者简介: 王秀娟(1991—),女,硕士生(E-mail: annewxj@163.com);

李灿(1968—),女,教授,博士(通讯作者. E-mail: lc19992@126.com).

# 1 细颗粒物碰撞模型

## 1.1 建立碰撞模型的前提假设

为了简化模型,对颗粒物作出以下几点假设:

1) 自然条件下,由于室内颗粒物的来源不同,其类型、形成过程、成分等均不同,颗粒的形状并不规则,有接近球形、块状、条形、片状等多种,所以表征颗粒的尺寸大小通常用空气动力学直径,即与空气中该颗粒沉降速度相同的球形粒子的直径.为了简化计算,本文假设在碰撞过程中,颗粒都为理想的球体模型,忽略颗粒形状对于颗粒运动的影响.

2) 相对于空气分子的平均自由程来说,颗粒粒径仍比其大一些,因此假设颗粒周围的气体是连续介质而不是单个的分子.

3) 室内空间体积为  $V$ ,室内均匀分布细颗粒物数为  $N$ .

4) 计算中不考虑室内布置对颗粒物运动所造成的影响.

5) 本文关于颗粒物发生碰撞的概率模型的建立是基于颗粒物随机运动的思想,故不具体考虑颗粒物的微观受力.

## 1.2 碰壁细颗粒物数模型

借鉴气体分子碰撞的统计平均的无关分析模型<sup>[9]</sup>建立颗粒物的碰壁数模型.假设速率处于区间  $v \sim v + dv$  内的细颗粒数为  $dN$ ,以室内空间内壁上某一点为原点  $O$ ,该点处的切面为  $xOz$  面,指向室内区域内部的法向为  $y$  轴的正方向,以此建立坐标系如图 1 所示.

在  $xOz$  平面原点处取一个面积元  $dS$ ,在体积  $V$  区域内极坐标为  $(r, \theta, \varphi)$  位置处取一个体积元  $dV$ :

$$dV = r^2 \sin \varphi dr d\theta d\varphi, \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为体积元与  $z$  轴的夹角,  $\theta$  为体积元在  $xOy$  平面上的投影与  $y$  轴的夹角.

$dS$  在垂直于线段  $r$  方向上的投影为  $dS'$ ,体积元  $dV$  内速率处于  $v \sim v + dv$  之间的颗粒数为  $dN_1$ ,这些颗粒以等概率向各个方向运动,则有可能碰撞  $dS$  的颗粒数为

$$dN_2 = \frac{dS'}{4\pi r^2} dN_1 = \frac{dN}{V} \frac{dS}{4\pi} \sin \varphi \cos \varphi \sin \theta dr d\theta d\varphi. \quad (2)$$

在  $dt$  时间内,速率在  $v \sim v + dv$  之间,与  $dS$  发生碰撞的颗粒数为

$$dN_3 = \int dN_2 = \frac{dN}{V} \frac{dS}{4\pi} \int_0^{rdt} dr \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta = \frac{1}{4} \frac{dN}{V} vdSdt. \quad (3)$$

则  $dt$  时间内,能够与  $dS$  发生碰撞的颗粒物总数为

$$dN_4 = \int dN_3 = \frac{1}{4} \frac{1}{V} dSdt \int vdN = \frac{1}{4} \frac{N}{V} dSdt \frac{\int vdN}{N} = \frac{1}{4} n\bar{v}dSdt, \quad (4)$$

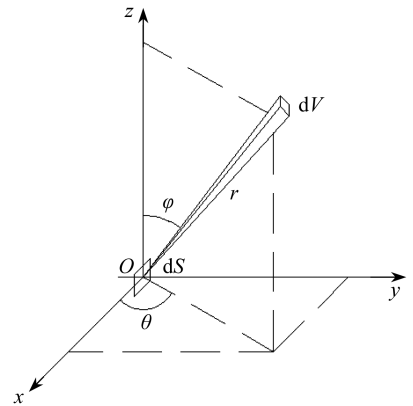


图 1 碰壁颗粒数计算模型

Fig. 1 The model for calculating the number of particles colliding with the wall

其中,  $n = N/V$ ,  $\bar{v} = \int v dN/N$  分别是室内空间的颗粒物数密度和颗粒物平均速率。

所以, 在单位时间内碰撞单位面积壁面的颗粒总数为

$$\Gamma = \frac{dN_4}{dSdt} = \frac{1}{4} n\bar{v}. \quad (5)$$

所得结果与文献[9]以及[16]中关于分子碰壁数的结果一致, 由公式可以发现随着颗粒物数密度以及颗粒运动平均速率的增加, 颗粒物的碰壁数会成正比地增加。

### 1.3 颗粒-颗粒间碰撞概率模型

在分析颗粒物之间的碰撞时, 必须考虑到颗粒物的大小. 假设  $A$  为所追踪的颗粒,  $B$  为室内空间任一颗粒。

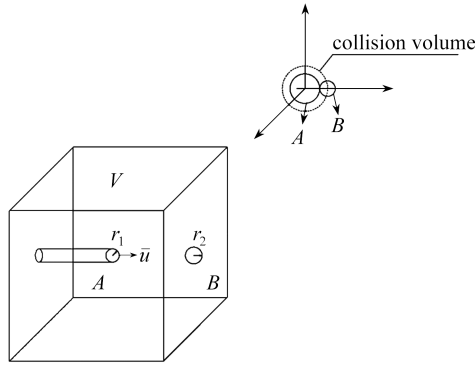


图2 颗粒间碰撞概率计算模型

Fig. 2 The particle-particle collision model

颗粒物  $A$  的半径为  $r_1$ , 将  $A$  看作跟踪颗粒, 静止不动, 在区域  $V$  内有  $N$  个虚拟颗粒  $B$ , 其半径为  $r_{2(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). 颗粒物  $B$  以两者的平均相对速率  $\bar{u}$  运动, 碰撞模型如图 2 所示.  $A$  和  $B$  发生一次碰撞的概率可定义为

$$P = \frac{\frac{4}{3} \pi (r_1 + r_2)^3}{0.52 \left( V - \pi r_1^2 |\bar{u}| \Delta t - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \cdot \frac{1}{2} \right)}, \quad (6)$$

其中, 0.52 为球形颗粒物紧密排列在立方体内时所占体积与  $V$  的比值,  $\Delta t$  为积分时间。

因为颗粒数  $N$  远大于碰撞概率  $P$ , 可认为碰撞概率服从 Poisson (泊松) 分布, 则两颗粒间至少发生一次碰撞的概率为

$$P_{\geq 1} = 1 - e^{-\lambda} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\lambda^n}{n!}. \quad (7)$$

因为  $\lambda$  正比于  $\Delta t$ , 可以使  $\Delta t$  足够小, 忽略高阶项后得到

$$P_{\geq 1} = \lambda = N \cdot P. \quad (8)$$

$A$  与编号为  $i$  的颗粒发生碰撞的概率为

$$P_i = \frac{\frac{4}{3} \pi (r_1 + r_{2(i)})^3}{0.52 \left( V - \pi r_1^2 |\overline{u_{(i)}}| \Delta t - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \cdot \frac{1}{2} \right)}, \quad (9)$$

则  $A$  与区域  $V$  内  $N$  个虚拟颗粒发生碰撞的算术平均概率为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\frac{4}{3} \pi (r_1 + r_{2(i)})^3}{0.52 \left( V - \pi r_1^2 | \overline{u_{(i)}} | \Delta t - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \cdot \frac{1}{2} \right)},$$

$$P_{\geq 1} = \lambda = N \cdot P = \sum_{i=1}^N \frac{\frac{4}{3} \pi (r_1 + r_{2(i)})^3}{0.52 \left( V - \pi r_1^2 | \overline{u_{(i)}} | \Delta t - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \cdot \frac{1}{2} \right)}. \quad (10)$$

若  $\Delta t$  取足够小, 且  $(4/3) \pi r_1^3 \ll V$ , 则有

$$P_{\geq 1} = \sum_{i=1}^N \frac{\frac{4}{3} \pi (r_1 + r_{2(i)})^3}{0.52 \cdot V}. \quad (11)$$

由结果可以得出, 两颗粒之间发生碰撞的概率随颗粒物粒径的增加而增大, 且颗粒数密度越大, 两颗粒之间发生碰撞的可能性亦会增加, 这与前人的研究结果<sup>[8,12,14]</sup>是一致的。

## 2 细颗粒物间碰撞结果分析

颗粒物所受作用力主要可分为两类: 内力作用, 代表性的为 Van der Waals 力、弹性形变力; 外力作用, 代表性的为 Stokes 阻力、润滑力、重力。而在两个颗粒接触了之后, 其内力的作用明显大于外力的作用, 故在计算中忽略外力的作用<sup>[10]</sup>。因此, 在细颗粒碰撞的过程中本文主要考察弹性形变力和 Van der Waals 力对其作用。

颗粒材料选取在暖通空调中, 以测试高效过滤器的过滤效率的 DOP 材料颗粒为代表进行分析讨论, 查阅材料特性表确定颗粒密度等参数, 碰撞为同粒径颗粒对心碰撞。

### 2.1 颗粒碰撞 Van der Waals 力

两颗粒之间的碰撞过程, 当刚刚接触时, 表现为点接触的形式, 随后颗粒间的接触面积会增加, 表现为面接触的形式。关于颗粒物碰撞过程中 Van der Waals 力的计算方式有多种不同形式, 因为颗粒物碰撞后两颗粒均有一定的压缩变形, 本文取两个直径为  $d_p - s$  的球体之间与两个平面之间 Van der Waals 力的叠加来计算。

两球体之间的 Van der Waals 力为

$$F_{vw1} = \frac{A}{24D^2}. \quad (12)$$

由图 3 所示, 可以得到接触面半径  $r_v$  与颗粒半径  $r$  及压缩形变位移  $s$  有以下的几何关系:

$$r_v^2 = r^2 - (r - s)^2. \quad (13)$$

进而可以得到接触面面积为  $\pi s(d_p - s)$ , 则面接触式 Van der Waals 力为

$$F_{vw2} = \pi s(d_p - s) \frac{A}{6\pi D^3} = s(d_p - s) \frac{A}{6D^3}. \quad (14)$$

因此颗粒物碰撞变形时 Van der Waals 力为

$$F_{vw} = \frac{Ad_p}{24D^2} + s(d_p - s) \frac{A}{6D^3}, \quad (15)$$

式中,  $d_p$  为两颗粒的直径,  $D$  为 Van der Waals 力开始作用的距离, 一般取值为  $1.65 \times 10^{-8} \sim 4.0 \times$

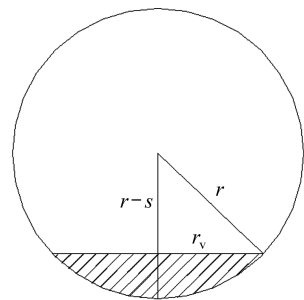


图 3 颗粒碰撞形变  
Fig. 3 Particle deformation

$10^{-8}$  m,  $s$  为两颗粒球心连线方向上的压缩距离,  $A$  为 Hamaker 常数, 与颗粒的材料有关。

## 2.2 弹性形变力

已知弹性形变力  $F_c$  与形变压缩距离  $s$  有如下关系<sup>[10]</sup> :

$$F_c = \pi k \left( \frac{s^3}{3} - \frac{d_p}{2} s^2 \right), \quad (16)$$

式中,  $k$  为颗粒的弹性形变系数, 与颗粒物材料有关。

## 2.3 碰撞结果分析

室内颗粒中, 通常有意义的粒径范围是  $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ , 多个文献发现粒径为  $0.3 \mu\text{m}$  左右的颗粒物最难通过纤维过滤方法进行去除<sup>[17]</sup>, 因为该范围颗粒对于利用 Brown(布朗)运动扩散效应原理捕集的方式而言粒径过大了, 对于利用惯性撞击原理捕集的方式而言又过小了。因此选取此粒径及附近范围颗粒的碰撞结果进行分析, 进而分析其碰撞凝并为较大颗粒的可能性具有重要的现实意义。 $0.3 \mu\text{m}$  的 DOP 颗粒, 其特性参数见表 1。

表 1 DOP 颗粒特性参数

Table 1 The parameters of DOP particles

$A/J$	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	$k/\text{Pa}^{-1}$	$D/\text{m}$
$6.8 \times 10^{-20}$	982	$5.45 \times 10^7$	$4 \times 10^{-10}$

在压缩的开始阶段, 右边的颗粒在碰撞点上以初速度  $v_0$  接触到左边颗粒, 初始位移变形  $s$  是 0。在压缩过程中, 由于 Van der Waals 力和弹性变形力的作用, 位移变形增加而相对速度  $v$  减少。在压缩的最后一刻, 相对速度为 0 而位移变形达到最大值  $s_{\max}$ 。

假设发生碰撞初始阶段, 颗粒 2 以相对初速度  $v_0$  向颗粒 1 运动。碰撞可以分为压缩变形和变形回复两个阶段, 如图 4、图 5 所示。在第一个阶段由于颗粒物受到 Van der Waals 力与弹性形变力的综合作用, 而在此阶段 Van der Waals 力大于弹性形变力, 故颗粒做减速运动, 形变位移增加, 压缩位移达到最大  $s_{\max}$  时刻为分界点, 此时, 两颗粒物的相对速度减为 0, 随后开始第二阶段的变形回复, 形变位移逐渐减小。本文所研究的情况为非完全弹性碰撞, 碰撞过程中存在机械能损失, 而机械能损失的大小则会决定碰撞的结果是凝并或是分离。当变形回复阶段结束, 两个颗粒相对速度回复为 0 时, 假设此时颗粒压缩变形位移为  $s_r$ 。将这两个阶段以运动学方程表示如下:

压缩变形阶段

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{2}v, \quad (17)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2(F_c - F_{vw})}{m}, \quad (18)$$

$$s|_{t=0} = 0, \quad (19)$$

$$v|_{t=0} = v_0. \quad (20)$$

变形回复阶段

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{2}v, \quad (21)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2(F'_c - F_{vw})}{m}, \quad (22)$$

$$s|_{t=0} = s_{\max}, \quad (23)$$

$$v|_{t=0} = v_0. \quad (24)$$

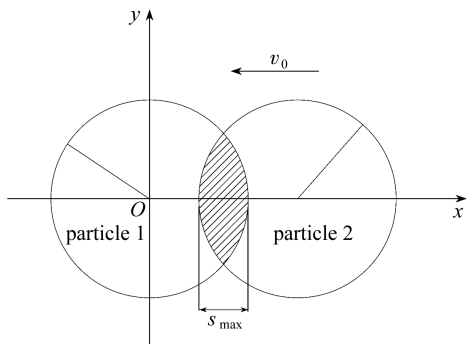


图 4 颗粒压缩变形阶段

Fig. 4 The compressive deformation

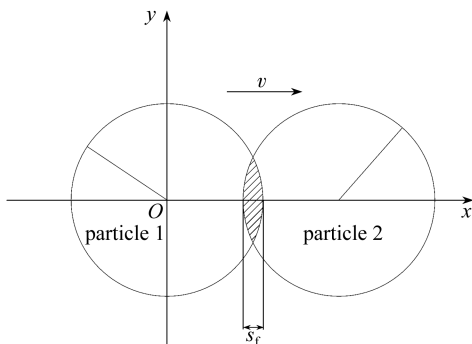


图 5 颗粒变形回复阶段

Fig. 5 The deformation recovery

分别解以上两组运动方程式(17)~(20)和式(20)~(24),可以得到  $s_{max}$  和  $v_0$  以及  $s_f$  和  $s_{max}$  的关系,并进一步可以得到  $s_f$  和  $v_0$  的关系如图所示( $v_0 < 0$  表示颗粒 2 的初始速度方向为  $x$  轴的负方向),同时可得两者的关系表达式:

$$s_f = -4.77 \times 10^{-7} v_0^4 - 5.04 \times 10^{-7} v_0^3 + 9.61 \times 10^{-9} v_0^2 - 2.37 \times 10^{-7} v_0 + 1.05 \times 10^{-7} \quad (25)$$

由图 6 可以看出,当  $v_0 = -0.715$  m/s 时,  $s_f = 0$ , 为颗粒碰撞后发生分离的临界点,当初速度大于此值时,两颗粒碰撞后一定会发生分离.由图亦可以发现,两颗粒发生碰撞的初始速度越大,颗粒碰撞后越容易发生分离;反之,颗粒之间以较小的初速度发生碰撞时,两颗粒碰撞后趋向于凝并在一起成为更大的颗粒.颗粒的初始速度越大,其发生碰撞时造成的变形位移  $s$  也会越大,变形回复时具有更大的弹性势能,因此颗粒发生碰撞后更容易分离.

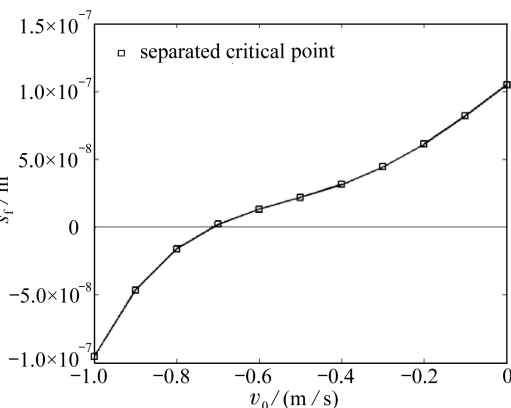


图 6  $s_f$  和  $v_0$  的关系曲线

Fig. 6 The relationship between  $s_f$  and  $v_0$

考虑  $0.1 \sim 0.75 \mu\text{m}$  粒径范围,结合文献[6]中对于碰撞效率  $\alpha$  的定义:  $\alpha = \int_{s_f}^{0.1} f(x) dx$ , 引入碰撞效率对颗粒碰撞后的结果进行分析讨论.

$s_c$  为临界变形位移,即为当回弹阶段颗粒弹性力减小到 0, 颗粒的相对运动速度也减小到 0 时所对应的颗粒变形位移.

碰撞初速度为  $0.4$  m/s 时,两相同粒径颗粒发生对心碰撞时碰撞效率关于粒径  $d_p$  的关系式为

$$d_p \in [0.1 \mu\text{m}, 0.5 \mu\text{m}] \text{ 时} \quad \alpha = -14.5579 d_p^3 + 15.4082 d_p^2 - 5.5519 d_p + 1.0073; \quad (26)$$

$$d_p \in [0.55 \mu\text{m}, 0.75 \mu\text{m}] \text{ 时} \quad \alpha = 1.3324 d_p^2 - 2.3001 d_p + 1.1903. \quad (27)$$

图 7 是本文结果与文献[7]结果的对比.

由曲线图可以发现,随着粒径的增大,两颗粒发生碰撞的碰撞效率会降低.与文献[7]中取得的结果趋势一致.根据 Van der Waals 力与弹性形变力的计算公式,可以初步判断是由于弹性形变力和 Van der Waals 力与颗粒直径的非线性关系所造成,在这两个粒径位置处, Van der

Waals 力与弹性形变力出现非线性突变, 相关文献中亦有提出相似观点。

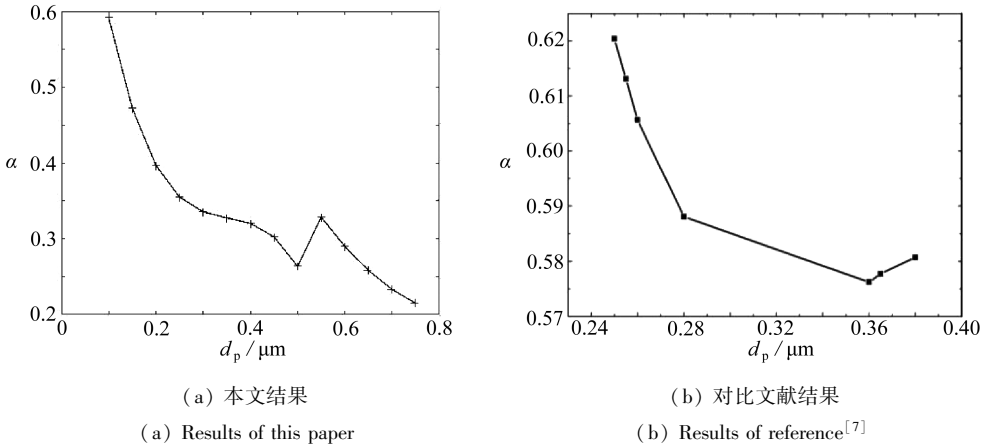


图7  $\alpha$  和  $d_p$  的关系曲线

Fig. 7 The relationship between  $\alpha$  and  $d_p$

粒径为  $0.3 \mu\text{m}$  的颗粒发生碰撞的碰撞效率为 0.335。《采暖通风与空气调节设计规范》<sup>[18]</sup> 中对工作区的风速的要求为: 冬季不应大于  $0.2 \text{ m/s}$ , 夏季不大于  $0.3 \text{ m/s}$ 。而送回风口附近气流速度根据送回风方式的不同而有不同的规定, 但也至少会控制在  $2 \text{ m/s}$  以上, 而对于微米级的细颗粒物而言, 因其粒径较小, 对气流有很好的跟随性, 可以认为其运动速度与室内空气速度相同。由此可以得知, 粒径为  $0.3 \mu\text{m}$  的 DOP 颗粒在室内工作区运动发生碰撞时, 较容易发生凝并成为更大粒径的颗粒, 而在进出风口位置处, 因为碰撞初速度较大, 则不易凝并。

### 3 结 论

本文从统计平均及颗粒物随机运动的角度建立了室内细颗粒物碰壁数以及颗粒间碰撞的模型, 对预测颗粒物碰壁数及颗粒之间的碰撞概率大小提供了一定的理论基础。为了进一步分析同粒径颗粒物之间对心碰撞之后的结果, 本文以  $0.3 \mu\text{m}$  大小的 DOP 颗粒为代表, 从 Van der Waals 力与弹性形变力的相对大小着手并结合运动学方程简单分析了碰撞后颗粒凝并或破碎的可能性, 得到了碰撞初速度与最终压缩距离以及碰撞效率与颗粒物粒径之间的关系曲线。随着碰撞初速度的增加, 会增加颗粒发生碰撞后发生分离的可能性, 且小粒径粒子发生碰撞后凝并的效率一般会大于较大粒径的粒子。由于颗粒受力与压缩形变位移的非线性关系, 颗粒的碰撞效率随着粒径的增加出现一定的突变现象。粒径大小为  $0.3 \mu\text{m}$  的 DOP 颗粒在室内工作区域运动发生对心碰撞时, 大多情况下会发生凝并成为更大粒径的颗粒; 在送回风口位置处发生碰撞时则易发生分离。根据这一结果可以进一步设计实验对其进行验证, 这将是笔者以及相关领域学者接下来需要研究的方向。

本文的分析结果对研究室内颗粒物凝并机理, 并寻求不同粒径段颗粒物的去除方法具有现实意义。但是考虑的因素较为简单, 还需要进一步研究不同材料及不同粒径颗粒的碰撞情况, 并结合实验结果进行更加准确、深入而详尽的分析和讨论。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈林烽. 热剪切湍流中微细颗粒输运特性的大涡模拟研究[D]. 硕士学位论文. 上海: 上海大学, 2011. (CHEN Lin-feng. An investigation on particle motion in the stratified turbulence by LES [D]. Master Thesis. Shanghai: Shanghai University, 2011. (in Chinese))

- [2] Kitron A, Elperin T, Tamir A. Monte Carlo simulation of gas-solids suspension flows in impinging streams reactors[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, **16**(1): 1-17.
- [3] Lun C K K, Savage S B. A simple kinetic theory for granular flow of rough, inelastic, spherical particles[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1987, **54**(1): 47-53.
- [4] Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: on the effect of particle-to-particle collision[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B*, 1990, **56**(1): 3210-3216.
- [5] Oesterle B, Petitjean A. Simulation of particle-to-particle interactions in gas solid flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, **19**(1): 199-211.
- [6] 王玉明, 林建忠. Brown 凝并中两个不同直径纳米颗粒的碰撞系数[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(8): 956-963.(WANG Yu-ming, LIN Jian-zhong. Collision efficiency of two nanoparticles with different diameters in the Brownian coagulation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(8): 956-963.(in Chinese))
- [7] 陈忠利, 游振江. 球形纳米颗粒 Brown 凝并碰撞效率的新表达式[J]. 应用数学和力学, 2010, **31**(7): 812-821.(CHEN Zhong-li, YOU Zhen-jiang. New expression for collision efficiency of spherical nanoparticles in Brownian coagulation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, **31**(7): 812-821.(in Chinese))
- [8] 樊建人, 姚军, 张新育, 岑可法. 气固两相流中颗粒-颗粒随机碰撞新模型[J]. 工程热物理学报, 2001, **22**(5): 629-632.(FAN Jian-ren, YAO Jun, ZHANG Xin-yu, CEN Ke-fa. Modeling particle-to-particle interactions in gas-solid flows[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, **22**(5): 629-632.(in Chinese))
- [9] 刘家福, 张昌芳. 气体分子碰撞的模型无关分析[J]. 物理与工程, 2010, **20**(1): 26-27.(LIU Jia-fu, ZHANG Chang-fang. Model-independent analysis of the gas molecules collision[J]. *Physics and Engineering*, 2010, **20**(1): 26-27.(in Chinese))
- [10] 王玉明. 微小颗粒碰撞与凝并模型的研究[D]. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量学院, 2012.(WANG Yu-ming. Research on the model of micro-particle collision and coagulation[D]. Master Thesis. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.(in Chinese))
- [11] 张文斌, 祁海鹰, 由长福, 徐旭常. 碰撞诱发颗粒团聚及破碎的力学分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(12): 1639-1643.(ZHANG Wen-bin, QI Hai-ying, YOU Chang-fu, XU Xu-chang. Mechanical analysis of agglomeration and fragmentation of particles during collision[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, **42**(12): 1639-1643.(in Chinese))
- [12] 柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究[D]. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2011.(LIU Guan-qing. Discrete element methods of fine particle dynamics in presence of Van der Waals and electrostatic forces[D]. PhD Thesis. Beijing: Tsinghua University, 2011.(in Chinese))
- [13] 周涛, 李洪钟. 粘性颗粒流化床中聚团大小的计算模型[J]. 化学反应工程与工艺, 1999, **15**(1): 44-52.(ZHOU Tao, LI Hong-zhong. The calculation model of agglomerate sizes in fluidized beds of cohesive particles[J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 1999, **15**(1): 44-52.(in Chinese))
- [14] 崔术祥. 湿度对室内颗粒物分布的影响[D]. 硕士学位论文. 湖南: 湖南工业大学, 2013.(CUI Shu-xiang. The influence of humidity on the distribution of indoor particle[D]. Master Thesis. Hunan: Hunan University of Technology, 2013.(in Chinese))
- [15] 陈富华. 燃煤超细颗粒物化学团聚理论及系统设计研究[D]. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012.(CHEN Fu-hua. A theory study and system design of chemical agglomeration for ul-



- trafine particulate matter[D]. Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [16] 谢名春. 关于分子碰壁数的计算[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 1990, **13**(1): 72-73. (XIE Ming-chun. Calculation concerning the number of molecules colliding with a wall[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 1990, **13**(1): 72-73. (in Chinese))
- [17] Nazaroff W W. Indoor particle dynamics[J]. *Indoor Air*, 2004, **14**(7): 175-183.
- [18] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 采暖通风与空气调节设计规范: GB 50019—2003[S]. 2003. (Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of heating ventilation and air conditioning: GB 50019—2003[S]. 2003. (in Chinese))

## The Collision Model for Indoor Fine Particles and the Collision Results

WANG Xiu-juan, LI Can

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology,  
Zhuzhou, Hunan 412007, P.R.China)

**Abstract:** In order to study the coagulation mechanism for indoor fine particles, the number of particles colliding with walls and the collision probability between particles were calculated based on the idea of statistical mean and random motion of particles. The collision results were also studied with the qualitative and quantitative analysis methods. The relationship between the final compressive deformation and the initial velocity, and that between the collision efficiency and the particle diameter, were obtained for 0.3  $\mu\text{m}$  DOP particles. The results show that the coagulation possibility of particles decreases with the particle velocity, the finer particles are easier to coagulate after collision, and the collision efficiency increases with the particle diameter.

**Key words:** fine particle; collision probability; coagulation

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51246008)

引用本文/Cite this paper:

王秀娟, 李灿. 室内细颗粒物碰撞模型及碰撞结果讨论[J]. 应用数学和力学, 2016, **37**(7): 766-774.  
WANG Xiu-juan, LI Can. The collision model for indoor fine particles and the collision results[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(7): 766-774.