

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.001

# 湍流通道内微粒受力沉降特性模拟<sup>\*</sup>

宁智 白振霄 孙春华 付娟

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 利用建立的微粒受力模型和微粒随机轨道模型,对湍流通道中不同条件下微粒的受力进行了研究,对湍流通道中微粒的沉降特性以及影响因素进行了分析。研究表明,湍流通道中,柴油机微粒所受的曳力、布朗力、Saffman 升力、热泳力以及重力和浮力等与微粒粒径、微粒距壁面的距离等因素密切相关;在不同条件下,微粒所受的主要作用力以及微粒沉降的主要驱动力不同;微粒受力、气流入口速度和温度以及通道尺度等因素都会对湍流通道中微粒的沉降产生影响。

**关键词:** 柴油机 湍流通道 微粒 受力 沉降

**中图分类号:** TK42      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0001-08

## 引言

柴油机的微粒排放已成为柴油机研究的热点问题<sup>[1-5]</sup>。柴油机排气采样管、排气再循环系统、排气管以及排气后处理装置中的微粒运动和沉降对微粒测量、排气再循环系统正常工作以及微粒净化捕集等具有重要影响<sup>[6-10]</sup>。

数值模拟研究是目前湍流通道内微粒运动研究的主要方法。国内外学者已在不同条件下,针对不同研究背景和目的,采用不同数值方法对湍流通道中的微粒运动进行过研究,并取得了许多研究成果<sup>[11-19]</sup>。但已有研究大多针对某一特定的运动机理,综合考虑湍流扩散、布朗扩散和热泳扩散对微粒运动作用的研究还很少,特别是从受力角度针对湍流通道中微粒运动的分析更是鲜见报道。

本文利用微粒受力模型和微粒随机轨道模型以及微粒运动学和动力学方程,对柴油机湍流通道中微粒的受力进行研究,对湍流通道中微粒的沉降特性以及影响因素进行分析。

## 1 微粒随机轨道模型及沉降速度模型

### 1.1 微粒受力模型

可以将作用在微粒上的力分为两类:一类是与流体和微粒间的相对运动无关的力,包括布朗力、热泳力、重力、浮力等;另一类是与流体和微粒间的相对运动有关的力,包括曳力、Saffman 升力等。为了

便于分析,假设微粒形状为球形;作用于微粒上的各种力如图 1 所示。

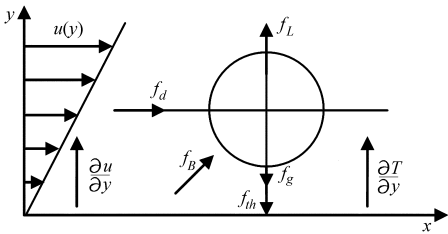


图 1 作用在微粒上的力

Fig. 1 Schematic diagram of force on a particle

本文着重考察微粒所受的曳力、布朗力、Saffman 升力、热泳力以及重力和浮力及其对湍流通道中微粒沉降的影响。

在运动的粘性流体中,作用在微粒上的曳力由压差曳力和摩擦曳力组成,单位质量曳力可表示为

$$f_d = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_d Re_p}{24} \tag{1}$$

其中

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \tag{2}$$

式中  $f_d$ ——单位质量曳力  
 $\tau_p$ ——微粒松弛时间  
 $\mu$ ——流体动力粘度  
 $\rho_p$ ——微粒密度  $d_p$ ——微粒直径

微粒松弛时间表征微粒与流体之间松弛过程的快慢; $\tau_p$ 越小,微粒速度与流体速度趋于平衡的时间越短。

收稿日期: 2013-12-30 修回日期: 2014-02-12  
<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51276011)、北京市自然科学基金资助项目(3132016)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA065303)和内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目(k2013-3)  
作者简介: 宁智,教授,博士生导师,主要从事内燃机排放与控制研究,E-mail: zhining@bjtu.edu.cn

$Re_p$ 为基于流体-微粒滑移速度和流体运动粘度的微粒雷诺数,定义为

$$Re_p = \frac{d_p |u_p - u_f|}{\nu} \quad (3)$$

式中  $\nu$ ——流体运动粘度  $u_p$ ——微粒速度  
 $u_f$ ——流体质点速度

$C_D$ 为阻力系数,是  $Re_p$ 的函数,即

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & (Re_p < 1) \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.667}) & (1 \leq Re_p < 400) \\ 0.44 & (Re_p \geq 400) \end{cases} \quad (4)$$

对于柴油机排气中的微米和亚微米级微粒来说,微粒所受曳力可以表示为

$$f_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} \quad (5)$$

其中  $C_c = 1 + Kn(1.257 + 0.4 \frac{-1.1}{Kn})$  (6)

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (7)$$

式中  $C_c$ ——Stokes - Cunningham 滑移系数

$Kn$ ——微粒克努森数

$\lambda$ ——空气分子自由程

微粒上下部流体速度的差异造成其受到一个与运动方向垂直的作用力,即 Saffman 升力。Saffman 升力是滑移和剪切联合作用结果。

对平面剪切流绕圆球流动运用奇异摄动法求解,可得出单位质量 Saffman 升力表达式

$$f_L = 1.615 \rho_f \nu^{0.5} d_p^2 (u_f - u_p) \left| \frac{du_f}{dy} \right|^{0.5} \text{sign} \frac{du_f}{dy} \quad (8)$$

式中  $f_L$ ——单位质量 Saffman 升力

$u_f - u_p$ ——流体-微粒滑移速度

Saffman 升力方向由滑移速度方向及速度梯度方向决定。在通道流动中,Saffman 升力主要体现在壁处附近。

单位质量布朗力可通过谱密度为  $S_{n,ij}$  的高斯白噪声随机过程进行模拟; $S_{n,ij}$ 定义为

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (9)$$

其中  $S_0 = \frac{216 \nu k_B T}{\pi^2 \rho_f d_p^5 S^2 C_c}$  (10)

式中  $\delta_{ij}$ ——克罗内克  $\delta$  函数

$k_B$ ——Boltzmann 常数

$S$ ——微粒密度与流体密度之比

单位质量布朗力可以表示为

$$f_B = G_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (11)$$

式中  $f_B$ ——单位质量布朗力

$G_i$ ——期望为 0、方差为 1 的高斯概率分布随机数

$\Delta t$ ——积分时间步长

热泳力指流场中微粒受到的由温度梯度造成的与温度梯度方向相反的作用力。单位质量热泳力可以表示为

$$f_{th} = D_{T,p} \frac{1}{m_p} T \frac{\partial T}{\partial y} \quad (12)$$

其中  $D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (k_f/k_p + C_t Kn)}{\rho_f (1 + 3C_m Kn) (1 + 2k_f/k_p + 2C_t Kn)}$  (13)

式中  $D_{T,p}$ ——热泳系数  $T$ ——温度

$m_p$ ——微粒质量

$f_{th}$ ——单位质量热泳力

$k_f$ ——流体导热系数

$k_p$ ——微粒导热系数

$C_s$ ——热蠕动系数

$C_t$ ——温度跳跃边界中动量交换系数

$C_m$ ——滑移边界中动量交换系数

球形微粒的重力和浮力可以表示为

$$F_g = \pi d_p^3 \rho_p g / 6 \quad (14)$$

$$F_{buo} = \pi d_p^3 \rho_f g / 6 \quad (15)$$

式中  $F_g$ ——微粒重力  $F_{buo}$ ——微粒浮力

$\rho_f$ ——流体密度  $g$ ——重力加速度

## 1.2 微粒运动方程

微粒随机轨道模型把流体相看作连续介质,把微粒看作在连续性流体中的离散相,即在 Euler 坐标系下处理流体相,在 Lagrange 坐标系下处理微粒相。微粒随机轨道模型的基本假设为:相间存在滑移;微粒相自身无湍流扩散、湍流粘性及湍流导热;微粒沿各自轨道运动,互不干扰;在考察微粒群与流体间相互耦合作用时,把微粒群对流体相质量、动量及能量的作用看作是某种连续分布的物质源、动量源和能量源。由于柴油机排气中的微粒浓度很低,因此只需考虑流体相对微粒相作用,而不考虑微粒相对流体相作用,且忽略微粒之间的相互碰撞和微粒自身的旋转。

单位质量微粒在  $x$  和  $y$  方向上的动力学方程可以由牛顿第二定律给出

$$\frac{du_p}{dt} = f_{dx} + f_{Bx} \quad (16)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = f_{dy} + f_L + g \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} + f_{By} + f_{th} \quad (17)$$

式中  $u_p$ ——微粒  $x$  向速度

$v_p$ ——微粒  $y$  向速度

$f_{dx}$ —— $x$  向单位质量曳力

$f_{dy}$ —— $y$  向单位质量曳力

$f_L$ —— $y$  向单位质量 Saffman 升力  
 $f_{Bx}$ —— $x$  向单位质量布朗力  
 $f_{By}$ —— $y$  向单位质量布朗力  
 $f_{th}$ ——单位质量热泳力

湍流场中的速度同时在方向和数值上随机变化,因此微粒轨道模型必须考虑湍流脉动速度的影响。用随机方法处理微粒与涡的相互作用以及微粒的湍流扩散。

1.3 微粒沉降速度模型

微粒沉降速度可以定义为

$$v_d = J/C_0 \tag{18}$$

式中  $J$ ——单位面积单位时间内微粒沉降到壁面的质量  
 $C_0$ ——微粒平均浓度

采用 2 种方法计算微粒沉降速度。

第 1 种方法:初始均匀分布的微粒在一个区域内释放,每个微粒具有各自运动轨迹;当微粒在  $t$  时刻碰到壁面时,就意味着一个微粒沉降到壁面。微粒沉降速度可以通过时间  $t$  内沉降到壁面的微粒数计算

$$v_d = \frac{N_d/(tA)}{\overline{N}/V} \tag{19}$$

式中  $N_d$ ——时间  $t$  内沉降到壁面的微粒数  
 $\overline{N}$ ——区域内平均微粒数  
 $V$ ——区域体积  
 $A$ ——壁面面积

第 2 种方法:微粒在一个点源释放,每一条轨迹代表一条载有一定微粒质量流量的微粒轨迹线;设  $t$  时刻微粒轨迹接触到壁面,则在  $t$  时刻后持续的微粒都会撞击到壁面相同位置。微粒沉降质量流量可以表示为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n M_i(t_{\max} - t_i^{dep})}{t_{\max} A} \tag{20}$$

式中  $n$ ——轨迹数  
 $M_i$ ——第  $i$  个轨迹上的微粒数  
 $t_i^{dep}$ ——第  $i$  条轨迹的沉降时刻  
 $t_{\max}$ ——每一个微粒的最大计算时间

通常  $t_{\max}$  对所有轨迹来说是同一个值;如果在整个计算时间内微粒都没有沉降,则  $t_i^{dep} = t_{\max}$ 。

在整个计算时间  $t_{\max}$  内,微粒平均浓度可以表示为

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i t_i^{dep}}{V} \tag{21}$$

因此,微粒沉降速度可以表达为

$$v_d = \frac{\sum_{i=1}^n M_i(t_{\max} - t_i^{dep})}{t_{\max} A} \frac{V}{t_{\max} A} \tag{22}$$

第 1 种方法模拟的是微粒预先混合情况;第 2 种方法模拟的是连续释放微粒情况。

微粒沉降特性通常可用无量纲微粒沉降速度随无量纲微粒松弛时间的变化来描述。微粒沉降速度以摩擦速度  $u^*$  无量纲化;微粒松弛时间采用  $u^*$  和  $\nu$  无量纲化。

$$v_d^+ = v_d/u^* \tag{23}$$
$$\tau_p^+ = \frac{\tau_p u^{*2}}{\nu} = \rho_p d_p^2 u^{*2}/(18\mu\nu) \tag{24}$$

在相同参数设置条件下,将利用上述模型得到的无量纲微粒沉降速度随无量纲微粒松弛时间的变化规律与文献[20]给出的结果进行比较,如图 2 所示。

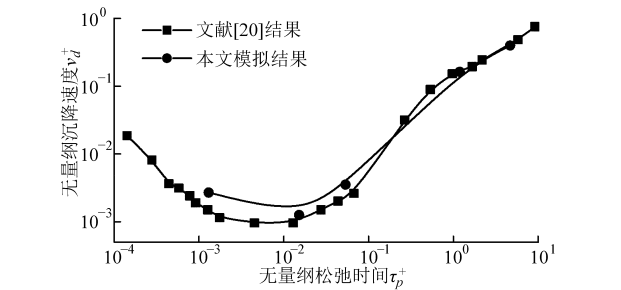


图 2 模拟结果的比较

Fig. 2 Comparison of simulation result

从图 2 可看到,计算得到的无量纲微粒沉降速度随无量纲微粒松弛时间的变化规律与文献[20]给出的结果相比,仅在小粒径微粒时存在一定偏差,粒径较大时则吻合较好。

2 微粒受力分析

在进行微粒受力分析时,考虑到编程方便,以二维通道为研究对象,通道几何参数取  $1\text{ m} \times 0.03\text{ m}$ ;通道入口速度取  $20\text{ m/s}$ ;通道入口温度取  $700\text{ K}$ ,壁面温度取  $300\text{ K}$ ;考虑到微粒凝并以及从壁面再悬浮微粒直径的增大,微粒直径取  $0.1$ 、 $1$  和  $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

在下面分析中,各变量以摩擦速度  $u^*$  和运动粘度系数  $\nu$  无量纲化

$$y^+ = y \frac{u^*}{\nu} \quad t^+ = \frac{tu^{*2}}{\nu} \quad f^+ = \frac{v}{\nu^*} f$$

式中  $y^+$ ——距壁面无量纲距离  
 $t^+$ ——无量纲时间  
 $f^+$ ——单位质量无量纲力

2.1 微粒受力

由于 Saffman 升力和热泳力主要局限于近壁区

域,因此这里仅对微粒在  $y^+ = 20$  (缓冲层) 和  $y^+ = 5$  (粘性底层) 释放时的受力进行分析。

图3和图4分别给出的是微粒在距壁面  $y^+ =$

20 和  $y^+ = 5$  释放时,微粒受到的  $y$  方向单位质量无量纲力随无量纲时间的变化;正值代表力的方向远离壁面,负值代表力的方向指向壁面。

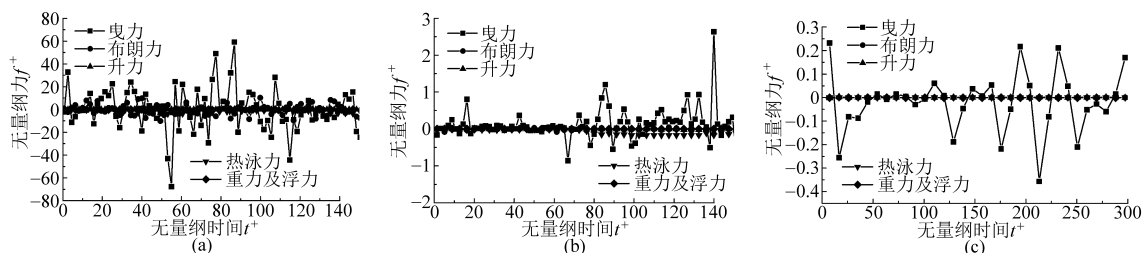


图3 无量纲力随无量纲时间的变化 (释放点  $y^+ = 20$ )

Fig. 3 Variation of dimensionless force with dimensionless time ( $y^+ = 20$ )

(a)  $d_p = 0.1 \mu\text{m}$  (b)  $d_p = 1 \mu\text{m}$  (c)  $d_p = 10 \mu\text{m}$

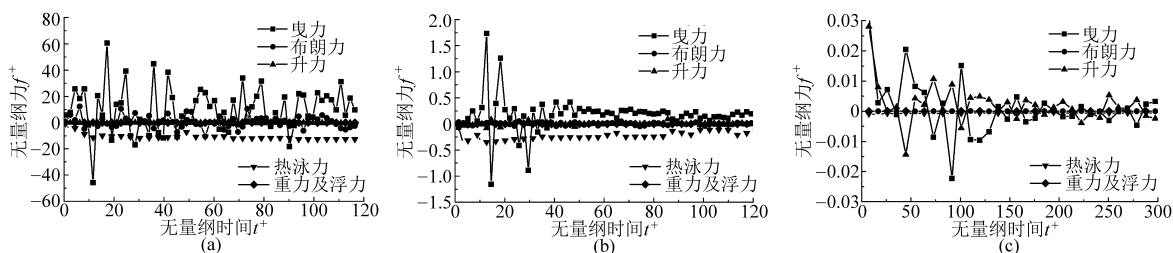


图4 无量纲力随无量纲时间的变化 (释放点  $y^+ = 5$ )

Fig. 4 Variation of dimensionless force with dimensionless time ( $y^+ = 5$ )

(a)  $d_p = 0.1 \mu\text{m}$  (b)  $d_p = 1 \mu\text{m}$  (c)  $d_p = 10 \mu\text{m}$

从图3可看到,曳力和布朗力具有明显的随机性和脉动性。微粒在  $y^+ = 20$  处释放时,对于  $0.1 \mu\text{m}$  微粒来说,曳力和布朗力基本在同一个数量级,而升力(如不特别说明,均用升力代替 Saffman 升力)、热泳力和重力(如不特别说明,均用重力代替重力与浮力的合力)均很小。对于  $1 \mu\text{m}$  微粒来说,曳力仍是主要作用力,但布朗力迅速减小,此时热泳力成为次要作用力;升力和重力仍然很小。对于  $10 \mu\text{m}$  微粒来说,曳力依然是主要作用力,升力已超过布朗力和热泳力成为次要作用力,热泳力和布朗力则可以忽略不计。

计算结果表明,在距壁面一定距离时(缓冲层中),对于亚微米级微粒来说,曳力和布朗力是对微粒运动起决定性作用的力,热泳力作用较小,升力和重力则可以忽略;对于  $1 \mu\text{m}$  左右微粒来说,曳力是对微粒运动起主导作用的力,热泳力作用次之,其他力则较小;对于  $10 \mu\text{m}$  左右微粒来说,曳力仍然是微粒运动最重要作用力,升力和重力对微粒运动具有一定影响,而布朗力和热泳力作用则可以忽略。

对比图3和图4可看到,微粒在距壁面  $y^+ = 5$  处释放时,与在  $y^+ = 20$  处释放时相比,微粒受力情况有很大不同。

对于  $0.1 \mu\text{m}$  微粒来说,在粘性底层中( $y^+ = 5$ ),热泳力明显增大,与曳力和布朗力处在同一个数量级;曳力和布朗力方向随机变化,而热泳力方向

则始终指向壁面;升力和重力可以忽略不计。对于  $1 \mu\text{m}$  微粒来说,曳力和热泳力处在同一个数量级,而布朗力却迅速衰减,几乎与升力处于同一个数量级;此时重力最小。对于  $10 \mu\text{m}$  微粒来说,升力迅速增大到与曳力同一个数量级,而热泳力则迅速减小为第三作用力,此时重力仍然很小。

图5给出的是距壁面  $y^+ = 5$  处释放微粒时,平均无量纲力随无量纲时间的变化。平均无量纲力是指在每一时间步长内对所有微粒的某一无量纲力进行平均。

从图5可以看到,对于亚微米级微粒来说,平均无量纲曳力的方向主要远离壁面,意味着平均曳力使微粒向通道中心运动;而平均无量纲热泳力的方向始终朝向壁面,热泳力促使微粒向壁面沉降;布朗力方向变化较为均匀,因此平均无量纲布朗力相对较小;平均无量纲升力和平均无量纲重力可以忽略。对于  $1 \mu\text{m}$  微粒来说,受力情况与  $0.1 \mu\text{m}$  微粒大致相同,只是平均布朗力更小。对于  $10 \mu\text{m}$  微粒来说,平均无量纲曳力的方向呈现出一定的随机性;平均无量纲热泳力和平均无量纲布朗力迅速减小;平均无量纲升力成为仅次于平均无量纲曳力的作用力,方向主要指向壁面。

## 2.2 热泳力与重力的比较

分析表明,热泳力对微粒沉降运动具有重要作用。与曳力、布朗力、Saffman 升力的方向存在随机

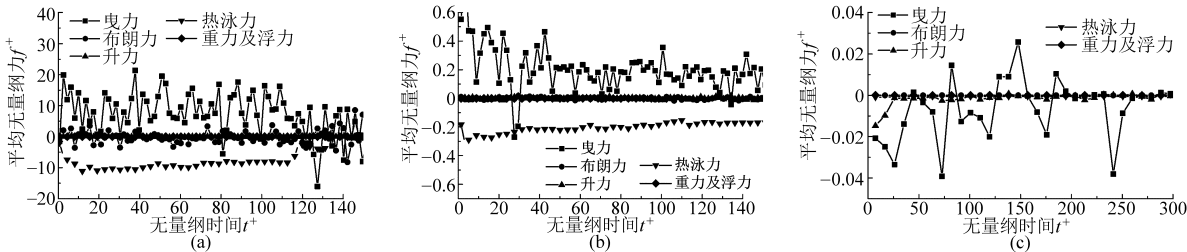


图 5 平均无量纲力随无量纲时间的变化

Fig. 5 Variation of average dimensionless force with dimensionless time

(a)  $d_p = 0.1 \mu\text{m}$  (b)  $d_p = 1 \mu\text{m}$  (c)  $d_p = 10 \mu\text{m}$

性不同,热泳力和重力的方向始终指向壁面。这里着重对热泳力和重力进行比较。

图 6 给出的是 3 种不同温度梯度下,热泳力与重力以及单位质量热泳力与重力的比较。

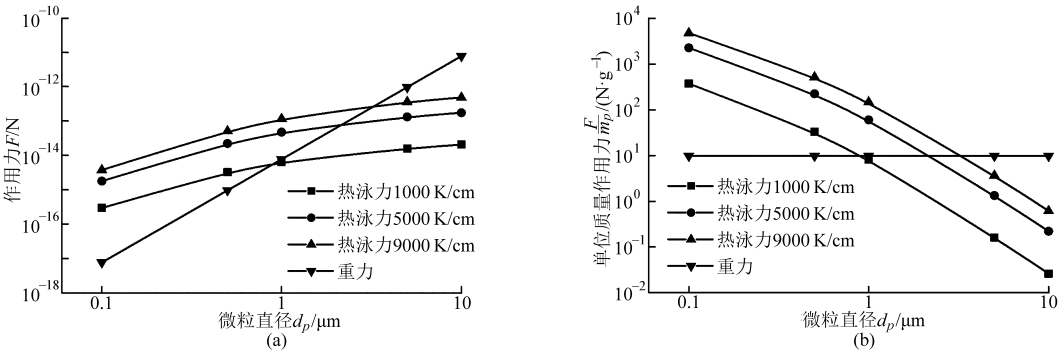


图 6 热泳力与重力的比较

Fig. 6 Comparison of thermophoresis force with gravity force

(a) 热泳力与重力 (b) 单位质量热泳力与重力

从图 6 可看到,尽管随着直径增加,热泳力及重力均增大,但重力增大幅度明显高于热泳力。存在一直径;小于该直径时,热泳力大于重力,热泳力对微粒沉降作用大于重力;随着温度梯度增加,该直径增大。单位质量热泳力与单位质量重力之间也存在类似关系。

3 微粒沉降特性及影响因素

从微粒沉降的研究来看,沉降速度可以更加直接地体现微粒的沉降特性。影响微粒沉降速度的因素很多,微粒受力、通道入口条件、通道几何参数、微粒直径等都会对微粒的沉降速度产生影响。

3.1 微粒受力对微粒沉降速度的影响

湍流通道中,微粒向壁面的沉降运动主要取决于微粒的受力。

图 7 给出的是有无重力作用时微粒沉降速度随微粒直径变化的比较。从图中可以看到,重力对沉降速度的影响与微粒直径存在一定关系;只有在粒径较大时(超过  $1 \mu\text{m}$ ),重力对微粒沉降速度才会有相对明显的影响。

图 8 给出的是有无 Saffman 升力作用时微粒沉降速度随微粒直径变化的比较。从图中可以看到,升力的存在有利于微粒沉降。随着微粒直径

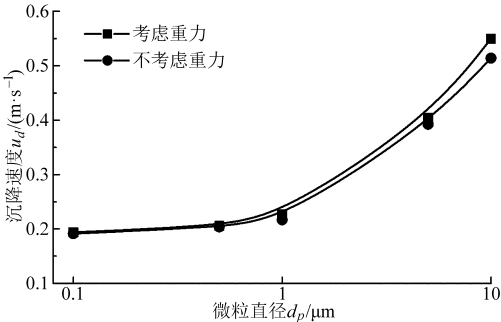


图 7 有无重力作用时微粒沉降速度的比较

Fig. 7 Comparison of deposition velocity with or without effect of gravity force

增加,微粒跟随性变差,近壁处的微粒速度大于流体质点速度,升力方向指向壁面,微粒沉降速度增大。与重力对沉降速度的影响类似,升力对沉降速度的影响随粒径增加而增大,且只有在粒径超过  $1 \mu\text{m}$  后,升力对微粒沉降速度才会有相对明显的影响。

图 9 给出的是有无热泳力作用时微粒沉降速度随微粒直径变化的比较。从图中可以看到,热泳力对微粒沉降速度的影响主要体现在亚微米级微粒和微米级微粒范畴,对亚微米级微粒沉降速度的影响尤为显著。粒径超过  $1 \mu\text{m}$  后,热泳力对微粒沉降速度的影响会迅速减弱。

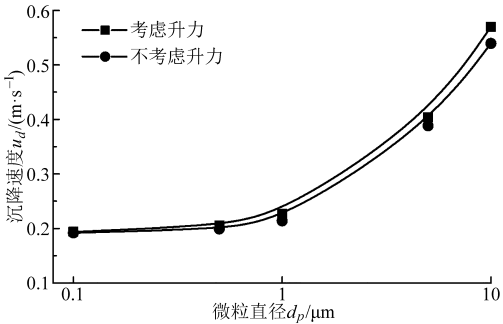


图 8 有无升力作用时微粒沉降速度的比较  
Fig. 8 Comparison of deposition velocity with or without effect of lift force

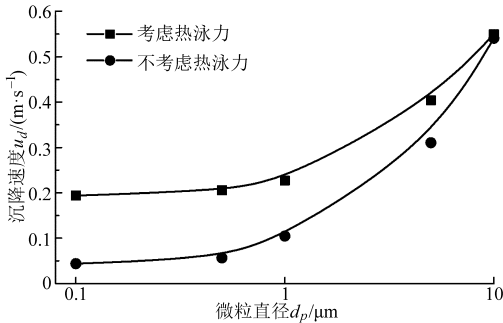


图 9 有无热泳力作用时微粒沉降速度的比较  
Fig. 9 Comparison of deposition velocity with or without effect of thermophoresis force

3.2 流场参数对微粒沉降速度的影响

通道入口速度决定了流场结构及微粒在通道中的滞留时间,通道入口温度则会对流场温度梯度产生影响。

图 10 给出的是不同直径微粒沉降速度随通道入口速度的变化。从图中可以看到,微粒沉降速度随通道入口速度的增加而增大;微粒直径越大,沉降速度受入口速度影响相对越大。

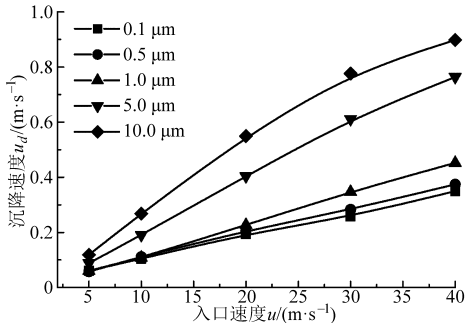


图 10 入口速度对微粒沉降速度的影响

Fig. 10 Effect of inlet velocity on deposition velocity

图 11 给出的是不同入口速度时微粒无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化。无量纲松弛时间大,意味着微粒速度与流体速度趋于平衡的时间长。从图中可以看到,微粒沉降速度大部分位于过渡区和惯性区。对于无量纲松弛时间较小的微粒来说,入口速度对无量纲沉降速度影响不大,且无量纲沉

降速度随无量纲松弛时间的增长较为缓慢。无量纲松弛时间超过一定值后,无量纲沉降速度会迅速提高;入口速度越高,发生无量纲沉降速度迅速升高的无量纲松弛时间相对越长。

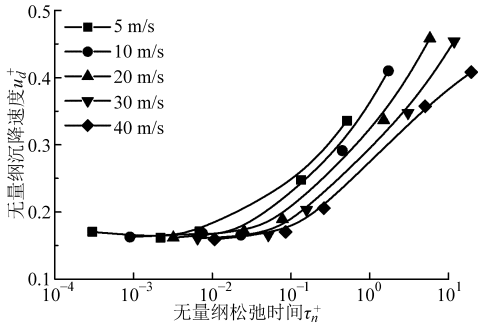


图 11 不同入口速度时无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化

Fig. 11 Variation of dimensionless deposition velocity with dimensionless relaxation time under different inlet velocities

图 12 给出的是不同直径微粒沉降速度随通道入口温度的变化。从图中可以看到,微粒沉降速度随入口温度增加而增大;但入口温度超过 700 K 后影响变缓。相比较,1 μm 以下小微粒沉降速度受入口温度影响略大。

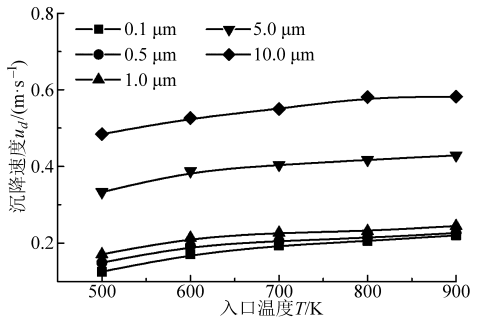


图 12 入口温度对微粒沉降速度的影响

Fig. 12 Effect of inlet temperature on deposition velocity

图 13 给出的是不同入口温度时微粒无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化。从图中可以看到,无量纲沉降速度随入口温度增加而增大;入口温

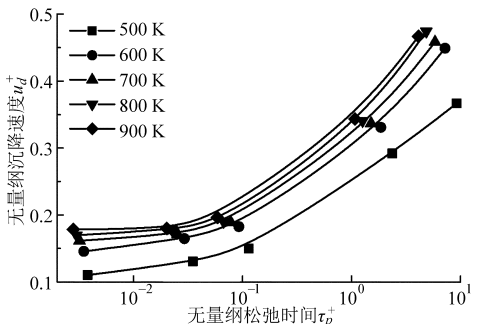


图 13 不同入口温度时无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化

Fig. 13 Variation of dimensionless deposition velocity with dimensionless relaxation time under different inlet temperatures

度较低时,无量纲沉降速度受入口温度影响较为明显。无量纲松弛时间较小时,入口温度对无量纲沉降速度影响相对较大;这进一步说明热泳力对小直径微粒影响相对较大。

3.3 通道几何参数对微粒沉降速度的影响

通道几何参数往往会影响到流场的结构特征,进而对微粒的沉降速度产生影响。

图 14 和图 15 分别给出的是不同直径微粒沉降速度随通道宽度的变化以及不同通道宽度时无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化。

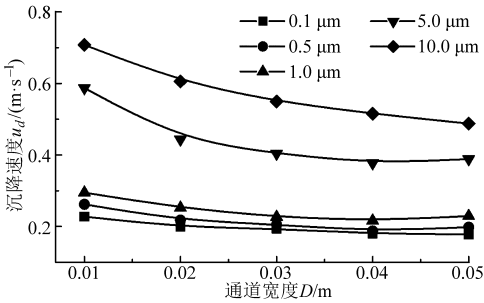


图 14 通道宽度对微粒沉降速度的影响  
Fig. 14 Effect of channel width on deposition velocity

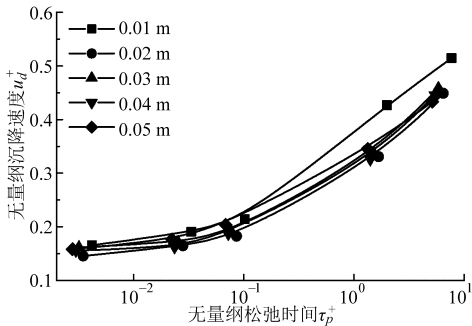


图 15 不同通道宽度时无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化  
Fig. 15 Variation of dimensionless deposition velocity with dimensionless relaxation time under different channel widths

从图 14 可以看到,微粒沉降速度随通道宽度增加而下降;通道宽度对  $1\text{ }\mu\text{m}$  以上较大微粒沉降速度的影响相对较大;随着通道宽度增加,通道宽度对沉降速度的影响逐渐减小,这一点对  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下小微粒来说尤为明显。

从图 15 可以看到,通道宽度对无量纲沉降速度随无量纲松弛时间变化的影响比较复杂,但总体上看影响不是很大。对于无量纲松弛时间较大微粒来说,通道宽度超过  $0.02\text{ m}$  后,无量纲沉降速度几乎不再受通道宽度的影响。

图 16 和图 17 分别给出的是不同直径微粒沉降速度随通道长度以及不同通道长度时微粒无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化。

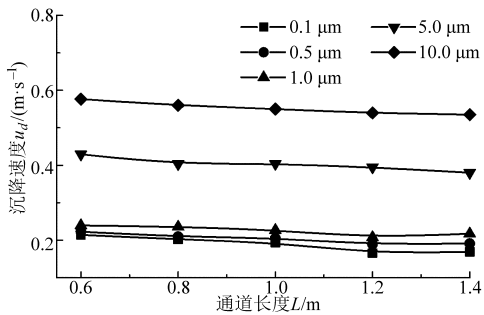


图 16 通道长度对微粒沉降速度的影响  
Fig. 16 Effect of channel length on deposition velocity

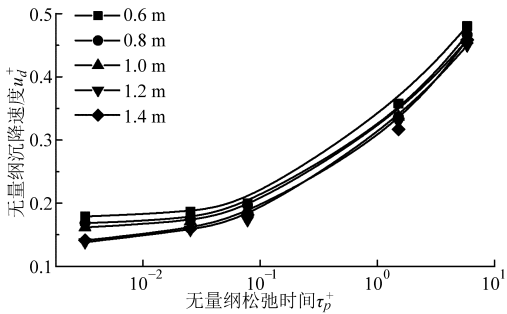


图 17 不同通道长度时无量纲沉降速度随无量纲松弛时间的变化  
Fig. 17 Variation of dimensionless deposition velocity with dimensionless relaxation time under different channel lengths

度略有减小,但总体来说变化不大。从图 17 可以看到,对于无量纲松弛时间较小微粒来说,通道长度对无量纲沉降速度影响相对较大;随着无量纲松弛时间增加,影响逐渐减小。

4 结论

(1) 对亚微米级微粒来说,在缓冲层中,曳力和布朗力对微粒运动起决定性作用;热泳力相对较小,升力和重力可以忽略。在粘性底层中,热泳力与曳力和布朗力处在同一数量级,升力和重力同样可以忽略。平均无量纲曳力方向主要远离壁面,平均无量纲热泳力方向始终朝向壁面。

(2) 热泳力随粒径增加而增大,单位质量热泳力随粒径增加而减小。重力随粒径增加而增大的幅度明显高于热泳力;小于某一粒径时,热泳力对微粒沉降的作用大于重力。

(3) 重力和升力对微粒沉降速度影响随粒径增加而增大,且只有在粒径超过  $1\text{ }\mu\text{m}$  后,对沉降速度才会有较明显影响;热泳力对沉降速度影响主要体现在亚微米级范畴;粒径超过  $1\text{ }\mu\text{m}$  后,热泳力对沉降速度影响会迅速减弱。

(4) 微粒沉降速度随通道入口速度增加而增大;较大微粒沉降速度受入口速度影响相对较大。入口速度对无量纲松弛时间较小微粒的无量纲沉降速度影响不大。沉降速度随通道入口温度增加而增

大;但入口温度超过 700 K 后,影响变缓;小微粒沉降速度受入口温度影响相对较大。无量纲沉降速度随入口温度增加而增大;入口温度较低时,无量纲沉降速度受入口温度影响较明显;入口温度对无量纲松弛时间较小微粒的无量纲沉降速度影响相对较大。

(5) 微粒沉降速度随通道宽度增加而下降;通

道宽度对沉降速度影响随通道宽度增加而减小。通道宽度对无量纲沉降速度随无量纲松弛时间变化的影响不大;通道宽度超过一定值后,无量纲松弛时间较大微粒的无量纲沉降速度几乎不再受通道宽度影响。沉降速度随通道长度增加略有减小。通道长度只是对无量纲松弛时间较小微粒的无量纲沉降速度影响相对较大。

## 参 考 文 献

- 1 Vicente Bermúdez, José Manuel Lujan, Pdero Piqueras, et al. Pollutants emission and particle behavior in a pre-turbo aftertreatment light-duty diesel engine[J]. *Energy*, 2014, 66: 509 – 522.
- 2 方显忠, 李国良, 阎淑芳, 等. 进气和压缩气反吹缸内燃烧再生的柴油机微粒过滤器[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 22 – 27.  
Fang Xianzhong, Li Guoliang, Yan Shufang, et al. Bag-type DPF regenerated by intake flow and high-pressure air reverse blow and in-cylinder combustion of particulate[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 22 – 27. (in Chinese)
- 3 Guo Xuesong, Tomoki Nakayama, Hiroyuki Yamada, et al. Measurement of the light absorbing properties of diesel exhaust particles using a three-wavelength photoacoustic spectrometer[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 428 – 437.
- 4 Tan Piquang, Ruan Shuaishuai, Hu Zhiyuan, et al. Particle number emission from a light-duty diesel engine with biodiesel fuels under transient-state operating conditions[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 22 – 31.
- 5 邢世凯, 仲蕾, 马朝臣. 柴油机低温放电处理的微粒热重特性[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 16 – 20.  
Xing Shikai, Zhong Lei, Ma Chaochen. Thermo-gravimetric properties of diesel particulate matter treated by non-thermal electro-discharge[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 16 – 20. (in Chinese)
- 6 Wang Y J, Yang Bo, Lipsky E M, et al. Analyses of turbulent flow fields and aerosol dynamics of diesel engine exhaust inside two dilution sampling tunnels using the CTAG model[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(2): 889 – 898.
- 7 Lee J, Sung N W, Huh K Y. Prediction of soot particle size distribution for turbulent reacting flow in a diesel engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2011, 12(2): 181 – 189.
- 8 Van Gulijk C, Heiszwoolf J J, Makkee M, et al. Selection and development of a reactor for diesel particulate filtration[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4): 1705 – 1712.
- 9 Warey A, Balestrino S, Szymkowiec P, et al. A one-dimensional model for particulate deposition and hydrocarbon condensation in exhaust gas recirculation coolers[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2012, 46(2): 198 – 213.
- 10 Maricq M, Matti S J, Loos M, et al. Motor vehicle PM emissions measurement at LEV III levels[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(1): 597 – 609.
- 11 Chen Qian, Goodarz Ahmadi. Deposition of particles in a turbulence pipe flow[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(5): 789 – 796.
- 12 Zhang H, Ahmadi G. Particle transport and deposition in vertical and horizontal duct flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 406: 55 – 80.
- 13 Thakurta D G, Chen M, McLaughlin J B, et al. Thermophoretic deposition of small particles in a direct numerical simulation of turbulent channel flow[J]. *Hear and Mass Transfer*, 1998, 41(24): 4167 – 4182.
- 14 Cristian Marchioli, Andrea Giusti, Maria Vittoria Salvetti, et al. Direct numerical simulation of particle wall transfer and deposition in upward turbulent pipe flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29: 1017 – 1038.
- 15 Dehbi A. A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary layer flows[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(3): 707 – 715.
- 16 Dehbi A. A stochastic Langevin model of turbulent particle dispersion in the presence of thermophoresis[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(3): 219 – 226.
- 17 Dehbi A. Turbulent particle dispersion in arbitrary wall-bounded geometries: a coupled CFD-Langevin-equation based approach[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(9): 819 – 828.
- 18 Hryb D, Cardozo M, Ferro S, et al. Particle transport in turbulent flow using both Lagrangian and Eulerian formulations[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(5): 451 – 457.
- 19 Arai M, Amagai K, Nakaji T, et al. Primary and aggregate size distributions of PM in tail pipe emissions from diesel engines[J]. *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 2006, 48(4): 639 – 647.
- 20 Lin Tian, Goodarz Ahmadi. Particle deposition in turbulent duct flows-comparisons of different model predictions[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38: 377 – 397.



## Improved Test Bench of Energy Storage System in Electric Vehicle

Li Yong<sup>1</sup>   Ma Fei<sup>1</sup>   Kazerani Mehrdad<sup>2</sup>   Gu Qing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada)

**Abstract:** The safety and reliability of electric vehicle depend on the performance of vehicular energy storage system. The test bench composed by DC motor and flywheel was proposed to test the performance of energy storage system. This paper mainly focuses on an improved test bench. The tracking precision of speed control system was affected by the improved test bench. The model and current problems of the test bench were presented. The structure improvement method of the test bench was improved according to the theory of multi-shaft transmission system. The improved test bench was modeled by using state-space equation method. The efficiency and ratio control of continuously variable transmission ( CVT ) were analyzed. The dSPACE-based hardware-in-the loop ( HIL ) test bench was built and improved in the lab. Experimental results showed that the tracking precision of speed control system was improved with new test bench. It provides technology support for the performance testing of hybrid energy storage system.

**Key words:** Electric vehicle   Vehicular energy storage system   CVT   Structure improvement   HIL test bench

( 上接第 8 页 )

## Forces and Deposition Characteristics of Particles in Turbulent Flow Channel

Ning Zhi   Bai Zhenxiao   Sun Chunhua   Fu Juan

( College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China )

**Abstract:** The movement and deposition of the diesel particles have important effect on the particle sampling measurement, the operation of the exhaust gas recirculation system and the trapping of the particles. The forces imposed on the emission particles of diesel engine and the deposition characteristics of the emission particles of diesel engine in the turbulent flow channel were investigated under different conditions by using the force modes and the particle random trajectory mode established. The results showed that the Stokes drag force, Brownian force, Saffman lift force, thermophoresis force, gravitation force, and buoyancy force imposed on the emission particles had strong relations with the dimension of the particles and the distance of the particles far from the wall. The main driving forces for the depositing of the emission particles were different under different conditions. The forces, the flow inlet velocity and temperature and the channel dimensions affected the deposition of the emission particles in the turbulent flow channel.

**Key words:** Diesel engine   Turbulent flow channel   Particle   Force   Deposition