

低真空管路中颗粒传输特性研究

党伟 王旭迪 张俊 毕海林 吴俊*
(合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

Particle Transport Characteristics in Low Vacuum Pipeline

DANG Wei, WANG Xudi, ZHANG Jun, BI Hailin, WU Jun*
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract The requirements of vacuum systems, such as semiconductor lithography and electric vacuum devices, are not only limited to vacuum degree, but also put forward higher requirements for cleanliness. The research shows that some components of the vacuum system will produce particle contaminations, which can pollute the vacuum environment under certain conditions. Therefore, it is necessary to study the transport law and distribution of the particulate matter in a vacuum pipeline and provide the theoretical basis for the particle contamination protection method. In this paper, the transport law of particle contamination under different gas flow patterns was simulated via the COMSOL software. In the simulation, the forces applied to the particle contaminations mainly include gravity, drag force and lift force. The effects of pressure, pumping speed and particle diameter on the gas flow and particle transport characteristics were studied. The results show that the drag force of gas flow on particles is dominant in the transport characteristics of particles under different conditions. When the pressure and particle diameter are constant, the increase in pumping speed enhances the probability of particle deposition at the pipeline outlet or even direct particle transport to the outlet through the gas flow. When the pressure and pumping rate are constant, the smaller the particle diameter is, the easier it is to reach the outlet with the gas flow. When the particle diameter and pumping speed are constant, the particle transport trajectory changes correspondingly with the variation of pressure.

Keywords Gas-solid two-phase flow, Vacuum environment, Particle transport law, Pipeline flow

摘要 半导体光刻技术、电真空器件等领域对真空环境的要求已不仅局限于真空度,对洁净度也有了更高的要求。研究表明真空系统中某些运动部件在一定条件下会产生细小的颗粒,污染真空环境。因此需要对固体颗粒污染在真空管道中的传输规律和落点分布进行研究,从而为真空环境颗粒污染防治提供理论依据。文章通过模拟软件 COMSOL,对固体颗粒在不同气体流态下的传输特性进行了研究。在仿真中颗粒的受力主要考虑自身重力、气流曳力、气流升力的作用。研究了不同压力、抽速、颗粒直径条件下气流对颗粒传输特性的影响。结果表明:在不同环境条件下,气流对颗粒的曳力作用对颗粒运动特性的影响占主导地位。管道抽气过程中,当压力与颗粒直径恒定时,抽速越大,颗粒越容易落在管道出口处甚至直接随气流穿过出口;当压力和抽速恒定时,颗粒直径越小,越容易随气流到达出口;当颗粒直径和抽速恒定时,随着压力的变化,颗粒传输轨迹也相应的变化。

关键词 气固两相流 真空环境 颗粒传输规律 管道流动

中图分类号: TB79

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202302008

近年来,随着半导体制造、微电子和国防工业领域的发展,真空装置在镀膜、刻蚀和超精密传感等领域的应用范围日益扩大^[1]。大多数光学系统,

例如光刻机、先进激光干涉仪引力波天文台等,不仅对真空度有要求,同时对真空环境的洁净程度也有着严苛的要求^[2,3]。真空系统中使用的各种材料

在一定条件下会产生细小的颗粒,污染真空环境,如存在压强差、强光照射、脉冲电压等都有可能使污染物颗粒从材料表面脱附,并在真空系统中扩散,最终吸附到真空室或光学元件等表面,从而造成污染。在大科学装置领域,颗粒污染会导致电子束寿命下降^[4,5];在半导体制造领域,干法刻蚀、等离子体增强化学气相沉积的薄膜沉积、硅片转移等过程中,颗粒污染会影响半导体器件的工作性能、可靠性和良品率^[6-8];在真空镀膜领域,电弧离子镀的电弧作用于靶材表面会产生熔融颗粒,沉积在薄膜表面,严重影响薄膜力学和光学性能^[9]。所以,需要研究颗粒污染物在真空环境下的传输规律,从而有针对性地提出颗粒防护方法,提高真空系统的洁净度,以有效减少关键器件的污染,增强元件可靠性。这对真空系统洁净度要求较高的研究及应用具有十分重要的价值^[10]。真空系统中的颗粒污染物难以控制,也会导致一些其他问题^[5,11]。因此了解颗粒污染物在真空系统中的传输规律是减少污染的关键。

本文通过 COMSOL 多物理场软件,考虑了压力、抽气速度和粒径等工况参数对颗粒传输特性的影响,进而对真空管道中的颗粒传输规律进行了模拟仿真研究。通过模拟得出颗粒在真空管道抽气过程中的传输规律,有效降低了关键器件的污染,这对真空系统洁净度高要求的研究和应用具有重要的参考价值。

1 模型与方法

本文针对圆柱形管道中颗粒运动特性进行研究,该管道的尺寸为长度 2000 mm、直径 150 mm。建立了管道内气体和颗粒的流体-颗粒耦合模型,通过求解流体和颗粒的运动方程,得到颗粒在管道内的运动轨迹和速度分布等相关信息。

1.1 流态划分及颗粒运动受力分析

随着压力逐渐降低,其内部气体可压缩性及稀薄作用将不可忽略;气体流动的连续性假设将不再成立,通常引入克努曾数(Kn)判断气体是否适用连续性假设条件^[12]:

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

式中, D 为流动特征尺寸, λ 为气体分子平均自由程。根据 Kn 值大小可将气体流动划分为四个流态^[13]:连续流($Kn < 10^{-3}$)、滑移流($10^{-3} < Kn < 10^{-1}$)、过渡流

($10^{-1} < Kn < 10^1$)以及自由分子流($Kn > 10$)。通过式(1)计算可得本文研究的气固两相流态在连续流、滑移流范围内。

在不同低压力下研究微米级别颗粒传输特性时,准确描述颗粒受力至关重要,图1是颗粒在流场中的受力示意图。大多数模拟中的颗粒运动都是通过Maxey^[14]公式的基础上进行相应简化来计算。

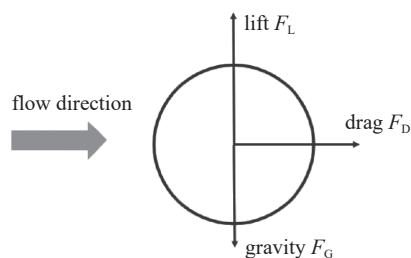


图1 颗粒受力示意图

Fig. 1 Particle force diagram

在研究流场中颗粒的运动时,学者通常采用静态力平衡模型。常常从静态力平衡模型角度入手。Wang^[15]和Nasr^[16]仅考虑了颗粒所受的曳力和升力来研究颗粒的基本运动规律和传输特性。在低速气流下颗粒的运动研究中,Dorgan和Loth^[17]仅考虑了颗粒的曳力和重力。针对颗粒在气流中的运动和沉降,Li^[18]和Yamamoto^[19]都考虑了颗粒所受的曳力、升力和重力。在此基础上,Lain^[20]考虑了曳力、重力、剪切升力和旋转升力,而Pan和Banerjee^[21]则考虑了拖曳力、压力梯度力和重力。针对颗粒在周期性脉动的气流中所受到的各种力的大小,岑可法在《工程气固多相流动的理论及计算》一书中做了比较,如表1所示。

表1 各种作用力的数量级

Tab. 1 The order of magnitude of various forces

粒径	名称		
	1 μm	10 μm	100 μm
曳力	0.59×10^{-12}	0.15×10^{-9}	0.8×10^{-7}
重力	0.77×10^{-14}	0.77×10^{-11}	0.77×10^{-8}
Saffman 升力	0.26×10^{-15}	0.28×10^{-12}	0.33×10^{-9}
附加质量力	0.53×10^{-16}	0.64×10^{-13}	0.72×10^{-10}
Basset 力	0.58×10^{-12}	0.62×10^{-10}	0.76×10^{-8}

一般来说,在流体速度小于 1 m/s 的情况时^[22],Basset 力相对于其他力的影响可以忽略不计,本文中流体速度远小于 1 m/s,因此忽略 Basset 力对颗粒

的作用。附加质量力在真空环境下比前三种力小的多,所以在本模拟中也忽略不计。也有不少研究者通过 RNR 模型研究真空容器中的颗粒传输特性。如 Yu 等^[23]在计算流动诱导力时,考虑了颗粒在表面上的流动滑移来判断稀薄气体粘性流中微颗粒的再悬浮率。RNR 模型主要用于研究固体壁面与颗粒之间的相互作用。本文主要研究宏观气流对颗粒的运动轨迹影响,对于目前研究暂时先不考虑颗粒与壁面的相互作用,假设颗粒从管道上壁无速度释放。相较于后者研究模型很少有学者在真空环境下通过静态力平衡模型进行研究,静态力平衡模型主要集中于湍流情况下的颗粒运动研究;因此本文通过静态力平衡模型研究真空管道中颗粒传输特性。基于此模型与方法,将 N-S 方程与颗粒运动方程相结合,对气固两相流流动进行模拟。本文中研究颗粒数目相对较少,因此可忽略颗粒间碰撞引起颗粒运动的改变,颗粒与壁面的壁条件为:漫散射,一次粒子条件概率为 0.9^[18]。同时由于颗粒所占总体积较小(小于 0.1%),因此模拟计算过程中可忽略微颗粒对流场作用,仅考虑气相流场对微颗粒的影响。

综上所述,计算颗粒的位置和速度的微分方程,首先假设颗粒是质量分布均匀的球形且为点质量,然后利用基于点源模型的欧拉-拉格朗日数值模拟研究气固两相流:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (2)$$

$$m_p \cdot \frac{du_p}{dt} = \sum F_i \quad (3)$$

式中, x_p 是颗粒的位置矢量; u_p 是颗粒的速度; m_p 是颗粒的质量; $\sum F_i$ 是颗粒所受相关力的总和。

本文模拟负压下气体中颗粒运动特性,只需要考虑对颗粒运动影响明显的力,忽略对颗粒作用比较小的力;颗粒受力(如图 1 所示)主要考虑流场对颗粒的曳力、升力以及在颗粒自身所受的重力,而相对于前三种力较小的压力梯度力、Basset 力和虚拟质量力等忽略。经分析颗粒在气流中的受力有:

$$\sum F_i = F_D + F_L + F_G \quad (4)$$

(1) 气固两相流中颗粒相对于气流主要的作用力—曳力^[24]:

$$F_D = \frac{3\mu_f C_D R_{ep}}{4\rho_p d_p^2} m_p (u_f - u_p) \quad (5)$$

式中, u_f 为气体速度; u_p 为颗粒速度; μ_f 为气体动力黏

度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; m_p 为颗粒质量; C_D 为气体对颗粒的曳力系数,具体表达式如下:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{R_{ep}} & R_{ep} < 1 \\ \frac{24}{R_{ep}} (1 + 0.15 R_{ep}^{0.687}) & 1 \leq R_{ep} \leq 1000 \\ 0.44 & R_{ep} > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

R_{ep} 是根据颗粒和气体的相对速度计算的颗粒雷诺数

$$R_{ep} = \frac{\rho_f |u_f - u_p| d}{\mu_f} \quad (7)$$

(2) 依赖于气体、颗粒间相对运动,其方向沿着垂直于运动方向的侧向力—Saffman(萨夫曼力):

$$F_L = 6.46 r_p^2 L_v \sqrt{\mu_f \rho_f \frac{|u_f - v_p|}{|L_v|}} \quad (8)$$

$$L_v = (u_f - v_p) \times [\nabla \times (u_f - v_p)] \quad (9)$$

(3) 颗粒在运动中受到重力场的力—重力

$$F_G = m_p g \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \quad (10)$$

1.2 网格及物理模型

三维模型网格数量较多,计算周期长、收敛性差,并且同一平面上三维与二维的计算结果基本相同,故选择二维模型进行模拟,不仅可以简化模型节省计算时间,而且二维更有利于模拟的收敛性。

图 2 给出了本文计算物理模型(二维),分别对管道进行抽气到稳态过程中颗粒从上壁释放在管道中运动特性进行研究,根据文献[25],可知在气体流速小于 3 L/min 或气压小于 100 Pa 的情况下不会产生微尘传送。因此本文的边界条件选取为:管道左边为压力入口;管道右边为速度出口;颗粒的属性选择二氧化硅颗粒,密度 2200 kg/m³。气相流场在欧拉坐标系下采用 N-S 方程进行描述,颗粒运动则采用拉格朗日方法进行跟踪。

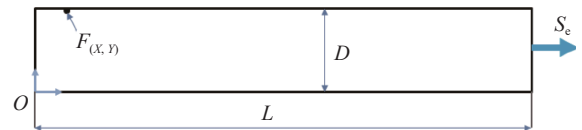


图2 计算物理模型

Fig. 2 Computational physical model

在 COMSOL 软件模拟中计算网格如图 3(a)所示,采用三角形网格,所划分网格质量较好。模型网格通过仿真软件自身三种方式:常规、较细、超细进行划分网格;其中常规方式网格数 28200 个、较

细方式网格数 66180 个、超细方式网格数 156556 个,并选取管道中间纵截面处速度作为网格无关性验证参数。在边界条件压力 1000 Pa、速度 0.015 m/s 时,三种不同方式下管道纵截面处速度如图 3(b) 所示。由图可知,常规网格相较于较细网格、超细网格在管道纵截面处速度误差较大;较细网格与超细网格在管道纵截面处速度相当,网格越细计算时间越长。因此本文网格选择较细方式划分网格。

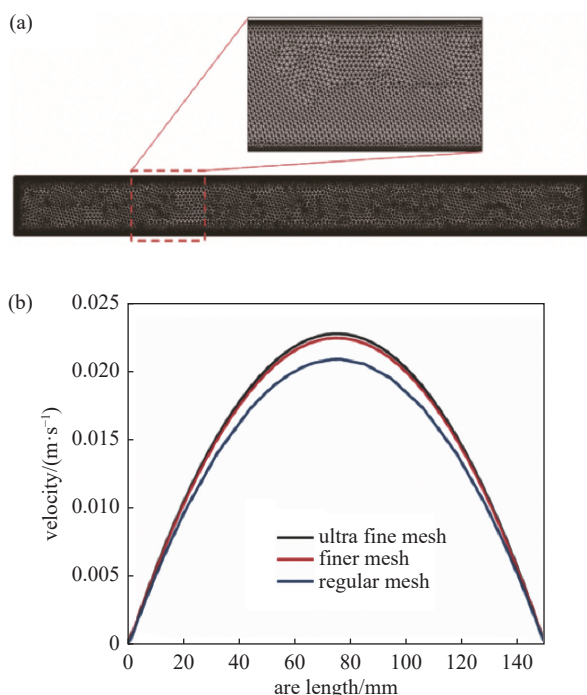


图3 物理模型的网格划分与无关性验证。(a)网格划分方案,(b)网格无关性验证

Fig. 3 Meshing and irrelevance verification of the physical model. (a) Scheme of mesh, (b) Mesh irrelevance verification

2 结果与讨论

颗粒在气流中运动时,颗粒与气相流场间存在动量转换,文献 [26] 通过引入无量纲参数 Stokes 数进行描述颗粒与气体之间的关系。本文通过控制变量法来研究气相流体对颗粒传输特性的影响。管道左端为压力边界条件,颗粒由管道上壁距离左端面 100 mm 处释放,管道右端抽速边界条件换算为二维速度边界条件;并选择速度为 0.001 m/s、0.01 m/s、0.015 m/s、0.02 m/s、0.03 m/s、0.04 m/s,六种不同的速度;颗粒直径:0.5 μm 、1 μm 、3 μm 、5 μm 、7 μm 、10 μm 的颗粒;根据式(1)判断出压力低于 50

Pa 时为滑移流,因此初始压力选择层流流态下:10000、1000、100 Pa;滑移流流态下:10、1、0.5 Pa 压力值。

2.1 抽速影响

首先研究了抽速变化对颗粒运动轨迹的影响,将抽速边界条件等效为速度边界条件;对给定压力、粒径的颗粒,通过计算不同速度下颗粒所受到的电力、升力以及重力研究其传输特性。图 4 给出了压力为 1000 Pa、速度 0.015 m/s、颗粒直径 3 μm 时管道内部气体速度云图分布和压力云图。

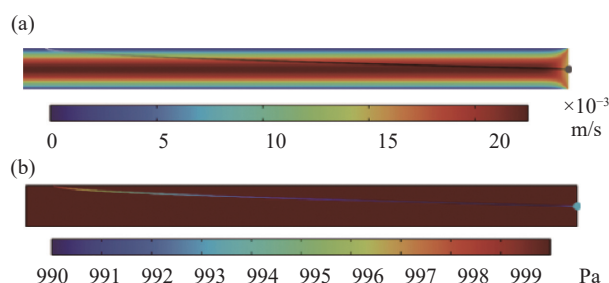


图4 1000 Pa, 0.015 m/s, 3 μm 速度云图 (a), 压力云图 (b)

Fig. 4 1000 Pa, 0.015 m/s, 3 μm velocity cloud image(a), pressure cloud image (b)

从图 4 中可看出,颗粒由初始位置释放后,在电力、升力、重力的作用下向前随气流运动。图 5 为压力在 1000 Pa 下 3 μm 颗粒在不同抽速下传输轨迹,可以发现:颗粒释放后颗粒随气流流向运动,总体趋势是在自身重力作用下缓慢向流速更大,压差较大的方向移动,这种现象在压力越低时越明显。由图 6 可以看出,压力较高时,抽气初始阶段传输轨迹曲线相近,在重力作用下下落趋势明显;压力降

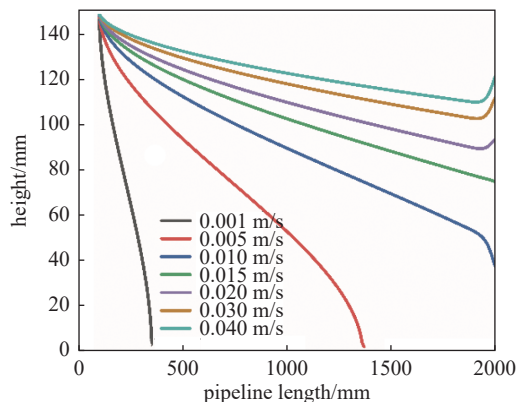


图5 不同抽速下压力 1000 Pa 直径 3 μm 颗粒运动轨迹

Fig. 5 The motion trajectory of particles with a diameter of 3 μm under a pressure of 1000 Pa at different pumping speeds

到滑移流范围后,颗粒自释放传输特性相较于层流不同;在速度较大时这种现象越明显,这主要是压力降低后相同边界条件下曳力系数相比于高压时增加,导致曳力增大;速度低于 0.001 m/s 时 1000 Pa、1 Pa 下 3 μm 的颗粒传输轨迹相差不大,因为曳力系数在速度较低时趋向于恒定值,不受压力和速度的变化而变化。同一抽速,不同压力的同一直径颗粒,垂直降落距离随压力升高而增加,因为压力改变会使颗粒所受升力,曳力以及颗粒自身重力三者比重发生改变,进而改变颗粒在流场中的传输特性。

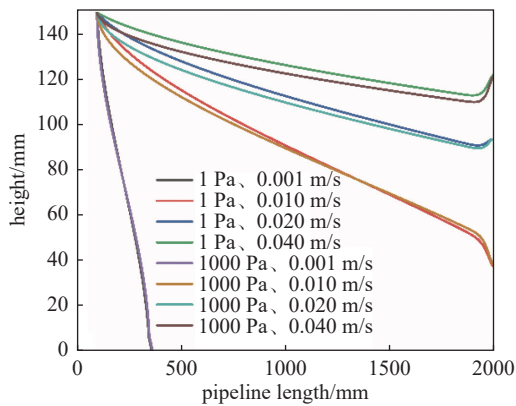


图6 不同抽速下压力 1 Pa/1000 Pa 直径 3 μm 颗粒运动轨迹
Fig. 6 The motion trajectory of particles with a diameter of 3 μm under a pressure of 1 Pa/1000 Pa at different pumping speeds

理论上来说,气体越稀薄重力作用越明显,但是 COMSOL 软件在物理场层流、滑移流中从模拟的结果来看未考虑此种现象,导致结果有一定误差。

本文还模拟了颗粒直径为 0.5、1、5、10 μm 在不同流态下的运动轨迹。表 2 是 3 μm 颗粒在不同流态下的几种相关参数,其他直径颗粒的传输特性与 3 μm 颗粒在相同条件下的特性趋势相同。速度逐渐减小时,在相同抽气时间内同一粒径颗粒垂直方向上位移逐渐增大,抽速的改变是影响颗粒所受曳力和升力的主要因素之一。

表 2 不同速度下参数选取

Tab. 2 Selection of parameters at different speeds

速度 $S/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	颗粒密度 $\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	压力 p/Pa
0.001	2200	10000/1000/100/10/1/0.5
0.01	2200	10000/1000/100/10/1/0.5
0.02	2200	10000/1000/100/10/1/0.5
0.04	2200	10000/1000/100/10/1/0.5

2.2 颗粒直径影响

粒径是一个可以表征颗粒大小的重要参数^[27]。本文选取几种常见的微颗粒直径进行研究。假设颗粒为球形,均匀大小分布,并指定粒子密度和直径,以分布函数值列表形式在固定点零速度释放。

不同粒径颗粒在给定压力和速度条件下传输规律为:细小颗粒的流动性强,大颗粒由于自身重力比重较大,从而与气流的跟随性较差。图 7 是颗粒不同粒径在速度 0.015 m/s、层流 1000 Pa 下的传输特性曲线。从图 7 中可以看出,0.5 μm 和 1 μm 的颗粒传输曲线相差不大,随着粒径增大差距也随之增大。图 8 为不同粒径下压力 1000、1 Pa,速度 0.015 m/s 的传输轨迹。可以看出,粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 后,不同流态下颗粒的落点基本相同,主要原因是粒径增大和重力的影响相较于压力改变所带来的升力

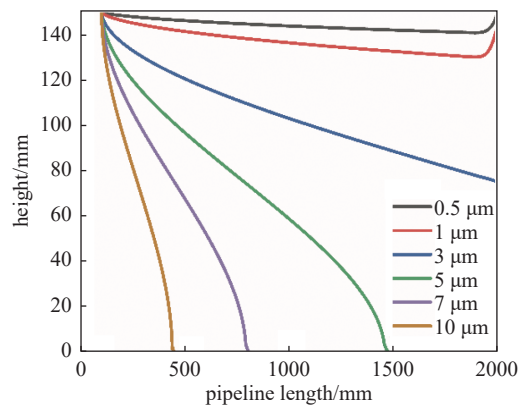


图7 不同粒径压力 1000 Pa、速度 0.015 m/s 传输轨迹
Fig. 7 The transport trajectory of particles with different diameters under a pressure of 1000 Pa and a velocity of 0.015 m/s

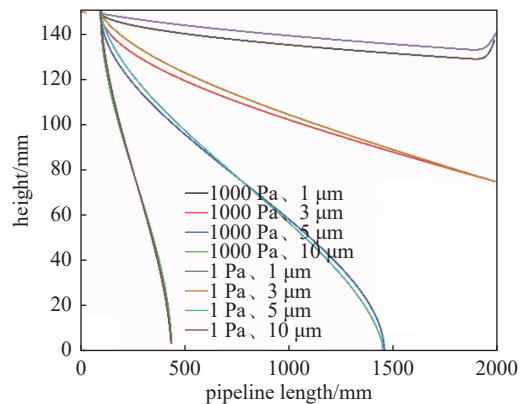


图8 不同粒径压力 1000 Pa/1 Pa、速度 0.015 m/s 传输轨迹
Fig. 8 The transport trajectory of particles with different diameters under a pressure of 1000 Pa/1 Pa and a velocity of 0.015 m/s

和曳力更加明显,从而对于粒径 $\geq 5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒压力改变已不再是影响其传输轨迹的主要因素。对于粒径 $\leq 1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,压力降低垂直方向上的位移也减少;到达出口的时间缩短,随着压力的降低,曳力系数和升力系数会有所增加,小颗粒随气流的跟随较好,容易在气流的横向作用下被抽走。因此压力改变对于小颗粒的传输轨迹影响不能忽略,在跨流态气固两相流研究小颗粒的传输轨迹时应给予足够重视。

表3是在不同粒径下颗粒模拟的相关参数。当抽速减小时,小粒径颗粒会在出口存在向上流动的迹象,这可能与出口处速度分布有关,从而导致颗粒向速度大的方向流动。

表3 不同粒径下参数选取

Tab. 3 Selection of parameters under different diameters

直径 $d/\mu\text{m}$	颗粒密度 $\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	流态	速度 $S/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	2200		
3	2200	层流/	0.001/0.01/0.015
5	2200	滑移流	/0.02/0.03/0.04
10	2200		

2.3 压力的影响

对于不同流态下真空管路中颗粒传输特性,选取层流与滑移流流态下几种不同的压力进行研究。现已研究的颗粒沉降过程中的传输特性均停留在高压、一个大气压环境下的湍流流态下,并未考虑负压环境下的层流、滑移流颗粒传输特性研究。本文基于欧拉坐标系描述气体流场,采用拉格朗日方法追踪颗粒,研究亚微米颗粒在负压下不同流态的气相流场中传输特性规律。

不同压力下颗粒传输特性相比于前面两种影响来说变化较小。图9、10、11分别是颗粒在不同压力下粒径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、速度为 0.01 m/s 、 0.015 m/s 、 0.04 m/s 条件下的传输特性曲线。由图可以看出,在层流流态下,对于同一粒径抽速较低,出口速度低于 0.01 m/s 时,不同压力下的颗粒运动传输轨迹差别很小,这是因为在层流流态不同压力下颗粒所受重力、曳力和升力合力的大小方向基本一致,高压条件下的压力改变不足以改变颗粒合力的大小和方向;滑移流流态下,对于同一粒径相同抽速的颗粒,随着初始压力的逐渐降低,垂直方向上的位移也逐渐减少。这是因为滑移流态下气流相比

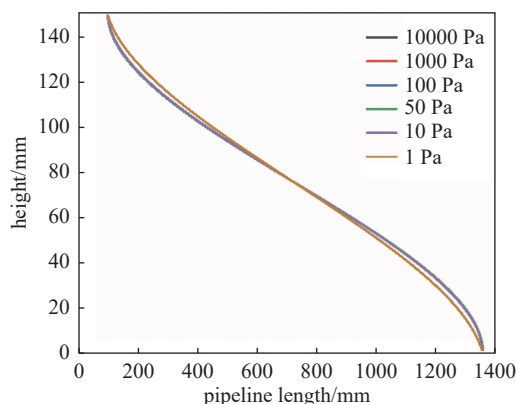


图9 不同压力下粒径 $3\text{ }\mu\text{m}$ 速度 0.01 m/s 颗粒传输轨迹
Fig. 9 The transport trajectory of particles with a diameter of $3\text{ }\mu\text{m}$ and a velocity of 0.01 m/s under different pressures

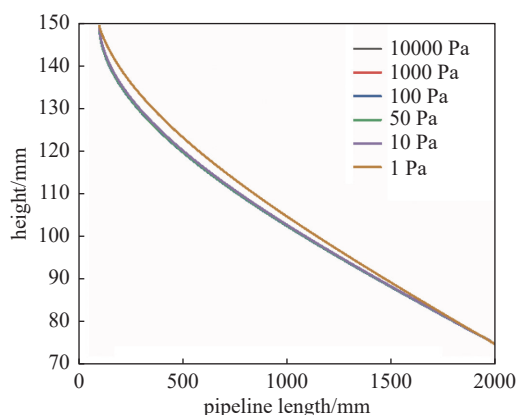


图10 不同压力下粒径 $3\text{ }\mu\text{m}$ 速度 0.015 m/s 颗粒传输轨迹
Fig. 10 The transport trajectory of particles with a diameter of $3\text{ }\mu\text{m}$ and a velocity of 0.015 m/s under different pressures

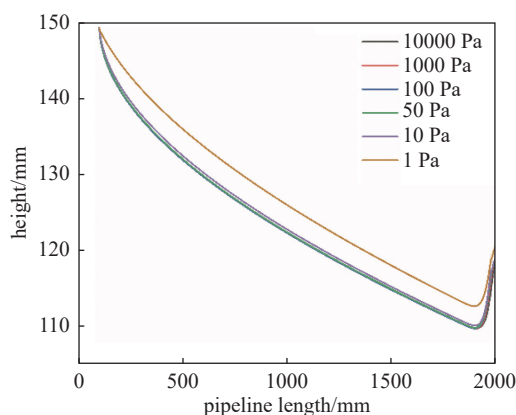


图11 不同压力下粒径 $3\text{ }\mu\text{m}$ 速度 0.04 m/s 颗粒传输轨迹
Fig. 11 The transport trajectory of particles with a diameter of $3\text{ }\mu\text{m}$ and a velocity of 0.04 m/s under different pressures

于层流下更稀薄,随着压力的降低;颗粒雷诺数降低,进而曳力系数、升力系数相应增加,颗粒所受曳

力、升力增大所导致的。图 9 可以看出在不同压力 0.01 m/s 的 3 μm 颗粒在沉降过程中有一个交点, 交点位置基本处于管道中间位置, 交点的上半部分压力越低越靠近管道上壁; 交点的下半部分压力越低越靠近管道下壁, 这是因为交点上下部分颗粒的曳力和升力的方向随着速度梯度的改变而改变的原因。从图 10 可以看出, 随着抽速增大, 这种现象随之右移, 颗粒最终在气体横向作用下运动出管道。

出口边界条件速度越大, 垂直方向上位移量越小。压力大于 100 Pa 时, 即层流流态下传输轨迹几乎相同。

表 4 是层流、滑移流流态下颗粒模拟的相关参数。随着压力的降低; 对于粒径越小、抽速越低的颗粒前面描述的现象越明显。

表 4 不同压力下参数选取

Tab. 4 Selection of parameters under different pressures

压力 p/Pa	颗粒密度 $\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	直径 $d/\mu\text{m}$	速度 $S/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
10000	2200		
1000	2200		
100	2200	0.5/1/3/	0.001/0.01/0.015
10	2200	5/7/10	0.02/0.03/0.04
1	2200		
0.5	2200		

3 结论与展望

本文主要对真空环境下亚微米颗粒传输轨迹进行了模拟, 主要研究了不同粒径、抽速、压强对其运动轨迹的影响, 获得真空环境下固体颗粒污染物运动轨迹的基本规律如下:

(1) 本文研究的边界条件速度和压力会影响颗粒的曳力系数, 从而影响了颗粒的轨迹传输特性;

(2) 真空度对颗粒的运动轨迹产生一定影响, 主要是由于随着真空度的升高, 气体的流动状态发生变化。当气体从层流转变为滑移流时, 气体变得更加稀薄, 颗粒所受的曳力、升力作用力减弱, 导致颗粒下落时间变长;

(3) 抽速越大、气流速度越大, 颗粒所受曳力越大, 颗粒在管道中的传输距离越远;

(4) 颗粒直径越大, 重力作用越明显, 下落越快, 同时传输距离也越近;

(5) 需要注意的是, 仿真中虽然流场仿真部分考虑了气体的稀薄效应, 但根据颗粒受力公式可知,

颗粒所受流场的曳力取决于流场速度, 即认为气体分子的动量能充分传递给固体颗粒, 使其曳力方向速度提升, 从而得出气体压力对颗粒传输轨迹影响不大的结论。然而, 当气体压力较低时, 含有动量的气体分子与固体颗粒之间存在碰撞概率问题, 气体分子的动量并不能充分传递给固体颗粒。因此, 采用目前的气固耦合仿真方法无法很好的预测气体压力对于颗粒传输特性的影响规律。对此, 需要采用蒙特卡洛方法, 考虑气体分子与颗粒的碰撞概率, 进行真空环境下颗粒传输仿真的进一步优化。

本文提出的模拟方法可用于研究洁净真空环境下污染物传输的特性, 对于设计高精度洁净室以及提高真空设备的性能具有重要的参考意义。同时, 通过模拟分析污染物在真空环境中的行为, 可以为实际应用中的污染物防护提供一种新的思路和方法。因此, 本研究成果对于真空技术的发展和具有重要的意义。未来, 可以进一步深入研究和优化该模拟方法, 以更加准确地预测和控制真空环境中的污染物分布, 为相关行业提供更加可靠和高效的真空环境保护方案。

参 考 文 献

- [1] Shimada M, Setyawan H, Hayashi Y, et al. Incorporation of dust particles into a growing film during silicon dioxide deposition from a TEOS/O₂ plasma[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(5): 408–414
- [2] Goshawk E, Terrie C I. Coming clean: understanding and mitigating optical contamination and laser induced damage in advanced LIGO[J]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2014, 9237: 923702
- [3] Chen Z J. Common contamination and cleaning treatment in vacuum equipment[J]. *Electronic Industry Special Equipment*, 2006, 35(6): 61–64 (陈占杰. 真空装置中的常见污染和清洁处理[J]. *电子工业专用设备*, 2006, 35(6): 61–64(in chinese))
- [4] Lei H, Xiao J Q, Lang W C, et al. Application of magnetic field simulation in magnetron sputtering/cathodic arc ion plating[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(02): 27–44 (雷浩, 肖金泉, 郎文昌等. 磁场模拟在磁控溅射/阴极弧离子镀中的应用[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(02): 27–44(in chinese))
- [5] Litnovsky A M, Voitsenya V S, Richler R, et al. Diagnostic mirrors for ITER: research in the frame of the International Tokamak Physics Activity[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(6): 066029

- [6] Kim D, Mum J, Kim H, et al. Development of particle characteristics diagnosis system for nanoparticle analysis in vacuum[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 023304
- [7] Kim D, Kim T, Park S H, et al. Characterization of particle generated during plasma-enhanced chemical vapor deposition on amorphous carbon layer using particle beam mass spectrometer. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2018, 36(2): 021506
- [8] Tachibana K, Michiana M, Takamasa K, et al. Smart optical measurement probe for autonomously detecting Nano-defects on bare semiconductor wafer surface: verification of proposed concept[J]. *Precision Engineering*, 2020, 61: 93–102
- [9] Li F, Wei D, Liang H, et al. Oxidation mechanism of ysz/nicr coating prepared by hollow cathode glow discharge phenomenon and multi-arc ion plating[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30: 2832–2842
- [10] Takahashi K M, Daugherty J E. Current capabilities and limitations of in situ particle monitors in silicon processing equipment[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1996, 14(6): 2983–2993
- [11] Lei M, Li X P. Research progress on control technology of extreme ultraviolet optical surface contamination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 40–46 (雷敏, 李小平. 极紫外光学表面污染控制技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 40–46(in chinese))
- [12] Anshar H, Shams M, et al. Microchannel heat transfer and dispersion of nanoparticles in slip flow regime with constant heat flux[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(10): 1060–1066
- [13] Barron R F, Wang X, Ameer T A, et al. The Gratz problem extended to slip-flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(8): 1817–1823
- [14] Maxey M R, Riley J. Equation of motion for a small rigid sphere in a no uniform flow[J]. *The Physics of Fluids*, 1983, 26(4): 883–889
- [15] Wang Q, Squires K D, Chen M, et al. On the role of the lift force in turbulence simulations of particle deposition [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(4): 749–763
- [16] Nasr H, Ahmadi G, McLoughlin J B. A DNS study of effects of particle–particle collisions and two-way coupling on particle deposition and phasic fluctuations[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 640: 507–536
- [17] Dorgan A J, Loth E. Simulation of particles released near the wall in a turbulent boundary layer[J]. *International journal of multiphase flow*, 2004, 30(6): 649–673
- [18] Li Y, McLaughlin J B, Kontomaris K, et al. Numerical simulation of particle-laden turbulent channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2001, 13(10): 2957–2967
- [19] Yamamoto Y, Potthoff M, Tanaka T, et al. Large-eddy simulation of turbulent gas–particle flow in a vertical channel: effect of considering inter-particle collisions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 442: 303–334
- [20] Lain S. Study of turbulent two-phase gas-solid flow in horizontal channels[J]. 2013. *Indian J Chemo Techno*, 2013, 20(2): 128–136
- [21] Pan Y, Banerjee S. Numerical simulation of particle interactions with wall turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 1996, 8(10): 2733–2755
- [22] Phung T N, Brady J F, Bossis G. Stokesian dynamics simulation of Brownian suspensions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 313: 181–207
- [23] Yu D, Hu F. Application of the “Rock’n’Roll” (RNR) re-suspension model with non-zero slip velocities on particle and substrate surfaces[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2021, 151: 105675
- [24] Greif F, Kratzsch C, Forger T, et al. Assessment of particle-tracking models for dispersed particle-laden flows implemented in Open FOAM and ANSYS FLUENT[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016, 10(1): 30–43
- [25] Zhao Y L, Hu X, Zhang S H. A slow pumping and slow venting device and method for dust-free vacuum process: CN110925180A[P]. 2020 (赵烨梁, 胡晓, 张少辉. 一种用于无尘化真空过程的慢充慢抽装置及法: CN110925180A[P]. 2020.(in chinese))
- [26] Liu Z Y, Zhou J. Numerical simulation of gas-particle two-phase flow under slip velocity condition[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2019, 18(5): 367–372 (刘振宇, 周俊. 速度滑移条件下气体-微颗粒两相流动数值模拟研究[J]. *热科学与技术*, 2019, 18(5): 367–372(in chinese))
- [27] Zhou J H, Fang H Y. Selection of characterization parameters for aggregate particle size detection using image method and experimental study[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(6): 783–790 (周建华, 房怀英. 图像法集料粒径检测表征参数的选择及实验研究[J]. *计量学报*, 2018, 39(6): 783–790(in chinese))