

DOI: 10.7652/xjtuxb201810008

激光光梯度力消除雾霾的实验研究

张德峰¹, 陈晓伟², 王海容², 杜军³, 姜久龙³, 吴九汇¹

(1. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安; 3. 空军工程大学航空航天工程学院, 710038, 西安)

摘要: 利用激光光梯度力破坏雾霾粒子的力平衡体系从而加速雾霾沉降的新机理, 搭建了模拟动态雾霾的实验舱。通过向悬浮的雾霾粒子辐射激光的方式验证了激光消除雾霾的可行性。大气中的雾霾粒子由于受到曳引阻力、范德瓦尔斯斥力、旋转升力等的作用, 处于稳定的网状力平衡状态。激光与雾霾粒子的相互作用过程即为利用激光光梯度力俘获电介质粒子的过程。当激光产生的光梯度力打破雾霾粒子所处的平衡状态时, 激光对雾霾粒子的捕获能力大于大气的悬浮能力, 雾霾粒子便会脱离原有的力平衡体系而坠落。实验数据表明, 功率为 2.6 mW 的氦氖激光器产生的光梯度力足以打破直径分别为 0.3、0.5 和 1.0 μm 的雾霾粒子原有的力平衡体系。激光开启时, 实验舱内粒子浓度急剧衰减, 衰减速率明显高于粒子的自然衰减速率, 成功达到了加速粒子沉降的目的。实验结果还表明, 烟雾粒子粒径越大沉降的效果越明显。这种治理雾霾的新机理对净化大气、消除工厂粉尘以及对人们的健康生活、经济持续发展等具有重要意义。

关键词: 雾霾粒子; 光梯度力; 模拟方法; 实验研究

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)10-0057-07

Experimental Investigation for Eliminating Haze Particles by Laser Gradient Force

ZHANG Defeng¹, CHEN Xiaowei², WANG Hairong², DU Jun³, JIANG Jiulong³, WU Jiuhui¹

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;
3. School of Aerospace, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Following the new mechanism of eliminating haze particles by optical gradient force, a test chamber for simulating dynamic haze is constructed. The feasibility of eliminating haze is verified by a laser beam irradiating suspended haze. The forces including air drag force, van der Waals repulsion force and rotary lift force keep the haze particles staying in a stable force balance status in the atmosphere. The interaction between laser and haze particles explains the process of optical gradient force trapping the dielectric particles. When the optical trapping force breaks the balance status of the haze particles, the haze particles are separated from the original force balance system then fall. The experimental results show that the optical gradient force generated by a 2.6 mW He-Ne laser is sufficient to break the original force balance system of haze particles with diameter of 0.3, 0.5 or 1.0 μm . When laser is once applied, the concentration of haze particles declines rapidly, and the decay rate is much faster than the natural decay rate. Thus, the purpose of eliminating haze particles is successfully achieved. In addition, the close

relationship between the particle size and elimination of haze is also discussed. It is undoubted that the proposed way of eliminating haze particles can effectively purify air and reduce factory dust to exhibit the great significance for both healthy life and sustainable economic development.

Keywords: haze particle; optical gradient force; simulation method; experimental investigation

雾霾天气是一种大气污染状态。雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述,其中霾是由灰尘、硫酸、硝酸、碳氢化合物等非水成物组成的气溶胶系统;雾是近地面的微小水滴或冰晶凝结形成的气溶胶系统。雾霾使大气浑浊、能见度下降并对人体呼吸系统和心血管系统等造成严重危害。此外,雾霾污染已经阻碍了中国吸引外商投资,并对国际旅游业造成冲击,影响远远超过经济利益的损失^[1]。鉴于雾霾治理的紧迫性,国务院总理李克强在 2017 年两会期间表示,如果有科研团队能够把雾霾的形成机理和危害性真正研究透,提出更有效的应对良策,愿意拿出总理预备费给予重奖。

当前,政府在治理雾霾等环境污染方面下定决心,但取得的成效与人们的期待相差甚远。针对雾霾这个难题,一方面,国内外许多专家做了大量研究,Chameides 等研究了气溶胶光学厚度和区域霾污染对水稻和小麦产量的影响^[2],Shakya 等测定了尼泊尔城市居民区总悬浮颗粒物、PM₁₀、PM_{2.5}、黑碳和颗粒物的化学成分^[3],姚青和蔡子颖等^[4]研究了天津冬季雾霾天气下颗粒物质量浓度分布与光学特性,表明雾霾颗粒物的散射作用是造成大气能见度降低的主要原因;另一方面,政府也投入了大量资金及人力来研究雾霾治理。

但是,目前这些治理以及防范雾霾的方法及措施,对减轻雾霾污染的效果微乎其微,并且对雾霾粒子能够长时间悬浮的内在本质一直没有深入研究分析。因此,针对雾霾治理这一大难题,我们课题组基于雾霾粒子悬浮的内在原因,从力学角度对其受力进行了深入分析^[5],率先提出了基于激光光梯度力破坏气溶胶雾霾粒子力平衡体系进而消除雾霾的新机理。

本文基于激光光梯度力消除雾霾的新机理,设计了一个小型雾霾模拟实验装置,构造了现实中的雾霾环境,即常温常压下,空气、雾和霾共存的满足湿度、颗粒物浓度等各项雾霾指标的 3 项体系^[6]。雾霾模拟实验舱能够产生特定温湿度、雾霾浓度和粒径分布与成分的雾霾环境,同时能监测雾霾的参数,并且首次使用激光光梯度力破坏雾霾颗粒的平衡体系,从而使雾霾颗粒沉降的方法进行实验研究。

1 激光消除雾霾机理

雾霾颗粒在大气流中所受力为:曳引阻力、旋转升力、Saffman 升力、Basset 力、范德瓦尔斯斥力、静电力、虚假质量力、重力、浮力等。忽略其他次要力,将雾霾粒子等效为球体,大气流中雾霾粒子的受力以及与激光作用后的沉降过程如图 1 所示。粒子与粒子之间在范德瓦尔斯力的作用下,互相排斥形成了稳定的网状力平衡状态,悬浮微粒难以扩散而被阻滞在低空和近地面,因此消除雾霾的本质就是破坏雾霾粒子的力平衡体系。微粒在激光范围内受到一均匀时变场的作用,在场作用力下,微粒有向光场较强区域移动的倾向,这种场作用力就是指向光轴的梯度力。当激光产生的光梯度力足以打破雾霾粒子的力平衡体系时,粒子便会脱离原有的平衡状态,在光轴处聚合坠落。

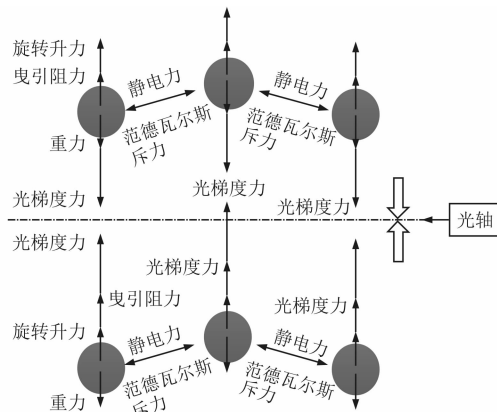
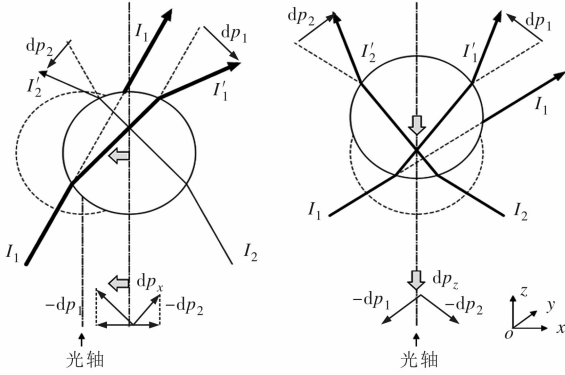


图 1 激光作用下雾霾粒子的受力情况

1.1 光梯度力对雾霾粒子捕获能力分析

1970 年, Ashkin 等人在美国贝尔实验室发现了微米级聚苯乙烯粒子在光梯度力的作用下被拉入光轴^[7],从此开创了光镊领域的研究^[8-9],光镊不仅可以俘获小至 5 nm^[10-11]的物体,还可以施加超过 100 pN^[12-13]的力。假设雾霾粒子的折射率 n_1 大于周围介质的折射率 n_2 ,当光子与微粒相互作用时,光子的部分动量将转移到雾霾粒子上,这种动量转移^[14-15]正是产生光梯度力的机理^[16]。对光学捕获的恰当物理描述:依赖于被捕获粒子的尺寸 d 相对于捕获光的波长 λ ,一般来讲,当 $d \gg \lambda$ 时应用射线

光学理论,当 $d \ll \lambda$ 时应用瑞丽散射理论。由于雾霾粒子的尺寸与激光波长相当,因此较为正确的描述应介于这两种理论之间。为了能够进一步对雾霾粒子的光学捕获原理进行一个定性的理解,可以应用射线光学理论,更加直观地解释光梯度力。



(a) 高斯激光束横向梯度力 (b) 高斯激光束纵向梯度力

图 2 射线理论中光学捕获粒子的梯度力

应用射线光学理论,可从两种介质折射率不同的角度来理解捕获力,图 2 定性地说明了横向梯度力和纵向梯度力的产生原因。横向梯度力可解释如下:当光线 I_1 和 I_2 的强度不同时,光线传递的动量级也不同,将传递到雾霾粒子上的动量 $-dp_1$ 和 $-dp_2$ 沿 x 轴分解,从而在雾霾粒子中产生一个反作用力,方向指向光场场强最大区域^[17],即高斯光束的光轴,这个反作用力的 x 轴分力趋向于遏止粒子偏离光轴。轴向梯度力的产生同样是由于光折射后的动量传递,在雾霾粒子中产生一个指向焦点的回复力。在 z 轴方向上,粒子被牢牢地束缚在焦点附近,激光即可实现对雾霾粒子的三维捕获。

1.2 激光消除雾霾机理分析

将雾霾颗粒等效为球体,大气流中雾霾颗粒主要受到的力如下。

(1) 气流曳引阻力为

$$F_r = \frac{\rho_g A_g C_D}{2} |u_g - u_p| (u_g - u_p) \quad (1)$$

式中: ρ_g 为流场中气体的密度; A_g 为颗粒物在与空气主流流速垂直面上的投影; C_D 为黏性阻力系数,取 $C_D = 24/Re$; u_g 、 u_p 分别为气流和雾霾粒子的速度。

(2) 颗粒自转形成的旋转升力为

$$F_m = \frac{1}{8} \pi \rho_p d_p^3 (\rho_g - \rho_p) \omega \quad (2)$$

将雾霾颗粒等效为球体时,需引入修正系数 K

$$F_m = \frac{K}{8} \pi \rho_p d_p^3 (\rho_g - \rho_p) \omega \quad (3)$$

式中: d_p 为雾霾粒子直径; ρ_p 为雾霾粒子密度; ω 为

雾霾粒子旋转速度。

(3) 流场中的速度梯度导致颗粒在运动时上下部分的流速不同,因此颗粒将受到一个沿垂直方向力的作用,当颗粒上表面速度大于下表面速度时,形成一个向上的 Saffman 升力 F_s ,表达式如下

$$F_s = 1.61 (\mu_g \rho_g)^{1/2} d_{1p} (u_g - u_p) \left| \frac{du_g}{dy} \right|^{1/2} \quad (4)$$

式中: μ_g 为气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(4) 范德瓦尔斯斥力为

$$F_a = \frac{2\pi\omega d_p}{3} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{h}{z_0} \right)^{-8} - \left(\frac{h}{z_0} \right)^{-2} \right] \quad (5)$$

式中: ω 为黏附功; h 为雾霾颗粒的间隙; z_0 为范德瓦尔斯力平衡间距,取 $z_0 = 0.4 \text{ nm}$ 。

光梯度力^[18]为

$$F_{\text{grad}}(r, t) = [\rho(r, t) \nabla] E(r, t) \quad (6)$$

式中: $\rho(r, t) = \alpha E(r, t)$ 为偶极矩, $\alpha = d^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$ 为极化率; $E(r, t)$ 为激光电场强度。

$$F_{\text{grad}}(r, t) = [\alpha E(r, t) \nabla] E(r, t) \quad (7)$$

利用 $(E(r, t) \nabla) E(r, t) = \frac{1}{2} \nabla E^2 - E(\nabla E)$ 和麦克斯韦方程 $\nabla E = 0$, 式(7)可改写成

$$F_{\text{grad}}(r, t) = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2(r, t) \quad (8)$$

所以,激光场的光梯度力为

$$F_{\text{grad}}(r, t) = \frac{\alpha}{2} \nabla E^2(r, t) = \frac{1}{4} \alpha \nabla |E(r)|^2 = \frac{2\pi n_m \alpha \nabla I(r)}{c} \quad (9)$$

式中: $I(r) = \frac{n_m \epsilon_0 c}{2} |E(r)|^2$ 为激光场强度; ϵ_0 为真空中的介电常数; c 为光速。

对大气流中雾霾颗粒主要受到的力进行计算,计算结果如图 3 所示,在不同粒子浓度下,功率为 2.6 mW 的氦氖激光器对粒径分布在 $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的雾霾粒子产生的光梯度力远大于其处于悬浮状态时所受的各种力。光梯度力捕获雾霾粒子情况如下。

(1) 激光光梯度力对雾霾粒子的捕获能力远大于大气对雾霾粒子的悬浮能力,雾霾粒子间原有的力平衡体系被打破,从而加速了雾霾粒子的沉降。

(2) 光梯度力随着粒子半径递增,并随着雾霾浓度的增大而增大,在激光逐渐衰减后而递减。

2 激光消除雾霾实验设计及验证

实验最直接的方法是在雾霾天气时选取一片空旷的场地并铺满白纸,向大气中的雾霾辐射激光,在

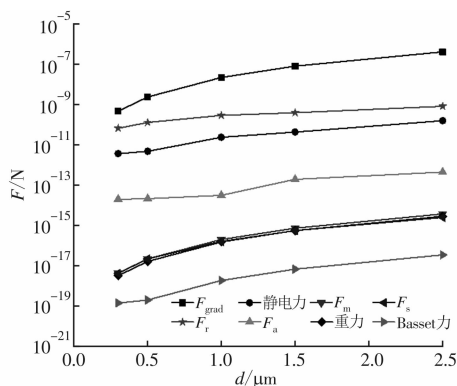
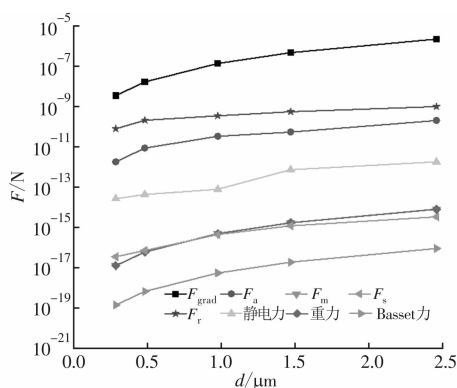
(a) 雾霾粒子浓度为 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (b) 雾霾粒子浓度为 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$

图3 雾霾粒子所受的各种力

激光光梯度力的作用下,雾霾粒子斥力平衡体系被打破从而相互聚合、掉落,对比在有、无激光照射区域下白纸上颗粒的数目,分析激光是否能够消除雾霾。但是,考虑到风力的影响,雾霾粒子在坠落过程中会被吹离激光辐射区域,导致颗粒数目不准确。此外,只能选取雾霾天气的自然因素限制了实验进行,针对单一的雾霾天气状况也难以分析激光光梯度力消除雾霾的主要技术参数。鉴于上述诸多因素的影响,实验难以在室外进行,因此本文实验的关键在于搭建一个雾霾粒子能够长时间悬浮的雾霾模拟实验舱,并配合颗粒物发生装置、温湿度计、颗粒稀释器、激光粒子计数器等实验设备,实时监测实验区域的颗粒物浓度、粒径分布、温湿度等参数指标。

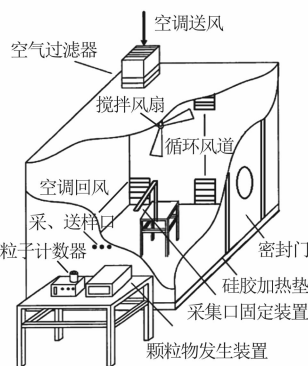
2.1 实验布局及实验原理

根据国家标准 GB/T 18801—2015《空气净化器》,搭建了进行烟雾粒子悬浮实验的雾霾模拟实验舱,实验舱内尺寸为 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,容积为 3 m^3 ,实验舱示意图、实物图如图4所示。实验舱主要分为控制区、进样区和观察采样区。舱内设有高效空气过滤器,用于净化实验舱内空气,在输入烟雾之前,开启循环风道的风阀,使舱内气体循环通过高

效空气过滤器,将颗粒物的背景浓度降低到标准值以下。搅拌风扇位于舱内顶部,主要用于使输入的烟雾进入搅拌风扇形成的空气涡流中,保证舱内烟雾粒子分布均匀。在实验舱的底部放置硅胶加热垫,保持温度恒定在 25°C 。进样区与颗粒物发生装置相连接,选用标准颗粒物:香烟烟雾(红塔山经典150),焦油量为 8 mg ,将一支标准香烟放入香烟燃烧器内,香烟烟雾出口链接一根穿过实验舱壁的输送管路,空气压缩机持续提供支持燃烧的空气和动力^[19],烟雾经过搅拌风扇进入空气涡流中。观察采样区与颗粒稀释器和激光粒子计数器相连接,经过颗粒稀释器稀释采集的气体,稀释采样流量为 20 mL ,采用的稀释比为 $960:1$ 。将稀释后的气体通入粒子计数器,记录颗粒数目,粒子计数器的示数打印间隔设为 1 min ,计数器的采样流量为 $2.83 \text{ L}/\text{min}$,与颗粒稀释器相匹配。



(a) 实物图



(b) 示意图

图4 雾霾模拟实验舱

激光器布置在实验舱进样区对面的工作台上,由激光固定底座夹持,激光通过进样口从实验舱外部向实验舱内部辐射。为保证实时测量烟雾浓度,调整激光固定底座支架的角度,使激光入口、烟雾采集口与激光束保持在同一水平高度上。入射的激光光束径直辐射烟雾采集口,若光梯度力与悬浮颗粒相互作用而起到沉降粒子的效果,则一定是采集口处颗粒浓度最先发生变化,避免了舱内粒子因再次混合造成的时间延迟。使用的激光器为氦氖激光器(HN-250),功率为 2.6 mW ,波长为 632.8 nm 。实验中需要凸透镜对激光扩束,扩大激光光束的照射范围,用以提高粒子沉降效率,凸透镜固定在舱壁的激光入口处,其中凸透镜焦距为 5 cm ,采集口到凸透镜的距离为 0.5 m ,此时光斑恰好覆盖整个采集口区域。

设计的实验方案为在烟雾粒子悬浮的中途开启激光器,观测各个阶段粒子衰减速率。在实验舱内进行多次烟雾悬浮实验时,由于难以精确控制进烟过程的各个因素,例如香烟的燃烧状态不同导致粒径分布的差异,多次实验之间的对照分析不够合理。因此,实验中采用的方案为在单次实验的中途开启激光器,同时观察颗粒浓度的变化,通过对比每个阶段曲线曲率的大小,分析激光与烟雾是否产生相互作用,从而分析光梯度力是否能够打破烟雾粒子的力平衡体系,达到沉降颗粒的目的。

2.2 雾霾模拟方法

雾霾模拟技术一直是大气环境模拟的一个难点,本文采用燃烧法来模拟雾霾颗粒,选择香烟作为燃烧物来模拟雾霾环境,模拟的参数主要有:雾霾浓度、雾霾成分、粒径分布、相对湿度和温度,实验舱进烟时各个阶段如图 5 所示。

(1)雾霾浓度。依照国家标准 GB 3095—2012《环境空气质量标准》HJ618 标准,取 PM10 的二级日平均标准,按照一般空气、轻度雾霾($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、中度雾霾($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、重度雾霾($450 \mu\text{g}/\text{m}^3$)划分。通过控制香烟燃烧量来控制雾霾浓度,根据香烟颗粒不易聚合、稳定悬浮浓度高等特点,选用的测量仪器为激光粒子计数器。

(2)雾霾成分。雾霾化学成分主要有硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳氢化合物粒子以及矿物颗粒等^[20]。香烟经燃烧后可生成细颗粒物以及烟焦油,其中烟焦油是有机质在缺氧条件下不完全燃烧的产物,是众多烃类及烃的氧化物、硫化物及氮化物的极其复杂的混合物。经分析得出,香烟烟雾与雾霾在化学成分上具有一致性。

(3)粒径分布。雾霾天气下 PM2.5 和 PM10 质量比大于 74%,说明细污染物是造成冬季污染的主要因素^[21-22]。香烟烟雾中 PM2.5 和 PM10 质量比约为 84.44%,且 $0\sim 1.0 \mu\text{m}$ 的颗粒物约占 PM10 总质量的 68.89%^[23],与雾霾粒径分布相似。

(4)相对湿度和温度。雾霾环境的相对湿度在 80%~90%,取 85%为试验湿度,雾霾环境的温度取室外空气温度 25°C 。

2.3 实验结果及分析

选用以散射法为测量原理的激光尘埃粒子计数器记录烟雾粒子的浓度。光学传感器的探测激光经尘埃粒子散射后被光敏元件接收并产生脉冲信号,微粒散射光的强度随微粒的表面积增加而增大,将测定散射光的脉冲信号放大,进行数字化处理,并与

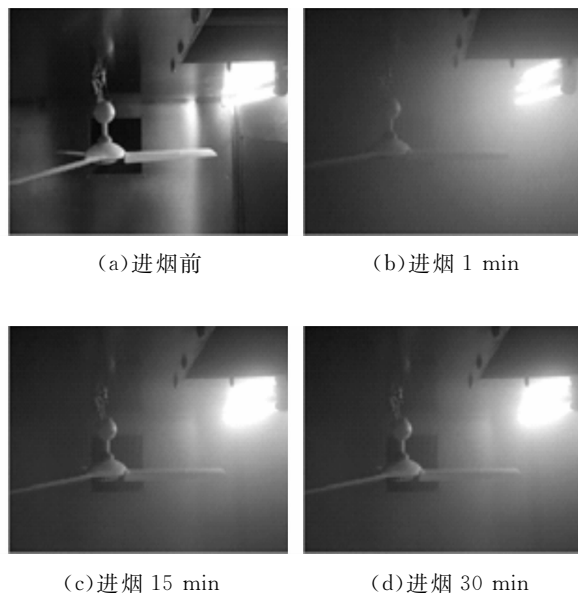


图 5 模拟雾霾的悬浮情况

标准粒子散射信号进行比较。其中,电脉冲数量对应于微粒的个数,电脉冲的幅度对应于微粒的大小,即可推知微粒的个数和大小。采用在雾霾自然衰减过程中开启激光器的方式开始颗粒物的衰减实验,分别观测烟雾粒子在自然状态下的衰减速率以及在激光辐射状态下的衰减速率,实验步骤如下:

(1)将采样点位置布置好,避开进出风口,离玻璃壁距离为 0.5 m ,相对实验室地面高度为 0.5 m ,并与实验舱外采样器相连接;

(2)开启高效空气过滤器,净化实验舱内空气,使颗粒物粒径在 $0.3 \mu\text{m}$ 以上的粒子背景浓度小于 1000 L^{-1} ,同时启动温度控制装置,使室内温度达到规定状态;

(3)待颗粒物背景浓度降低到合适水平,记录颗粒物背景浓度,关闭高效空气过滤器,启动搅拌风扇,烟雾输送完毕后,关闭烟雾输送管阀门,搅拌风扇工作 10 min ,使颗粒污染物混合均匀后关闭搅拌风扇;

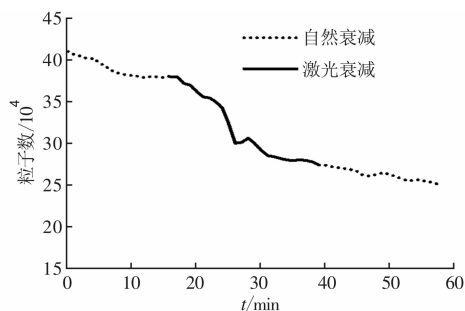
(4)待搅拌风扇停止转动后,用颗粒计数器测定颗粒物的初始浓度 C_0 ;

(5)实验舱内的初始浓度(自然衰减的第 1 个取样点)测定后,每 1 min 测定 1 次,并记录颗粒物的浓度;

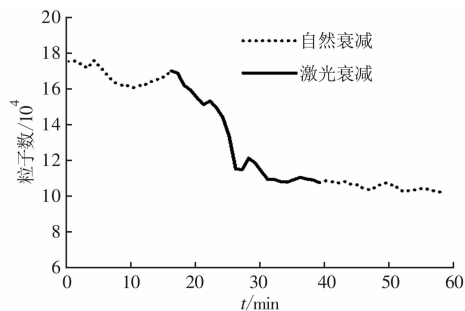
(6)在规定时间内开启激光器,观测烟雾粒子浓度在激光梯度力的影响下的衰减速率。

本次实验在观测烟雾粒子浓度时,同时对直径为 $0.3, 0.5, 1.0 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度进行计数,用以分析光梯度力对不同大小微粒的作用情况。在 $16\sim$

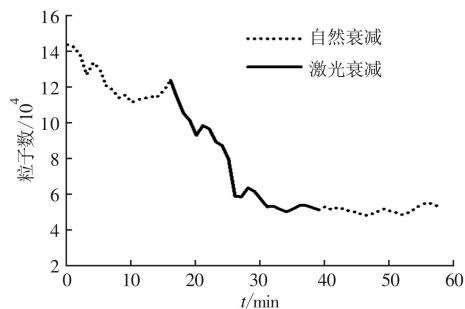
39 min 时间段内开启激光器,实验结果如图 6 所示。



(a) 直径为 $0.3 \mu\text{m}$



(b) 直径为 $0.5 \mu\text{m}$



(c) 直径为 $1.0 \mu\text{m}$

图 6 雾霾浓度随时间的变化情况

由图 6 可见,开启激光器,即在 16 min 处,直径分别为 0.3 、 0.5 、 $1.0 \mu\text{m}$ 的粒子浓度曲线均有非常明显的转折,粒子浓度剧烈下降,并且在激光开启过程中持续下降。3 种不同大小的粒子衰减斜率均大于 $0 \sim 16 \text{ min}$ 的自然衰减曲线斜率,说明激光对粒子沉降起到了显著作用,其中对 $1.0 \mu\text{m}$ 直径的粒子沉降效果最好。

激光器开启 30 min 后,烟雾粒子在有激光作用的情况下衰减不明显,有以下两条原因:第一,在 $30 \sim 39 \text{ min}$ 时间段内,若此时舱内底部的硅胶加热垫处于加热状态,受到激光作用而沉降的烟雾粒子,在自然对流的影响下被舱内流体向上托起,导致采样数偏大,因此曲线没有明显的下降趋势;第二,衰减速率与粒子浓度有关,舱内粒子浓度较低时,受到激光作用的粒子数目减少,因此曲线趋向于平缓。另

外,从曲线中可以发现粒子浓度上升的现象,原因可能在于加热垫此时正在加热,从而影响了粒子浓度。因此,在后续的实验中,实验舱在保温可以采用设计外舱的形式,也可以采用设计保温层的形式,避免采样区受自然对流的影响。

3 结 论

本文以激光光梯度力破坏雾霾粒子力平衡体系进而消除雾霾的新机理为实验方案,对粒径为 0.3 、 0.5 、 $1.0 \mu\text{m}$ 的雾霾粒子做了以下实验分析。

(1)搭建了雾霾粒子能够长时间悬浮的雾霾模拟实验舱,配合颗粒物发生装置、温湿度计、颗粒稀释器、激光尘埃粒子计数器等实验设备,实时监测实验区域的颗粒物浓度、粒径分布、温湿度等参数指标。

(2)根据理论计算,选定了额定功率为 2.6 mW 氦氖激光器,计算得出产生的光梯度力大于雾霾粒子间的斥力,可以打破雾霾粒子的平衡体系,使雾霾粒子达到沉降条件。

(3)进行了利用光梯度力消除雾霾粒子的实验,证明了光梯度力对雾霾粒子的沉降作用。当激光开启时,实验舱内粒子浓度急剧下降,下降速率明显高于粒子的自然下降速率,证明了光梯度力对粒子的沉降作用,粒径越大,沉降的效果也更加明显,说明利用光梯度力消除雾霾是可行的。该方法同样也可以用来消除工厂粉尘等。

综上所述,利用激光光梯度力可以破坏雾霾粒子的网状平衡体系,消除雾霾,证明了新机理的可行性。

参考文献:

- [1] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响 [J]. 中国工业经济, 2014, 31(4): 19-31.
MA Limei, ZHANG Xiao. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure [J]. China Industry Economics, 2014, 31(4): 19-31.
- [2] CHAMEIDES W L, YU H, LIN S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1999, 96(24): 13626-13633.
- [3] SHAKYA K M, PELTIER R E, SHRESTHA H, et al. Measurements of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, and PM chemical composition from an urban residential lo-

- cation in Nepal [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(6): 1123-1131.
- [4] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季雾霾天气下颗粒物质量浓度分布与光学特性 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(5): 462-469.
- YAO Qing, CAI Ziyang, HAN Suqin, et al. PM_{2.5} pollution characteristics and aerosol optical properties during fog-haze episodes in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(5): 462-469.
- [5] 张永燕, 吴九汇, 曾涛, 等. 利用激光光梯度力消除气溶胶雾霾粒子的机理研究 [J]. *物理学报*, 2016, 65(7): 074203.
- ZHANG Yongyan, WU Jiuhui, ZENG Tao, et al. Mechanism of eliminating the aerosol haze particles by using laser gradient force [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(7): 074203.
- [6] 王黎明, 刘动, 陈枫林, 等. 雾霾模拟方法及其装置研究 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(11): 3297-3304.
- WANG Liming, LIU Dong, CHEN Fenglin, et al. Simulation method and testing apparatus of fog-haze [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(11): 3297-3304.
- [7] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [8] ASHKIN A. Forces of a single-beam gradient force on a dielectric sphere in the ray of optic regime [J]. *Biophysical Journal*, 1992, 61(2): 569-582.
- [9] VAN M J, WUITE G J, HELLER I. Introduction to optical tweezers: background, system designs, and commercial solutions [J]. *Methods in Molecular Biology*, 2011, 783: 1-20.
- [10] SVOBODA K, BLOCK S M. Optical trapping of metallic Rayleigh particles [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(13): 930-932.
- [11] KE P C, GU M. Characterization of trapping force on metallic Mie particles [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(1): 160-167.
- [12] GHISLAIN L P, SWITZ N A, WEBB W W. Measurement of small forces using an optical trap [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(9): 2762-2768.
- [13] ROHRBACH A, STELZER E H K. Trapping forces, force constants, and potential depths for dielectric spheres in the presence of spherical aberrations [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2494-2507.
- [14] ALLEN L, PADGETT M J, BABIKER M. The orbital angular momentum of light [J]. *Progress in Optics*, 1999, 39(1): 291-372.
- [15] CURTIS J E, GRIER D G. Structure of optical vortices [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(13): 133901.
- [16] BRADSHAW D S, ANDREWS D L. Manipulating particles with light: radiation and gradient forces [J]. *European Journal of Physics*, 2017, 38(3): 034008.
- [17] HALLOCK A J, REDMOND P L, BRUS L E. Optical forces between metallic particles [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(5): 1280-1284.
- [18] 李忠明, 张镇西. 光场力的电磁理论分析 [J]. *量子电子学报*, 2007, 24(2): 211-215.
- LI Zhongming, ZHANG Zhenxi. Electromagnetic theory of optical forces [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(2): 211-215.
- [19] 王建辉, 赵悦菊, 孙伟, 等. 人工模拟雾霾实验及其装置 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 5130-5137.
- WANG Jianhui, ZHAO Yueju, SUN Wei, et al. Experiment and its device for artificial simulated fog-haze environment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9): 5130-5137.
- [20] MA J Z, XU X B, ZHAO C S, et al. A review of atmospheric chemistry research in China: photochemical smog, haze pollution, and gas-aerosol interactions [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 1006-1025.
- [21] 常清, 杨复沫, 李兴华, 等. 北京冬季雾霾天气下颗粒物及其化学组分的粒径分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 363-370.
- CHANG Qing, YANG Fumo, LI Xinghua, et al. Characteristics of mass and chemical species size distributions of particulate matter during haze pollution in the winter in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 363-370.
- [22] 周羽生, 罗屿, 赵纯, 等. 人工气候室雾霾模拟方法及装置 [J]. *高电压技术*, 2017, 43(3): 909-914.
- ZHOU Yusheng, LUO Yu, ZHAO Chun, et al. Haze-fog simulation method and device in the artificial climate chamber [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(3): 909-914.
- [23] 王亚杰, 强天伟, 孙婧. 香烟烟雾中颗粒物粒径的分布情况 [J]. *洁净与空调技术*, 2016(1): 81-85.
- WANG Yajie, QIANG Tianwei, SUN Jing. The size distribution of particles in cigarette smoke [J]. *Contamination Control & Air-Conditioning Technology*, 2016(1): 81-85.

(编辑 杜秀杰)