

利用激光光梯度力消除气溶胶雾霾粒子的机理研究

张永燕 吴九汇 曾涛 钟宏民

Mechanism of eliminating the aerosol haze particles by using laser gradient force

Zhang Yong-Yan Wu Jiu-Hui Zeng Tao Zhong Hong-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 074203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.074203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光梯度力驱动的纳米硅基光开关

A nano-silicon-photonic switch driven by an optical gradient force

物理学报.2015, 64(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154209>

基于表面等离激元场的分子反射镜的理论研究

Theoretical study on a novel molecular mirror with a surface plasmon polariton field

物理学报.2014, 63(21): 213701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.213701>

n型主动拉曼增益原子介质中的光学双稳态

Optical bistability via active Raman gain in an n-type atomic medium

物理学报.2012, 61(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.224204>

单原子在两个远红失谐光偶极阱中的转移

Transferring single-atoms between two red-detuned far-off-resonance optical dipole traps

物理学报.2012, 61(20): 203701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.203701>

利用激光光梯度力消除气溶胶雾霾粒子的机理研究

张永燕¹⁾²⁾ 吴九汇^{1)†} 曾涛²⁾ 钟宏民²⁾

1)(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

2)(四川理工学院机械工程学院, 自贡 643000)

(2015年10月12日收到; 2015年12月14日收到修改稿)

针对气溶胶雾霾粒子在大气流中所受力的平衡体系(旋转升力平衡重力, 粒子与粒子之间依靠斥力形成稳定的网状的力平衡体系)的问题, 提出了用激光光梯度力破坏力平衡进而消除雾霾的新机理. 首先, 根据牛顿第二定理, 得到了粒子所受力的非线性方程组, 应用 Runge-Kutta 法积分求解了雾霾颗粒在大气流中所受的主要力(空气曳引阻力、范德瓦耳斯斥力、旋转升力)的数值, 成功验证了西安市2013年12月17—25日、2014年2月20—26日两次雾霾检测试验结论: 在雾霾过程中, 粒径在0.5—0.835 μm 径段的粒子数浓度增加最明显. 其次, 在雾霾粒子形成的均匀介质中, 计算了激光光梯度力的大小. 研究发现, 激光光梯度力的数量级恒大于雾霾颗粒所受主要力的数量级, 激光光梯度力完全可以破坏雾霾颗粒所受力的平衡体系. 因此, 用激光光梯度力消除雾霾是可行的, 这种新的解决雾霾的方法对人们的实际生活、环保及创建美丽的蓝天具有重要的意义.

关键词: 雾霾粒子, 光梯度力, 激光

PACS: 42.65.Pc, 37.10.Vz, 42.60.Da, 77.55.df

DOI: 10.7498/aps.65.074203

1 引言

雾霾是空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等形成的气溶胶粒子. 目前, 气溶胶雾霾越来越严重, 严重危害人们的健康及生活(如图1所示). 频发的雾霾及大气污染, 引发了国内外学者们的极大兴趣, 进而对大气污染进行研究. 在2009年, Stuart等^[1]提出不仅仅是城市中的工厂企业应受到环保部门或政府的监管, 郊区的工厂企业的排污行为也应当在有关部门的监管之下. 对于曾经经历过雾霾的西方发达国家, 采取了一些成功的措施积极治理, 其中治理空气污染的手段之一就是发展公交和城市绿化.

当前, 面对雾霾人们束手无策, 只能采取一些其他措施^[2,3] 防雾霾, 如减少外出或减少户外活

动、外出时一定要戴口罩、减少户外锻炼、关闭门窗以及经济结构转型和人们生活习惯的改变等. 2015年, 储梦然和李世祥^[4]从社会协同治理理论出发, 提出优化我国雾霾治理政策的建议, 以期寻求雾霾治理的长效机理. 纵观国内外专家治理雾霾的认识仍停留在雾霾形成机理, 而提出治理雾霾的方法实施周期较长或只是治标不治本, 效果非常有限. 因此, 要从根本上治理雾霾, 探讨新的治理雾霾的方法是非常必要的. 我们提出的新方法是本质分析雾霾形成及悬浮的内在机理(雾霾粒子在大气中形成了网状的力平衡体系).

气溶胶雾霾颗粒(图2为霾粒子放大图片)在雾霾颗粒形成的均匀介质中形成了动态平衡力体系(静电力远程吸引霾粒子, 旋转升力大于重力将霾粒子托起, 在气流曳引阻力的作用下加速颗粒的

† 通信作者. E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn

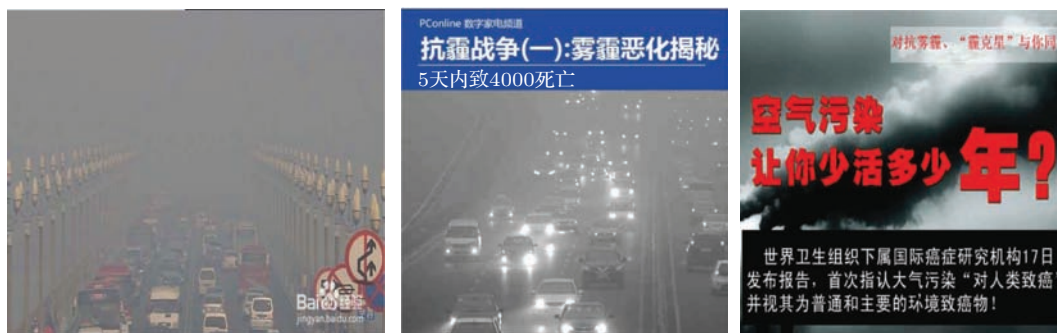


图1 雾霾的危害

Fig. 1. Haze hazard.

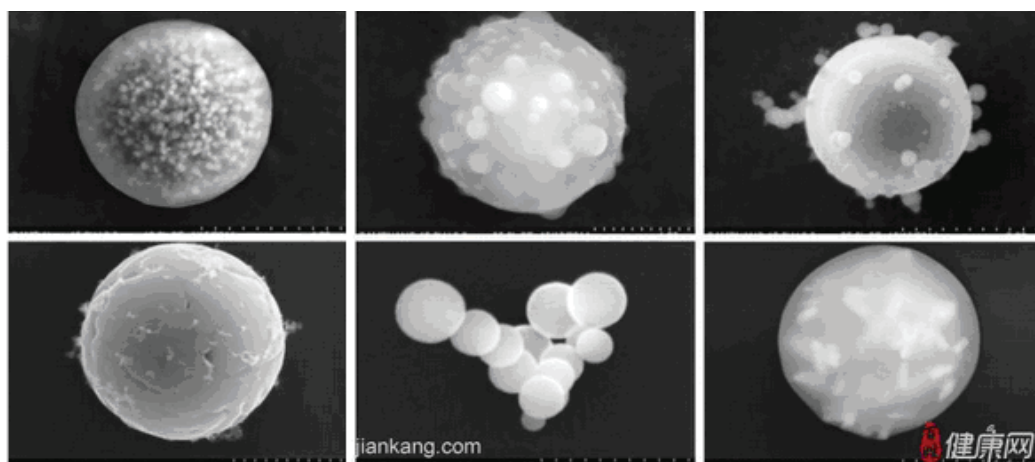


图2 雾霾粒子的放大图

Fig. 2. An enlarged view of haze particles.

运动,使霾粒子继续在垂直方向上扩散;当颗粒高速旋转时(1000 r/s)旋转升力将很大,越来越多的雾霾粒子被继续托起,被托起的众多粒子,粒子与粒子之间在范德瓦耳斯力的作用下,相互排斥形成了稳定的网状力平衡,旋转升力平衡重力,使得大气层低空的颗粒垂直运动受到限制,悬浮微粒难以向高空飘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力平衡体系,使粒子满足沉降条件,霾粒子就会沉降。因此,本文提出消除雾霾的关键是要破坏雾霾粒子的力平衡体系。

本文针对雾霾粒子的力平衡体系和激光束的高亮度、准直性、方向性、同调性之特点^[5,6]、激光在检测雾霾粒子的应用^[7]以及激光光梯度力在许多方面的广泛的应用^[8],以及西安市2013年12月17—25日、2014年2月20—26日两次雾霾天气的形成、发展、维持与变化,提出了一种新的解决雾霾的方法,即用激光光梯度力破坏雾霾颗粒所受力的

平衡体系,从而使雾霾颗粒沉降。

2 雾霾颗粒在大气中的受力分析

根据文献^[9],西安市2013年12月17—25日、2014年2月20—26日两次雾霾检测的数据显示:24—25日 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以下粒子的数浓度一直持续较大,据累计数浓度分析,在该雾霾过程中,粒径在 $0.5\text{--}0.835\text{ }\mu\text{m}$ 之间的粒子的数浓度占总数浓度的平均值达到82.5%,该粒径段粒子数浓度增加最明显。因此,本文对粒径在 $0.5\text{--}0.835\text{ }\mu\text{m}$ 径段的粒子的受力进行分析。

雾霾颗粒在大气流中所受力为:气流曳引阻力 F_1 、旋转升力、Saffman力、Basset力、重力、浮力、范德瓦耳斯力、静电力、虚假质量力等,计算过程中,可以忽略其他次要力,本文根据图2将霾粒子等效为球体,粒子所受主要力如图3所示。

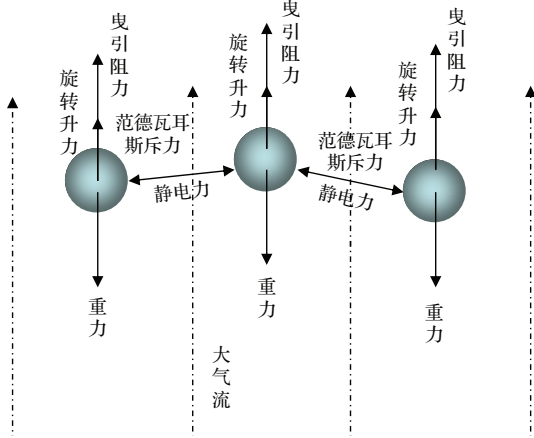


图3 粒子受力图

Fig. 3. Schematic of the force exerted on haze particles.

1) 颗粒所受气流曳引阻力 F_r ,

$$F_r = (\rho_g A_g C_D / 2) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p), \quad (1)$$

式中, ρ_g 为流场中气体的密度 (kg/m^3); A_g 为颗粒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 $C_D = 24/Re$, $\mathbf{u}_g$, $\mathbf{u}_p$ 分别为气流和雾霾粒子的速度 (m^2/s).

2) 颗粒由于自转而具有的升力. 效应旋转升力为

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{8} \pi \rho_p d_p^3 (\rho_g - \rho_p) \boldsymbol{\omega}. \quad (2)$$

雾霾粒子并非球形粒子, 故引入修正系数 K ,

$$\mathbf{F}_m = \frac{K}{8} \pi \rho_p d_p^3 (\rho_g - \rho_p) \boldsymbol{\omega}, \quad (3)$$

式中, d_p 为雾霾粒子直径 (m), ρ_p 为雾霾粒子密度 (kg/m^3), $\boldsymbol{\omega}$ 为雾霾粒子旋转速度 (m^3/s).

3) 颗粒在有速度梯度的流场中运动时, 由于颗粒上下部分的流速不同, 颗粒将受到一个沿高度方向力的作用. 当颗粒上部的速度高于下部的速度时, 此力为向上的 Saffman 升力 F_S :

$$F_S = 1.61 (\mu_g \rho_g)^{1/2} d_p^2 (u_g - u_p) |du_g/dy|^{1/2}, \quad (4)$$

式中, μ_g 为气体动力黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), 其他符号同前.

4) 范德瓦耳斯力 (未接触)

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

其中, w 为黏附功, h 为颗粒间的间隙距离, z_0 为范德瓦耳斯力平衡间距 (0.4 nm).

根据牛顿第二定理可得

$$m \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \sum \mathbf{F}, \quad (6)$$

其中 $\sum \mathbf{F}$ 为雾霾粒子所受的合力. 将其在 x 轴上分解,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} \\ &= 3\pi \mu_g d_p f(u_g - u_p) + \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho_g \mu_g)^{1/2} \\ & \times \int_0^l \frac{d\tau}{(t - \tau)^{1/2}} \int_0^l \left(\frac{du_g}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

在 y 轴上分解,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{dw_p}{dt} \\ &= 3\pi \mu_g d_p f(w_g - w_p) + \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho_g \mu_g)^{1/2} \\ & \times \int_0^l \frac{d\tau}{(t - \tau)^{1/2}} \int_0^l \left(\frac{dw_g}{dt} - \frac{dw_p}{dt} \right) \\ & - \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g + \frac{1}{8} \pi \rho_g d_p^3 (u_g - u_p) \omega \\ & + 1.61 (\mu_g \rho_g)^{1/2} d_p^2 (u_g - u_p) \left(\frac{du_g}{dy} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

再经化简, 得

$$\frac{d(u_p - u_g)}{dt} = -\frac{1}{\tau} (u_p - u_g) + A/\tau, \quad (9)$$

$$\frac{d(w_p - w_g)}{dt} = -\frac{1}{\tau} (w_p - w_g) + B/\tau, \quad (10)$$

其中

$$\tau = \left(\rho_g + \frac{1}{2} \rho_p \right) d_p^2 / 18 \mu_g f.$$

用四阶 Runge-Kutta 法积分求解 (9) 和 (10) 式得 u_p 和 w_p , 即可计算各力的值, 结果如图 4 和图 5 所示.

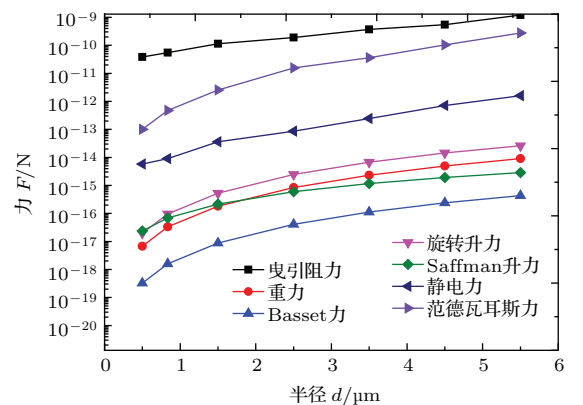


图4 (网刊彩色) 霾粒子浓度为 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时所受的各种力

Fig. 4. (color online) The force exerted on haze particles at particle concentration of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

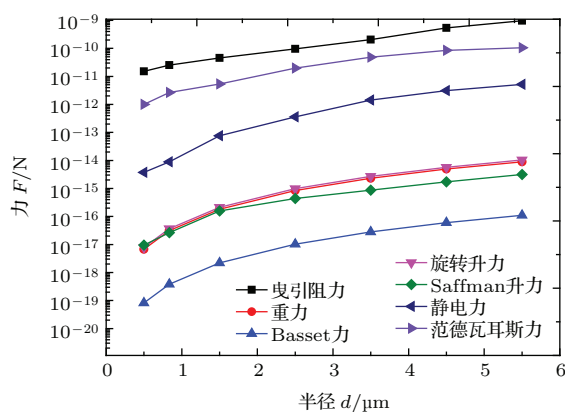


图5 (网刊彩色) 霾粒子浓度为 $550 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时所受的各种力

Fig. 5. (color online) The force exerted on haze particles at particle concentration of $550 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

如图4和图5所示,在不同粒子浓度下,雾霾粒子在大气中所受的各种力中,范德瓦耳斯力、静电力和空气曳引阻力的数量级最大,旋转升力及重力相当,因此,可以认为雾霾粒子在大气中所受的主要力为范德瓦耳斯力斥力、空气曳阻力、旋转升力、静电力。

如图4所示,在粒子浓度为 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 雾霾开始形成时,气流曳引阻力是作用于雾霾颗粒上的最大力,旋转升力的数量级在各种雾霾颗粒直径下均大于重力一级。粒径在 $0.5\text{--}0.835 \mu\text{m}$ 径段的粒子,静电力远程吸引霾粒子,旋转升力大于重力将霾粒子托起,在气流曳引阻力的作用下加速颗粒的运动,同时,向上的 Saffman 升力使霾粒子继续在垂直方向上扩散;当颗粒高速旋转时 (1000 r/s) 旋转升力将很大,越来越多的雾霾粒子被继续托起,被托起的众多粒子,粒子与粒子之间在范德瓦耳斯力的作用下相互排斥形成了稳定的网状力平衡,旋转升力平衡重力,使得大气层低空的颗粒垂直运动受到限制,悬浮微粒难以向高空飘散而被阻滞在低空和近地面,粒子不易扩散,这样有利于气溶胶粒子的数浓度增加,有利于雾霾维持和发展,这与文献[6]的结论相符合,粒径在 $0.5\text{--}0.835 \mu\text{m}$ 之间的粒子的数浓度增加最明显。

如图5所示,当霾粒子浓度逐渐增大时,旋转升力也逐渐平衡重力;粒子浓度为 $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,一方面霾粒子与霾粒子之间由于范德瓦耳斯力和静电力平衡;另一方面旋转升力和重力数量级等大,旋转升力与平衡重力,粒子扩散速度受限,导致霾粒子稳定悬浮;最后导致霾粒子在这些力形成的力平衡体系中无法沉降。

3 激光光梯度力的分析与计算

3.1 激光梯度力

光梯度力激光的本质是电磁波,在激光范围内的微粒可看作是在一均匀时变电场内,且微粒本身被电场所极化,被极化的微粒受电场力的吸引有移向电场较强区域的倾向,对激光微束而言,这种倾向就是朝向焦点的梯度力。当雾霾粒子的折射率 n_1 大于周围介质的折射率 n_2 且小球处在非均匀光场中,如图6所示,光场自左向右增强,从而在垂直光传播方向的横向面内产生方向向右的梯度力 F_{grad} , 梯度力^[10]大小可由下式给出:

$$F(r, t) = [\mathbf{p}(r, t) \nabla] \cdot \mathbf{E}(r, t), \quad (11)$$

式中, $\mathbf{p}(r, t) = \alpha \mathbf{E}(r, t)$ 为偶极矩, $\alpha = d^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$ 为极化率, $\mathbf{E}(r, t)$ 为激光场矢量。

$$F(r, t) = [\alpha \mathbf{E}(r, t) \nabla] \cdot \mathbf{E}(r, t). \quad (12)$$

由 $(\mathbf{E}(r, t) \nabla) \cdot \mathbf{E}(r, t) = \frac{1}{2} \nabla E^2 - \mathbf{E} \cdot (\nabla \mathbf{E})$ 和麦克斯韦方程 $\nabla E = 0$, 得

$$\begin{aligned} F_{\text{grad}}(r, t) &= \frac{\alpha}{2} \nabla E^2(r, t) = \frac{1}{4} \alpha \nabla |\mathbf{E}(r)|^2 \\ &= \frac{2\pi n_m \alpha \nabla I(r)}{c}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $I(r)$ 为激光场强度, c 为光速。

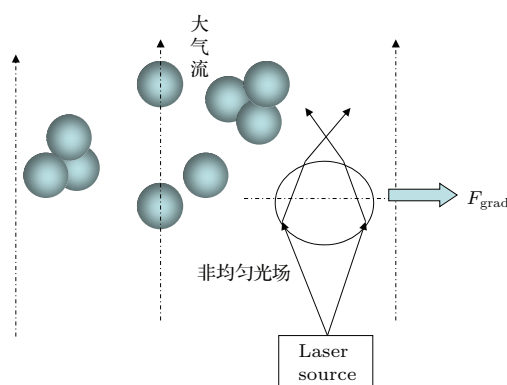


图6 梯度力

Fig. 6. Gradient force.

3.2 激光在大气中的衰减情况

1) 大气引起激光衰减用 beer 表示为

$$I(R) = I_0 \exp \left[- \int_0^R \mu(r, \lambda) dr \right], \quad (14)$$

式中, $I(R)$ 是波长为 λ 的激光在大气中传输距离为 R 后的光强; I_0 是发射出的激光强度; $\mu(r, \lambda)$ 是大气的衰减系数,

$$\mu(\lambda) = A_m(\lambda) + A_a(\lambda) + S_m(\lambda) + S_a(\lambda), \quad (15)$$

其中, $A(\lambda)$ 是吸收系数, $S(\lambda)$ 是散射系数, 大气衰减系数的单位为 km^{-1} , 下标 m 及 a 分别表示分子和气溶胶.

2) 雾霾粒子引起激光衰减模型

由于雾霾特征较复杂, 实际中以如下的经验公式估算雾霾衰减系数^[11]:

$$\mu = \frac{3.912}{V_b} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^a, \quad (16)$$

天气从晴朗到雾霾该经验公式均适合, 式中, V_b 为大气能见度, λ 为波长, a 为波长修正系数.

法国学者 Nabouls^[12] 对较低能见度的 a 值进行修正如下:

$$a = \begin{cases} 0.16V_b + 0.34, & 1 \text{ km} < V_b \leq 6 \text{ km}, \\ V_b - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V_b < 1 \text{ km}, \\ 0, & V_b < 0.5 \text{ km}. \end{cases} \quad (17)$$

3.3 激光在雾霾均匀介质中的光梯度力

根据激光在雾霾均匀介质中的衰减经验公式得

$$a = \begin{cases} 1.6, & V_b = 10 \text{ km}, \\ & \rho = 70 \mu\text{g}/\text{m}^3, \\ 0.585V_b^{1/3}, & V_b > 6 \text{ km}, \\ & \rho = 200 \mu\text{g}/\text{m}^3, \\ 0.16V_b + 0.34, & 1 \text{ km} < V_b \leq 6 \text{ km}, \\ & \rho = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3, \\ 0, & V_b < 0.5 \text{ km}, \\ & \rho = 750 \mu\text{g}/\text{m}^3. \end{cases} \quad (18)$$

取 $\lambda = 1000 \text{ nm}$, $d = 0.835 \mu\text{m}$, $R = 200 \text{ m}$, $I_0 = 2 \times 10^{20} \text{ W}/\text{cm}^2$ 及 (18) 式中的对应值代入 (13) 式可得梯度力的大小.

如图 7 所示, 不同粒子浓度下, 激光光梯度力的数量级远远大于颗粒所受的阻力和范德瓦耳斯力及旋转升力, 从各个方向加梯度力:

1) 激光光梯度不仅可以使空气拽阻引力的作用效果减小, 减小粒子在气流中加速的程度, 而且破坏了粒子与粒子之间依靠范德瓦耳斯力斥力

形成的稳定结构, 加强了粒子扩散, 不易粒子堆积增多;

2) 如图 7 所示, 激光光梯度力恒大于重力, 在激光梯度力的作用下粒子不再被托起, 而是在梯度力的作用下, 粒子间的力平衡被破坏, 粒子便沉降.

图 8 所示, 梯度力随着雾霾浓度的增大, 经衰减逐渐减小, 并随着粒子半径的增大逐渐增大.

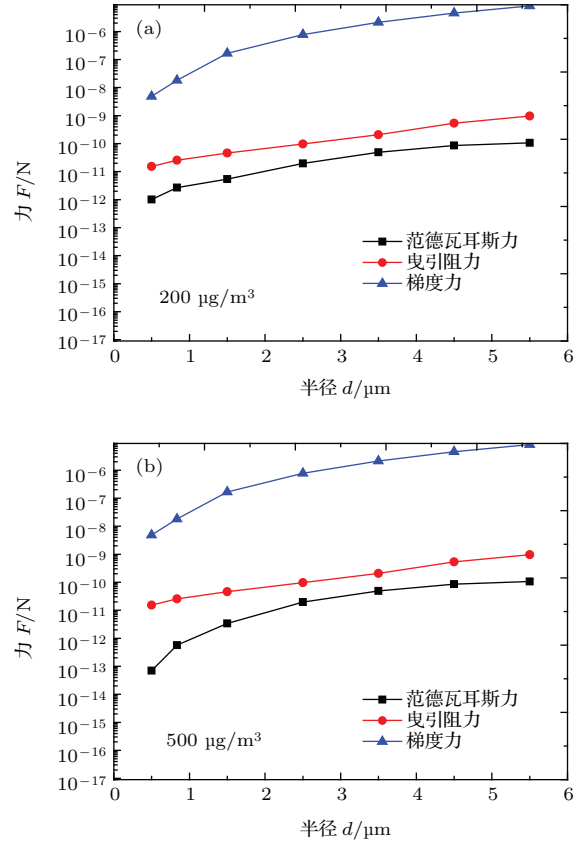


图 7 激光梯度力与粒子所受的各种力的数量级比较
Fig. 7. Comparison of various forces exerted on haze particles and laser gradient force.

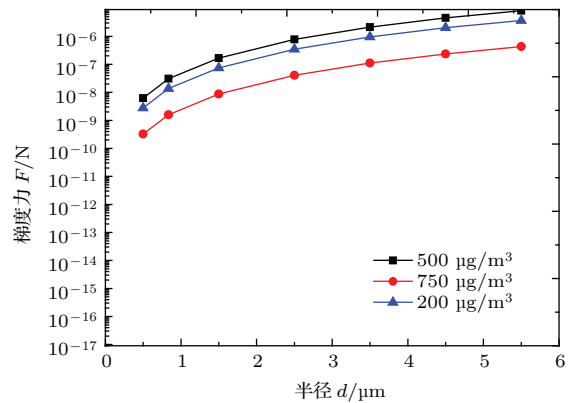


图 8 不同粒子浓度下的梯度力
Fig. 8. The gradient forces under different particle concentrations.

4 结 论

本文以西安市雾霾检测数据——粒径在0.5—0.835 μm 径段之间的雾霾粒子为研究对象, 对其做了以下分析.

1) 本文阐明了雾霾粒子能够长时间悬浮在大气中的内在原因(雾霾粒子在大气中形成了力平衡体系)及力平衡体系中极为重要的力, 并分析了消除雾霾粒子的本质就是要打破力平衡体系, 使雾霾粒子满足粒子沉降条件.

2) 定量分析了粒子所受的主要力为: 空气曳引阻力、范德瓦耳斯斥力、旋转升力, 同时分析了各个力在雾霾形成中的作用; 气流曳引阻力是作用于雾霾颗粒上的最大力, 起着加速颗粒的作用; 旋转升力的数量级在各种雾霾颗粒直径下均大于重力一级, 它起着托起雾霾颗粒及平衡重力的作用, 限制了霾粒子在垂直方向上扩散; 粒子与粒子之间的斥力使粒子相互排斥不易扩散.

3) 在雾霾粒子浓度为100—750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 传输200 m时, 分析可知强度为 $2 \times 10^{20} \text{ W}/\text{cm}^2$ 的激光经衰减后的激光梯度力数量级恒大于其主要力(空气曳引阻力、范德瓦耳斯斥力、旋转升力)的数量级, 激光光梯度力完全可以破坏这些力的作用效果, 进一步证实了激光光梯度力完全可以破坏雾霾粒子的力平衡体系, 使雾霾粒子达到沉降条件.

综上分析, 激光光梯度力完全可以破坏雾霾粒子的力平衡体系, 消除雾霾是可行的. 可以设想在合适的参数范围内, 针对不同区域的雾霾浓度可以设计不同激光器驱散雾霾. 这种消除雾霾的方法不污染环境, 用普通的激光器就可以, 设备简单, 操作方便, 经济成本不高, 后续我们会用实验验证其可行性.

当然, 还有很多不足之处:

1) 本文主要根据距近地面300 m左右的雾霾层厚度, 因此, 这种研究方法在雾霾层高度上有一

定的局限性;

2) 本文针对西安市具体一个局域地区的雾霾浓度进行研究, 在探测范围上有一定的局限性, 后续我们将根据不同区域的雾霾粒子浓度, 调节激光强度以满足要求.

参考文献

- [1] Stuart A L, Sarntharm M, Sriwatanapongse W 2009 *Journal of the Air Waste Management Association* **59** 591
- [2] Xiao J H, Chen S H 2015 *Central South University of Forestry and Technology (Social Sciences)* **9** 79 (in Chinese) [肖建华, 陈思航 2015 中南林业科技大学学报 **9** 79]
- [3] Lu N, Zhou J B, Li Z G, Wang Y T, Jin W 2015 *Hebei Journal of Industrial Science and Technology* **32** 371 (in Chinese) [路娜, 周静博, 李治国, 王耀涛, 靳伟 2015 河北工业科技 **32** 371]
- [4] Chu M R, Li S X 2015 *Safety and Environmental Engineering* **22** 22 (in Chinese) [储梦然, 李世祥 2015 安全与环境工程 **22** 22]
- [5] Huo X, Pan S, Sun W 2006 *Opt. Technique* **32** 311 (in Chinese) [霍鑫, 潘石, 孙伟 2006 光学技术 **32** 311]
- [6] Lu X H, Huang K K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1409 (in Chinese) [陆璇辉, 黄凯凯 2001 物理学报 **50** 1409]
- [7] Di H G, Hou X L, Zhao H, Yan L J, Wei X, Zhao H, Hua D X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 244206 (in Chinese) [狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 阎蕾洁, 卫鑫, 赵欢, 华灯鑫 2014 物理学报 **63** 244206]
- [8] Lin J X, Wu J H, Liu A Q, Chen Z, Lei H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154209 (in Chinese) [林建潇, 吴九汇, 刘爱群, 陈喆, 雷浩 2015 物理学报 **64** 154209]
- [9] Yang W F, Li X M, Chen C, Liu R F, Du C L 2015 *China Environ. Sci.* **35** 2298 (in Chinese) [杨文峰, 李星敏, 陈闯, 刘瑞芳, 杜川利 2015 中国环境科学 **35** 2298]
- [10] Li Z M, Zhang Z X 2007 *Chin. J. Quantum Electron.* **24** 211 (in Chinese) [李忠明, 张镇西 2007 量子电子学报 **24** 211]
- [11] Yang R K, Ma C L, Han X E, Su Z L, Jian D J 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 415 (in Chinese) [杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 苏振玲, 鉴佃军 2007 红外与激光工程 **36** 415]
- [12] Nabouls A 2004 *Opt. Eng.* **43** 319

Mechanism of eliminating the aerosol haze particles by using laser gradient force

Zhang Yong-Yan¹⁾²⁾ Wu Jiu-Hui^{1)†} Zeng Tao²⁾ Zhong Hong-Min²⁾

1) (School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

(Received 12 October 2015; revised manuscript received 14 December 2015)

Abstract

The mechanism of eliminating the aerosol haze particles by destroying the force balanced system with laser gradient force is proposed in terms of the force balanced system exerted on the haze particles in the atmosphere, namely, rotary lift force balances gravity, and haze particles are balanced by repulsion between particles and particles. First of all, nonlinear equations about forces exerted on haze particles are obtained according to the Newton's second law, and these main forces (air drag force, van der Waals repulsion, rotary lift force) on the haze particles are solved by integrating these nonlinear equations by the Runge-Kutta method. The facts that the concentrations of particles with diameters in a range from 0.5 μm to 0.835 μm increased obviously in the haze particles test on December 17–25, 2013 and February 20–26, 2014 in Xi'an are verified. Secondly, the laser gradient force is analyzed and calculated in the homogeneous medium of haze particles. It is found that the system balanced by the force exerted on haze particles is destroyed completely by laser gradient force, because the magnitude of laser gradient force is always larger than any other forces exerted on haze particles. Therefore, it is feasible to eliminate these haze particles by laser gradient force. It is undoubted that the proposed way of eliminating haze particles is of great significance to establish harmonious surroundings for human.

Keywords: haze particle, light gradient force, laser

PACS: 42.65.Pc, 37.10.Vz, 42.60.Da, 77.55.df

DOI: 10.7498/aps.65.074203

† Corresponding author. E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn