

红外显微观测被俘获吸光性颗粒*

张志刚 刘丰瑞 张青川[†] 程腾 高杰 伍小平

(中国科学技术大学近代力学系, 中科院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230027)

(2013年6月14日收到; 2013年7月16日收到修改稿)

光镊技术被广泛应用在俘获和操纵微纳米尺寸颗粒, 目前被研究者普遍接受的俘获吸光性颗粒的机理为光泳力. 本文实现了对空气中被俘获的吸光性颗粒的红外显微观测. 当激光器功率为 1.0 W 时, 成功观测到被俘获墨粉颗粒 (直径约 7 μm) 和甲苯胺蓝颗粒 (直径约为 1—20 μm) 的温升约为 14 K, 为光泳力理论提供了强有力的证据. 另外, 首次用可见光显微镜和红外显微镜同时观测到被俘获颗粒的周期振荡现象, 并分析了振荡现象的产生机理.

关键词: 光镊, 光俘获, 红外显微

PACS: 87.80.Cc, 87.64.km, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.62.208702

1 引言

1970 年, Ashkin^[1] 首次实现了用激光束操纵微米尺寸颗粒, 到目前光镊技术仍然被广泛地研究^[2-5] 和应用^[6,7], 并发展了光阱力^[8-10] 的计算与分析、生成空心光束^[11-13] 以及偏振光镊^[14] 等方面. 应用光镊技术俘获的颗粒尺寸为微纳米量级, 分为透光性颗粒^[15,16] 和吸光性颗粒^[17,18] 两种. 目前国内对于俘获和操纵透光性颗粒方面的研究报道比较多, 而对于俘获和操纵吸光性颗粒方面的研究报道比较少. 对透光性颗粒的俘获和操纵主要在液体中进行, 通过平衡颗粒所受到的几个主要力: 散射力、梯度力以及重力^[19], 实现颗粒的稳定俘获和操纵. 对吸光性粒子的俘获和操纵主要在空气^[17,18] 中进行, 并且已经有研究者实现了捕捉和操纵吸光性颗粒^[17,18]. 应用光镊技术俘获大量的吸光性颗粒, 并对吸光性颗粒进行图像采集, 识别被俘获颗粒的数量与大小, 可应用在 PM2.5 检测^[20,21] 等方面. 对于俘获空气中吸光性颗粒现象, 研究者普遍认为是基于光泳力原理^[22,23]. Lewittes 等^[24] 进行了光悬浮吸光性颗粒实验, 并首次提出了实验

中操纵颗粒的原理为光泳力. 当激光照射到吸光性颗粒时, 被照射表面吸收光能温度升高. 颗粒与周围的空气存在热交换, 颗粒较高温度表面处的空气温度也高. 颗粒周围的气体分子做布朗运动撞击到颗粒表面并被颗粒反弹时, 温度较高表面的气体分子撞击和反弹时的频率以及平均动量大于未被照射表面的气体分子撞击和反弹的频率以及平均动量, 因此吸光性颗粒获得了沿光强梯度方向的净动量, 从而发生定向运动, 这就是光泳力原理. 然而到目前为止, 被俘获颗粒的温升现象一直没有被直接观测和报道过.

基于多年的红外成像研究经验^[25-27], 本文将红外显微镜应用到观测被俘获颗粒的红外图像. 文中第二部分采用高斯光束照射球差透镜, 在焦点处形成大量的暗区能量陷阱结构^[28], 用以俘获墨粉颗粒, 同时采用红外显微镜和可见光显微镜从不同角度同时拍摄, 并对墨粉温升进行分析. 第三部分采用暗区能量陷阱俘获甲苯胺蓝颗粒, 并进行红外显微观测和温升分析. 第四部分描述了实验过程中部分被俘获颗粒的周期性震荡现象, 并给出了合理的解释.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB302105)、国家自然科学基金 (批准号: 11072233, 11127201, 11102201) 和中国科学院科研装备研制项目 (批准号: YZ201265) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

2 红外显微观测被俘获墨粉颗粒

为了实现对大量吸光性颗粒的捕捉和操纵, 进行如下实验, 光路图见图 1. 激光器波长为 532 nm, 激光传播方向为 z 轴. 可见光显微镜和红外显微镜的中心轴线分别为 x 轴和 y 轴. 红外显微镜的参数为像素数 320×240 , 空间分辨率为 $22 \mu\text{m}$, 温度分辨率为 $\pm 0.05 \text{ K}$. 打印机墨粉颗粒具有很好的吸光性能, 可被看作为黑体 (辐射率接近 100%), 因此选用墨粉作为被俘获颗粒. 由激光器发出的光经过透镜 1 (直径 25.4 mm, 焦距 25.4 mm) 扩束后照射到

透镜 2 (直径 25.4 mm, 焦距 25.4 mm) 上, 并由透镜 2 会聚. 透镜 1 与透镜 2 的距离约为 600 mm. 在透镜 2 的加工过程中, 球差是不可避免的, 因此在透镜 2 的焦点处会出现大量的暗区能量陷阱 [22]. 暗区能量陷阱结构为中心光强低 (甚至为 0) 而四周光强高的瓶状结构. 由光泳力理论, 吸光性粒子能够被束缚在暗区能量陷阱中. 当激光器功率选 30 mW 时, 大量的墨粉颗粒被暗区能量陷阱俘获. 为了获得颗粒的红外像, 增大激光器功率到 1.0 W. 图 2(a) 和 (b) 分别为刚流入大量墨粉粒子时可见光显

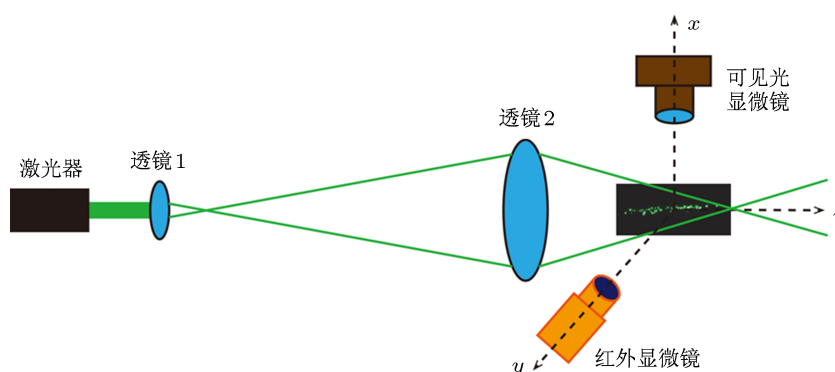


图 1 高斯光束俘获吸光性颗粒光路示意图

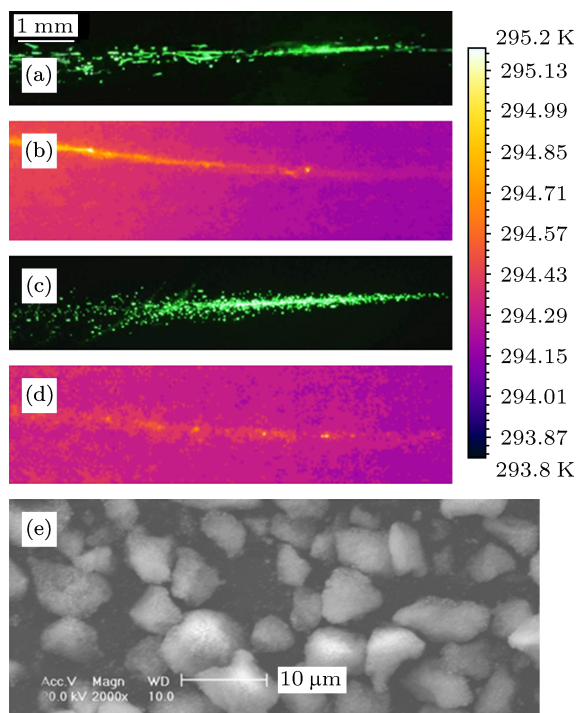


图 2 光泳力俘获墨粉颗粒. (a) 喷入大量墨粉颗粒时墨粉的可见光图像; (b) 喷入大量墨粉颗粒时墨粉的红外图像; (c) 墨粉颗粒被稳定俘获时的可见光图像; (d) 墨粉颗粒被稳定俘获时的红外图像; (e) 墨粉颗粒扫描电子显微照片

镜和红外显微镜拍摄图像, 图 2(c) 和 (d) 为稳定俘获时可见光显微镜和红外显微镜拍摄的图像. 图 2 右侧为红外显微观测图像对应的温标条. 墨粉的环境扫描电子显微照片见图 2(e), 墨粉形状为不规则的, 尺寸约为 $7 \mu\text{m}$.

当俘获腔体内喷入大量的墨粉颗粒时, 颗粒除了分布在激光照射区域, 还分布在腔体内未被照射区域. 由红外显微镜拍摄的图像显示未被俘获颗粒的温度与环境温度相同. 由图 2 中温标条可得, 被俘获颗粒最高温度比未被俘获颗粒温度仅高 1.4 K, 这是由红外显微镜的空间分辨率引起的. 红外显微镜的每个像素对应实际尺寸为 $22 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$, 而较大的墨粉的尺寸仅为 $7 \mu\text{m}$, 当采用红外显微镜对墨粉颗粒进行红外成像时, 较大的墨粉颗粒在红外显微镜记录平面的红外图像只占红外显微镜一个像素单元的 10%. 准确聚焦且尺寸较大 (约 $7 \mu\text{m}$) 的颗粒应该为记录温升的最大值处, 因此选用与环境温度相比温升最大值作为准确聚焦且尺寸较大颗粒的温升, 也即记录平面处一个像素的 10% 面积接收的辐射能量使得整个像素的温升为 1.4 K, 因此碳粉的实际温升应约为 14 K (1.4 K/0.1). 可见, 被

俘获颗粒的温升是很明显的,这与光泳力理论相符合,因此本实验为光泳力理论提供了强有力的证据.

图 2 红外显微镜拍摄图像中被俘获的墨粉颗粒数量远小于可见光显微镜拍摄图像中的墨粉颗粒数量,主要是由于红外显微镜的景深很短,当被俘获颗粒的位置不在红外显微镜清晰聚焦的物平面时,其辐射的红外能量被多个 CCD 像素同时接收,此时单个像素获得的红外能量产生的温升与环境噪声为同一量级,因此难以被观察到.

3 红外显微镜观测被俘获甲苯胺蓝颗粒

红外显微镜的空间分辨率制约了被俘获颗粒的红外成像效果,为了获得更好的红外成像效果,尝试用高斯光束俘获更大的颗粒物体.甲苯胺蓝为一种染色剂,可被看作为黑体(辐射率约为 100%),因此选用甲苯胺蓝颗粒作为被俘获颗粒.

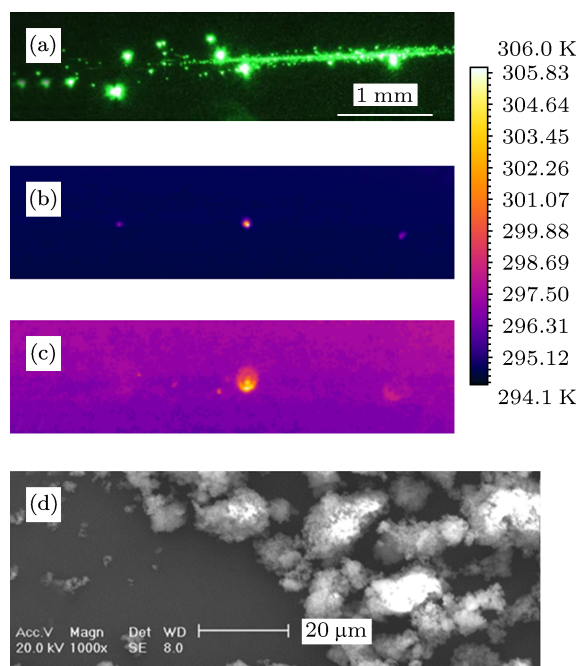


图 3 光泳力俘获甲苯胺蓝颗粒 (a) 稳定俘获甲苯胺蓝颗粒时的可见光图像; (b) 和 (c) 为稳定俘获甲苯胺蓝颗粒时不同聚焦位置处的红外图像; (d) 甲苯胺蓝颗粒的扫描电子显微照片

调节激光器功率为 1.0 W,在焦点区域生成大量的暗区能量陷阱用以俘获大量的甲苯胺蓝颗粒,其可见光显微图像如图 3(a) 所示.被俘获颗粒不仅有小颗粒,而且有较大颗粒.采用红外显微镜进行观察,当红外显微镜准确聚焦在中央较大颗粒时,红外图像如图 3(b) 所示,对应的温标条见图 3 右侧,此时红外相机采集到的被俘获颗粒的温度与

环境温度差值达到 11.9 K,远大于环境噪声,因此可以看到被俘获颗粒清晰的红外图像.受到红外显微镜景深较短的限制,能够观测到 3 个被俘获颗粒的红外图像,而其他的颗粒由于未能清晰聚焦,红外显微镜所能观测到的温升是很小的,以至于显示颜色与环境温度显示颜色基本一样,难以被观测出来.缓慢调节红外显微镜镜头与被俘获颗粒的距离,其他较大颗粒的红外图像也可以被红外显微镜观测到,见图 3(c).甲苯胺蓝颗粒的扫描电子显微图像见图 3(d),颗粒的形状为不规则的,直径约为 1—20 μm .甲苯胺蓝颗粒温升应约为 14.4 K (11.9 K / (20 μm / 22 μm)²).红外显微图像显示被俘获甲苯胺蓝颗粒吸收光能而产生温升,进一步验证了光泳力理论.

4 被俘获颗粒周期振荡现象

实验过程中,经常可以观测到一个奇特的现象.当颗粒被俘获时,一些颗粒为静止状态或准静止状态,而一些颗粒为周期振荡状态.图 4(a) 和 (c) 为可见光显微镜拍摄的图片,图 4(b) 和 (d) 为红外显微镜拍摄的图片.图中被圆圈圈出的颗粒为被稳定俘获后静止的颗粒,被方框圈出的颗粒为周期性振荡的颗粒.图 4(a) 和 (b) 中周期性振荡颗粒位于左侧,图 4(c) 和 (d) 中周期性振荡颗粒位于右侧.静态或准静态颗粒数目远大于周期振荡颗粒数目.另外我们进行了俘获对称颗粒(如球形颗粒)的实验,周期性振荡现象很难被观测到.

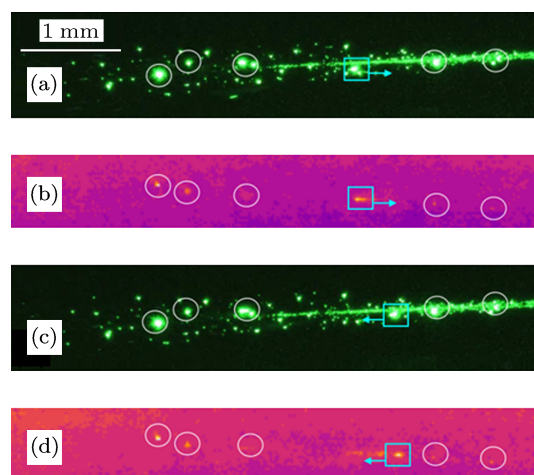


图 4 被俘获甲苯胺蓝颗粒周期振荡现象 (a) 和 (c) 为可见光显微镜观测到的周期振荡现象; (b) 和 (d) 为红外显微镜观测到的周期振荡现象; 圆圈圈出的颗粒为静态或准静态颗粒,方框圈出的颗粒为周期性振荡颗粒

为了描述被俘获颗粒周期振荡现象,我们给出了如下解释.在透镜的制造加工过程中,误差是不可避免的,并且实验过程中空气中的微小尘埃会粘附在透镜表面,因此焦点处的实际光场强度分布与理论分析的光场强度分布会略有差别,在焦点处有一定较大的暗区能量陷阱的生成概率.当颗粒进入大的暗区能量陷阱时,由于颗粒形状为不规则的,施加在其上的力也往往不平衡,因此颗粒获得了一个初始的动量,使得颗粒难以稳定在某一特定位置.此外,颗粒不能够突破能量陷阱,因此会在大的暗区能量陷阱内部做周期性振荡.产生大的暗区能量陷阱的概率远低于产生正常尺寸暗区能量陷阱的概率,因此周期振荡的颗粒数目远低于静态或准静态颗粒的数目.

5 总结

本文采用球差透镜生成大量的暗区能量陷阱场,并成功俘获了大量吸光性墨粉颗粒和甲苯胺蓝颗粒.实验中观测到了被俘获颗粒的周期振荡现象,其产生原因主要为透镜加工误差和透镜表面吸附的空气尘埃影响了焦点处的光场强度分布.采用红外显微镜成功观测到了被俘获颗粒的红外图像,当激光器功率约为 1.0 W 时,颗粒的温升约为 14 K,为光泳力理论提供了强有力的论据.

感谢昆山光微电子有限公司提供红外显微镜以及红外观测与分析软件.

- [1] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156
- [2] Sun W, Wang Y Q, Gao C M 2000 *Chin. Phys. B* **9** 855
- [3] Ren H L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 100701 (in Chinese) [任洪亮 2013 物理学报 **62** 100701]
- [4] Li B J, Xin H B, Zhang Y, Lei H X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0900126 (in Chinese) [李宝军, 辛洪宝, 张垚, 雷宏香 2011 光学学报 **31** 0900126]
- [5] Liu C X, Guo H L, Jiang Y Q, Li Z L, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1162 (in Chinese) [刘春香, 郭红莲, 降雨强, 李兆霖, 程丙英, 张道中 2005 物理学报 **54** 1162]
- [6] Brzobohatý O, Karásek V, Šiler M, Chvátal L, Čizmár T, Zemánek P 2013 *Nature Photon.* **7** 123
- [7] Yue L Y, Wang G W, Yao H L, Peng L X, Yuan Z G, Mo H 2007 *Acta Biophys. Sin.* **23** 75 (in Chinese) [岳粮跃, 王桂文, 姚辉璐, 彭立新, 袁志刚, 莫华 2007 生物物理学报 **23** 75]
- [8] Zhu Y Y, Ding X F, Gao Q J, Wang M L 2006 *Laser J.* **27** 69 (in Chinese) [朱艳英, 丁喜峰, 高秋娟, 王明利 2006 激光杂志 **27** 69]
- [9] Hu G J, Li J, Long Q, Tao T, Zhang G X, Wu X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030301 (in Chinese) [胡耿军, 李静, 龙潜, 陶陶, 张恭轩, 伍小平 2011 物理学报 **60** 030301]
- [10] Mao F L, Xing Q R, Wang K, Lang L Y, Li S X, Chai L, Wang Q Y 2004 *Acta Photon. Sin.* **33** 513 (in Chinese) [毛方林, 邢岐荣, 王锴, 郎利影, 李术新, 柴路, 王清月 2004 光子学报 **33** 513]
- [11] Zhang M Y, Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 047103
- [12] Xu Y Q, Zhou G Q, Wang X G 2013 *Chin. Phys. B* **22** 064101
- [13] Zhao C L, Lu X H, Chen H 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1676
- [14] Li X C, Sun X D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 119401
- [15] Zhou Z H, Zhang X L, Xu Y H, Wang X L, Zhang X Q, Zhu L Q 2013 *J. Beijing Info. Sci. Tech. Univ.* **28** 22 (in Chinese) [周哲海, 张晓林, 徐永恒, 王晓玲, 张晓青, 祝连庆 2013 北京信息科技大学学报 **28** 22]
- [16] Liu W W, Ren Y X, Gao H F, Sun Q, Wang Z Q, Li Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 188701 (in Chinese) [刘伟伟, 任煜轩, 高红芳, 孙晴, 王自强, 李银妹 2012 物理学报 **61** 188701]
- [17] Shvedov V G, Hnatovsky C, Shostka N, Rode A V, Krolikowski W 2012 *Opt. Lett.* **37** 1934.
- [18] Zhang P, Zhang Z, Prakash J, Huang S, Hernandez D, Salazar M, Christodoulides D N, Chen Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 1491
- [19] Li Q, Feng W L, Hu X M, Cao Q, Sha D G, Lin J M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 726
- [20] Zhang Q C, Zhang Z G, Liu F R, Liu S, Wu X P 2012 Chinese Patent 201210275567.0 (2012-08-03) (in Chinese) [张青川, 张志刚, 刘丰瑞, 刘爽, 伍小平 2012 专利申请号: 201210275567.0 [2012-08-03]]
- [21] Zhang Q C, Zhang Z G, Liu F R, Zhang Y, Liu S, Wu X P 2012 Chinese Patent 201210366305.5 (2012-09-27) (in Chinese) [张青川, 张志刚, 刘丰瑞, 张勇, 刘爽, 伍小平 2012 专利申请号: 201210366305.5 [2012-09-27]]
- [22] Pan Y L, Hill S C, Coleman M 2012 *Opt. Express* **20** 5325
- [23] Zhang Z, Cannan D, Liu J, Zhang P, Christodoulides D N, Chen Z 2012 *Opt. Express* **20** 16212
- [24] Lewittes M, Arnold S, Oster G 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 455
- [25] Miao Z, Zhang Q, Guo Z, Wu X 2007 *Opt. Lett.* **32** 594
- [26] Xiong Z M, Zhang Q C, Chen D P, Wu X P, Guo Z Y, Dong F L, Miao Z Y, Li C B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2529 (in Chinese) [熊志铭, 张青川, 陈大鹏, 伍小平, 郭哲颖, 董凤良, 缪正宇, 李超波 2007 物理学报 **56** 2529]
- [27] Cheng T, Zhang Q C, Chen D P, Wu X P, Shi H T, Gao J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 852 (in Chinese) [程腾, 张青川, 陈大鹏, 伍小平, 史海涛, 高杰 2009 物理学报 **58** 852]
- [28] Shvedov V G, Hnatovsky C, Rode A V, Krolikowski W 2011 *Opt. Express* **19** 17350

Infrared microscopic observation of trapped absorbing particles*

Zhang Zhi-Gang Liu Feng-Rui Zhang Qing-Chuan[†] Cheng Teng
Gao Jie Wu Xiao-Ping

(Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials of Chinese Academy of Sciences, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(Received 14 June 2013; revised manuscript received 16 July 2013)

Abstract

Optical tweezers technology is widely used to trap and manipulate particles, and the trapping mechanism generally accepted by researchers is due to the action of photophoretic force. In this paper, infrared microscopic observation of absorbing particles trapped in gaseous medium is first achieved. When the laser power is about 1.0 W, the temperature of trapped toner particles (diameter is about 7 μm) and toluidine blue particles (diameter is from 1 μm to 20 μm) rises by about 14 K, which provides strong evidence for the photophoretic force mechanism. In addition, the periodic oscillation of trapped particles is first observed by both optical microscope and infrared microscope, and the oscillation principle is analyzed.

Keywords: optics tweezers, optical trapping, infrared microscopy

PACS: 87.80.Cc, 87.64.km, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.62.208702

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB302105), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11072233, 11127201, 11102201), and the Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. YZ201265).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn