

活性浴中惰性粒子形状对有效作用力的影响*

宁鲁慧¹⁾²⁾ 张雪³⁾ 杨明成⁴⁾⁵⁾⁶⁾ 郑宁^{3)†} 刘鹏^{3)‡} 彭毅^{4)5)††}

1) (中国石油大学(北京), 油气光学探测技术北京市重点实验室, 北京 102249)

2) (中国石油大学(北京)理学院, 能源交叉学科基础研究中心, 北京 102249)

3) (北京理工大学物理学院, 北京 100081)

4) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 软物质物理实验室, 北京 100190)

5) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

6) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2024年5月8日收到; 2024年6月3日收到修改稿)

活性物质是典型的非平衡态系统, 其组成单元能够利用自身存储的能量或者周围环境的能量实现自驱动. 在活性系统中, 物体间的受力情况直接影响其结构和动力学行为, 因此深入了解物体间的有效作用力是理解活性物质一切复杂现象的基础. 本文通过光镊显微镜实验分别研究了活性大肠杆菌溶液中惰性球形聚苯乙烯胶体粒子间和板状粒子间的有效作用力, 发现球形粒子间有效作用力的性质一直是短程排斥力, 而板状粒子间的有效作用力则为长程吸引力, 这说明惰性粒子间的有效作用力受粒子形状的影响. 惰性粒子间的有效作用力主要来源于两部分的贡献, 即细菌-惰性粒子间的直接碰撞, 以及细菌运动产生的流场. 在实验上通过对比粒子之间、粒子外侧细菌的浓度和取向有序性发现, 球形粒子间的有效排斥力主要来源于细菌-粒子的直接碰撞, 而板状粒子间的长程吸引力则主要源于细菌流场的贡献. 本文通过光镊显微镜实验证明了惰性粒子间的有效作用力与惰性粒子的几何构型有关, 为调控活性物质中的动态自组装提供了实验支撑.

关键词: 活性物质, 光镊, 有效作用力, 粒子形状**PACS:** 82.70.Dd, 87.16.Uv, 87.64.M-, 87.80.Cc**DOI:** 10.7498/aps.73.20240650

1 引言

活性物质的共同特点是能够利用自身存储的能量或者周围环境的能量实现自驱动, 包括平动和转动. 自然界中小到微、介观尺度的微纳米马达、细胞组织、细菌菌落, 大到宏观尺度的颗粒体系、鸟群、鱼群、人群等都是活性物质. 由于组成活性

物质的个体之间、个体与环境之间存在复杂的相互作用, 活性物质在宏观上表现出一系列非常有趣且复杂的动力学行为, 如动态自组装、集体运动等^[1-5]. 在现实生活中, 无论是生物生命系统中的药物运输、癌细胞扩散的抑制、伤口愈合^[6-8], 还是操控微纳机器人进行微创辅助治疗^[9], 都需要我们从微观细节上深刻认知物体的受力情况.

而与平衡态不同, 活性物质中惰性物体的表面

* 国家自然科学基金(批准号: 12304245, 12374205, 12074406)、油气资源与工程全国重点实验室定向课题(批准号: PRE/DX-2407)、北京凝聚态物理国家研究中心开放课题面上基金(批准号: 2023BNLCMPKF014)和中国石油大学(北京)科研基金(批准号: 2462023YJRC031)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ningzheng@bit.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liupeng@bit.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: pengy@iphy.ac.cn

构型、尺寸、机械强度、以及活性粒子本身的活性大小等因素都会对惰性粒子间的有效作用力产生重要影响^[10-17]. 2014年, Harder等^[13]利用计算机模拟构建了二维活性浴系统, 研究了活性浴中不同形状的惰性粒子间的有效作用力, 发现惰性粒子的几何构型会对活性粒子的聚集产生影响, 从而使不同区域活性粒子的浓度不同, 进而导致形状不同的惰性粒子受力不同. 2020年, Liu等^[10]采用布朗动力学模拟和光镊实验研究了大肠杆菌溶液中惰性球形粒子间的有效作用力, 发现当距离稍微变大时, 惰性球形粒子间存在有效的排斥相互作用. 2022年, Paul等^[16]再次证明活性物质中球形粒子间的有效作用力为排斥力. 以上研究工作的微观机制均把惰性粒子间的有效作用力归因于惰性粒子附近活性粒子浓度的差异, 并没有考虑在活性体系中普遍存在的流体力学相互作用的影响. 近期, Ning等^[17]采用光镊显微镜实验和介观流体力学模拟研究了活性大肠杆菌溶液中板状粒子间的有效作用力, 发现板状粒子间的作用力为长程吸引力, 并证明此长程吸引力是由细菌流场引起的, 这是首次通过实验证明大肠杆菌产生的流场对惰性粒子间有效作用力的贡献. 随之而来的问题是, 在活性大肠杆菌溶液中, 惰性粒子形状如何影响球形惰性粒子间的有效作用力? 细菌-颗粒之间的力学碰撞和细菌运动所引发的流场对不同形状的粒子的作用力有何不同? 以上问题均需借助介观光镊显微镜实验进行深入细致研究.

早在1986年, Ashkin等^[18]就利用高数值孔径的物镜汇聚一束激光光束来构建稳定的三维能量势阱, 以此来俘获、操控微米尺寸的粒子. 光镊的工作原理是激光和物质间存在相互作用, 因此可以通过两者之间能量和动量的传递实现对物体的捕获和操控. 光镊不需要直接机械接触物体就可以实现对物体的俘获和操控, 所以光镊不会对样品产生机械损伤, 也不会对样品周围的环境产生污染和干扰. 除此之外, 光镊可操控物体的尺寸从几十纳米延伸至几百微米, 可测的作用力范围从飞牛至纳牛^[19,20]. 近年来, 光镊作为一种高精度的力学探测器也被广泛地用于微纳米物体的捕获和操控、蛋白质结构的折叠、以及物体间有效作用力的测量等领域^[10,16,17,20,21].

本文利用光镊显微镜实验研究了球形聚苯乙烯胶体粒子和 SUS (紫外曝光胶) 板状粒子在活

性大肠杆菌溶液中的有效作用力, 测得球形粒子间的有效作用力为短程排斥力, 而板状粒子间的有效作用力为长程吸引力, 其中, 我们依据参考文献^[12, 13, 17, 22]划分了惰性粒子间的有效作用力是短程作用力还是长程作用力. 通过分析惰性粒子附近细菌的浓度和取向分布, 发现两板状粒子距离较小时, 板状粒子间细菌的浓度大于板外, 同时相比两板外, 在两板间的大肠杆菌更趋向平行于板游动, 细菌流场贡献的吸引力大于细菌-板粒子间碰撞引起的排斥力, 因此两板间的有效作用表现为吸引力; 而对于球形粒子, 粒子间的细菌浓度大于粒子外部, 但是粒子间和粒子外细菌的取向区别不大, 说明球形粒子间的有效排斥作用主要来自于大肠杆菌-球形粒子间的碰撞效果.

2 实验系统

2.1 大肠杆菌培养

将大肠杆菌菌株滴入细菌培养液 (tryptone 1.2% (w/v), yeast 2.4% (w/v), glycerol 0.4% (w/v)) 中, 加入 0.1% (w/v) 的选择性抗生素 (ampicillin 100 mg/L), 随后将其放置在温度为 37 °C、摇动速率为 200 r/min 的恒温振荡器中培养 14—16 h. 然后, 将培养好的饱和细菌溶液用新的培养液稀释 100 倍, 同时加入 0.1% (w/v) 的选择性抗生素, 在温度为 30 °C、摇动速率为 200 r/min 的恒温振荡器中培养 3.5 h. 为了使大肠杆菌光控基因充分表达^[23,24], 加入 1 mmol/L 的 *sopropyl* β -D-thiogalactoside 和 10 μ mol/L 的 *ethanolic all-trans-retinal* 后再培养 3 h. 最后, 在室温下将细菌培养液放置在转速 650 g 的离心机中离心 5 min, 去除上层培养液, 将剩余的含有大量细菌的溶液使用超纯水离心清洗 3 次, 使细菌分散在超纯水中待用. 实验中, 大肠杆菌的长度为 (3.0 ± 0.11) μ m, 直径为 (1.0 ± 0.13) μ m, 在超纯水中的游动速度为 (10.8 ± 0.88) μ m/s^[17].

值得注意的是, 我们在实验中使用的大肠杆菌为光控大肠杆菌, 它的游动速度可以通过光强来控制^[23,24]. 为了降低大肠杆菌的活性差异对惰性粒子间有效作用的影响, 实验过程中将显微镜照明灯的电压统一设置为 9 V.

2.2 光镊测力

实验中使用的球形聚苯乙烯胶体粒子 (PS 粒子) 直径为 $7.0\ \mu\text{m}$ (采购于天津倍思乐公司), 通过对 SU8 光刻胶紫外曝光制备的板状粒子^[25] 尺寸为 $20.0\ \mu\text{m} \times 7.5\ \mu\text{m} \times 7.5\ \mu\text{m}$. 将少量的球形粒子或板状粒子与细菌溶液混合, 得到细菌体积分数不同的样品 (球形 PS 粒子样品中的细菌浓度分别为 $\phi = 0.05, 0.12$; 板状粒子样品中的细菌浓度分别为 $\phi = 0.07, 0.13$). 将细菌混合悬浮液密封在腔室内, 并在悬浮液中加入微量的、直径为 $10.0\ \mu\text{m}$ 的 PS 粒子, 使其作为样品上下玻璃板之间的间隔物, 以保持封闭腔室的样品厚度为 $10.0\ \mu\text{m}$. 使用明场显微镜结合高速相机拍摄视频数据 (物镜采用 $60\times$ 水镜, 相机拍摄速率为 30 帧/秒), 使用优化的粒子跟踪技术提取球形 PS 粒子、SU8 板状粒子以及细菌的位置和角度信息^[26], 并统计视频数据中的细菌数目, 进而得到待测样品的细菌浓度.

实验上使用两个光学势阱就可以实现对两球形粒子的固定并测量其有效作用力, 如图 1(a) 所示. 然而, 对于非球形的板状粒子, 如图 1(b) 所示, 需要采用多个光镊固定板状粒子^[17]. 为了防止实验过程中平板发生翻转, 采用 8 个光学势阱来固定每个平板. 由于光学势阱本质上是谐振势阱, 球形粒子 (或板状粒子) 在有效光阱中心的附近运动, 两粒子之间的质心与质心的瞬时距离记为 d . 在实验过程中, 仔细调整焦平面的位置, 使其在 z 方向上与腔室的上玻璃表面的距离为 $5.0\ \mu\text{m}$, 因此惰性粒子 (两球形粒子和板状粒子) 都大致位于整个样品在 z 方向上的中间位置, 而不直接接触腔室的上下表面. 在无细菌的超纯水中, 处于平衡态的两个惰性粒子间的有效作用力为 0, 此时两粒子质心之间的平均距离为 d_f . 采用 d_f 作为惰性粒子间有效作用力为 0 的参考距离. 在相同的光镊参数下, 活性大肠杆菌溶液中两惰性粒子质心之间的平均距离 $\langle d \rangle$ 与平衡状态 (无细菌的超纯水溶液中) 不同, 进而得到细菌溶液中粒子间距的平均偏移量为 $\langle \Delta d \rangle = \langle d \rangle - d_f$. 通过平均偏移量 $\langle \Delta d \rangle$ 和光学势阱的有效刚度系数 k (通过无细菌超纯水中的惰性粒子的位置概率分布求解), 可得每个惰性粒子受到的有效作用力为 $F_{\text{eff}} = k \langle \Delta d \rangle / 2$. $F_{\text{eff}} > 0$ 表示两粒子间存在有效排斥力, $F_{\text{eff}} < 0$ 则表示两粒子间为有效吸引力.

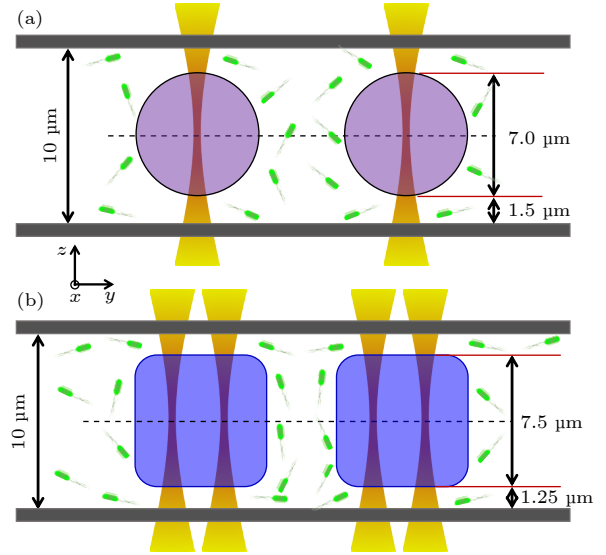


图 1 光镊实验测量惰性粒子间有效作用力的示意图 (a) 使用光学势阱将两个球形聚苯乙烯胶体粒子 (紫色圆) 固定在两盖玻片 (灰色厚实线) 之间; (b) 使用多个光学势阱将两平行板 (蓝色方块) 固定在两盖玻片之间; 实验观测平面设置在光镊的光腰位置在图中由黑色虚线标出

Fig. 1. Schematic diagram of optical tweezers measuring the effective force between passive particles: (a) Two spherical PS particles (purple circles) are trapped between two cover glasses (thick grey lines); (b) two parallel plates (blue squares) are trapped between two cover slides using multiple optical potential wells. The observation plane marked by the black dashed line in (a), (b) is set at the optical waist of the optical tweezers.

3 实验结果与讨论

3.1 光学势阱的有效刚度系数 k

光学势阱的有效刚度系数 k 取决于激光强度, 可以通过无细菌溶液中光镊约束下的惰性粒子的位移分布来求解. 在热平衡条件下, 谐振势场中 (沿 y 方向) 束缚粒子的位移 (Δy) 符合玻尔兹曼分布:

$$p(\Delta y) \propto \exp\left(\frac{-U(\Delta y)}{k_B T}\right) = \exp\left(\frac{-k\Delta y^2}{2k_B T}\right), \quad (1)$$

其中, Δy 代表惰性粒子相对于势阱中心在 y 方向上的位移, $k_B T$ 为热力学能量.

图 2 为超纯水溶液中, 球形 PS 粒子的位移在 y 方向上投影 Δy 的概率分布曲线. 蓝色虚线由 (1) 式拟合而来, 斜率对应 $\frac{-k}{2k_B T}$. 通过多次独立测量, 得到约束惰性球形粒子的光阱平均有效刚度系数 $k = 1.23\ \text{pN}/\mu\text{m}$, 约束惰性板状粒子的平均刚度系数 $k = 4.42\ \text{pN}/\mu\text{m}$ ^[17].

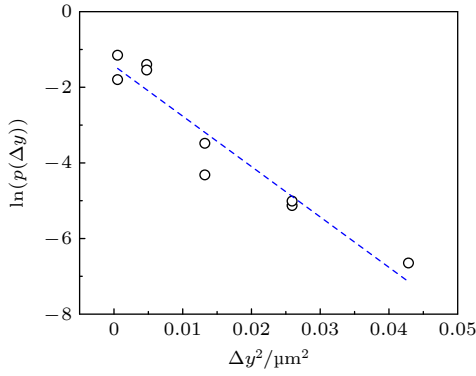


图 2 在无细菌的超纯水溶液中, 处于光学势阱中的球形粒子在 y 方向上位移 Δy 的概率分布图, 蓝色虚线是 (1) 式拟合的最佳线

Fig. 2. Displacement distribution of spherical particles trapped by tweezers in the y direction in the bacteria-free suspension. The blue dashed line represents the best fit to the Eq. (1).

3.2 惰性两球形和板状粒子间的有效作用力

根据惰性粒子间的有效作用力公式, $F_{\text{eff}} = k \langle \Delta d \rangle / 2$, 利用粒子的平均偏移量 $\langle \Delta d \rangle$ 和光学势阱的有效刚度系数 k , 可以计算粒子间的有效作用力 F_{eff} . 图 3(a) 和图 3(b) 分别显示了细菌浓度 ϕ 不同的情况下, 板状粒子和球形粒子间的有效作用力 F_{eff} 和粒子间距 d 的关系. 从图 3(a), (b) 可以看出, 球形粒子间的有效作用力为短程排斥力, 而板状粒子间则只表现出有效的吸引力. 当 ϕ 不变时, 随着粒子间距离的增大, 板状粒子间的有效吸引力单调减小; 在高浓度 $\phi = 0.13$ 的情况下, 即使板间距离增大至 $30 \mu\text{m}$, 两板间仍然存在有效吸引力, 说明此吸引力是长程作用力, 这一发现与文献 [17] 研究结果一致.

在活性细菌溶液中, 惰性粒子间的有效作用力来自于细菌-惰性粒子间的碰撞和流体力学作用这两部分的贡献. 在先前针对惰性球形粒子的研究中, 研究者仅仅考虑了细菌-粒子间碰撞的影响, 由于实验和模拟结果定性符合得很好, 所以一个合理的猜测是, 活性物质中球形粒子间的有效作用力主要来源于活性粒子-惰性粒子之间的碰撞贡献, 系统中的流体力学效应可以忽略 [10-16]. 然而对于细菌溶液中的板状粒子, 最新的光镊实验发现, 板状粒子间的有效作用力为长程吸引力, 该长程吸引力必须要考虑细菌运动引起的流体力学相互作用的影响. 事实上, 细菌流场引起的板间长程吸引力大于

细菌-粒子碰撞贡献的排斥力, 此结论已被介观流体力学模拟验证 [17], 与先前模拟中只考虑活性粒子-惰性粒子间碰撞得到的结果存在本质的不同 [11-13].

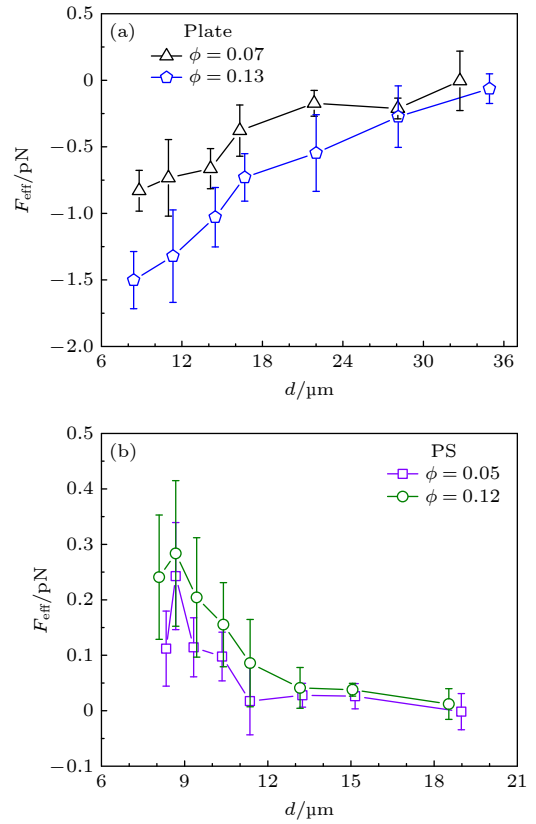


图 3 不同细菌浓度 ϕ 时惰性粒子间的有效相互作用力与惰性粒子间距离 d 的关系 (a) 板状粒子间 ($\phi = 0.07, 0.13$); (b) 球形 PS 粒子间 ($\phi = 0.05, 0.12$); 图中的符号和误差棒分别表示由 4—16 次独立测量得到的平均值和标准差
Fig. 3. Effective force between two passive particles as a function of the distance d of them at different bacterial concentration ϕ : (a) Two passive plates ($\phi = 0.07, 0.13$); (b) two spherical PS particles ($\phi = 0.05, 0.12$). The symbols and error bars represent the mean and standard deviation calculated over 4–16 independent measurements, respectively.

3.3 球形和板状粒子附近细菌的浓度和角度取向分布

为了更好地理解惰性粒子的形状对粒子间有效作用力的影响, 分别研究了光镊约束的两球形粒子、两板状粒子周围空间的细菌浓度和细菌方向取向序. 在沿 y 轴的不同位置 Y 处, 选取一系列平行于 x 轴 (平行于板) 的矩形区域 $7.0 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$ (板状粒子中选取的矩形区域为 $10.0 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$), 在不同的矩形区域内测量大肠杆菌的相对局域密度 ρ_r 和局域取向有序性参数 Q . 细菌的局域取向

有序性参数定义为 $Q = \langle |\cos \theta| \rangle$, 其中角度 θ 是细菌菌体长轴与 x 轴 (或板) 之间的角度, $\langle \cdot \rangle$ 表示对系统求系综平均. 细菌的相对局域密度 ρ_r 为细菌局域密度与平均密度的比值.

图 4 显示了两惰性球形粒子和板状粒子附近的细菌相对局域密度 ρ_r 和局域取向有序性参数 Q 的分布. 对于球形粒子, 在两粒子距离较小时 (图 4(a), (b)), 粒子间的细菌局域浓度是平均浓度的 3 倍以上, 表明细菌-球形粒子在粒子之间的碰撞频率远大于粒子外部的碰撞频率, 为球形粒子间的有效作用贡献排斥力; 随着距离的增大, 球形粒子间细菌的局域浓度与粒子外部浓度的差异减小, 直到两粒子间和粒子外部细菌浓度基本相等 (图 4(d)), 此时细菌-粒子碰撞的频率也相等, 细菌-粒子碰撞对球形粒子间有效作用力的贡献为零, 粒子间的有效作用力也为零. 特别注意的是, 在两球形粒子距离变化的过程中, 球形粒子间和粒子外部细菌的 Q 值基本相同, 表明细菌取向在球形粒子间和粒子外部基本没有区别, 细菌和球形粒子间的流体力学相互作用很弱, 可以忽略. 因此, 整个过程中, 细菌-粒子碰撞对球形粒子间有效作用力的贡献远远大于细菌流场的贡献, 这也解释了球形

粒子间有效作用力为短程排斥力的物理原因.

与球形粒子不同的是, 板状粒子间的有效作用表现为长程吸引力 (图 3(a)), 该有效吸引也应来自于细菌-板的碰撞和细菌流场两部分. 大肠杆菌游动产生的流场可以看成偶极子, 环境流体从细菌的头部和尾部流出, 通过向细菌腰部内流来补偿^[27,28]. 图 4(e)–(h) 显示了不同的板间距离时, 两板间和板外不同区域内细菌浓度和取向的分布^[17]. 在板间距离较小时 (图 4(e), (f)), 板间细菌的密度明显大于板外密度和体密度; 同时板内细菌的方向取向有序性参数 Q 也明显高于板外部. 随着板间距离的增大, 板内外的细菌密度和方向取向序之间的差异都在减小, 板间距离为 $21.89 \mu\text{m}$ 时 (图 4(g)), 两板间依旧存在明显的有效吸引, 此时板间细菌浓度和板外细菌浓度大致相等, 然而板内细菌的取向有序性参数 Q 远高于板外, 说明板状粒子间的有效吸引力源于板内细菌更大的 Q . 事实上, 板内细菌更喜欢平行于板游动, 结合大肠杆菌的流场特征, 可以证明是细菌流场诱导了板间的有效吸引力^[17]. 当板间距离为 $33.29 \mu\text{m}$ (图 4(h)), 两板间和板外的细菌浓度和 Q 都变得相同, 此时板间有效吸引力消失.

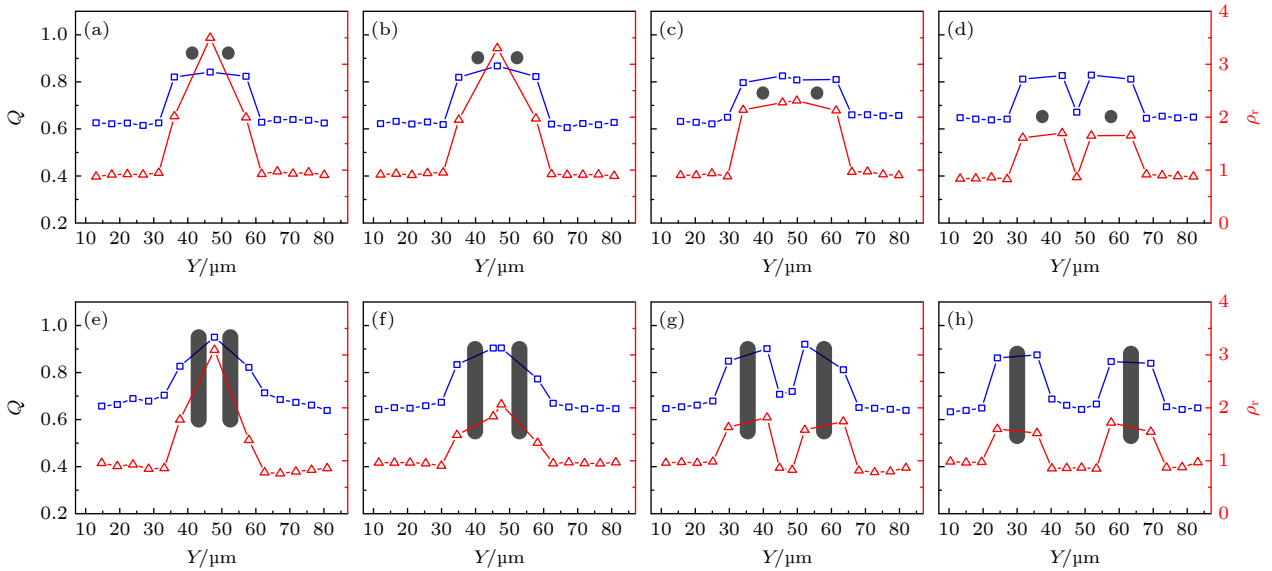


图 4 惰性粒子附近, 细菌的相对局域密度 ρ_r 和局域取向有序性参数 Q 的分布, 其中红色三角形和蓝色正方形分别表示 ρ_r 和 Q , 黑色阴影圆形和板状区域分别表示球形和板状粒子的相对位置; (a)–(d) 对应球形粒子, 其间距分别为 $8.68, 10.58, 15.47, 19.35 \mu\text{m}$; (e)–(h) 对应板状粒子, 其间距分别为 $8.95, 14.38, 21.89, 33.29 \mu\text{m}$

Fig. 4. Distribution of relative density of bacteria ρ_r (red triangles) and local orientation order Q (blue squares) around two passive spherical particles (black shaded circles) and plate-like particles (black plate-like area): (a)–(d) Correspond to spherical particles with the distances of $8.68, 10.58, 15.47, \text{ and } 19.35 \mu\text{m}$, respectively; (e)–(h) correspond to plates with the distances of $8.95, 14.38, 21.89, \text{ and } 33.29 \mu\text{m}$, respectively.

4 结 论

本文利用光镊显微镜实验,在活性大肠杆菌溶液中研究了形状不同(球形和板状)的惰性粒子间的有效相互作用力.实验测得球形聚苯乙烯胶体粒子间的有效作用力始终为短程排斥力,而SU8板状粒子间的有效作用力则为长程吸引力,这说明活性物质中惰性粒子间的有效作用力敏感地依赖于其几何构型.通过分析球形粒子和板状粒子周围大肠杆菌的相对局域密度 ρ_r 和局域取向有序性参数 Q ,发现当球形粒子间存在短程排斥力时,两球间细菌的 ρ_r 明显大于球外的区域,但是两球间细菌的 Q 与球外基本相同,说明球形粒子间的有效排斥力主要是由球间和球外细菌的密度差异引起的,细菌流场诱导的流体力学相互作用对球间有效相互作用的影响可以忽略.然而对于板状粒子则相反,细菌流场对两板间有效作用力的贡献起主导作用.当两板间存在有效吸引力时,板内的细菌浓度 ρ_r 和细菌取向 Q 都大于板外,细菌-板之间的碰撞贡献为排斥力,细菌流场贡献则为吸引力,两板间的净吸引力证明了细菌流场的主导作用.这些发现进一步加深了我们对活性物质介导的惰性物体有效相互作用的认识和理解,并从实验上揭示了惰性粒子的几何构型影响其有效相互作用的物理起源.此外,流体力学作用和活性粒子-惰性粒子的直接碰撞存在竞争关系,为合理调控粒子间的有效作用开辟了新途径,对活性系统中的动态自组装、相变、以及输运过程都至关重要.

数据可用性声明

本篇论文的关联数据可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00026> 中访问获取.

参考文献

[1] Zhang H P, Be'er A, Florin E L, Swinney H L 2010 *Proc.*

- Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107** 13626
- [2] Karamouzas I, Skinner B, Guy S J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 238701
- [3] Palacci J, Sacanna S, Steinberg A P, Pine D J, Chaikin P M 2013 *Science* **339** 936
- [4] Buttinoni I, Bialké J, Kümmerl F, Löwen H, Bechinger C, Speck T 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 238301
- [5] Petroff A P, Wu X L, Libchaber A 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 158102
- [6] Bechinger C, Leonardo R Di, Löwen H, Reichhardt C, Volpe G 2016 *Rev. Mod. Phys.* **88** 045006
- [7] Needleman D, Dogic Z 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17048
- [8] Gonzalez-Rodriguez D, Guevorkian K, Douezan S, Brochart-Wyart F 2012 *Science* **338** 910
- [9] Nelson B J, Kaliakatsos I K, Abbott J J 2010 *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **12** 55
- [10] Liu P, Ye S M, Ye F F, Chen K, Yang M C 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 158001
- [11] Ni R, Cohen Stuart M A, Bolhuis P G 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 018302
- [12] Ray D, Reichhardt C, Olson Reichhardt C J 2014 *Phys. Rev. E* **90** 013019
- [13] Harder J, Mallory S A, Tung C, Valeriani C, Cacciuto A 2014 *J. Chem. Phys.* **141** 194901
- [14] Leite L R, Lucena D, Potiguar F Q, Ferreira W P 2016 *Phys. Rev. E* **94** 062602
- [15] Feng F, Lei T, Zhao N R 2021 *Phys. Rev. E* **103** 022604
- [16] Paul S, Jayaram A, Narinder N, Speck T, Bechinger C 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 058001
- [17] Ning L H, Lou X, Ma Q L, Yang Y C, Luo N, Chen K, Meng F L, Zhou X, Yang M C, Peng Y 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 158301
- [18] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, Chu S 1986 *Opt. Lett.* **5** 288
- [19] Pesce G, Jones P H, Maragò O M, Volpe G 2020 *Eur. Phys. J. Plus* **135** 949
- [20] Volpe G, Maragò O M, Rubinsztein-Dunlop H, et al. 2023 *J. Phys. Photonics* **5** 022501
- [21] Bustamante C, Alexander L, Maciuba K, Kaiser C M 2020 *Annu. Rev. Biochem.* **89** 443
- [22] Baek Y, Solon A P, Xu X P, Nikola N, Kafri Y 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 058002
- [23] Walter J M, Greenfield D, Bustamante C, Liphardt J 2007 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **104** 2408
- [24] Peng Y, Liu Z Y, Cheng X 2021 *Sci. Adv.* **7** eabd1240
- [25] Hernandez C J, Mason T G 2007 *J. Phys. Chem. C* **111** 4477
- [26] Zheng Z Y, Han Y L 2010 *J. Chem. Phys.* **133** 124509
- [27] Drescher K, Dunkel J, Cisneros L H, Ganguly S, Goldstein R E 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 10940
- [28] Lauga E, Powers T R 2009 *Rep. Prog. Phys.* **72** 096601

Effect of passive particle shape on effective force in active bath^{*}

Ning Lu-Hui¹⁾²⁾ Zhang Xue³⁾ Yang Ming-Cheng⁴⁾⁵⁾⁶⁾ Zheng Ning^{3)†}

Liu Peng^{3)‡} Peng Yi^{4)5)††}

1) (*Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*)

2) (*Basic Research Center for Energy Interdisciplinary, College of Science, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*)

3) (*School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

4) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Laboratory of Soft Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

5) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

6) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

(Received 8 May 2024; revised manuscript received 3 June 2024)

Abstract

In active matter, the effective force between passive objects is crucial for their structure and dynamics, which is the basis for understanding the complex behaviors within active systems. Unlike equilibrium states, the factors such as the surface configuration, size, and confinement strength significantly influence the effective forces between passive particles. Previous studies have shown that the shapes of passive particles affect the aggregation of active particles, leading to different forces experienced by passive particles with different shapes. However, recently, a long-range attractive force between passive platelike particles, caused by the bacterial flow field instead of the direct bacterium-plate collisions in active bacterial suspensions, has been found. This raises an intriguing question: how does hydrodynamics affect the forces on passive particles of different shapes in different ways?

In this work, we investigate the effective forces exerted on passive spherical and plate-like particles immersed in bacterial suspensions by optical-tweezers experiments. The effective force between passive particles can be calculated from the formula, $F_{\text{eff}} = k \langle \Delta d \rangle / 2$, where $\langle \Delta d \rangle$ represents the difference in distance between the passive particles in the bacterial bath and those in the solution without bacteria, k is the effective stiffness of optical traps. The $F_{\text{eff}} > 0$ indicates a repulsive force between passive particles, and the $F_{\text{eff}} < 0$ represents an effective attractive force between passive particles. Our results demonstrate that the passive spherical particles experience short-range repulsion, while plate-like particles are subjected to long-range attraction. This highlights the substantial effect of particle shape on their effective forces.

The forces on passive particles are mainly attributed to two factors: direct bacterium-particle collisions and the bacterial flow field. The analysis of the bacterial concentration and orientation distribution around passive

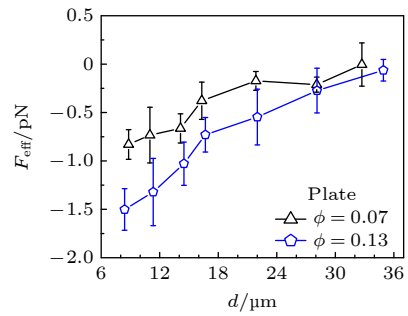
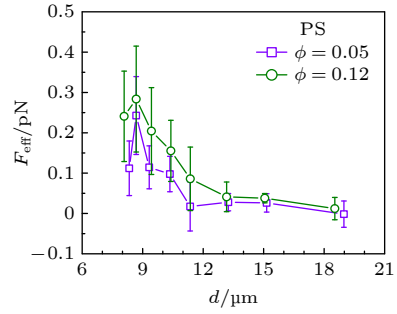
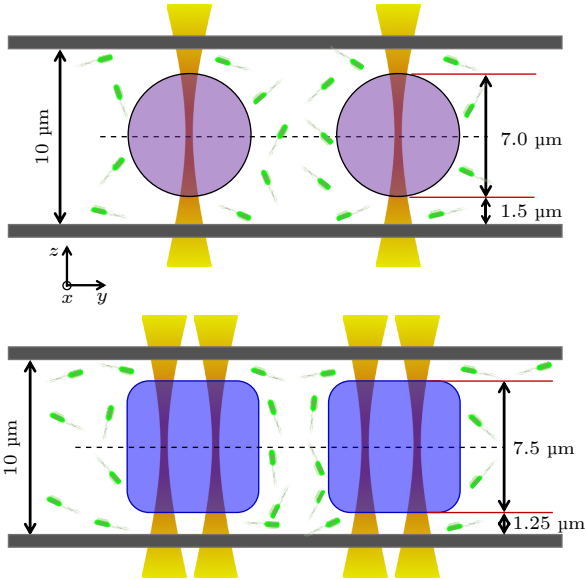
^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12304245, 12374205, 12074406), the National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering (Grant No. PRE/DX-2407), the Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, China (Grant No. 2023BNLCPKF014), and the Science Foundation of China University of Petroleum-Beijing, China (Grant No. 2462023YJRC031).

[†] Corresponding author. E-mail: ningzheng@bit.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: liupeng@bit.edu.cn

^{††} Corresponding author. E-mail: pengyi@iphy.ac.cn

particles reveals that for spherical particles, the concentration of bacteria between particles is higher than that outside the particles, but there is almost no difference in the orientation order between bacteria inside and outside the particles. This suggests that the effective repulsion between spherical particles is mainly due to the direct bacterial collisions. Conversely, for plate-like particles, the long-range attraction is primarily influenced by the bacterial flow field rather than their direct collisions, which is evidenced by the higher bacterial density and orientation order inside the two plates compared with those outside the two plates. This study provides strong evidence that the effective force between passive particles is shape dependent in active bath, and offers new insights into controlling active-directed assembly.



Keywords: active matter, optical tweezers, effective interaction, particle shape

PACS: 82.70.Dd, 87.16.Uv, 87.64.M-, 87.80.Cc

DOI: 10.7498/aps.73.20240650



活性浴中惰性粒子形状对有效作用力的影响

宁鲁慧 张雪 杨明成 郑宁 刘鹏 彭毅

Effect of passive particle shape on effective force in active bath

Ning Lu-Hui Zhang Xue Yang Ming-Cheng Zheng Ning Liu Peng Peng Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 158202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240650

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240650>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低惯性与高惯性活性粒子混合体系中的相分离现象

Phase separation phenomenon in mixed system composed of low- and high-inertia active particles

物理学报. 2023, 72(19): 190501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230792>

基于低损光学相变和超透镜的可控多阱光镊

Controllable multi-trap optical tweezers based on low loss optical phase change and metalens

物理学报. 2023, 72(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221794>

空间调制的驱动外场下活性聚合物的动力学行为

Dynamic behavior of active polymer chain in spatially-modulated driven field

物理学报. 2022, 71(24): 240501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221367>

自驱动杆状粒子在半柔性弹性环中的集体行为

Collective behaviors of self-propelled rods under semi-flexible elastic confinement

物理学报. 2020, 69(8): 080507 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200561>

椭圆波束对非均匀手征分层粒子的俘获特性研究

Analysis of trapping force exerted on multi-layered chiral sphere induced by laser sheet

物理学报. 2022, 71(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212284>

超强激光驱动的辐射反作用力效应与极化粒子加速

Laser-driven radiation-reaction effect and polarized particle acceleration

物理学报. 2021, 70(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210091>