

粗糙和光滑椭球胶体的受限扩散*

梁建¹⁾ 王华光^{1)†} 张泽新^{1)2)3)‡}

1) (苏州大学材料与化学化工学部, 苏州 215123)

2) (苏州大学物理科学与技术学院, 软凝聚态物理及交叉研究中心, 苏州 215006)

3) (苏州大学高等研究院, 苏州 215006)

(2024年4月23日收到; 2024年5月31日收到修改稿)

复杂受限环境中的扩散研究在凝聚态物理领域中备受关注. 胶体体系的出现, 为定量研究微观粒子的受限扩散提供了卓越的实验模型系统. 当胶体粒子的形状由球形变为椭球形时, 体系展现出各向异性的扩散动力学特性. 近年来, 研究者们发现粗糙表面能够诱发球形胶体体系异常的旋转动力学. 然而, 由于实验体系的局限性, 粗糙表面对椭球形胶体粒子的受限扩散的影响依然知之甚少. 本文建立了胶体受限扩散的模型体系, 由粗糙圆球胶体构成受限环境, 研究了粗糙和光滑椭球在其中的受限扩散. 当圆球的堆积分数较低时, 粗糙表面未发挥作用, 因此光滑和粗糙椭球的平动和转动扩散相近. 随着圆球堆积分数的增高, 粗糙表面之间发生互锁, 导致粗糙椭球的平动扩散明显慢于光滑椭球; 随着堆积分数的进一步增高, 由于粗糙表面产生的空间位阻效应, 粗糙椭球的转动扩散也显著慢于光滑椭球. 该工作表明粗糙表面会改变椭球的受限扩散, 为揭示复杂环境中具有粗糙表面物质的扩散规律提供了实验依据.

关键词: 胶体椭球, 粗糙粒子, 受限扩散, 动力学**PACS:** 82.56.Lz, 82.70.Dd, 07.60.Pb, 05.40.Jc**DOI:** 10.7498/aps.73.20240559

1 引言

扩散是自然界中普遍存在的物理现象, 也是物理学、材料科学和化学等领域中备受关注的研究课题^[1,2]. 由于影响扩散行为的因素繁多, 因此为了揭示扩散行为的物理机制和普遍规律, 需要考察各种因素对扩散的作用, 包括扩散物质本身的物理性质和扩散的环境等. 胶体体系因为具有与分子体系类似的热运动, 通过摄像显微技术能够观察和记录到单个粒子的运动信息^[3-5], 同时也可以调控粒子的物理性质, 所以为定量地研究各种因素对扩散行为的影响作用提供了优异的实验模型系统. 例如, 前

人建立了非球形粒子模型体系, 研究了粒子形状对扩散行为的影响. 非球形粒子会呈现平动和转动两种扩散行为, 并且这种非球形的物理特性会导致有趣的各向异性扩散动力学^[6-10]. 进一步研究发现, 对于非球形粒子, 当扩散介质的黏度增大或者扩散环境的受限作用增强时^[8], 尽管粒子的平动扩散和转动扩散都会减慢, 但两者的演化会呈现不同步的变化规律^[11-15], 即转动运动的减慢速率通常快于平动运动. 例如, 前人研究了椭球在圆球胶体构成的受限环境中的扩散行为, 发现平动和转动随受限增强的非同步演化, 并且表明椭球的受限扩散运动趋向于沿着长轴方向, 呈现强烈的各向异性扩散动力学^[10].

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074275, 11704269) 和江苏省高等学校自然科学基金 (批准号: 20KJA150008, 17KJB140020) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hgwang@suda.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangzx@suda.edu.cn

除了粒子形状,粗糙表面是粒子的另一个关键物理参数.粒子的粗糙表面会改变粒子与周围环境的相互作用,因此会对扩散行为产生重要影响^[16-19].目前的研究集中于粗糙表面对圆球粒子扩散的影响.当堆积分数较高时,粗糙圆球在其近邻粒子构成的受限环境中扩散运动,粒子的粗糙表面之间发生互锁(locking),从而改变了粒子的扩散动力学^[20].此外,粗糙表面也会改变圆球的剪切扩散行为,导致扩散系数与粒子堆积分数呈现非单调的演化^[21].然而,由于缺乏合适的实验体系,对于粗糙非球形粒子的受限扩散的研究仍然非常匮乏,非球形粒子的粗糙表面的影响作用依然知之甚少.因此,设计和建立胶体模型体系,从实验上认识和理解粗糙非球形粒子扩散的规律具有重要的科学意义.

本文制备了粗糙椭球和光滑椭球胶体粒子,对比研究了这两种粒子在由粗糙圆球胶体构建的受限环境中的扩散行为,从而揭示胶体粒子的粗糙表面对椭球胶体受限扩散的影响.研究发现,相比于光滑椭球,粗糙椭球的平动和转动都表现出更慢的扩散动力学行为,这种减慢作用在圆球的堆积分数较低时不明显,而在高堆积分数下表现明显.此外,随着圆球堆积分数的增加,粗糙椭球和光滑椭球的

平动扩散首先发生显著的差异,表明粒子的平动更容易受到粗糙表面的影响;当进一步增加圆球的堆积分数,二者的转动扩散也呈现明显差异,说明粗糙椭球的转动也受到了粗糙表面的强烈抑制.

2 实验过程和方法

实验中所用的粗糙圆球是3-(异丁烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(TPM)在直径为3 μm 的聚苯乙烯(PS)微球表面异相成核形成鼓包制备得到的(图1(a)),粒子表面的鼓包尺寸为300—600 nm.粗糙椭球(图1(b))和光滑椭球(图1(c))是分别通过物理拉伸粗糙圆球和光滑PS微球得到的,椭球的长径比均为3.6.为研究两种椭球在粗糙圆球体系中的扩散行为,将极少量(粒子数百分比约0.5%)粗糙椭球和光滑椭球与大量的粗糙圆球分散在水溶液中,取2 μL 混合液注入两个盖玻片之间,液滴通过毛细管力形成单层样品(图1(d)),然后用紫外光胶密封样品^[22].以这种方法制备的胶体体系与前人的椭球体系类似^[6],粒子间的相互作用近似于硬球相互作用.将样品倾斜放置数小时,使胶体粒子在重力作用下缓慢向一侧沉积,从而达到测量所需要的圆球堆积分数.之后,将样品平放于光

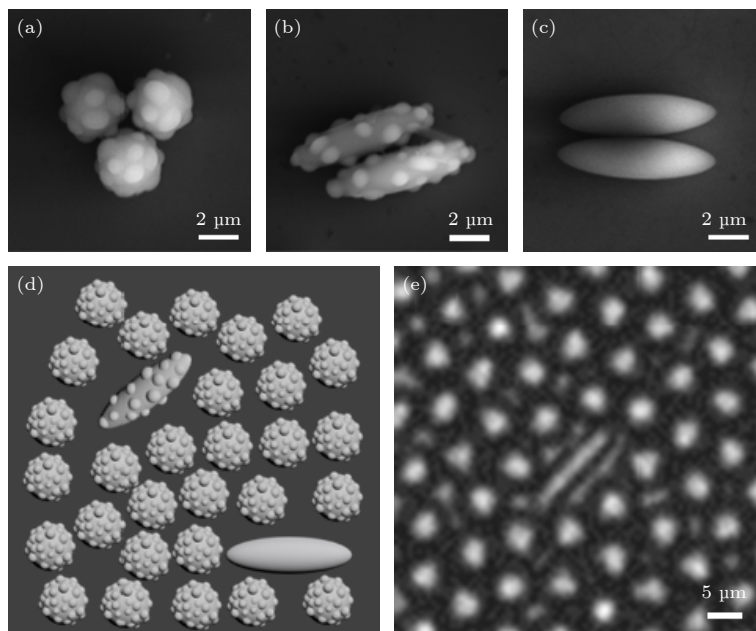


图1 制备的胶体粒子的扫描电镜图像 (a) 粗糙圆球; (b) 粗糙椭球; (c) 光滑椭球; (d) 单层样品的示意图; (e) 粗糙椭球在粗糙圆球体系($\phi = 0.74$)中的明场显微镜照片

Fig. 1. SEM images of the as-prepared colloidal particles: (a) Rough spheres; (b) rough ellipsoids; (c) smooth ellipsoids; (d) schematic diagram of a monolayer sample, rough and smooth ellipsoids in a dense packing of rough spheres; (e) bright-field micrographs of a rough ellipsoid among rough spheres ($\phi = 0.74$).

学显微镜台上 2—3 h 进行平衡, 然后对粒子的扩散运动进行拍摄和记录 (图 1(e)). 为了研究单个椭球粒子的扩散行为, 拍摄和后续的图片分析过程中, 要保证整个拍摄视野中只有一个椭球. 椭球粒子的位置和取向利用 ImageJ 开源图像软件进行识别和确定, 然后利用通用的粒子跟踪程序实现对图像数据进行定量的分析并计算各种物理量 [23]. 本文研究了不同粗糙圆球堆积分数下两种椭球的扩散行为. 粗糙圆球的堆积分数 ϕ 的计算公式为 $\phi = N\sigma/A$, 其中 N 是粗糙圆球的粒子数, σ 是单个粗糙圆球粒子的横截面积, A 表示整个视野的面积.

3 结果与讨论

为了定量地表征椭球的受限扩散动力学, 计算了在不同浓度圆球的受限作用下, 粗糙椭球和光滑椭球的平动和转动均方位移 (mean square displacement, MSD). 对于平动均方位移, $\text{MSD}_T = \langle \Delta r^2(t) \rangle = \langle |r(t) - r(0)|^2 \rangle$, 对于转动均方位移, $\text{MSD}_R = \langle \Delta \theta^2(t) \rangle = \langle |\theta(t) - \theta(0)|^2 \rangle$, 其中 $r(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别表示粒子在 t 时刻的中心位置和取向, $r(0)$ 和 $\theta(0)$ 是粒子在初始时刻的中心位置和取向. 粗糙椭球和光滑椭球扩散运动的均方位移如图 2 所示. 随着粗糙圆球浓度的增大, 受限作用增强, 椭球平动和转动的 MSD 都减小, 并且在高浓度下呈现出明显的次扩散行为 (subdiffusion), 这源于排斥体积效应, 椭球的运动空间和运动自由度受到周围粗糙圆球的限制, 导致其动力学减慢, 从而偏离自由扩散行为. 此外, 通过对比粗糙椭球和光滑椭球的 MSD, 结果发现在粗糙圆球浓度较低时, 由于椭球与周围圆球的相互作用较弱, 粒子表面粗糙度没有发挥作用, 因此两种椭球的扩散运动相近. 而随着粗糙圆球浓度的增加, 两种椭球的扩散差异越来越明显, 在图 2 中表现为同种颜色的实心与空心曲线距离增大. 特别是在高浓度下 ($\phi > 0.65$), 粗糙椭球的 MSD 显著小于光滑椭球的 MSD, 这是由于此时粗糙椭球表面会与粗糙圆球表面发生互锁, 从而抑制了粗糙椭球的扩散, 而光滑椭球则没有这种效应. 更有趣的是, 粗糙表面对平动和转动的抑制作用并不同步. 例如, 在 $\phi = 0.65$ 时, 图 2(a) 中代表平动 MSD 的两条曲线具有明显的差别, 表明粗糙椭球和光滑椭球的扩散行为的显著差异, 而图 2(b)

中代表转动 MSD 的两条曲线几乎重合, 表明二者的扩散行为差异仍然较小. 上述结果说明, 椭球粒子的平动扩散更易受到粗糙表面的影响.

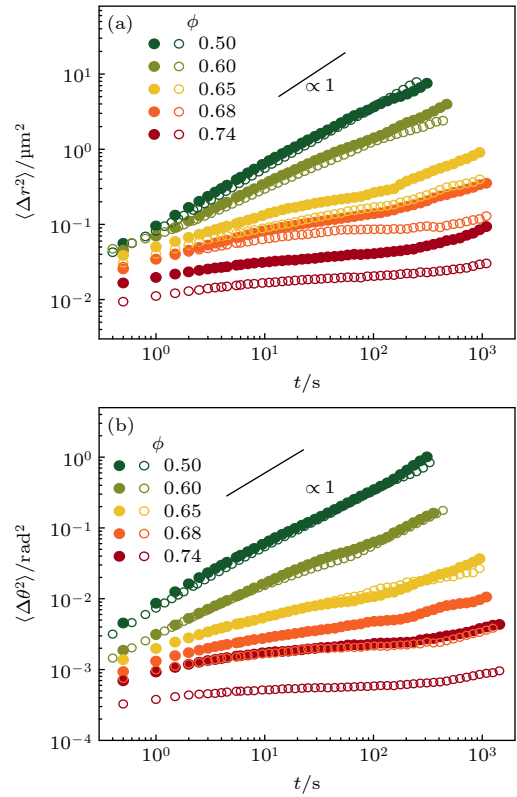


图 2 在不同圆球浓度 (ϕ) 下, 粗糙椭球和光滑椭球的平动均方位移 (a) 和转动均方位移 (b). 实心符号表示光滑椭球, 空心符号表示粗糙椭球

Fig. 2. Translational (a) and rotational (b) MSDs for rough (hollow symbols) and smooth (solid symbols) ellipsoids at different concentrations (ϕ) of microspheres.

为了进一步表征粗糙表面对平动和转动的不同抑制作用, 分析了粒子的扩散系数. 为了获取扩散系数, MSD 需要满足与时间呈一次方关系, 即 $\text{MSD} = 2dt^\alpha$, $\alpha = 1$, d 为空间维度. 在本文的体系中, 对于平动 $d = 2$; 对于转动 $d = 1$. 由于椭球受到周围圆球的“牢笼”效应, 即周围圆球限制了椭球的扩散运动, 因此 MSD 在较高浓度和中间时间尺度范围出现了显著的次扩散行为, 表现为 $\alpha < 1$, 这与大多数受限胶体扩散行为相一致, 具有一定的普遍性 [13,24]. 只有在更长的时间尺度, 粒子才可能从“牢笼”逃离, 因而呈现普通的扩散行为, 表现为 $\alpha = 1$ [13,24]. 从 MSD 的结果可以看出, 当 $\phi = 0.65$ 及以下时, 在长时间尺度呈现了普通的扩散行为. 同时, 在 $\phi = 0.65$ 时, 粗糙椭球和光滑椭球之间 MSD 的差异行为在平动和转动两种运动中呈现了

明显的不同. 因此, 我们给出了 $\phi = 0.65$ 和 $\phi = 0.60$ 的扩散系数结果(图 3). 值得注意的是, 在更高圆球浓度时, 椭球的运动受到了周围圆球强烈的限制, 因此椭球很难从“牢笼”逃离, 导致在实验测量范围内没有普通扩散行为, 不能获得扩散系数. 我们从长时间 (100—1000 s) 的 MSD 曲线中测量得到了 $\phi = 0.60$ 和 $\phi = 0.65$ 的扩散系数, 平动扩散系数 $D_T = \Delta r^2/(4t)$, 转动扩散系数 $D_R = \Delta \theta^2/(2t)$. 在 $\phi = 0.60$ 和 $\phi = 0.65$ 两种浓度下, 粗糙椭球的扩散系数均小于光滑椭球的扩散系数(图 3). 然而, 这种差别对平动和转动表现不同. 粗糙椭球的平动扩散系数 D_{TR} 显著小于光滑椭球的平动扩散系数 D_{TS} ($D_{TS} = 2.0D_{TR}$); 而粗糙椭球的转动扩散系数 D_{RR} 却与光滑椭球的转动扩散系数 D_{RS} 相差不多 ($D_{RS} = 1.2D_{RR}$). 这表明粗糙表面对平动扩散产生了较大影响, 强烈地抑制了椭球的平动扩散行为.

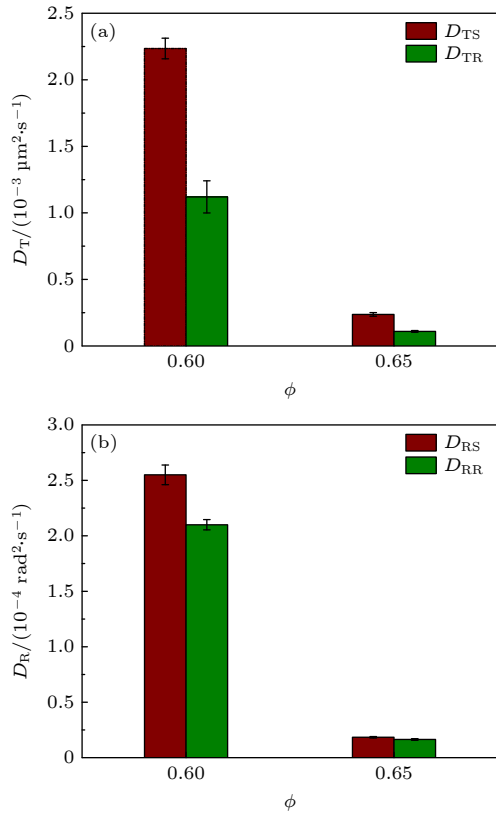


图 3 粗糙椭球和光滑椭球的扩散系数 (a) 平动扩散系数; (b) 转动扩散系数. D_{TS} 和 D_{RS} 表示光滑椭球的扩散系数, D_{TR} 和 D_{RR} 表示粗糙椭球的扩散系数. 误差是通过测量不同粒子的扩散系数得到的

Fig. 3. The diffusion coefficients of the rough ellipsoid (D_{TR} and D_{RR}) and smooth ellipsoid (D_{TS} and D_{RS}): (a) Translational diffusion coefficient; (b) rotational diffusion coefficient. Error bars are obtained by measuring the diffusion coefficients of different particles.

为了更为清晰地展示粗糙表面对于平动和转动的不同影响程度, 本文统计了椭球运动的位移概率分布. 图 4 给出了粗糙椭球和光滑椭球运动 10 s 时的平动和转动位移概率分布. 结果表明, 在 $\phi = 0.65$ 时, 两种椭球的平动位移分布已经出现了明显的差异, 即粗糙椭球的分布相对较窄(图 4(a)), 说明粒子的平动被粗糙表面所抑制; 而二者的转动位移分布却非常接近(图 4(b)), 表明此时粒子的转动受到粗糙表面的影响较小. 当 $\phi = 0.74$, 椭球的平动和转动都受到了粗糙表面的抑制, 对应的位移分布均比光滑椭球的要窄. 测量其他高浓度椭球运动的位移分布, 也会得到类似的结果. 这些进一步表明粗糙表面对椭球扩散有显著的阻碍作用, 并且对平动和转动两种运动的影响不同步.

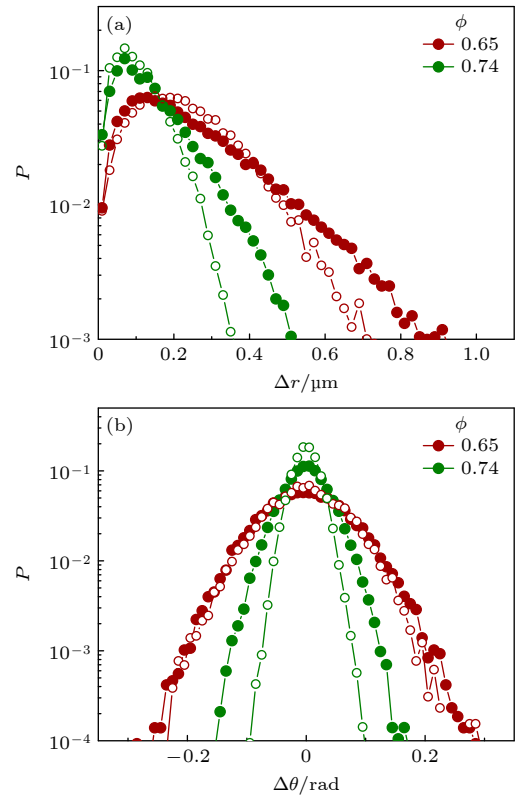


图 4 椭球运动 10 s 的位移概率分布 (a) 平动位移; (b) 转动位移. 实心符号表示光滑椭球, 空心表示粗糙椭球

Fig. 4. The probability distributions of the displacements of the smooth ellipsoid (solid symbol) and rough ellipsoid (hollow symbol) for lag time of 10 s: (a) Translational displacement; (b) rotational displacement.

为了进一步表征椭球的扩散动力学, 我们还计算了中间自散射函数 (self-intermediate scattering function) 和取向关联函数 (orientation correlation function), 分别用来表征平动和转动的动力学弛

豫行为. 其中, 中间自散射函数为 $F_s(q, t) \equiv \frac{1}{N} \left\langle \sum_{j=1}^N e^{iq \cdot [r_j(t) - r_j(0)]} \right\rangle$, $r_j(t)$ 表示粒子 j 在 t 时刻的位置, $r_j(0)$ 表示粒子 j 的初始位置, N 表示体系的粒子总数, q 为自散射矢量; 取向关联函数为 $L_n(t) \equiv \frac{1}{N} \left\langle \sum_{j=1}^N \cos n[\theta_j(t) - \theta_j(0)] \right\rangle$, $\theta_j(t)$ 表示粒子 j 在 t 时刻的取向, $\theta_j(0)$ 表示粒子的初始取向, N 表示体系的粒子总数, n 为正整数. 图 5 为粗糙椭球和光滑椭球在不同粗糙圆球浓度下的中间自散射函数 (取 $q = 3.6 \mu\text{m}^{-1}$) 和取向关联函数 (取 $n = 7$), 选取不同的 q 和 n 可以得到相似的结果 [25]. 从图 5 中可以直观地看出, 随着 ϕ 的增大, 粗糙椭球和光滑椭球平动和转动动力学函数的衰减都逐渐减弱, 弛豫时间逐渐变长, 这源于周围圆球的受限作用阻碍了椭球的扩散运动. 并且, 在 ϕ 较小时, 粗糙椭球和光滑椭球的动力学函数衰减相近, 表明二者的扩散行为相似, 这些结果与 MSD 的结果一致. 当 $\phi = 0.65$ 时, 粗糙椭球的中间自散射函数衰

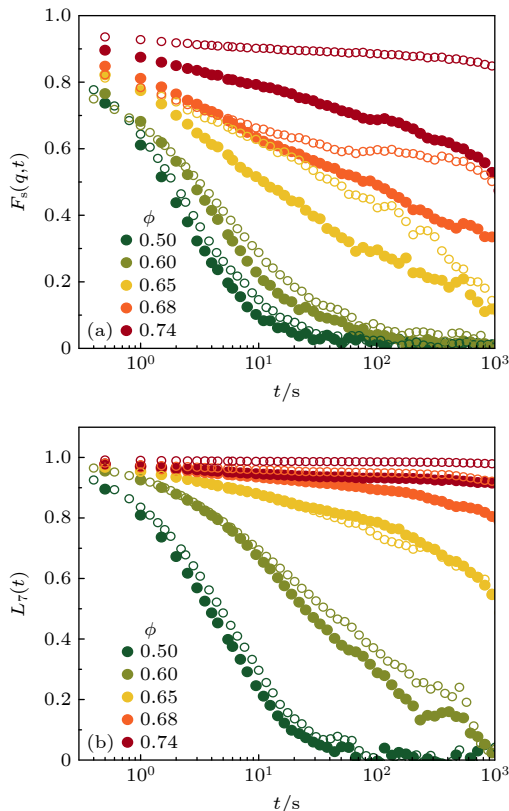


图 5 在不同圆球浓度 (ϕ) 下, 粗糙椭球和光滑椭球的 F_s ($q = 3.6 \mu\text{m}^{-1}$, t) 和 $L_7(t)$. 实心符号表示光滑椭球, 空心表示粗糙椭球

Fig. 5. F_s ($q = 3.6 \mu\text{m}^{-1}$, t) and $L_7(t)$ of the smooth ellipsoid (solid symbol) and rough ellipsoid (hollow symbol) at different concentrations (ϕ).

减明显慢于光滑椭球的, 说明此时粗糙表面已经对粒子平动弛豫产生了明显阻碍作用; 然而对于取向关联函数, 二者的衰减行为依然接近, 表明此时粗糙表面对粒子的转动弛豫影响较小. 随着 ϕ 的进一步增大, 粗糙椭球平动和转动的动力学衰减都比光滑椭球更弱, 说明了粗糙表面对于椭球胶体平动扩散和转动扩散都有抑制作用. 这些结果进一步表明粗糙表面会阻碍粒子扩散, 同时对平动和转动的影响并不同步.

4 总 结

本文利用摄像显微技术和粒子追踪技术, 深入研究了粗糙椭球和光滑椭球在粗糙圆球胶体构成的受限环境中的扩散行为. 通过计算椭球的均方位移、中间自散射函数和取向关联函数等物理量, 定量地表征了粗糙椭球和光滑椭球在不同浓度圆球体系的受限作用下的扩散动力学. 研究表明, 随着圆球浓度的增大, 受限作用增强, 粗糙椭球和光滑椭球的平动扩散和转动扩散都逐渐变慢, 这是由于椭球受到周围圆球的限制而引起的. 并且, 粗糙表面对椭球的平动和转动的影响不同步, 随着圆球浓度增加, 粗糙表面首先对平动产生显著的抑制作用. 随着圆球浓度进一步增加, 粗糙表面对转动也会产生阻碍. 因此, 在高浓度圆球的受限作用下, 粗糙表面导致椭球表现出更慢的平动和转动扩散行为. 本研究为理解胶体粒子的粗糙表面在受限扩散中的作用迈出了重要一步, 为揭示表面粗糙物体的扩散规律提供了实验依据.

参考文献

- [1] Weeks E R, Crocker J C, Levitt A C, Schofield A, Weitz D A 2000 *Science* **287** 627
- [2] Mitragotri S, Lahann J 2009 *Nat. Mater.* **8** 15
- [3] Anderson V J, Lekkerkerker H N W 2002 *Nature* **416** 811
- [4] Carrasco-Fadanelli V, Mao Y S, Nakakomi T, Xu H A, Yamamoto J, Yanagishima T, Buttinoni I 2024 *Soft Matter* **20** 2024
- [5] Doan D, Kulikowski J, Gu X W 2024 *Nat. Commun.* **15** 1954
- [6] Han Y, Alsayed A M, Nobili M, Zhang J, Lubensky T C, Yodh A G 2006 *Science* **314** 626
- [7] Chakrabarty A, Konya A, Wang F, Selinger J V, Sun K, Wei Q H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 160603
- [8] Zhou F, Wang H G, Zhang Z X 2020 *Langmuir* **36** 11866
- [9] Zhou H X, Rivas G N, Minton A P 2008 *Annu. Rev. Biophys.* **37** 375
- [10] Liu X Z, Wang H G 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 238201 (in Chinese) [刘心卓, 王华光 2020 *物理学报* **69** 238201]

- [11] Carbajal-Tinoco M D, Lopez-Fernandez R, Arauz-Lara J L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 138303
- [12] Boniello G, Blanc C, Fedorenko D, Medfai M, Ben Mbarek N, In M, Gross M, Stocco A, Nobili M 2015 *Nat. Mater.* **14** 908
- [13] Edmond K V, Elsesser M T, Hunter G L, Pine D J, Weeks E R 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **109** 17891
- [14] Peng Y, Lai L, Tai Y S, Zhang K, Xu X, Cheng X 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 068303
- [15] Kim J, Sung B J 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 158302
- [16] Cervantes-Martínez A E, Ramírez-Saito A, Armenta-Calderón R, Ojeda-López M A, Arauz-Lara J L 2011 *Phys. Rev. E* **83** 030402
- [17] He K, Khorasani F B, Retterer S T, Thomas D K, Conrad J C, Krishnamoorti R 2013 *ACS Nano* **7** 5122
- [18] Hsu C P, Mandal J, Ramakrishna S N, Spencer N D, Isa L 2021 *Nat. Commun.* **12** 1477
- [19] Moinuddin M, Biswas P, Tripathy M 2020 *J. Chem. Phys.* **152** 044902
- [20] Ilhan B, Mugele F, Duits M H G 2022 *J. Colloid Interface Sci.* **607** 1709
- [21] Zhang H, Pham P, Metzger B, Kopelevich D I, Butler J E 2023 *Phys. Rev. Fluids* **8** 064303
- [22] Zhang Z X, Yunker P J, Habdas P, Yodh A G 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 208303
- [23] Wang H G, Zhang Z X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 178705 (in Chinese) [王华光, 张泽新 2016 *物理学报* **65** 178705]
- [24] Xu Z Y, Gao L J, Chen P Y, Yan L T 2020 *Soft Matter* **16** 3869
- [25] Mishra C K, Rangarajan A, Ganapathy R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 188301

Experimental study of confined diffusion of rough and smooth ellipsoidal colloids*

Liang Jian¹⁾ Wang Hua-Guang^{1)†} Zhang Ze-Xin^{1)2)3)‡}

1) (*College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Soochow University, Suzhou 215123, China*)

2) (*Center for Soft Condensed Matter Physics and Interdisciplinary Research, School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

3) (*Institute for Advanced Study, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

(Received 23 April 2024; revised manuscript received 31 May 2024)

Abstract

The study of diffusion in complex confined environments has received great attention in the field of condensed matter physics. The emergence of colloidal systems provides an excellent experimental model system for quantitatively studying the confined diffusion of microscopic particles. When colloidal particles change from spherical to ellipsoidal shape, the system presents anisotropic diffusion dynamics. Recent studies have found that rough surfaces, another important physical parameter of colloids, can lead to unusual rotational dynamics in spherical colloidal systems. However, due to the lack of a suitable experimental system, little is known about the effect of rough surfaces on the confined diffusion of ellipsoidal colloidal particles. In this work, rough colloidal spheres, rough colloidal ellipsoids, and smooth colloidal ellipsoids are prepared, and then monolayer colloidal samples are prepared to study the confined diffusions of these two types of ellipsoids in dense packing of the rough sphere colloids. By calculating the mean square displacement, intermediate self-scattering function, and orientation correlation function of the ellipsoids, we quantitatively characterize the diffusion dynamics of rough and smooth ellipsoids in varying concentrations of rough spheres. The results indicate that the translational diffusion and rotational diffusion of rough ellipsoids and smooth ellipsoids slow down as the concentration of rough spheres increases. This is due to the confinement of the ellipsoid by the surrounding spheres. At low stacking fractions of spheres, smooth and rough ellipsoids show similar translational diffusion

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12074275, 11704269) and the Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (Grant Nos. 20KJA150008, 17KJB140020).

† Corresponding author. E-mail: hgwang@suda.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhangzx@suda.edu.cn

and rotational diffusion. However, as the stacking fraction of spheres increases, there is a significant difference in advection diffusion between rough ellipsoids and smooth ellipsoids. The advection diffusion of rough ellipsoids is significantly slower than that of smooth ellipsoids. This is because the rough surface strongly inhibits rotation, meaning that the rotational diffusion of the rough ellipsoids is significantly slower than that of the smooth ellipsoids. By extracting the diffusion coefficients for translation and rotation from the ellipsoid's long-time mean-square displacements, we find that at $\phi = 0.60$ and 0.65 , the diffusion coefficients of rough ellipsoids are smaller than those of smooth ellipsoids. The translational diffusion coefficient of the rough ellipsoids is notably smaller than that of the smooth ellipsoids. However, the rotation diffusion coefficient of the rough ellipsoids is not significantly different from that of the smooth ellipsoids. This suggests that the rough surface mainly affect translational diffusion, strongly suppressing the translational diffusion of the ellipsoids. By calculating the displacement probability distribution for ellipsoidal motion, we find that at $\phi = 0.65$, the translational displacements of rough ellipsoids have a relatively narrow distribution. This suggests that the translational motion of particles is suppressed by the rough surface. However, the distributions of rotation displacement for smooth ellipsoids and rough ellipsoids are very similar, indicating that the rough surface has less influence on particle rotation. At $\phi = 0.74$, the rough surface suppresses both the translation and the rotation of the ellipsoid, resulting in a narrower displacement distribution than in the case of smooth ellipsoid. These findings suggest that rough surfaces significantly impede ellipsoidal diffusion, leading the translational and rotational motions not to occur simultaneously. This study provides an in-depth understanding of the role of rough surfaces of colloidal particles in confined diffusion, as well as an experimental basis for explaining the diffusion laws of rough materials.

Keywords: colloidal ellipsoids, rough particles, confined diffusion, dynamics

PACS: 82.56.Lz, 82.70.Dd, 07.60.Pb, 05.40.Jc

DOI: [10.7498/aps.73.20240559](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240559)



粗糙和光滑椭球胶体的受限扩散

梁建 王华光 张泽新

Experimental study of confined diffusion of rough and smooth ellipsoidal colloids

Liang Jian Wang Hua-Guang Zhang Ze-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 148202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240559

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240559>

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

椭球胶体在圆球胶体体系中扩散行为的实验研究

Experimental study of diffusion behaviors of an ellipsoidal colloid in spherical colloid systems

物理学报. 2020, 69(23): 238201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201301>

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>

不对称双势阱中玻色-爱因斯坦凝聚体的动力学

Dynamics of Bose-Einstein condensation in an asymmetric double-well potential

物理学报. 2023, 72(13): 130303 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230419>

纯四次孤子光纤激光器研究进展

Research progress of pure quartic soliton fiber laser

物理学报. 2023, 72(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230868>

一种基于离散数据从局部到全局的网络重构算法

Discrete data based local-to-global network reconstruction algorithm

物理学报. 2021, 70(8): 088901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201756>

时滞和扩散影响下社交网络谣言传播动力学

Rumor propagation dynamics in social networks under the influence of time delay and diffusion

物理学报. 2022, 71(18): 180201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220726>