

L₁₀ 相 FePt 纳米颗粒及其纳米结构研究进展*

冯乙巳^{1,2,†} 蔡伟平¹ 李志刚¹

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230000)

(2 合肥工业大学化工学院 合肥 230000)

摘要 面心四方结构(L₁₀相)的 FePt 复合纳米磁性颗粒具有极高的磁晶各向异性性能、高饱和磁化强度、极小的超顺磁极限颗粒尺寸和优异的化学稳定性,是下一代超高密度垂直磁记录介质最有希望的候选材料,在药物定向载体、纳米检测和敏感器件、功能化细胞研究等方面也有广泛的应用前景.文章概述了基于化学热溶剂分解方法制备 FePt 纳米颗粒、结构、性质,总结并评述了其在纳米结构自组装和应用等方面研究的最新进展.

关键词 FePt, 磁性纳米颗粒, 自组装, 纳米结构

Current Research on magnetic nanoparticle FePt

FENG Yi-Si^{1,2,†} CAI Wei-Ping¹ LI Zhi-Gang¹

(1 Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, China)

(2 School of Chemical Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230000, China)

Abstracts In recent years FePt magnetic nanoparticles have attracted great interest because of their easy synthesis, chemical stability, and potential applications in high-density data storage, high performance permanent magnets and bioengineering. A review is presented of current research on the preparation, self-assembled nanostructures and applications of this form of FePt.

Keywords FePt, magnetic nanoparticles, self-assembly, nanostructure

1 引言

近年来,结构可控的磁性纳米颗粒的制备、表面处理、纳米结构组装、性质和应用研究受到广泛关注. L₁₀ 相的 FePt 复合纳米颗粒(即 FePt 具有面心四方结构,简称 fct 结构,Fe 原子层和 Pt 原子层沿 c 轴交替出现,以下简称为 FePt),由于其极高的磁晶各向异性性能($K_6.6-10\text{J}/\text{cm}^3$)、极小的超顺磁极限颗粒尺寸($D_{2.8-3.3}\text{nm}$)以及优异的化学稳定性而引起了人们极大的兴趣,作为永磁合金 FePt 纳米颗粒在下一代高密度垂直磁记录材料、药物定向载体、纳米检测和敏感器件、生物分离技术和功能化细胞研究等方面有广泛的应用前景^[1-4].

能够满足实际应用的超高磁性 FePt 纳米颗粒,必须具备以下结构特征^[4] (1) FePt 保持铁磁性时

最小粒径应大于 3.0 nm (2) FePt 的粒径分布要尽可能窄,粒径分布偏差一般小于 10%,以满足 FePt 组装有序纳米结构的要求 (3) FePt 从化学无序面心立方结构(fcc 相)转变为化学有序面心四方结构(L₁₀相)才具有很高的磁晶各向异性,而在高温相转变过程中,要尽量避免颗粒团聚 (4) 各 FePt 的组成尽量保持一致,以 $\text{Fe}_x\text{Pt}_{100-x}$ 表示时,满足 $40 > x > 60$ 条件.

通过磁控溅射、自组装、球磨法和电沉积等多种物理方法可制备 $\text{FePt}^{[5-9]}$;而 IBM 研究人员^[1,2]将制备 Co 纳米颗粒的高温化学热分解方法应用于制备单分散粒径为 3—10 nm 的 FePt,由此开创化学方法制备 FePt 新途径.该方法具有原料易得、设备简

2005-12-27 收到初稿,2006-04-13 修回

† 通讯联系人 Email: fengzirui@126.com

单、制备条件温和、易大规模工业化生产等优点,为研究组装各种 FePt 纳米结构和应用打下良好基础。本文将对该方面研究进展进行综述。

2 FePt 的制备

2.1 FePt 制备过程和影响因素

高温化学热分解法是制备金属纳米颗粒,特别是磁性纳米颗粒常用的方法,即在表面活性制备剂存在下,在高沸点溶剂中加热还原金属盐得到纳米颗粒。FePt 制备是热分解 Fe 金属有机化合物,同时以多元醇还原 Pt 化合物。典型制备过程是以 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 和 $\text{Pt}(\text{acac})_2$ (acac 为乙酰丙酮)为原料,在油酸和油胺的正辛醚溶剂中,在高纯惰性气体保护下高温(297°C)分解 $\text{Fe}(\text{CO})_5$,同时 1,2-十六醇还原 $\text{Pt}(\text{acac})_2$,原位得到面心立方结构(fcc)的 FePt,再在惰性气体保护下高温(500—700°C)退火,转变成面心四方结构(即 fct)的 L_{10} 相 FePt。

制备过程中,通过控制工艺条件,控制 FePt 组成、纳米颗粒粒径大小和分布、晶体结构,改变 FePt 表面吸附的活性剂或其他有机物,即对 FePt 表面进行表面处理来改变纳米颗粒表面性质,使 FePt 能够分散在不同极性溶剂中等。 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 是挥发性剧毒金属有机化合物,制备过程中工艺操作和控制困难,对 FePt 组成、粒径和分布有很大影响。以 $\text{Fe}(\text{acac})_2$ 、 $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CO})_4$ 和 $\text{Fe}(\text{OEt})_3$ [10—12] 等代替 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 为原料,毒性小,挥发性低,能够准确控制 FePt 组成,而且还原过程中 Fe 和 Pt 能同时形成,电子可直接从 Fe^{2+} 转移到 Pt^{2+} 上,无需另外的还原剂,使金属在原子级相互混合,不产生各金属分离的单独相或芯壳结构合金。

高温化学热分解制备 FePt 的粒径分布偏差一般可控制在 10% 以内,但是操作条件苛刻,控制困难,条件控制通常是经验性的。如果制备过程中直接加入还原剂时,体系中 Pt 晶核形成速度太快,FePt 粒径小;无还原剂时,减缓 $\text{Pt}(\text{acac})_2$ 被还原速度,使更多的原料沉积在晶核表面,得到大粒径的 FePt [13]。微波辅助制备 FePt 时,退火后可得到粒径达 23nm 的 L_{10} 相 FePt [14]。随着 FePt 粒径增大,纳米颗粒中 Pt 组分含量增加,因此制备大粒径和等原子摩尔比的 FePt 比较困难。Teng 等应用晶种诱导生长方法,以 Pt 纳米颗粒为晶核先制备 $\text{Pt}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 芯壳结构纳米颗粒,再还原得到大粒径的(17nm)FePt 纳米颗粒 [15,16]。

2.2 FePt 晶体结构控制

FePt 的晶体结构是影响其永磁性能的重要因素。只有 L_{10} 相的 FePt 才具有大的矫顽力和极高的磁晶各向异性,且 FePt 的有序化相转变过程中形成的纳米双相结构与 FePt 的磁性能之间存在着密切的关系。

化学溶剂热分解法原位制备的 FePt 是化学无序的 fcc 结构固溶体。近等原子比的 FePt 高温退火时发生相转变,FePt 从 fcc 结构转变成有序的 fct 结构。但是在退火过程中,并不确定生成单一晶体结构,而有孪晶结构生成,孪晶表面存在(111)和(001)晶面,并决定 FePt 的团聚和颗粒的形貌 [15]。在高沸点溶剂中热分解制备 FePt 时,可以直接得到化学有序的 L_{10} 相 FePt [11]。制备过程中引入第三种金属组成,如 Cu、Ag、Zr 和 Au 等,可以大大降低 FePt 相转变温度 [17—19]。这是由于掺杂原子占据晶格中铁或铂原子位置,降低相转变温度 [20]。应用激光脉冲辐射和离子辐射诱导方法也可实现 FePt 相转变,但激光脉冲辐射只能使 $\text{Fe}_x\text{Pt}_{100-x}$ 组成在 $40 < x < 60$ 之间,粒径较小的 FePt 产生相转变 [21,22]。FePt 在含氧气氛中退火时,FePt 中 Fe 组分易被氧化成 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ,并形成 L_{12} 相的 FePt_3 和 fcc 相的 Pt,因此在退火过程中,氧气浓度必须小于 1ppm [23,15]。用二氧化硅代替有机化合物包覆在 FePt 表面,退火过程中可有效防止 FePt 团聚而导致其形貌和组成改变 [24]。

3 FePt 的纳米复合颗粒和有序纳米结构组装

3.1 FePt 复合纳米颗粒

1991 年,Kneller 和 Hawig 提出了制备永磁材料的新原则 [25],指出当纳米晶粒的软磁相与硬磁相形成复合材料时,晶粒间将产生交换耦合作用导致剩磁增强效应,产生高的磁性能。对 FePt 进行处理,可得到各种芯壳结构的复合 FePt 纳米磁性颗粒 [26],并具有软磁相与硬磁相共格特点,增强 FePt 复合纳米颗粒的磁性。Chen 等 [3] 应用过量 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 制备出 FePt 芯- Fe_3O_4 壳复合纳米颗粒(用 $\text{FePt}@\text{Fe}_3\text{O}_4$ 表示),其形成包括成核、铁沉积、fcc 相 FePt 形成和氧化等过程(如图 1 所示) [13]。

3.2 FePt 表面化学处理

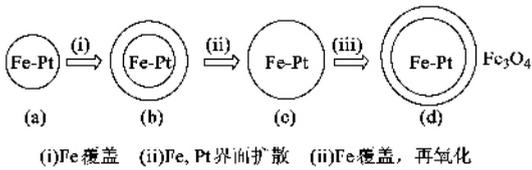


图 1 芯壳结构的 FePt/Fe₃O₄ 纳米复合颗粒形成示意图^[13]

化学热分解制备的 FePt 表面吸附一层有机物如油酸/油胺,可防止 FePt 团聚和表面金属原子被氧化,使 FePt 能够均匀分散在非极性有机溶剂中.许多研究表明,通过改变 FePt 吸附的表面活性剂,可改变 FePt 在不同极性溶剂中的分散性^[27-28].如表面活性剂用四甲基氢氧化铵后,在 FePt 表面形成双静电层,纳米颗粒能够均匀分散在水中.这类稳定分散在水溶液中的 FePt 在生物工程领域中应用具有非常重要的意义. FePt 表面的原子高度配位不饱和,在适当条件下容易同带有孤对电子的 S、N 和 O 原子直接形成共价键,得到各种表面功能化学处理的 FePt^[29,30].

3.3 FePt 二维有序结构的组装

FePt 二维纳米有序结构是高密度磁记录应用的基础,其组装方法和性质研究是 FePt 研究重点和热点. FePt 二维有序纳米结构组装必须解决两个关键问题:其一是纳米有序结构的控制,包括纳米颗粒的间距、超晶格结构等;其二是防止退火过程中 FePt 表面活性剂分解引起颗粒团聚,粒径分布变宽,破坏纳米结构有序性.目前,主要有以下几种组装纳米结构的方法.

(1) 溶剂控制蒸发法.将含有一定浓度的 FePt 溶液滴到经过表面处理的衬底上,慢慢蒸发溶剂,由于液体表面张力和 FePt 表面吸附的表面活性剂作用,可自组装成超晶格结构. FePt 的表面活性剂不同,得到的 FePt 超晶格纳米结构也有所不同(如图 2 所示)^[1,32,33].

(2) 高分子辅助层-层组合法^[34-37].该方法是将带有特殊基团的高分子负载在衬底上,然后衬底浸泡在 FePt 溶液中,高分子一端吸附在衬底上,带有官能团的一端延伸到溶液中,替换 FePt 表面上的表面活性剂,将 FePt 吸附在衬底上,形成 FePt 有序膜.如应用 3-氨基丙基二甲基乙氧基硅烷(APS)为中间层连接分子,可得到大面积 FePt 有序颗粒膜,同时衬底表面的连接分子层还能够阻止退火过程中 FePt 的团聚^[38-40].

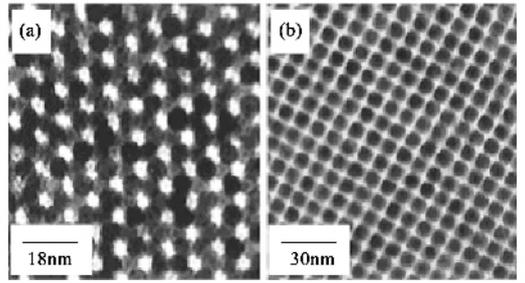


图 2 控制溶剂蒸发 FePt 自组装纳米结构 (a)油酸/油胺包裹的 FePt (b)己酸/己胺包裹的 FePt^[11]

(3) 胶体晶体模板法.即用聚苯乙烯微球组装的胶体晶体为模板,制备得到 FePt 的大孔三维有序纳米结构^[41](如图 3 所示);其特殊结构在光磁材料、高效催化剂和纳米传感器件等有潜在应用.通过三层溶液技术,也可诱导 FePt 生成微米数量级的六边形堆积超晶格胶体晶体^[42].

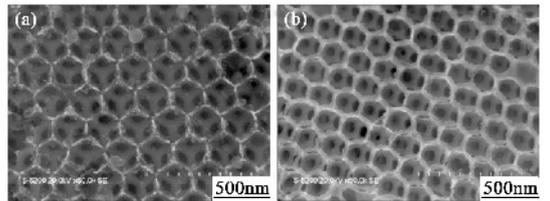


图 3 胶体晶体模板制备 FePt 有序孔膜 SEM 图^[40]

4 FePt 性质和应用

4.1 FePt 磁性

FePt 纳米晶粒具有超高的各向异性能和室温矫顽力,使其磁存储密度可高达 1 Tbit/in² 以上,引起人们的广泛关注和研究.研究主要集中在 FePt 纳米颗粒、FePt/铁氧体芯壳结构和有序纳米结构的磁性研究,以得到高矫顽力、高矩形比的磁记录介质等方面.

Ding 等^[43]研究发现,FePt 的磁回滞曲线对外界切换磁场表现为双峰分布,只有当纳米颗粒粒径大于一临界值时才能表现出高各向异性;临界值的大小与纳米颗粒退火前的粒径有关,而与退火条件无关,这可能是退火过程中 FePt 由 fcc 相向 fct 相转变时,颗粒边缘作为成核点,同时相转变是动力学控制过程.

对芯壳结构的 FePt@Fe₃O₄ 复合磁性纳米颗粒,改变芯部分直径和壳部分厚度比可以调节其磁性.在退火还原后得到的 FePt@FePt₃ 复合磁性纳米

颗粒中,由 FePt 组成的硬磁相芯和富铁的 Fe_3Pt 软磁相壳组成,硬磁相与软磁相之间的交换耦合作用,使软磁相具有一定的硬磁性,其磁矩沿着相邻硬磁相的易磁化方向排列,在因此复合纳米颗粒中,软、硬磁相之间的交换耦合作用不仅能增强剩磁 B_r ,且能提高矫顽力 H_c ,从而获得较高的磁能积,剩磁显著增强^[44]。

FePt 组装的三维有序孔膜纳米结构未退火时,有序孔膜的矫顽力在室温下可达 8 千多奥斯特,退火后有序孔膜的晶格结构取向会更好,室温下矫顽力高达到 1 万个奥斯特,是目前已知具有最大矫顽力的有序多孔纳米磁性颗粒膜^[41]。Kang^[45]等人制备出的具有很好(001)取向的 FePt 颗粒膜,表现出很强的垂直磁晶各向异性,垂直膜面时磁滞回线的矩形比接近 1,矫顽力高达 7 千多奥斯特,还有合理的曲率($a = 4\pi(dM/dH)H_c \sim 2$),而平行于膜面方向上,矫顽力只有 4 千多奥斯特,矩形比也不到垂直时的一半,只有 0.4 左右,可很好满足高密度垂直磁记录材料的要求,显示了良好的应用前景。此外他们还发现,随着 FePt 膜厚度的增加,矫顽力也显著增加。

4.2 FePt 在生物工程领域中的应用

磁性纳米颗粒在核磁共振成像造影剂、药物靶向输运和释放、免疫检测、蛋白质和核酸分离等生物工程领域有广泛应用前景,是目前的研究热点之一。与其他磁性纳米颗粒相比较,FePt 具有非常优良的磁性,极少用量的 FePt 就能实现药物靶向输运和蛋白质分离等,且 FePt 具有良好的物理与化学稳定性,对人体影响小。

表面处理的 FePt 可应用于固定、输运标记的蛋白质。如三乙酸胺基硫醇(Nitrilotriacetic Acid, NTA)通过共价键与 FePt 结合得到的磁性纳米颗粒,可方便快速地从溶解细胞中直接分离出纯蛋白质^[30]。与常规微珠柱色谱相比表现出更好的选择性,缩短分离时间,降低溶剂消耗,是一种简单、多用途试验平台,可应用于重组蛋白质的固定、输运和分离。

FePt 体积比通常的细菌小 2—3 个数量级,适当表面处理后可与细菌中的活性官能团牢固结合,并在磁场作用下富集,应用于病毒和细菌分离检测。如用 N,N -二万古霉素化脒胺酸表面处理的 FePt,可稳定均匀分散在水溶液中,用于快速(1 小时内)捕捉、分离和检测大肠杆菌^[46]和革兰氏阳性菌^[29],检测灵敏度远高于传统检测方法。

5 结束语

虽然科学工作者对 FePt 进行了大量研究,也取得了丰硕成果,但是仍然有以下问题需要深入研究:(1)制备过程中 FePt 的组成、粒径和粒径分布、晶体结构等可控制性,是 FePt 在工业化应用的基础;其中直接制备具有 L1_0 相的 FePt,无需退火相转变过程,防止 FePt 团聚和粒径分布不均,是极具挑战性和重要意义的工作。(2)FePt 表面吸附的活性剂对其物理和化学性质有较大的影响,对具有自由表面的 FePt 制备和性质研究也将是非常有意义的工作。(3)应用 FePt 组装具有实际用途的纳米器件,特别是用于下一代高密度存储的二维超晶格纳米结构过程中,在颗粒间距、厚度、纳米结构机械强度和磁性控制等方面都面临巨大挑战,需要进行大量深入细致的研究。

参 考 文 献

- [1] Sun S, Murray C B, Weller D *et al.* Science, 2000, 287: 1989
- [2] Sun S., Fullerton E E, Weller D *et al.* IEEE Trans. Magn., 2001, 37: 1239
- [3] M Chen, David E N, Yina H *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2003, 266: 8
- [4] Weller D, Moser A, Folks L *et al.* IEEE Trans. Magn., 2000, 36: 10
- [5] Li G Q, Takahoshi H, Ito H *et al.* J. Appl. Phys., 2003, 94: 5672
- [6] Shima T, Takanashi K, Takanashi Y K *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2003, 266: 171.
- [7] Stappert S, Rellinghaus B, Acet M *et al.* J. Cryst. Growth, 2003, 252: 440
- [8] Lyubina J, Gutfleisch O, Muller K H *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2005, 290–291: 547
- [9] Chu S Z, Satoru I, Kenji W *et al.* J. Phys. Chem. B, 2004, 108: 5582
- [10] Liu C, Wu X, Timothy K *et al.* J. Phys. Chem. B, 2004, 108: 6121
- [11] Luciano E M H, Nguyen H L, Sean R G *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2005, 127: 10140
- [12] Soichiro S, Shinya M. Chem. Mater., 2005, 17: 3705
- [13] Chen M, Liu J P, Sun S. J. Am. Chem. Soc. 2004, 126: 8394
- [14] Riki H, Aharon G. J. Mater. Chem., 2005, 15: 698
- [15] Dai Z R, Sun S, Z L Wang. Nano Lett., 2001, 1: 443
- [16] Teng X, Yang H. J. Am. Chem. Soc., 2003, 125: 14559
- [17] Chen C, Kitakami O, Okamoto S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 76: 3218
- [18] Kitakami O, Shimada Y, Oikawa K *et al.* Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 1104
- [19] Maeda T, Kai T, Kikitsu A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2002, 80: 2147
- [20] Kang S, Harrell J, David E N. Nano Lett., 2002, 2: 1033
- [21] Soichiro S, Shinya M. J. Phys.: Condens. Matter, 2004, 16: 6385
- [22] Lai C, Yang C, Chiang C C. APPL. Phys. Lett., 2003, 83: 4550
- [23] Ding Y F, Chen J S, Liu E *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 2005, 285: 443

- [24] Dinga Y , Majeticha S A , Kimb J *et al.* J. Magn. Magn. Mater. , 2004 284 336
- [25] Kneller E F , Hawig , IEEE Trans. Magn. Magn. , 1991 , 27 : 3558
- [26] Liu C , Wu X , Klemmer T *et al.* Chem. Mater. 2005 17 620
- [27] Vero'nica S , Maceira. Luis M , Liz M *et al.* Langmuir 2004 , 20 6946
- [28] Gu H , Ho P - L. Tsang K W T *et al.* J. Am. Chem. Soc. , 2003 , 125 : 15702
- [29] Xu C , Xu K , Gu H *et al.* J. Am. Chem. Soc. 2004 , 126 : 3392
- [30] Hong R , Fischer N O , Emrick T *et al.* Chem. Mater. , 2005 , 17 4617
- [31] Wang Y , Wong J F , Teng X *et al.* Nano Lett. , 2003 3 1555
- [32] Zhou W L , He J , Fang J *et al.* J. Appl. Phys. , 2003 , 93 : 7340
- [33] Chao L , Xiaowei W , Timothy K *et al.* J. Phys. Chem. B , 2004 108 6121
- [34] Cassagneau T , Mallouk T E , Fendler J H. J. Am. Chem. Soc. 1998 120 7848
- [35] J Machtle P , Eck D , Mohwald H *et al.* Langmuir , 1999 , 15 : 3256
- [36] Sohn B H , Seo B H. Chem. Mater. 2001 13 1752
- [37] Ostrander J W , Mamedov A A , Kotov N A. J. Am. Chem. Soc. 2001 123 1101
- [38] Mikihisu M , Yuichi S , Andrew C C Y *et al.* Langmuir 2004 , 20 11305
- [39] Sun S , Anders S , Hamann H F *et al.* J. Am. Chem. Soc. , 2002 , 124 2884
- [40] Andrew C C Y , Mikihisu M , Yuichi S. Appl. Phys. Lett. , 2003 82 2220
- [41] Ferry I , Toru I , Toshiyuki T *et al.* Nano Lett. , 2005 , 5 1525
- [42] Shevchenko E , Talapin D , Kornowski A *et al.* Adv. Mater. , 2002 , 14 287
- [43] Ding Y , Sara A M. Appl. Phys. Lett. , 2005 87 22508
- [44] Zeng Hao , Li J , Wang Z L *et al.* Nano Lett. , 2004 4 187
- [45] Kang K , Zhang Z G , Papusoi C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 82 3284
- [46] Hongwei G , Pak - Leung H , Kenneth W T *et al.* Chem. Commun. 2003 , 31 1966



· 物理新闻和动态 ·

高能量密度下的金

美国 Lawrence Livermore 实验室的科学家利用强激光将一小块金靶转换成由电子和正离子组成的等离子体. 在金样品分飞之前的瞬间, 物理学家记录到一些令人惊讶的结果. 最重要的发现是: 即使在高能量密度(10^7 焦耳/千克)的极端条件下, 金仍然保持所有金属所展示的能带结构 - 所容许的电子能量不是连续的而是处于一定的容许的能带中.

使用飞秒激光照射在金样品上, 科学家们得到最高的等密度的能量密度 10^7 焦耳/千克. 对保持原来体积不变的固体样品来说, 这是从未达到过的.(利用激光或核爆使固体靶爆聚曾达到过高能量密度.)

此外, 这项实验创造了加热速率的新记录——对固体中的电子达到每秒超过华氏 10^{17} 度. 形成固体晶格的离子较重, 变热的速率要慢得多.

这项研究工作可以看作是处于凝聚态物理和等离子体物理的交叉处的新兴课题的一部分——“温密物质”.

这一研究领域与另一个叫做高能量密度物理的课题有关, 该课题对于在高压科学、行星科学、地球物理、冲击压缩等领域工作的科学家来说是很感兴趣的. 有关论文发表在 Phys. Rev. Lett. , 2006 96 255003

(树华 编译自 Physics News Update , Number 782 #2 , June 27 , 2006)

暴雨突然降临

在夏天当我们外出郊游时, 常常会碰到在晴空万里时突然变天, 在几分钟内就下起了瓢泼大雨. 气象学家们对这种现象的起因归结于在大气中有积云的存在. 积云的对流导致了小尺度的湍流, 它们使微小的水珠相结合形成雨滴. 计算机模拟显示, 只有在湍流强度达到一定的阈值时, 小水珠间的碰撞率才会明显地增大. 但科学上却一直无法解释, 为什么碰撞率会以这种方式突然地增大.

最近英国和瑞典的科学家 M. Wilkinson , B. mehlig 和 V. Bezuglyy 三位教授共同寻找到了这个问题的答案. 他们发展了流动粒子在作无规流动时的一个简单的解析理论. 分析他们求得的解析解中可看到, 快速运动的粒子在移动过程中可以超过低速运动的粒子, 从而形成了一种“焦散交迭”(fold caustics)过程. 即在空间中, 处于同一地点却具有不同速度的粒子可以聚集于同一时刻. 这样一种相关性的运动促使了微粒间碰撞率的增大. 理论计算表明, 当斯托克斯数(Stokes number)增大时, 微粒间的碰撞率也会突发性增大并使湍流强度超过阈值. 斯托克斯数是一个无量纲的参数, 它与微粒的半径以及云层中湍流的信息有关. 因此 M. Wilkinson 教授认为, 当天空中积云的范围充分大时, 它就可能有足够强的湍流强度, 从而引发了在几分钟内突降暴雨. 所以这个新理论很好地解释了日常生活中常观察到的暴雨突然降临的物理机理.

(云中客 摘自 Physical Review Letters , 28 July 2006)