身边力学的趣话

花气袭人知骤暖[1)]

——从花香四溢谈流体的扩散运动

刘晋闻　马兴宇[2)]　姜　楠

(天津大学机械工程学院，天津 300072)

摘要　扩散运动是流体常见的运动形式之一。本文从中国古代诗歌中描写花香的佳句“花气袭人知骤暖”谈起，通过分析菲克定律和佩克莱数在流体扩散中的作用，讨论花香分子传播的基本原理，以此为引，漫谈流体力学中的扩散运动及其在机械、化工、生物卫生等领域的应用。

关键词　花香，扩散运动，菲克定律，佩克莱数

中图分类号: O351.2　　DOI: 10.6052/1000-0879-24-049

文献标识码: A　　CSTR: 32047.14.1000-0879-24-049

THE FRAGRANCE OF FLOWERS TOUCHES THE PEOPLE AS THE MESSENGER OF THE SUDDEN WARMTH: DISCUSSING THE DIFFUSION MOTION[1)]

LIU Jinwen　MA Xingyu[2)]　JIANG Nan

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract　Diffusion motion is a common form of fluid motions. In this paper, by discussing the ancient Chinese poem “The fragrance of flowers touches the people as the messenger of the sudden warmth”, we investigate the underlying physical mechanism of the diffusion phenomena of enchanting flower fragrance. By comparing the differences in concentrations of fragrance molecules, we find the Fick’s law and the Peclet’s number play essential roles in the principles of fluid diffusion. We then discuss the phenomena of diffusion in everyday life, as well as its various engineering applications.

Keywords　fragrance of flowers, diffusion motion, the Fick’s law, the Peclet number

1　诗情画意谈花香

鲜花是大自然的礼物，自古为人们所赞美。近日恰逢天津大学海棠花季，海棠花盛开，吸引了全国各地的游客拍照留念，正如图 1，海棠花不仅鲜艳迷人，而且花香四溢，不绝如缕。在古诗中，花香则是春意与灵感的信使，满载诗人对馥郁芳香的追求。南宋著名爱国诗人陆游（1125—1210）在《村居书喜》中写道[1]：

红桥梅市晓山横，白塔樊江春水生。
花气袭人知骤暖，鹊声穿树喜新晴。
坊场酒贱贫犹醉，原野泥深老亦耕。
最喜先期官赋足，经年无吏叩柴荆。

这首脍炙人口的七律诗，描绘出一幅恬淡超

2024-01-22 收到第 1 稿，2024-03-26 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (12372278)、翼型叶栅空气动力学国家重点实验室稳定支持项目 (61422010301)、气动噪声控制重点实验室联合项目 (ANCL20230108)、天津大学课程思政示范课程建设项目 (2023-2024) 和军科委“飞行器流动控制前沿科技及应用科普资源建设与实践”科普专项课题 (2024) 资助。

2) 马兴宇，博士，副教授，研究方向为实验流体力学。E-mail：xingyuma@tju.edu.cn

引用格式: 刘晋闻, 马兴宇, 姜楠. 花气袭人知骤暖——从花香四溢谈流体的扩散运动. 力学与实践, 2025, 47(1): 253-257

Liu Jinwen, Ma Xingyu, Jiang Nan. The fragrance of flowers touches the people as the messenger of the sudden warmth: discussing the diffusion motion. *Mechanics in Engineering*, 2025, 47(1): 253-257

然的田园风光。南宋时期，时局动荡，国乱当前，诗人满怀报国之志，却屡遭挫折，无奈空老山林。归隐期间，陆游创作了大量山水田园诗，流露出对山水自然的热爱和壮志难酬的豪情，本诗便是其中的代表之一。

图 1 天津大学的海棠花海

“花气袭人知骤暖，鹊声穿树喜新晴。”诗中颔联从嗅觉和听觉多感官进行描写，是画龙点睛之笔。早春时节，沉睡多日的花儿在春光温暖的怀抱中舒展了花朵，花香扑鼻而来，给人“袭人”之感，生动形象。清代巨著《红楼梦》中的姑娘“袭人”之名正是取自此诗。

但“花气袭人”这一表述，并非陆游诗中最早采用。早在唐代贾谟就曾在《赋得芙蓉出水》中写道“翻影初迎日，流香暗袭人”，芙蓉出水，微风拂过，空气中弥漫着淡淡的清香，香气萦绕在人们身旁；唐代皮日休也在《橡叹》中描写“山前有熟稻，紫穗袭人香”，一幅成熟稻田的美丽景象摆在了我们眼前；此外，苏轼也在《赠孙莘老七绝》中写道“乌程霜稻袭人香，酿作春风雪水光”，彼时的苏轼不满于政局的腐败，外调湖州之时恰逢旧友，于是寄情于安兴的锦绣山水，肆意于湖州的田园乡情，将对稻谷之香的赞美流露于笔尖。

而陆游却对“花气袭人”情有独钟，《村居书喜》后两年，退居越州山阴（今浙江绍兴）的陆游[2]送走了远方的友人，独自在窗边踱步，被窗外的花香吸引，写下了“花气袭人浑欲醉，鸟声唤客又成愁”。若干年后，陆游在《夜雨》里继续写：花气袭人娱独夜，雨声绕舍送丰年。句句含“袭人”，可见陆游对“花香袭人”的钟爱。欣赏着这些优美的诗句，我们如入芝兰之室，身临其境得享受花香。

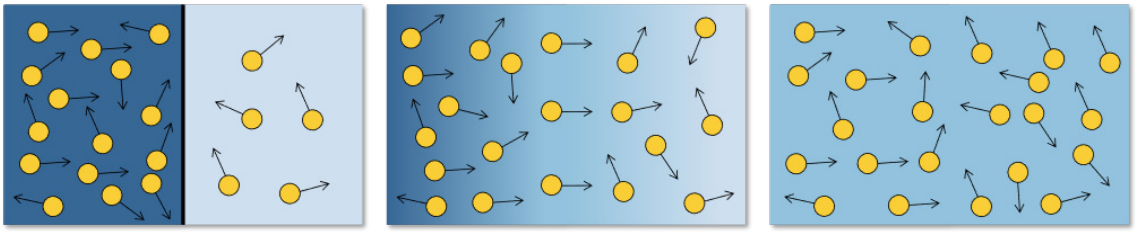
在吟诵优美诗句的同时，聪明的读者不禁会问，花香为什么会“袭人”呢？本文将从流体力学中的扩散现象出发，谈一谈花香是如何“袭人”的。

2 扩散运动的原理

2.1 扩散的原理

流体运动最常见的两种方式分别是对流和扩散[3]，其中对流运动指的是流体的宏观运动，而扩散运动是在微观层面上由分子热运动驱动的运动形式。

在均匀流体内部，无外作用时，分子随机做无规则运动，整体处于平衡状态，如图 2(a) 所示；当存在溶质浓度差时，分子会从密度大的区域向密度小的区域迁移，产生顺浓度的净通量，即扩散运动，最终会达到平衡状态，如图 2(b) 和 2(c) 所示。



(a) 扩散前 (b) 扩散中 (c) 扩散后

图 2 浓度差驱动的扩散运动示意图

扩散运动的数学模型通常基于菲克定律（the Fick’s law）

$$J = -D\nabla\phi \tag{1}$$

式中，J 表示扩散流密度，表示的是单位面积上单位时间内通过的粒子数量；D 为扩散系数，体现了扩散物质在介质中的扩散能力；$\nabla\phi$ 为浓度梯度，表示浓度标量的空间变化率；负号表示扩散流密度 J 的方向与浓度梯度 $\nabla\phi$ 的方向相反，

比如，当浓度沿着空间某一方向减小时，即 $\nabla\phi<0$，但粒子会顺浓度流动，即 $J>0$，因而需加上负号以体现这一关系。

在花香的传播过程中，花朵释放花香分子，使得花朵周边与远处产生了浓度梯度，即 $\nabla\phi$。在浓度梯度的作用下，花香分子向四周扩散传播，香远益清。除此之外，自然界中还有植物根系中养分的吸收、水中气体的溶解与传播、金属材料之间的相互渗透等现象都体现出了扩散现象。

但自然中，除了顺浓度扩散，也有逆浓度扩散的现象，比如第二相的析出、晶界溶质偏聚等，这从根本上说明驱动原子进行扩散的并非浓度梯度，而是化学势梯度。

根据热力学理论，扩散的实质是原子从高化学势向低化学势迁移以降低自由能的过程。化学势可表述为

$$\mu_i=\frac{\partial G_i}{\partial N_i} \tag{2}$$

式中，N_i 为单位物质的摩尔数，G_i 为单位物质的吉布斯自由能，$i=1,2,3,\cdots$。

基于式 (2)，我们给出扩散的热力学方程，即

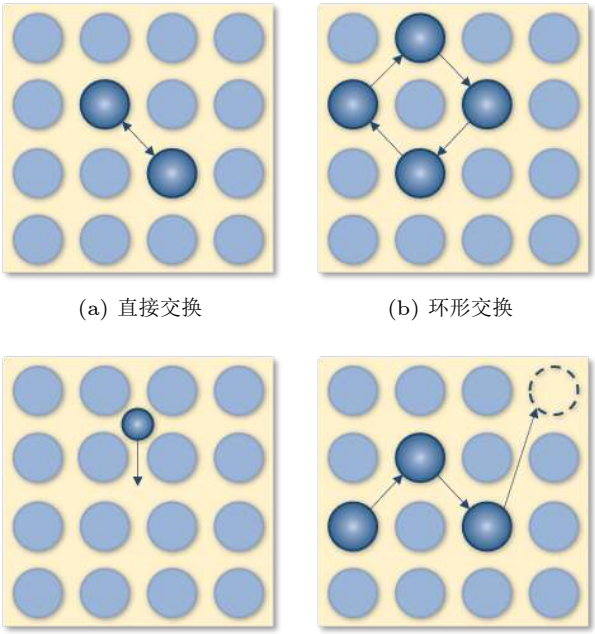
$$J=-K\nabla\mu \tag{3}$$

式中，K 为比例系数。一般情况下，化学势梯度 $\nabla\mu$ 方向与浓度梯度 $\nabla\phi$ 方向相同，此时扩散的热力学方程可近似为菲克定律，原子进行顺浓度的扩散，所以我们经常误认为浓度梯度是扩散的推动力；但有时，可能是由于外部作用力或者物理化学反应等，在化学势梯度的作用下，原子会进行逆浓度的扩散，此时化学势梯度 $\nabla\mu$ 方向与浓度梯度 $\nabla\phi$ 方向相反，这就解释了为什么化学势梯度才是推动原子进行扩散的根本原因。

2.2　扩散的微观机制

在微观世界中，晶体中的原子始终以平衡位置为中心振动着，振动频率约为每秒 $10^{12}\sim10^{13}$ 次，当部分原子获得了足够高的能量后，便会摆脱周围原子对它的束缚，发生迁移。大量原子的迁移则会产生扩散运动。

图 3 所示为常见的几种微观扩散机制。图 3(a) 所示为晶体中两个相邻的原子互相迁移到对方的位置，即进行了直接交换；图 3(b) 所示为晶体中相邻的多个原子轮流迁移到对方的位置，发生了环形交换；图 3(c) 所示为某一原子晶格中另一种原子从间隙中发生扩散，即间隙扩散；图 3(d) 所示为原子借空位的移动发生迁移，即进行了空位扩散，温度越高，金属晶格内的空位密度越大，空位扩散也就越顺利。



(a) 直接交换　(b) 环形交换　(c) 间隙扩散　(d) 空位扩散

图 3　扩散的微观机制

2.3　扩散与对流的关系

在流体运动的过程中，会同时发生对流和扩散，那么这两者的关系是什么呢？最早研究流体中对流运动与扩散运动关系的是法国物理学家 Jean Peclet（1793—1857），以擅长将科学与制造艺术相结合而著称，在热学方面也颇有造诣，其中重要成果之一就是提出表征对流速率与扩散速率的重要无量纲数佩克莱数（the Peclet number）

$$Pe=\frac{v}{u} \tag{4}$$

式中，v 为对流运动速率，u 为扩散运动速率。其在质量传递与热量传递方面具有不同的表达形式。在质量传递中，佩克莱数相当于雷诺数（Re）和施密特数（Sc）的乘积，即

$$Pe=\frac{Lu}{D}=Re\cdot Sc \tag{5}$$

在热量传递中，佩克莱数可写为雷诺数（Re）和普朗特数（Pr）的乘积，即

$$Pe = \frac{Lu}{\alpha} = Re \cdot Pr \tag{6}$$

式（5）和式（6）中， L 为特征长度， u 为平均流速， D 为质量扩散系数， α 为热扩散系数。当 Pe 数很大时（可以认为 $Pe \gg 1$）[4]，流体的对流运动远大于扩散运动，此时整个流体主要呈现为对流运动，而扩散运动相对可忽略。例如，夏天的午后，大气发生强对流，爽朗的风吹散闷热的感觉。当 Pe 很小时（ $Pe \ll 1$）[5]，扩散效应占主导作用，对流运动则可忽略不计。此时可将流体近似看为静止状态，单从扩散效应来研究流体内部质量或热量的交换。

3 扩散运动的应用

扩散运动不仅使人享受迷人花香，也在机械制造、医疗卫生、化工生产等工程应用中起到关键作用。

3.1 材料热处理

在工业生产中，金属热处理是将金属材料等置于特定介质中进行加热、保温等处理，通过改变金属材料的表面或内部结构来改善其性能的工艺方法。这种工艺方法可以应用扩散运动原理。例如，将金属工件等置于高碳气体中[6]，通过加热、保温等处理，推动碳原子通过扩散运动渗进金属材料，从而提高金属材料表面含碳量。这可有效提高金属工件的表层硬度、耐磨性等机械性能。

3.2 扩散成像

人体内的水分子无时无刻不在进行着扩散运动，并受生理环境变化的影响。病变如肿瘤等会改变水分子所处的生理环境，导致病变部位扩散状态发生变化。通过检测扩散运动的变化，可以用于诊断疾病。磁共振扩散加权成像技术通过扩散加权成像的方式[7]，能够测量水分子的扩散程度，反映出癌症情况，从而对疾病治疗有所帮助。如图 4 所示，基于该原理的磁共振机已广泛应用于肿瘤的诊断和分级，其效果显著。

3.3 化工原料制备

在石油化工、医药生产等领域，分子筛被广泛用于分子的催化、分离等过程。在分子筛的孔道结构中，分子的扩散运动状态直接影响着催化和分类效果[8]。例如，研究烃类化合物在分子筛孔道中的扩散行为，对于提高烃类化合物的选择性以及获得高纯度的产物具有重要的理论指导意义。

图 4 磁共振机

3.4 公共卫生学

在人流密集型场所，通过气溶胶传播的病毒传播速度较快、传染性较强，研究其传播机制，特别是通过扩散运动，对于疾病防控具有重要指导意义[9]。例如，在疫情期间，了解新冠病毒的扩散和传播机制，有利于我们采取更有效的隔离和防护措施。

3.5 微流控领域

微流控是指在微尺度上对流体等进行操控和运输，以完成高精度的实验操作，扩散在其中发挥着重要作用[10]。如图 5 所示，在狭小的微通道内，可利用扩散运动促进不同溶液和溶质之间的混合和分散；此外，在微生物分析时，可以通过调节分子或细胞在微通道中的扩散路径和效率，实现对样品成分的分析等。

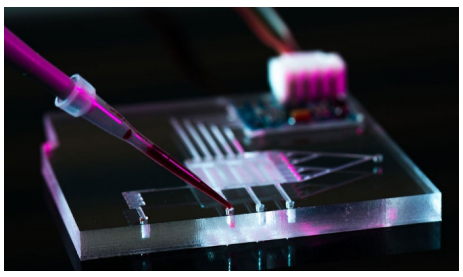


图 5 微流控的应用

4 总结

灿若星河的唐诗宋词不仅是瑰丽的文学宝库，

更是书写诗人自然哲思、凝练大自然力学原理的知识殿堂。本文从古代诗词中“花气袭人”的现象谈起，分析了流体中扩散运动的原理，漫谈自然界与工程中扩散效应的特点与应用。从古代诗词中汲取诗情画意的养分，灵活运用力学原理分析成因与特点，并以此指导工程实践，使我们回归力学教育与研究的初心与使命。

致谢 本文工作得到天津大学流体力学实验室的支持。本文引用了部分网络信息和图片，仅作为科普教育使用，特此致谢。

参　考　文　献

1 北京大学古文献研究所. 全宋诗. 北京: 北京大学出版社, 1998

2 王振东. 风如拔山怒, 雨如决河倾——漫话台风. 力学与实践, 2011, 33(1): 97-100

3 陈亚舟, 周志强, 彭杰. 毛细管出口表面活化剂包覆液滴形成过程研究. 力学与实践, 2020, 42(4): 405-412
Chen Yazhou, Zhou Zhiqiang, Peng Jie. Drop formation from a capillary tube in the presence of surfactant. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(4): 405-412 (in Chinese)

4 Mydlarski L, Warhaft Z. Passive scalar statistics in high-Péclet-number grid turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 358: 135-175

5 Lister JR. On penetrative convection at low Péclet number. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 292: 229-248

6 刘港, 刘静, 杨峰等. 钛合金化学热处理研究进展. 金属热处理, 2022, 47(8): 249-256
Liu Gang, Liu Jing, Yang Feng, et al. Research progress of chemical heat treatment of titanium alloys. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(8): 249-256 (in Chinese)

7 王嫚, 刘爱连, 赵莹等. 基于扩散张量成像的纹理分析鉴别肝细胞癌和肝内胆管细胞癌的价值. 磁共振成像, 2021, 12(8): 15-21
Wang Man, Liu Ailian, Zhao Ying, et al. The value of texture analysis based on diffusion tensor imaging in distinguishing hepatocellular carcinoma from intrahepatic cholangiocarcinoma. *Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2021, 12(8): 15-21 (in Chinese)

8 周媚, 曾浩桀, 卢俊宁等. 等级孔分子筛构筑及扩散过程强化研究进展. 化工进展, 2024, 43(1): 76-86
Zhou Mei, Zeng Haojie, Lu Junning, et al. Progress in the synthesis of hierarchical zeolites for diffusion intensification. *Chemical Industry and Engineering Pogress*, 2024, 43(1): 76-86 (in Chinese)

9 施烨闻, 张若愚, 张涛等. 病毒通过气溶胶传播扩散及感染概率模拟——以地铁车厢为例. 环境与职业医学, 2023, 40(11): 1240-1249
Shi Yewen, Zhang Ruoyu, Zhang Tao, et al. Virus aerosol transmission, dispersion, and infection probability simulation: a case study in subway carriages. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2023, 40(11): 1240-1249 (in Chinese)

10 崔嘉轩, 刘璐, 李东浩等. 外加场分离技术与微流控技术联用在微纳尺度物质分离中的研究进展. 色谱, 2021, 39(11): 1157-1170
Cui Jiaxuan, Liu Lu, Li Donghao, et al. Research progress in the application of external field separation technology and microfluidic technology in the separation of micro/nanoscales. *Chinese Journal of Chromatography*, 2021, 39(11): 1157-1170 (in Chinese)

(责任编辑: 胡　漫)