

# 微重力流体物理专题序

段 俐<sup>1)</sup>

(中国科学院力学研究所微重力实验室, 北京 100190)

(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

微重力流体物理主要研究微重力环境中流体的行为及运动规律以及重力变化对运动规律的影响. 微重力环境中, 浮力对流、重力沉降及分层、液体静压等极大地减小, 地面重力效应掩盖的次级效应凸显, 从而影响或改变流体运动机制与行为. 微重力流体物理研究关注微重力环境(包括低重力环境)中液体、气体或多相混合物以及分散体系等物质的流动、形态、相变及其运动规律和机理, 特别是在微重力环境流体热质运输表现出的新现象和新规律以及物理形态变化表现出的新机制. 微重力流体物理服务于航天器极端条件下的热质管理与运输、空间材料制备等空间应用, 具有极强的应用背景, 其典型科学问题包括如下内容.

## (1) 扩散及输运现象

扩散过程是自然界中普遍存在的不均匀的温度场和浓度场趋于均匀化的过程. 热扩散满足 Fourier 定律, 即热通量与温度梯度成正比. 浓度扩散满足菲克第一扩散定律, 即浓度通量与浓度梯度成正比. 同时与温度通量和浓度通量有关的扩散是交叉扩散, 是耦合扩散过程. 浓度梯度对热通量的贡献称为 Dufour 效应, 温度梯度对浓度通量的贡献称为 Soret 效应.

在重力场中, 要获得纯粹的扩散过程很困难, 因为不均匀的温度场或浓度场受到重力的作用会产生对流, 扩散过程与对流过程相互耦合在一起. 在理论上依据扩散方程研究扩散问题, 扩散系数是关键参量, 地面难以精确测量. 在微重力环境中, 有可能产生纯扩散过程. 扩散问题是微重力流体物理的典型科学问题, 精确测量扩散系数和 Soret 系数也是化学、生物、材料等学科领域的需求.

## (2) 对流

对流是自然界中普遍存在的现象. 在地面重力环境中, 由于温度梯度或浓度梯度导致浮力驱动的对流, 即浮力对流. 其驱动形式是体积力, 主要依赖于 3 个无量纲参数, Rayleigh 数、Prandtl 数、几何参数比  $A$ .

在空间微重力环境中, Rayleigh 数被极大地减小, 抑制了浮力对流的发生, 其它对流过程突显起来, 如表面张力梯度驱动的对流过程, 即 Marangoni 对流, 其关键的无量纲参数是 Marangoni 数、Prandtl 数、几何参数比  $A$ . Marangoni 对流是由于温度梯度或浓度梯度引起表面张力驱动的流动, 其驱动形式转为表面力. 微重力环境延长扩大了流动从层流到湍流转捩的时空尺度, 可以研究流动形成、发展、演化、至混沌的基本物理规律及湍流形成机理, 探索混沌斑图、亚涡胞、表面波的等非线性竞争规律及影响机制等. Marangoni 对流模型很多来源于材料科学领域的晶体生长, 因此 Marangoni 对流研究不仅具有理论意义, 而且有重要的应用价值.

赵诚卓等撰写的《双自由面溶质-热毛细液层的不稳定性》论文采用线性稳定性理论研究双自由面溶质-热毛细液层对流的不稳定性, 得到了两种负毛细力比 ( $\eta$ ) 下的临界 Marangoni 数与 Prandtl 数的函数关系, 并分析了临界模态的流场和能量机制. 周游等撰写的《高径比对 GaAs 熔体液桥热毛细对流失稳的影响》论文以材料科学为背景, 基于谱元法线性稳定性分析, 研究高径比对 GaAs 熔体 ( $Pr = 0.068$ ) 液桥热毛细对流失稳的影响, 同时结合能量分析揭示了热毛细对流的失稳机制.

2022-02-14 收稿, 2022-02-17 录用, 2022-02-17 网络版发表.

1) 段俐, 研究员, 主要研究方向: 微重力流体物理. E-mail: duanli@imech.ac.cn

引用格式: 段俐. 微重力流体物理专题序. 力学学报, 2022, 54(2): 289-290

Duan Li. Preface of theme articles on microgravity fluid physic. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(2): 289-290

### (3) 液滴和气泡动力学

液滴是自然界中一类典型和普遍存在的物质形态,液滴的平衡、迁移和运动、以及液滴之间的相互作用等一直都是流体力学的研究热点.对液滴运动规律的探索,实现液滴的主动驱动控制,是近几年提出的新理论和新思想.在微重力环境下,液滴的行为具有新的特性.重力场不再是驱动液滴运动的主要作用场,温度场、电磁场、浓度场等引发的液滴界面张力不均匀,使液滴产生毛细迁移运动,具有新现象和新规律.研究并掌握液滴热毛细迁移规律,对实现液滴的驱动控制非常重要,不仅有重要的学术意义,同时具有广泛的应用背景.在空间合金制备、两相分离、晶体生长、空间玻璃制备、空间液滴燃烧与消防安全、空间流体管理等方面有着巨大的应用价值.叶致君等撰写的《激光驱动液滴迁移的机理研究》论文主要研究激光驱动液滴迁移的物理机制,探索界面张力作用机理,获得了激光驱动液滴迁移的规律,探索出对液滴的驱动控制方法.

### (4) 毛细界面平衡问题

物质各相之间的界面现象对于物质的行为有极大的影响.在界面上,分子的内聚力会产生界面张力,它有调节界面面积的作用,当界面面积达到极小,相应的静平衡状态是稳定的;当界面的面积极大,对应不稳定状态.除温度和浓度外,引起界面张力变化的另一个因素是界面形变.界面曲率引起界面张力的变化不仅影响平衡的稳定与否,对体系的化学势也产生影响.

微重力条件下,重力作用基本消失,液体界面张力、内聚力等次级力占主要地位.在航天工程中,液体推进剂贮箱作为推进系统的重要组成部分,其主要作用是推进剂提供纯的推进剂,实现航天器的调姿、变轨、对接等.研究流体界面重定位过程,认识微重力环境大尺度毛细驱动机理,了解非理想状态、非常规模态界面过程的新现象以及新规律,是突破航天工程推进系统关键技术并实现板式贮箱在轨应用的关键.

陈上通等撰写的《微重力下成一定夹角平板间的表面张力》论文瞄准板式表面张力贮箱板式组件在微重力环境中对流体管理的作用,研究微重力环境中成一定角度平板间的表面张力驱动流动问题.考虑了液体与壁面的动态接触角、对流引起的压力损失、黏滞阻力、液池内弯曲的液面等因素的影响,推导出液体爬升高度的二阶微分方程.为板式贮箱的研制和空间流体管理提供理论依据和数据支撑.

### (5) 多相流

多相流是研究两种或两种以上相的介质混合体的流动特征.作为流体力学系统,研究的比较多的是液气两相混合的两相流过程.多相流体系中受到多种力的作用,如重力、界面张力等.在重力场中,重力起重要作用.在微重力环境中,消除了重力影响,更有利于研究多相流的相互作用.探索微重力条件下的多相流体系相分布、流动演化及多相耦合的热质输运规律,发展高效绝热技术及热转移技术,实现空间多相分离、供液等.研究微重力多相流问题,在航天工程中具有重要的应用价值.

### (6) 复杂流体问题

复杂流体一直是国际上微重力流体物理研究领域的重要方向,基于软凝聚态物质的制造、材料的胶体微结构组装是该方向研究得最为丰富和深入的内容.复杂流体是非单一相的,常包含介观尺度的微粒,可形成某种内部结构的流体,是常见的、影响广泛的物质形态.软凝聚态系统包含多级相互作用的结构和功能,在外部刺激下呈现跨尺度集体协同行为.在地面重力条件下,沉降、对流、分层、静压力等效应常会掩盖复杂流体自身的行为特征,一些复杂微结构难以稳定甚至无法形成,大大影响了对复杂大尺度微结构形成过程基本规律的认识,限制了具有特殊功能的微结构功能材料的组装和应用.

微重力环境有效抑制了颗粒沉降和浮力对流作用,为实现大尺度三维组装提供了可能.空间微重力环境下,复杂流体中颗粒相互作用机制、局域微流动对多颗粒相互作用的影响以及多级复杂微结构形成过程中的相互作用都是复杂流体领域重点关注的问题.张祺等撰写的《转动驱动圆角立方体颗粒有序堆积的离散元模拟》论文研究颗粒受圆角立方体容器往复旋转剪切作用实现的有序堆积,探究颗粒有序堆积过程的内部结构演化和动力学机理.给出了体积分数和有序度参数在容器不同运动条件下随旋转次数增加的变化规律;发现在亚重力环境下立方体颗粒同样可以通过容器的旋转实现有序堆积,重力加速度的减少会抑制立方体颗粒从无序堆积向有序堆积的转变.

doi: 10.6052/0459-1879-22-070