

# 微水动力学的发展\*

G.K.Batchlor

## 1 引 言

当流体流场的特征长度是微米量级时,在更大的长度尺度时被忽略掉的许多效应和过程就变得重要起来。虽然这些效应并不总是以某种形式包含着动力学,但它们大多是物理化学家所熟悉的。对这种小长度尺度系统的研究尚处于早期阶段。它开始显示出不同的特色和得到一些条理性。我们可以把这一相当新的领域叫做微水动力学。我把这个术语解释成典型地指长度尺度在0.1—10微米间的流场,也包含长度尺度小到0.01微米和大到100微米的流场的某些方面。注意,所选的低界对于把问题中的流体作为连续体处理来说是足够大的。水分子的直径约为 $3 \times 10^{-4}$ 微米,当速度变化的长度尺度为0.01微米或更大时,为了动力学的目的常可把水作为连续体来处理。

在长度尺度很小的流动系统中,惯性力常是可以忽略的,对于这些条件下的粘性流体的流动来说,有特殊数学解的文献非常多。然而,当我们考察自然界里发生的各式各样的小尺度流动系统时,发现除粘性应力外,还有许多物理过程在发生作用,并且跟数学上的困难相比,理论的困难更多的是概念方面的困难。对于分析小雷诺数下的流动来说,微水动力学并不单纯是另立一个名称而已。

可能是由于溶解现象引起的后果,跟气体相比,液体似乎提出广泛得多的各种长度尺度接近1微米的运动问题,随之而来的是在液体分子一级的混合。假如气体可以看作是“不可压缩的(实际上总是这样作的)和连续的,那么,包含气体的非常小尺度的运动问题在动力学上自然就没有什么不同的地方。但是,因为在通常条件下氧分子的平均自由程度约为0.1微米,所以气体不能作为连续体来对待的情况并不是罕见的,于是需要考虑分子的运动。我在本报告中不考虑这种情形,所以用表示“水”的意义的字头来代替更一般的字头“流体”。因此,涉及气溶胶的一些问题属于我们考虑的范围,而另一些问题,例如热漂移(thermophoresis)和空气携带的粒子沉降在表面较冷部分的现象,则不属于我们的范围。

有关离散粒子的流动自然是我们这个题目的主要部分。自然界或工程实际中发生微

\*全文共七节:1.引言;2.特征效应;3.布朗运动;4.运动流体内的粒子;5.悬浮体的集体性质;6.其他课题:柔性长链高分子聚合物,纤毛和鞭毛的摆动,动电学现象;7.参考文献。现摘译其中的前两节。 一一译者

水动力学问题的那些情况列于表 1。表 1 示出了各种类型微粒的典型尺寸。在室温下,半径 0.5 微米的刚性球(比重为 2.0 的情况)在水中的下沉速度约为 0.5 微米/秒,布朗平移扩散速度约为 0.5 微米<sup>2</sup>/秒,这二者的奇特的一致有助于我们回忆一些动力学量 的大小。

图 1 (一些气溶胶粒子。(a) 煤粉的显微照片;(b) 石棉针状晶体的电子显微镜照片;(c) 氧化锌烟的电子显微镜照片)和图 2 (一些用液体悬浮的粒子。均为电子显微镜照片。(a) 烟叶病毒的分子,分子量  $4 \times 10^7$ ,长约 0.3 微米;(b) 几个提纯的多瘤脱氧核糖核酸分子,周长均为 1.6 微米,分子量  $3 \times 10^6$ ;(c) 用乳液聚合作用制备的直径 1.24 微米的聚乙烯-甲苯球)示出普通天然“胶体”粒子或人造“胶体”粒子(即粒子小到它们在重力下多多少少保持着永久悬浮状态)的各种各样的形状。“粒子”一词也用于分子量在  $10^6$  以上的分子(“高分子”),严格说来,这些分子是在溶液内而不是在悬浮液内,但它们对于周围的溶剂来说是足够大的,可以作为连续体来看待。

## 2 特征效应

在考察微水动力学中当前感兴趣的一些课题之前,简要指出作为这些微尺度运动的特征的下列效应或过程是有用的:

(1) 作用在流体上的惯性力通常比粘性力小,流体的运动方程可化成线性的斯托克斯形式。流体运动是可逆的和可叠加的。所施力或边界的水动力影响随着距离的增加而缓慢减小。

(2) 由周围流体强迫运动的特征时间内的布朗运动所引起的自由粒子的位移通常相当大。因此,首先,自由粒子的位置、方向及相对位置都是无规则的,必须用统计方法来描述;其次,粒子在平移空间或有向空间内的扩散输运,通常是跟对流输运相当的。布朗运动的其他较不明显的后果将在以后叙述。

微水动力学中几何位形的无规则性的另一来源,是在这种尺度上难于形成规定的规则形状的曲面。天然的边界形状通常是不规则的,例如有关土壤渗流中的散布现象。

(3) 在重力下,直径为微米量级的自由粒子沉降得很慢,以致在许多情况下可以看作是悬浮在流体内或与流体一起运动着。悬浮体的加速所引起的作用于悬浮粒子上的有效力,通常并不引起粒子与流体之间可以看得出来的相对运动(超高速离心机里的情况除外,这种离心机是设计来分离混合物的两种组分的,它可以产生较重力大  $10^6$  倍的力作用于粒子上)。于是,当流体内粒子的悬浮体作为一个整体而运动时,该物质体积内的组成成分通常是不发生变化的。在含有大粒子或气泡的两相流的典型问题中,两相间的相对运动是理论的一个重要变量,它要求建立两相的平均运动的单独方程,但另一方面,悬浮体的理论通常只包含整体运动的单一动力学方程,其中粒子的效应表现为物质的流变性质。小粒子悬浮体的理论所要着重注意的,主要是流变性质,这与大粒子的两相流的那些性质是不相同的。

(4) 当长度尺度减小时, 相对于体积效应来说, 表面效应变得更加重要而需要加以考虑。例如, 假若一个空气泡淹没在液体内, 此液体有一温度的空间梯度, 则气泡边界上的表面张力 $\gamma$ 将是非均匀的而使液体发生流动, 迫使气泡向较暖的区域(对液体来说, 该区域的 $d\gamma/dT < 0$ )运动。Young, Goldstein, Block<sup>[6]</sup>在理论上和实验上曾证明, 对于纯液体来说, 一个半径为 $a$ 的小气泡在重力和表面张力梯度的共同作用下, 在液体中保持驻定不动(虽然液体仍有一些运动)的临界铅直温度梯度为

$$\frac{2}{3} \rho g a \left( \frac{d\gamma}{dT} \right)^{-1}$$

对于硅酮油内的半径为1微米的气泡来说, 此临界铅直温度梯度约为0.1°C/毫米——这是实验时常会于无意中造成非均匀性的温度度数。

当体积和表面积的比值小时, 在一种液体和另一种流体(可以是气体或液体)交界面上的溶质分子或“杂质”的吸附作用, 也可以有力学的后果。这些表面活性剂的分子通常有两个组成部分, 一部分是极性亲水化学团, 另一部分是非极性憎水团, 随着亲水部分进入水相, 它们都有保持在分界面上的倾向(由于扩散而形成分界面后)。由于蒸发或扩散, 表面活性剂影响着分界面上的表面张力。大家知道, 例如, 自来水中观察到直径小于100微米的气泡的上升速度, 跟零切应力表面相比, 大大接近于刚性表面的理论上的低雷诺数值, 这是因为表面活性剂扩展到气泡后部时, 增加了那里的密度, 会引起抗拒在气泡表面上液体运动的表面张力梯度<sup>[7,8]</sup>。

(5) 多数固体和液体物质, 当它们同一种极性电解质体例如一种水溶液(或是由于表面上分子的电离而生成, 或是由吸附在表面上的正负离子的数目不同而生成)接触时, 它们的表面会获得电荷。而带电表面将吸引液体内部扩散的反号离子云, 表面和云共同形成所谓电偶层。扩散云内的反号离子的分布, 由表面的吸引作用和布朗运动的扩散效应之间的平衡来确定, 而在平衡时, 电偶层的厚度(Debye长度)与电解质浓度的平方根成反比。对于弱电解质, 电偶层厚度的典型值为 $10^{-2}$ — $10^{-1}$ 微米。扩散云象一个电屏作用于表面的电荷上, 在离表面大于Debye长度的距离处, 表面电荷的电效应和力学效应是微弱的。但是, 当包围一带电小粒子的液体在与粒子作相对运动时, 或者一些带电的小粒子相互接近时, 电荷分离的效应就可能是重要的。化学家懂得怎样去“稳定”或“破坏”胶态散布物(即控制粒子的聚集速度, 这种聚集是由热的激发使粒子相互接近, 并在Van der Waals力的吸引作用下粘在一起), 办法是加进盐类去影响表面电荷及电偶层厚度, 但也了解到动电学效应是有更多的限制的。也许这是微水动力学中遇到的最复杂困难的过程, 也无疑是流体力学家最不熟悉的过程。然而, 电效应强烈影响流体小尺度运动的迹象是无可怀疑的, 我们必须学会如何考虑它们。

现在我打算讲一讲当前正在研究的微水动力学的一些具体问题。我称之为微水动力学的领域是很宽广的领域, 它包括许多学科中的现象和应用, 这些学科有: 胶体科学, 水文学, 化工, 燃烧, 动物学, 生理学, 细胞生态学。对我来说, 把目前的研究情况作一综述, 是既不合适, 也不胜任的。我这个报告的目的, 不过是引起大家注意一个新领域的出现, 并通过简要讨论一些典型问题来使大家对此新领域的情况有一点概念。下面

几节继续介绍的，主要是根据我个人的兴趣选出一些例子，我承认其中有些并不绝对是新的东西。我想，在一个一般性的报告中，努力让人有所理解和得到启发，要比只谈一些最新的材料更为有用。所选的那些课题反映了我的理论上的癖好，感到抱欠的是，我没有能够把在流体的这些微尺度领域内观察到的丰富多采的现象更好地表达出来。

摘译自：Batchelor, G.K., Developments in microhydrodynamics, Theoretical and Applied Mechanics (Proc. 14 IUTAM Congress, 1976——第14届国际理论与应用力学会议文集), ed., W.T.Koiter, North-Holland Publ. Comp. (1977) .

(董务民译)

表1 粒子的直径或长度(微米)

