

液态物理进展概述

陆 坤 权

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

液态作为物质存在的主要形态之一, 大量而广泛存在, 对其研究具有重要意义, 近年来液态物理研究更加受到重视。概述了液态物理的一些活跃研究领域的发展和所存在的困难。对复杂液体的研究作了简要的介绍。

关键词 液态物理, 复杂液体

Abstract

It is of great significance to study the liquid state which exists extensively as one of the main states of matter. In recent years, more and more attention has been paid to liquid state physics. In this article, the developments and difficulties in some active areas of liquid state physics are summarized. And a brief introduction to the research works for the complex fluid is also given.

Key words Liquid state physics, complex fluid

液态作为物质的主要形态之一大量而广泛存在。地球表面大部分被水覆盖着, 地球内部则是融熔的岩浆, 占地球质量的绝大部分。材料的制备很多以液态为母相, 如冶金、玻璃制造、晶体生长、化工制品等。液体也是生物体的主要构成部分, 起着维系生命的作用。人们生活必不可少的饮料、食用油、燃油、药水及日常使用的洗涤剂、墨水、胶水、油漆等也都是液体。这些液态物质的重要性尽人皆知。科学家们对液体的研究已有几个世纪的历史, 可是对液体微观结构、性质和变化机理的深入研究和认识还是近几十年的事, 有些则刚刚开始。

什么是液体, 很难下一个严格的定义。一般认为是有一定体积可为自由状态的凝聚物质, 或不具有永远保持自身形状作用力的凝聚物质。但是, 胶水时间放长了会变干, 熔化的玻璃冷却时逐渐变硬, 很难区分什么时候发生了液-固转变。从微观结构角度来看, 液态和非晶态中原子均为无序分布, 不能用原子无序分布

来完全表征液体。况且在有些液体中存在有某种有序结构, 后面将会讨论。

和人们对固体和气体的认识相比, 对液体的认识还很不深入, 这主要是由于研究液态存在理论和实验上的困难。在理论上, 对于固体可以采用完整晶体原子周期性结构模型, 用周期势加微扰, 扩展到研究各种固体。对于气体则可用理想气体模型, 在此基础上研究真实气体。而对液体则难以找到理想的表述方法来描述原子组态和动力学的贡献。在实验上, 液体原子无序分布, 研究晶体的衍射方法不能适用。此外, 对于熔体的研究往往要在高温下进行, 更增加了实验的难度。近十多年来, 随着实验技术的发展, 理论和计算能力的提高, 同时社会和技术发展的需要, 推动了液态物理的发展。其中液晶的发展和应用是一个典型的例子。愈来愈多的物理学家投入到液态物理的研究领域。1990年在欧洲举办了第一次液态研究的国际学术会议。

本文将概述近年来液态物理的某些进展和情况。关于液氮、水、液晶等已成专门领域或已广泛了解,本文将不涉及。

一、简单液体和复杂液体

一般元素、合金以及化合物溶化以后,原子或分子之间的相互作用使其凝聚在一起。即使是多组元体系互溶,原子或分子基本上是均匀地、无序地分布,呈现出典型的液体特征,这些称为简单液体。然而在很多情况下,液体中包含很大的分子,如聚合物,或是有固体微粒的固液混合物,或是互不相溶的液体混合物。这些液体具有许多与简单液体不同的特性,称之为复杂液体(complex fluid)。这也是目前研究很多的重要领域。简单液体和复杂液体的区别,除上述组成情况不同外,结构、性质也有所不同。在简单液体中,主要是近邻原子或分子之间的相互作用,作用长度为几个 \AA 的范围,作用能大致为 kT ,即热能级。原子或分子运动到邻近位置的时间很短,约为 10^{-12}s 。这种液体不能承受切变作用力,任何切变作用都会引起液体流动。其粘滞系数和切变速率无关,通常称为牛顿液体。复杂液体则有下列特征:分子或组成单元较大,尺度为 100\AA 或更大。相互作用能比 kT 大得多。分子或构体单元运动有

弛豫效应,比简单液体原子和分子运动慢得多。粘滞系数与切变速率有关,为非牛顿液体。图1表示简单液体和复杂液体一种不同的流动特性。复杂液体中可呈现多种特别的结构形式,如自组织、分形、某种长程有序等。这些在简单液体中不会出现。

二、液体结构

这里主要是指简单液体的结构,尤其是熔体的结构。关于复杂液体的结构将在后面说明。

液体中原子不像晶体中那样周期性排列,因而用径向分布函数来表征其平均结构。由此可得到原子周围短程结构状况,包括配位数、原子间距、无序度等信息。由于结构是认识液体的关键,因而受到重视。

研究液体结构的实验方法,主要是X射线和中子散射。对于简单体系,如单组元体系,可以得到较好的结果,已研究过很多简单金属熔体的结构。对于多组元体系,需用X射线异常散射或同位素替代中子散射,以获不同种类原子的径向分布函数。前者实验条件比较困难,后者是近十多年才用于熔体结构研究的有效方法,但费用昂贵,因此所做工作还不多。扩展X射线吸收精细结构谱(EXAFS)也是研究液体结构的一种好方法,近年陆续做了一些工作。(表1中 Rb_2ZnCl_4 熔体的结构数据就是我们用EXAFS方法测量的结果。)随着同步辐射等现代实验手段的发展和使用,液体结构的研究也正更快地发展。

另一方面,用分子动力学或 Monte Carlo 模拟计算,可以给出液体的结构模型。在这些计算中,重要的是假定合适的原子相互作用势,对于不同类型的液体,提出了多种作用势模型。但一般说来,计算结果的正确与否还需由实验数据验证。

下面简述不同液体的结构特征。主要是不同结合类型固体溶化后的结构特征,以和相应固体结构作比较。

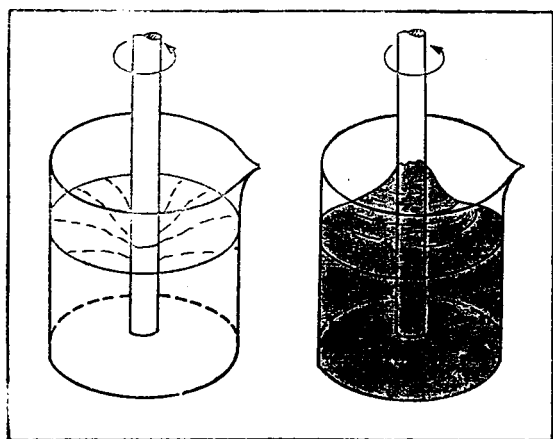


图1 旋转的棒在两种液体中引起不同的流动行为
(a) 牛顿液体 (b) 非牛顿液体

表 1 一些熔盐的结构数据

熔盐	$r_{+-}(\text{Å})$	N_{+-}	晶态		
			$r_{+-}(\text{Å})$	N_{+-}	
NaCl	2.78	5.3(3.9)*	2.81	6	
KCl	3.06	6.1(4.1)*	3.41	6	
RbCl	3.20	6.9(3.5)*	3.27	6	
CsCl	3.4	6.0	3.51	6	
AgCl	2.6	4.3	2.77	6	
BaCl ₂	3.10	6.4	3.18	8	
ZnCl ₂	2.27	4.3	2.27	4	
CaCl ₂	2.78	5.3	2.78	6	
SrCl ₂	2.9	6.9	3.03	8	
Rb ₂ ZnCl ₄	Rb-Cl	3.41	7.6	3.52	8.5
	Zn-Cl	2.27	4	2.24	4

* 括号中给出另一种发表数据。

1. 液态金属

固态金属一般为密堆积结构。液态金属近似于无规硬球密堆积结构。一般情况下，液态金属的密度比相应的固态金属低 5% 左右，液态金属的堆积系数约小于 0.49，配位数为 9—11，平均原子间距与固态相比略有变化。从干涉函数和分布函数的形状特征来看，各类金属略有不同，这与键性有关，尚无确切解释。有两点看法比较肯定。一是液态金属并不保持其晶态的结构特征，例如晶态碱金属、碱土金属及 Al, Pb 的结构为三种典型的金属结构之一，即面心立方、或密堆六方，或体心立方。而它们的液态结构却很相似。二是液态金属与非晶态金属结构相似，但更无序。非晶的结构存在某些与晶态相近的短程序，液态则不显示此种短程序的影响。

关于液态金属和合金中较为复杂的情况这里不再评述。

2. 离子晶体熔体

离子键结合的晶体熔化以后通称熔盐。一般说来，熔盐体系中正负离子库仑相互作用强，为强耦合体系，形成正负离子配位。研究较多的是金属卤化物。表 1 给出了一些熔盐的结构数据。由于用径向分布函数求配位数的方法不同，得到的数据也不一致，有待进一步的工作。实验中发现，尽管第一配位层为正负离子配位，但第二配位层，即正-正和负-负离子的配位有

物理

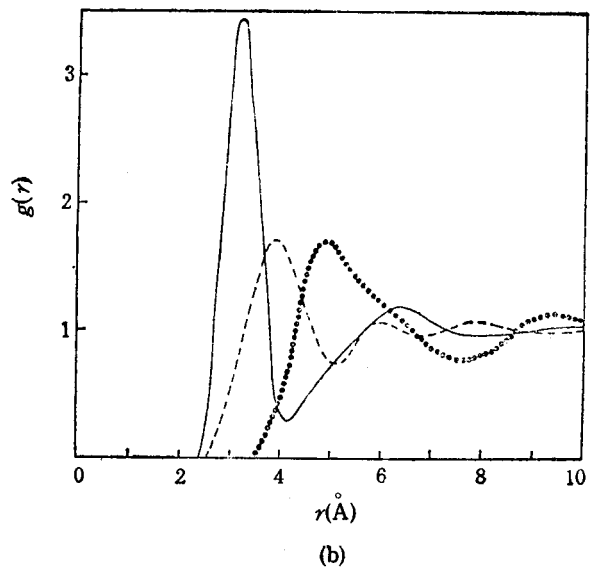
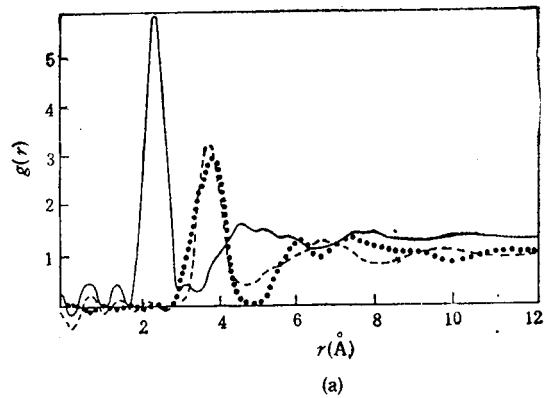


图 2 ZnCl₂ (a) 和 BaCl₂ (b) 熔体的径向分布函数⁽¹⁾

不同的情况。一般是同性离子的分布函数基本相同，近似有 $r_{++} = r_{--}$ 。但有些熔盐，如 BaCl₂，其 Cl-Cl 的分布函数和 Ba-Ba 分布函数有明显不同，Cl-Cl 配位进入了第一配位层 Ba-Cl 之中，明显有 $r_{ClCl} < r_{BaBa}$ ，称之为渗透效应。图 2 给出了 BaCl₂ 和 ZnCl₂ 熔体的径向分布函数。Zn 和 Ba 都是二价正离子，ZnCl₂ 熔体结构没有渗透效应。这被认为是 Ba 离子半径较大引起的。除金属卤化物熔盐外，研究较多的还有硫系化合物，如硒化物、碲化物等，因其熔点较低，易于实验测定。氧化物熔体一般熔点较高，结构研究工作很少。离子晶体熔体结构的特点除正负离子配位外，其配位数

比晶态中低,原子间距比晶态中小。

3. 共价结合晶体的熔体

一些共价结合的半导体物质,例如 Si, Ge, GaSb, AlSb, InSb 等熔化以后,共价性被破坏,成为金属态。一般物质熔化后密度降低,而这些物质熔化后密度增大。上述这些物质熔化后密度分别增大 10%, 4.5%, 8.2%, 12.9%, 12.5%, 结构也发生了很大变化。晶态 Si 和 Ge 为典型共价结合的金剛石型结构,配位数为 4。非晶态 Si 和 Ge 仍然保持与晶态类似的短程序,配位数为 4,但配位键角有一个分布范围,形成长程无序。然而, Si 和 Ge 的熔体情况则有很大不同,其配位数为 7 左右,类似金属的密堆结构,电导率和电导率的温度系数均与金属类同,从共价结合变为金属结合。

Se, Te, As₂Se₃ 等晶体,具有链状结构,熔化后链状结构基本保持,但无序分布。Se 和 Te 的配位数仍为 2。在熔点附近,液态 Te 链长为十几个原子,而液态 Se 中链长则有数千原子。液态 Se 仍为半导体,液态 Te 则为金属。这种变化原因尚未认识清楚。

由上述可知,在很多情况下,熔体并不保持与晶态相同的结构单元。同时,熔体结构并不都与相应的非晶结构类似,即不能都认为非晶态就是过冷的液态。有些熔体的结构随温度和压力而变化,性质也发生变化,也是人们有兴趣研究的课题。

三、液态中的金属—非金属转变

固体中的金属—非金属转变长期以来是凝聚态物理有兴趣的课题,所发展起来的基本观点也是研究液态中金属—非金属转变的理论依据。这些包括:结构和原子间距变化引起的能带交叠或分裂的观点、电子的局域态和迁移率边的概念、赝势模型、非均相迁移和渗流理论等。液态中金属—非金属转变与固态中不同之处是无序结构情况下的转变。通常在下列几种情况下可发生金属—非金属转变,即液—固转变、临界点转变、随成分转变、随温度和压力转

变。

固体熔化时,一些非金属和半金属元素以及半导体化合物转变为金属态,如 Si, Ge, C, Te, AlSb, GaSb, InSb 等。熔化破坏了其共价性,结构也发生很大变化,这已在上面说明。人们对这种变化的本质尚未弄清。最近对于液态 Te 的结构和性质的研究认为,液态 Te 中原子形成平面折叠链式结构,金属性来自沿折叠方向孤对电子的扩展态。而一些金属间化合物或合金在固态时为金属,熔化后则成为非金属,例如 AuCs, Mg₃Bi₂ 等。一般认为是熔化后形成离子性结合的异类原子配位而成非金属,这将在后面说明。

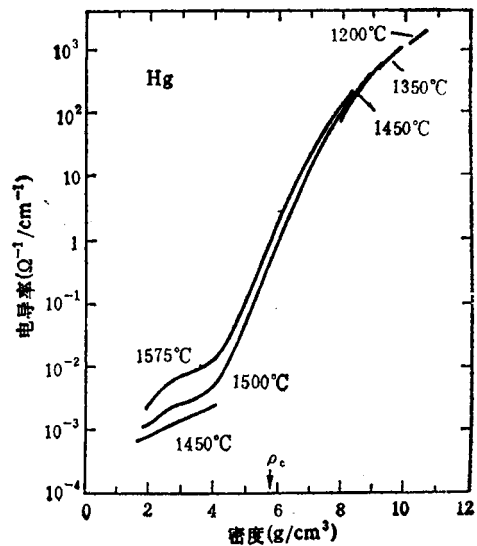


图3 不同温度 Hg 的电导率与密度的关系^[2]

在液—气转变的临界点附近发生从液态金属向非金属的转变。这是由于密度变化而引起的。典型的例子是 Hg。液态 Hg 在常温下密度为 13.6g/cm³ 时,电导率约为 10⁴Ω⁻¹cm⁻¹。当改变温度和压力时,密度会发生变化。临界点的密度为 5.8g/cm³,这时电导率约 10⁻²Ω⁻¹cm⁻¹。图 3 表示 Hg 的电导率随密度变化关系。可以看出,密度降低时电导率减小。一般认为金属—非金属转变发生在密度为 9g/cm³ 左右。这种变化用电子态密度随密度降低而变小来解

释。在密度较高时,如大于 11g/cm^3 ,近自由电子模型适用.当密度降到 9g/cm^3 时,费米面态密度与自由电子态密度之比为 0.3,由 Mott 准则可认为电子局域化了,变成了非金属.除 Hg 以外,研究较多的还有 Cs, Rb 等.由于高温、高压实验条件的困难,工作还不多.

成分变化引起的金属-非金属转变有两种情况.一种是金属熔体和非金属熔体混合比例改变时引起的转变.典型的是金属-熔盐体系,例如金属-金属卤化物熔体.化学式可表示为 M-MX,其中 M 为金属原子,如 Na, K, Cs, Bi 等. X 表示卤族元素如 F, Cl, Br, I. 一般熔盐为非金属,当 M 成分不断增加时,液体逐渐由非金属态变成金属态,全部为 M 时则为液态金属.这一变化过程似乎很显然,但要解释清楚并不容易.有人用渗流理论解释,认为金属体积达到渗流极限时,则变成金属态.然而,对微观机制的研究还需进一步工作.另一种是两种金属熔体在化学计量比成分附近转变为半导体.这种随成分变化情况各有不同.有些电导率随成分变化很陡,如液态 Cs-Au, Mg-Bi 等.图 4 表

示 Cs-Au 液态合金电导率随成分的变化,可以看出在 Cs 和 Au 为 1:1 成分附近电导率比纯金属液体降低了三个数量级以上.有些则随成分变化较缓,如 Li-Pb, Cu-Te 等液态合金.

关于液态中金属-非金属转变的物理本质还需从实验和理论上深入探讨.关键是需要有更多的液态电子结构方面的实验数据,而液态的光电谱实验困难,工作很少.

四、液态半导体

50 年代半导体发展的过程中,人们注意到半导体熔化后的结构和性质.苏联著名物理学家 Ioffe 和 Regel 在 1960 年首先提出液态半导体这个概念^[9].如前所述,很多半导体元素和化合物熔化后成为金属态,并不保持其半导体性质.元素周期表中的固态元素熔化以后,只有 B, I, P, S, As 和 Se 为非金属,其他均为金属态.然而不少金属合金和盐类的熔体是半导体.电导率处于金属和绝缘体之间,大体范围为 $5000-500\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$,电导率温度系数为正,这样的液体一般称为液态半导体.当然这一定义并不严格.

关于液体的电导,用近自由电子近似和费势模型进行过不少计算.著名的 Ziman 公式用于计算简单金属的电导和热电势很成功,与实验定量符合很好,以致在六、七十年代人们认为对液体电导的理解比对固体电导的理解更深入.然而,液态合金的半导体性质使这些理论遇到了困难.为什么两种液态金属在某些成分时形成的液态合金变成了半导体,例如 CsAu 等. Ioffe 和 Regel 曾指出两点来说明这种变化的原因.一是液态中的化学短程序,二是无量纲参数 lK_F , l 为电子平均自由程, K_F 为费米波矢.他们认为某些合金在化学计量比成分附近形成离子型结合,即形成异类原子配位的化学短程序,使电导降低.这时电子的平均自由程和原子间距大小相近,使 $lK_F \approx 1$, 电子的局域化发生. CsAu, Mg, Bi₂ 这类液态合金的离子型结合的观点认为 Cs 和 Au 分别为 +1 和

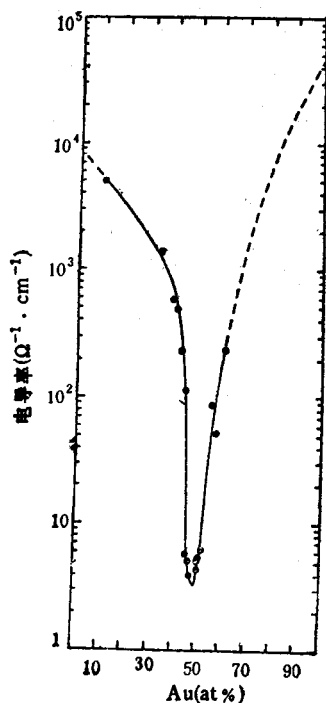


图 4 液态 Cs-Au 合金在 600°C 时的电导率^[12]

-1 价, Mg 和 Bi 分别为 +2 和 -3 价。这似乎已被广泛承认。然而, 关于这些液体的异类原子配位的结构研究还未进行。

Mott 等人发展起来的关于隙隙和迁移率的概念, 可用来解释化学计量比 M_nA_m 附近的电导率的变化。这里 M 表示正价元素, A 表示负价元素。在 M_nA_m 成分, 电子态密度最低, 对应隙隙位置, 电导率最低。当成分发生改变时, 态密度和费米能 E_F 位置均改变, 使电导率增大。图 5 表示这种变化。通过测量磁化率和 Knight 位移, 表明隙隙模型是合理的。表征载流子浓度和性质的霍尔系数的测量表明, 液态金属与自由电子情况相近, 而液态半导体则与自由电子明显不同。霍尔系数值比自由电子大, 而且大多数为负值, 即电子导电。

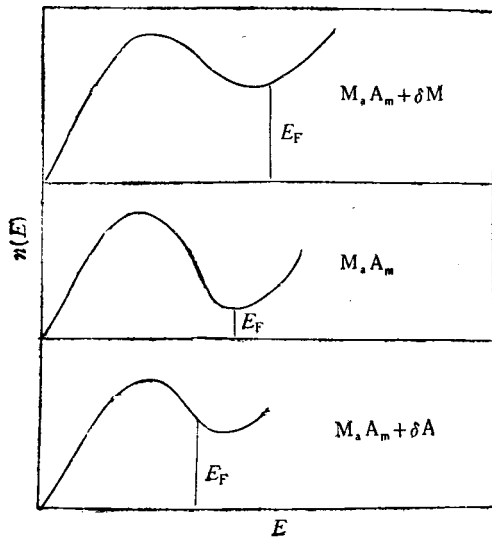


图 5 化学计量比成分附近的态密度和费米能 E_F 的变化^[2]

电导率随温度升高而增大是由下述原因引起的。一是费米函数随温度升高而变宽, 二是异类原子配位的倾向随温度升高而减弱。

液态半导体与非晶半导体相比有明显差别。非晶半导体中费米能一般与导带相隔约为 kT , 而液态半导体费米能很接近导带, 或在导带中, 载流子浓度比非晶半导体大得多。液态半导体对杂质不敏感, 而非晶半导体则很敏感。非晶半导体电导随温度升高而增大是由于载流子的激发, 液态半导体则与结构和化学态的变化

有关。非晶半导体的制备只在较小的成分范围, 而液态半导体的组成范围宽得多。

五、熔化和界面

熔化的热力学已经普遍了解。但晶体熔化的微观机理是长期争论而未解决的问题。另一方面, 从液态转变为晶态的微观机制也没有解决。核心的问题是界面的结构和性质。

熔化是怎样发生的, 曾提出过不同的模型。早在 20 年代, Frenkel 就提出空位浓度在熔点附近突然增加的模型。50 年代 Mott 等提出位错密度突然增大的理论, 均不理想。1910 年 Lindemann 提出原子振动模型, 认为晶体中原子振动振幅达到平均原子间距的约 10% 左右时, 晶体发生熔化, 称之为 Lindemann 熔化定律。70 年代以后, 有些人又对这种振动模型作了进一步的理论工作。现在较多人接受这一观点。但原子如何由晶体中有序排列变成液态的无序结构并未得到说明。因此又有从位置无序来说明熔化的观点。近年来的研究工作重点是在实验方面。用一些新的实验手段对熔化的过程和机理进行观测。

谈到熔化, 人们自然会提出这样一个问题, 为什么一般观察不到过热熔化现象, 即晶体总是在熔点熔化, 而不能超过熔点才熔化。相反, 液体结晶却可以过冷, 有时有很大过冷度。结晶时的过冷是由于晶核形成能的要求, 这已了解得很清楚。熔化不需过热表明, 在达到熔点前晶体中已有某种液核形成。这种观点早在几十年前就已提出, 称之为预熔化 (premelting)。从一些晶体接近熔点时的性质反常变化, 可推测到这种预熔化的存在。直到 80 年代才得到较可靠的观测结果, 即表面熔化 (surface melting) 现象。晶体的某些表面或表面吸附层在熔点之下就开始熔化。用离子散射, 低能电子衍射、X 射线掠入射及扫描隧道显微镜等方法, 对一些单晶表面进行研究^[4]。到目前为止, 已观察到冰的 (0110) 面、Pb(110) 面、Au(110) 面、Al(110) 面、Ge(111) 面等发生表面熔化, 并观察

到某些吸附层的熔化也开始于熔点之下。单晶 Pb 的 (110) 表面的熔化始于 560K, 比熔点 (600.7K) 低 40K。冰的 (01 $\bar{1}$ 0) 表面, 在 -20℃ 开始熔化。单晶表面熔化层的厚度随温度升高而变厚, 开始熔化时为几个原子层, 达到熔点时则晶体完全熔化。这些晶体的其他面没有观察到表面熔化现象, 这与不同面的结构有关。一般表面熔化在开放性表面发生。理论和实验表明, 这种表面熔化并不是一级相变, 和真正的固-液相变是不同的。因而将表面熔化层称为类液层 (quasi-liquid layer 或 liquid like layer)。对类液层的结构和性质还未作深入研究。有人对这是否为表面熔化尚有异议, 认为这些是表面的无序。晶体中杂质和缺陷附近是否会发生预熔化, 仍是一个有争议的问题。有人用 EXAFS 方法观测到 Pb 中少量 Hg 杂质存在时, Hg 原子周围的 Pb 在熔点之下就发生了熔化^[7]。其他一些实验也观测到局部熔化现象。理论计算认为表面或界面的预熔化是存在的, 但否定杂质和缺陷处局部预熔化的存在^[8]。从上述所述, 正是表面或界面预熔化的发生, 不必有过热作为驱动力产生液核, 因而一般不发生过热熔化。但这并不排除在某些特殊情况下的过热现象。人们早就预料在晶体内部可能发生局部过热。最近的一些实验已观测到这种过热。此外, 用激光快速加热, 加热速率为 10¹¹K/s, 观测到 Pb(111) 表面过热 120K 才熔化。另一方面, 实验上也观察到, 在有些情况下, 液体表面可以发生表面结晶^[9] (surface crystallization)。即在高于凝固温度 (熔点) 时液体表面形成二维的结晶薄层, 厚度为几个 Å, 而且是发生了一级相变。这是在具有链形结构的有机链烷中用掠入射 X 射线散射和表面张力测量进行观测的。液体表面结晶温度比熔点高 3K 左右。

由上所述, 界面或表面的熔化和结晶温度, 取决于界面或表面的结构状态和动力学过程。尽管自由表面的研究较易进行, 但对熔化和结晶层的结构和性质还未认识清楚。而固-液界面的研究则更为困难。在晶体生长中有光滑界面和粗糙界面的生长, 关于晶体生长的机制已

进行了很多工作。然而, 生长界面液体一侧的微观结构状况并不清楚。有一点是肯定的, 固体表面原子与界面液体原子相互作用, 使液体分子趋向于有序排列。表面熔化的类液层就被认为有一定程度有序, 具有某种近晶体结构的对称性。这还未得到实验的直接验证。这种有序已由晶体表面液层的力学性质测量给出了间接的证明^[10]。将分子为球形的环己烷液体, 夹在两云母片之间, 液层的厚度为几个分子层。使用表面力测量装置, 沿晶体表面测量切应力与移动位置的关系, 发现切应力的变化与位置有关。在某些位置, 可承受切应力并有屈服点, 类似固体, 这时对应液体分子的有序排列。在有些位置, 分子无序排列, 不能承受切应力, 对应通常的液态。这种液体分子的有序和无序是由于两晶体片相对位置不同, 晶体原子与液体原子作用情况不同而引起的。事实上, 过去关于气体分子在晶体表面吸附的研究已经表明, 晶体原子的周期排列对吸附分子的取向和排布有强烈影响, 这里不再评述。真实的固-液界面是复杂的, 除有序固体原子或分子的作用, 无序液体原子或分子的作用, 还有动态变化过程。因此, 关于体状态情况下的固-液界面的结构和性质还远未认清, 这也是研究的难点。

近年来, 对固-液界面、液-液界面的浸润和浸润相变, 对于多孔介质中液体的输运特性等进行了大量研究, 在理论和实际上都有重要意义, 是液态物理的活跃领域, 本文不能详述。

六、复杂液体

复杂液体包括很广的领域和丰富的内容。前面已对复杂液体和简单液体的主要区别作了介绍, 这里扼要说明一些复杂液体的特征。复杂液体的很多性质都决定于其特殊的结构状态。其复杂性也体现在结构上, 因此人们也将复杂液体称之为结构液体 (structured fluid)。液晶是典型一例, 人们已普遍了解, 这里不详述。

悬浮液是液体中加入不溶的微粒而形成。

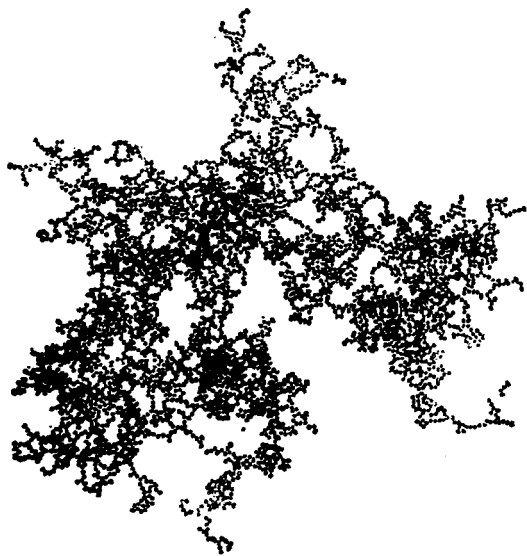


图6 50 Å 金胶体颗粒的分形集聚

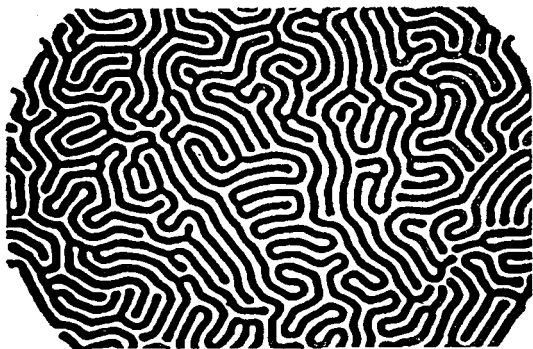


图7 磁流体在磁场中的自组织行为^[11]

平常用的墨水、油漆就是悬浮液。有些悬浮液显示特别的结构特征。普遍观察到的是颗粒集聚的自组织行为。图6表示50 Å的金胶粒的集聚图象。这种集聚由颗粒之间的相互作用引起,密度与体积为分数维关系,即分形。悬浮液在外场作用下,有时会出现另一些结构特征,并导致一些特别的性质。磁流体(ferrofluid)是用铁磁颗粒制成的悬浮液。颗粒尺寸合适并为单畴时,在一定强度的磁场作用下,这些颗粒形成如图7所示迷宫似的自组织图象。图中条纹宽度约为10 μm,所用的颗粒尺度为100 Å,磁流体的这种效应已用于真空密封等。电流变液(electrorheological fluid)则是悬浮颗粒在电

场作用下的效应。这种悬浮液由尺度为1—100 μm的介电颗粒和不导电的液体组成。在电场作用下颗粒形成链状或柱状分布,性质也发生很大改变,粘滞性可增大几个数量级,接近固体。若颗粒为尺度均匀的球体,则颗粒可像晶体中原子那样有序排列,已观测到可形成体心四方点阵。这种在电场作用下的“液—固”相变的效应和应用前景已引起广泛重视^[12]。悬浮液中的颗粒尺度在光波波长范围时,在强光驻波场作用下也可形成有序分布,即形成光子晶体。光在其中的传播特性就会像电子在晶体中那样,具有能带结构或局域化现象。目前正从实验上努力实现这种效应的观测。

聚合物的溶液或熔体情况更为复杂。聚合物的分子很大,形成很长的链,这些链柔软而易发生相互作用,相互缠绕,因而呈现特别的弛豫性、结构形态和其他特性,在技术上有重要应用。对聚合物的研究已形成专门的学科。然而,对其液态的许多基本特性的物理本质的认识还刚刚开始。例如,一些聚合物溶液呈现出切变作用下变稠的特性,这种现象很容易观察到。将一些树脂溶液放在瓶子里,若缓慢摇动瓶子,这种溶液就像普通液体一样在瓶子里荡动。若突

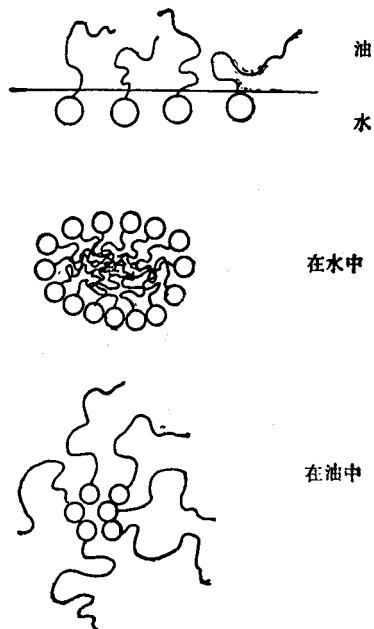


图8 表面活性剂分子在油、水及其界面的不同行为

然将瓶子倒过来,则溶液会像粘的胶体沿瓶壁慢慢向下流动。最近的研究认为,这种切变作用致稠是由于单个聚合物分子自组织行为引起的。

表面活性剂是另一类复杂液体。最常见的是洗涤剂,它可使油和水相溶。具有极性的表面活性剂分子链在油和水的界面上使界面能降低,而这些分子在油中或在水中则有不同的集聚行为。图8示意表面活性剂分子的这种分布图象。研究这些分子的集聚、分散及相互作用规律也是目前活跃的课题。

上面所述各种复杂液体,各自具有特殊的结构和性质,有与简单液体不同的相互作用和变化规律。对复杂液体,在有些情况下甚至难以区分是液体还是固体,它和时间有关,和外加作用有关,而不像简单液体在一定温度、压力下就转变为固体。这些区别的基本因素是,简单液体中的作用单元是原子或小分子,而复杂液体中则是较大尺度的分子或颗粒。

凝聚态物理过去只包含简单液体的研究,尚有许多问题没有解决。液晶、聚合物、悬浮液等复杂液体的结构、性质、变化规律和机理的研究更丰富了我们对物质世界的认识,扩大了研

究领域。我国在液态物理方面的研究还很薄弱,很多基本的物理问题正敞开其门,等待我们去解决。

- [1] J. E. Enderby, *J. Phys.: Condens. Matter*, **5** (1993), B99.
- [2] W. Götzlaff, G. Schönherr & F. Hensel, *Z. Phys. Chem., NF*, **156**(1988), 219.
- [3] R. Schmutzler et al., *Phys. Chem.*, **80**(1976), 107.
- [4] A. F. Ioffe and A. R. Regel, *Prog. Semicond.*, **4**(1960), 238.
- [5] J. E. Enderby and A. C. Barnes, *Rep. Prog. Phys.*, **53**(1990), 85.
- [6] J. Franken and J. van der Veen, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 134;
E. G. McRae and R. A. Malic, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1437;
J. W. Herman and H. E. Elsayed-Ali, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992), 2952;
L. Kuipers and J. W. M. Frenken, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 3907.
- [7] E. A. Stern and K. Zhang, *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988), 1872.
- [8] C. H. Martin and S. J. Singer, *Phys. Rev. B*, **44**(1991), 477.
- [9] X. Z. Wu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 958.
- [10] J. N. Israelachvili et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **2**(1990), SA89.
- [11] T. A. Witten, *J. Phys.: Condens. Matter*, **2** (1990), SA1.
- [12] 陆坤权,物理, **22-7**(1993),411.

一种新的笼形分子 M_5C_{12}

吴自勤

(中国科学技术大学,合肥·230026)

团簇(cluster)物理的研究对象是由几个到几百个原子组成的聚集体。这是一门新兴的分支学科。它处于传统的原子分子物理和凝聚态物理之间,不久前还是空白的领域。 C_{60} 等笼形分子^[1]的发现是团簇物理的一大进展,它推动人们去探索新的笼形分子。

另一方面材料物理也在扩展它的研究领域,它的一个新领域是纳米材料^[2]。常规材料是多晶体,材料中晶粒的尺寸约为 $10\mu\text{m}$ 。纳米材料中的晶粒可以小到几个nm。如尺寸为

3nm时,小晶粒包含的原子数约1000个,因此纳米材料的研究领域已和团簇物理衔接起来。纳米材料是由纳米颗粒组成的。预期不久的将来,纳米材料可以由笼形分子的小晶粒组成。

团簇和纳米颗粒可以有一个物理上的界线:团簇的性质(如结构稳定性)不随原子数的增加而单调地变化,即存在所谓结构最稳定的幻数,而纳米颗粒的性质随原子数的增加而单调地变化。

由此可见,笼形分子是一种近年来引起广