

# 物 理 力 学 介 紹

錢 学 森

(中国科学院力学研究所)

## 一 引言

物理力学是一个新的力学分枝,具体地提出这个名詞还只不过四五年;所以我們必需解釋一下物理力学是什么、是为什么的。先說物理力学是为什么的:物理力学的目的是想通过对物質的微观分析,把有关物質宏观性質的實驗数据总结和整理,找出其中規律。然后再进一步利用这些規律去予見新物質新材料的宏观性質。我們特別注重工程技术里所要用的物質和材料,像动力机械的介質、結構里的金屬和非金屬材料等等。因此、正和力学本身一样,物理力学也是一門为工程技术服务的技术科学。

自然,当我们开拓一門技术科学的新領域,我們不能够只憑主觀的兴趣,更重要的是要考虑工程技术里有没有这个需要。那么問題就在工程师們是不是要一个材料性質的計算方法,材料性質的一个理論。一直到現在,工程师們在材料性質方面是不靠什么理論的,他們要知道什么物質或材料的性質,他們就作一些實驗来測定所要的数据,他們完全用經驗方法来解决这个問題。例如:蒸汽的热力性能是用實驗方法来量的,鋼材的强度和彈性也是用材料試驗机来決定的。那么現在为什么又提出新花样,要用理論来帮助呢?問題是这个帮助能不能有效。有效的帮助一定为工程师們所欢迎,沒有有效的帮助一定遭到工程师們輕視。在以前,一方面因为工程师所要解决的材料問題并不复杂,實驗方法用起来方便而又省事。另一方面

呢,物質的微观結構还没有搞清楚,也实在沒有能力来建立物質宏观性質的理論。可是現在不同了,一方面工程师所要解决的材料問題复杂得多了,高温、高压、超高温、超高压是现实的問題了,材料在各种放射綫作用下的性能也是急待解决的了,完全靠實驗方法就有些困难,它要龐大的設備和长久的时日来做實驗。而另一面,由于近代物理学和化学的發展,只要是在原子核以外,除了个别几处以外,物質的微观結構已經基本上沒有問題,物理力学的基础已經有了,也就有条件来建立这門技术科学。物理力学就在这样一面有需要一面有可能的情况下产生的,它的确可以帮助工程师們,在介質和材料問題上大大地节省時間、人力和物力。自然,物理力学的最終目的是:能够就工程师所提出的技术条件,“設計”出能完全滿足这技术条件的介質和材料,不再像現在那样去摸索;而費了多大气力摸索出来的东西,又有时不能令人十分滿意。

## 二 物理力学的根源和研究方法

当然,一門新的學問决不会沒有它的根源,相反地,新學問也必定有它的来历,有旧的已成长了的学科作为它的基础。我們在前面已經說过物理力学的建立是依靠近代物理学和化学的成果的,这也就是物理力学这个名詞的来源,——用物理学的观点来解决力学里的問題。与物理力学尤其有密切关系的是統計力学和分子运动論这一門統計物理;在化学里的量子化学或化学物理和物理化学也是研究物理力学所

• 本文的内容曾在 1957 年 2 月 17 日中国物理学会北京分会的年会上报告。

必需的学科。这些物理学和化学里的部門都是从物質的原子和分子結構出發，先知道了原子和分子的性質，然后用統計的方法来計算物質中千千万万原子和分子聚在一起的性質。这正是物理力学由微觀結構到宏觀性質的这条路，它們和物理力学的紧密关系是容易了解的。

值得注意的是：在早年的时候，物理学家和化学家之所以研究物質的宏觀性質，他們的目的和我們現在的目的是不相同的。在以前，物質的微觀結構还没有肯定，原子和分子論只不过是一个有理的假定，人們对原子和分子也抱着“将信将疑”的态度，物理学家和化学家为了帮助明确微觀結構的概念，就研究怎样从假設的微觀結構来推論出已知的宏觀性質。如果推論出来的宏觀性質和直接測量出来的性質相符合，那么假設的微觀結構也就有更多的真实性。所以在这个时代，我們可以說物理学家和化学家是用物質宏觀的性質来帮助决定物質的微觀結構。可是現在不同了，情形反过来了。我們对微觀結構是搞得很清楚了，分子是由原子构成的，而原子呢，它是由一个中心非常密集的原子核和周圍很稀疏的电子云所构成的。这一个肯定了的，具体的微觀結構就成了我們的可靠的出發点，这是已知的。通过統計方法我們可以推論出宏觀的性質，作为未知的是宏觀性質。所以用从前的情形和現在的情形对比，微觀結構和宏觀性質的已知和未知关系是恰恰反轉过来了。

現在也許有人要問：既然統計物理、量子化学和物理化学同物理力学有密切的关系，而且又有些一样的看法，那么物理力学和它們之間有什么区别呢？是不是物理力学只不过把这些物理学和化学部門应用到工程技术問題上去呢？其实問題没有这样簡單，虽然物理力学引用許多物理学和化学的理論，但是它又不完全是統計物理和物理化学的分枝，它是和这些基础科学有分別的。所以有这个分別的原故是：基础科学并不能完全解决工程技术里所提出的問題，光是它还不行。譬如說：在原則上，我

們可以用量子力学的方法来算出氧原子的結構，从氧原子的結構我們可以算出氧分子的結構，氧分子的性質（它的大小，相互作用的力等等）；但是一直到現在，誰也沒有实际这样作过，誰也沒有能够只用量子力学来算出氧气的性質。問題在于执行这个計算是非常煩难的，难到实际上不能算出来。所以原則上可行还不够，一定要实际上也可行。关于氧气性質的問題，我們还是靠一些實驗来測定氧分子的性質：用氧气的粘度来測定它的大小，它的相互作用力；用氧气的光譜来測定它的振动能位。有了这些實驗数据，我們就能由理論来算出氧气的热力学函数，它的热傳导系数等等新的、不必用實驗去測量的宏觀性質。就在这个比較簡單的問題上，我們已經看出純粹推演是不够的，一定要結合實驗才行。何況物理力学里面的問題往往还没有氧气問題那样簡單，更不能单純推演方法，更需要灵活地結合實驗方法了。不是單純推演就不是簡單把基础科学应用到工程技术上去的問題，物理力学也就不只是把統計物理和物理化学应用到工程介質和材料問題上去。

既然不能單純地从基础科学推演出物理力学，这也就是說物理力学的基础是广大的，不只是基础科学这一面，它也包括一切可以利用的實驗和經驗数据。什么是和物理力学有关的實驗和經驗数据呢？这里面有不少是物理学和化学手冊中的物質性質的測定数据，冶金学中从长远以来所累积的金屬材料性質，以及工程材料和介質的性質等等。其实这还不够，物理力学是建筑在更广泛的基础上的：作为一門技术科学，它必然地是介乎基础科学和工程技术之間，一面吸取基础科学里的規律和理論，一面也要吸收工程技术里面的經驗和規律，把兩方面的东西融会貫通才行。什么是物理力学所最有关系的工程技术呢？这里有化工的許多經驗規律，和材料强度試驗中所總結出来的原則。也許有人要問：工程技术里的一些經驗規律和原則往往是不太成熟的，只能用在比較狹窄的

范围里, 这是不是物理力学好的原材料? 要回答这个问题, 让我们先来分析一下什么是成熟, 什么是不成熟, 成熟的意思是整理得有条有理, 已经能够纳入科学理论的总体系里面; 而不成熟的意思是还没有整理出头绪, 还不能纳入科学理论总体系的东西。所以成熟的东西倒没有什么新鲜, 既然已经是可以纳入科学理论里的东西, 它也就是基础科学所能推演出来的东西。我们所要的倒正是那些“未入正宗”的东西, 那才是新东西, 那才是现在基础科学体系里面所没有的东西, 那才是可以补基础科学之不足的东西。所以工程技术的经验规律也是物理力学所要的原材料。

其实, 物理力学的工作能把工程技术的经验规律加以整理, 使它们能和基础科学更相接近。虽然从基础科学家看来, 仍然是经验规律, 但它已经有所提炼, 再进一步就可以被吸收到基础科学里面去了, 很可能就成为物理学或化学的一部分。所以从基础科学的发展和充实来看, 物理力学也是有它的贡献的。

现在我们已经说明了物理力学的目的是什么, 这也就自然可以从而体会到研究物理力学的方法; 研究物理力学的方法是和研究其它技术科学的方法一样的: 在一般原则上, 它和一切自然科学没有什么两样, 只不过特别注意到下面这两点: 第一是问题中实际机理的分析, 从而认清问题中最重要的因素。在实际现象里, 不像提炼了的基础科学问题, 内容很复杂, 千头万绪, 要同时顾到其中每一个因素是不可能的, 那样做势必至于无法进行运算。所以研究的第一步就是实事求是, 做到完全了解问题重点所在, 专为这一个问题制造出一个简单的模型, 使模型里只包括机理里面最重要的因素。惟有这样, 分析运算才能进行。自然, 就是同一个东西, 在不同情况下它可以显出它本质的不同方面, 因此同一东西在不同问题里可以有不同的模型。举个例: 当我们研究气体的粘度的时候, 是把气体分子看作为一个各向同性相互作用的质点; 但是当我们研究气体热

力学函数的时候, 又把气体分子看作具有内部结构而不光是质点了。模型是不同的, 但是模型所代表的实在分子是一个。在深入地分析问题的机理的时候, 也常常会发现手头资料不够, 那就必需做新的实验。因此, 研究物理力学也必然理论和实验并重, 不可偏废一面。

物理力学研究方法的第二个要点就是注重运算的手段, 也就是要求采用最有效的数学工具。这原因是: 物理力学是要解决具体问题的, 要做到工程师们能使用物理力学的成果, 不能满足于原则上的解决, 一定要有数据。这样就必需把运算做到彻底, 因而计算也就烦难了, “死”算是不行的, 不采用高效率的运算方法自然就不能完成这个工作。

以上这两条研究方法也是从过去几十年的力学研究经验中所总结出来的, 没有这两条, 就没有力学里面的创造。

### 三 物理力学的内容

现在要说一说物理力学的内容。在这里我们是有困难的, 因为物理力学的历史太短, 可以说我们还在摸索的阶段, 我们还不能够一下看到物理力学的全貌。因此, 在下面所讲的只是一个初步看法, 物理力学的内容一定会通过实践而丰富起来。

物质的性质可以分成两大类, 一类是属于平衡现象的, 像物态方程、比热、化学平衡等等; 一类是属于不平衡现象的, 像物质的扩散、热传导、粘性、化学反应等等。我们所以这样分的原故是因为直到现在这两类问题的处理方法是不同的; 对于第一类的平衡现象我们用统计力学的方法去解决, 而对于第二类的不平衡现象, 统计力学的方法还不能完全解决问题, 一般地是需要用分子运动论的手法。统计力学的方法好处是在它的一般性, 结果不为各个研究对象的不同本性所限制。例如由统计力学所求出的热力学定律就不为各个物质本性所影响, 不论氧气也好, 木材也好, 钢也好, 都得遵守这些热力学的定律。只在把这些热力学

定律用到热力学函数的具体計算上才需要引入物質的特性。但是也就是因为它的一般性，比較复杂的不平衡現象也就难用統計力学的方法，我們就必需在一开始就引入現象的具体模型，这才能进行运算。因此不平衡現象就少有一般的結果，每一类現象差不多都得分別处理，这是研究不平衡現象中的困难。

平衡現象的問題里，最简单的是低压气体在常温和較高温中的热力学函数的計算。我們知道物理学家們早就找出計算的方法，只要知道气体分子的各个振动能位就行；而振动能位可以从分子的紅外光譜获得。可是对一个工程师来講，在他选择热力介質的时候，他最想知道的是一个簡捷的方法，能直接从分子結構式算出比热等等热力学函数，这可以說是物理力学中的一个課題了。对这个題目現在我們已經有一个近似的答案，它是 Bennewitz 和 Rossner<sup>[1]</sup> 与 Meghreblan<sup>[2]</sup> 的研究成果。他們發現两个原子結合起来有一定的結構强度，因此两个原子間的振动頻率差不多与分子的其余部分無關。我們可以为每一对相結合的原子給一个伸張頻率，一个撓曲頻率，或者說每个化学鍵有一个伸張振动的特性温度  $\theta_v^{(1)}$  和一个撓曲振动的特性温度  $\theta_v^{(2)}$ 。如果一个分子里面有  $n$  个化学鍵，那么我們就有  $2n$  个振动， $2n$  个振动的特性温度。如果分子里面的原子数目是  $a$ ，那么一共有  $3a$  个自由度；如果这个分子是綫型的，那么它有 3 个直綫运动自由度、两个轉动自由度，余下  $3a-5$  个振动自由度；如果这个分子是非綫型的，那么它有 3 个直綫运动自由度、3 个轉动自由度，余下  $3a-6$  个振动自由度。無論如何，一个多原子的分子的振动自由度的数目一般都比  $2n$  大，多出来的是什麼振动呢？这自然是多原子参加的、較大范围的振动，前面所說的几位科学家建議我們用一个簡略方法来計算这些  $(3a-5-2n)$  或  $(3a-6-2n)$  个振动的頻率：算每一个頻率都是一样，等于所有  $n$  个化学鍵的撓曲振动頻率的平均值。而且，如果我們撇开过低

的温度，那么分子的平移自由度和轉动自由度是充分激發了的，因此我們就得出下列分子定容比热  $C_v$  的公式，其中  $k$  是玻耳茲曼常数。綫型分子：

$$\frac{C_v}{k} = \frac{5}{2} + \sum_{v=1}^n \frac{\left(\frac{\theta_v^{(1)}}{2T}\right)^2}{\text{sh}^2\left(\frac{\theta_v^{(1)}}{2T}\right)} + \frac{(3a-5)-n}{n} \sum_{v=1}^n \frac{\left(\frac{\theta_v^{(2)}}{2T}\right)^2}{\text{sh}^2\left(\frac{\theta_v^{(2)}}{2T}\right)} \quad (1)$$

非綫型分子：

$$\frac{C_v}{k} = 3 + \sum_{v=1}^n \frac{\left(\frac{\theta_v^{(1)}}{2T}\right)^2}{\text{sh}^2\left(\frac{\theta_v^{(1)}}{2T}\right)} + \frac{(3a-6)-n}{n} \sum_{v=1}^n \frac{\left(\frac{\theta_v^{(2)}}{2T}\right)^2}{\text{sh}^2\left(\frac{\theta_v^{(2)}}{2T}\right)} \quad (2)$$

$\theta_v^{(1)}$  和  $\theta_v^{(2)}$  的具体数字是从許許多多的分子实测得的頻率統計出来的，我們把它列在表 1 里。这也就是通过微觀的分析，把物質宏觀的性質总结出一般性的規律。有了这規律，一有了分子結構式我們就可以用 (1) 或 (2) 公式計算比热，一些典型結果列在表 2 里，其中也列入了实测的数据，我們可以看出这个計算方法是很可靠的。值得注意的是表 2 的最后一行，这个分子一时还查不出实测的比热数据，可能还没有测出，但是我們可以不用依賴实验把它算出来。

如果我們要知道气体在 100 大气压左右的情况，用理想气体的物态方程就不够准确，就得照顧到气体分子本身的体积和分子間的相互作用，也就是計算气体的維里系数。物理力学在这問題上的課題是：怎样从分子的結構式定出它的尺寸和相互作用的力。自然，因为在常温和較高的温度下，气体分子的轉动自由度是

表 1  
化学键的特性温度 [2]

键	$\theta_v^{(1)} \cdot K$	$\theta_v^{(2)} \cdot K$	键	$\theta_v^{(1)} \cdot K$	$\theta_v^{(2)} \cdot K$
C-C(脂肪族)	1307	935	H-O	5030	1940
C-C(芳香族)	2154	862	H-S	3694	1235
C=C	1724	1307	S=O	1797	748
C≡C	2990	539	S-C	992	402
C-H	4315	1510	在N <sub>2</sub> O的N-N	3190	848
C-O	1480	1610	在N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 的N-N	402	719
C=O	2500	1120	N-N	1437	1290
C-N	1437	647	N-H	4740	1724
C≡N	3190	345	N-O	1823	949
C-Cl	935	374	N=O	2112	935
C-F	1510	1724	Si-H	3132	1335
C-Br	877	1365	Si-O	1510	575
C-I	762	1264	B-H	3668	1654
			B-F	1280	992

表 2  
定压比热的近似计算值和实验值 [2]

分 子	温度, °C	定 压 比 热	
		近似计算值	实 验 值
CH <sub>3</sub> OH	137	12.9	11.8
NH <sub>3</sub>	0	8.4	8.7
	300	11.06	10.27
	500	12.51	11.31
	700	13.74	12.92
	850	14.52	13.22
	1000	15.15	14.65
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	20	20	21.8
	100	25.7	25.8
	350	39.45	38.9
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	10	11.85	11.72
	25	12.29	12.41
	50	13.04	13.79
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	64.5	14.1	13.4
N <sub>2</sub> O	20	10.14	9.24
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH	10	15.8	15.8
	50	18	18.66
CHCl <sub>2</sub> Br	27	16.19	
	42.7	21.72	

充分激发了的, 所以每个分子都在很快的转动。我们可以具体地估计一下分子自转一周的时间: 如果  $A$  是分子的转动惯量,  $\omega$  是自转的角速度,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是绝对温

度, 那么分子的一个自由度的平均转动能是  $\frac{1}{2}kT$ , 所以

$$\frac{1}{2}kT = \frac{1}{2}A\omega^2 \quad (3)$$

$A$  可以从转动的特性温度  $\theta_r$  算出来,

$$A = h^2 / (8\pi^2 \theta_r k) \quad (4)$$

其中  $h$  是普朗克常数。从 (3) 和 (4) 式我们可以算出转一周的时间,

$$\frac{2\pi}{\omega} = \frac{h}{k} \frac{1}{\sqrt{2\theta_r T}} \sim 5 \times 10^{-11} \frac{1}{\sqrt{2\theta_r T}} \quad (5)$$

像氧气,  $\theta_r \sim 2^\circ K$ , 那么在  $T = 100^\circ K$  的时候, 自转一周的时间是  $2.5 \times 10^{-12}$  秒。我们知道在 100 大气压左右的分子“碰撞”或碰头过程的时间大约是  $10^{-10}$  秒, 所以在一次见面的时间里, 氧分子已经自转了好几十次。我们可以说从一个氧分子来看另外一个氧分子, 它看不出什么哑铃形状的氧分子, 看见的只是风车般一团圆球。由这我们可以体会到为什么气体分子可以作为是圆球形的, 而圆球的半径是从分子的质中心到最远的一个原子的边缘。具体的运算是: 从分子的结构式, 利用已知的化学键的方向和原子的尺寸, 搭起分子的空间架子, 再求出分子的质中心, 找出离质中心最远的原子, 用这个原子的凡特瓦尔半径描出这原子的电子云有效圆球范围, 这就是最远原子的边缘了。我们就能这样找出整个分子的有效半径。

表 3  
分子直径, Å [3]

	由分子式	由 维 里 数		由分子式	由 维 里 数
Ne	3.20	3.08	环C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5.78	6.56
A	3.83	3.83	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.54	5.10
H <sub>2</sub>	3.14	3.28	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	6.59	6.33
N <sub>2</sub>	4.09	4.10	异C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6.94	6.90
O <sub>2</sub>	4.00	4.02	新C <sub>4</sub> H <sub>12</sub>	7.03	7.79
CO	4.10	4.10	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	6.60	6.09
NO	4.04	4.29; 3.56	异C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	6.98	6.98
N <sub>2</sub> O	5.21	5.15	正C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	7.88	7.03
CO <sub>2</sub>	5.13	5.13	正C <sub>3</sub> H <sub>12</sub>	9.04	8.23
CH <sub>4</sub>	4.16	4.28	正C <sub>3</sub> H <sub>10</sub>	11.56	9.98
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.33	5.54	正C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	7.76	6.96

Hamann 和 Pearse [3]就用了这个方法求出了分子的有效直径, 我们把结果列在表 3 里。在那里也列出了由气体的维里系数所求出来的分子直径, 我们可以看出这个方法也是相当成功的。当然, 对一个很长的分子来说, 像庚烷 ( $C_7H_{16}$ ), 它的转动惯量一定相当大, 因此转动也慢, 我们的“风车”模型就不合适了, 算出来的误差也自然要大些。但对一般不太大的分子来说, Hamann 和 Pearse 的方法是很有用的, 所以我们已经有一个从分子结构式算分子直径的暂行方法, 问题是怎样再加以改进, 怎样再找出一个计算分子间相互作用力的方法。

分子间的各向同性相互作用, 也就是分子的圆球模型是广泛地被用于物性理论, 像上面说过的维里系数的计算, 此外还在计算粘性系数, 扩散系数, 也用在正常液体的理论, 以及固体的物态方程理论。所以如果这个模型在不同情况下都一样可用, 都有同样的准确度, 那么通过理论我们就能把这一连串物质的多方面性质联系起来, 可以“举一反三”, 知道了粘性系数就能计算出同一物质的维里系数, 高压物态方程, 液体性质, 固体性质等等。这自然是物理力学的理想。但是问题没有这样简单, 在高压、在液态、在固态情况下, 分子间的距离很小, 分子的具体真实形状就不能用圆球来代表。正如人和人之间, 朋友做得越亲切就越需要知道个人的真脾气, 不能再随随便便认一下是人就行了。所以只用分子相互作用的一个规律就不够仔细。像 Lennard-Jones 规律:

$$\epsilon(r) = \epsilon^* \left[ 2 \left( \frac{r^*}{r} \right)^{12} - \left( \frac{r^*}{r} \right)^6 \right] \quad (6)$$

其中  $\epsilon$  是两个分子在  $r$  距离的相互作用势,  $r^*$  是平衡点 (也就是没有相互作用力) 的分子间距离, 也就是上节里所说的分子直径,  $\epsilon^*$  是在  $r^*$  的  $\epsilon$ 。这个规律在计算维里系数, 粘性系数等等“薄”气体问题的时候, 都能得到满意的结果, 但是一到“浓”气体问题像临界态、液态等等, 结果就不是一般地都好, 就有

好有坏。我想这里的原故是必需把分子的性质更仔细地体现出来, 也许能把分子分一分类, 用几个, 不是一个, 规律来代表它们。这个工作还没有开始。

在这里我们也要提一下一件 40 年前就完成了的工作, Grüneisen<sup>[4]</sup> 的固体物态方程理论。他把 Debye 的比热理论和 Mie 的固体弹性理论结合起来, 写出了固体的物态方程。一有了物态方程, 我们就可以算出热膨胀系数, 弹性系数和温度的关系。这些关系是工程师们所需要的, 但是一直埋没了这许多年, 没有被利用。把这个理论整理出来, 更加以改进也是物理力学任务之一。

以上我们所谈的大部都是平衡现象里的問題。在不平衡现象里除了粘性、扩散等问题以外, 热传导问题是很重要的。但是要计算气体、液体、或固体的热传导系数有许多困难至今还没有能解决。问题的要点是: 什么是能量传导的本体? 什么是传导的速度? 什么是传导体的自由路程? 在气体里, 看来问题是简单些, 能量传导的本体是分子, 传导的速度是分子的速度, 传导体的自由路程是分子的自由路程。但是困难在分子的能量有三种, 平移的、转动的和振动的, 三种是不是一起传导? 还是有先后? 现在大家都公认振动能传得慢些, 可是到底慢多少? 这方面虽说也有一些工作, 但是从分子结构式计算后滞时间还是一个没有解决的问题。在液体里, 能量传导的本体看来是晶格中的振动波。传导的速度自然是振动波的速度, 也就是声速。至于自由路程, 我们就得考虑到液体里的晶格结构是局部的, 差不多出了一个晶格以外, 分子的排列就没有一定的次序。所以振动波出不了几个晶格或分子直径就打乱了, 打乱了的意思就是自由路程打断了; 因此在液体里面的自由路程只不过几个分子直径。如果是如此, 那么一个波走一段自由路程的时间只有  $10^{-12}$  秒, 而振动自由度的后滞时间是比这长得多, 这就说明分子内部的振动能决不能参加热传导, 也证实了晶格振动波是热

傳導的本體。用這個概念所算出的液體熱傳導系數離實驗不出 20%。在固體里，能量傳導的本體也是晶格中的振動波，但對金屬來說更重要的是自由電子雲，這情況就已經複雜了，而最困難的是自由路程的問題。這和固體中原子的熱振動、固體的外加雜質、固體中的脫節等缺陷都有關係，我們在這些方面的計算都不完全，只有一些質的一般概念，還沒有量的理論。

在高溫的氣體里，另一個導熱的方式是輻射。這也就是電磁波在氣體中不斷地被吸收，不斷地再發射的過程。要分析這個現象我們自然也得先知道氣體分子，原子，離子等的能位譜，以及它們與電磁波相互的作用。這個問題比起計算熱工函數來要困難的多，我們還沒有一套完整的方法。如此看來，熱傳導這個非常重要的問題是還要等待將來物理力學家的努力。

我們在前面說到，研究不平衡現象主要地是靠分子運動論的方法，現在我們就要提一下另外的一個方法。這個理論就是不可逆過程的熱力學。如果沒有外界的干擾，在自然界里一切不平衡都有逐漸趨於平衡的傾向，而這個過程都是不可逆的。如果不平衡的程度小，也就是離開平衡不遠，那麼我們就可以利用熱力學中的振動論來做出一般的分析。當然，振動論是討論鄰近於平衡態的不規則的變動，因此有從不平衡到平衡，也有從平衡到不平衡。不可逆過程的熱力學有一個假設就是：不管從不平衡到平衡或從平衡到不平衡，過程在相空間所走的路都是同樣的一條窄胡同，所以就是撇開從平衡到不平衡的一面，只考慮從不平衡到平衡，只考慮宏觀的不可逆過程，也可以用熱力學攝法論的結果。這是 Onsager 的假設。在 Onsager,<sup>[3]</sup> deGroot,<sup>[4]</sup> Meixner<sup>[7]</sup> 幾個人的努力下，不可逆過程的熱力學已經成了一個完整的體系，在研究不平衡現象的因果關係里它是非常有用的。自然，不可逆過程的熱力學因為是一個一般理論也就不能夠給出具體數據，像擴

散系數有多大等等。但是它可以指出：因為有溫度的不均勻，就可以產生擴散；反過來因為有濃度的不均勻，也可以產生熱的流動。不但如此，不可逆過程的熱力學也給出這兩個現象的系數間的關係。也就是說，如果從分子運動論算出所謂熱擴散系數，那麼我們就可以很容易地算出因濃度不均勻而引起的熱流。所以不可逆過程的熱力學的用途是：一面可以奠定一切不平衡過程的體系和其中關係，一面它也可以節省許多計算的勞力。

用了不可逆過程的熱力學去分析有化學反應的流體，我們就發現一個有趣的化學反應和流體的應力張量間的關係。分析指出：化學反應速度可以改變一般熱力學里的物態方程關係，必需加上一個修正項；而流體膨脹或壓縮的速度也可以改變化學反應的速度。這是從前所沒有想到的相互效果，也是還沒有用分子運動論的方法去具體計算的效果。在爆震波里，化學反應的速度高，膨脹和壓縮的速度也是很大的，這兩個效果是一定非常重要的。把這些現象仔細分析一下也是物理力學里的一個問題。

另外一個物理力學的問題是研究超高溫氣體的性質，也就是離子化了的氣體的性質。我們知道在洲際彈道式導彈的附面層中可以達到一萬度以上的高溫，而氫聚變更要一億度的高溫，在這種溫度下的氣體都是離子化了的氣體，也就是等離子區了。因為它導電，可以被電磁場所影響研究它的運動是電磁流體力學的事；但是物理力學家一定先要供給電磁流體的運動方程式，也就是等離子區的宏觀物理性質。例如：等離子區里的粘性和導熱系數應該如何計算？應力張量和各個不均勻度有什麼關係？這都是要找出答案的。

我們在一開始的第一節里曾提到物理力學的目的是：為工程師設計出符合要求的材料。現在在最後我們再把這個問題說得更具體些。如果我們把固體作為一個十全十美的晶體，那麼我們就很簡單地能從它的結構算出拉破它所需要的力，這也就是完美晶體的強度。所不

幸的是：这样算出来的晶体强度要比实测的强度大几千倍，所以这理论固体强度是没有现实意义的。问题在什么地方呢？问题自然在我们不现实的假设：十全十美的晶体。因此人们就把各种脱节引入到单晶体里去，然后再计算有这种脱节的晶体的在外力下的变形和强度。自然我们还没有直接从显微镜看见脱节，它太小了；只不过有了一定脱节的密度的晶形，理论的计算确是和实验的结果相合。我们做到了用一个事物——脱节，去解释许多的实际塑性和强度现象，也就是用一个未知去代替多个未知，这是应当认为前进了一步。这个情形和原子分子论是相似的，谁也没有直接看见原子或分子，但是从由它们推演出来的结果来看，原子和分子一定是存在的。我们从这个观点来看，脱节理论是有它的重要意义的。但是问题并不止于此，照脱节理论所算出的单晶体强度比起实测的固体强度又太低了，这又是什么毛病呢？毛病就在工程上用的材料不是单晶体，而是多晶体——由许许多多细小的单晶体所组成的。多晶体是有别于单晶体的，因为多晶体有晶粒间界，而晶粒间界的性质和晶粒本身不同，由脱节所引起的形变也会因晶粒间界而受到阻挠，邻近晶粒方向的差别也会阻挠形变。这就是说多晶体比单晶体应该强一些好，这是合乎实际观察的，问题是在乎怎样具体把多晶

体的变形和强度计算出来。这问题是复杂的，我们不但要考虑到上面已经说到的因素，而且正如葛庭燧所说，也要考虑到晶粒间界本身的滑移和强度<sup>[1]</sup>。这还是纯金属或是金属的固体溶液，如果谈到一般合金，那晶粒又可以是不相同的，有两种以上的晶粒共同存在，其中关系就更复杂了。显然建立起这样一个固体形变和强度的理论是需要的，但这专靠物理力学家还不够，必得要金属物理学家和塑性力学家也参加，由微观的看法和由宏观的看法“双管齐下”才能解决这个困难的问题，只有到那时候，我们才会有设计工程材料的理论。

### 参考文献

1. Bennewitz 及 Rossner, Zeit. Phys. Chem. (B) 39 卷, 126 頁 (1938)。
2. R. Meghrebian, J. Am. Rocket Society, 9 月号, (1951)。
3. S. D. Hamann 及 J. F. Pearse, Trans. Faraday Soc. 48 (2) 卷, 101 頁 (1952)。
4. 見 Grüneisen, Handbuch der Physik, 10 卷, 1—52 頁 (1926)。
5. L. Onsager, Phys. Rev. 37 卷, 405 頁 (1931) 及 38 卷, 2265 頁 (1931)。
6. DeGroot, "Thermodynamics of Irreversible Processes", North-Holland Publishing Company, Amsterdam, (1951)。
7. J. Meixner, Zeit. Phys. Chem. (B) 53 卷, 235—263 頁 (1943)。
8. 葛庭燧, 物理学报 10 卷, 365 頁 (1954)。

(上接第 239 頁)

目的，才能使复习起到应有的作用。关于本编的主要目的是使学生对原子的核式结构获得较具体的了解，对于基本粒子得到初步的认识，而关于原子能问题只做为常识进行粗浅的介绍。复习时除了给予学生一个整体的概念以外，要注意以下几个重点：1. 原子的核式结构。2. 原子核外电子的分布。3. 原子核的组成及核反应方程式。4. 铀核裂变及原子能的意义。至

于各个实验装置、方法等知识则无关重要，不必在课堂上复习。

由于本编的复习时间很短，可能是一节到两节课的时间，所以选用教法时要注意考虑教师的主导作用。首先是较全面而系统的说明，进而扼要的讲述，尤其要重点明确，使学生对最基本的知识能够掌握，就算达到了复习的目的。