

物理化学力学

[苏]И·А·列宾杰尔著

洪 定 海 译

中国工业出版社

全苏政治与技术知识普及协会

物理化学力学

(一门新的科学领域)

苏联科学院院士

И·А·列宾杰尔

洪定海译

中国工业出版社

中 譯 本 序

物理化学力学是近十几年内发展起来的一門新的边缘学科。这門学科是在固体分子物理学，材料力学与物理化学，特别是近代胶体化学等基础上发展起来的。它的内容是研究决定着物体的力学性能和内部结构的物理化学因素，并利用这些因素来控制固体的力学性能和加工过程，控制物体的形成过程，以使其结构和性能符合既定的要求。这門学科的最终目的在于制定力学性能及其结构都合乎要求的建筑材料与结构材料的工艺科学原理。

这門学科对建筑材料与结构材料的生产 and 加工工艺，正在起着很大的理論指导作用。通过从物理化学力学角度对固体进行的研究，可以提高固体材料在各种使用条件下的强度和耐久性。同时，用加压、剪切、磨細，以及綜合利用物理化学因素和力学因素等方法，可以簡化、加速与改进各种固体的机械加工过程。可見，物理化学力学是关系到国民經济和科学技术发展的一門重要的学科。随着国民經济和尖端技术的不断发展，这門年輕的学科，将日益得到发展与完善。

苏联科学院院士 И.А.列宾杰尔写的这本小册子，概括地、比較浅显地介绍了这門学科的内容和研究对象，以及近年来苏联学者及国外其他学者在这方面所取得的一些成

01 06

就。这是一本知識性讀物，可以幫助我国讀者了解物理化学力学这門新的学科的概况。讀者如需要进一步了解这方面的知識和近几年的进展情况，最好在閱讀本书的同时，參閱П.А.列宾杰尔（ П.А.Ребиндер ）， Б.В.捷良金（Б.В.Дерягин ）， А.В.杜曼斯基（ А.В.Думанский ）， Н.Б.米哈依洛夫（ Н.В.Михайлов ） 等人在苏联胶体化学等杂志上发表的有关論文。

黃 蘊 元

于同济大学建筑材料系

1962.11.25

目 录

中譯本序

緒言	(1)
物质的結構力学性能及其意义	(3)
一門新的边缘科学——物理化学力学	(31)
获得力学性能及其結構均合乎要求的建筑材料与 結構材料(固体)	(39)
降低固体強度、促进固体形变的吸附效应	(51)
固体材料的磨細	(70)
結語	(82)
参考文献	(86)

緒 言

現代科學的重要任務之一是：獲得具有一定力學性能的、一定結構的、高強的和耐久的固體——建築材料、合金和塑料。

這一項任務同細致地研究各種物體的力學性能有關。但是，它既不屬於力學的範疇，也不屬於固體分子物理學的範疇，而且用舊的工藝方法（主要是經驗方法）是不能解決這項任務的。

物理化學力學這門新的邊緣學科的基本目的是儘可能充分地解決這一重要任務。這門學科是最近十年才發展起來的，它的发展主要是蘇聯物理化學家、物理學家和工藝專家共同努力的結果。

下面列舉的要由物理化學力學這門學科來解決的國民經濟問題表明，物理化學力學的迫切性是顯而易見的。

我國工業建築特別是住宅建築的宏偉規模要求，研究利用易于取得的地方性材料來製造新型建築材料，並且發展混凝土工藝，以保證最好地利用膠凝物質——水泥、石灰、石膏。解決這些問題的唯一科學基礎，就是研究實際固體強度理論和膠凝物質（各種水泥）硬化理論的物理化學力學。工業生產的主要膠凝物質——波蘭水泥在混凝土中能利用的還不到一半。制定具有科學根據的混凝土工藝，就能大大地改善水泥的利用狀況；就能提高混凝土

的强度和耐久性；就能减小混凝土和钢筋混凝土构件的截面；甚至能保证在承重构件上采用容重小的、隔热的、多孔的混凝土；并且能使混凝土的用量节约20~25%。这样，就可以大大地节省资金或者用同等数量的水泥来扩大建筑工程量。

磨细问题也有巨大的国民经济意义。在各种工艺过程中所利用的一切固体，一般说来，都应该磨得相当细。这样，就可以在不太高的温度和压力下，大大地加速这些工艺过程。

固态物质参与下的反应速度同固体颗粒的表面积成正比。正因为如此，随着颗粒磨细程度的增加，反应速度将会急剧增加。同时，磨细会提高固体分散（粉状的）混合物的均匀度，也就能得到质量更高的建筑材料、混凝土、陶瓷、金属陶瓷、铅笔心、颜料、填料等。

固体的磨细理论（用振动磨、喷射磨和其他粉磨设备磨细）同固体的破坏理论一样，已成为物理化学力学的重要组成部分之一。应该根据材料的磨细理论研究出粉磨设备的合理结构，以便将原料和成品的颗粒磨细到规定的程度。还必须研究出使用这些磨细材料的新工艺。这种新工艺，应该考虑到固体在磨细时产生的各种特性，而且首先应该考虑的是它形成结构的能力。合理地、最充分地利用磨细材料的优越性，也是物理化学力学的任务之一。

同物理化学力学有关的、工业上最重要的问题是制造出为发展新技术所必需的难熔、耐热和强度相当高的合金（就是在可能达到的极高的温度下仍然坚固的合金）。这

里还存在一个难加工合金的加工問題，首先是高溫下用压力加工的問題(热压或热冲压)。为了實現这些加工过程，还必须要有耐高溫的潤滑剂。而采用这种潤滑剂又有助于提高制品的表面质量，保护工具，消灭廢品并减小昂貴的加压設備的功率。

作者在这一本小冊子里力图向广大讀者介紹这門学科的內容，或者是象大家所說的那样，介紹这門学科的对象。

同时，还想扼要地說一說在物理化学力学初期发展过程中所取得的一些成果。这里主要是指苏联科学院物理化学研究所分散体系研究室和莫斯科大学胶体化学教研室同一些工业科学研究所密切合作下取得的成果。这些研究工作使得一些研究人員組成了一个强大的集体。这个集体将成为物理化学力学研究所的核心。苏联科学院化学学部已經提出組織这样一个新的科学中心。

物質的结构力学性能及其意义

物理体(首先是固体与各种材料)的最重要的性能是它們的力学性能:粘性、彈性、塑性和强度。这些性能决定了外力作用下物体抵抗形变*与破坏的能力，决定了物

* 当固体受到外力作用时，就要发生体积和形状的变化，我們就說固体发生了形变。这个固体就叫做形变体。形变有容积(体积)的变化(也就是容变)，还有切变、弯曲、伸长或压缩、扭轉等。

——譯者

体能不能用作建筑构件、机器和机械的零件；因此，它们是建筑材料与结构材料最普遍、最典型的性能。无论在技术上利用的是材料的哪一种物理性能，它都决定于这种材料或构件的几种力学性能（强度、塑性*、弹性*）的总和。

新技术对建筑物与机器提出了更加严格的要求：在高温、高压、高速、高应力和周期性的高频率作用下的稳定性。这些要求实际上就是对所用的材料（如水泥混凝土、沥青混凝土、合金、玻璃、塑料和橡胶）在力学性能方面提出的要求。这些材料在许多场合下应该有高度的疲劳强度（疲劳强度就是物体在极高的温度下，承受长期不变或者经常变化的负荷而不致于破坏，也不会随负荷时间的延续而逐渐出现塑性形变*，也就是不会发生徐变现象的一种性能）。

固体的力学性能与它的构造（物体的结构）、与在物体内部起作用的分子内聚力以及无秩序的热运动特性有密切的关系。正因为如此，所以我们常常称力学性能为结构力学性能。当我们提到固体的结构时，不仅应该想到它的晶粒的晶格构造，而且还应该想到一般多晶固体的分散系统的结构（дисперсная структура обычного поликристаллического твердого тела），多晶固体是由许多细小的晶

* 当物体所受的外力不大时，由于所加的力未超过原子间的结合力，这时外力除去以后可以完全消失的形变叫做弹性形变，并不消失的形变叫做塑性形变（残余变形），这种性能相应地称为弹性和塑性。——译者

粒（粒徑有大有小）不規則地排列而成的堆积体（срос-ток）*。

因此，固体結構不能單純地用它的单个晶粒的晶格特点（結晶化学的結構）表示，还應該用晶粒粒徑的分布（即所謂晶粒的級配曲綫）晶粒的共生和互相排列的条件以及物体的孔隙率来表示。物体的孔隙有两种：一种是由形状不一、大小不等的孔道（毛細管）网組成的开口孔隙（открытая пористость）；另一种是实际上彼此不連通的空腔和微孔所构成的閉口孔隙（закрытая пористость）。閉口孔隙与开口孔隙不同，气体与液体是不能通过閉口孔隙滲入固体中的。

在固体結構这个概念中还應該包括：固体中所包含的各种缺陷，正如我們在研究被固体吸附的介质对固体力学性能的影响时所查明的：当固体在外力作用下发生形变时，这些缺陷会不断发展。当这些缺陷在負荷下进一步发展到裂开的程度时，物体的均匀性就会降低；当应力接近极限强度值时，物体的不均匀性就达到了最高限度，在断裂时，就会出现现象“雪崩”（лавине）一样的现象。固体的这种有缺陷的結構对于研究破坏前一瞬間的形变过程具

* 晶体的特征是它的内部构造非常規則，并且具有严格的規律性。它的組成部分（质点，也就是原子、离子或分子）在三度空間內排列整齐并且有严格的周期性，很象格架，所以称为晶格。不同的晶体，就有不同的晶格构造。通常，晶体都很細小，一个个細小的晶体，称为晶粒。由許多晶粒堆积而成的固体称为多晶固体，晶粒和多晶体（晶粒的堆积体）的关系，打个比喻，就象砂粒与砂堆一样。——譯者

有特別重大的意义。

以后，我們經常將“結構”这个術語理解為各種固體所特有的一種空間格架，它由原子、離子、分子或膠體粒子彼此以分子內聚力結合而成。決定固體的彈性與強度的這種結構，可能是象晶体中那樣有規則的空間晶格（也就是真正的固體），也可能是象凝聚結構*、凝膠**、膠凍以及許多玻璃體那樣不規則的骨架。

远程有序性（дальний порядок）是晶格規則的晶体所特有的特点。它表示在某原子或原子團所佔據的結點外，任何相同距離的結點上，都有相似的原子或原子團規則地交替着。只有無秩序的热运动才能破坏這種有規則的交替，不過，从統計學的观点看来，在實際的晶粒中，無秩序的热运动對理想晶格所具有的嚴格規律的破坏，是均勻分布着的（也就是說，在各個結點上破坏作用都是一樣的——譯者注），無論離選定的某一個原子的距離是遠是近，這種破坏都是一樣的。

液體与晶体不同，當它的密度与固體相同時，在液體中，就沒有远程有序性，而只有近程有序性。也就是說，只有在最近某一已知分子的中心的範圍內，分子或原子的分布才有規律，而在稍遠的距離以外就分布得沒有規律。用現代的結構分析方法（利用波長可以和分子間的距

* 參見本書第15頁第2行。——譯者

** 在一定條件下，膠體溶液中的全部膠體粒子（質點）轉入特殊的半液體狀態，同時獲得固體的某些性能，這種過程稱為膠凝，這種膠凝產物稱為凝膠（Тель）。——譯者

离相較量的阴极射綫或X射綫的衍射)可以对液体內的近程有序性和晶体內的远程有序性加以定量的研究。这方面的大量研究成果已为現代結晶化学的晶体构造与液体构造的特征,在定量研究方面提供了极为珍贵的資料。

分子內聚力将排列得不規則的胶体粒子結合成空間凝聚結構,在这种結構中(例如在凝胶中)是完全不会有晶体所特有的远程有序性的。虽然,构成这种空間結構的基本要素,可能是粒徑从1到0.001微米的胶态粒徑的晶粒。消除单个粗晶体(单晶体)*所特有的远程有序性,方法之一可将粗晶体变为由細晶粒不規則地堆积成“堆积体”(多晶体)。在通常的結晶条件下,用不断减小晶粒粒徑的办法就可以做到这一点。这样看来,由于沒有象单晶体所特有的那种有規則的外形而称为玻璃质或无定形的物体,实际上是从单晶体轉变成隱晶状态(крипто-кристаллическое состояние)的空間凝聚結構。但是,無論这些空間結構的晶粒排列得多么規則(或者,反过來說,是多么不規則),它們都具有固体的某些性质:一定的彈性和强度。指出下面这一点是特別有意思的:空間結構的結構要素,排列得不規則、沒有远程有序性,总是使它的强度大大增高。

的确,有些单晶体(如石墨、云母、石膏、食盐、方

* 所謂“单晶体”,一般是指沒有一定輪廓的单个的大晶体,它的形状随結晶以前液体容器的形状而異。它的結晶过程是从一个中心(晶胚)往外发展,整个液体都被唯一的一个晶格所貫穿,因此这种晶体一般都是綫形、棒形或者是小坩堝形(原书作者)。

解石等)有很明显的解理面(плоскость спайности)。在垂直于解理面的方向上,晶体的抗拉强度最低,因为在解理面之間,晶格的間距比在其他任何平面上的晶格間距大得多。象金屬单晶体之类的晶体的特征是具有滑动面(плоскость скольжения),即使作用力很小,金屬单晶体也会沿着它的滑动面发生残余的切变*,这种形变反映了这种物体的塑性,也就是它所具有的容易发生残余形变的性质。显然,在排列得不規則的、由細晶粒互相交錯而成的堆积体(多晶体)中,解理面与滑动面是不起什么作用的,例如在玻璃中就完全没有这种降低强度的因素。因此,如果把玻璃看成是粘度极高的液体,那末可以肯定地说,这种液体不仅具有固体的各种性能,而且还具有比晶体更高的强度。

古典的物理学,在研究物理力学性能时,对于物理化学因素,特别是物体本身的状态与物体构造的特征、周圍介质的特征注意得不够。

一般认为:固体与液体有明显的区别。但是,无论液体或固体都是粒子以高度的密集程度在空間內堆积成的物体,它們与气体的区别在于它們的分子力实际上是均等的(分子力只与粒子間的間距有关);可压缩性非常小(也就是说,体积的弹性非常高)。

分子物理学的进展,特别是胶体化学中关于分散系統結構形成方面的知識的发展表明:一方面液体与固体的区

* 參見第4頁注。——譯者

別并不明显，它們的區別具有动力学的特点（即松弛的特点 *релаксационный характер*）*；另一方面，在理想的彈性固体与粘性液体之間有着一系列連續不断的过渡，大量各种各样的实际物体都具有过渡特征。由此可以得出結論：关于物体的力学性质取决于它們的結構的細微特点与化学成分的知识應該日益成为近代物理化学科学领域中一个巨大的、独立的、重要的分支。

早在一百年以前，著名的英国理論物理学家麦克斯韦就根据关于松弛現象的概念提出了液体与固体在力学性能上没有什么原則性区別的見解。松弛現象指的是受力而发生形变的物体在形变值維持原值不变的条件下，彈性切应力会逐渐消失，也就是說，貯蓄在已經形变的物体中的彈性能量会以轉化为热能的方式逐漸消失。

松弛过程和扩散过程一样，与組成物体的微粒（分子）的无秩序的热运动有密切的关系。正与热运动本身一样，松弛过程是一切物体都具有的一种自发的过程，它不需要任何外加的作用；在任何一种实际物体內都会发生这种过程。問題只在于各种液体中彈性应力**降低到一定数值所需要的松弛時間（或者叫做松弛期 *период релаксации*）有的长、有的短。如果，松弛期比一般观察或試驗的

-
- * 受力而变形的物体在形变值保持不变的条件下，应力逐渐消失，象拉紧的弦自己会逐渐地放松一样，这种現象叫做“松弛”，能迅速松弛的物体就象液体，不能迅速松弛的物体就象固体，所以說固体与液体的区别有松弛的特点，下文将会詳細論述。——譯者
 - ** 应力解除后，形变也能完全消失的，这种应力称为彈性应力。——譯者

時間長，那末，這種液體就象固體；反過來，如果弛緩期比一般觀察的時間短，例如比一秒钟（凭人的感覺器官所能感覺的最短的時間）短，那末，這種物體就象液體。因為，這時候會有流動的現象，彈性應力值會很快地降為零。也就是說，一開始外力所引起的彈性的切變會很快地變為外力消失後（也就是沒有應力時）也能保持的殘余形變。如果，不是保持原有的形變值，而是保持原有的應力值不變，那末殘余形變就以恒定的速度（等速）增加，也就是說，會有穩定的流動過程*。因此，某一物體是固體還是液體，就要看造成應力的外力作用時間比這個物體的弛緩期是長些還是短些。弛緩期是聯繫液體性能與固體性能為一體的主要常數。利用關於因次的概念，用包括物體的粘度 η 和剛度（剪切彈性模量 E ）的公式表示弛緩期是很容易的。為此，必須利用表示形變 ϵ 與剪應力 P 成正比例關係的關係式（虎克定律）：

$$\epsilon = \frac{1}{E} \cdot P$$

微分成相應的形變速度 $w = \frac{\delta}{\tau}$ 與剪應力 P 成正比例的關係式：

$$w = \frac{\epsilon}{\tau} = \frac{P}{\eta}$$

* 流體流動時，到達空間任何一固定點的流體質點的速度總是有相同的大小與相同的指向這樣的流動叫做穩定流動。——譯者

式中 η 是牛頓粘度*。

由上式左边得到的時間因次 τ 值，應該是表示已知物体特性的一个常数。因为它等于上式的右边，等于粘度 η 和刚度 E （阻止形变的抗性）两个常数的比值，因此，这个比值显然就是松弛期 θ ，即：

$$\theta = \frac{\eta}{E}$$

在任何一种液体中，如果形变力作用于物体上的時間比物体的松弛期短得多，那末，在力作用的这段時間內，物体还来不及流动，液体也就成了彈性的固体了。例如，我們假想在水上走路，如果，每走一步所花的时间不超过水的松弛期（对水來說： $\eta = 0.01$ ， $E = 10^{11}$ ，因此， $\theta \approx 10^{-13}$ 秒），而远比可以测量的時間短，那末，我們就可以在水上走路而不致于沉入水中。当然，这是不可能的事。不过，对于粘度比水大得多的液体說来，如果，它們的松弛期短到完全可以测量的話（例如，瀝青的松弛期就是可以直接测量的），那末，当外力作用時間极其短促时，粘度这么高的液体就会在脆性破坏之前成为完全符合虎克定律的真正的彈性体。М.О.柯恩菲尔德（Корнфельд）在А.Ф.約飞（Иоффе）院士的試驗室中，曾以試驗表明：一股通常很容易流动的液体流，在急促的冲击作

* 实驗研究各种液体的粘度表明了，它們之中有一部分服从于牛頓定律，另一部分不服从于这定律，服从牛頓定律的体系中，粘度和流动速度无关，即和毛細管两端压力降无关，这种粘度称为正常粘度也叫牛頓粘度。——譯者

月下，例如，在子彈的射击下，也会象玻璃一样地脆性碎裂。如果延长外力的作用時間，那末，即使維持作用力的大小不变，也絕不会发现彈性形变。按照 Я.И. 富連开尔（Френкель）教授极为中肯的說法：它們被液体的流动性“打扮”起来了。粘滯的流动是等速的流动。它的速度与主动切应力成正比，比例常数就是粘度（或松弛期）的倒数。因此，这个比例常数被称为这种液体的流动性（текучесть）。

彈性模量与溫度关系不大，溫度升高时由于分子間距的增大，也就是分子力的减小，模量稍有降低；而粘度与松弛期却随溫度的升高而急剧降低。因为热运动的剧烈程度增高时，物体在剪力作用下，从一种暫时的平衡状态轉变到另一种平衡状态的趨勢（即流动性）大大地增加。在我們的柏油馬路上，很容易看到这种現象。冬天，行人、馬和載重汽車在柏油馬路上通行时，并不会在馬路上留下明显的行迹（由它們的重量所引起的形变还完全是彈性形变，因为，这时候，路面材料的松弛期是如此之长，以致在力作用期間，实际上，它还来不及发生显著的殘余形变，也就是說，还来不及流动，这种形变还是完全可以恢复的）；通行后（力的作用消失后），形变又完全消失。在夏天炎热的日子里，情况就完全不同了，通行后，会以压痕的形式出現大量损坏路面的殘余形变。

更明显的例子要算是普通的玻璃。正如前面提到的：玻璃可以看成是非常粘的液体，不过，在常溫下，玻璃（如窗玻璃）的粘度非常高，高到难以測量的程度（它的