

发展新材料的一些物理力学问题: 材料的力学性质和材料设计

葛庭燧

中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放研究实验室, 合肥 230031

中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京 100080

提要 本文论述了发展新材料必须进行材料设计, 在设计当中要进行各个学科层次的分工与合作。结构材料设计的主要问题是材料的力学性质, 这包括高强度、优良的加工性能和高的阻尼本领, 其关键环节是加强物理力学和力学物理的研究。

关键词 材料设计; 力学性质; 物理力学与力学物理; 材料强度; 韧性; 阻尼性能

1 发展新材料与材料设计

发展新材料和材料制备工艺要有明确的要求和具体的思路, 这就首先需要进行材料设计。材料设计就是根据材料科学的原理, 按照指定的使用条件和性能要求来设计材料的成分和组织结构以及加工工艺, 也就是制订配制新材料的“丹方”, 就象是开丹方抓药治病似的。为了使得开出来的“丹方”很灵验, 必须广泛地预先了解材料的成分和组织结构与其性能的关系。现代高新技术和工艺的发展对于材料提出了越来越严峻的要求, 传统的“炒菜”和“试一试看”的发展新材料的方法已经不适用, 必须有一套合乎科学的材料设计方案来进行指导。

一个完善的材料设计包括许多环节, 从构思到制备的过程中要解决不同层次的问题。在进行某种具体材料的设计时, 首先要考虑, 控制这种材料主要性能的是何种内部过程。这可以分为量子效应、电子效应、原子和分子效应以及显微组织结构效应或细观效应。当然也要考虑外部条件对于这些过程的影响。这些不同层次的微观的、细观的和宏观的过程都属于各个不同层次的学科所研究的对象, 所对应的学科层次是量子物理和化学、固体物理学、材料科学、力学、材料工程以及系统工程, 所对应的设计层次是量子元件设计、电子元件设计、原子和分子元件设计、工程设计以及系统设计。

上述各个层次各有自己的特点, 但其间也存在着交叉和紧密联系。各种材料所要求的设计层次并不相同。例如对于信息材料来说, 所要求的主要是量子元件和电子元件的设计, 而对于结构材料来说, 则主要的要求是原子和分子元件设计和工程设计。因此, 在进行具体材料的设计时, 必须抓住它所牵涉到的主要内部过程和学科层次, 着重解决主要矛盾, 对其规律进行深入细致的了解, 然后才能够提出有效的设计原则和具体措施。这就需要在有关的各

个学科层次进行具有各该学科特点的基础研究，解决“知其所以然”的问题。

2 材料设计中各个层次的分工和合作

我们强调分工解决各个学科层次的基础研究问题的目的是为了能够更好地发挥各个学科之间的联系。有分工才能达到更好的合作，只有分工没有合作则会导致不同的学科各不相干，互相分割。事实上，各个层次并不是孤立的，它们之间本来就存在着紧密联系。近年来发展起来的“协同论”或“系统科学”为材料设计提供了一个理论框架。“协同论”研究一个系统内各个子系统之间的相互影响和协同作用。所以，电子行为，原子和分子结构，晶体缺陷，显微组织和宏观裂纹等都可包括在内。我们认为，进行材料设计必须解决跨学科的问题，从而需要组织和协调有关学科的力量从理论方面、应用方面和工艺方面进行合作和综合研究。单从一个方面进行孤立研究会形成一个封闭系统，使知识闭塞，思路枯竭，并且会理论脱离实际。因此，搞材料设计就象是接力赛跑一样，有人跑第一棒，有人跑第二、三、四棒，根据教练员的总体安排和战略部署，跑每一棒的运动员都担负着各自的特殊任务，例如跑第一棒要争取跑道，先声夺人，跑第四棒的要奋力冲刺。跑每一棒的运动员要把他跑的那一段跑好，而各棒之间又有紧密的衔接和默契，做好接棒和递棒的工作。这样，一方面可以充分发挥跑各棒的运动员的特长和潜力，另一方面从第一棒到第四棒又组成了一个链条的整体，跑每一棒的运动员可以根据自己担负的特定任务而奋力拼搏，为获得整个接力赛的优异成绩做出各自的贡献。这就是说，在材料设计这个链条上，每个学科层次必须深入地了解该层次的问题，才能够对于整体设计发挥最大的作用。

在材料整体设计上，我们需要能够做好整体安排，但是更需要能够深入细致地做好每个环节工作。只有科学地安排这整体与局部的关系才能上下沟通，程序顺达，层次分明，分工协作。如果各个层次的工作不够深入，则会形成做基础理论研究的人既不理论也不实际，做实际工作的人只会“炒菜”，不能够理解和交流搞基础理论的人传来的信息和思路。当然进行每个研究层次的人也要了解整体安排和部署，要扩大自己的知识面，了解各个层次之间的联系，但最重要的还是做好自己的“本职工作”，这就是“分工”和“合作”的辩证法。

3 结构材料设计中的主要问题是材料的力学性质

当前发展新材料的热门话题是信息材料和生物材料，但是对于我国当前经济建设的需要来说，结构材料仍然是关键材料，因为归根到底，生产工具的制造总是离不开结构材料。对于所有的结构材料来说，力学性能是最重要的使用性能。任何工程结构、机械零件和生产工具在使用过程中都要受到各种形式的外力的作用，这就要求所用的材料具有能承受外力而不超过允许变形或不破坏的能力。某些信息材料，例如微电子材料与组件，在使用当中也常常受到力和热的作用，引起了热破坏，因而也要求具有相适应的力学性能。在生物材料方面，新近也发展了生物力学，生物振动力学，活组织和骨骼的力学性质等学科。力学性能有别于其它物理性质之处是它的结构敏感性，因而结构材料设计所要首先考虑的是控制材料的力学性能的原子和分子效应以及显微组织结构效应，所牵涉到的性能主要是弹性、范性(塑性)形变和断裂，所牵涉到的学科是固体物理学，材料科学和力学。对于非金属结构材料，还牵涉到电子效应和量子力学。从过去的情况看来，关于材料的力学性质方面的各个学科层次的研

究内容是相当割裂的，是彼此不相联系的。例如物理学进行的关于材料的力学性质的研究只强调材料的弹性，采用量子力学的方法来研究电子的运动和变化，计算原子间的结合力，而关于范性的研究则只考虑位错的运动和增殖，所采用的计算方法主要是连续介质弹性力学。这就把材料的弹性和范性割裂开来，无法理解从弹性到范性的过渡。在目前，由于金属学和物理冶金学的拓宽而形成的材料科学则只注重显微结构的组态和变化（这包括光学显微镜和电子显微镜所能观察到的范围），着重研究裂纹的扩展引起材料断裂的过程，对于各种晶体缺陷（包括点缺陷、位错、晶界等）的结构及其存在状态以及它们的运动变化在形变和断裂过程中所发生的作用研究得较少。各个学科之间的割裂现象以力学与物理学之间的鸿沟最为明显。直到最近，材料力学工作者所注重的是工程设计，把材料看作是一种连续介质，不考虑它的结构和结构缺陷，进行的工程设计只是根据实际测得的材料的力学参量指标（例如屈服强度，断裂强度，延伸率和面积减缩率等），用材料力学的原理和计算进行近似的评估。因此，为了提出精确定量的设计，保证系统的安全和可靠，必须进行跨学科的综合研究。对于结构材料的设计来说，这就需要物理学与力学的紧密结合，大力发展物理力学或力学物理这个新学科，并加强进行相关的基础研究。

现代科学技术的发展形成了在高度分化的基础上走向高度综合的大趋势，传统学科之间的界线逐步被打破，边缘学科和交叉学科日新月异。为了迎接新技术革命的挑战，人们必须以创新和开拓的科学精神奋勇拼搏，阔步前进。

4 结构材料设计的关键环节是加强物理力学的研究

对于新型结构材料的主要要求可以归结为两个方面：第一，需要具有一定的强度，从而在服役当中不致于“失效”。这主要表现在“断裂”上，包括在交变载荷下的疲劳，在高温下的蠕变和低温下的变脆，以及在极端条件下的力学行为。第二，要具有优良的加工性能，这才能够把材料制成所需形状的机械元件。人们把对于这两个方面的期望归结为“**金属的强度赶陶瓷**”，“**陶瓷的塑性赶金属**”，这很形象地表达了设计新型材料或改进传统材料的指导思想。我们认为，除了上述两种要求以外，还可以加上对于阻尼性能的要求，这就是能够消除机械振动的本领。对于运转速度日益提高的机械元件来说，高的消震（阻尼）本领是必要的。新近有人认为应该把阻尼本领作为材料的一项重要的力学性能指标。下面让我们针对着对于新型结构材料的上述三种要求来阐明设计新型的结构材料所牵涉到的学科层次以及它们之间的联系，并进而说明基础理论研究对于材料设计的重要意义。

4.1 关于材料强度的问题

就目前应用得最广泛并且最重要的金属材料来说，在传统上提高强度的主要措施是合金化。金属物理学工作者研究了固溶强化、沉淀强化、弥散强化等等合金强化的措施，广泛地应用了晶体缺陷和位错理论来说明强化的机制。这与理论强度和晶须的研究相配合，逐步发展了用复合材料的方法来提高材料的强度，并且在一定程度上解决了强度与脆性的矛盾，但也提出了尺寸稳定性和界面反应的问题。为了达到“金属强度赶上陶瓷”的目的，我们不能完全依靠晶体缺陷的机制来说明问题，而必须考虑电子效应所引起的键力的作用，这就牵涉到量子层次的问题。另外，为了解决工程设计问题，必须能够了解新材料在各种使用条件下的应力与应变的关系，这就需要力学工作者列出材料的本构方程。断裂力学的发展使人们能

够从试验测出的材料裂纹扩展的速度来推知带有裂纹的机械元件的残留寿命，但要预知裂纹的扩展速度却不得不求助于位错及界面的运动和增殖的知识。总之，要了解材料的断裂机理，必须了解材料的弹性和范性形变的过程，因为即便是最脆的材料，在断裂以前也会发生一定的范性形变。另外，要了解裂纹的成核和萌生的问题，也需要研究材料的整个服役过程及其历史。这些都需要从量子、电子、原子和分子以及显微结构的运动变化及其相互作用的角度来考虑。要解决这些物理学和力学交叉的问题，必须依靠两方面的工作者的紧密合作。要沟通物理学和力学有如挖隧道一样，物理学工作者可从物理学这一头向力学挖过来，这可以叫做力学物理；力学工作者可从力学这一头向物理学挖过来，这可以叫做物理力学。这样，两方面的研究工作者既有了共同的目标，也有了共同的语言，隧道总会挖通的，关键是既要有分工又要有联系。

4.2 关于材料的机械加工性能的问题

金属材料的加工强化性能使人们能够按照需要把金属加工成所需的形状，例如拉成线材或轧成薄板。这就使金属有别于陶瓷，因为陶瓷很脆，难以通过机械加工而变形。这也使金属有别于粘弹性材料，因为粘弹性材料很软，难以保持稳定的形状。金属材料的特异的力学性质既使它能够在外力的作用下发生范性变形，又由于它的加工硬化性能可以使它变硬并通过热处理退火使它变软。目前虽然有了基于位错过程的加工硬化理论，但都不够成熟。这就使得“陶瓷的范性赶金属”的愿望难以实现。关于晶界的研究使我们认识到晶界具有粘滞性质，能够在切应力的作用下发生粘滞性滑动，从而沿晶界的原子扩散率较高。在这个基础上，人们认识到具有晶粒尺寸约为纳米量级的多晶陶瓷材料会大大改进陶瓷的脆性，使它在较低的温度下就具有一定的范性。这引发了人们研究陶瓷材料的晶界或陶瓷与金属的界面的力学性质的浓厚兴趣。这又是一项跨学科和跨层次的综合研究。

4.3 关于材料的阻尼性能

人们很早就认识到，材料能够很快地压抑机械振动的性能是非常有用的一种材料性能。这种阻尼性能既与材料有关，也与一些外部参量，例如温度、振动频率和振幅以及周围环境、外加磁场及电场有关。对于一个结构系统来说，如果在机械设计方面是完善的，则对于机械振动的阻尼本领决定于材料的本身。很明显，在必需把机械元件或结构系统所发生的振动减小到一个临界振幅以下的情况下，就必须求助于材料的阻尼性能，这就迫切需要了解材料的阻尼性能的来源以及各种外部参量对它的影响。由于近代机械设备的运转速度越来越快，所引起的振动就越为激烈。把振动振幅加以限制的必要性，可能是由于一个设备的正常运转所必需，可能是由于要延长系统的可用寿命，也可能是为了减轻操作者所受的干扰。

噪声一直是在交通工具和家用电器中困扰人们的质量问题。人们固然可以在设计中尽量避开器件可能产生的本征振动，然而消灭噪声的更为明智的做法是选择那些不会在声波范围内发生本征振动的材料来充当结构材料，发展不会“喊叫”的材料。

众所周知，疲劳断裂引起了许多严重事故。材料的疲劳寿命决定于在材料中发生的交应变振幅的大小。可以预期，高阻尼材料的采用将会提高振动机械部件的疲劳表现和疲劳寿命。

高阻尼材料的设计包括着各个层次的跨学科问题。对于包括着许多自由度的设备系统来说，可以通过工程设计的办法引入一定的惯性元件和弹性元件的组合，使得整个系统在某一

自由度对于给定的振动频率完全不发生振动，但是就一般情况来说，就必须通过采用“结构复合阻尼”和“材料阻尼”的办法来达到阻尼的目的。结构复合阻尼所根据的原理是把高刚度材料与高阻尼材料组合到一起成为一个元件，例如在金属板上涂上一层高粘弹性材料，或者用纤维增强树脂材料。这种类型的阻尼也可以在一定程度上包括“玻璃-陶瓷”一类的情况，其特点是高阻尼主要产生于两种不同材料之间的摩擦所引起的振动能量的消耗，也就是所谓的“外耗”。

材料阻尼指的是在一种材料内部所引起的对于振动能量的消耗，也就是所谓的“内耗”。内耗的来源是由于材料内部有缺陷或不均匀结构存在。对材料施加一定的策动力使它振动时，物体内部要发生相对应的变动，由于有缺陷或不均匀结构存在，物体内部的变动就会与外部策动力不同步，从而使物体被激励而获得的振动能量被消耗，物体就会渐渐停止振动。物体的振动停止得越快，说明物体的内耗越大，也就是阻尼本领越高。产生内耗的物理机制很多，但是从得到高内耗或高阻尼材料的角度来看，最有希望的是位错弛豫效应，各种界面（晶粒间界，相界，孪晶间界，畴界等）的运动以及相转变（玻璃转变，热弹性马氏体转变，沉淀）效应所引起的内耗。

上面所谈的阻尼机制主要是牵涉到固体的晶体结构和晶体缺陷问题，但是非晶材料却一直被认为是属于最高阻尼材料的行列。另外，非晶高分子材料和金属玻璃也都表现高阻尼性能，但是关于这些方面的系统研究很少。

应该指出，材料的阻尼本领与材料的强度是一对矛盾。高强度材料的阻尼本领低，低强度材料的阻尼本领高。高阻尼材料的设计者必须通过深入了解阻尼（内耗）的机理才能解决这个矛盾问题。

5 结 语

上面着重讨论了材料设计的问题。要发展新材料必须进行材料设计，但是材料设计只能是发展新材料和制订新工艺的最初始的一个环节，接着还需要进行设计的可行性试验和中间试验。材料设计方案是否灵验还需要通过实践来判断。本文的目的在于说明各个学科领域踏踏实实的基础研究是进行科学设计的关键环节，重视创新才能善于创新，这期间没有捷径可走，是不能一蹴而就的。

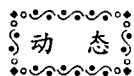
SOME PROBLEMS OF PHYSICAL MECHANICS IN THE DEVELOPMENT OF ADVANCED MATERIALS: MECHANICAL PROPERTIES AND MATERIALS DESIGN

Ge Tingsui (T.S.Ké)

LNM, Institute of Mechanics and Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids,
Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences

Abstract This paper expounds that it is necessary to share out the work and cooperate with one another among different disciplines for the design of advanced materials. The principal problem in the design of structural materials is the mechanical properties of the material, which include high strength, fine mechanical working performance and high damping capacity, the key link of which is the strengthening of the study on physical mechanics and mechanical physics.

Keywords *materials design; mechanical properties; physical mechanics and mechanical physics; materials strength; ductility; damping behavior*



我国学者试将遥感技术用作岩石力学的一种新测试手段

[本刊讯] 据国家地震局、中国科学院、国家航天局耿乃光等人近年来发表的文章,岩石在加载过程中其内部产生应变的同时,其红外辐射和微波辐射也发生相应变化。他们是在探索地震预报新方法的模拟实验中,借助于先进的遥感设备观察到上述现象的。这方面的研究工作在继续进行。据了解,这项研究已推广到混凝土和金属的加载实验,获得了类似结果。