

材料科学研究的发展与动态

郭景坤

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

随着社会和人类文化的进步, 社会对新一代材料的要求日益提高, 于是促进了材料研究的飞速发展. 本文阐述了新一代材料的特点, 认为材料科学研究发展方向有: (1)多相复合材料; (2)纳米材料; (3)智能材料; (4)生物医学材料; (5)材料的无损评价等. 此外, 还对材料科学的发展提出了一些建议.

Abstract

The ever higher demand for novel materials due to the progress of society and civilization accelerates the development of material research. The characteristics of the new generation of materials are described in this paper. An overview and suggestions are presented for new areas of material science research dealing with multiphase composite materials, nano-scale materials, intelligent materials, biological and medical materials, and non-destructive evaluation of materials.

一、材料是科学技术的先导

自古以来, 人类文化的进步都是以材料的发展为其标志. 一种新材料的发展可以引起人类文化和生活发生新的变化. 石器、陶器、瓷器、铁器、铜器、玻璃、钢、水泥、有机高分子、单晶材料……等的发明都为人类的生活带来幸福. 科学是人类对自然的认识, 技术是这种认识基础上的再创造. 而材料的发展则保证了科学技术的实现. 没有新材料的发展就不可能有新的科学技术的进步. 因此, 从这个意义上说, 材料是科学技术的先导. 当然, 材料的发展依赖于其他科学技术的发展, 这是相辅相成的关系. 但是相对来说材料科学还比较年轻, 因而具有极大的发展潜力. 按日本通产省的估计, 今后若干年对先进材料的市场估计年增长率为 10%, 2000 年约达 9.5—12.6 万亿 (10^{12}) 日元. 其中高分子材料、含氢合金、无机材料、碳纤维、生物材料(无机)等增长最快, 特别是氧化

物系统的超导材料将会有数量级的增加. 市场估计 2000 年先进陶瓷为 6.014 万亿日元, 约为 1990 年的五倍, 其中功能应用方面的材料将从 1990 年的 72.4% 下降为 59.6%, 表明其他方面的应用比例将增加.

二、对新一代材料的要求

人类的进步对材料不断提出新的要求, 材料是人类赖以生存和发展的物质基础. 众所周知, 人类与其他动物的根本区别在于人类会使用工具进行生产, 因而使用什么材料来制造工具往往成为人类文明发展的一个重要标志, 并在历史上以此来划分人类的时代, 如石器时代、青铜器时代、钢铁时代. 当今人类正面临一场新的技术革命, 需要愈来愈多、品种各异和性能独特的材料. 现代社会对新一代材料的要求大致有下列几点: (1)结构与功能相结合, 即要求材料不仅能作为结构材料使用, 而且能具有特定的功能或多种功能, 最近的梯度功能材料的

发展就是一个明显的例子；(2)智能型,即要求材料本身具有感知、自我调节和反馈的能力,具有敏感和驱动的双重功能,就如同模仿生命体系的作用一样；(3)少污染,即为了人类的健康,要求材料的制作和废弃的过程中尽可能少地对环境产生污染；(4)可再生性,即一方面可保护和充分利用自然的资源,另一方面又不为地球积存太多的废料；(5)节约能源,即要求制作时能耗尽可能少,同时又能利用或开辟新的能源；(6)长寿命,即要求材料能少维修或不维修。这些基本要求构成了新一代材料发展的总趋势。

三、材料研究发展的方向

材料研究发展的方向应遵循以上新一代材料发展的总趋势。首先强调材料科学基础研究的重要性。材料科学作为一门独立的科学需要不断完善和发展,从而逐渐增强它对材料工艺过程的正确指导作用。这里蕴藏着理论与实践辩证统一的关系。理论来源于实践,反过来又指导实践。材料科学对材料研究指导作用的一个重要方面是材料设计。根据使用的要求对材料的组成和结构进行设计,以达到所要求的性能,这是发展新材料的必由之路。因此为了进行有效的材料设计,必须广泛研究材料的合成与制备中的科学问题,研究材料的组成、显微结构及其与性能之间的关系和规律,研究材料的相关系以及材料的缺陷、损毁规律、无损评价和使用寿命预测等。在新的理论指导下,又必须进行新的实践,以求得新的发展。下面介绍当前材料研究应该发展的几个方向。

1. 多相复合材料

为满足新技术对材料性能的综合要求,不得不放弃单体材料后处理改性的唯一途径,采取取长补短的两种或两种以上单体进行有效复合化的复合材料。因而多相复合材料成为当前材料研究的重要对象,它的内涵已极其广泛,主要包括下面几个方面。

(1) 纤维(或晶须)增强或补强复合材料

纤维增强有机高分子复合材料已经得到很

广泛的应用。高性能聚酰胺复合材料、聚苯并咪唑(polybenzimidazole)基复合材料今后都将有较大的发展。纤维增强金属基复合材料估计仍以碳纤维或碳化硅纤维增强铝基和钛基复合材料为主要发展对象。纤维补强陶瓷基复合材料则以碳化硅纤维或其他无机纤维为补强剂,基体则以非氧化物陶瓷为主的复合材料发展前景较大。从强度/重量比和它们的工作温度来衡量,在1200℃以下近期使用的则是金属基复合材料、金属间化合物及其复合材料；在1200℃以上至1700℃左右环境下使用的则是陶瓷基复合材料；在1700℃以上使用的则是碳/碳复合材料。玻璃陶瓷基体复合材料,由于它的性能匹配上的可调性,与纤维组成复合材料可以具有较优的性能,是一类作为1100℃以下使用的较有发展前途的复合材料。

(2) 第二相颗粒弥散复合材料

以无机化合物弥散金属的复合材料是当前颇具吸引力的材料。SiC颗粒增强铝基复合材料和钛基复合材料在改善它们的高温性能方面均显示出明显效果。TiC或ZrB₂弥散的SiC基复合材料的强度和断裂韧性大约可提高50—70%。SiC颗粒弥散的氧化锆(Y-TZP)复相陶瓷,在800℃时的高温强度提高约一倍以上,使它成功地应用于热机上。SiC颗粒弥散的莫来石陶瓷,常温和高温下的强度和断裂韧性都可以有近二倍半的提高,而且抗热震性能亦大大改善,是作为热机应用的第四种候选材料。用无机化合物颗粒弥散的有机高分子材料能有效地改善它们的耐磨性能和刚性等。由于颗粒弥散型的复合材料具有工艺的重复性和可靠性的特点,而且成本较低,因此应用前景较好。

(3) 两(多)相复合材料

锂铝合金和Ti-Ni系统的金属间化合物的两相复合材料是一类有望提高金属的强度/重量比和使用温度的材料。两(多)相陶瓷复合材料是典型的自补强陶瓷材料,也是陶瓷材料剪裁与设计的一个很好对象。例如从Y-Si-Al-O-N相图中的 α' 和 β' Sialon的共存相区中,选择可以得到兼具 α' 和 β' 特性的复相

陶瓷。又如利用该相图的富氮区中的 AlN 多型体具有较大的长径比晶粒特性，可以达到陶瓷自补强的目的。充分利用多相复合材料来获得具有综合性能的材料是一个很好的思路，很值得研究。

(4) 无机物和有机物复合材料

无机/有机复合材料的研究已经有较长的历史，以无机物作为高分子材料的充填剂进行改性早被人们所采用，例如玻璃钢就是一种已经广泛应用于工业和建筑业中的典型的无机/有机复合材料。近年来，这类材料仍具有较好的发展前景，如压电陶瓷与高分子材料相复合不仅提高了它的物化性能，而且较好地改善了老化性能。这种复合原理还普遍应用于封装材料之中。

(5) 无机物和金属复合材料

在 50 年代末期和 60 年代前期曾经热闹过一阵子的所谓金属陶瓷，希望集金属与陶瓷的各自的长处于一身而得到一种新型材料。但实践的结果正好相反。这并非是思路上的失误，更多地应归咎于工艺问题。最近纳米技术的发展，为金属陶瓷的设想重新带来一线光明。通过纳米技术的途径，有可能制备出集金属与陶瓷各自长处于一身的新型材料。

(6) 梯度功能复合材料

最近发展了一种所谓梯度功能复合材料，即一面是具有结构作用的金属材料，再逐层地掺入无机化合物，使另一面成为具有一些特殊的功能。这一设想早已为人们为人们在厚涂层材料中应用，但是以此设想来制备体材料则是一种大胆的构思，因而一经提出就受到人们的重视。最近将此概念扩展，做成 $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 梯度复合材料，使它的性能较纯粹的 SiC 陶瓷有大幅度的提高。因此，利用“梯度”这一设想可以构思出一系列的新材料，是一个很值得注意的研究方向。

(7) 纳米复合材料

最近，新发展的利用纳米技术来制备复合材料可以是晶内纳米复合（即纳米晶粒进入到较大的相晶粒之中），也可以是晶间纳米复合，

（即纳米晶粒分布于较大母相晶粒的晶界之上），所得复合材料统称为复相的纳米材料。这一设想可以适用于陶瓷、金属和高分子材料，特别是在陶瓷材料方面，已经取得了令人可喜的结果。

由上述可知，多相复合是改进材料性能的一条很好途径，但不是唯一的途径。使各种不同的强化和增韧的机理同时起作用，以产生叠加效应，这是最具有实用价值的。

2. 纳米材料

纳米材料是指晶粒和晶界等显微构造能达到纳米级尺度水平的材料。当然所用的原料——粉料首先必须是纳米级的。从微米级到纳米级的进步，不仅是制备工艺上的跃进，而且能推进材料科学的理论发展。

材料的很多性能如强度、断裂韧性、应变速率、硬度、超塑性等，都受晶体尺寸大小的影响，在材料制备过程中的物理和化学行为亦与所用原料的颗粒尺寸有关。纳米技术的进步将使近代的微米级尺寸的材料跃进到纳米级尺寸的材料，并使材料的许多性能产生飞跃。

要制备纳米材料，首先必须制备纳米级水平的粉料。现在已可以利用激光或等离子体的技术进行高温气相合成，可以得到纳米级的金属粉料和陶瓷粉料。用化学共沉淀法、溶胶凝胶法以及水热合成法均可制得相应的纳米尺寸的陶瓷粉料。其次是纳米粉料的成型与烧结。超细粉末成型和烧结过程中所遇到的最大问题是团聚。实验结果表明，可以通过增加适当的添加剂来改善以至消除团聚现象。防止超细颗粒烧结时的重结晶，是纳米材料制备过程中的另一个要认真对待的重要问题。因此，原有适应于微米级材料的工艺都将作相应的改进以至改变。

当颗粒变细时，巨大的颗粒表面使整个工艺过程发生重大变化。由于颗粒变细，大大改变了烧结过程的驱动力——表面能；由于颗粒变细，物料的扩散路径变短，接触界面增多，从而加速了扩散及化学反应过程，使原有的烧结动力学理论不适应于纳米材料的烧结；由于颗

粒变细,晶粒尺寸效应和晶界效应变得更为重要,对性能的影响显著。因此,成功制备纳米材料必须对原有工艺和工艺学理论作大量的补充和修改,从而引出了很多新的研究课题。所以,它的提出是具有方向性和指导意义的,是当前材料研究发展的一个重要方向。

虽然纳米材料现在还没有达到具有量子效应的尺寸水平,但是在性能上已经表现出它的优越之处。例如,某些金属的超高硬度,某些陶瓷的超塑性行为,陶瓷材料烧结温度的降低等。纳米级氧化锆粉料可以在1250℃烧结到理论密度的98%以上(比原来的1650℃降低400℃),且具有约400%的塑性变形。具有典型共价键结构和无极性的氮化硅陶瓷,在纳米态时却出现与极性相联系的压电效应,较高的交流电导和在一定频率范围的介电常数急剧升高的现象。随着对纳米材料研究的不断深入,将会发现更多高性能的新材料。纳米技术与多相复合材料相结合所组成的纳米复合材料,使材料的性能大幅度地提高。

3. 智能材料

智能材料是指能模仿生命系统同时具有感知和驱动双重功能的材料。它既能象人的五官那样,感知客观世界,又能能动地对外作功,发射声波,辐射电磁波和热能,甚至能促进化学反应和改变颜色,作出类似于有生命物质的智慧反应。当然这类材料的智慧功能的获得是材料与电子、光电子技术相结合的结果。被动的智能材料不需外加的辅助就能有效地反映出对外界环境的变化并作出的响应;而主动智能材料则是通过反馈网络而发挥它的感知和驱动功能。

被动智能材料之所以能有效地响应外界环境条件而不需要任何外电场、应力或反馈系统来诱导它的行为,是因为它自身具有下列的一些功能,这些功能的英文词中都是以S开头的,故称为“S行为”,如:选择性(selectivity)、自诊断(self-diagnosis)、自调节(self-tuning)、灵敏性(sensitivity)、变形性(shapeability)、自恢复(self-recovery)、简化性(s-

物理

implicity)、自修复(self-repair)、稳定性与多元稳定性(stability and multistability)、候补现象(stand-by Phenomena)、免毁能力(survivability)和开关性(switchability)。陶瓷变阻器和正温度系数热敏陶瓷就是比较典型的被动智能材料。

主动智能材料则要求有一外加反馈系统来发挥它自身的感知和驱动功能,如录像磁头定位器即是一例。

4. 生物医学材料

为了保障人类的健康和长寿,生物医学材料的发展尤为人们所关注。生物医学材料的目标是对人体组织的矫形、修复、再造、充填以维持其原有功能。它要求材料具有相适应的性能外,还必须与人体组织的相容性以及一定的生物活性。

具有较高强度的氧化铝陶瓷和氧化锆陶瓷以及带有陶瓷涂层的钛合金材料,往往被选作能承受负荷部位的生物体的矫形修复。具有生物活性的羟基磷灰石和微晶玻璃是牙根种植体、牙槽矫形、颌面再造等的可用材料。聚乳酸与羟基磷灰石、磷酸钙的复合材料,以及加入碳纤维或玻璃纤维组成的多相复合材料则是矫形固定器、组织再造等的有效材料。此外,人工心脏瓣膜的碳基复合材料亦被成功地应用。材料科学家与医学家的紧密结合可以创造出更多的生物医学材料来保障人类的健康。

5. 材料的无损评价

具有实用意义的材料无损评价技术是材料使用可靠性的保证,是整个材料科学与工程研究的不可忽视的一个重要环节。

一般说来,陶瓷属脆性材料,其强度严格说来不是一个确定的值,而是在其平均值的一定范围内变化着,并根据缺陷状况而呈一定的统计分布,且取决于应力状态与加载速率,时效效应明显。因此,传统的工程设计准则是陶瓷构件允许最大张力应力不得大于其平均强度的20%—10%,这无疑是未充分利用材料的特性。因此,先进结构陶瓷的真正趋于实用化,首先必需解决材料的可靠性评价技术及安全寿命

预测方法。

在这方面,美国政府首先拨款支持美国陆军材料和力学研究中心(AMMRC)及美国国家标准局(NBS),对先进结构陶瓷进行力学性能可靠性评价及寿命预测技术的研究。Quinn等(AMMRC)曾以13种高性能结构陶瓷(包括各种工艺的 Si_3N_4 , SiC)为对象,以燃气轮机陶瓷件为应用目标,进行了各种应力条件实验,温度为 $1000\text{--}1400^\circ\text{C}$,连续承载试验时间长达15000h,为陶瓷的可靠性评价积累了大量数据,并由此建立了许多先进的高温力学性能测试设备。

电子与光电子技术的不断发展为材料的无损评价提供更多的可用技术。例如,高技术项目中热波检测技术所用的电声成像装置分辨率已优于 $2\mu\text{m}$ 。对陶瓷材料亚表面缺陷检测,对涂层的微裂纹扩展和气孔分布,半导体材料的表面改性和光损伤观察等方面都开展了有效的研究。虽然提高检测的分辨率是材料无损评价的一个重要方面,但是应坚持以实用为主,切实地解决具有一定分辨能力的实用检测技术对新材料的发展是重要的。

总之,我们要充分认识材料对整个科学技术发展的先导作用,要了解 and 掌握社会发展对新一代材料的要求和材料发展的总趋势。根据

我国国情和实际需要,在制订好总体规划和有效的实施计划的前提下,首先必须保证一支精锐的科研队伍,开展材料科学的基础研究。例如,目前的国家自然科学基金项目和八六三高技术项目就是一种有效的形式。政府支持和资助这些项目,科研人员应该珍惜机会,在“信息爆炸”的时代,及时把握方向,广泛开展各种学术交流活 动,从中得到启发,确保我国材料科学的基础研究不落后于世界水平。其次是应用研究,要在充分调查市场需求的基础上,综合国内外材料发展的趋势,开展一批中短期将具有较大应用前景的项目的研究。科学技术是第一生产力,只有对准社会的要求,科学技术才会发挥出巨大的威力。基础研究与应用研究并不是毫无关系的,基础研究是应用研究的基础,应用研究所产生的经济效益又反过来扶植基础研究。当然应用研究并不能直接产生效益,其中还有一个非常重要的环节就是开发。过去人们忽视了这一过程,使科研与生产脱节,造成非良性循环。如今国内外形势喜人,加快开发过程的进行,投入较多的人力与物力已势在必行,其成果转化形式也是多种多样的,如建立中试基地,与企业联营,所办公司等都将有利于成果产业化和使科技单位本身搞活。

核 天 体 物 理 学*

——核物理和天体物理的相互影响

王 荣 平

吕南姚

(Drexel 大学物理系)

(Cornell 大学天文系)

冯 达 璇

Friedrich-Karl Thielemann

(Drexel 大学物理系)

(Harvard 大学 Smithsonian 天体物理中心)

核物理学研究核结构和核反应,它在我们探索认识这个物质的宇宙方面起着极其重要的作用。近年来,随着全世界许许多多实验室建造放射性束流装置的兴趣逐渐增长,这个领域中以前的许多疑难问题也许会在这一十年内得到答案。单就这个理由就已经在整个核物理学内激起了对核天体物理学强烈的兴趣。在这篇文章中,我们将介绍核天体物理学中某些关键课题的梗概。我们希望这篇文章能激励人

* 本文原稿为英文,由南京大学天文系彭秋和翻译。