



材料科学中的若干特殊力学问题

(摘要)

中国科学院力学研究所 郑哲敏

力学是研究物质在受力作用下运动和变形规律的一门科学。

阐明宏观物体机械运动的经典力学体系,是第一次工业革命的杠杆。此后,力学紧密结合工程技术,使它超越直观经验,成为能从事精确设计和制造的现代知识体系。同时,力学也发展了材料力学,弹性力学,流体力学等分支。这些力学成就,进而帮助航空业克服了“音障”和“热障”,促成了今天蓬勃发展的航空和航天工业。

现在,力学特别注重发展边缘交叉学科,近年来,围绕材料强度,材料应用技术和制造工艺,发展起来的本构关系理论,断裂力学,损伤力学等,已成为材料工程界的重要理论工具。目前,物理力学,微观力学和材料学的结合,已开始将材料的宏观力学

性质与材料内部细一微观结构联系起来,逐步使材料研制摆脱“炒菜”式的传统做法。

力学研究的一个主要方法,是通过对工程实际的观察和测量,根据力学原理,把复杂的现象加以提炼,从而明确主要控制因素,建立力学模型。再通过理论分析,数值计算和实验研究,作出本质上符合实际乃至精确的预测,力学的目标之一是为工程设计和技术发展,提供新的概念和途径,以及软件和某些设备雏型。所以,力学研究是多种工程,从定性到定量的必由之路。

本文不拟介绍材料科学界熟知的一些力学学科内容,如材料的变形,强度,疲劳,断裂,损伤,蠕变等。虽然,这些仍是当前材料工程界普遍遇到的重大问题,也是力学界现在研究的主流。本文拟从展望角度介

定性。

新的光盘存储介质的设想还在不断出现。介绍了最近出现的利用对光谱有不同响应的介质,用激光光谱学中“烧孔”现象,发展“光谱孔”存储的方式,使存储密度可提高千倍。利用超短脉冲激光技术,使数据率增高至每秒千兆位的前景。

利用并列处理和高速处理的特点,使光在其信息处理中发挥大容量和高速的优点。以图象为对象的光学信息处理已进行多年工作,主要用光空间调制器进行光模拟并列处理。介绍了光空间调制器的工作原理和所应

用的材料特性,如各种液晶、非线性晶体、微通道板和纤维激光板等。从光空间调制器的速度、分辨本领、稳定性等方面对非线性材料提出的进一步发展要求。

全光计算机和光电计算机是以数字并列处理为特征。介绍了光学双稳态器件的作用以及材料的性能要求。讨论了材料的发展前景。

光信息工程中要求各种光学元件的集成化,因此光学材料也需要薄膜化和纤维化。介绍了光学薄膜制备的新方法和新工艺,它将把无机材料工学推向一个新的发展阶段。

绍,在材料科学和力学(特别是流体力学)之间,还交流较少的若干特殊力学问题,以期促进各方的重视和协作。

一、微重力下的材料研制

利用航天飞机和宇宙实验室,在微重力下制作地球上难以制作的材料,已提上日程。美国空间政策中心估计,到2000年,空间生产的材料,年产值将达400亿美元。他们预料,这是一场能同微电子学革命相比的革命。苏联在礼炮号上备有多种实验装置,广泛进行材料研制,在某些技术方面超过了美国。

微重力下研制材料的特点在于,长时间的微重力或失重,为生产高纯度,均质,无缺陷的材料提供了很有吸引力的前景,而且也提出了一系列尚待研究的问题。

在通常重力条件下(g),液体的运动,传热,传质,固化,结晶都明显受到重力的控制。在微重力下,由于重力加速度小了好几个数量级,制备材料出现和预期出现一些全新的现象。许多这样的现象有待于说明,并加以利用来制备有特殊优异性能的材料,创造崭新的工艺。

例如,在通常条件下,对流主要是重力引起的,在微重力条件下,这种对流受到抑制,这对生长均质单晶显然是十分有利的。然而事情并非总是这样简单,因为在微重力下,那些通常被重力影响所掩盖但亦能引起对流的因素变得重要起来了,而人们过去对这些因素的认识却是很少的。突出的例子有表面(界面)张力变化所引起的流动,因质量扩散与热扩散速率不同所引起的流体不稳定性,固态与流态密度所引起的流动等。因此为了充分利用微重力所提供的特殊条件来制备性能更高的半导体或光电材料,特殊合金等,必须深入研究这类运动的流体力学问题。

微重力下,还可以实现无容器加工。这既可避免容器壁污染,又可避免器壁造成的温度不均匀性和相应的不均匀成核,从而制

作完整结晶。这方面要解决的问题则是,样品材料定位,控制其形状和进行操作。目前有四种供选择的定位场方法:共振或干涉声场,气动场,电磁场和静电场。定位和操作中,液滴振荡,旋转和相撞时的稳定性,气泡的迁移是材料研制最关心的。如低重力下,形成与周长相当的圆柱形稳定浮区,减弱了温度梯度,对提高单晶质量很有利。

二、急冷凝固技术,微粉材料和制品

微粉是一大类有很大潜在能力和应用前景的材料。

使金属和合金的冷却速度在 10^3 K/s到 10^5 K/s,其结晶可变得十分细致,以至非晶态。合金成份的配比也可以远离平衡态,从而形成一些十分特殊的合金材料。其强度和耐腐蚀能力等能大幅度提高。

上述急冷凝固材料多用力学方法制作。力学粉碎过程和急冷凝固耦合在一起。如用高速气流(如滞止压力为十或数十大气压的超音速流)或水流粉碎熔融金属流柱时,熔融金属在流体动力和表面张力的联合作用下雾化,Weber数是控制液滴破碎的主要参数。与此同时和气流进行强烈的对流传热。在强对流条件下,冷却速度由液滴内部热传导控制,典型冷却速度为 10^3 K/S,有人认为叠加超音频脉动的超音速雾化器,能提高粒度均匀性和冷却速度。不过这种观点目前仍有争议。力学所与协作单位进行气流超声雾化熔融金属制粉的工作,获得90%以上球形颗粒的微粉。技术关键是方案制定喷嘴设计,超声和流动控制。要求解决的核心力学问题是:在气流及叠加超音频脉动的雾化作用;表面张力下收缩成球、冷却凝固、氧化膜形成等过程工作参数与成品质量的关系;能量利用率的提高等。用快速移动的固体表面来冷却熔融金属,其冷却速度比气体或液体的对流传热还快,可制成细粒和薄箔制品。高熔点金属则先用等离子体电弧加热,再用旋转电极离心法向外抛洒熔融金属,而形成细粒,并在冷气流中急冷凝固。

由于非晶金属通常以微粉或薄片出现,晶化温度又低,因此会有尚未烧结已经晶化的现象。瞬态,超高压的爆炸烧结,是烧结微晶和非晶制品的很有希望的途径之一。力学所现已实现了将非晶金属箔爆炸复合在常用金属表面的技术。爆炸烧结粉体材料,升降温速率可达 $10^3 \sim 8$ K/s。但由于此工艺利用的是波在粉体材料中的传播产生的效应要制成合格产品,必须弄清粉体材料中激波的传播,汇聚,特别是颗粒间局部高温区的形成机理。

三、陶瓷材料的增韧

陶瓷材料重量轻,硬度高,不易蠕变,热稳定性和化学安定性都好。主要缺点是太脆。近年来,在陶瓷增韧的力学分析方面取得了重要进展,较成功地阐明了相变增韧和微裂纹增韧,指导了陶瓷的研制。

下面以相变增韧为例,说明增韧机制和

力学分析方法。在非相变的陶瓷基体中加入能产生马氏体型相变的粒子,如氧化锆。陶瓷中裂纹附近的高应力将使其产生相变。这种体积膨胀型的相变将导致裂纹顶端的应力强度因子减小。这个应力强度因子的减小量就是增韧值。这个机理的定量描述,关键在于建立复合体的非线性本构关系,包括相变条件和流动规律。根据相变条件和应力分布可以确定相变区的尺寸,然后再根据流动规律和相变区尺寸可以确定区内非弹性应变,从而再确定应力强度因子减小量。最简单的临界相变应力准则,给出的预言增韧值是实测的1/3。这表明,上述方法有待完善,但很有希望。目前考虑相变粒子形状,尺寸和方法,以及更真实相变准则和流动规律的理论,正在发展中。一些计算表明,尺寸均匀的球形粒子能产生最好的增韧效果。

美国超级合金生产技术

1. 氧化物沉淀强化(ODS)合金 镍基和铁镍基氧化物沉淀强化合金的应用取得重大的进展。其中最典型的是Inconel MA754,是粉末冶金锭块的轧制材料,目前已用于F101、F110、F404喷气飞机的喷嘴导叶。另一种Inconel MA957,它将在核增殖反应堆中用来代替不锈钢,作为核材料的包复材料。据报导这种合金不膨胀(non-swelling)。

2. 超强合金 超强合金718,是采用真空感应熔炼-电渣重熔-真空自耗电极重熔(VIM-ESR-VAR)三重熔炼,并经固溶处理、加工强化及二次时效处理。具有屈服强度1240~1380MPa,抗拉强度1450~1515MPa,延伸率14~20%,晶粒尺寸为

ASTM10~12级。已用于固体燃料火箭的升压器抑制螺栓(直径101.6mm)。

3. 真空熔炼 据报导,在1986年将鉴定电子束精炼(EBCHR)浇注的电极作为真空电弧双电极重熔(VADER)的重熔电极。预料涡轮盘高温合金的疲劳性能,会通过EBCHR的提纯和VADER的晶粒细化相结合而得到改善。这种熔炼方法将证明是一种廉价的,代替目前生产高温合金的粉末冶金的方法。

高温合金生产者对真空熔炼、液态金属过滤的应用逐渐增多。陶瓷过滤片的结构改进向大型细孔发展。

谢燮撰摘译自《Metal Progress》

129, 1986, (1)p71~73