

目.这类研究无疑会推动分子磁学的发展,尤其是对研制有实用价值的磁性分子材料有极其重要的意义.

参 考 文 献

- [1] Kahn O. *Molecular Magnetism*. New York: VCH, 1993
- [2] Kahn O. *Adv. Inorg. Chem.*, 1996, 43: 179—257
- [3] 崔建中,程鹏,廖代正等.化学通报,1998,(9):1—10[CUI Jian Zhong, CHENG Peng, LIAO Dai Zheng. *Chemistry*, 1998,(9):1—10(in Chinese)]
- [4] Miller J S, Epstein A J. *Angew. Chem. (Int. Ed. Engl.)*, 1994, 33: 385—415
- [5] Andruh M, Raunade I, Codjovi E *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1993, 115: 1822—1829
- [6] Aubin S M J, Wemple M W, Adams D M *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1996, 118: 7746—7754
- [7] Caneschi A, Getteschi D, Sessoli R. *Acc. Chem. Res.*, 1989, 22: 392—398
- [8] Palacio F. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79: 2336—2339
- [9] Ferlay S, Mallah T, Ouahes R *et al.* *Nature*, 1995, 378: 701—703
- [10] Re N, Crescenzi R, Floriani C *et al.* *Inorg. Chem.*, 1998, 37: 2717—2722
- [11] Thomas L, Lioni F, Ballou R. *Nature*, 1996, 383: 145—147
- [12] Castra S L, Sun Z, Grant C M *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1998, 120: 2365—2375
- [13] Kahn O, Krober J, Jay C. *Adv. Mater.*, 1992, 4: 718—727
- [14] Kahn O, Codjovi E. *Phli. Trans. R. Soc. London A*, 1996, 354: 395—406
- [15] Poganiuch P, Decurtins S, Glutlich P. *J. Am. Chem. Soc.*, 1990, 112: 3027—3037
- [16] Solomon B I, Wilcox D B. *Magneto- Structural Correlations in Bioinorganic Chemistry*. In: Willett R D. *Magneto- Structural Coorelation in Exchange Coupled Systems*. Netherland: Dordrecht, 1985. 463—496
- [17] Pulver S, Froland W A, Fox B J *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1993, 115: 12409—12422
- [18] Weighardt K. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 1989, 28: 1153—1172

功能梯度材料研究的现状与将来发展*

王 豫 姚凯伦

(华中理工大学物理系 武汉 430074)

摘 要 功能梯度材料是近年来材料科学的研究热点之一.文章评述了 FGM 的基本概念、制备技术、理论研究和应用情况等发展现状,同时对可能的发展进行了讨论,强调了对电磁性能研究的重要性.

关键词 功能梯度材料,制备技术,理论模型

STATE— OF— THE— ART AND FUTURE DEVELOPMENT OF FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS

WANG Yu YAO Kai-Lun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In recent years functionally graded material have attracted considerable attention. The basic concepts, processing technology, theoretical mechanism and potential applications are reviewed. Future developments are discussed, with special emphasis on the electromagnetic properties of such materials.

Key words functionally graded materials, processing technology, theoretical model

近 10 年来,材料科学获得了突飞猛进的发展.究其原因,或者是与物理、化学、计算机等学科的交叉渗透,引入了新理论方法及实验技术,或者是实际应用的迫切需要而对材料提出了新的要求.功能梯度材料(functionally graded material, FGM)即是这方面一个很好的事例.它是近年来在材料科学中涌

现出的研究热点之一.目前,它的研究领域迅速扩大,引起了世界范围的普遍关注,其中存在的众多材料物理问题更是为物理学工作者提供了一个显露身手的机会.本文综述了这方面的研究现状,同时对其

* 激光技术国家重点实验室开放课题资助项目
1999 - 06 - 22 收到

将来可能的发展进行了讨论。

1 FGM 的基本概念

我们首先通过一个实例来说明 FGM 的概念。在现代航天技术中,飞行器表面内外要承受高达 1000 K 以上的温差,传统的单相均匀材料已无能为力。若采用多相复合材料,如金属基陶瓷涂层材料,由于各相的热胀系数和热应力的较大差别,很容易在相界处出现涂层剥落现象。其关键在于基底和涂层间存在有一个物理性能突变的界面。为解决这个问题,日本科学家于 1987 年提出了梯度材料的新概念^[1],即以连续变化的组分梯度来代替突变界面,消除了物理性能的突变,使热应力降至最小,如图 1 所示。

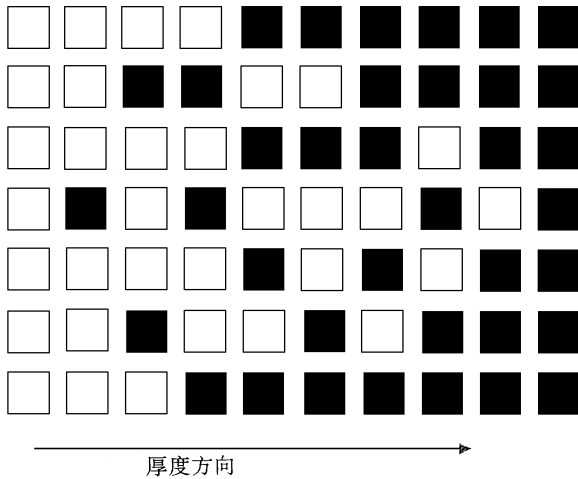


图 1 FGM 的结构和组分分布示意图
(□ A 相物质; ■ B 相物质)

可见,功能梯度材料,即是其组分或结构呈有规律的空间变化,从而其性能也呈空间变化以满足特定要求的一类复合材料。显然这是一种非均匀材料,但它与传统意义上的非均匀材料(inhomogeneous media)^[2]具有很大的不同,尽管后者也是多相复合材料。二者的重要区别在于功能梯度材料的宏观组分/结构及性能是非均匀的,而传统的非均匀介质的宏观组分/结构与性能都是均匀的,即它是不同相(化学组分不同)的均匀混合而形成的材料。

梯度材料的实质是材料内部要有一个固有的梯度场(某一参量的空间函数),据此可以派生出各种功能梯度材料来。最主要的是化学组分呈连续变化的功能梯度材料,如 Al/Al₂O₃(金属/陶瓷)功能梯度材料。但是,组分的变化往往带来结构的变化,最终对宏观性能的影响由二者共同决定。也可以利用

结构相同但组分不同的材料来制备 FGM。此时 FGM 中主要是组分变化,而结构的变化则大大减小,如由某些不同组分的钙钛矿构型金属氧化物所制备的 FGM。另一类 FGM 则可以是化学组分不变而结构呈空间变化。这是利用了同分异构现象。此时材料中必然存在着许多结构的缺陷及失配,它们对宏观性能有什么样的影响目前尚不清楚。由于同分异构是有机材料中的普遍现象,因此制备有机纯结构梯度材料比制备无机梯度材料有着更大的选择性,这方面的工作应该引起研究人员的重视。

如果我们以同质颗粒的粒径为变量(梯度变化),就可以得到晶粒尺寸呈一定空间分布的多晶材料,比如纳米/微米(nm/μm)梯度材料。由于化学组分和显微结构都相同,因此晶粒尺寸的梯度变化主要导致晶界的密度也呈梯度变化。我们知道,多晶材料中的晶界对其性能有着重要影响,可以想见,这种类型的功能梯度材料必然也会表现出新的性质来。这也是一个饶有兴趣的研究领域。当梯度变量是材料中的微孔(孔径)时,则可以得到所谓的孔梯度材料。目前孔梯度陶瓷材料已经在渗透过滤、催化分离等方面得到了实际应用。总之,利用梯度的概念,可以生成多种多样的梯度材料来,而每种梯度材料都具有其独特的应用性质。

还有一类材料在物理学中已经发展成一个极为重要的研究领域,这就是超晶格和量子阱。它们和梯度材料有密切关系。如锯齿形超晶格,其中的化学组分呈梯度变化,从而导致了锯齿形的能带结构,对其输运性能产生了重要影响^[3]。这类梯度材料的研究属于微观范畴,元件尺度非常之小(< μm),其理论工具是固体量子场论,它们已发展成为凝聚态物理的一个专门分支,一般不包含在我们所指的 FGM 范围内。再如近年来引起广泛注意、呈现出巨磁阻效应的磁多层膜,也可算是一种广义的 FGM 了^[4]。目前的 FGM 概念通常指几种化学成分不同的相按一定的空间分布所复合而形成的功能材料。最常见的是两相在 μm 级复合而成的 FGM。随着研究工作的不断深入及实际应用的发展需要,FGM 的概念也会推广,正如上面所讨论的那样。

2 FGM 的研究现状

2.1 FGM 的制备技术

FGM 的制备是 FGM 研究的一个最为重要的方面,制备技术的发展决定着 FGM 实际应用的程

度与范围.目前报道的制备技术很多,可制备从体材到薄膜,从金属到陶瓷的多种 FGM.其中比较基础、有代表性的是如下几种.

2.1.1 粉末叠层法

这是 FGM 制备技术中最简单实用的一种方法.其基本过程是将材料沿梯度方向分成若干层,每层都具有依需要而事先确定的组分配比,然后按一般电子陶瓷制备工艺,经压制后烧结而成.显然,这种方法获得的材料还不是严格意义上的梯度材料,因为它的组分是阶梯式跃变的,存在着一系列的界面.层的厚度愈薄,组分分布就愈逼近一条曲线,同时由于烧结的扩散运输作用,这些界面亦变得更加模糊.但是,层厚的变薄就对工艺提出了更高的要求,因为控制层厚在 μm 级时就不那么容易了.这种方法工艺简单,较容易获得大尺寸的材料,但样品的梯度特性较差,仅为一维变化,也只适合烧结类型的材料(如陶瓷).到目前为止,采用此种技术已制备了多种 FGM 材料,如 Mihara^[5]等人设置层厚度为 100—600 μm ,陶瓷/金属之比每层按 10vol% 的梯度增加,制备了 $\text{ZrO}_2/304$ 不锈钢 FGM.

2.1.2 气相沉积法

在通常的 PVD(物理气相沉积)及 CVD(化学气相沉积)技术中,通过改变沉积气相的组分,使得沉积物的组分在厚度方向上呈梯度变化而得到梯度材料.此种方法的特点是直接利用较为成熟的技术及设备,所得材料的梯度性质较好,呈现连续的曲线变化,但仅适合于制备薄膜,而且沉积速率很慢.已采用此项技术先后制取了 SiC/C , ZrO_2/Cu , TiN/Ti , TiC/SiC 等多种 FGM 膜.

2.1.3 沉淀生成法

不同化学成分的粉末一般具有不同的密度、形状、大小等物理与几何特征.如果将几种粉体置入同一液体介质中,则会出现共同沉淀,但每种粉体的沉淀速率并不相同.通过适当选择及控制液体介质的密度、粘度及粉末的密度、粒度等参量,就可以获得组分连续变化的沉淀层,经干燥成型处理后再烧结即可获得 FGMs 材料.这是制备 FGMs 的一种较简便的方法.如果在共沉淀过程中施加离心力,那么可大大加快沉淀速率,克服了自然沉淀法的一些不足.采用这种方法已经制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiAl}$ ^[6], SiC/Al 等体系的 FGMs.

另有一种沉淀生成 FGM 的方法是所谓的电泳法(EPD).它是将所选材料的悬浮液置于两电极间的外场中,通过注入另一相的悬浮液与之混合并控

制注入速率而改变组分配比.在电场作用下荷电的悬浮颗粒就在电极上沉积下来.最后得到 FGM 膜或体材料. Sarkar^[7]等人利用此方法制备了 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ FGM,其组分连续变化,厚度为 6mm 左右时只用了约 90min 的时间.所以此种方法的发展潜力较大,特别是由于在溶液中进行制备而更有可能制备无机/有机 FGM.

2.1.4 激光熔覆法

激光技术在材料制备中已经得到了很好的应用,如利用脉冲激光沉积高温超导薄膜.由于 FGM 的特点,使得激光制备 FGM 的过程较为复杂.具体制备过程是,以高功率的激光入射至基片(FGM 的一种组分)上并使之熔化,同时将预先设计好组分配比的混合粉末注入到熔化区中,这就形成了第一包覆层.改变注入粉末的组分配比,在上述覆层上熔覆的同时再注入,于是在垂直覆层方向上就存在着组分的变化.重复上述过程,就可以获得任意多层的 FGM,其组分的变化接近于连续分布.图 2 是 Ab-boud^[8]等人利用 2kW CO_2 激光器在 Ti 金属基片上熔覆的 Ti-Al-TiB₂ 梯度层中 Al 的浓度分布.在 300 μm 的厚度内 Al 的含量由 12wt% 左右连续地变为零.总梯度层厚约为 2mm.因此,此种方法的优点是既可以制备 FGM 覆膜,也可以制取 FGM 体材.另外,制备时间也远远小于气相沉积法,适应面较广.其不足之处是制备工艺及设备都比较复杂昂贵.

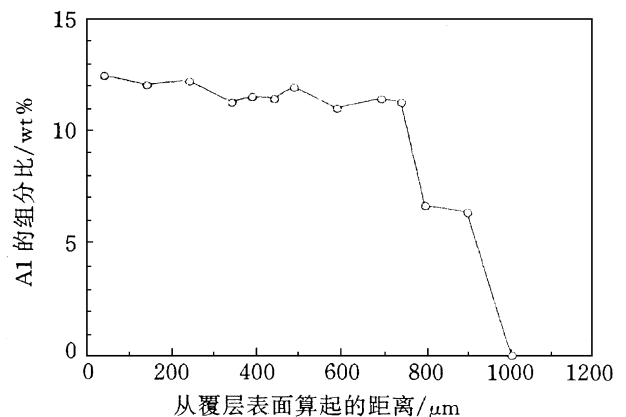


图 2 Ti 基片上 Ti-Al-TiB₂ 梯度层中 Al 的浓度分布

这里仅介绍了几种制备 FGMs 的基本方法.事实上,已经发展的许多其他方法是上述方法的拓展或结合.

2.2 FGM 的评估技术

广义来讲,FGM 的评估技术是指对制取的 FGM 的性质进行确认与表征的一系列测试与分析技术.这包括对 FGM 梯度特征、组分与结构的评

估,对 FGM 物理、化学性质的评估以及使用条件下的评估等等.这些评估的内容直接反映了某种 FGM 的“好坏”,对促进制备技术及理论研究的发展都具有重要意义.

对 FGM 中组分、结构的表征已有多种成熟的测试与分析技术,如分析电子显微镜系统(ATEM)、X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)等.这些技术可准确确定元素的空间分布,并给出显微结构的清晰图像.在 FGM 性能评估方面,目前研究得最多的是对其力、热性能的评估,已发展了激光热冲击、高温热差热疲劳、无损检测热应力及机械强度等评估技术.其中由日本航空宇宙技术研究所开发的高温热差评估实验系统可模拟材料表面温度 2000 K 以上,温差为 10^3 K 及最大热负荷达 $6 \text{ MW}^2/\text{m}^2$ 的试验条件,可用来进行隔热、热疲劳等方面的性能评估^[3].但是在有关 FGM 电磁性质的测试与评估方面尚未发展起来.

2.3 FGM 的理论研究

FGM 的理论研究涵盖了两方面的内容: FGM 的模型化设计及 FGM 中的物理机理研究.前者是指在已知具体应用要求的基础上,利用数据库及计算机模拟技术,从理论上给出所需的 FGM 梯度函数、组分分布及物理性能等主要参量,用以指导 FGM 的制备.后者则是充分运用物理学理论及手段,对 FGM 所表现的各种物理现象进行详尽分析,在不同的结构层次上阐明其所具有的物理规律,建立相应的物理模型.显然二者具有紧密的联系,机理性研究是 FGM 模型设计的基础.

2.3.1 FGM 的模型化设计

FGM 的模型化设计要求预先给出明确的应用指标/条件及完善的材料知识库.这个知识库应该包括描述 FGM 性质的物理模型(微观、介观和宏观等不同层次),关于材料性能、结构的数据和公式等.整个过程一般采用逆向推理与设计思想,即从已知的具体要求(材料形状、理化性能、使用功能及应用环境等)出发,以材料知识库为基础,假设不同的组分及其分布,在合适的物理、化学模型框架内,进行迭代数值计算,最后获得可满足具体要求的最佳材料组合及其空间梯度分布.其相应的运行流程图如图 3 所示.

Tanaka 等人从最初给定的 FGM 组分割面出发,假设异相为球形物分布,以热应力减小为约束条件,通过定义一些判断性能偏差的参量,采用优化方法及以模糊推理为基础的内插法,计算了 Al/SiC 组

分的 FGM,如图 4 所示. Matsuzaki 等人为隔离超音速冲压式喷气发动机的冷却机构,通过对 $\text{ZrO}_2/\gamma\text{-TiAl}$ 梯度材料中的热障进行设计,使得冷却剂的使用在应用 FGM 冷却机构后比不用 FGM 时减少了 35%.

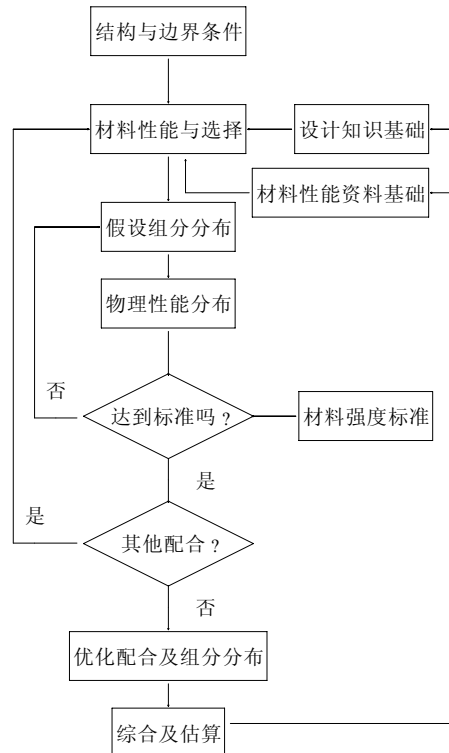


图 3 FGM 设计中的“逆向设计过程”流程图

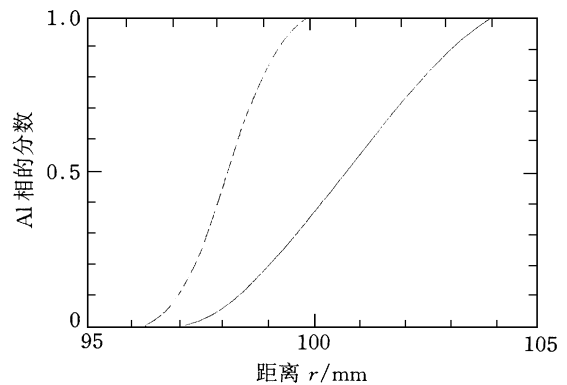


图 4 Al-SiC FGM 的组分纵剖面优化设计图
(虚线为组分的初始剖面,实线为优化后的组分割面)

FGM 的模型化设计是一个系统工程,需要有材料、物理、化学、计算机和数学等学科的研究人员共同参与,同时也需要来自实验的支撑.在这方面比较完善、比较深入的研究工作还不多,目前尚无先进行明确的 FGM 模型化设计后再从实验上加以验证的系统具体工作报道.但它是 FGM 研究中的一个极为重要的方向.

2.3.2 FGM 的基础研究

对 FGM 中各种物理过程的基础研究是一个极为重要的领域.根据目前所涉及的可能应用领域及 FGM 的性能看,FGM 中的主要物理问题是其中的输运(热量、电量、质量)过程及相关问题.目前对 FGM 的研究几乎都集中在其热物理性质上,基本问题是当 FGM 上存在一个温度梯度场时,相应的热应力分布及其演变规律,以及它们与其他物理参数的关系及其相互影响.可以看到,此时 FGM 的各种物理参数不但是坐标(组分)的函数,也是温度的函数,故相关的方程是非线性的,这使得求解变得很困难.日本的 Noda 等人讨论了组成材料的体积分数与温度和热应力之间的关系,边界条件对热应力分布的影响,减小热应力的优化方法等^[9].他们的研究工作表明,适当地选择热物理性质可以大大降低应力强度因子.这方面的工作比较活跃,已研究过许多种类及不同几何形状的材料问题.如圆柱(盘)状 FGM、空心圆筒 FGM、平板状 FGM;涉及的物理量主要是热应力、热膨胀系数、杨氏模量等;有瞬态情况,也有稳态过程;得到的结果既有解析解,也有数值解.尽管其中可直接用于指导 FGM 制备及设计的结论并不多,但这些研究还是使我们认识了 FGM 热物理性质的一些重要问题.另一方面的研究是关于 FGM 的力学性能的,如对竹子显微结构的研究表明,竹子实际上是一种梯度材料^[10],由于这种结构梯度的存在,使得竹子在韧性、强度等方面具有良好的性能.

相比之下,对 FGM 中电磁特性的研究,无论是实验或是理论,所见报道极少.柳襄怀等人^[11]曾报道过采用离子束注入技术而制备的 FGM 薄膜,除了具有优良的力学性能外,更引人注目的是,在不到 $1\mu\text{m}$ 的距离内,电阻的变化可达 $10^7\Omega$ 以上.Zhu 等人^[12]为改善压电系数、介电常数等的温度稳定性,通过在 PZT 系压电材料中加入具有钙钛矿结构的第三种组成,制备了 $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PZT - PNN) 系压电 FGM.目前对 FGM 的主要电磁性能及其变化规律还知之甚少,这是实现 FGM 广泛应用的一个主要障碍.

从 1992 年到 1996 年间召开的 3 届 FGM 国际会议看,基本上没有关于 FGM 中物理机理的研究文章.而各种层次上的物理模型及计算方法,是 FGM 应用和设计的必要的基础.因此,这方面的工作目前是 FGM 研究中的一个薄弱环节,应该引起我们的重视.

3 FGM 的应用现状

迄今为止,FGM 的最直接应用就是前述的航天飞行器材料.这是一种热障型梯度材料,具有一侧耐热隔热及抗氧化(陶瓷),另一侧高导热及韧性优良(金属)的特性.目前 FGM 的大部分研究都是在此应用背景下展开的.这种隔热耐磨韧性好的梯度材料(或覆层)在机械工程中的应用也十分广阔.

另一个 FGM 应用前景很明朗的领域是能源学科,如固体燃料电池、太阳能电池、热电转换装置等.目前对热电转换材料的研究最多.热电转换材料是实现热能与电能间直接转换的功能材料,其物理基础是熟知的 Seebeck 及 Peltier 效应.由于它可利用废热发电,或制成空调、冰箱等产品,没有机械运动部分,能耗低,也不需要任何气、液工质,不污染环境,因此极具发展潜力.热电材料的优劣可用优值系数 Z 来表征:

$$Z = S^2 \sigma / \kappa$$

其中 S 为 Seebeck 系数, σ 为电导率, κ 为热导率.可见,理想的热电材料应具有高 σ (电导)低 κ (热导)的特性.如果将梯度的概念引入,以优化 S , σ , κ 等参数为设计条件,使热电材料的组分沿温度梯度方向合理地变化,就可使总的 Z 值达到极大.已经制备了如 $\text{FeSi}_2/\text{SiGe}$ 、 PbTe/PbI_2 ^[13] 等热电材料,确实明显改善了其热电性能,但仍然存在着优值系数不够高,难以获得大尺寸材料等问题.

在其他应用领域,已经有少量的工作开展起来.如 Dilish^[14] 等人采用 sol - gel(溶胶 - 凝胶)工艺,通过组分的梯度变化,制备了一种新型的有机/无机键合玻璃材料,它兼具有有机玻璃的塑性及无机玻璃的刚性特性.在人造生物材料方面,FGM 的出现可较好地解决生物相容性及结合强度等问题.但总的来看,已知的 FGM 应用领域还不够广泛,有些应用目标尚不够明确.

4 FGM 的未来发展

FGM 是一种很新的材料,目前我国不少单位都开展了这方面的工作,但与国际先进水平相比尚有不少差距.FGM 在将来的全面发展,一方面依赖于物理、化学、计算机、数学及其他学科研究人员的共同参与;另一方面则依赖于实际应用的迫切要求.这两方面的因素是相辅相成的.没有前者,FGM 中

存在的众多材料制备、设计和机理问题就无法解决,FGM的研究就不能深入下去,其大规模应用也就无从谈起.而没有后者,研究人员及研究经费就不会在FGM领域集中,也就缺乏发展的动力.

FGM在近期的发展应该是,实验上从多种FGM角度出发,在发展及完善FGM制备技术的同时,对其中的各种物理过程,特别是其中的电、磁、光特性进行详尽研究,积累较为系统的实验数据及规律,发展相关的物理性能评估与测试技术,并探讨其更广泛应用的可能性.理论上应该特别注重对其中的物理机理进行深入研究,在不同层次上发展物理参量的理论计算模型,为后续的材料设计提供良好的材料知识库.

最后值得一提的是,材料中梯度的概念所蕴含的意义非常深远,可能在不久的将来在生物体系中也会找到梯度材料的用武之地.实际上,在发育生物学的研究中,已经提出了胚胎中存在着某种决定发育的关键性物质,其浓度在特定方向上呈梯度分布的理论^[15].也许将来FGM专家可与生物专家走到一起,来回答FGM在生物体系的生命过程中起到

什么作用这样一个值得认真考虑的问题.

参 考 文 献

- [1] 新野正之,平井敏雄,渡边龙三,日本复合材料学会志,1987,13(6):257
- [2] Landauer R. In:Garland J, Tanner D eds. Electrical Transport and Optical Properties of Inhomogeneous Media. Amer. Inst. of Phys. Conf. Proc., No. 40, New York, 1978, 2
- [3] Capasso F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1983, 51:2318
- [4] Gijs M A M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1995, 66(14):1839
- [5] Mihara T *et al.* In:Levy M, Mcavoy B M eds. IEEE 1993 Ultrasonics Symposium Proceedings, Vol. 1, New York:1993, 617
- [6] Miller D P *et al.* J. Mater. Res., 1993, 8:2004
- [7] Sarkar P *et al.* J. Amer. Ceram. Soc., 1993, 76:1055
- [8] Abboud J H *et al.* J. Mater. Sci., 1994, 29:3393
- [9] Noda N *et al.* Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 1991, 57(533):98
- [10] Amada S *et al.* J. Composite Mater., 1996, 30:800
- [11] 柳襄怀等.材料研究学报,1994,8(1):61 [LIU Xian-Huai *et al.* Mater. Res. Acta, 1994, 8(1):61 (in Chinese)]
- [12] Zhu X H *et al.* J. Mater. Sci. Lett., 1995, 14:516
- [13] Dilish H *et al.* J. Non-Cryst. Solids, 1988, 100:378
- [14] Kajikama T. In:Shiota I, Miyamoto M Y eds. Functionally Graded Materials, 1996. Tokyo, Elsevier Science, 1996. 475-482
- [15] 沈瑛译.科学,1996,(12):16

激光等离子体中自生磁场的诊断*

李 玉 同¹⁾ 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

江 文 勉

(西南核物理与化学研究所高温高密度等离子体物理重点实验室 成都 610003)

摘 要 激光与固体靶相互作用时会产生极强的磁场.文章简单地介绍了自生磁场的产生机制,较全面地讨论了自生磁场的实验诊断方法,包括物理探针法和光学诊断法,重点介绍了比较成功的法拉第旋转法和塞曼分裂法.最后还提出了两个可能的新方法.

关键词 激光等离子体,自生磁场

DIAGNOSTICS OF SELF-GENERATED MAGNETIC FIELDS IN LASER-PLASMAS

LI Yu-Tong ZHANG Jie

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

JIANG Wen-Mian

(Laboratory for Laser Fusion, Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract During the interaction of laser pulses with matter, megagauss spontaneous magnetic fields are pro-

* 中国工程物理研究院预研基金、国家自然科学基金、国家高技术惯性约束核聚变委员会基金资助项目

1999-02-04 收到初稿,1999-03-17 修回

1) 中国科学院物理研究所和西南核物理与化学研究所联合培养的博士生