

技术进展

适用于催化剂和发光材料研究的 并行合成和高通量表征技术

鲍 骏^{1,2}, 高 琛^{1,2}, 黄孙祥^{1,2}, 刘小楠^{1,2}, 陈 雷^{1,2}, 丁建军^{1,2}, 罗震林^{1,2}, 耿 斌^{1,2}

(1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

2. 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要:介绍了作者课题组近年来所发展的适用于催化材料和发光材料研究的并行合成和高通量表征技术, 以及在新材料筛选方面开展的工作。在并行合成方面包括组合喷射合成仪、微型阵列式溶液燃烧技术以及结合四元掩模和连续掩模的磁控溅射和脉冲激光沉积系统; 高通量表征部分包括真空紫外荧光照相系统和组合光谱扫描仪、红外热成像筛选装置和同步辐射红外光谱成像系统。最后, 简要介绍了利用所发展的组合技术在稀土聚合物敏化发光材料、真空紫外荧光材料以及可见光响应光催化材料方面开展的工作。

关键词:组合材料学; 并行合成; 高通量表征; 催化剂; 发光材料

中图分类号: O643.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2006)08-0008-06

Parallel synthesis and high throughput characterization techniques for catalysts and phosphors library

BAO Jun^{1,2}, GAO Chen^{1,2}, HUANG Sun-xiang^{1,2}, LIU Xiao-nan^{1,2}, CHEN Lei^{1,2},
DING Jian-jun^{1,2}, LUO Zhen-lin^{1,2}, GENG Bin^{1,2}

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

2. Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The parallel synthesis methods and high throughput characterization techniques for catalysts and phosphors library were reviewed based on the work of the author's research group. The contents include drop-on-demand ink-jet delivery technique, parallel solution combustion synthesis, thin film deposition combined with quaternary or in-situ physical mask, VUV phosphors library screening system, scanning spectroscopy system, IR thermography and synchrotron FT-IR spectral imaging. Finally, several examples of screening new materials via combinatorial method were demonstrated, such as sensitized phosphors VUV phosphors and some catalytic materials respond to visible light.

Key words: combinatorial materials science; parallel synthesis; high throughput characterization; catalysts; phosphors

新型功能材料是国民经济及社会发展的物质基础。尽管目前人们对材料性质和结构的理解有了长足进步, 但仍然难以从材料科学的理论出发, 根据材料的组成和处理过程来预言材料的性质, 进而根据需求设计新材料。一般情况下, 材料工作者不得不依靠经验和直觉, 通过每次合成、表征一种材料的方法来寻找新材料, 该方法已难以为高速发展的现代社会提供功能材料上的支撑。为了提高材料科学的研究效率, 1995 年美国劳伦斯-伯克莱国家实验室

(Lawrence Berkeley National Laboratory) 的项晓东博士和 P.G. Schultz 教授首次将组合思想引入材料科学领域并加以发展, 提出了新材料发现和优化的集成组合方法^[1], 其核心思想在于快速/并行合成、处理和表征由大量不同成分的微小样品组成的阵列或梯度样品(称之为“材料库”)。这项成果问世以来, 受到材料科学、生物、化学等学科领域和工业界的高度重视, 并成功将其应用于高温超导材料^[1]、磁阻材料^[2]、介电/铁电材料^[3]、发光材料^[4-6]、催化剂等的

收稿日期: 2006-05-27

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体项目(50421201)资助

作者简介: 鲍骏(1974-), 男, 博士, 助理研究员, 从事组合材料学研究, baoj@ustc.edu.cn, 0551-3607492; 高琛(1962-), 男, 博士, 研究员, 从事组合材料学和同步辐射应用研究, 0551-3602031, cgao@ustc.edu.cn。

研究^[7],从而发现并优化了许多性能优异的新型功能材料,已逐渐形成了一门新兴交叉学科——组合材料学(Combinatorial Materials Science)。

近年来随着工作的深入开展,平台和手段的匮乏已逐渐成为制约组合材料学发展的主要障碍。相对于材料库合成而言,材料库中样品物性的表征难度更大,这主要是因为材料的物性多种多样,其表征方法和技术千差万别,而传统的表征技术大多又不能满足组合材料研究的要求(微量、空间分辨、快速)。

中国科技大学国家同步辐射实验室组合材料课题组成立于1999年,是国内最早从事组合材料研究及其应用的课题组之一。该课题组依托同步辐射在研究材料结构和物性方面的优势,致力于发展创新的、具有通用性的组合方法及技术,兼服用组合方法筛选新材料。目前,已通过自行设计、国内加工结合进口的方式,建立了较为完善的组合材料学研究实验条件。本文结合笔者所在课题组近年来的工作,重点介绍所发展的适用于催化剂和发光材料研究的并行合成和高通量表征技术,希望能对国内相关领域的研究产生一定的推动作用。

1 并行合成

并行合成的目的是在同一块基片上用尽可能少的步骤快速合成大量不同成分的微量材料样品,形成所谓的材料库。其过程可细分为2步:一是微量反应原料向微反应器的精确输送,二是微反应器中化学反应的控制。由于材料的应用形式多样,其采用的样品库形态也各不相同。目前,无机功能材料的组合研究中大多采用粉末材料或者薄膜材料样品库,与之对应的较为成功的材料库合成技术主要有液滴喷射和结合原位物理掩模的薄膜沉积。

1.1 液滴喷射——组合溶液喷射合成仪

将多试管滴定的过程微型化、机械化、数字化即可实现组合液滴喷射^[8]。为了配合组合材料研究,笔者所在课题组自行研发了一台组合溶液喷射合成仪^[9],其结构示意图见图1。该合成仪有8个可独立控制的喷头。不同储液瓶装有不同的前驱体溶液或悬浮液,并通过进液管分别与喷头相连,预打孔的陶瓷基片放置在二维电动平台上。整个仪器由计算机控制,在图形软件界面的帮助下,操作者输入各喷头所喷液体的浓度、基片尺寸、组合方案等信息后,系统自动生成喷射控制指令控制喷头和平台的协调动作,完成前驱体溶液的喷射。通过这一技术,

可以在陶瓷片上的阵列孔中根据需要喷射不同种类、不同浓度、不同数量的液滴,然后经超声混合烘干、高温固相反应后得到所需的材料库。图1中右侧为笔者所在课题组采用该设备在50 mm × 50 mm的陶瓷基片上一次制备含11 × 11个不同样品的材料库。此技术属于液相合成,具有反应物在分子水平充分混合的优势,适用于粉末材料库的合成,已成功用于发光材料的组合研究中。

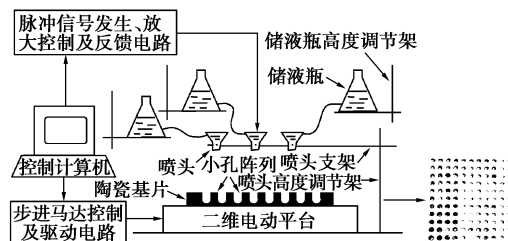


图1 组合溶液喷射合成仪的结构示意图^[9]

在已有的利用液滴喷射技术开展组合材料研究的报道中,所用“墨水”都是可溶物的水溶液。为了拓展液滴喷射技术在组合材料研究中的应用,笔者课题组发展了悬浮液喷射技术。通过将难溶氧化物粉末在纯水中球磨,成功制备了能够长时间稳定的系列“纯”稀土氧化物超细颗粒悬浮液^[10],并以其为前驱体,采用组合溶液喷射合成仪喷射合成了发光材料库。这种悬浮液制备方法具有一定的普适性,可以满足较多难溶物悬浮液的制备。

1.2 微型阵列式材料库溶液燃烧合成技术

利用液相合成法制备粉末材料库面临的一个难题是许多功能材料的固相合成温度较高(>1500℃),现有的材料库合成技术难以胜任。为了能够用组合方法研究高温材料,笔者所在课题组基于溶液燃烧法发展了微型阵列式材料库燃烧合成技术,实现了高温材料的并行液相合成^[11]。

溶液燃烧合成法的本质是将氧化剂(多为目标材料成分的金属硝酸盐)和还原剂(有机燃料)等前驱体溶液进行混合、加热,当体系的温度达到点火温度时,前驱物溶液开始自燃,发生剧烈的氧化还原反应,所释放的热能使体系瞬间达到高温,生成极细的粉末材料。这一技术小型化/阵列化的关键是将反应产物有效地控制在微反应器中,以避免产物飞溅,造成相邻反应器内产物的混合。为了实现这一目的,笔者所在课题组设计加工了具有“基片-金属丝网-盖板”3层结构的反应装置。陶瓷基片上预打了直径5 mm、间隔8 mm、深8 mm的小孔阵列,用作承载装有前驱体溶液的微反应器。前驱体溶液的输送

可用组合喷射合成仪完成。溶液喷射完成后,将 100 目的金属铜网覆盖在微反应器上,以阻挡燃烧粉末产物喷出。金属盖板与基片具有相同位置和大小开孔,并通过 4 个角上的螺丝将铜网和基片压紧。为了尽可能地降低燃烧反应的剧烈程度,选用尽可能慢的升温速率,以保证自燃在尽可能低的炉温下均匀发生。

为了验证上述合成方法的可靠性,该课题组利用该微反应器阵列首先合成了一个红色 $Y_2O_3:Eu_{0.01}$ 和绿色 $Y_2O_3:Tb_{0.01}$ 发光材料交替排列的材料库^[11]。光谱纯净性表明,相邻微反应器中合成的样品未发生相互混合。在此基础上又合成了一个高温材料库: $Y_3Al_5O_{12}:Tb_x$ ^[11]。紫外光谱测量表明, $^5D_3 \rightarrow ^7F_7$ 与 $^5D_4 \rightarrow ^7F_7$ 发射的分支比随 Tb 含量的变化与常规方法合成的结果一致,说明 Tb 已成功掺入 $Y_3Al_5O_{12}$ 基质中,这表明该技术可用于高温材料库的并行液相合成。

1.3 原位掩模薄膜顺序沉积——磁控溅射和脉冲激光沉积系统

在薄膜气相沉积的同时结合一定的掩模技术,如二元掩模、四元掩模、连续掩模等,并通过掩模的遮蔽和运动,可在衬底基片上形成特定的成分分布,从而合成空间可定位的薄膜材料库,其样品密度比用液滴喷射或阵列燃烧法得到的要高得多。针对薄膜材料库的制备,笔者所在课题组相继发展了结合原位掩模的磁控溅射和脉冲激光沉积(PLD)系统。

磁控溅射是通过射频辉光放电产生的离子轰击靶材来实现薄膜沉积的,它具有沉积速率高、基片温升低、膜-基结合力好、装置性能稳定、操作控制方便等优点。笔者所在课题组自行设计、制造了磁控溅射仪,它有 3 个独立的 25.4 mm(1 英寸)磁控射频/直流溅射靶,配合 3 套射频溅射电源,可以溅射包括导体、半导体和绝缘体在内的多种材料。真空部分通过机械泵和分子泵结合烘烤,可达 10^{-5} Pa 的极限真空。使用此溅射仪制备薄膜材料库主要有 2 种方法:一是结合四元掩模进行薄膜沉积。四元掩模是一组精确定位的、具有自相似的物理掩模,见图 2。通过 5 个掩模的交替使用,利用 20 步薄膜沉积可在 $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 的基片上获得多至 1 024 个不同成分的薄膜样品。另一种制备薄膜材料库的方法是利用溅射速率的空间分布,在基片的不同位置沉积不同厚度的薄膜,该方法可用于制备三元相图型材料样品库。

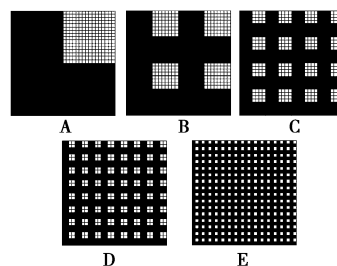


图 2 四元物理掩模

脉冲激光沉积(PLD)是近年来发展起来的使用范围很广的制膜技术,其原理是聚焦紫外脉冲激光于靶材表面,使组成材料的原子瞬间离子化,并进一步产生高温高压等离子体(温度大于 10^4 K),等离子体定向局域膨胀在基片上沉积成膜。和已有的制膜技术比较,PLD 最重要的特点是可以生长和靶材成分一致的多元化合物薄膜,甚至可生长含有易挥发元素的多元化合物薄膜。笔者所在课题组在真空腔内紧贴衬底基片前设计安装了一套移动掩模,用于在衬底上形成材料的厚度梯度分布,实现了梯度薄膜材料库的制备。

需要指出的是,采用磁控溅射和 PLD 系统刚沉积完的薄膜材料库是分层的,先要在中低温下进行长时间的退火处理,以促使组元间的充分扩散、防止组元的蒸发和亚稳相的形成,然后再在高温下经固相反应合成所设计的材料。由于样品纵向的厚度远小于横向的尺度,因此横向的扩散可以忽略。

2 高通量表征

2.1 材料库发光特性的高通量表征

2.1.1 真空紫外荧光照相系统

照相术是表征材料库发光特性最简单的方法,它具有天然的并行特点和优良的空间分辨率(约 10 μm)。大多数情况下,通过对材料库在各种激发下的发光进行照相,根据肉眼判断就可以从中筛选出性能优异的“线索”化合物。针对近来高效真空紫外荧光材料筛选的需求,笔者所在课题组设计了一款特种照相系统,其主体由一个真空腔和真空紫外光源构成。光源所发出的真空紫外光直接投射到材料库上,所激发的荧光经窗口由数码相机或科学级单色 CCD 来收集。

2.1.2 组合光谱扫描系统

照相术只能得到较为定性的结果,为了实现对材料库样品发射光谱的定量检测,笔者所在课题组发展了如图 3 所示的组合光谱扫描系统^[9]。该系统

的核心部件是一台美国 Ocean Optics 公司生产的便携式 SD 2000 型光纤光谱仪。该光谱仪采用 $25\ \mu\text{m}/200\ \mu\text{m}$ 入射狭缝、600 线/mm 闪耀光栅、2 048 元线 CCD 阵列探测器,可同时采集 200 ~ 850 nm 的光谱数据,分辨率达 1.34 nm/7.68 nm。使用时将材料库固定在二维电动平台上,光纤探头与材料库中的样品孔对准,然后启动激发系统使材料库中的样品发光,计算机自动控制二维平台移动,使材料库中的每个样品运动到光纤探头的正下方,并通过光谱仪逐一采集材料库中每个样品的发射光谱。为了避免样品间的相互干扰,可用一遮光板挡住其他样品的发光。

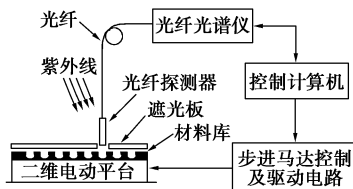


图3 组合扫描光谱系统结构示意图^[9]

2.2 催化材料库的高通量表征

现有的催化剂高通量筛选技术大致可以分为2种:一种是利用光学方法对特定的反应或分子产生信号,实现催化材料库的原位筛选。由于给出的是各种信号,只能间接地判断催化剂活性或选择性,因此适用于一级库的快速筛选。另一种是常规方法,将不同催化剂反应产物逐个导入检测器,直接计算出反应的活性和选择性,一般用于二级库的筛选。

2.2.1 催化材料库红外热成像筛选系统

由于不同催化材料对反应的催化能力不同,反应的热效应也不同,因而导致催化剂表面温度发生微小变化,利用对温度非常敏感的红外照相技术把催化剂表面温度的变化记录下来,可以实现筛选催化剂的目的^[12]。为了开展组合催化的研究,笔者所在课题组自行建造了一套催化剂红外热成像高通量筛选系统,用于催化材料库的初筛,其结构示意图如图4所示。系统主体是由反应腔、加热及控温系统和红外热成像仪构成。反应腔内含加热平台,使用时将催化材料库陶瓷基片放置在加热平台上,通过温控系统控制加热平台温度,即催化反应温度。反应气从腔体上部的入口进入,在催化剂表面发生反应,然后尾气通过加热平台下方的出口流出。为了使腔内的气体混合均匀,在反应气入口前方加装了混气风扇。催化材料库样品表面温度的变化通过红外窗口由红外热成像仪进行检测。加热平台温度范

围:20 ~ 900 °C;平台温度均匀性:< 5 K;热成像仪温度分辨率:0.1 K。陶瓷基片为圆形,每个样品孔直径为 5 mm,深度 7 mm,可同时筛选 109 个催化剂样品。目前,该课题组正利用这套装置开展新型稀土 NO_x 消除催化剂的组合筛选。

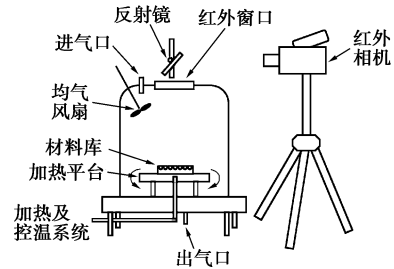


图4 催化材料库红外热成像筛选系统结构示意图

2.2.2 同步辐射红外光谱成像系统

红外热成像筛选系统只能用于比较催化材料库中不同样品的反应活性,但无法判断反应产物的种类及含量,因而适用于催化材料库的大规模初筛。为了弥补这一不足,该课题组正在发展一种基于红外光谱成像技术的组合催化表征系统,可用于催化材料库的二级筛选。该系统的设想首先由 Snively 等^[13]提出,并用于组合催化的研究。其原理是:光源发出的红外辐射经光学系统扩束后,由不同催化剂的反应产物吸收,再经光学系统由焦平面阵列探测器(FPA)同时记录。图5中, x 、 y 是空间位置,代表不同催化剂的反应产物, ν 是扫描波数范围。FPA所记录的数据通过快速傅里叶变换后,可同时获得不同催化剂反应产物的红外吸收谱,由此可分析产物种类和相对含量,获得催化材料库中各个样品的反应选择性数据。而将扫描波数固定在目标产物特征吸收波数 ν_1 处,所得到的截面图像则直接反映了材料库中不同催化剂的催化活性。采用这样的技术,研究效率可得到大幅度提高。

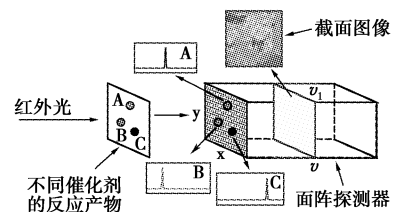


图5 红外光谱成像技术用于组合催化研究的原理示意图

系统中该课题组拟采用2套反应器,分别用于催化材料库的高通量筛选以及不同催化剂表面吸附

物种的高通量表征。图 6 为催化反应器和不同催化剂反应产物的高通量分析装置。法兰 A 内装有样品、加热装置和测温热电偶;法兰 B 是反应气入口。不同催化剂反应产物的高通量分析装置由一系列相互独立的不锈钢管构成,材料库中的每个催化剂与一个钢管相接,每个钢管都有独立的气体入口和出口,保证不同催化剂的反应产物相互隔绝,装置两端采用红外透明窗体材料密封(根据需要可选用不同的窗体材料,一般为 CaF_2)。

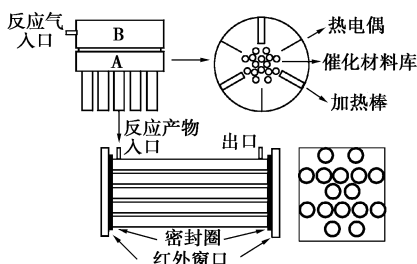


图 6 催化反应器及反应产物高通量分析装置基本结构

材料库中催化剂表面吸附物种的高通量表征采用图 7 所示的反应器进行,它是由一系列法兰构成。其中主法兰 A 内装有样品、加热装置和测温热电偶;法兰 B 和法兰 C 分别为气体入口和出口,其中气体出口连接真空机械泵。法兰 D 为一锥形法兰,连接红外窗体材料并装有水冷系统,以避免高温对窗体材料的影响,整套装置置于光学平台上。该反应器适合于采用透射法对材料库中催化剂的表面吸附物种同时进行表征,而且由于所有样品均在同一条件下进行测试,因而保证了结果的可比性。

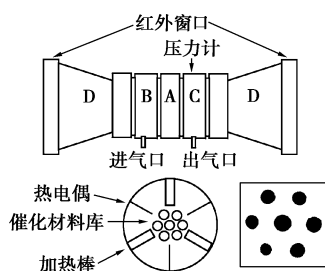


图 7 催化剂表面化学高通量表征反应器

在上述设计中,灵敏度、信噪比和动态范围的表征在很大程度上取决于光源。由于需要对多个样品同时进行表征,光源需要进行扩束,而普通光源由于亮度较低,扩束后光强更弱,导致其灵敏度和信噪比降低,这就限制了表征区域的大小,即材料库中的样品数量。在 Snively 等^[13]建立的装置中,可同时进行性能表征的催化剂数量不超过 20 个,可同时进行表面

化学研究的催化剂数量则更少。同步辐射作为一种新光源,其亮度在红外波段比普通光源高 2 个数量级,同时还具有光谱平缓、谱带宽等普通光源无法比拟的优点,对于提高组合催化筛选效率以及检测灵敏度具有重要意义。该系统的研制拟依托合肥同步辐射光源来进行,合肥同步辐射红外与远红外光束线站经二期工程改造后,能够提供波长 $1 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 、亮度 $1.2 \times 10^{13} \text{ phs/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{rad}^2$ 0.1% BW 的光束,这为整套系统的建立提供了基本保证。预计系统建成后具有以下性能指标:光谱范围 $5\,000 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$;分辨率 0.5 cm^{-1} ;可同时对 30 ~ 50 个催化材料的反应性能进行高通量筛选,尝试对 20 ~ 30 个催化材料的表面化学进行高通量表征。

3 新材料的组合研究

3.1 稀土聚合物敏化发光材料

单一稀土离子掺杂的聚合物材料,其光致发光虽然较稳定,但由于其发光是由 4f 能级间的跃迁造成的,吸收截面和发射几率都较小,因而影响到材料的发光效率。解决方法之一是掺入敏化离子的配合物,通过分子间的敏化作用来增强发光。由于稀土配合物掺杂聚合物的光致发光性能受稀土离子种类、稀土掺杂浓度、敏化离子种类及浓度、激发光源的波长、聚合物的凝聚态结构等诸多因素的影响,样品数目与稀土种类数目、稀土离子浓度等均是乘积关系,如果采用常规的方法进行筛选,工作量巨大。

笔者所在课题组采用组合方法系统研究了在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基质中掺杂不同稀土配合物 $\text{RE}(\text{DBM})_3\text{phen}$ ($\text{RE} = \text{La}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Gd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Y}^{3+}$) 对 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 的敏化发光影响情况^[14]。在 $\text{PMMA}-\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 体系中掺杂不同种类、不同含量的稀土配合物,结果表明,在 PMMA 中 $\text{La}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Gd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Y}^{3+}$ 离子配合物对 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 的发光都有敏化作用,其中 $\text{La}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 对 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 发光的敏化效率最高。在 PMMA 中掺杂不同含量的 $\text{La}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 和 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, 结果表明,当 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 的含量降低时,其发光强度也降低,但 $\text{La}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 对 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 的敏化效率却增强,在 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 与 PMMA 质量比为 0.05 时, $\text{La}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 对 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 发光的最大敏化效率约增加了 20 倍。针对组合法筛选出的样品,采用传统方法制备了相应的体材料,其测试结果与组合法基本相符。

3.2 真空紫外荧光材料

高效真空紫外荧光材料在新型环保荧光灯和等离子体平面显示器中具有广泛的应用前景。笔者所在课题组利用自行研制的组合液滴喷射合成仪和VUV荧光材料表征系统,以硝酸盐水溶液为前驱体,在预打孔的50 mm × 50 mm陶瓷基片上合成了含121个样品的硼磷酸盐材料库,并从中筛选出一组“线索”材料:GdSr(B_xP_{2-x})O_{5.5-7.5}:Eu_{0.1},其发射峰为⁵D₀→⁷F₀跃迁^[15]。采用常规方法合成的体材料测试结果表明,在同样的激发条件下,其真空紫外激发下的发光强度^[15]要高于商用红粉Y₂O₃:Eu。对这一材料的深入研究已在同步辐射真空紫外光谱实验站上展开,光谱测量结果显示该系列样品有可能具有下转换(即量子剪裁)的性质。由于国内不具备进一步确认的实验条件,该课题组已于2005年7月在德国同步辐射装置上进行了更加精确的测量,数据正在分析整理中。

3.3 可见光响应光催化材料

光催化材料在环境污染治理和光解水制氢中有着巨大的应用前景。为了提高研究效率,该课题组尝试采用组合法来筛选新型可见光响应光催化材料,光催化材料库的合成可采用组合溶液喷射法来进行,材料库的表征以亚甲基蓝的光降解为模型反应。将一定浓度、一定量的蓝色亚甲基蓝水溶液注入材料库的每个样品孔中,可见光源为Xe灯,使用滤光片来调节可见光波长范围。材料库中样品光催化活性的高低通过亚甲基蓝溶液褪色速率的快慢来进行判断。每隔一段时间,使用数码相机或CCD对材料库拍照,通过计算机对照片中亚甲基蓝溶液的颜色进行分析,根据蓝色的深浅得到亚甲基蓝溶液的褪色速率,由此判断样品光催化活性的相对高低。

4 结语

催化材料和发光材料是组合方法应用最早、最广泛的领域之一。笔者所在课题组通过几年的努力,已建立起较完善的适用于上述材料研究的并行合成和高通量表征实验装置,目前的工作重心已逐步转向新材料的筛选。根据实际工作情况来看,开展组合材料学研究,首先必须投入大量的研发资金和建立相关的技术平台。而这些资源一旦形成,单独一个课题组难以承担全部工作,因为短期实验所产生的大量数据需要很长的时间去分析处理。因

此,通过合作的机制来充分发挥这些技术平台的研究潜力是目前组合材料学发展的一个趋势。

参考文献

- [1] Xiang X D, Sun X D, Briceno G, *et al.* A combinatorial approach to materials discovery[J]. *Science*, 1995, 268: 1738 - 1740.
- [2] Briceno G, Chang H, Sun X D, *et al.* A class of cobalt oxide magnetoresistance materials discovered with combinatorial synthesis[J]. *Science*, 1995, 270: 273 - 275.
- [3] Chang H, Gao C, Takeuchi I, *et al.* Combinatorial synthesis and high throughput evaluation of ferroelectric thin film libraries[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72: 2185 - 2187.
- [4] Danielson E, Golden J H, McFarland E W, *et al.* A combinatorial approach to the discovery and optimization of luminescent materials[J]. *Nature*, 1997, 389: 944 - 948.
- [5] Wang J, Yoo Y, Gao C, *et al.* Identification of a blue photoluminescent composite material from a combinatorial library[J]. *Science*, 1998, 279: 1712 - 1714.
- [6] Danielson E, Devenney M, Giaquinta D M, *et al.* A rare-earth phosphor containing one-dimensional chains identified through combinatorial methods[J]. *Science*, 1998, 279: 837 - 839.
- [7] Reddington E, Sapienza A, Gurau B, *et al.* Combinatorial electrochemistry: A highly parallel, optical screening method for discovery of better electrocatalysts[J]. *Science*, 1998, 280: 1735 - 1737.
- [8] Sun X D, Wang K A, Yoo Y, *et al.* Solution-phase synthesis of luminescent materials libraries[J]. *Advanced Materials*, 1997, 9: 1046 - 1049.
- [9] Chen L, Bao J, Gao C, *et al.* Combinatorial synthesis of insoluble oxide library from ultrafine/nano particles suspension using a drop-on-demand inkjet delivery system[J]. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 2004, 5: 699 - 702.
- [10] 陈雷, 刘忠海, 沈磊, 等. 在纯水中高能球磨稀土氧化物制备超细纳米悬浮液[J]. *物理化学学报*, 2004, 20(7): 722 - 726.
- [11] Luo Z L, Geng B, Bao J, *et al.* Parallel solution combustion synthesis for combinatorial materials studies[J]. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 2005, 7: 942 - 946.
- [12] Taylor S J, Morken J P, Thermographic selection of effective catalysts from an encoded polymer-bound library[J]. *Science*, 1998, 280: 267 - 270.
- [13] Snively C M, Oskarsdottir G, Lauterbach J. Chemically sensitive parallel analysis of combinatorial catalyst libraries[J]. *Catalysis Today*, 2001, 67: 357 - 368.
- [14] Ding J J, Jiu H F, Bao J, *et al.* Combinatorial study of cofluorescence of rare earth organic complexes doped in the poly(methyl methacrylate) matrix[J]. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 2005, 7: 69 - 72.
- [15] Liu X N, Cui H B, Tang Y, *et al.* Combinatorial screening for new borophosphate VUV phosphors[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 223: 144 - 147. ■