

特约专栏

钙钛矿型 Pb 基反铁电储能材料研究进展

王 瑶, 邓 元

(北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191)

摘 要: 反铁电材料在发生场致反铁电-铁电相变过程中伴随着巨大应变和能量的储存和释放, 故在高密度储能器件和机电换能器上极具应用潜力。综述了具有钙钛矿结构的 Pb 基反铁电体结构特点与性能调控, 特别是 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) 基反铁电储能材料的研究进展与存在问题。重点讨论了几类典型元素掺杂 Pb 基反铁电薄膜材料研究的最新进展。简要介绍了适应无铅化要求、环境友好的无铅钙钛矿型反铁电-铁电相变材料。最后对当前钙钛矿型 Pb 基反铁电材料研究与应用中尚需深入探究的问题进行了总结。

关键词: 反铁电材料; 钙钛矿; 储能; 相变

中图分类号: TM221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2011)09-0051-05

Progress on the Studies of Perovskite Pb-Based Antiferroelectric Energy Storage Materials

WANG Yao, DENG Yuan

(School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The antiferroelectric materials are accompanied by huge strain and energy storage and release in the process of field-induced antiferroelectric-ferroelectric phase transition, which make them great potential in high-density energy storage devices and electromechanical transducers. An overview is given on the structure features and properties improvement of perovskite Pb-base antiferroelectric materials. The research progress as well as the problems on $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT)-based antiferroelectric material are reviewed. Particularly, several types of doped PZT-based antiferroelectric thin films that receive extensive attention are mainly discussed. To meet the environmental requirements, lead-free perovskite antiferroelectric-ferroelectric phase change materials are introduced. Finally, some issues that worth further exploration are summarized and corresponding prospects are proposed on the research and application developments of the antiferroelectric perovskite Pb-based materials.

Key words: antiferroelectric; perovskite; energy storage; phase transition

1 前 言

作为铁电材料的一类分支, 反铁电体直到 1951 年才由美国科学家 Kittle C 根据宏观唯象理论提出, 并预言了其基本特征^[1]。在目前已经发现的约 40 多种反铁电材料中, 钙钛矿结构的 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 基化合物是最具有应用价值的一类反铁电材料, 也是当今国内外研究的热点^[2-3]。反铁电体因其相邻的偶极矩反平行排列, 宏观并不表现出自发极化, 但在外电场作用下会发生反铁电 (AFE) - 铁电 (FE) 相变, 出现特征的双电滞回线, 如图 1 所示。对相变后的铁电体, 通过加热或加压等方

式可使其回复为反铁电体。该过程伴随着极大的应力变化和高密度电荷瞬间释放的现象, 因而反铁电体成为应用于高密度储能电容器的优秀候选材料。图 2 为反铁电材料与铁电材料储能过程。当施加在铁电电容器的电场撤掉时, 由于铁电体较大的剩余极化, 大部分充电输入的能量 W_F 被存储在材料中, 只有很小一部分 W'_F 被释放; 而对于反铁电电容器, 当电场降为零, 极化也降至零, 材料不储存多余能量, 除去很小一部分 W_{AF} 因极化转向发热的损耗外, 输入能量的大部分 W'_{AF} 以电能释放。反铁电体在足够电场作用下转变为铁电体, 这便是一个储能的过程; 当电场强度逐步减小到零, 铁电相变为反铁电相, 这也就是一个释能过程^[4]。

由于相变储能材料具有储能密度高、储能放能近似等温、过程易控制等特点, 能够解决能量供求在时间和空间上分配不平衡的矛盾, 是提高能源利用率的有效手段, 也是储存可再生能源的有效方式之一。它在航空航

收稿日期: 2011-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51002006); 科技部 863 计划项目 (2009AA03Z322)

通信作者: 邓元, 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师

天、太阳能利用、工业余热回收、采暖空调及家用电器等领域有着广泛应用。同时,通过控制电场的大小,电场诱导相变还提供了可开关、可调的介电、压电和热释电性能,并具有可逆的增强效应。所以反铁电材料也是智能传感和致动系统中的关键材料。

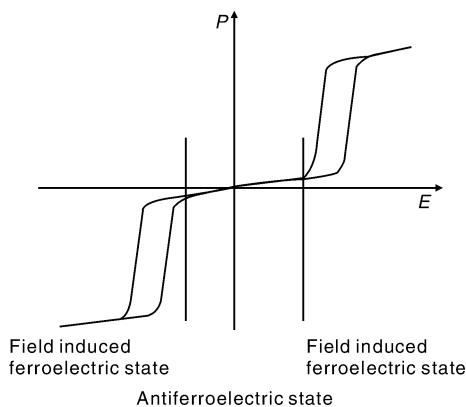


图 1 PbZrO₃ 双电滞回线

Fig. 1 Hysteresis loop of PbZrO₃

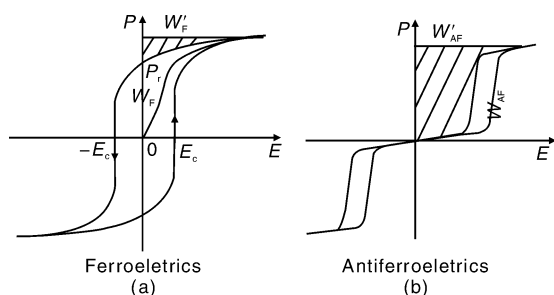


图 2 铁电体(a)和反铁电体(b)储能过程

Fig. 2 Energy storage process of ferroelectrics (a) and antiferroelectrics(b)

2 Pb(Zr, Ti)O₃ 基反铁电材料结构与性能

钙钛矿的晶体结构如图 3 所示。含 Pb 的 ABO₃ 型 PbZrO₃ 和 PbTiO₃ 化合物,位于氧八面体中心的 Ti 离子和 Zr 离子半径相近且很小,可以任意比例固溶,得到固溶体 Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃ (PZT)。同时这种 ABO₃ 钙钛矿结构允许其它原子部分替代 A 位 Pb 离子和 B 位的 Ti/Zr 离子,从而微调晶胞结构。PZT 作为具有优异铁电、压电性能的材料,自 20 世纪 50 年代开始在工业界被广泛应用。因其组分、物相、性能可调性,一直是功能材料领域的研究热点。由 Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃ 相图可知, $x = 0.05$ 是 AFE-FE 相界,相界附近为 FE 和 AFE 两相共存区域,在不同温度和组分下可表现出复杂的相结构,如四方反铁电相、正交反铁电相、菱方铁电相等。该相图区间的材料在电场诱导作用下发生 AFE-FE 相变;在温

度或应力诱导下发生 FE-AFE 相变。在 PZT 基础上,对钙钛矿结构的 A 位和 B 位分别进行掺杂,调整其晶体结构,可得到多种具有应用价值的反铁电体。

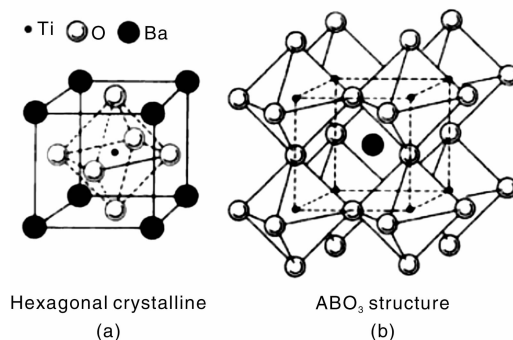


图 3 钙钛矿 BaTiO₃ 晶体结构: (a) 六方晶形, (b) ABO₃ 结构

Fig. 3 Crystal structure of perovskite BaTiO₃ unit cell (a) and ABO₃ structure(b)

2.1 块体材料

20 世纪 60 年代, Jaffe 和 Berlincourt 等人通过对 PZT 掺杂改性,得到在室温下可发生电场诱导 AFE-FE 转变的 Pb(Zr, Ti, Sn)O₃ (PZST) 材料体系^[5-6]。由于 Sn 的掺入,扩大了四方反铁电相的稳定区域和 Zr/Ti 比的调节范围。随后 Bigger, Gururaja, Maher 等人对 La 掺杂 PZT 进行了广泛地研究^[7-9]。结果表明: La 掺杂在一定程度上抑制了 PLZT 材料中的长程铁电有序分布,从而使得反铁电相界部分扩大。

反铁电体在充电-放电循环工作中,一个较大的缺陷是通常几百个循环后器件就会产生裂纹而失效。这些裂纹是充放电过程中材料相变产生较大应力应变造成的。如果目标材料能够保持较高的饱和极化强度(P_s)以及低的剩余极化强度(P_r),同时增加双电滞回线的矩形度,就可以在保持反铁电体高能量密度的同时,增加其充放电循环寿命。为实现以上目标,对 Pb(Zr, Sn, Ti)O₃ 基反铁电材料进行 La 或 Nb 掺杂,以调控它们的性能。Chen 在 La 掺杂 PZST 陶瓷的基础上,在 A 位和 B 位同时加入少量 Nb,使双电滞回线更倾斜,面积更小,如图 4 所示^[10]。多次充放电循环测试结果表明,在经过 500 次循环后,储能密度仅由 0.31 J/cm³ 减少为 0.30 J/cm³,所储能能在 500 ns 内完全释放。可见,此类材料适用于脉冲电容器。

Zhang 等人^[11]通过测试不同电场强度下 La 掺杂 PZST 陶瓷电容器得到脉冲放电电流-时间曲线,发现随着电场强度由 3 kV/mm 增加到 3.5 kV/mm,极化强度和发电电流随之显著增大;在 3.5 kV/mm 电场强度下,电容器经过 2 000 次充放电循环并无明显性能退化。

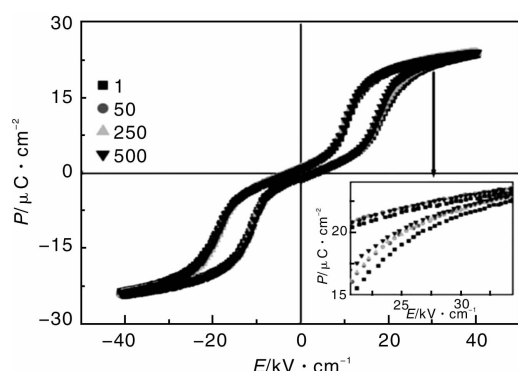


图4 La, Nb 共掺 PZST 多次循环充放电后电滞回线

Fig. 4 Hysteresis loops after various charge-discharge circulations for the $\text{Pb}_{0.93}\text{La}_{0.04}\text{Nb}_{0.02}(\text{Zr}_{0.42}\text{Ti}_{0.18}\text{Sn}_{0.40})_{0.98}\text{O}_3$ ceramics

2.2 薄膜材料

随着电子、信息和控制技术朝着小型化、高集成化方向发展,对器件、对新材料的要求越来越朝薄膜化方向发展。PZT 基薄膜因具有优良的压电、铁电、介电、热释电性能等,在微机电系统(MEMS)中有重要应用,多年来一直是国际上新功能材料和器件的研究热点。反铁电薄膜的场致相变性能使之十分适用于高能存储电容器上。

Chen 曾预计在 PbZrO_3 (PZ) 相变过程中能产生高达 50 J/cm^3 能量^[12], 因此,关于 PZ 以及 PZ 掺杂薄膜的研究将推动电荷存储和储能器件的开发。对 PZ 和 PZT 基薄膜材料,其制备工艺对材料性能有较大影响。其中,因 Pb 的易挥发性而造成的 Pb 缺失, V_{O} 缺陷的形成、第二相杂相的形成及薄膜与衬底界面是否形成中间“死层”等,都是影响薄膜性能的关键因素。

Yao 等人^[13]采用脉冲激光沉积的方法制备了 La 掺杂 PZST 薄膜 $\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02}(\text{Zr}_{0.65}\text{Sn}_{0.24}\text{Ti}_{0.11})\text{O}_3$ 。通过对沉积工艺中衬底、沉积、热处理温度和氧分压等参数细致调控,发现最佳的衬底温度和后处理温度分别为 $100^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 和 $550^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$, 过高的温度会导致焦绿石相的出现,而低的温度则无法得到结晶良好的钙钛矿结构;后处理过程中的氧分压也十分重要,不但会影响薄膜的质量更对性能影响显著;氧分压越高,得到的薄膜越致密、表面越平整、结晶性更好,极化强度越高,耐压强度也随之提高。

La 掺杂 PZST 体系 (PLZST) 因其高储能密度、高转换电场、零剩余极化强度而成为目前储能用反铁电薄膜材料中较有应用价值的材料体系。对块体陶瓷而言,因为 AFE 相和 FE 相的转换电场强度较低(几十 kV/cm),导致储能密度较低,约 0.41 J/cm^3 , 而对应的薄膜体系

转换电场很高(几百 kV/cm), 储能密度高达 8.13 J/cm^3 。但相比于块体,薄膜的应变却远远低于块体,可能的原因包括由于复杂的成分导致产生的第二相和裂纹。Mirshekarloo 等人最近的研究中发现^[14], PLZST 薄膜虽然在 XRD 谱中观测不到第二相的存在,但通过 TEM 分析可发现存在少量的焦绿石第二相,如图 5 所示。为此,通过在前驱体溶胶中加入聚乙二醇(PEG)以及在薄膜表层覆盖一层 PbO , 可以明显降低焦绿石第二相的含量,从而提高薄膜的储能性能。在完全不含焦绿石相的 PLZST 薄膜中,储能密度高达 13.7 J/cm^3 , 应变量为 0.49% 。

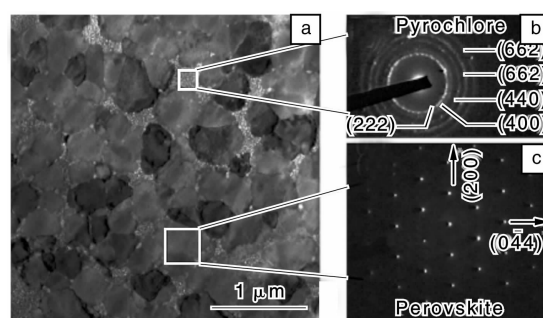


图5 PLZST 薄膜透射电镜照片(a), 焦绿石相选区电子衍射(b), 钙钛矿相选区电子衍射(c)

Fig. 5 TEM image of PLZST film (a), SEADs of pyrochlore phase(b), and perovskite phase (c)

Hao 等人则采用在前驱体溶胶中直接添加过量 Pb 以弥补 Pb 挥发对薄膜性能的影响^[15]。通过对不同 Pb 过量条件下制备的 $(\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02})(\text{Zr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03})\text{O}_3$ 薄膜性能对比,得到随着 Pb 从化学计量比增加到过量 20%, 薄膜的储能密度由 3.3 J/cm^3 提高到 11.7 J/cm^3 。由此可见, Pb 含量对 AFE 薄膜储能性能的影响显著。

大部分的 AFE 薄膜都是沉积在 Si 片或是单晶基片上, Ma 等人将 $\text{Pb}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ 薄膜沉积在覆盖着介电层的 Ni 箔上形成电容器,为薄膜在电子器件中的应用开辟了一种新方法^[16]。该电容器在 25°C 和 150°C 时的储能密度高达 53 J/cm^3 和 37 J/cm^3 , 室温下该容器在 300 kV/cm 电场强度作用下疲劳寿命大于 5000 h 。

Parui 等人在研究较多的 La 掺杂 PZ 体系中发现,通过 La 掺杂可以调控 PZ 薄膜的晶体取向,而取向与薄膜的极化强度有密切联系^[17]。研究结果显示:储能密度的高低并不取决于回线的形状,根据 $W = \int E dP$ 公式,极化强度的提高对储能密度的提升作用更显著。在 5% La 掺杂的 PZ 薄膜获得的最大储能密度高达 14.9 J/cm^3 , 相应的转换电场强度 $E \sim 60 \text{ MV/m}$ 。Hao 等人也在 $(\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02})(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 薄膜体系的研究过程中发

现了薄膜取向与性能的对对应关系^[18]。该课题组还对 PZ 体系进行了 Sr 掺杂, 结果表明: Sr 可以提高 PZ 薄膜的储能密度和能量效率以及疲劳特性^[19]。

3 无铅反铁电 - 铁电相变材料

随着全球环境问题的凸显, 绿色环境友好材料将成为未来发展的主流需求。随着欧盟、美国等国家禁止含 Pb 产品, PZT 基材料虽然性能优越, 但其高 Pb 含量限制了其市场应用, 人们也开始寻找能够替代 PZT 基且性能相当的无铅压电材料。Saito 于 2004 年首次在《Nature》上报道了 (K, Na)NbO₃ (KNN) 基陶瓷在准同晶相界面处具有同 PZT 相当的性能, 从而为无铅压电材料的设计提供了新的研究方向, 由此拉开了寻找高机电换能性能的无铅压电材料研究热潮^[20]。但是开发无铅反铁电 - 铁电相变材料的研究却是一个较新的方向。基于掺杂可以扰乱铁电体的长程有序的设计思路, Zhao 等人在 0.94(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃-0.06BaTiO₃ (BNT-BT) 体系菱方和四方相的准同晶相界面处, 加入少量 KNN, 开发出一类无铅反铁电体。这种组分材料易发生反铁电 - 铁电相变产生巨大的场致应变用于驱动器等^[21-22]。

Gao 等人于最近首次报道了 0.89Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-0.06BaTiO₃-0.05K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ (0.89BNT-0.06BT-0.05KNN) 无铅陶瓷体系的储能性能^[23]。研究结果表明: 该体系在温度较宽的范围 (20 ~ 90 °C) 存在弥散的铁电 - 反铁电相变; 在稳定的 AFE 相内, 材料的储能密度维持在 0.59 J/cm³@5.6 kV/mm 且储能密度的大小与温度和频率的依赖关系不大; 与含铅体系的性能相当, 该体系将有望成为 Pb 基反铁电储能材料的替代产品。

4 结 语

反铁电材料因其发生场致 AFE-FE 相变过程中伴随着巨大应变和能量的储存和释放, 在高密度储能器件和机电换能器上极具应用潜力。特别是具有钙钛矿型结构 Pb 基材料体系, 已成为当前研究的热点。虽然反铁电材料已取得不少进展, 但更深入的研究尚待开展, 主要集中在以下几个方面。

(1) PZT 基反铁电材料组成和结构较为复杂, 因此材料的化学组成、显微结构与电性能间的相互影响关系需要深入研究。

(2) 反铁电材料受外电场、压力和温度的影响较大, 需系统研究外场作用下材料的响应特点。

(3) 制备工艺对材料性能影响显著, 特别是相变发生的材料组分区间狭窄, 稍稍一些成分波动将给材料性能带来严重影响, 需要进一步探索组分和结构的调节,

扩大相变区间、增加材料性能稳定性。

(4) 反铁电材料应用于器件, 尚需完善多项性能指标的测试, 特别是对于薄膜体系, 如: 充放电循环疲劳、持久性、可靠性、稳定性等。

(5) 适应于环境需求, 开发无铅反铁电材料。

参考文献 References

- [1] Kittel C. Theory of Antiferroelectric Crystals[J]. *Physical Review*, 1951(82): 729-732
- [2] Xia Zhiguo(夏志国), Li Qiang(李强). PZT 基反铁电材料研究进展[J]. *Journal of Synthetic Crystals* (人工晶体学报), 2006, 35(4): 835-843.
- [3] Zhang Xiaoshuai(张晓帅). *Antiferroelectric Energy Storage Materials* (反铁电储能材料) [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [4] Huang Xinyou(黄新友), Gao Chunhua(高春华). *Introduction of Electronic Components and Materials* (电子元器件及其材料概论) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [5] Berlincourt D, Krueger H H A. Domain Processes in Lead Titanate Zirconate and Barium Titanate Ceramics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1959(30): 1804-1810.
- [6] Berlincourt D, Jaffe H, Krueger H H A, et al. Release of Electric Energy in PbNb(Zr, Ti, Sn)O₃ by Temperature and by Pressure-Enforced Phase Transitions[J]. *Applied Physics Letters*, 1963(3): 90-92.
- [7] Guttritja T R, Kumarakrishna S, Subbarao E C. Modified PLZT High Voltage Dielectrics[J]. *Ferroelectrics*, 1980(27): 863-869.
- [8] Biggers J V, Schulze W A. Direct Current Bias of Antiferroelectric PLZT Ceramics[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1974(53): 2046-2053.
- [9] Maher G H. Effect of Silver Doping on the Physical and Electrical Properties of PLZT Ceramics[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1983(66): 1209-1218.
- [10] Chen X, Zhang H, Cao F, et al. Charge-Discharge Properties of Lead Zirconate Stannate Titanate Ceramics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009(106): 034105
- [11] Zhang H L, Chen X, Cao F, et al. Charge-Discharge Properties of an Antiferroelectric Ceramics Capacitor Under Different Electric Fields[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010(93): 4015-4017.
- [12] Chen N, Bai G R, Auciello O, et al. *MRS Symposia Proceedings* [C]. Pittsburgh: Materials Research Society, 1999: 345-350.
- [13] Yao Y, Zhai J, Chen H. Dielectric Properties of Lead Lanthanum Zirconate Stannate Titanate Antiferroelectric Thin Films Prepared by Pulsed Laser Deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004(95): 6341-6346
- [14] Mirshekarloo M S, Yao K, Sriharan T. Large Strain and High

- Energy Storage Density in Orthorhombic Perovskite ($\text{Pb}_{0.97}\text{-La}_{0.02}$) ($\text{Zr}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ti}_y$) O_3 Antiferroelectric Thin Films [J]. *Applied Physics Letters*, 2010(97): 142 902.
- [15] Hao X H, Zhou J, An S L. Effects of PbO Content on the Dielectric Properties and Energy Storage Performance of ($\text{Pb}_{0.97}\text{-La}_{0.02}$) ($\text{Zr}_{0.97}\text{Ti}_{0.03}$) O_3 Antiferroelectric Thin Films [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011(94): 1 647 – 1 650.
- [16] Ma B H, Kwon D K, Narayanan M, *et al.* Dielectric Properties and Energy Storage Capability of Antiferroelectric $\text{Pb}_{0.92}\text{La}_{0.08}\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ Film-on-Foil Capacitors [J]. *Journal of Materials Research*, 2009(24): 2 993 – 2 996.
- [17] Jayanta Parui Krupanidhi S B. Enhancement of Charge and Energy Storage in Sol-Gel Derived Pure and La-Modified PbZrO_3 Thin Films [J]. *Applied Physics Letters*, 2008(92): 192 901.
- [18] Hao X H, Zhai J W, Yang J C, *et al.* Improved Field-Induced Strains and Fatigue Endurance of PLZT Antiferroelectric Thick Films by Orientation Control [J]. *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, 2009(3): 248 – 250.
- [19] Hao X H, Zhai J W, Yao X. Improved Energy Storage Performance and Fatigue Endurance of Sr-Doped PbZrO_3 Antiferroelectric Thin Films [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009(92): 1 133 – 1 135.
- [20] Saito Y, Takao H, Tani T, *et al.* Lead-Free Piezoceramics [J]. *Nature*, 2004 (432): 84 – 87.
- [21] Zhang S T, Kouna A B, Aulbach E, *et al.* Giant Strain in Lead-Free Piezoceramics $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3\text{-K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{-NbO}_3$ System [J]. *Applied Physics Letters*, 2007 (91): 112 906.
- [22] Zhang S T, Kouna A B, Jo W, *et al.* High-Strain Lead-Free Antiferroelectric Electrostrictors [J]. *Advanced Materials*, 2009(21): 1 – 5.
- [23] Gao F, Dong X, Mao C, *et al.* Energy-Storage Properties of $0.89\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3\text{-}0.05\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ Lead-Free Anti-ferroelectric Ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, DOI: 10.1111/j.1551 – 2916.2011.04731.x.

我国在纳米材料生物效应研究方面取得新进展

近日, 国家纳米科学中心中国科学院纳米生物效应与安全性重点实验室陈春英研究组与纳米材料研究室唐智勇研究组合作, 在以秀丽线虫为模型研究纳米材料生物效应方面取得重要进展, 研究成果发表在美国化学会的 *Nano Letters* 杂志上(2011, 11: 3174 – 3183)。

纳米材料与生命体系相互作用及其健康效应问题, 是纳米科技领域的重要前沿科学问题。由于纳米材料本身具有独特的理化性质, 传统毒理学评价方法已不能满足纳米材料生物效应研究的需求, 实验中体内、体外结果不一致的矛盾日益凸显, 这就要求发展快速、简单、准确的毒理学评价模型体系。而纳米材料在复杂生物体系内可能发生的多种理化性质改变更为其后续毒理学研究带来了巨大的挑战, 这就要求在方法学上有所突破创新。

秀丽线虫(*Caenorhabditis Elegans*)是生物学经典的模式生物, 然而用于纳米材料的生物效应研究还鲜有报道。本研究基于秀丽线虫模型, 从纳米材料毒理学评价方法学的建立、应用和机理揭示等方面进行了具有开创意义的研究。值得一提的是: 秀丽线虫的优势在于其既可以从生物个体水平进行研究, 其体内的每个细胞又可单独研究, 便于从整体、器官、组织、细胞多层次对纳米材料的体内行为进行研究。

本工作选择了目前最具有应用前景的量子点(Quantum Dots)作为代表性纳米材料, 研究了其在体内的分布、代谢、转化和长期毒理效应。研究发现: 量子点经摄食进入并积累在秀丽线虫消化系统, 进入消化道内皮细胞定位于溶酶体, 长期蓄积会导致量子点从消化系统向生殖系统迁移, 并导致生殖障碍和子代发育毒性。

基于同步辐射先进光源发展起来的多种元素高灵敏分析技术近年来已开始应用于纳米材料的表征、化学结构分析等领域, 然而用于生物体系内原位的研究尚无报道。本工作创新性地多种同步辐射技术, 如 X 射线原位微区元素成像与化学结构分析技术应用于量子点材料在体内代谢与降解过程的研究, 揭示了量子点在线虫消化系统微环境内降解、氧化和代谢的过程, 并指出了利用纳米材料光学特性进行分布研究的不可靠性, 提出了集成光学成像、原位元素成像与结构分析、细胞生物学、毒理学等多种方法来研究纳米材料在生物体系内分布代谢等重要问题的系统研究方法。

该研究方法对于建立以秀丽线虫为模式生物评价纳米材料生物效应的研究平台具有重要意义, 并有望在后续研究中推广应用于多种重要纳米材料的研究, 在不同层次阐明纳米材料与生物体系相互作用的机制。

(来源: 国家纳米科学中心)



专栏特约编辑徐惠彬

徐惠彬：男，1959年生，教授；1992年获德国柏林工业大学博士学位、1993年回国到北京航空航天大学工作；1994年获首届国家杰出青年基金、2000年入选教育部长江学者特聘教授、2010年获何梁何利科学与技术进步奖；担任总装备部先进材料技术专业组成员、国务院学位委员会材料科学与工程评议组成员、国家自然科学基金委员会工程与材料学部咨询委员会委员、中国航空学会材料工程专业委员会副主任、中国材料研究学会常务理事等职务；长期从事材料固态相变的基础研究以及新型形状记忆合金、磁致伸缩材料和热障涂层材料等特殊功能材料的科学研究和工程应用；先后主持了20多个国家重点和重大项目，获国家技术发明一等奖和二等奖各1项、省部级一等奖4项，作为学术带头人，2008年获批“国防科技创新团队”，2010年获批国家自然科学基金委“创新研究群体”；获授权发明专利81项，发表论文200余篇。

蔡伟：男，1963年生，教授、博导，教



特约撰稿人蔡伟

育部跨世纪优秀人才培养计划、黑龙江省杰出青年基金及优秀中青年专家获得者；1994年于哈尔滨工业大学获博士学位，曾赴日本筑波大学从事博士后研究；主要从事形状记忆材料和生物材料等基础理论和应用研究；主持自然科学基金重点项目1项、面上项目4项，973前期研究专项1项以及其它部委项目20余项；获国家科技二等奖1项，国家自然科学基金四等奖1项，黑龙江省自然科学一等奖1项以及部委科技二等奖3项；发表论文260余篇，出版专著2部，获国家发明专利20余项。

龙毅：女，1955年生，教授、博导；1989年于日本北海道大学获工学博士学位；现任北京科技大学材料学院磁性材料及应用研究室学术梯队负责人、《中国稀土学报》和《金属功能材料》编委；主要从事磁性材料研究；负责了国家“十五”、“十一五”以及“十二五”磁制冷材料的“863”项目，负责和参加了多项国家自然科学基金项目、“973”项目、军工项目；长期承担国际合



特约撰稿人龙毅

作项目，参与中小企业创新基金等企业项目；发表论文50篇。

于荣海：男，1963年生，教授、博导；1995年获西班牙巴塞罗那大学博士学位、1995~1996年在西班牙科学院做博士后研究、1997~1999年在美国特拉华大学做博士后和研究助理、1999~2000年在美国Rhodia公司工作、2000~2003年在美国Santoku公司工作、2003年清华大学百人计划引进；曾任清华大学材料科学与工程系副主任、教育部先进材料重点实验室副主任、金属材料研究所所长，2010年任北京航空航天大学材料物理中心主任；长期从事磁性和磁性材料、储氢材料等方面研究；承担“973”、“863”重大课题，自然科学基金项目（包括海外杰出青年基金1项），科技部国际合作重点项目和丰田汽车国际合作项目等项目；发表论文100余篇，国际会议邀请报告8篇。

金学军：男，1969年生，教授、博导；2001.1~2001.12美国MIT材料系访问科学家，现任上海交大材料学院副院长，兼任马氏体相



特约撰稿人于荣海



特约撰稿人邓元

变国际顾问委员会委员，内耗与力学谱国际学术委员会委员等；获2000年“中国高校自然科学”二等奖，获“周徐锦芝”、“华为”优秀教师和“材料学院最受学生欢迎的教师”等荣誉；入选上海市优秀青年教师后备人选，新世纪优秀人才计划；承担国家自然科学基金、973和国际合作项目等10余项；发表论文60余篇，参编教材3部，授权专利3项。

蒋成保：男，1968年生，博士、教授、博导；1996年获北京科技大学工学博士；2000年3月~2007年4月期间先后为爱尔兰Trinity College访问学者，英国Birmingham University高级研究学者，2001年入选“北京市科技新星计划”、2004年入选“教育部新世纪人才计划”、2009年获“国家杰出青年科学基金”；现为中



特约撰稿人金学军



特约撰稿人蒋成保

国稀土学会理事、中国材料研究学会青年工作委员会常务理事；主持包括国家杰出青年基金在内的10余项国家级或省部级科研项目；曾获教育部自然科学一等奖，国防技术发明一等奖和国家技术发明一等奖；发表论文80余篇，授权发明专利10余项。

邓元：男，1972年生，教授、博导，入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”；2001年清华大学化学系博士毕业、2003年清华大学材料科学与工程系博士后出站；AMDP 2008国际会议分会主席；主要从事新型能源转化、存储材料及器件的设计、加工及应用等方面的研究工作；主持国家自然科学基金，“863”，民用航天、企业重大技术攻关等课题10余项；发表论文60余篇，授权发明专利8项。