

The Preparation of YbCrO₃ Nanometer Powder and the Study of Its Structure and Magnetism

Yaowen Mao, Ruilong Wang, Chengcheng Zhang

Faculty of Physics and Electronic Science, Hubei University, Wuhan Hubei
Email: myw0228@163.com

Received: Jul. 26th, 2018; accepted: Aug. 7th, 2018; published: Aug. 14th, 2018

Abstract

In order to explore the influence of structure and magnetism of rare earth chromium oxide from powder size, YbCrO₃ powder samples with different sizes were successfully fabricated by sol-gel method. The studies of structure indicate that the size of powder increases with the increase of sintering temperature, and cell volume and Cr-O-Cr bond angle decrease with the increase of powder size, while the Cr-O bond length is nearly unchanged. The effect of Cr-O-Cr bond angle on the magnetic properties of YbCrO₃ powder was reflected on the obvious increase of T_{comp} , T_{max} and M_{max} and weak increase of Neel temperature T_{N} in thermomagnetic curves with the increase of powder size. On the one hand, the decrease of the Cr-O-Cr bond angle weakened the anti-ferromagnetic coupling strength between Cr³⁺ ion; on the other hand, the gradually increase of long range order enhanced the anti-ferromagnetic coupling strength between Cr³⁺ ion. The competition made the T_{N} slightly increase with the increase of the powder size. The M-T curve fitting results also showed that, under T_{N} , the decrease of the Cr-O-Cr bond angle and the increase of long range order enhanced the Cr³⁺-O²⁻-Cr³⁺ superexchange effect, improved the net magnetic moment of Cr³⁺ (M_{Cr}) and the infield of Yb³⁺ from Cr³⁺ (H_i). The low temperature hysteresis loop showed that positive exchange bias field increased with the decreases of Cr-O-Cr bond angle.

Keywords

Rare Earth Chromium Oxide, Oxygen Vacancy, Super Exchange Effect, Negative Magnetization, Exchange Bias

YbCrO₃纳米粉末的制备及其结构和磁性的研究

毛耀文, 王瑞龙, 张城城

湖北大学物电学院, 湖北 武汉
Email: myw0228@163.com

收稿日期: 2018年7月26日; 录用日期: 2018年8月7日; 发布日期: 2018年8月14日

摘要

为探究粉末尺寸对稀土铬氧化物的结构、磁性的影响机制, 我们用溶胶凝胶法成功制备出不同尺寸的 YbCrO_3 粉末样品。结构和磁性的研究表明晶胞体积随着粉末尺寸的增大而减小, 同时 Cr-O 键长基本不变, 而 Cr-O-Cr 键角逐渐减小, 且制备的粉末尺寸随着烧结温度的升高而逐渐增大。Cr-O-Cr 键角对 YbCrO_3 粉末的磁性影响反应在随着粉末尺寸的增大, 热磁曲线上 T_{comp} 、 T_{max} 、 M_{max} 明显增大及奈尔温度 T_N 微弱增大。一方面, Cr-O-Cr 键角的减小削弱 Cr^{3+} 离子之间的反铁磁耦合强度; 另一方面, 其长程有序度逐渐提高增强 Cr^{3+} 离子之间的反铁磁耦合强度。二者的竞争关系使得 T_N 随着粉末尺寸的增大而轻微增大。同时 M-T 曲线的拟合结果也表明, 在 T_N 以下, Cr-O-Cr 键角的减小和长程序的提高增强了 Cr^{3+} - O^{2-} - Cr^{3+} 超交换作用, 提高了 Cr^{3+} 的净磁矩 M_{Cr} 及 Cr^{3+} 对 Yb^{3+} 作用的内场 H_I 。低温下的磁滞回线表明粉末样品的正向交换偏置场随着 Cr-O-Cr 键角减小而增大。

关键词

稀土铬氧化物, 氧空位, 超交换作用, 负磁化, 交换偏置

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳米材料具有低维度、量子效应, 且其结构、磁性与纳米粉末的尺寸都具有独特的依赖机制, 因而研究的热点逐渐转向纳米尺寸的钙钛矿结构氧化物[1]-[9]。传统的固相合成法制备的钙钛矿铬氧化物其尺寸仅能达到微米尺寸[10][11][12][13]。因而出现一些有效的化学方法, 如微波[14]、共沉淀[15]、燃烧[16]、水热[17]、溶胶-凝胶[18]等方法来制备锰氧化物的纳米粉末。2014年 Dhinesh [17]等人用水热法通过控制烧结温度制备出不同纳米尺寸的 TbMnO_3 纳米粉末, 其报道纳米粉末的结构、形态及其磁性结构均对烧结温度有一定的依赖机制。在该体系中, 随烧结温度升高纳米粉末尺寸增大且奈尔温度也伴随升高, 晶格长程有序性被破坏使其粒子表面形成氧空位。同年 Cai 等人也对 DyMnO_3 [18]的纳米粉末研究中也发现晶格参数 a、b、c 也随粉末尺寸减小而减小, 但其正交畸变却增大, 在对其磁性研究中发现源于锰离子的反铁磁相互作用随尺寸增大而减小即 Mn-O-Mn 的键角减小。且在低温区(4 K)均出现磁滞并伴随 H_c 的增大, 说明锰氧化物中源于表面铁磁性的弱铁磁性的存在, 而且这种对磁性的影响为非线性的。

这些应用在锰氧化物的纳米粉末的制备方法和纳米尺寸差异对样品的结构、磁性的影响机制同样在部分的稀土铬氧化物中也有过报道。在 DyCrO_3 [19]体系中, 分别用柠檬酸和草酸作为黏合剂制备出尺寸为 90 nm、50 nm 的纳米粉末, 纳米粉末的尺寸使其奈尔温度分别不同且为 140 K、146 K。同样 HoCrO_3

[20]体系中同样出现类似的依赖关系, 煅烧温度调控制备出单纯的 HoCrO_3 纳米粉末, 其尺寸分别为 60 nm、190 nm、320 nm、425 nm; 在低温区(5 k), 在同一外磁场下, 体系的磁化强度随尺寸减小而增大; 而对于等温磁化曲线, 尺寸大的纳米粉末具有较大的磁滞回线, 特点在于强制场合剩余磁化率与温度有很大的依赖关系, 然而对于稀土铬氧化物 YbCrO_3 体系并未有过类似报道。

在本文中, 我们通过控制烧结温度来制备不同尺寸的 YbCrO_3 纳米粉末, 并对样品的结构、磁性与纳米尺寸的依赖关系进行了系统研究, 以期待为探究纳米尺寸粉末尺寸对稀土铬氧化物的结构、磁性的影响机制提供有价值的参考。

2. 实验方法

本文采用溶胶-凝胶法在 750°C、950°C、1150°C、1350°C 烧结温度下制备了相应 4 个不同粉末尺寸粉末样品。首先根据所需样品的金属离子的化学摩尔比例及柠檬酸与金属阳离子的摩尔比为 2:1, 计算并精确称量高纯度的 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (>99.99%)、 $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (>99.0%) 及柠檬酸。混合搅拌硝酸盐溶液并将柠檬酸溶液逐滴加入混合溶液直至搅拌均匀。在 80°C 下搅拌水浴直至形成胶状、无流动性的凝胶。然后将其置于控温电热套中, 经低温燃烧充分得到呈褐色粉末前躯体。将前躯体研磨均匀并经过两次 500°C 保温 1 h 的预烧。最后把预烧后的粉末研磨均匀, 分别在 750°C、950°C、1150°C、1350°C 下保温 5 h 进行烧结, 制备出 4 个不同粉末尺寸粉末样品。使用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker 公司, D8)对样品晶体结构进行分析; 使用扫描电镜(SEM, JEOL 公司, JSM-7100F)完成样品形貌采集。使用超导量子干涉仪(SQUID-VSM, Quantum Design)对样品进行磁性分析。

3. 实验结果与分析

3.1. 结构与表征

图 1 为各 YbCrO_3 样品的 XRD 测试精修图, 样品测试数据的分析结果表明样品成相良好, 无杂相, 均为正交钙钛矿结构, 且空间群为 Pbnm 。表 1 为 Rietveld 精修的具体结果列表。由表可看出晶格参数 a 呈现减小趋势, 而 b 、 c 呈现锯齿形变化趋势, 这是因为烧结效应增强了晶胞的在不同方向上的畸变效应。

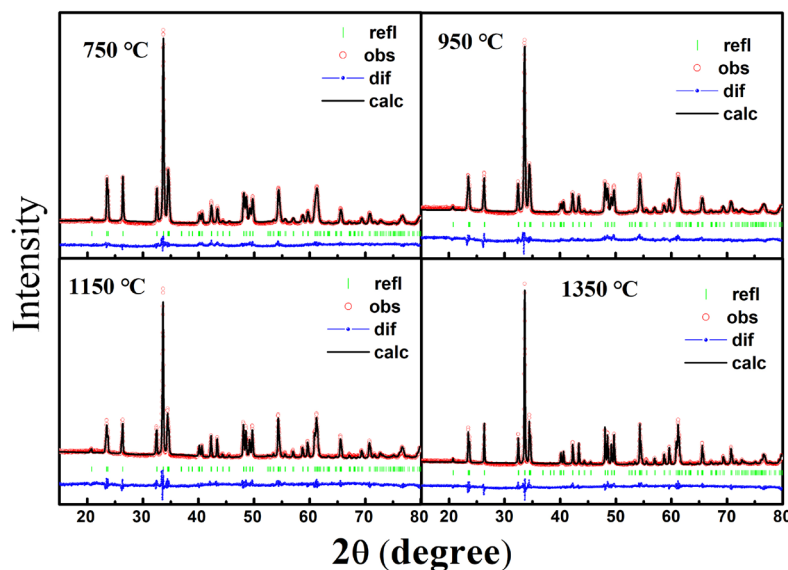


Figure 1. Rietveld refinement results of YbCrO_3

图 1. YbCrO_3 粉末样品的 XRD 结果精修图

Table 1. Rietveld refinement results of YbCrO₃
表 1. YbCrO₃ 的 XRD 精修结果列表

YbCrO ₃	750℃	950℃	1150℃	1350℃
a(Å)	5.50785(19)	5.50580(23)	5.50481(17)	5.50470(14)
b(Å)	7.49559(26)	7.49239(31)	7.49246(23)	7.49187(18)
c(Å)	5.19909(20)	5.19703(24)	5.19741(17)	5.19774(14)
V(Å ³)	214.642(13)	214.386(16)	214.365(12)	214.357(73)
$\theta(\text{Cr-O}(1)\text{-Cr})$	147.442(1)	141.734(1)	142.753(1)	141.908(1)
$\theta(\text{Cr-O}(2)\text{-Cr})$	145.160(2)	148.342(2)	146.274(1)	146.888(1)
$\overline{\theta}(\text{Cr-O-Cr})$	146.301	145.038	144.513	144.398
Length Cr-O(1)	1.98637(5)	2.02723(6)	1.99519(5)	2.03276(4)
	1.95904(5)	1.97967(6)	1.99934(5)	1.97193(4)
Length Cr-O(2)	1.96413(6)	1.94693(7)	2.00881(4)	1.95398(4)
$\overline{\text{Length Cr-O}}$	1.969847	1.98461	2.001115	1.986223
D(nm)	~120	~210	~310	~370

同时高温烧结使其结合更紧致，使晶格体积随烧结温度升高而收缩。晶胞格畸变变化的不确定性使晶胞内 Cr³⁺-O-Cr³⁺键角及 Cr-O 键长随烧结温度升高而呈现锯齿状变化，但平均键长变化量较小，几乎保存一个稳定值~1.985，且其 Cr³⁺-O-Cr³⁺键角的平均值呈现减小趋势。图 2 为粉末样品的 SEM 微观形貌(左图所示)及随机对 100 个个单个纳米粉末的尺寸统计并拟合(右图所示)，其结果表明 YbCrO₃ 纳米粉末的尺寸 D 分别为~120 nm、~210 nm、~310 nm、~370 nm，随烧结温度升高而增大。这是在奥斯瓦尔德熟化效应的作用下，随着烧结温度改变粉末的团聚程度，因而纳米粉末尺寸随烧结温度升高而增大。

3.2. 磁性结果分析

图 3 为样品的场冷却(Field-cooling, FC)下的热磁曲线。可以看出所有样品体系的热磁曲线的变化趋势基本一致，磁化强度均在 T_N 开始增大并在 T_{max} 处达到最大值 M_{max}，然后减小，在低于补偿温度(T_{comp})出现负磁化效应，磁化曲线的明显变化预示这形成带着弱铁磁矩的倾角反铁磁有序。尺寸会引起 T_N 变化，在曾报道粉末尺寸为 60~425 nm 的 HoCrO₃ [20]样品中，其 T_N 的变化量小于 1 K。在本样品的 T_N 同样略微增大，这源于两种因素的竞争所致：1) 粉末在烧结效应的作用下使晶胞体积膨胀导致 Cr-O-Cr 键角增大，增强了超交换作用，导致样品的 T_N 升高；2) 由于粉末表面的长程有序性在高温下被破坏，使相邻 CrO₆ 八面体的相关性减弱，从而削弱 CrO₆ 八面体间的 Cr³⁺-O²⁻-Cr³⁺超交换作用，即削弱了键角增大引起 T_N 升高的效应。这两种因素相互竞争，导致 YbCrO₃ 粉末样品的 T_N 略微增大。同时粉末尺寸引起的影响反映在热磁曲线上还有 T_{comp}、T_{max}、M_{max} 的变化趋势。表 2 为 YbCrO₃ 的 T_{max}、M_{max}、T_{comp} 参数列表，表中可以看到 T_{max}、M_{max}、T_{comp} 均随粉末尺寸增大而增大，这源于粉末在烧结效应的作用下使晶胞体积收缩导致 Cr-O-Cr 键角减小，削弱了超交换作用，从而增强 T_N-T_{comp} 温区的磁化强度。T_{comp}、T_{max}、M_{max} 增大的变化趋势及奈尔温度 T_N 的略微增大揭示了 Cr-O-Cr 键角对体系的磁化强度的影响机制。

为了研究粉末样品中的 Cr³⁺对 Yb³⁺作用的内场与 Cr-O-Cr 键角依赖关系，我们把场冷热磁曲线用 $M = M_{\text{Cr}} + C(H_{\text{I}} + H_{\text{meas}})/(T - \theta)$ 公式拟合，其中 M_{Cr}、C、H_I 和 θ 分别是 Cr³⁺的自旋磁矩、居里常数、内场和 Yb³⁺的外斯温度。具体结果如图 4 所示，图中拟合曲线和热磁曲线很好吻合，其具体拟合参数如表 3 所示。随着 Cr-O-Cr 键角减小，M_{Cr} 呈现增大趋势，这与 M_{max}、T_{max} 的变化趋势相符合。同时 H_I 的负值吻合了内场方向与冷场 H 方向相反；随着 Cr-O-Cr 键角减小，H_I 在 4800 Oe~6600 Oe 之间呈现的增大趋势证实了 Cr³⁺对 Yb³⁺施加的内场作用和 Cr-O-Cr 键角的关联性。

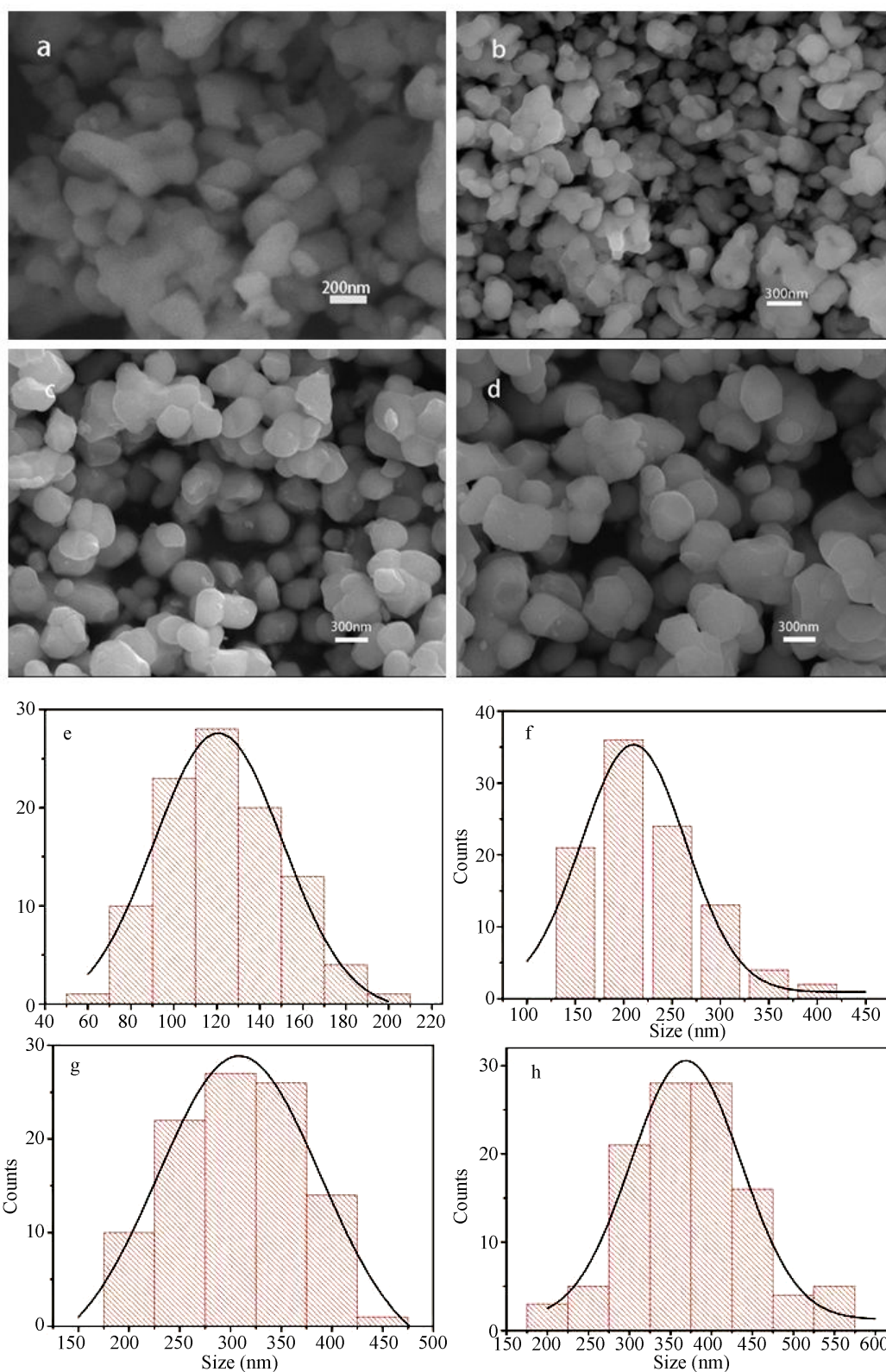


Figure 2. SEM images and corresponding statistical fitting results: 750°C (a, e), 950°C (b, f), 1150°C (c, g), 1350°C (d, h)

图 2. SEM 图像及对应的统计拟合结果：750°C (a, e), 950°C (b, f), 1150°C (c, g), 1350°C (d, h)

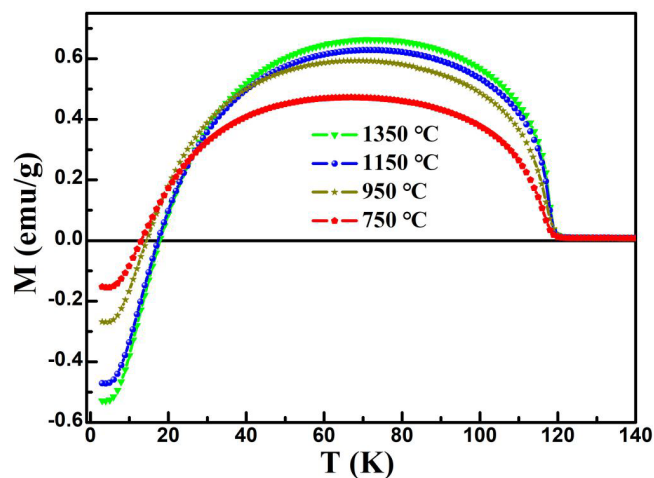


Figure 3. Temperature dependence of magnetization $M(T)$ curves of YbCrO_3 under 100 Oe

图 3. YbCrO_3 在 100 Oe 下的场冷热磁曲线

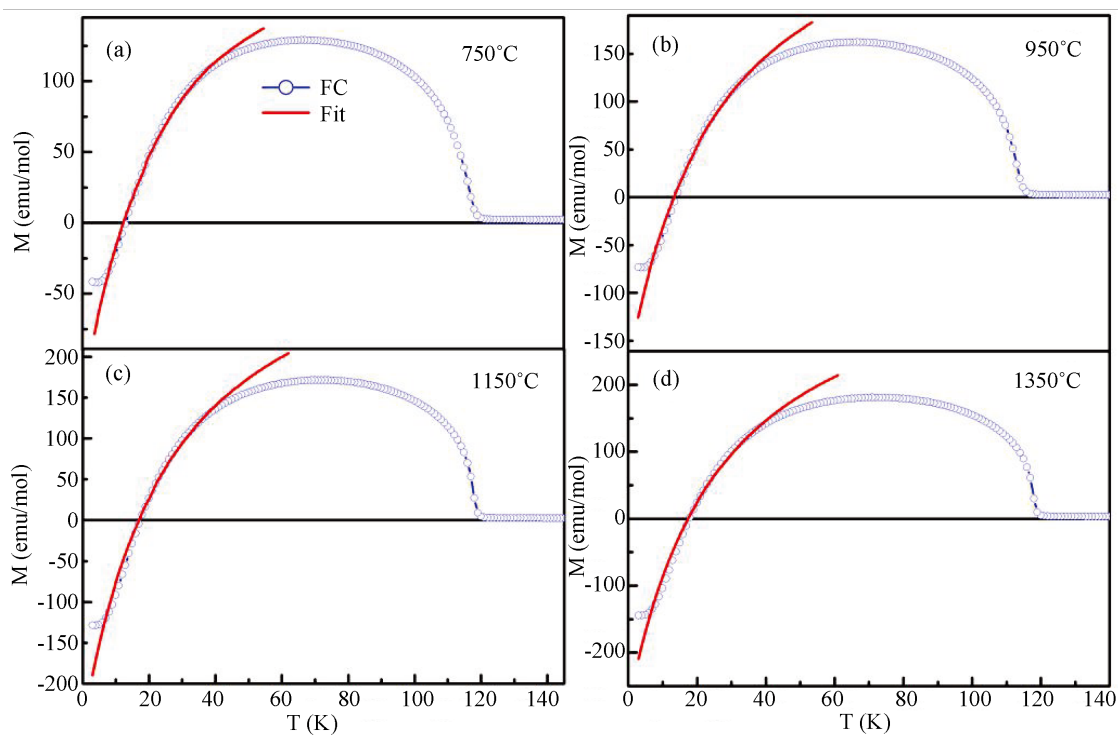


Figure 4. The fitting results of the $M(T)$ curves

图 4. YbCrO_3 场冷热磁曲线的拟合图

Table 2. System resulting data of standard experiment

表 2. YbCrO_3 的 T_{max} 、 M_{max} 、 T_{comp} 参数列表

	750 °C	950 °C	1150 °C	1350 °C
T_{comp} (K)	13.03	14.42	17.36	17.79
T_{max} (K)	66.94	68.96	70.95	72.99
M_{max} (emu/g)	0.4728	0.5934	0.6286	0.6635

Table 3. The fitting results of the $M(T)$ curves under field-cooling
表 3. YbCrO₃ 场冷模式下热磁曲线的拟合结果参数

	750 °C	950 °C	1150 °C	1350 °C
M_{Cr} (emu/mol)	245.10	313.37	360.53	390.25
H_1 (Oe)	-4862.2	-5548.0	-6235.5	-6572.6
θ (K)	-26.599	-25.78932	-25.91039	-26.504
C	1.9437	2.2237	2.5043	2.6419

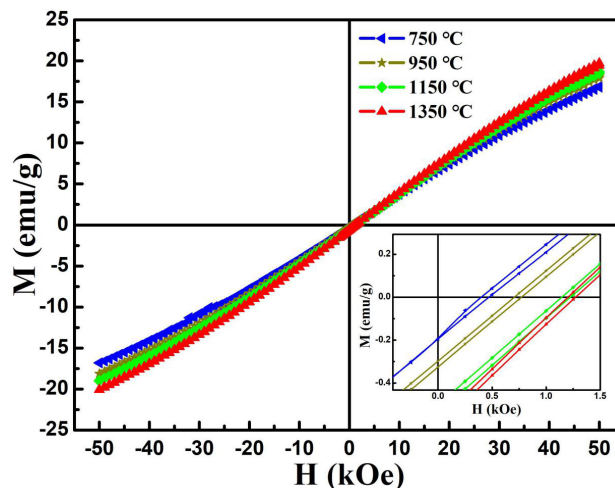


Figure 5. Magnetic hysteresis loops of YbCrO₃ at 5 K; The insets are the enlarged scale at low field

图 5. T = 5 K 时 YbCrO₃ 的磁滞回线; 插图为低场区域放大图

为进一步探究研究样品低温下的磁性与 Cr-O-Cr 键角的依赖关系, 测量了各样品在 5 K 下的等温磁化 M-H 曲线, 结果如图 5 所示。可以观察到各曲线趋势一致且均出现正向交换偏置效益, 表明此时样品中 Yb³⁺-Yb³⁺的相互作用取代 Cr³⁺-O²⁻-Cr³⁺倾角反铁磁作用并占据主导地位。同时饱和和磁化强度随烧结温度升高而增大, 这很好地与吻合 M-T 曲线拟合结果相吻合。随着键角减小, 样品的正向交换偏置场偏移量增大(如插图(b)所示), 这源于粉末样品中的 Cr³⁺对 Yb³⁺作用内场的增大, 因而 Yb 离子磁矩反转需更高外场诱导, 使正偏移量增大。插图(a)为各样品在 50 K 的磁滞回线部分放大图, 纳米粉末的长程有序性容易被破坏, 使样品在不同温度烧结下产生不同浓度的氧空位, 从而样品出现一定程度的 Cr²⁺削弱超交换作用并且出现 Cr²⁺和 Cr³⁺/Yb³⁺之间的相互作用, 这些影响着反铁磁态和倾角弱铁磁态共存温度, 其随烧结温度升高而增大。因而在 750 °C、950 °C 烧结的样品同时出现磁滞和负交换偏置效应, 且 750 °C 烧结的样品磁滞更为明显。对于 1150 °C 和 1350 °C 烧结的样品仅出现负交换偏置效应。

4. 总结

我们利用溶胶-凝胶法在不同温度下烧结制备了 YbCrO₃ 纳米粉末样品, 并研究其结构及磁性。XRD 数据及其结构精修结果表明晶胞体积随着烧结温度的升高而减小, Cr-O 键长基本不变, 而 Cr-O-Cr 键角逐渐减小。SEM 图像及粉末尺寸统计拟合结果表明粉末尺寸随着烧结温度的升高而逐渐增大。随着粉末尺寸的增大, Cr-O-Cr 键角的减小, 而 Cr-O-Cr 键角的减小引起 D-M 相互作用变化, 增强了倾斜的弱铁磁性, 进而提高了 Cr³⁺对 Yb³⁺作用的内场 H₁ 大小, 相应地, 样品最大磁矩温度 T_{max}、补偿温度 T_{com} 也随之逐渐降低。这一点从 M-T 曲线也得到验证。低温(5 K)的磁滞回线测量表明, 样品均表现为正向交换偏

置效应, 同时, 可以看到交换偏置场随样品中 Cr-O-Cr 键角的减小和 Cr-O-Cr 组分的增多而增大。这些研究有利于深入理解稀土铬氧化物磁相互作用的物理机制, 并对其物理效应进行有效调控, 有助于稀土铬氧化物在磁电子器件中应用。未来, 我们将探讨其他稀土铬氧化物体系的结构和性质, 如在 TmCrO_3 体系参杂, 期望对稀土铬氧化物磁相互作用的物理机制有更深入、更广泛的认识, 并探寻更普遍的调控手段, 将稀土铬氧化物应用于磁电子器件中。

基金项目

湖北省自然科学基金(No. 2015CFB549)。

参考文献

- [1] Bergum, K., Okamoto, H. and Fjellvag, H. (2011) Synthesis, Structure and Magnetic Properties of Nanocrystalline YMnO_3 . *Dalton Transactions*, **40**, 7583-7589. <https://doi.org/10.1039/c1dt10536a>
- [2] Zhang, N., Dong, S. and Chang, F.G. (2012) Grain Size Effect on GdFeO_3 -Type Lattice Distortion and Ferroelectric Behavior in DyMnO_3 . *Physica B*, **407**, 3736-3739. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.05.053>
- [3] Cai, X., Shi, L., Zhou, S.M., et al. (2014) Size-Dependent Structure and Magnetic Properties of DyMnO_3 Particles. *Journal of Applied Physics*, **116**, Article ID: 103903. <https://doi.org/10.1063/1.4895128>
- [4] Gupta, P., Bhargava, R. and Das, R. (2013) Static and Dynamic Magnetic Properties and Effect of Surface Chemistry on the Morphology and Crystallinity of DyCrO_3 Nanoplatelets. *RSC Advances*, **3**, 26427-26432. <https://doi.org/10.1039/c3ra43088j>
- [5] Hueso, L.E. and Rivas, J. (2014) Tuning of Colossal Magnetoresistance via Grain Size Change in $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$. *Journal of Applied Physics*, **86**, 3881.
- [6] Wu, S.P. and Lv, Y.C. (2015) A Facile and Environmentally Friendly Route to Multiferroicnanorods and Their Size-Dependent Magnetic Properties. *Journal of Materials Chemistry C*, **3**, 3121-3127. <https://doi.org/10.1039/C4TC02828G>
- [7] Ramírez, J.M.M. and Pessoni, H.V.S. (2017) Synthesis of Europium Orthochromites (EuCrO_3) Nanoparticles by a Combustion Reaction Method. *Journal of Alloys and Compounds*, **690**, 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.105>
- [8] Jaiswal, A., Das, R., Vivekanand, K., et al. (2010) Magnetic and Dielectric Properties and Raman Spectroscopy of GdCrO_3 Nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, **107**, Article ID: 013912. <https://doi.org/10.1063/1.3275926>
- [9] Ratkovski, D.R., Ramírez, J.M., Ribeiro, P.R.T., Pessoni, H.V.S., Franco Jr, A. and Machado, F.L.A. (2017) Magnetic Irreversibility and Spin Dynamics in Nanoparticles of Iron-Doped Europium Chromite. *Journal of Alloys and Compounds*, **724**, 501-506.
- [10] Silva Jr., R.S., Albino, A.J. and Barrozo, P. (2017) Magnetization Study in $\text{LaCr}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 0.95$). *Ceramics International*, **44**, 153.
- [11] Qasim, I., Blanchard, P.E.R. and Liu, S. (2014) Impact of Cu Doping on the Structure and Electronic Properties of $\text{LaCr}_{1-y}\text{Cu}_y\text{O}_3$. *Inorganic Chemistry*, **53**, 2240-2247. <https://doi.org/10.1021/ic402927y>
- [12] El Amrani, M. and Zaghrioui, M. (2014) Local Symmetry Breaking and Spin-Phonon Coupling in SmCrO_3 Orthochromite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **361**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.02.057>
- [13] Ratkovski, D.R., Marín Ramírez, J.M., et al. (2017) Magnetic Irreversibility and Spin Dynamics in Nanoparticles of Iron-doped Europium Chromite. *Journal of Alloys and Compounds*, **724**, 501-506. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.018>
- [14] Sahu, J.R., Serrao, C.R., Ray, N. and Waghmare, U.V. (2007) Rare Earth Chromites: A New Family of Multiferroics. *Journal of Materials Chemistry*, **17**, 42. <https://doi.org/10.1039/B612093H>
- [15] Prado-Gonjal, J., Schmidt, R., Romero, J.J., Avila, D. and Amador, U. (2013) Microwave-Assisted Synthesis, Microstructure, and Physical Properties of Rare Earth Chromites. *Inorganic Chemistry*, **52**, 313-320. <https://doi.org/10.1021/ic302000j>
- [16] Inagaki, M., Yamamoto, O. and Hirohara, M.J. (1990) Synthesis of LaCrO_3 from Complex Precipitation and Its Electrical Conductivity. *The Ceramic Society of Japan*, **98**, 675-678. <https://doi.org/10.2109/jcersj.98.675>
- [17] Yang, Z., Zhang, Y. and Xiong, R. (2013) Effect of Sintering in Oxygen on Electrical Conduction and Dielectric C

Properties in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Materials Research Bulletin*, **48**, 310-314.

<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.10.029>

- [18] Kumar, R.D. and Subramanian, M. (2014) Synthesis, Annealing Effect and Magnetic Behavior of TbMnO_3 Nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, **16**, Article No. 2501. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2501-4>
- [19] Tajiri, T., Terashita, N., Hamamoto, K., *et al.* (2013) Size Dependences of Crystal Structure and Magnetic Properties of DyMnO_3 Particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **345**, 288-293. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.06.055>
- [20] Yin, S., Sauyet, T., Mohindar, S., *et al.* (2017) Particle Size Dependence of the Magnetic and Magneto-Caloric Properties of HoCrO_3 . *Journal of Applied Physics*, **121**, Article ID: 063902. <https://doi.org/10.1063/1.4975405>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3512, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: cmp@hanspub.org