

花状LiFePO₄微球的湿敏性能研究与皮肤湿度监测

张一博^{1*}, 王佳慧¹, 殷艳艳^{2#}, 别利剑¹, 尹静^{3#}

¹天津理工大学材料科学与工程学院, 天津

²南开大学滨海学院环境科学与工程系, 天津

³天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津

收稿日期: 2026年2月24日; 录用日期: 2026年3月20日; 发布日期: 2026年4月3日

摘要

本工作以简单水热法合成了纳米片组装的花状LiFePO₄微球, 在材料表征的基础上, 首次探究了其湿敏性能。LiFePO₄微球的特殊形貌和较大的比表面积有利于暴露更多活性位点, 提升湿敏性能。测试结果表明, 基于LiFePO₄的湿敏传感器件具有良好的湿敏性能, 显示了三个数量级的响应值(1.5×10^3), 并具有较短的响应时间(15 s), 展示了人体皮肤湿度监测的应用潜力。本工作不仅提供了一种优异的湿敏材料, 而且扩展了LiFePO₄的应用范围。

关键词

磷酸铁锂, 湿度传感器, 皮肤湿度监测

Humidity Sensing Properties and Skin Moisture Monitoring of Flower-Like LiFePO₄ Microspheres

Yibo Zhang^{1*}, Jiahui Wang¹, Yanyan Yin^{2#}, Lijian Bie¹, Jing Yin^{3#}

¹School of Materials Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin

²Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin

³Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: February 24, 2026; accepted: March 20, 2026; published: April 3, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张一博, 王佳慧, 殷艳艳, 别利剑, 尹静. 花状 LiFePO₄ 微球的湿敏性能研究与皮肤湿度监测[J]. 纳米技术, 2026, 16(2): 26-31. DOI: 10.12677/nanotechnology.2026.162004

Abstract

In this work, flower-like LiFePO_4 microspheres were synthesized by a simple hydrothermal method. After material characterization, the humidity sensing performance of the LiFePO_4 sample was explored for the first time. LiFePO_4 microspheres featuring special morphology and a large specific surface area can provide more active sites for boosted humidity sensing. The test results show that the humidity sensor based on LiFePO_4 shows good humidity sensitivity, as high as three orders of magnitude (1.5×10^3), and short response time (15 s), demonstrating the application potential of human skin moisture monitoring. This work not only provides an excellent humidity sensing material, but also expands the application scope of LiFePO_4 .

Keywords

LiFePO_4 , Humidity Sensor, Skin Moisture Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

湿度传感器已经在智能家居、工业生产、农业种植、医疗健康等方面得到了广泛应用。在各种原理的湿度传感器当中，电阻型器件的使用最为广泛。电阻型湿度传感器的核心是敏感材料，其不同湿度环境下通过电阻大小变化来指示环境湿度数据，支撑设备自动化控制或状态监测。常见的湿敏材料有半导体、电解质、高分子及陶瓷类等，具有测量范围宽、柔韧性好、耐高温等特点，但仍然存在灵敏度低、长期稳定性差、易受气体干扰等不足[1] [2]。因此，迫切需要开发新型高性能湿敏材料。

以氯化锂(LiCl)为代表的电解质具有本征吸湿性，已经被证明是优异的湿敏材料。比如，Jiang 等制备了 LiCl 修饰的 HPPMs 复合材料，展示出高灵敏度[3]。Zhang 等构建了基于 $\text{LiCl}@\text{UiO-66-NH}_2$ 复合材料的湿度传感器，表现了优异的长期稳定性[4]。与之类比，含锂电解质磷酸铁锂(LiFePO_4)作为一种典型的无机锂盐材料，应该可以作为湿敏材料的可靠候选者，然而相关研究目前尚未见报道。此外， LiFePO_4 纳米形貌多样且不溶于水，有利于提升湿度传感器的响应值和长期稳定性。

在本工作中，运用简单的水热法制备了花状形貌的 LiFePO_4 微球。在材料表征的基础上，首次报道了 LiFePO_4 的湿敏性能，进而探索了其在人体皮肤湿度监测方面的应用潜力。

2. 实验

2.1. 试剂

本文中所用试剂均为分析纯，使用前未经过进一步纯化。其中，无水乙醇由天津市江天统一科技有限公司提供，硫酸亚铁(FeSO_4)、磷酸(H_3PO_4)、一水氢氧化锂($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$)和乙二醇(EG)均购于阿拉丁生化科技股份有限公司。

2.2. 材料合成

将 4 mmol $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、12 mmol $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 4 mmol H_3PO_4 (0.23 mL)依次加入到 20 mL EG 中，超

声分散 15 min 得到均一溶液。将所得溶液转入 45 mL 具聚四氟乙烯内衬的高压釜中, 在 180°C 下反应 10 h。过滤所得沉淀物, 用去离子水和乙醇洗涤数次, 最后放入烘箱内 80°C 干燥 12 h 得到黑色粉体样品。

2.3. 表征手段

利用 X-射线衍射(XRD, X-ray Diffraction)测定样品的结构(日本 Rigaku, D/Max2500pc), Cu K α 1 辐射($\lambda = 0.15406$ nm)。利用场发射扫描电子显微镜(FESEM, Field Emission Scanning Electron Microscope)观察样品的形貌(美国 FEI, QUANTA FEG 250), 工作电压为 5 kV。利用 N₂ 吸脱附法测定样品的比表面积(日本 MicrotracBEL, BELSORP-max), 样品在 100°C 和 10⁻⁴ Pa 条件下脱气 4 h。

2.4. 传感器组装与测试

将适量 LiFePO₄ 粉末与无水乙醇在陶瓷研钵中充分混合研磨 5 min, 并将黑色浆料均匀涂在陶瓷基板上, 组装成平面型湿度传感器。Al₂O₃ 陶瓷基板(8 mm × 4 mm × 0.5 mm)上预先沉积了 Ag-Pd 叉指电极, 电极宽度与间隙均为 0.15 mm。湿度传感测试在 CHS-1 湿度传感分析系统完成(北京 Elite), 在 1 V 交流电压, 100 Hz 测试频率下开展。采用饱和盐溶液法提供相对湿度(RH, Relative Humidity)梯度: LiCl (11%)、MgCl₂ (33%)、Mg(NO₃)₂ (54%)、NaCl (75%)、KCl (85%)与 K₂SO₄ (97%)。传感器灵敏度定义为 $S_r = Z_{11\%}/Z_{97\%}$, 其中 $Z_{11\%}$ 和 $Z_{97\%}$ 为传感器在 11% RH 和 97% RH 下的阻抗值(Z)。响应时间(τ_{res})定义为传感器从低湿度切换至高湿度环境后阻抗变化 90%所需的时长, 而恢复时间(τ_{rec})则是传感器从高湿度至低湿度环境后阻抗变化 90%所需的时长。

3. 结果与讨论

3.1. 材料表征

图 1(a)显示了 LiFePO₄ 材料的 XRD 衍射花样。所有衍射峰均能与正交橄榄石结构 LiFePO₄ (PDF#40-1499)相对应, 表明所合成的黑色粉体是 LiFePO₄ 材料。此外, 较为尖锐狭窄的衍射峰说明 LiFePO₄ 具有高结晶度与相纯度。需要说明的是, 38.47°和 44.72°处两个明显的衍射峰归属于 Al (PDF:89-2769)。这是因为在进行 XRD 测试时, 将 LiFePO₄ 放在铝制样品台上进行扫描导致的 Al 元素峰。

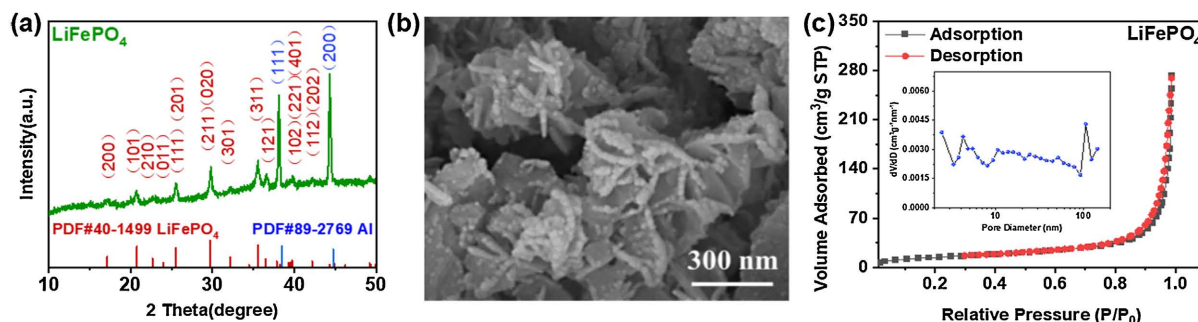


Figure 1. (a) XRD patterns of LiFePO₄, (b) SEM image of LiFePO₄, (c) Typical N₂ adsorption-desorption isotherms and pore size distribution of LiFePO₄ (inset)

图 1. (a) LiFePO₄ 的 XRD 花样, (b) LiFePO₄ 的 SEM 照片, (c) LiFePO₄ 的典型 N₂ 吸附 - 解吸等温线和孔径分布图(插图)

LiFePO₄ 材料的 SEM 照片如图 1(b)所示, LiFePO₄ 花状微球形貌是由长度约为 300 nm、厚度约为 35 nm 的纳米片组装而成。片与片之间形成了较大孔隙, 有利于提高材料的有效比表面积。采用氮气(N₂)吸附 - 脱附法对 LiFePO₄ 的多孔性能进行表征, 详细分析结果如图 1(c)所示。LiFePO₄ 的比表面积为 52.32 m²/g, 平均孔径为 32.28 nm, 明显高于 LiFePO₄ 电极材料(21.5 m²/g) [5]。更大的比表面积使 LiFePO₄ 表面

与水分子的接触位点增多,可以缩短水分子吸附与扩散时间,有利于提升湿敏材料灵敏度,加快响应速度。此外, LiFePO_4 的平均孔径处于介孔范围(2~50 nm),能兼顾水分子在 LiFePO_4 材料孔径中的吸附容量与扩散效率,使水分子快速进出孔道,有利于综合湿敏性能的提升。

3.2. 湿敏性能

在图 2(a)呈现了 LiFePO_4 湿度传感器在 11%~97% RH 相对湿度区间, $10\sim 10^5$ Hz 测试频率范围内的阻抗特性。在低于 10^2 Hz 范围,数据超出设备检测上限,因此传感器的阻抗值在低湿度环境下无法被测试系统有效采集;在高于 10^2 Hz 的频段下,水分子极化较弱,传感器阻抗值随湿度变化不明显。因此,选择 10^2 Hz 作为该传感器的最优测试频率[6]。图 2(b)展示了 LiFePO_4 湿度传感器在 11% RH 与 97% RH 湿度环境间循环切换时的动态响应-恢复曲线。测试结果表明, LiFePO_4 传感器的灵敏度高达 1.5×10^3 。同时,从低湿度向高湿度环境切换过程的响应时间仅为 15 s,传感器能够快速捕捉高-低湿度环境的变化;而从高湿度回到低湿度环境时,传感器的恢复时间为 231 s,可逐步回归至初始阻抗状态,整体展现出较为稳定的动态湿敏响应表现。相比响应时间,传感器的恢复时间较长,可能来源于 LiFePO_4 与水分子之间较强的静电作用,可以通过集成微型加热器或者气体吹扫装置加以解决。从图 2(c)中可见, LiFePO_4 传感器在吸湿-脱湿测试循环中,均能良好回归至初始基线水平,说明传感器具有好的稳定性和重复性[7]。

在低湿度(11% RH)环境下,水分子在 LiFePO_4 晶格表面的金属离子位点(Fe^{2+})和磷氧基团活性位点的协同催化下发生分解,生成质子(H^+)和羟基(OH^-) [8];在此阶段,水分子在 LiFePO_4 表面的吸附量极少,发生化学吸附,因此湿度传感器的阻抗值较高。随着环境湿度升高,在高湿度(97% RH)下,大量水分子在 LiFePO_4 表面的化学吸附层上进一步物理吸附,显著加快了质子的迁移速率,传感器阻抗随之大幅下降[9] [10],表现湿敏响应行为。因此, LiFePO_4 湿度传感器具有较高的灵敏度和较短的响应时间,能有效提高检测效率,降低设备能耗,为实现高效、稳定的湿度实时监测提供了关键支撑。

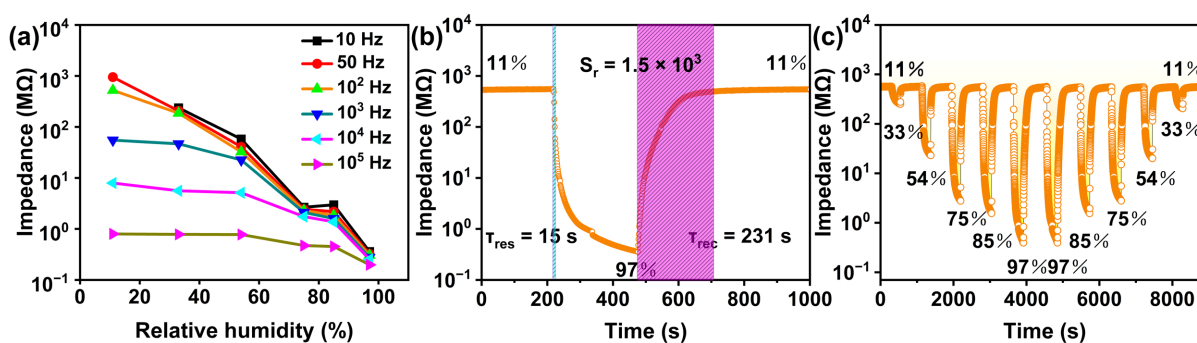


Figure 2. (a) Frequency behavior, (b) dynamic response-recovery curve, and (c) wetting-drying diagram of the LiFePO_4 humidity sensor

图 2. LiFePO_4 传感器的(a) 频率图, (b) 响应-恢复曲线和(c) 吸湿-脱湿图

此外,本研究针对人体相关湿度监测场景开展了实验探究,见图 3(a)所示的手指皮肤湿度测试示意图。由图 3(b)可见,在实验室环境中($\sim 20^\circ\text{C}$),手指接近传感器表面(垂直距离 5.0 mm),停留 5 s,阻抗值迅速下降;手指远离传感器表面,阻抗值则快速上升至基线,表现出可靠的响应-恢复行为。 LiFePO_4 传感器的阻抗呈现显著变化特征,直观反映出该传感器优异的灵敏度($S_r \approx 39.3$) [11]。由图 3(c)的放大图可以得出, LiFePO_4 传感器的响应时间为 4 s,恢复时间为 6 s,具备快速响应与恢复的优良特性,能准确监测人体相关湿度。综上所述, LiFePO_4 湿度传感器为人体相关水分蒸发监测提供了一种兼具可靠性与实用性的新型技术方案,为人体湿度监测设备的研发与优化提供了更多思路。

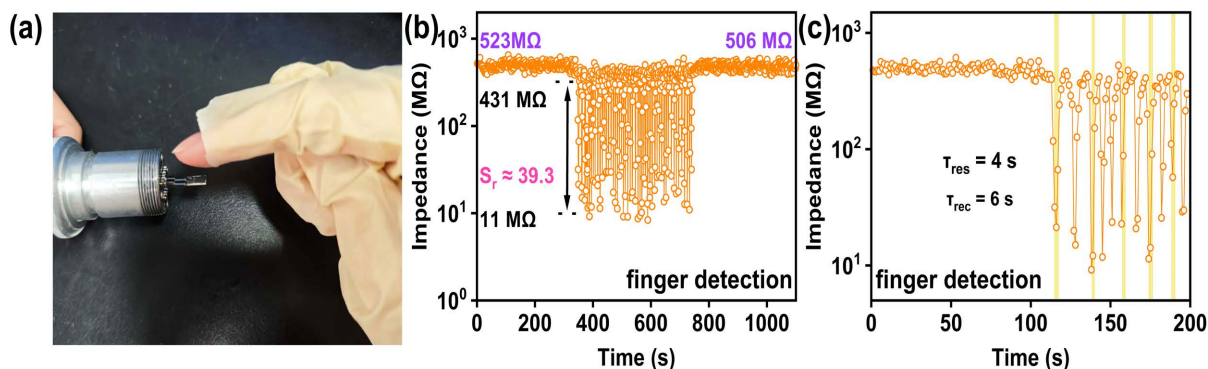


Figure 3. (a) Finger humidity monitoring diagram of LiFePO₄ sensor, (b) finger humidity monitoring diagram, and (c) enlarged response-recovery diagram.

图 3. (a) LiFePO₄ 湿度传感器用于手指湿度监测示意图, (b) 响应 - 恢复曲线和(c) 局部放大图

4. 结论

本工作通过水热法成功合成了花状 LiFePO₄ 微球。由材料表征分析可知, LiFePO₄ 材料呈现片状组装的分级结构外形, 具有较大的比表面积和孔径。LiFePO₄ 微球被首次应用于湿敏领域, 表现了优异的感湿特性, 特别是较高的灵敏度($S_r = 1.5 \times 10^3$)和较短的响应时间(15 s)。此外, 所合成的 LiFePO₄ 微球可用于手指皮肤湿度测试, 在人体生理湿度监测方面展示了巨大的应用潜力。本工作不仅提供了一种性能优异的湿敏材料, 更重要的是拓展了 LiFePO₄ 材料的应用领域。

参考文献

- [1] Duan, Z., Jiang, Y. and Tai, H. (2021) Recent Advances in Humidity Sensors for Human Body Related Humidity Detection. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 14963-14980. <https://doi.org/10.1039/d1tc04180k>
- [2] Zhang, D., Wang, M., Tang, M., Song, X., Zhang, X., Kang, Z., *et al.* (2023) Recent Progress of Diversiform Humidity Sensors Based on Versatile Nanomaterials and Their Prospective Applications. *Nano Research*, **16**, 11938-11958. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4917-y>
- [3] Jiang, K., Zhao, H., Dai, J., Kuang, D., Fei, T. and Zhang, T. (2016) Excellent Humidity Sensor Based on LiCl Loaded Hierarchically Porous Polymeric Microspheres. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 25529-25534. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b08071>
- [4] Zhang, Y., Xiong, J., Chen, C., Li, Q., Liu, J. and Zhang, Z. (2020) Regulating the Dissociation of LiCl and Transportation of Li Ions within UiO-66-NH₂ Framework for Humidity Sensing Applications with Superb Comprehensive Performances. *Journal of Alloys and Compounds*, **818**, Article ID: 152854. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152854>
- [5] Reich, R., Eiche, E. and Kolb, J. (2024) Delithiation and Lithiation of LiFePO₄: Implications for Direct Li Extraction from Synthetic Solutions and Geothermal Brines. *Desalination*, **586**, Article ID: 117883. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117883>
- [6] Ma, Y., Hu, X., Li, S., He, Y., Xia, Z. and Cai, K. (2022) A Facile and Flexible Humidity Sensor Based on Porous PDMS/AgNWs and GO for Environmental Humidity and Respiratory Detection. *Macromolecular Materials and Engineering*, **307**, Article ID: 2100686. <https://doi.org/10.1002/mame.202100686>
- [7] Wu, Z., Liu, W., Shi, J., Han, B., Li, D., Xu, X., *et al.* (2022) Renewable and Fast Response Humidity Sensors Based on Multiple Construction of Water Graftable Molecules Highly Sensitive Surface. *Surfaces and Interfaces*, **31**, Article ID: 102035. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102035>
- [8] Huo, C., Chen, H., Chen, L., Yang, S., Cui, P. and Song, J. (2024) Humidity Sensor Based on ZnO MS/GR Composite Material. *Journal of Electronic Materials*, **53**, 5238-5245. <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11259-7>
- [9] Shi, W., Yang, X., Lei, L., Lin, J., Liang, Q., Huang, X., *et al.* (2025) Human Respiration Monitoring Using Humidity and Temperature Dual-Modal Sensors for Temperature-Insensitive Humidity Sensing and Synchronous Temperature Sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*, **395**, Article ID: 117008. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.117008>
- [10] Zhang, Y., Wu, Y., Duan, Z., Liu, B., Zhao, Q., Yuan, Z., *et al.* (2022) High Performance Humidity Sensor Based on 3D Mesoporous Co₃O₄ Hollow Polyhedron for Multifunctional Applications. *Applied Surface Science*, **585**, Article ID:

152698. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152698>

- [11] Chang, Q., Wu, D., Huang, Y., Liang, C., Liu, L., Liu, H., *et al.* (2022) Ultrahigh Response Humidity Sensor Based on Lead-Free Cs₂SnCl₆ Perovskite Films. *IEEE Electron Device Letters*, **43**, 805-808. <https://doi.org/10.1109/led.2022.3157633>