高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

Ag/ZnO纳米颗粒掺杂P(VDF-TrFE)多孔复合薄膜的制备及压电性能

贾亚东，林　煌，杨宜旭，张启龙
（浙江大学材料科学与工程学院，硅及先进半导体材料全国重点实验室，杭州 310058）

摘要　以制备的银负载氧化锌纳米棒(Ag/ZnO NRs)为填料，通过非溶剂诱导相转化法(NIPS)构筑了具有均匀多孔结构的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合压电薄膜．研究发现，NIPS法能够诱导聚偏二氟乙烯-三氟乙烯[P(VDF-TrFE)]形成高含量的极性β相压电活性晶区；同时，Ag/ZnO异质结诱导极化电荷单向流动并放大微观电压．所制备的压电纳米发电机展现出优异的压电输出和力敏特性，满足将生物机械能高效转化为电能的需求．本研究为高性能自极化压电纳米发电机的发展提供了一种简单且可扩展的策略．

关键词　非溶剂诱导相转化法；压电性能；Ag/ZnO异质结；复合薄膜
中图分类号　O647　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20260157

Preparation and Piezoelectric Performance of Ag/ZnO Nanoparticle-doped P(VDF-TrFE) Porous Composite Films

JIA Yadong，LIN Huang，YANG Yixu，ZHANG Qilong*
（*State Key Lab of Silicon and Advanced Semiconductor Materials*，*School of Materials Science and Engineering*，*Zhejiang University*，*Hangzhou* 310058，*China*）

Abstract　A Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) composite piezoelectric film with a uniform porous structure was constructed *via* non-solvent induced phase separation(NIPS) with silver-loaded zinc oxide nanorods(Ag/ZnO NRs) as fillers. It was found that the NIPS method induces the formation of high-content polar β-phase piezoelectric active crystalline regions in P(VDF-TrFE). Meanwhile, the Ag/ZnO heterojunction induces unidirectional migration of polarization charges and amplifies the microscale voltage. The as-fabricated piezoelectric nanogenerator exhibits excellent piezoelectric output and force-sensitive characteristics, meeting the demand for efficient conversion of biomechanical energy into electricity. This work provides a simple and scalable strategy for the development of high-performance self-polarized piezoelectric nanogenerators.

Keywords　Non-solvent induced phase separation; Piezoelectric performance; Ag/ZnO heterojunction; Composite film

作为纳米发电机的重要分支，压电纳米发电机(Piezoelectric nanogenerator，PENG)基于压电材料的压电效应运行，可以将弯曲、压缩和振动等机械能转化为电能．与其它能量采集技术相比，PENG具有体积小、结构简单、对低频机械能敏感及运行稳定性高的特点，非常适用于健康监测、可穿戴设备、微能源采集和自供能平台等应用[1~6]．PENG的核心压电材料通常分为有机和无机两大类．有机压电材料[如聚偏二氟乙烯(PVDF)及其共聚物聚偏二氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))]具有分子链柔性好、

收稿日期：2026-04-17．网络首发日期：2026-08-16．
联系人简介：张启龙，男，博士，教授，主要从事纳米复合材料方面的研究．E-mail: mse237@zju.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(批准号：52272093)和浙江省“领雁”研发攻关计划项目(批准号：2022C01136)资助．
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52272093) and the “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang Province, China(No.2022C01136).

可溶液加工、生物相容性高及声阻抗低等突出优点[7~11]，但其压电系数(d_{33})通常仅为20～30 pC/N，导致器件输出偏低. 无机压电材料[如锆钛酸铅(PZT)、钛酸钡($BaTiO_3$)[12~17]、氧化锌(ZnO)[18,19]及铌酸钾钠(KNN)等]则具有高压电系数(d_{33}可达数百pC/N)和优异的热稳定性，但其本质脆性大、密度高、难以与柔性基底共形集成.

从上述两类材料的固有短板可以看出，单独使用任何一种材料都难以同时满足柔性可穿戴应用对高压电输出与良好力学柔韧性的双重需求. 因此，研究者逐渐将关注点转向有机-无机复合策略，即通过将高压电活性的无机填料分散于柔性聚合物基体中，协同发挥聚合物的柔韧性、可加工性与陶瓷的高压电响应，从而在保持柔性的前提下提升整体压电输出与多功能集成能力. 基于此，研究者围绕ZnO/PVDF基复合压电薄膜开展了大量工作. 如，Zhang等[20]通过旋涂法制备了不同ZnO纳米颗粒含量的柔性压电薄膜，并封装构建压力传感器，结果表明，ZnO的引入有效提高了压电输出，但其输出电压仍远低于同类型陶瓷填料体系.

为进一步增强压电响应，Kim等[21]采用电喷涂法将预先合成的ZnO纳米棒沉积于PVDF纤维表面，利用ZnO纳米棒自身的压电效应和表面粗糙度引起的摩擦电效应，获得了明显的输出提升. Li等[22]进一步设计了具有三明治结构的分级P(VDF-TrFE)/ZnO纳米棒压电纳米复合薄膜触觉传感器，该设计不仅保证了良好的生物相容性，还能实现对微弱生理信号的稳定响应. Ongun等[23]制备了不同浓度的银掺杂氧化锌纳米颗粒，以增强静电纺丝β相偏二氟乙烯纳米纤维的压电相含量. 上述研究表明，ZnO因其无毒、环保、生物相容性好及成本低廉等优势[24]成为有机-无机复合体系中有吸引力的填料选择. 同时，具有高长径比的ZnO纳米棒能够在聚合物基体中形成连续的压电网络，有利于应力传递效率和压电系数的提高，其一维几何结构也有助于诱导聚合物分子链形成全反式构象的极性β相. 然而，现有ZnO/PVDF基复合压电薄膜的压电输出仍然偏低，在输出灵敏度、弱信号采集能力和柔性集成方面尚未达到实际应用要求.

针对上述瓶颈，本文提出Ag纳米颗粒修饰ZnO纳米棒并耦合非溶剂诱导相转化多孔结构的协同增强策略. 通过在ZnO表面负载Ag构建Ag/ZnO肖特基异质结，利用界面内建电场驱动压电电荷定向分离与迁移，抑制电荷复合；同时，采用非溶剂诱导相转化法(NIPS)制备多孔结构，通过应力集中效应放大局部微观应变，并降低薄膜的弯曲刚度以实现柔韧性与压电输出的协同提升.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硝酸银($AgNO_3$)、二水合柠檬酸三钠($C_6H_5Na_3O_7\cdot 2H_2O$)和乙醇(C_2H_5OH)，分析纯，上海国药集团化学试剂有限公司；硼氢化钠($NaBH_4$，纯度≥98%)、二水合乙酸锌[$Zn(CH_3COO)_2\cdot 2H_2O$，纯度99.99%]、氢氧化钠(NaOH，纯度99.9%)和*N*,*N*-二甲基甲酰胺(DMF，分析纯)，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；聚乙二醇(PEG400)，分析纯，北京索莱宝科技有限公司；聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)[P(VDF-TrFE)，VDF与TrFE的摩尔比为7∶3，M_w=450000]，法国Piezotech公司；聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)胶带，上海笛柏生物科技有限公司.

D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)和Vertex 70型衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(ATR-FTIR)，德国Bruker公司；SU-8010型场发射扫描电子显微镜(SEM)和HT-7700型透射电子显微镜(TEM)，日本日立公司；AutoPore IV 9510型压汞仪，美国麦克默瑞提克仪器有限公司；TA Q200型差示扫描量热仪(DSC)，美国TA公司；ZJ-3A型准静态压电常数测试仪(Quasi-static d_{33} meter)，中国科学院声学研究所；SBT732型高精度压力传感器，广州市Simbatouch公司；TBS2104型数字示波器和Keithley型静电计，美国Tektronix公司；Q23HZ线性马达，苏州Controlwmy公司.

1.2 实验过程

1.2.1 Ag/ZnO NRs的制备 通过水热法制备ZnO纳米棒(NRs)：将2.75 g $Zn(CH_3COO)_2\cdot 2H_2O$溶解在87.50 mL C_2H_5OH和18.75 mL PEG400中，搅拌15 min. 随后向混合液中加入7.5 g NaOH，搅拌30 min

后将悬浮液超声处理15 min，转移至不锈钢高压反应釜并在120 ℃下加热3 h. 所得产物用去离子水反复冲洗后，在60 ℃下干燥24 h，获得ZnO NRs. 通过光还原法制备各向异性银纳米颗粒(NPs)[25]：将5.0 mL 10 mmol/L $AgNO_3$溶液、0.5 mL 450 mmol/L 二水合柠檬酸盐三钠和48.5 mL去离子水混合并剧烈搅拌，滴加5.0 mL 0.25 mmol/L $NaBH_4$溶液. 将所得均匀溶液在钠灯(飞利浦，70 W，λ=589 nm)下照射3 h后，倒入上一步中水热合成的ZnO NRs粉末. 磁力搅拌3 h，以促进银纳米颗粒在ZnO纳米棒表面的自组装，即得到Ag/ZnO NRs，在60 ℃真空烘箱中干燥24 h，备用.

1.2.2 Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的制备及PENG的封装 NIPS法制备Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜：将P(VDF-TrFE)溶解在DMF中，浓度为0.1 g/mL. 搅拌2 h后，将在复合物中不同质量分数(0，2.5%，5%，7.5%，10%)的Ag/ZnO纳米棒加入聚合物基体中，搅拌48 h使溶液混合均匀. 使用移液枪将1.5 mL溶液滴加到玻璃基板上，在80 ℃下真空干燥10 min后，将玻璃基板倒扣在装满去离子水的表面皿上并放置约12 h，得到Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜.

滴涂法制备Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜：将P(VDF-TrFE)溶解在DMF中，浓度为0.1 g/mL. 搅拌2 h后，将在复合物中不同质量分数(0，2.5%，5%，7.5%，10%)的Ag/ZnO纳米棒加入聚合物基体中，搅拌48 h使溶液混合均匀. 使用移液枪将1.5 mL溶液滴加到玻璃基板上，在80 ℃下真空干燥约12 h.

为了制备PENG，将制备得到的复合薄膜裁剪成统一规格的正方形，将薄膜两侧贴附宽度为2 cm的镍金属电极，镍金属电极两侧导出两根铜导线，最后用PET胶带包覆.

2 结果与讨论

2.1 Ag/ZnO NRs的表征

通过控制水热反应的时间，获得100~200 nm的均匀长度ZnO NRs(图S1，见本文支持信息). 通过可见光还原法在ZnO NRs表面负载Ag NPs，构建了Ag/ZnO异质结. 最终粉末呈深绿色(原始ZnO NRs为白色)表明Ag/ZnO NRs的成功合成(图S2，见本文支持信息). ZnO和Ag/ZnO NRs的XRD谱图中的衍射峰对应六方纤锌矿晶体结构[26,27]，表明这种温和的Ag负载方法对ZnO的结晶性没有明显影响[图1(A)].

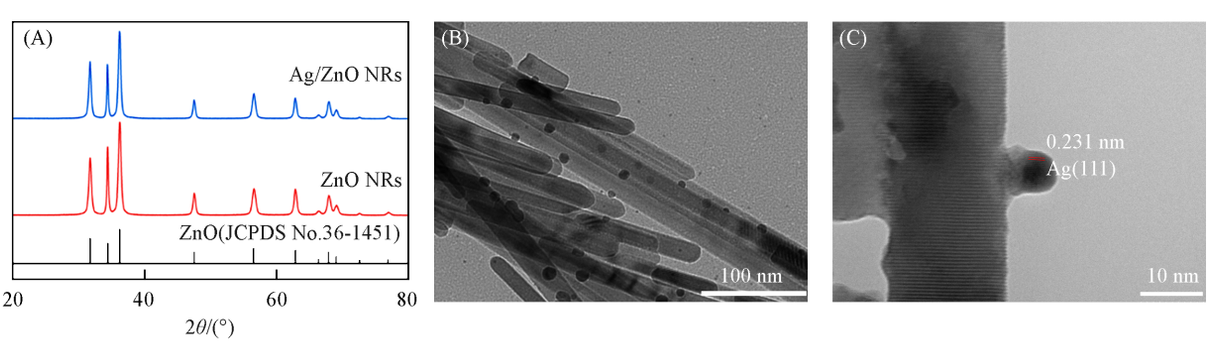


Fig. 1 XRD patterns of annealed ZnO and Ag/ZnO NRs(A), TEM image of Ag/ZnO NRs(B), HRTEM image of Ag-ZnO heterojunction(C)

图1(B)为Ag/ZnO NRs的TEM照片. 可以清楚地观察到Ag/ZnO纳米复合材料的微观形貌以及Ag NPs与ZnO NRs之间的异质界面，Ag NPs均匀地固定在ZnO NRs表面，证实了该负载方法的可行性. 如图1(C)所示，间距0.231 nm的清晰晶格条纹对应于立方Ag的(111)晶面，为异质结成功制备提供了明确的证据. Ag/ZnO NRs的TEM照片及其EDS(图S3，见本文支持信息)证实了Ag在ZnO的表面空间分布. Zn和O在整个纳米棒中均匀分布，而Ag则随机分布在纳米棒的几个局部区域，从而避免了导电通道的形成. 此外，XPS谱图中Ag_{3d}峰的结合能位移(图S4，见本文支持信息)证实了Ag与ZnO间发生了相互作用[28].

2.2 Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)柔性多孔复合薄膜的结构

图2(A)~(E)分别为Ag/ZnO NRs掺杂量为0, 2. 5%, 5%, 7. 5%, 10%的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的截面SEM照片. 可以清楚地看到薄膜内部连续、贯穿且大小均匀的孔洞. 并且随着掺杂量的提高, 可以从截面图中看到分布越来越多的Ag/ZnO NRs. 图2(F)为分别掺杂了0, 2. 5%, 5%, 7. 5%, 10% Ag/ZnO的多孔复合薄膜的孔隙率图. 随着Ag/ZnO NRs掺杂量从0增加至10. 0%, Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的间隙孔隙率呈现一个稳定的趋势, 约为47. 6%. 7. 5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜截面图的EDS能谱(图S5, 见本文支持信息)中分辨出了C, O, F, Zn和Ag元素, P(VDF-TrFE)基体的特征元素C和F均匀分布于连续的聚合物骨架中, 与多孔结构完全对应, Ag负载于ZnO NRs表面, 且Ag/ZnO NRs与P(VDF-TrFE)形成了紧密的界面结合.

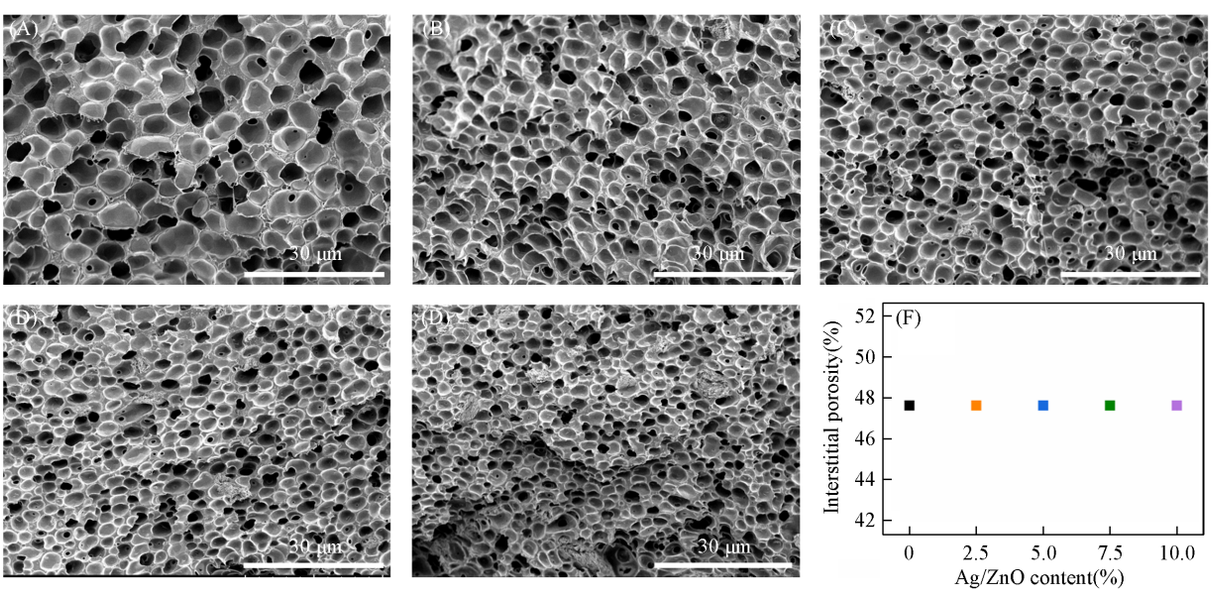


Fig. 2 SEM images with Ag/ZnO doping contents of 0(A), 2. 5%(B), 5%(C), 7. 5%(D), and 10%(E) and porosity(F) of Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) composite films

2.3 多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的表征

制备了不同填料浓度的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜并进行了系统的表征. 复合薄膜的XRD谱图证实了Ag/ZnO已掺入P(VDF-TrFE)有机聚合物基体中, 且随着掺杂量的增加, Ag/ZnO的衍射峰变得更加明显[图3(A)和(B)]. 根据复合材料的熔融吸热曲线[图3(C)]结果计算得出, 随着Ag/ZnO NRs掺杂量的提升, 复合薄膜的结晶度呈现先升后降的趋势, 多孔7. 5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合材料的结晶度最高, 达到51. 40%[图3(D)]. 在10%的掺杂量下Ag/ZnO NRs发生团聚, 有效成核位点减少, 同时团聚体阻碍聚合物分子链的规整排列, 结晶度下降. 为了确定不同复合材料中极性β相的含量, 采用ATR-FTIR光谱对不同掺杂水平的多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合材料进行了表征[图3(E)]. 图3(F)显示了复合材料的计算β相含量. 结果表明, 随着Ag/ZnO掺杂量的提高, 多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的β相含量先提高, 在Ag/ZnO掺杂量为7. 5%时, 多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合材料的β相含量最高, 为86. 8%.

压电应变常数(d_{33})是评价压电材料机电转换能力最重要的指标之一, 表征沿极化方向施加法向力时材料产生压电电荷的能力. 在有效电极面积与受力面积相同的条件下, 根据材料正压电效应, d_{33}可表达为[29]: $d_{33}=\Delta Q/\Delta F$(其中, ΔQ为产生的压电电荷变化量; ΔF为沿极化方向施加的法向力变化量). 如图4(A)所示, 随着Ag/ZnO掺杂量的增加, 采用滴涂法制备的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的d_{33}也随之增加, 在Ag/ZnO掺杂量为7. 5%时达到最大(约38. 8 pC/N), 约为纯P(VDF-TrFE)的3倍. 图4(B)示出了采用非溶剂诱导相转化法制备的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)多孔复合薄膜的d_{33}结果. 随着Ag/ZnO

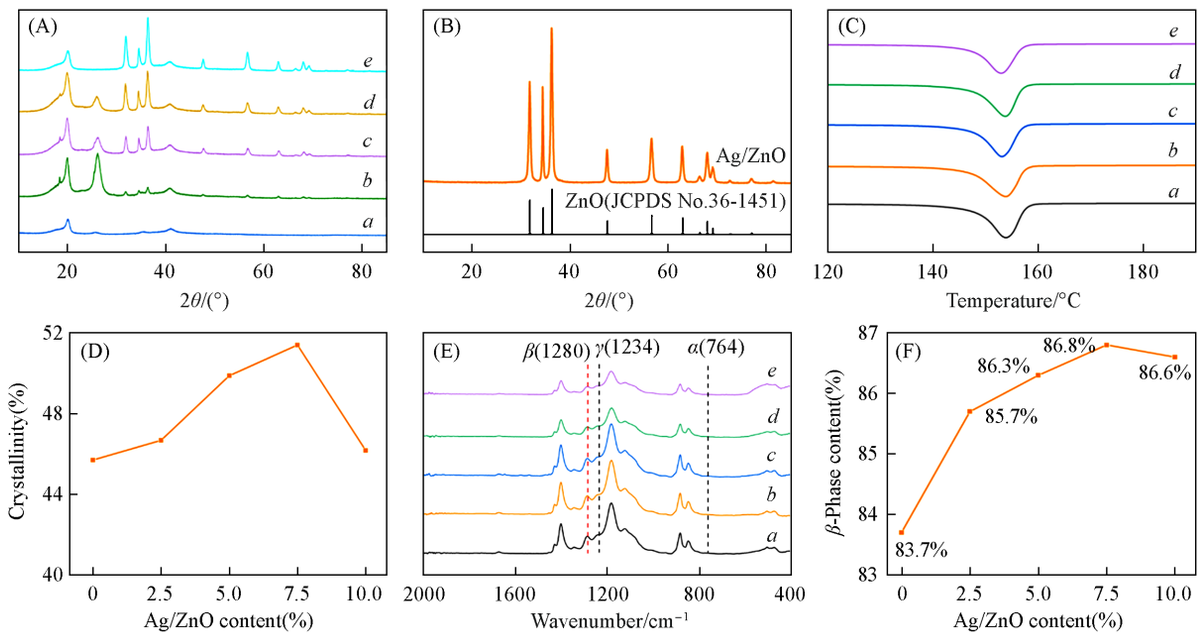


Fig. 3 XRD patterns of P(VDF-TrFE) and porous Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) composite films(A) and pristine Ag/ZnO(B), heat flow as a function of temperature(C), crystallinity(D), ATR-FTIR spectra(E), calculated polar *β*-phase content(F) of porous Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) composite films with different Ag/ZnO contents

(A, C, E) *a*. P(VDF-TrFE); *b*. 2.5% Ag/ZnO-P(VDF-TrFE); *c*. 5% Ag/ZnO-P(VDF-TrFE); *d*. 7.5% Ag/ZnO-P(VDF-TrFE); *e*. 10% Ag/ZnO-P(VDF-TrFE).

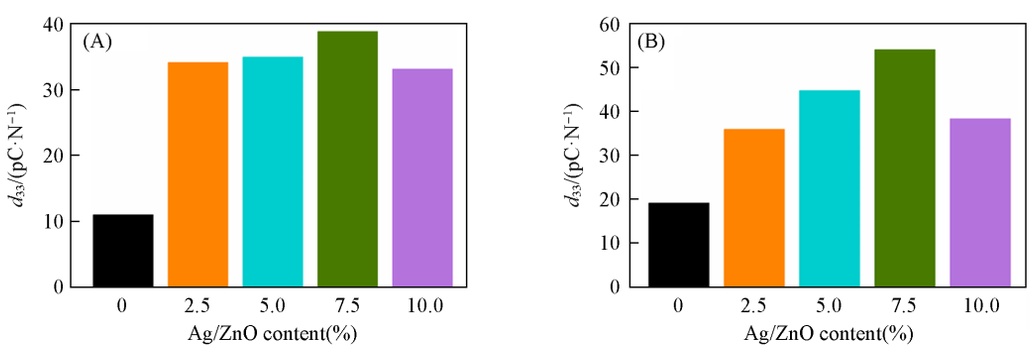


Fig. 4 d_{33} of the Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) composite films prepared by drop-coating method(A) and non-solvent induced phase separation method(B)

NRs掺杂量的提升，d_{33}呈现先上升后下降的趋势. Ag/ZnO纳米棒掺杂量为7.5%的复合薄膜表现出最大的压电系数(d_{33}≈54 pC/N)，约为传统滴涂法制备薄膜的1.4倍.

2.4 多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的压电输出和增强机理

图5(A)为不同Ag/ZnO掺杂含量的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的开路电压输出曲线. 可见，纯P(VDF-TrFE)薄膜的峰值输出电压约为7 V. 随着Ag/ZnO掺杂量的提升，复合薄膜的开路电压呈先上升后下降的趋势，在Ag/ZnO掺杂量为7.5%时达到峰值(约29 V)，较纯膜提升了约4倍. 图5(B)为7.5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜在不同频率下的开路电压输出. 可见，随着激励频率从2 Hz提升至4 Hz，峰值输出电压从约29 V逐步提升至约50 V，与以往文献相比具有一定优势(表S1，见本文支持信息). 图5(C)为不同Ag/ZnO掺杂量的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜的短路电流输出曲线. 可见，纯P(VDF-TrFE)薄膜的峰值输出电流仅约为0.3 μA；随着Ag/ZnO掺杂量的提升，复合薄膜的短路电流呈先上升后下降的趋势，在Ag/ZnO掺杂量为7.5%时达到峰值(约0.85 μA)，较纯膜提升了183%.

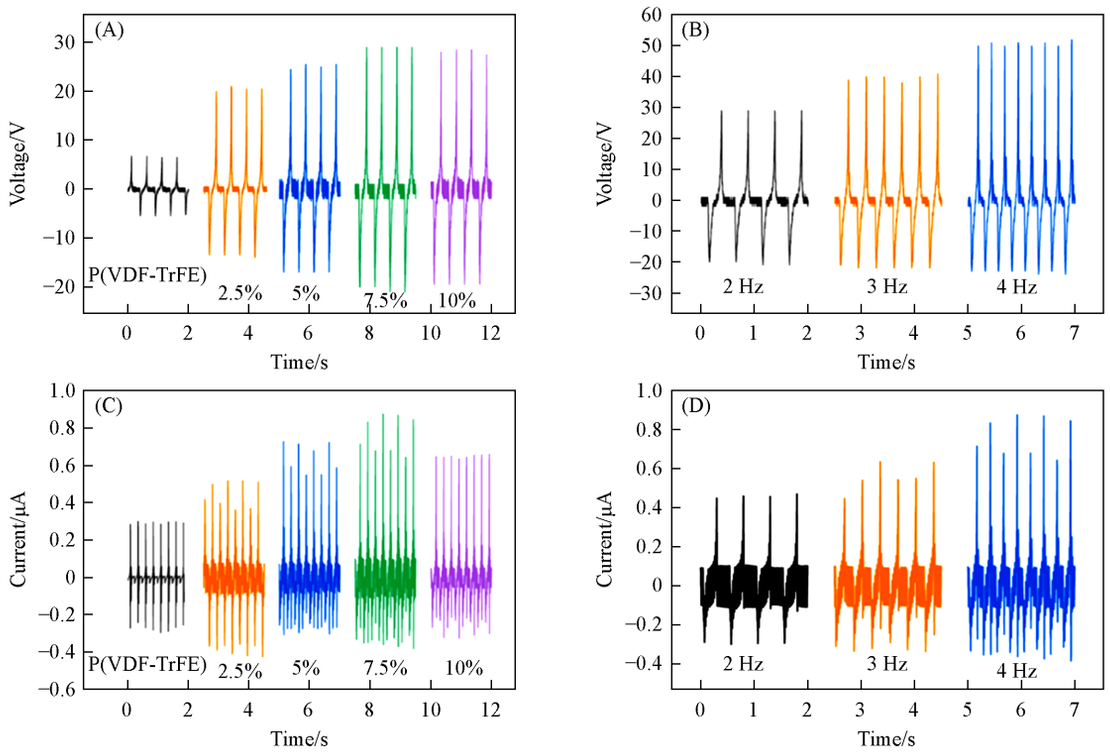


Fig. 5 Piezoelectric output voltages(A, B) and output currents(C, D) of porous Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) PENGs with various Ag/ZnO NRs nanorod contents(A, C) and the porous 7. 5%Ag/ZnO PENG at frequencies of 2—4 Hz(B, D)

图5(D)为7. 5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合薄膜在不同激励频率下的短路电流输出. 可见, 随着激励频率从2 Hz提升至4 Hz, 峰值输出电流从约0. 45 μA逐步提升至约0. 85 μA. 由图6可见, 多孔薄膜在被10 N的力锤击1000次后, PENG的电压输出仍然保持稳定. 通过与滴涂法制备的致密薄膜比较(图S6, 见本文支持信息), 在经过大角度的弯折后, 致密薄膜出现折痕, 而非溶剂诱导相转化法制备的多孔薄膜无明显折痕, 体现了多孔薄膜更好的柔性.

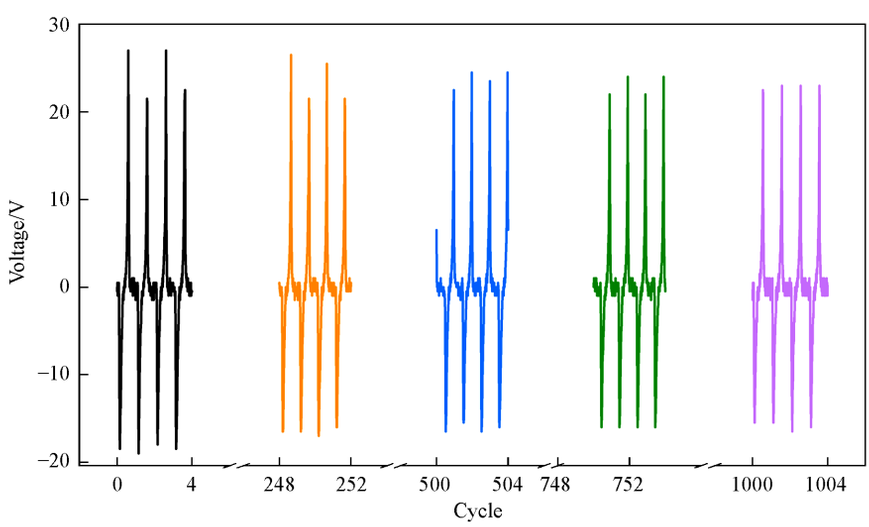


Fig. 6 Piezoelectric output of the porous 7. 5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) PENG

复合薄膜的压电输出增强性能主要归因于异质结和非溶剂诱导相转化法制备多孔的协同作用. Ag/ZnO异质界面形成了肖特基势垒(图S7, 见本文支持信息), 可控制自由载流子的流动. ZnO NR在受到机械压缩时产生微变形, 进而产生内部压电势. 假设Ag纳米粒子具有近乎零的电势(U_{Ag}≈0), 在

带正电的ZnO表面(U_{ZnO^+})处，由于$\Delta U=U_{Ag}-U_{ZnO^+}<0$，Ag/ZnO界面发生反向偏置．相比之下，在带负电的ZnO表面(U_{ZnO^-})，Ag/ZnO界面表现为正向偏置的肖特基二极管，其中$\Delta U=U_{Ag}-U_{ZnO^-}>0$，促使大量电子从ZnO NRs向Ag NPs流动．Ag纳米颗粒作为捕获位点，捕捉并储存极化电荷．大大抑制了压电诱导电荷的复合，提升空间分离效率．因此，更多分离的压电电荷可以沿外部电路方向迁移，最终显著提高PENG的开路电压和短路电流[25]．在施加压力时，ZnO NRs附近和界面区域的局部电场强度显著高于平均值．相比于滴涂法得到的致密薄膜，NIPS法制备的多孔Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)薄膜通过应力集中效应、机械阻抗匹配以及界面极化增强等多重机制，在保持甚至提升压电系数的基础上，显著改善了薄膜的柔韧性和轻量化程度．

2.5 多孔7.5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合PENG在能量收集和自供电传感的应用

为验证掺杂7.5%的Ag/ZnO的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)复合PENG在可穿戴自供电传感领域的实际应用潜力，将柔性PENG器件贴附于人体不同部位，测试了其对多种生理活动与肢体运动的实时传感响应(图S8，见本文支持信息)，Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) PENG对不同人体机械刺激的响应灵敏度存在显著差异，这主要取决于施加应力的大小和应力变化速率两个因素．根据压电本构方程，开路电压与施加应力成正比．因此，不同动作的输出差异可从其力学特征得到解释．眨眼动作传感如图7(A)所示，可产生约1 V的输出电压；发声动作传感如图7(B)所示，可产生约0.8 V的连续周期性电压信号；指尖轻触时可产生约0.8 V的间歇性脉冲信号[图7(C)]；手指滑动时可产生约为4 V的电压[图7(D)]；键盘敲击时可产生输出幅值约1 V的规则间歇电压信号[图7(E)]；转头动作可产生输出幅值约2 V的连续周期性电压信号[图7(F)]．上述分析表明，该器件在微弱、高频及瞬态机械刺激下均表现出良好的响应能力．其中，Ag/ZnO异质结提供的内建电场促进了压电电荷的定向分离与收集；而多孔结构通过应力集中效应进一步放大了局部形变，使得微弱生理信号仍可被有效检测．上述研究表明，多孔结构的PENG具有优异的高灵敏度，可将微小压力高效转换为压电信号，在可穿戴健康设备与人机交互界面等领域具有应用潜力．

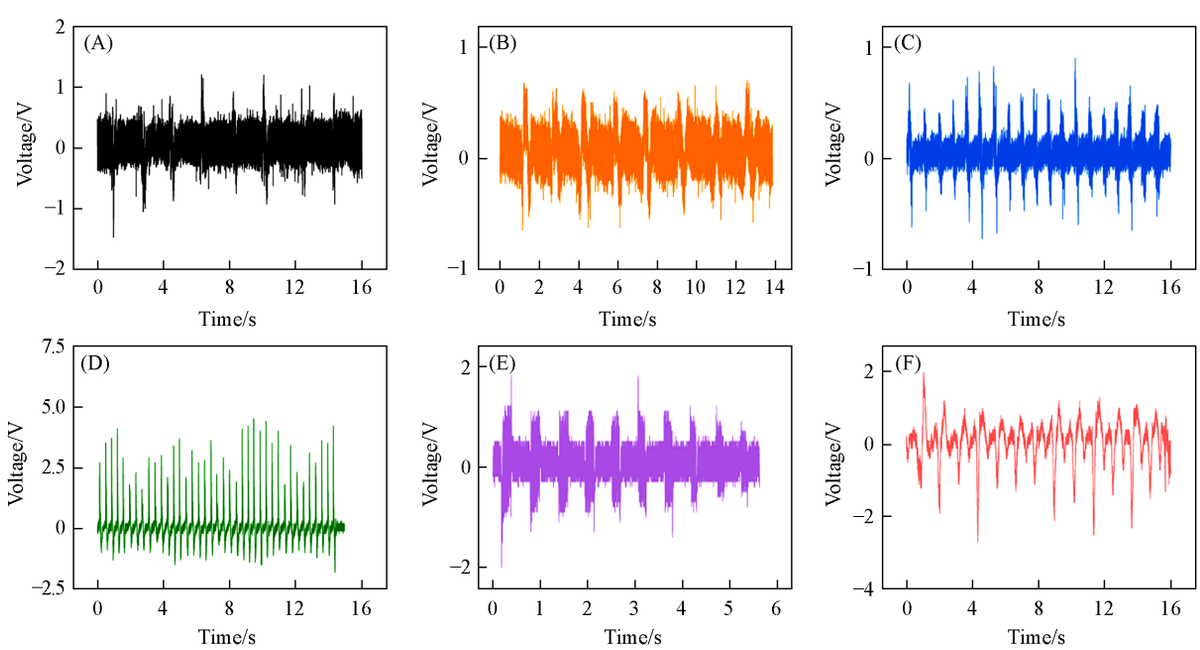


Fig. 7 Output signals of the Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)/PENG corresponding to eye blinking(A), throat vibration during phonation(B), gentle fingertip touching(C), finger sliding(D), keyboard typing(E), and head turning(F)

3 结　　论

通过水热合成法和光还原法制备了Ag纳米颗粒负载的ZnO纳米棒(Ag/ZnO NRs)，并以其为填料，

进一步采用非溶剂诱导相转化法构筑了具有均匀多孔结构的Ag/ZnO-P(VDF-TrFE)柔性压电复合薄膜，系统研究了Ag/ZnO异质结界面效应与多孔结构对复合薄膜压电输出性能的协同增强机制. Ag/ZnO肖特基异质结在界面处引入内建电场，促进了压电电荷的定向分离与单向迁移. 多孔结构通过应力集中效应放大了局部微观应变，同时降低了薄膜的弯曲刚度，使器件在保持高压电活性的前提下展现出优异的柔韧性. 7.5%Ag/ZnO-P(VDF-TrFE) PENG的压电输出(29 V，0.85 μA)显著提升，分别为致密P(VDF-TrFE)薄膜的5.8倍和2.8倍. 该多孔器件能够通过人体生理活动中产生特征电信号，将生物机械能高效转化为电能，并保持卓越的输出稳定性. 本研究为高性能自极化柔性压电纳米发电机的发展提供了一种简单且可扩展的策略.

支持信息见http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20260157.

参 考 文 献

[1] Yang M., Huang W., Chen R. S., Ma Z. L., *IEEE Sens. J.*, **2025**, *25*(1), 9—16
[2] Hu Y. H., Kang W. W., Fang Y., Xie L. R., Qiu L. Z., Jin T., *Appl. Sci.*, **2018**, *8*(5), 836
[3] Yu P., Liu W. T., Gu C. X., Cheng X. Y., Fu X., *Sensors*, **2016**, *16*(6), 819
[4] Wang J., Liu S., Zhang X. L., Hou Y., Liu Y., Li X. J., Wang H. P., *Chem. Eng. J.*, **2025**, *510*, 161818
[5] Lai Y. H., Huang Y. J., Chen L. P., Lam T. N., Ko W. C., Su C. J., Wang C. C., *Polymer*, **2025**, *332*, 128505
[6] Yan H., Liu J. H., Wu Y., Liu S. F., Jiang T. Y., *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **2025**, *36*(30), 1961
[7] Decharat A., Wagle S., Jacobsen S., Melandso F., *Sensors*, **2015**, *15*(4), 9210—9227
[8] Al-Saygh A., Ponnamma D., AlMaadeed M. A., Vijayan P. P., Karim A., Hassan M. K., *Polymers*, **2017**, *9*(2), 33
[9] Beringer L. T., Xu X., Shih W., Shih W. H., Habas R., Schauer C. L., *Sens. Actuators A: Phys.*, **2015**, *222*, 293—300
[10] Ji S. H., Yun J. S., *Nanomaterials*, **2018**, *8*(4), 206
[11] Kumar A., Sharma S., Jayasimhadri M., Puri N. K., *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **2026**, *37*(2), 98
[12] Briscoe J., Dunn S., *Nano Energy*, **2015**, *14*, 15—29
[13] Zhou B. C., Li R., Cai J., Xu J., Zhao Z. H., Pei J. Z., *Mater. Res. Express*, **2018**, *5*(9), 095510
[14] Tanvir G., Saleem M., Jabbar H., Hamza A., Hussain M. A., Khan M. Z., Baluch A. H., Irfan M., Butt M. S., Naeem F., *Mater. Sci. Eng. B*, **2023**, *287*, 116100
[15] Roscow J. I., Topolov V. Y., Bowen C. R., Taylor J., Panich A. E., *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **2016**, *17*(1), 769—776
[16] Jiang Z. J., Sun Y. H., Chen J. M., Zeng Y., *J. Adv. Ceram.*, **2024**, *13*(7), 987—1001
[17] Liu L., Li X. Y., Gang Y. F., Cui X., Fan B., Dan Y. Y., Fang J. W., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **2024**, *57*(21), 215501
[18] Hoang Q. T., Ravichandran V., Cao T. G. N., Kang J. H., Ko Y. T., Lee T. I., Shim M. S., *Chem. Eng. J.*, **2022**, *435*(3), 135039
[19] Qi J. X., Gong J. W., Zhang C. R., Peng Z. H., Cai Y. J., Liu X., Liu J. L., Chen X. J., Liang R. P., Qiu J. D., *Nat. Commun.*, **2025**, *16*(1), 1078
[20] Zhang H., Ji X., Wang Z., Tang S. Y., Wang Z. K., Zhu W. B., *Small*, **2026**, *22*(2), e09387
[21] Kim M., Fan J. T., *Adv. Fiber Mater.*, **2021**, *3*(3), 160—171
[22] Han J., Li D., Zhao C. M., Wang X. Y., Li J., Wu X. Z., *Sensors*, **2019**, *19*(4), 830
[23] Liu Y., Aziguli H., Zhang B., Xu W. H., Lu W. C., Bernholc J., Wang Q., *Nature*, **2018**, *562*(7725), 96—100
[24] Ongun M. Z., Oguzlar S., Kartal U., Yurddaskal M., Cihanbegendi O., *Solid State Sci.*, **2021**, *122*, 106772
[25] Zhou Z., Zhang Q. L., Zhang Z., Kuang H. Z., Du X. X., Yang H., *Chem. Eng. J.*, **2022**, *442*(2), 136241
[26] Meng N., Ren X. T., Santagiuliana G., Ventura L., Zhang H., Wu J. Y., Yan H. X., Reece M. J., Bilotti E., *Nat. Commun.*, **2019**, *10*, 4535
[27] Nguyen V. S., Rouxel D., Vincent B., Badie., Dos Santos F. D., Lamouroux E., Fort Y., *Appl. Surf. Sci.*, **2013**, *279*, 204—211
[28] Kumawat A., Chhichholiya S., Sharma M. D., Kumari P., Meena R. K., Fageria P., *Nanoscale Adv.*, **2026**, *8*, 1686—1711
[29] Huang Y., Rui G., Li Q., Allahyarov E., Li R., Fukuto M., Zhong G. J., Xu J. Z., Li Z. M., Taylor P. L., Zhu L., *Nat. Commun.*, **2021**, *12*, 675

(Ed.: Y, K, M)