宁波市青年科技创新奖公示内容

一、被提名人基本情况

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 提名者 | 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 | | | | |
| 姓 名 | 胡本林 | 性 别 | 男 | 联系电话 | 13028939265 |
| 证件类型 | 身份证 | 证件号码 | 511324198302207432 | | |
| 国 籍 | 中国 | 民 族 | 汉 | 政治面貌 | 群众 |
| 院 士 | 否 | | | 当选时间 |  |
| 从事专业 | 高分子材料 | 最高学历 | 研究生 | 最高学位 | 博士 |
| 技术职称 | 研究员 | | | 职 务 | 无 |
| 学科分类名称 | 1 | 光电磁功能材料 | | 代 码 |  |
| 2 | 高分子材料化学 | | 代 码 |  |
| 3 | 交叉学科 | | 代 码 |  |
| 工作单位 | 名 称 | 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 | | | |
| 通讯地址 | 宁波市镇海区中官西路1219号 | | | |
| 联 系 人 | 庞琳 | | 联系电话 | 15545156609 |
| 受高等教育情况：  1999年9月~2002年6月：四川省仪陇县复兴中学，高中生；  2002年9月~2006年6月：哈尔滨理工大学， 本科生；  2006年9月~2013年1月：中国科学院大学， 硕博连读。 | | | | | |

二、被提名人的主要科学技术成就和贡献

铁电材料是一种具有自发极化、高介电常数和压电性等特性的多功能材料，在信息存储、电驱动以及超声成像等多领域具有广泛且重要的应用。随着可穿戴可植入技术领域的快速发展，电子材料与器件面临着弹性化的挑战。然而，在可穿戴器件中有着重要应用的铁电材料的弹性化进程却较为缓慢。因此，如何实现铁电材料的弹性化，优化性能并探索其应用场景，对于铁电材料和可穿戴应用等领域的发展都有着重要意义。

近年来，申请人对铁电聚合物的弹性化及其性能优化和应用进行了探索，取得如下创新成果：**(1)** 提出了精确“微交联”赋予铁电材料良好回弹性的研究策略；**(2)** 通过弛豫性铁电体的本征弹性化实现了高介电常数弹性体的制备；**(3)** 探索了弹性铁电材料在拉伸应变下的介电储能和压电输出等器件的应用。基于以上成果，近五年来以第一/通讯作者身份发表论文20余篇(其中9篇IF＞10)，包括*Science*, *Sci. Bull*.、*J.Am. Chem. Soc.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*Adv. Mater.*( 2篇)、*Adv. Funct. Mater.*，个人总被引2300余次；主持国家自然科学基金面上项目(2024)、中科院百人计划(2020)和浙江省自然科学基金杰出青年基金(2023)等项目，承担国家重点研发计划任务(2024)；获中科院院长奖(2013)，入选中科院引才计划(2020)、浙江省钱江人才计划(2021)、宁波市领军人才(2020)，并获宁波市科学技术进步一等奖(2017)。

一、**利用精准“微交联”实现了弹性和铁电性的平衡**

主要创新点：**提出了一种铁电材料的本征弹性化方法，即采用精确的“微交联”法使铁电聚合物从线性结构转变为网络状结构，开创性地同时将大应变下的弹性回复与铁电性赋予同一材料**。

铁电聚合物PVDF是一种半结晶聚合物，其结晶区提供铁电性，非晶区具有拉伸性和塑性形变能力，是铁电材料弹性化的最佳候选对象。在过去几年里，化学交联法在导体和半导体的本征弹性化过程中取得了显著进展。但传统化学交联一般会使结晶度剧烈降低，而铁电性依赖高结晶度，导致PVDF类共聚物的铁电响应和弹性回复难以兼顾。



**图 1**. (A)弹性铁电的概念；(B)合成策略示意图；(C)不同应变下的*P*–*E*滞回曲线；(D)不同应变下的名义*Pr*和扣除面积变化后的真实*Pr*

申请人提出了“弹性铁电”的概念，设计了精确的“微交联法”在铁电聚合物中建立弹性网络结构(**图1**)。以P(VDF-TrFE)作为反应基体材料，选择带有软而长链的PEG二胺作为交联剂材料，通过低交联密度(1～2%)赋予线性铁电聚合材料弹性的同时保持较高的结晶度。在受力时，该网络状结构能够均匀地将外力分散并且更多地承受应力，避免结晶区受到破坏。实验结果显示交联后的铁电薄膜在70%应变下依旧具有稳定的铁电响应（剩余极化约4.5μC/cm2），且具有较好的耐机械和铁电翻转疲劳性，显著提高了可靠性和使用寿命，拓展了应用范围(*Science* 2023, 681, 540-544)。

针对氨基交联温度过高、弹性铁电聚合物居里温度较低等问题，申请人通过设计合成带有双吖丙啶端基的交联剂，降低了交联反应的能垒；同时合成了高VDF含量且带有双键的铁电聚合物，在提高VDF结晶性的同时维持了退火后聚合物的拉伸性能，最终在低温(150 ℃)实现了“微交联”(**图2左**)。所得弹性铁电材料在50%应变下保持了稳定的铁电响应(*J.Am.Chem. Soc.* 2024, 146, 5614−5621；*Chem. Sci.* 2025, 16, 10307–10314)。此外，通过选择具有高活性的P(VDF-CTFE-DB)并以C=C双键作为交联位点，减少交联剂用量，从而减轻其对结晶度的影响。通过过氧化物交联，成功制备出具有稳定铁电极化强度的弹性弛豫性铁电材料，在高达80%的应变下也表现出了较高的介电常数、优异的弹性、抗疲劳性和稳定的铁电响应(*Chem. Sci.* 2024, 15, 15432–15439)。



**图2**. 通过卡宾(左)和光(右)交联制备的弹性铁电体及其拉伸应变下的铁电响应

针对高温热交联与电子器件制造的CMOS工艺不兼容的问题，申请人也发展了室温下光交联制备弹性铁电体的方法。通过在PVDF共聚物主链中引入双键，利用巯基–烯点击反应，在室温下实现了弛豫铁电材料的本征弹性化(**图2右**)。交联后的铁电薄膜具有较好的力学回弹性，断裂伸长率达260%，在50%应变下经3000次循环后仍能保持80%的应变回复率，与商品化的氟橡胶P(VDF-HFP)相近。以此薄膜为介质层制备的全弹性铁电器件在70%应变下展现了稳定的铁电响应(*Angew. Chem. Int. Ed.* 2024, 63, e202400511，被选为VIP paper)。

**科学意义和影响**：首次通过精准微交联技术实现了铁电材料弹性和铁电性的高度平衡，打破了传统铁电材料中弹性与铁电性能相互制约的瓶颈。通过精确调控交联密度，不仅显著提升了材料的力学柔韧性和弹性回复能力，并且保持了稳定的铁电响应，从而拓展了铁电材料的应用范围。熊仁根院士在Science期刊上发表的评述文章认为我们的工作开启了“弹性铁电”这个新的研究方向，Science编辑Brent在当期期刊中也对本工作做了重点推介。褚君浩、刘云圻、南策文和李全等院士在*Nat. Commun.*等期刊对我们的工作做了专门评述。我们的工作被央视新闻频道、中国之声和Physics World等百余家国内外媒体报道，入选了“中科院上海分院2023年度十大科技进展”，研究团队多次受邀在浙江省和宁波市的科技新闻发布会上向社会公众汇报我们的研究。基于上述工作，我们受邀在*Science Bulletin*发表综述论文，系统阐述弹性铁电材料的研究进展。

**二、高介电常数弹性弛豫铁电体**

主要创新点：**通过三元弛豫铁电聚合物的精准“微交联”，获得了迄今为止介电常数最高的本征弹性体；利用短链交联进一步限制了分子链的活动，降低了介电损耗，为提升本征弹性体介电性能开辟了新路径。**

高介电常数弹性体具有柔软、可拉伸、响应快和可靠性高等特点，可应用于人工肌肉、驱动、传感、信息处理和能量存储等领域。弛豫性铁电体因其纳米铁电畴结构，具有更宽的铁电-顺电相转变温区，从而使其在宽温区内具有高介电常数和高压电系数，是一类综合性能良好的电介质材料。因此，相比填料复合体系带来的一系列问题，实现弛豫性铁电体的本征弹性化是获得高介电常数弹性体的有效途径。



**图3**.三元聚合物的本征交联和介电性能(左)；短链交联降低介电损耗 (右)

申请人以三元共聚物弛豫性铁电体为研究对象，以实现其高弹性、保持铁电性以及高介电常数为目标，探索了化学交联对该聚合物结构、力学性能以及电学性能的影响，制备出了兼具高弹性与高介电常数的电介质材料（**图3左**），获得了迄今为止介电常数最高(54.2@ 100 Hz、25 ℃)的本征弹性体，在高达80%拉伸应变下具有良好的弹性回复和良好的耐拉伸疲劳性能(*Adv. Mater.* 2024, 36, 2404001)。

然而，软长链交联的本征弹性体材料在交变电场下的分子链运动会导致较高的能量耗散，从而产生较高的介电损耗。这不仅会使器件产生大量热量，降低器件灵敏度，还可能导致设备失效。为了解决上述问题，申请人采用刚性短链交联剂，设计制备了一种兼具高介电常数和低介电损耗的本征弹性体材料(**图3右**)。该弹性体材料在室温下(25 ℃)仍具有高介电常数(35 @1 kHz)以及较低的介电损耗(<0.1)。和软长链交联制备的弹性体相比，该短链交联弹性体的介电损耗降低了70%，而且也具备良好的铁电性、压电性和热稳定性。基于该材料制备的弹性器件在80%的应变下仍具备稳定的铁电响应，为高性能介电弹性体材料的发展提供了新的设计思路(*Adv. Mater.* 2024, 36, 2411082)。

**科学意义和影响**：通过精准“微交联”策略以及刚性短链交联策略，我们成功实现了弛豫铁电聚合物的弹性化，显著提升了材料的介电常数并进一步降低了介电损耗，克服了传统填料复合体系导致的介电损耗增大、模量升高及界面不稳定等问题。这一创新性方法在分子层面优化了铁电聚合物的结构与性能，赋予材料在高应变条件下优异的介电性能、力学抗疲劳性和热化学稳定性，为柔性机器人、生物传感器和可穿戴电子器件等前沿领域的技术发展奠定了重要基础，具有深远的科学意义和广泛的应用前景。首尔大学的Joon Hak Oh教授认为我们将弛豫性铁电体进行微交联是同时获得高介电低损耗弹性体的有效手段。是基于我们在高介电常数弹性体方面的研究工作，国际知名期刊《Chinese Journal of Structural Chemistry》和《Chemistry - A European Journal》邀请我们发表综述(附件：论文邀请2，3)，系统介绍了我们的工作进展和未来展望。

**三 弹性铁电材料在介电储能和压电输出的应用**

主要创新点：**利用具有优异的弹性回复能力、高介电常数且力电性能对拉伸不敏感的弹性弛豫性铁电材料，制备了全弹性的介电储能器件，在高达80%的应变下仍能保持稳定的高储能密度和高效率；利用生物兼容的压电弹性体制备了压电发电器件，在200%的弹性范围内均能实现高压电输出，为先进医疗器械和可穿戴设备提供了新型的能源解决方案。**

通过过氧化物交联反应制备的弹性材料在高达80%的应变下仍能保持稳定的铁电响应，具有相对较高的介电常数(20 @ 100 Hz)和较低的杨氏模量(<10 MPa) (图4左)。与商业氟橡胶相比，其耐拉伸疲劳性能更优异，并展现出卓越的热稳定性、化学稳定性、高介电常数和应变不敏感的铁电响应。制备的弹性介电储能器件在高达80%的应变下仍能保持>8 J/cm3的能量密度和超过75%的能量存储效率(Mater. Horiz., 2024, 11, 6150–6157)。这种弹性弛豫铁电材料是弹性储能应用的理想候选者，为柔性电子领域（如软体机器人、智能服装、智能纺织品和电子皮肤）的快速能源储存和释放提供了一种新的选择。



**图4**. 可拉伸介电储能的器件示意图和器件性能(左)和弹性压电输出器件的生物兼容性和压电输出性能(右)

通过“解锁熵弹性”策略制备了可生物降解的热塑性聚酯弹性体，其降解速度、弹性回复能力和模量等参数可通过化学结构进行有效调控，其良好的生物兼容性使其可以用于可穿戴可植入设备(*Adv. Funct. Mater.* 2025, 10.1002/adfm.202515241)。此外，我们通过将水溶性压电分子HFPD掺入水性聚氨酯弹性体基质中，成功合成了生物相容性压电弹性体HFPD/WPU(图4右)。制备的弹性压电发电器件无需极化即可表现出显著的压电性能，在高达200%的大应变下也能保持其压电输出，并展现出卓越的耐疲劳性，也具有良好的生物相容性，对生物细胞无显著毒性*(Nano Lett.* 2025, 25, 9646−9653)。

**科学意义和影响**：提出了制造弹性介电储能器件和生物相容性压电器件的有效方法。基于灵敏的压电响应特性，该技术可有效捕获各种生物机械能。我们所开发的器件显示出优越的弹性和出色的生物安全性，拓展了其在生物医学中的潜在应用，为该领域的探索和创新开辟了新视野，同时为柔性电子领域（如软体机器人、智能服装、智能纺织品和电子皮肤等）提供了新型能源器件。

三、提名者：中国科学院宁波材料技术与工程研究所