

·教育与教学·

## 超支化结构提升聚酰亚胺击穿性能的项目式教学探究

张鹏图<sup>1</sup> 王棋悦<sup>1</sup> 王 贞<sup>1</sup> 王家正<sup>1</sup> 王丛丛<sup>1</sup> 李 阳<sup>2</sup> 苑世领<sup>1,3</sup> 蒋秀燕<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>山东石油化工学院 山东省绿色电氢科学与技术重点实验室 化学工程学院 东营 257061)

<sup>2</sup>东营元维电子科技有限公司 东营 257000)

<sup>3</sup>山东大学化学与化工学院 济南 250100)

**摘要:** 在国家推进新型工业化、发展先进制造业的战略背景下,山东石油化工学院作为地方应用型本科高校,以高素质应用型人才为培养目标。为精准对接东营市重点产业发展需求,强化学生理论联系实际与创新实践能力,学校应用化学专业开设“开放创新实验”课程,构建项目式教学模式,探索人才培养产教融合、科教融汇的新路径。以该课程中“超支化聚酰亚胺的制备及击穿性能表征”项目为例,该项目以“有机化学”课程中的酸胺缩合反应和“仪器分析”课程中的X射线衍射分析为核心知识内容,以“实验室制备及表征+应用性能对比+机理模拟研究”为实施路径,首先指导学生在实验室完成超支化聚酰亚胺薄膜的制备与性能表征,再带领学生深入本地生产企业开展调研,探究产业场景下测试条件对测试结果的影响规律,最后通过多物理场仿真模拟,深挖测试条件影响测试结果的内在机理,实现科研、教学与产业需求的深度衔接。该课程项目式教学法的实施,不仅有效提升了学生解决产业实际问题的能力,更为应用型高校理工科专业深化教学改革、践行产教融合与科教融汇、培养高素质应用型人才提供了可借鉴的实践范式。

**关键词:** 产教融合; 科教融汇; 项目式教学法; 超支化聚酰亚胺; 击穿性能

## Project-Based Teaching Exploration on Improving the Breakdown Performance of Polyimide *via* Hyperbranched Structures

ZHANG Peng-tu<sup>1</sup>, WANG Qi-yue<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Jia-zheng<sup>1</sup>, WANG Cong-cong<sup>1</sup>,

LI Yang<sup>2</sup>, YUAN Shi-ling<sup>1,3</sup>, JIANG Xiu-yan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Shandong Key Laboratory of Green Electricity & Hydrogen Science and Technology, School of Chemical Engineering, Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061)

<sup>2</sup>Dongying Yuanwei Electronic Technology Co., Ltd., Dongying 257000)

<sup>3</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract:** Against the strategic backdrop of the country advancing new industrialization and developing advanced manufacturing industries, Shandong University of Petroleum and Chemical Technology, as a local application-oriented university, aims to cultivate application-oriented talent as its core goal. To align with the development needs of key industries in Dongying City and to strengthen students' abilities to integrate theory with practice and engage in innovative experimentation, the applied chemistry major of the university launched the course “Open Innovation Experiments” constructed a project-based teaching model, and explored new pathways for talent cultivation through the integration of industry-education

2026-02-02 收稿, 2026-03-02 录用

基金项目: 山东省本科教学改革研究重点项目(项目号 Z2024415, Z2022316), 山东石油化工学院校级重大教学改革研究项目(项目号 ZDJG202401)

\* 通信联系人: 蒋秀燕, E-mail: xyjiang@sdipect.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.362

and science-education. Taking the project “preparation and breakdown performance characterization of hyperbranched polyimide” as an example, the project takes the acid-amine condensation reaction from the “Organic Chemistry” course and the X-ray diffraction analysis from the Instrumental Analysis course as its core knowledge components and adopts the implementation path of “laboratory preparation and characterization + application performance comparison + mechanism simulation”. First, students were guided to complete the preparation and characterization of hyperbranched polyimide films in the laboratory. Second, students were led to explore the influence of test conditions on test results in a collaborative enterprise. Finally, it digs deep into the internal mechanism of how test conditions affect test results was investigated through multiphysics simulation, realizing the in-depth connection between scientific research, teaching practice, and industrial needs. The project implementation not only effectively improves students’ ability to solve practical industrial problems but also provides a referable practical paradigm for science and engineering majors in application-oriented universities to deepen teaching reform, practice industry-education integration and science-education integration, and cultivate high-quality applied talents.

**Keywords:** Industry-education integration; Science-education integration; Project-based teaching; Hyperbranched polyimide; Breakdown performance

引用: 张鹏图, 王棋悦, 王贞, 王家正, 王丛丛, 李阳, 苑世领, 蒋秀燕. 超支化结构提升聚酰亚胺击穿性能的项目式教学探究. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.362

**Citation:** Zhang, P. T.; Wang, Q. Y.; Wang, Z.; Wang, J. Z.; Wang, C. C.; Li, Y.; Yuan, S. L.; Jiang, X. Y. Project-based teaching exploration on improving the breakdown performance of polyimide via hyperbranched structures. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.362

近年来, 国家高度重视工程科技创新与工程教育发展, 产教融合与科教融汇已经成为当前应用型本科高校打破学科壁垒、衔接产业需求并培养高素质应用型人才的核心路径<sup>[1]</sup>。2024年, 教育部强调引导高校进一步优化招生结构, 加大理工科招生比例, 引导人才聚焦国家重点领域、重点产业, 并开展协同攻关<sup>[2]</sup>。在此背景下, 应用型高校理工科专业以产教融合、科教融汇为重要手段, 充分探索教育与产业的联系、不断强化人才培养的目的性和应用性, 将极大助力人才培养质量提升, 并为区域新质生产力发展注入新动能。

产教融合是指产业界与教育界之间建立紧密联系和深度合作的一种模式。该模式通过产学研合作、产学研结合, 将教育资源与产业需求有机结合, 促进人才培养质量的提升, 同时推动科技创新与产业发展<sup>[3]</sup>。科教融汇则指科学研究与教育教学相互渗透, 将科研成果融入教学过程, 并激发学生的科研兴趣和创新意识, 达到提升教学质量、促进科技创新的目的<sup>[4]</sup>。国内针对产教融合、科教融汇的研究主要聚焦于“双师双能型”教师队伍建设<sup>[5]</sup>以及“校企合作”人才培养<sup>[6,7]</sup>模式探究两个方面, 主要手段包括通过校企导师共同承担教学任务<sup>[8]</sup>、合作开发课程<sup>[9]</sup>、共建专业等方

式, 以实现教育链、人才链、产业链和创新链的有机衔接。但当前我国产教融合、科教融汇也存在着诸如产业主导能力不足、教育供给侧单向驱动、校企合作制度落实壁垒深厚、创新资源无法有效整合、人才培养与行业产业发展时空错位、对新兴领域和未来产业缺乏有效支撑等一系列亟待解决的问题。

项目式教学是以真实项目为载体, 将知识学习、能力锻造与实践探究有机融合的教学模式, 其核心在于引导学习者在完成项目任务的全过程中主动建构知识体系、提升综合素养<sup>[10]</sup>。其核心优势在于以项目为纽带, 可以将产业需求转化为教学内容, 将企业资源转化为实践平台, 将工业标准转化为评价依据, 既解决了产教融合中“产业主导不足、资源整合不畅”的痛点, 又实现了“教学提质、产业增效、人才适配”的三方共赢, 为应用型高校理工科专业的产教融合实践提供了重要参考。本研究立足“开放创新实验”课程(专业必修课, 32个实验学时), 构建了“校企协同、研教一体”的项目式教学体系。在课程实施方面, 课程采用分组教学模式, 每组3~4名学生, 配备1名指导教师; 指导教师可结合自身研究背景及校企合作资源自主选题、设计实验, 为教学与科研、产业的衔

接奠定基础；在项目设计方面，通过联合高校科研团队与企业技术研发部门，围绕产业生产痛点、技术攻关方向及国家重点领域需求，打破了单一课程的边界，设计了兼具科学性、实践性与综合性的实验项目，实现了知识传授与产业需求的精准对接；在课程评价方面，进一步聚焦成果应用价值、工艺可行性等产业指标考核，推动形成了“教学—实践—应用”的闭环，旨在探索一条可复制、可推广的应用型人才培养路径。

## 1 项目简述

聚酰亚胺(PI)作为一类高性能聚合物材料<sup>[11]</sup>，凭借优异的耐高温、耐化学腐蚀及力学性能，在微电子封装<sup>[12]</sup>、柔性电子<sup>[13]</sup>、新能源器件<sup>[14]</sup>（如电容器、锂离子电池隔膜）等领域具有不可替代的应用价值。然而，随着5G通信、新能源汽车、柔性显示等技术的快速发展，电子器件向“小型化、高功率、高频化”方向迭代，对聚酰亚胺材料的击穿场强( $\geq 300$  kV/mm)、介电损耗( $\leq 0.01$ )及耐湿热稳定性提出更高要求。项目组成员前期调研以及与合作企业交流时发现，现阶段商用聚酰亚胺的击穿强度普遍在200~250 kV/mm左右，高端应用场景对提升聚酰亚胺薄膜的击穿强度有重大需求。例如，项目合作单位东营元维电子科技股份有限公司生产的电子封装用聚酰亚胺薄膜厚25  $\mu\text{m}$ ，耐受电压为6000 V，折合240 kV/mm。虽然增加薄膜厚度，可以提升其耐受外电压的数值，但这势必会导致所制备的聚酰亚胺薄膜的原材料成本增加，且厚度增加还会导致其应用场景受到限制。

研究表明<sup>[15-17]</sup>，通过在线型聚合物基体内引入支化结构，可以提升分子链的堆积密度，减小聚合物内部的自由体积，从而显著提升聚合物的耐击穿强度。同时，分子内部自由体积的减小，还可以抑制聚合物内部极性官能团沿外电场的取向，进而降低材料的介电损耗，使其在交变电场绝缘领域有更广阔的应用空间。在此背景下，项目指导教师带领学生通过“实验室制备及表征+应用性能对比+机理模拟研究”的方式对超支化结构影响聚酰亚胺击穿强度和介电损耗的规律进行了深入探究，成功制备了具有本征高击穿强度的超支化聚酰亚胺材料，并为企业端应用提供了充足的实验与理论支撑。

## 2 学时分配及学生评价方法

### 2.1 项目学时分配

本项目共包含32个实验学时，其具体学时分配见表1。

### 2.2 学生评价方法

本项目对学生学习效果的评价主要包含3个方面：实验表现情况、实验报告撰写情况和最终产品性能。

实验表现主要对学生在项目实施过程中的表现进行考查，包括出勤率、参与度以及是否遵守实验室相关管理规定和合作企业管理规定等，占课程成绩的20%。

本项目的实验报告主要由文献综述、实验过程记录、实验结果分析与讨论和实验思考题4个方面组成，报告满分为100分，占课程成绩的50%。

表1 本项目学时分配情况

Table 1 Project hour distribution

项目环节	具体内容	学时
项目背景讲解	对聚酰亚胺薄膜的制备过程、具体应用及市场情况进行介绍	2
项目实施过程	对高分子化学课程中的缩聚反应进行讲解，并对具有超支化结构的聚酰亚胺薄膜的制备进行重点梳理	2
	在实验室制备具有不同支化度的聚酰亚胺薄膜 (核心知识点：有机化学——酰胺缩合反应)	8
	对聚酰亚胺薄膜进行X射线衍射、介电损耗、击穿强度等性能进行表征，并指导学生自主使用相应仪器 (核心知识点：仪器分析——X射线衍射分析)	8
	对实验室制备的具有超支化结构的聚酰亚胺薄膜和工厂制备的聚酰亚胺薄膜进行介电损耗和击穿强度对比测试与分析	4
企业调研过程	带领学生赴合作企业进行调研，着重调研企业的生产流程及测试条件，并通过COMSOL模拟向学生讲解实验室和企业测试条件差异对测试结果的影响	4
项目总结	对项目进行总结与梳理，对学生在项目实施过程中的表现进行点评，并指导学生完成实验报告	4

最终产品性能主要通过将学生制备的聚酰亚胺薄膜的击穿性能与商用薄膜进行对比并给出评价,占课程成绩的30%。

### 3 项目式教学模式的创新点

相较于“双创”活动难以实现全体学生全覆盖、毕业设计课程多实施于高年级等局限,本文所述的项目式教学法,依托必修课程的系统化开设,使学生得以提前接触专业前沿知识与创新理论,能够有效助力其科学思维与工程思维的早期培育,对应用型人才培养具有重要的教学实践指导价值。

相较于传统实验课程,本文所阐述的项目式教学法的优势则更为凸显。该教学模式深度耦合产教融合与科教融汇的核心逻辑,推动教学方式从“知识传授型”向“能力培养型”转型,构建起“认知—探究—创新”三阶递进的阶梯式教学路径,实现了“教学链—科研链—产业链”的深度融合。其核心创新点主要体现在以下3个方面:

(1)项目选题精准锚定产业需求,强化理论知识与实际产业融合。传统的无机及分析化学实验和有机化学实验等课程多聚焦于单一知识点或经典反应的验证,是实验教学的基础。但随着科技进步与产业发展,其实验内容与实际生产场景存在一定程度的脱节,学生难以感知知识的实际应用价值。本项目锚定商用聚酰亚胺击穿强度不足的产业痛点,将实验目标设定为“制备高击穿强度的聚酰亚胺薄膜”。实验过程中,学生需综合运用“有机化学”课程的官能团反应知识和“仪器分析”课程的X射线衍射表征方法,在实现先修课程知识的串联基础上,让理论知识与实际产业应用更加融合。

(2)项目设计高度契合科研流程,夯实学科通用方法论体系构建。传统实验教学设计多以“复刻既定流程、验证已知结论”为核心,学生只需按教材步骤操作、记录数据即可。本项目采用变量控制法、对比实验法等学科通用研究方法,通过改变支化单体的添加量,探究支化度对聚酰亚胺结构与性能的影响。项目深度复刻“提出问题—设计方案—验证假设—揭示机理”的科研逻辑,让学生在实践中掌握科学研究的基本范式,实现从“实验操作者”向“科学探究者”的角色转变。

(3)项目产出更加注重应用价值,构建学科知

识与产业应用闭环。本项目以产业落地为导向,打破传统实验教学验证正确理论或获得标准数据的教学应用边界。在项目实施过程中,团队在线型聚酰亚胺体系内引入支化结构,有效提升了聚酰亚胺薄膜的击穿强度,为企业提供了低成本的解决方案,并通过对标企业生产测试标准,深入探究了测试方法对测试结果的影响。通过项目实施,构建了“课堂知识—实验实践—产业应用”的完整闭环,有效锻炼了学生的科学思维和工程思维,并直观感受到了基础化学知识在实际生产中的应用。

## 4 超支化聚酰亚胺薄膜的制备及表征

### 4.1 实验原理

以酸酐与胺的亲核加成—消除反应为核心,采用溶液聚合法,通过控制单一变量,在实验室制备了一系列具有不同支化度的聚酰亚胺薄膜,其实验原理如图1所示。

### 4.2 原料和试剂

均苯四甲酸酐(PMDA)、4,4'-二氨基二苯醚(ODA)、三(4-氨基苯基)胺(TAPA)、*N,N*-二甲基乙酰胺(DMAc)均为分析纯,购自上海麦克林生化科技有限公司。

### 4.3 实验过程

#### 4.3.1 前驱体聚酰胺酸(PAA)的制备

在制备支化度为0 wt%的聚酰亚胺薄膜时,首先利用溶液聚合法制备聚酰胺酸(PAA)前驱体。具体步骤如下:先用分析天平称取0.909 g ODA,加入25 mL的圆底烧瓶中,同时用量筒量取19.1 mL DMAc溶剂加入其中,放入转子后固定在磁力加热搅拌器上,在室温条件下搅拌至完全溶解(约8 min),称取1.000 g PMDA,分3次(0.400、0.400、0.200 g)加入上述溶液中,每次间隔20 min,并持续搅拌。且在最后一次加入PMDA固体后,继续搅拌12 h以获得聚酰胺酸溶液。在制备具有不同支化度的聚酰亚胺薄膜时,步骤与上述相同,并且需要在最后一次加入PMDA后,进一步加入一定量的TAPA,以形成超支化结构,具体加入量见表2。

#### 4.3.2 聚酰亚胺薄膜的亚胺化

用胶头滴管量取前述制备的聚酰胺酸溶液2.0 mL,并将其均匀涂布在载玻片上,置于烘箱

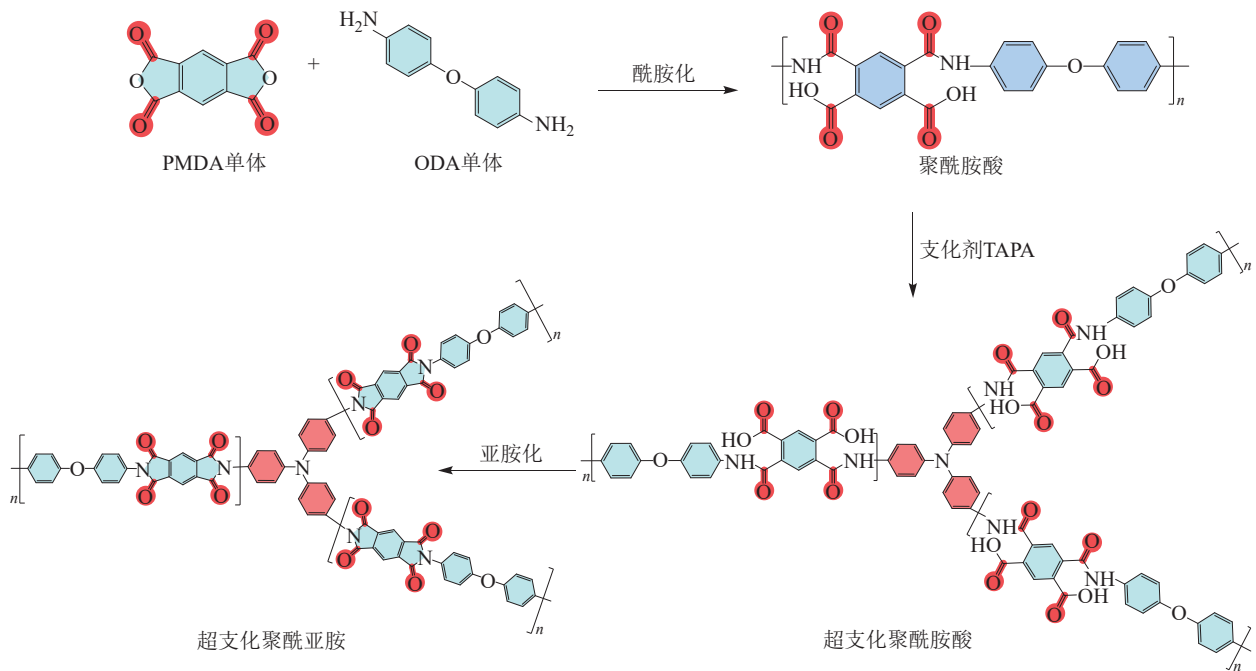


图1 超支化聚酰亚胺薄膜的制备

Figure 1 Preparation of hyperbranched polyimide films

表2 制备不同支化度的聚酰亚胺所需的各原料配比

Table 2 Material proportion for preparing polyimide films with different branching degree

支化度(wt%)	$m_{\text{PMDA}}$ (g)	$m_{\text{ODA}}$ (g)	$m_{\text{TPTA}}$ (g)	$V_{\text{DMAC}}$ (mL)
0	1.000	0.909	0	19.1
5	0.500	0.432	0.022	19.1
10	0.500	0.409	0.044	19.1
15	0.500	0.386	0.066	19.1
20	0.500	0.364	0.088	19.1

中。在真空环境下,首先于 80 °C 烘干 24 h, 然后分别于 150、200 和 250 °C 加热烘干 2、2 和 1 h 以完成亚胺化过程, 并得到聚酰亚胺薄膜。

#### 4.4 仪器与表征

聚酰亚胺薄膜的 X 射线衍射 (XRD) 分析是在德国 Burker 公司生产的 Avance D8 型 X 射线衍射仪上进行的, 测试角度范围为 15°~20°。

聚酰亚胺薄膜介电损耗的测试使用 ZTK3302 型自动电子元件分析仪进行。首先使用离子溅射仪在薄膜样品均匀溅射一层金原子, 以构筑测试电极。然后使用圆形裁刀将薄膜裁剪成直径为 1 cm 的圆形样品, 并将样品固定在电子元件分析仪上, 在 100 Hz~1 MHz 范围内进行扫描, 读取介电损耗。

测试聚酰亚胺薄膜的击穿强度, 使用南京长盛仪器有限公司生产的 CS2674AX 型高压测试

仪。测试在直流电场下进行。首先, 将样品置于绝缘硅油中并将测试探针置于样品两面, 手动进行升压操作, 设置报警电流为 10 mA, 共测试 10 个数据点, 数据处理采用 Weibull 分布进行。

#### 4.5 结果与讨论

聚合物内部的分子链并非完全无序, 而是会形成一定的规整排列区域, 即“片晶”或“微晶”结构。这些规整排列的分子链会构成平行的晶面, 当 X 射线照射到这些晶面上时会发生衍射现象, 并且可以根据衍射结果对晶体内部的晶面间距进行计算。因此, 项目组学生在指导教师的带领下, 对具有不同支化度的聚酰亚胺薄膜进行 X 射线衍射分析, 表征其分子链间距, 具体结果如图 2(a) 所示。图中展示的全部 PI 材料的 X 射线衍射图谱在  $2\theta=15^\circ\sim 25^\circ$  的范围内均呈现一条宽且平滑的衍射峰, 并且其最大衍射强度对应的  $2\theta$  角随支化度的增加呈现先增大后减小的趋势。

根据布拉格方程 (Bragg's Law)<sup>[18]</sup> (式 (1)), 可以对不同支化度的聚酰亚胺的链间距 (此处等价为晶面间距) 进行计算。

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

式中:  $n$  为衍射级数 (均取 1),  $\lambda$  为 X 射线波长,  $d$  为晶面间距,  $\theta$  为衍射角。

计算后的不同支化度的聚酰亚胺材料的链

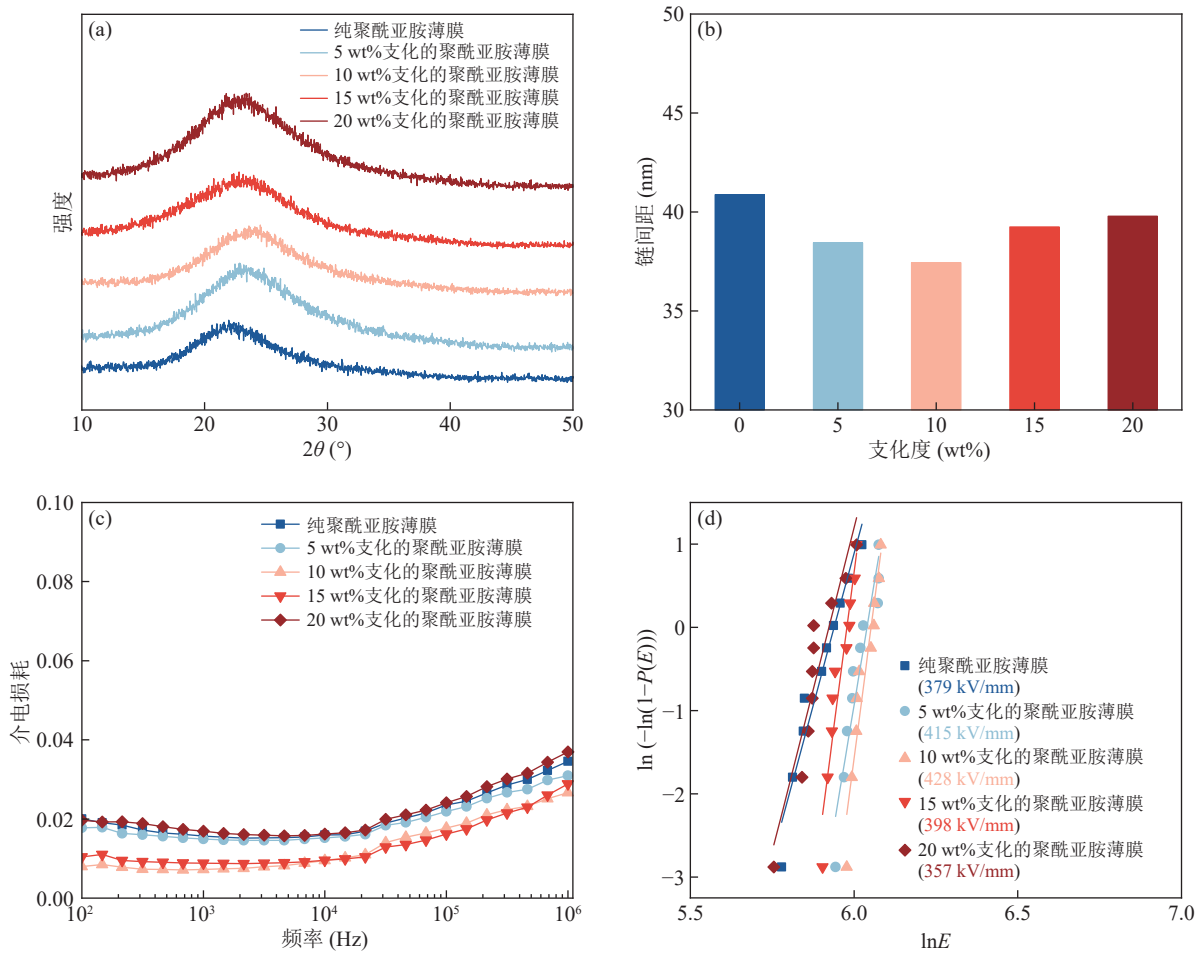


图2 实验室制备聚酰亚胺薄膜的表征:(a)不同支化度的聚酰亚胺薄膜的X射线衍射分析图;(b)根据XRD最强峰位置计算的分子链间距;(c)不同支化度聚酰亚胺薄膜的介电损耗;(d)薄膜击穿强度的Weibull分布图

Figure 2 Characterization of laboratory prepared polyimide films: (a) X-ray diffraction patterns of polyimide films with different branching degrees, (b) molecular chain spacing calculated according to the position of the strongest XRD peak, (c) dielectric loss, (d) Weibull distribution of breakdown strength of polyimide films with different branching degrees

间距如图2(b)所示。可以看出,通过支化结构的引入,聚酰亚胺材料的分子链间距呈现明显的先减小后增大的趋势。其中,10 wt%支化的聚酰亚胺分子的链间距最小,根据布拉格方程(式1)计算的结果为37.5 nm。以上结果说明,通过引入一定量的支化结构,可以有效提升聚酰亚胺分子链的堆积密度。然而,当引入过多支化结构时,由于支化单元较高的刚性,会导致聚合物分子链的堆积密度明显下降,进而导致分子链间距增大。

介电损耗是电介质在交变电场作用下,因极化弛豫或电导作用,将一部分电能转换为热能而损耗的现象。介电损耗产生的原因主要有两类,一类是电介质材料内部极性官能团的极化跟不上外加电场的转化速度而产生的弛豫损耗,另一类是电介质内部的载流子在外电场下迁移而产生的

电导损耗。介电损耗对电介质材料的使用稳定性有重要影响,当介电损耗过大时,损耗产生的热量会加速材料老化,甚至引起绝缘击穿,引发设备故障。具有不同支化度的聚酰亚胺薄膜的介电损耗如图2(c)所示。可以看出,全部待测薄膜的介电损耗均随测试频率的增加呈现先降低后升高的趋势。出现这种现象的原因是,在低测试频率下,聚酰亚胺分子内部极性官能团(主要为C=O官能团)的扭转及位移能够与外加电场切换的速率相匹配,此时,材料表现出明显的极化损耗;而在高测试频率下,极化官能团的极化无法跟上外加电场切换的速率,表现出明显的弛豫损耗。结果显示,10 wt%支化的聚酰亚胺薄膜的介电损耗与其他薄膜相比处在最低水平。结合上述X射线衍射分析和分子链间距的计算结果,支化结构可

以显著改变聚酰亚胺分子链的堆积密度并影响其介电性能。起初,在线型聚酰亚胺分子内引入一定量的支化结构,可以显著提升分子链的堆积密度,使分子内部极性基团(主要指C=O)在外加交变电场下的取向作用得到明显抑制,从而降低材料的极化损耗;同时,引入的支化结构还可以充当电子陷阱,进一步抑制聚合物的电导损耗。而当支化度进一步提升时,由于分子内部自由体积的增加,使得极性官能团在外加电场下有较大空间进行位移,导致其介电损耗明显提升。

击穿强度是指绝缘材料在被击穿前能够承受的最大电场强度,常用单位是kV/mm,是衡量绝缘膜耐电压能力的核心指标。薄膜的击穿强度越高,其在相同厚度下能够承受的电压就越高,可以适配更高电压等级的电子器件,对系统稳定性有重要作用。同时,高击穿强度的薄膜,还可以在较小厚度下满足绝缘要求,在降低成本的基础上,助力电子器件向轻薄化、小型化方向发展。图2(d)展示了不同支化度聚酰亚胺薄膜的击穿强度及其Weibull分布曲线,并给出了每种聚酰亚胺样品的特征击穿强度。聚合物电击穿的产生主要有2种机制,一种是共轭路径的形成,另外一种是在链间空穴(空隙)的迁移。从测试结果可以看出,由于支化结构的引入,聚合物分子链间距明显降低,链间空穴的迁移得到了明显的抑制,使材料的击穿强度得到明显提升<sup>[19]</sup>。其中,10 wt%支化的聚酰亚胺薄膜的特征击穿强度最高,达到428.37 kV/mm。在高支化度下,由于分子链堆积

不够致密,聚合物的链间空穴迁移明显加强,材料的击穿强度出现明显下降<sup>[20]</sup>。

## 5 实验室与企业制备薄膜的性能对比

在后续研究中,项目组成员将筛选的具有较低介电损耗和较高特征击穿强度的10 wt%支化度的聚酰亚胺薄膜与商用聚酰亚胺薄膜进行了性能对比,结果如图3(a)和3(b)所示。由图可知,无论是介电损耗还是击穿强度,本项目所制备的具有超支化结构的聚酰亚胺薄膜与商用薄膜相比均出现明显的性能优化(介电损耗降低,特征击穿强度提升)。介电损耗方面,由于超支化结构的引入,实验室制备的聚酰亚胺薄膜在1 kHz测试频率下的介电损耗(0.00724)较商用聚酰亚胺薄膜(0.01003)降低了约30%,降低效果十分明显,为薄膜在高频交变电场下的应用打下了良好的基础。击穿强度方面,实验室制备的薄膜与商用聚酰亚胺薄膜存在2个明显的区别。首先,无论是在生产企业测试条件下,还是在实验室测试条件下,商用聚酰亚胺薄膜的各测试点的击穿强度都比较均一,不同测试点的击穿强度测试数值较为接近,而实验室所制备的薄膜的各测试点的测试数据的均一性与商用聚酰亚胺薄膜存在一定差距;其次,不同薄膜样品的实验室的测试结果均优于生产企业的测试结果。测试结果显示,通过在线型聚酰亚胺体系内部引入支化结构,实验室制备的聚酰亚胺薄膜在生产企业测试条件下的击穿强度达到

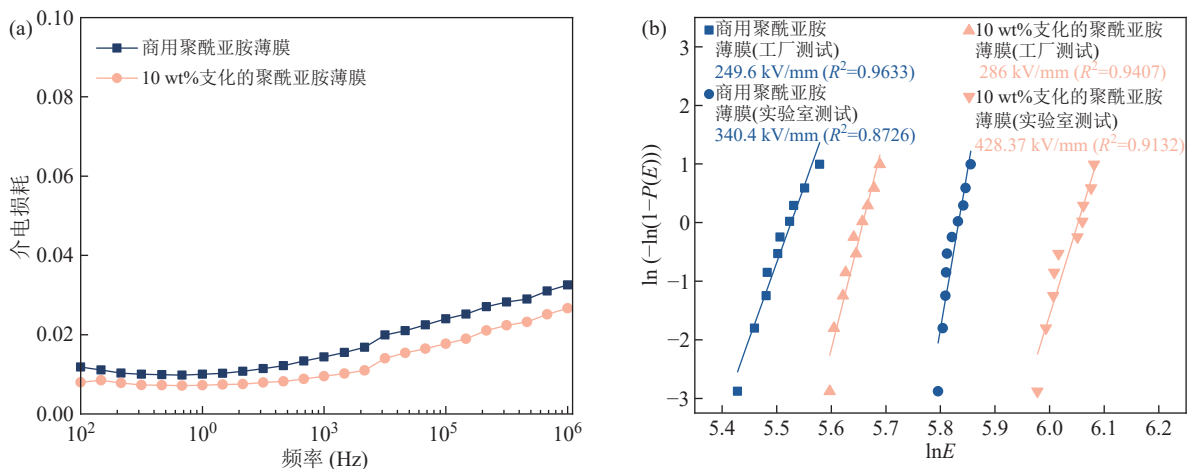


图3 商用聚酰亚胺薄膜与项目制备的10 wt%超支化聚酰亚胺薄膜的性能对比:(a)介电损耗,(b)击穿强度

Figure 3 Comparison of commercial polyimide films and 10 wt% branched polyimide films prepared in this project: (a) dielectric loss, (b) breakdown strength

286 kV/mm, 较商用聚酰亚胺薄膜(约 250 kV/mm)提升了 14.4%。由以上结果可以推断, 通过引入超支化结构, 薄膜在较小的厚度下就可以达到使用端所需的绝缘要求。由于在引入超支化结构过程中, TAPA 的添加量较少, 因此理论上该方法将为生产企业节省原料成本 10% 以上, 上述研究结果得到了合作企业的充分肯定。

### 6 电极形状对击穿强度测试的影响

为深入探究不同测试条件对聚酰亚胺薄膜击穿强度测试结果的影响, 项目组教师组织同学赴合作企业就双方测试条件展开了深入调研, 并使

用 COMSOL 软件对 2 种电极在薄膜上所形成的电场进行了模拟。图 4(a) 和 4(b) 是实验室测试和生产企业测试所使用的击穿强度测试电极的照片, 实验室测试时使用的是尖端为球形的针状电极, 而生产企业使用的是直径为 12 mm 的柱状电极。由于击穿测试的测试是在同一片薄膜上取 10 个不同测试点进行的, 生产企业所使用的电极覆盖待测薄膜的面积明显大于实验室电极, 而更大的覆盖面积必然会提升测试结果的均一性。

图 5 是使用 COMSOL 软件模拟的不同电极在待测薄膜表面形成的电场, 在模拟过程中薄膜的厚度设置为 25 μm, 外加电场强度均为 240 kV/mm

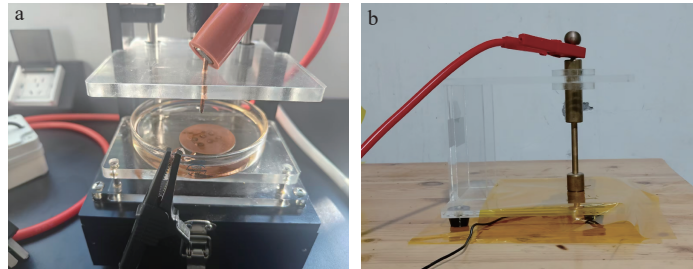


图 4 实验室和企业击穿强度测试电极对比: (a)实验室测试电极, (b)企业测试电极

Figure 4 Comparison of breakdown strength test electrode between laboratory and factory: (a) laboratory test electrode, (b) factory test electrode

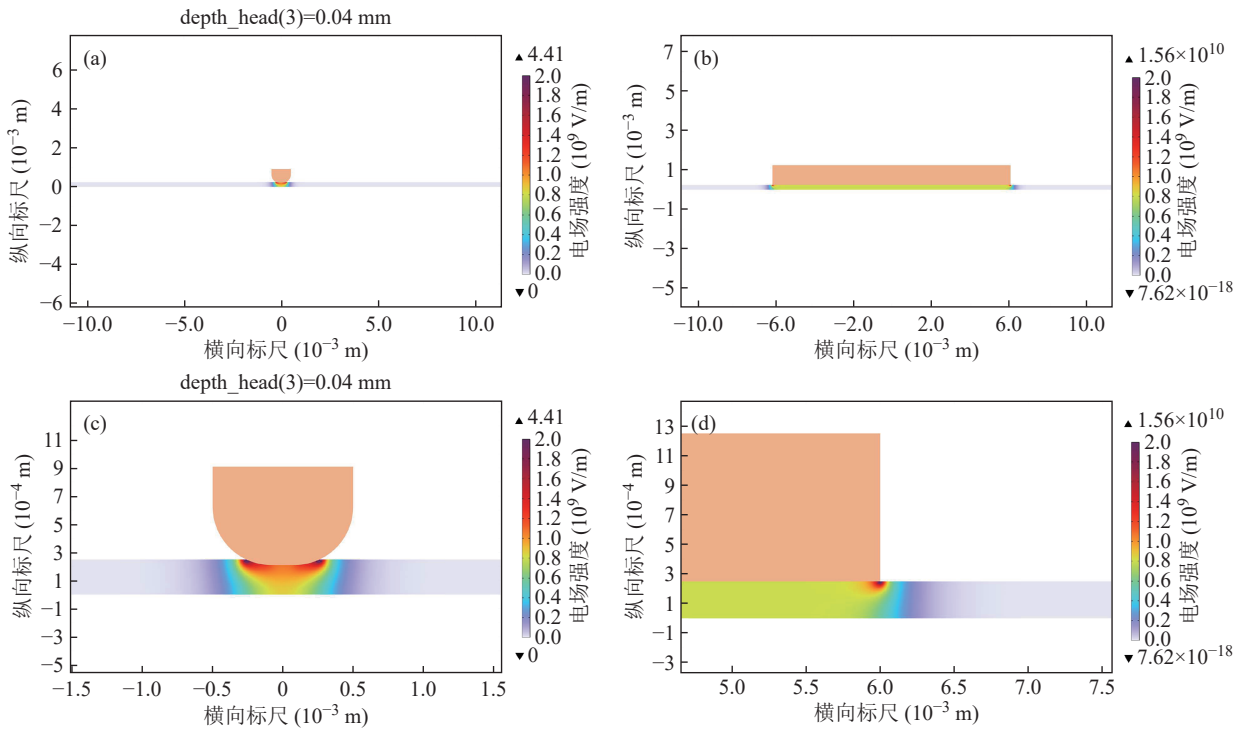


图 5 使用 COMSOL 软件模拟的相同外加电场下不同形状电极在待测薄膜表面形成的电场: (a, c)实验室测试电极, (b, d)企业测试电极

Figure 5 COMSOL simulation of electric field distribution of different test electrodes on testing films under the same external electric field: (a, c) laboratory test electrode, (b, d) factory test electrode

(接近生产企业所测试的薄膜的特征击穿强度),实验室电极设置为尖端直径为 1.0 mm 的球形,企业测试电极设置为直径为 12 mm 的圆柱形。模拟结果显示,电极的物理尺寸及形状对其在薄膜表面产生的电场强度有明显的影响。理想的平行板电器(面积无限大)的电场应该是垂直于样品表面均匀分布的,但实际测试过程中,测试电极会对待测薄膜产生一定的挤压作用,导致薄膜出现形变,进而使局部电场发生畸变。如图 5(c)和 5(d)所示,在相同的外力作用下,实验室测试电极使薄膜出现较大的形变,在相同的外加电场下(240 kV/mm),薄膜的局部场强最高值为 4410 kV/mm,而生产企业使用的圆柱状电极与薄膜的接触面积较大,引起薄膜形变的程度弱于实验室电极,导致其局部最高场强高达 15600 kV/mm,约为实验室电极的 3.5 倍。也就是说,在相同外加电场下,由于测试电极物理形状不同,待测薄膜实际承受的最大电场强度存在明显差异。以上模拟结果充分解释了实验室测得的击穿强度高于生产企业的原因。通过上述模拟分析,学生不仅更进一步地了解了相关测试的原理及影响因素,还对实际生产和实验室制备的区别有了更加深刻的认识,理论联系实际的能力得到了明显提升。

## 7 总结

以应用型人才培养为主要目标,围绕区域产业发展需求,通过“超支化结构提升聚酰亚胺击穿性能的实验与机理探究”项目的实施,对超支化作用影响聚酰亚胺介电损耗和击穿性能的规律进行了全面探究,对实验室测试与企业测试的区别与联系及其内在机理进行了深入分析。项目不仅成功制备出高击穿强度的超支化聚酰亚胺材料,为合作企业提供了降低生产成本的潜在可能方案,还极大地提升了学生理论联系实际和实际操作能力。自 2022 年“开放创新实验”课程项目式教学模式实施以来,学生将该课程项目不断优化升级为大学生创新训练计划项目,并参加各类学科竞赛,获奖数量与质量不断提升。仅 2025 年 1 年,专业学生共获批国家级大学生创新创业训练计划项目 4 项,省级大学生创新创业训练项目 5 项,校级 77 项;共获“挑战杯”“中国国际大学生创新大赛”、山东省化学实验技能大赛等高水平竞赛奖 5 项,成绩较以往有大幅提升。从应用化

学专业几年的实践经验来看,该模式不仅全面提升了学校应用型人才培养质量,更可为应用型高校理工科专业教学改革提供有效参考。

## 参考文献

- 1 郑丽娜,吴瑞林.工程创新人才跨学科培养:动因、模式和路径.中国高教研究,2025,(9),34-41.
- 2 中共中央 国务院关于实施就业优先战略促进高质量充分就业的意见.中华人民共和国国务院公报,2024,(29),9-13.
- 3 刘叶.弗朗霍夫模式:德国产教融合组织创新.高教发展与评估,2025,42(1),92-101.
- 4 卢晓中,王婧.新质生产力发展视域下科教融汇促进拔尖创新人才培养.江苏高教,2024,(8),13-24.
- 5 降雪辉.新工科高校“双师双能型”师资队伍建设的评《高校师资队伍建设的实践与研究》.中国高校科技,2021,(5),99.
- 6 赵天章,左国超.地方应用型高校“产教融合、校企合作”人才培养现状研究:以大理大学为例.大学教育,2025,(16),114-120.
- 7 卢俊,吴永平,张伟,李民君,吴晓滨,谢修伟.校企合作下应用化工技术专业订单式人才培养模式的探索.化学教育,2016,(14),58-61.
- 8 刘云霞.产教融合下高职“三三结合式”人才培养模式:以药品生产技术专业为例.化学教育,2021,42(8),69-73.
- 9 章平平,胡锦涛,周视玉,唐传球.基于知识图谱的分析化学产教融合课程体系构建与实践:水质重金属分析.化学教育(中英文),2025,46(12),7-13.
- 10 张鹏图,王丛丛,张春晓,苑世领,蒋秀燕.突出应用特色的化学类开放创新实验课程项目式教学创新模式.化学教育(中英文),2024,45(18),44-49.
- 11 Liu, X. J.; Zheng, M. S.; Chen, G.; Dang, Z. M.; Zha, J. W. High-temperature polyimide dielectric materials for energy storage: theory, design, preparation and properties. *Energy Environ. Sci.*, 2022, 15(1), 56-81.
- 12 门秀婷,李铭新.电子元器件用低介电常数聚酰亚胺研究进展.绝缘材料,2022,55(12),10-19.
- 13 卢小闯,余文涛,翁梦蔓,刘屹东,张继升,方基永,闵永刚.电子器件用低膨胀聚酰亚胺薄膜研究进展.绝缘材料,2021,54(11),11-22.
- 14 陈嘉伟,王焱,李玉湖,孙贵琦,江杉,宋鑫,张健敏.聚酰亚胺在电池隔膜与固态电解质膜中的研究进展.高分子通报,2025,38(4),546-559.
- 15 吴迪.聚酰亚胺基电介质薄膜的设计制备及其储能性能.东华大学博士学位论文,2023.
- 16 辛长征,禹亚奇,卞建新,王亚兵,许若璞,卢夺,段广宇.新型交联聚酰亚胺电介质的制备及其性能研究.化工新型材料,2025,53(4):63-68.

- 17 王俊川, 姜涛. 全有机聚酰亚胺电介质研究进展. 现代塑料加工应用, **2026**, 38(1), 61–64.
- 18 Gmernicki, K. R.; Hong, E.; Maroon, C. R.; Mahurin, S. M.; Sokolov, A. P.; Saito, T.; Long, B. K. Accessing siloxane functionalized polynorbornenes *via* vinyl-addition polymerization for CO<sub>2</sub> separation membranes. *ACS Macro Lett.* **2016**, 5(7), 879–883.
- 19 Xu, W. H.; Ma, X. R.; Su, Y. H.; Song, Y.; Shang, M. J.; Lu, X. M.; Lu, Q. H. Synthesis of highly transparent and thermally stable copolyimide with fluorine-containing dianhydride and alicyclic dianhydride. *J. Appl. Polym. Sci.* **2020**, 137(17), 48603.
- 20 Wu, Z. Q.; Peng, Y. W.; Song, Y.; Liang, H. Y.; Gong, L.; Liu, Z. G.; Zhang, Q. Y.; Chen, Y. H. Polyimide dielectrics with cross-linked structure for high-temperature film capacitors. *Mater. Today Energy*, **2023**, 32, 101243.