

# 高强高模聚酰亚胺纤维增强环氧复合材料研究进展

卓航<sup>1</sup> 陈卫娜<sup>1</sup> 李炎<sup>1</sup> 田国峰<sup>2</sup> 刘少飞<sup>3</sup>

(1 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

(2 北京化工大学, 北京 100029)

(3 江苏先诺新材料科技有限公司, 常州 213149)

**文 摘** 本文综述了当前高强高模聚酰亚胺(PI)纤维增强环氧(EP)复合材料的制备及应用研究进展,较全面地介绍了PI/EP复合材料的成型工艺性能、界面性能、力学性能及破坏机制、电性能、耐损伤性能、防弹性能等,对其应用研究方向进行了展望。

**关键词** 高强高模,聚酰亚胺纤维,环氧树脂,复合材料,成型工艺,基础性能

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.002

## Research Progress of High Strength and High Modulus Polyimide Fiber Reinforced Epoxy Composites

ZHUO Hang<sup>1</sup> CHEN Weina<sup>1</sup> LI Yan<sup>1</sup> TIAN Guofeng<sup>2</sup> LIU Shaofei<sup>3</sup>

(1 Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

(2 Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(3 Jiangsu Shino New Materials & Technology Co., Ltd., Changzhou 213149)

**Abstract** This paper reviews the current research progress on the preparation and application of high-strength and high-modulus polyimide (PI) fiber-reinforced epoxy (EP) composites. It comprehensively introduces PI/EP composites properties including the molding process properties, interface properties, mechanical properties, failure mechanisms, electrical properties, damage resistance and ballistic resistance. The application direction of PI/EP composites is proposed.

**Key words** High strength and high modulus, Polyimide fiber, Epoxy resin, Composites, Molding process, Basic performance

### 0 引言

高强高模聚酰亚胺(PI)纤维是近年来开发的一种新型高性能有机纤维,其拉伸强度大于3.0 GPa,拉伸模量超过120 GPa,同时兼具低吸湿、低介电、高绝缘、高阻燃、耐辐照、耐化学腐蚀等性能特点<sup>[1]</sup>,在航天航空、核工业、电力电子、安全防护等领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

20世纪60年代美国杜邦公司开始报道PI纤维的制备研究工作,由于受工艺水平限制未能实现产业化。直到80年代,奥地利Lenzing AG公司开发了第一款商品化PI纤维——P84,其具有优异的阻燃性能和耐高温性能,主要用于高温过滤和热防护等领

域<sup>[3]</sup>。90年代,国外科研人员也开展了高强高模PI纤维的制备研究工作,但是一直未能实现商品化。之后国外科研人员重点关注耐热型PI纤维的制备和应用研究工作。2000年后,随着合成技术和纺丝工艺的成熟进步,国内的PI纤维研究中取得了一系列突破性进展,包括北京化工大学、长春应用化学所、东华大学、四川大学等均突破了耐热型PI纤维一体化连续制备技术,实现了PI纤维产业化。一直以来国内科研单位都在积极开展高强高模PI纤维的制备研究工作,但是大多数仍处于实验室制备阶段,未能实现规模化制备。近年来江苏先诺新材料科技有限公司(以下简称“江苏先诺”)与北京化工大学通过技

收稿日期:2022-06-30

基金项目:国防基础科研计划资助(JCKY2020110B002)

第一作者简介:卓航,1993年出生,硕士,研究方向为航天非金属材料及复合材料选用分析与管理。E-mail:zhuohang93@163.com

通信作者:田国峰,1984年出生,研究员。E-mail:tiangf@mail.buct.edu.cn

术合作率先开发出系列化高强高模PI纤维产品<sup>[4]</sup>,注册商标为Shinofil®,具体技术指标见表1。

表1 商品化PI纤维性能  
Tab. 1 Properties of commercial PI fiber

序号	牌号	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂伸长率 /%	密度 /g·cm <sup>-3</sup>
1 <sup>#</sup>	S25M	2.4~2.9	≥130	≥1.5	1.44
2 <sup>#</sup>	S30	2.9~3.4	100~130	≥2.5	1.44
3 <sup>#</sup>	S30M	2.9~3.4	≥130	≥1.5	1.44
4 <sup>#</sup>	S35	3.4~3.9	100~130	≥2.5	1.44

PI树脂、PI短切纤维、PI浆粕等一直是PI复合材料应用研究的主要对象。PI树脂是目前工程应用较为成熟且耐热等级最高的热固性树脂基体,PI短切纤维和PI浆粕在复合材料体系中的含量较低且呈各向异性,无法充分发挥纤维轴向优异的力学性能。高强高模PI纤维作为一种综合性能优异的新型连续增强材料,在一定程度上能够满足航天航空、核工业、国防军工等关键领域先进功能材料、结构功能一体化材料的性能需求。本文综述了当前高强高模PI纤维增强环氧(EP)复合材料的制备及应用研究进展,较全面地介绍了PI/EP复合材料的成型工艺性能、界面性能、力学性能及破坏机制、电性能、耐损伤性能、防弹性能等,对PI/EP复合材料的应用研究方向进行了展望。

### 1 PI纤维结构与力学性能

PI分子主链一般含有苯环、酰亚胺环和含氮五元杂环结构,独特的化学结构不仅增大了PI主链分子刚性,还极大提高了分子间作用力和取向度,从而赋予了PI纤维优异的力学性能和功能性<sup>[1,4]</sup>。为了更好地提高分子间作用力,研究人员在PI主链上引入咪唑、噻啉、喹啉、噁唑等刚性基团及功能性侧基<sup>[5-7]</sup>,制备了一系列高强高模共聚PI纤维,其拉伸强度大于4.0 GPa,拉伸模量达到130 GPa<sup>[8]</sup>。通过调控纺丝工艺如牵伸比、亚胺化条件及凝固浴条件等还可以进一步优化提升PI纤维的力学性能<sup>[9-10]</sup>。PI材料化学结构多变、结构/性能可设计性强等特点为PI纤维的性能提升和功能实现提供了有利条件。

### 2 PI纤维耐环境性能

表2对比了PI纤维、对位芳纶(PPTA)纤维和芳Ⅲ纤维在不同环境下条件下的拉伸强度保持率<sup>[5]</sup>。PI纤维的耐酸性、耐有机溶剂性能、耐吸湿性、耐紫外性等耐环境性能明显优于PPTA纤维和芳Ⅲ纤维。PI纤维的耐碱性和耐盐性较差,G. F. TIAN等<sup>[11]</sup>利用碱液对PI纤维表面进行粗糙化处理,从而进一步提高了PI纤维和环氧树脂的界面结合性能。

表2 高性能有机纤维耐环境性能<sup>[5]</sup>

Tab. 2 Environmental resistance of high performance organic fiber

环境条件	拉伸强度保持率/%		
	PI	PPTA	芳Ⅲ
25°C、40% $H_2SO_4$ /100h	98	88	90
80°C、40% $H_2SO_4$ /50h	95	0	0
60°C、2、0%NaOH/0.5h	73	94	90
99°C、10%NaCl/100h	53	95	95
99°C、10% $FeCl_3$ /100h	52	60	68
95°C去离子水/100h	99	85	80
紫外光/500h	92	50	78

张梦颖等<sup>[5,12]</sup>采用DMA测定了PI纤维、PPTA纤维和芳Ⅲ纤维的损耗因子(tanδ)-温度曲线。3种纤维的玻璃化转变温度分别为354、290和250°C。350°C/10 h及380°C/10 h热环境处理后,PI纤维的强度保持率均超过90%;380°C/200 h热环境处理后,PI纤维的强度保持率为82%,而PPTA纤维的强度保持率仅为20%,以上试验结果充分验证了PI纤维突出的耐高温性能。

### 3 PI/EP复合材料基础性能及应用研究

#### 3.1 PI/EP复合材料成型工艺性能

借鉴树脂基复合材料成熟的成型工艺经验,研究人员采用手糊法、湿法缠绕及热熔法制备的PI织物/EP预浸料和PI/EP单向预浸料的厚度、面密度、树脂含量等基本性能满足热模压、热压罐、RTM成型工艺要求<sup>[13-16]</sup>。焦亦彬等<sup>[17]</sup>研究了江苏先诺生产的PJ-35-1500-170型PI/EP单向带预浸料的成型工艺性能。PI/EP单向带预浸料易于裁切、铺覆性良好,热压罐的PI/EP复合材料树脂含量精度控制较高,挥发份含量低,其室温干态环境下纵向拉伸强度高达2.06 GPa,平均值1.89 GPa,纵向压缩强度最大值可达273 MPa,平均值260.5 MPa。卓航等<sup>[18]</sup>对比研究了未经表面处理的PI纤维和含有上浆剂的PPTA纤维与环氧树脂的预浸工艺性能和固化成型工艺性能。采用相同的湿法缠绕工艺参数制备的PI/DGEBA、PPTA/DGEBA预浸料的物理性能基本接近,手工裁切及铺覆性良好。经热压罐固化后,PI/DGEBA单向复合材料纵向拉伸强度、纵向压缩强度(室温干态)均高于PPTA/DGEBA复合材料,两者的层间剪切强度基本相当,均高于60 MPa。同时采用热熔法工艺制备的PI/EP单向预浸料的单层厚度为0.125 m,面密度为130 g/m<sup>2</sup>,通过优化预浸工艺参数和热压罐固化条件PI/EP复合材料的基本力学性能稳定,批次数据离散程度较低,层间剪切强度大于65 MPa<sup>[16]</sup>。

### 3.2 PI/EP复合材料基本力学性能及破坏机制

PI/EP复合材料单向板力学性能<sup>[13-15,18]</sup>(室温干态)见表3。试验所用PI纤维均为出厂原丝,未经表面处理(不含上浆剂)。1#~3#组采用热压罐成型工艺,4#为模压成型工艺。由于PI纤维与不同环氧树脂的匹配性及成型工艺的稳定性不同,因此力学性能存在一定差异。PI纤维与环氧树脂的浸润性良好,1#~3#组复合材料的层间剪切强度均大于65 MPa。PI/TDE-85复合材料简支梁冲击强度为263.8 kJ/

m<sup>2[19]</sup>,F-8H3/602芳纶织物增强环氧复合材料的冲击强度最高为220 kJ/m<sup>2[20]</sup>,表明PI/TDE-85复合材料的抗冲击性能良好。此外研究人员<sup>[18]</sup>还通过落锤冲击试验测试了PI/EP层合板的低速冲击性能,结果表明,PI/EP复合材料具有优异的抗冲击韧性,30 J冲击能量下,4 mm厚的PI/EP层合板迎击面仅产生一个直径约9 mm的凹坑,深度为0.438 mm,层合板背面几乎无贯穿损伤,整个冲击过程中层合板承受的冲击载荷峰值接近7 kN。

表3 PI/EP复合材料基本力学性能

Tab. 3 Basic mechanical properties of PI/EP composites

序号	PI/EP 复合材料	层间剪切强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	压缩强度 /MPa	压缩模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
1#	S30/AG-80	67.8	1268	81.5	-	-	655	58.4
2#	S35/TDE-85	65.8	1608	77.3	298	67.3	717	76.7
3#	S35/5228A	65.2	1835	81.5	256	61.17	723	56.7
4#	S35/(DGEBA/FDE)	53.2	1375	68.5	257	57.3	750	53.1

PI/EP复合材料纵向拉伸强度可达1835MPa,其拉伸破坏宏观形貌见图1。PI/EP复合材料的纵向拉伸破坏形式均为散丝爆炸破坏,纤维与基体脱粘呈爆裂形态,符合XGM破坏模型<sup>[21]</sup>。而PPTA/EP复合材料的纵向拉伸破坏形式一般为散丝劈裂破坏,基体纵向开裂、部分纤维发生断裂。因PI纤维具有较高的拉伸强度和断裂伸长率,其在承载过程中不断吸收能量,基体树脂与纤维逐渐脱粘并发生剪切破坏,当达到断裂应力时瞬间崩裂,呈散丝爆炸形态。

PI/EP复合材料的纵向压缩强度较差,其失效破

坏前后宏观形貌如图2所示。压缩试样中段均产生了45°折曲带<sup>[22]</sup>,破坏形式为屈曲失稳破坏<sup>[16,23]</sup>。图2(d)组HMPI/EP复合材料发生严重分层破坏,这是因为高模型HMPI纤维与环氧树脂的界面结合性能相对较弱,即使HMPI纤维的拉伸模量达到140 GPa,

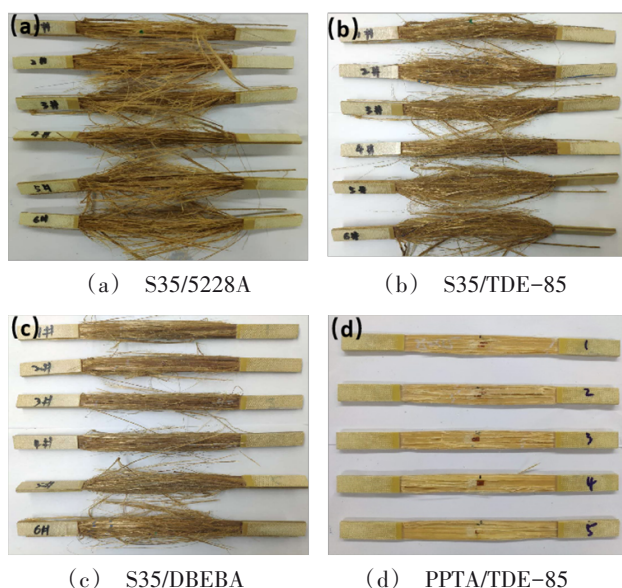


图1 PI/EP复合材料纵向拉伸破坏宏观形貌

Fig. 1 Macro-morphology of longitudinal tensile failure of PI/EP composites

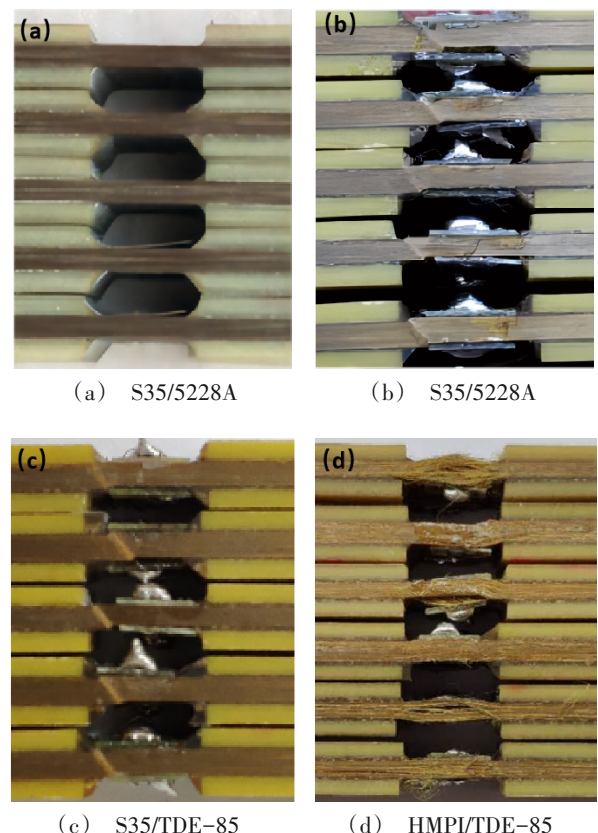


图2 PI/EP复合材料纵向压缩破坏前后宏观形貌

Fig. 2 Macro-morphology of longitudinal compressive failure of PI/EP composites



其纵向压缩强度也低于 300 MPa, 压缩破坏形式为分层屈曲破坏。关于有机纤维增强树脂基复合材料纵向压缩强度差的问题, 尚未有突破性进展。通常使用更高模量的树脂基体或采用有机纤维与碳纤维、玻璃纤维等混杂设计来提高复合材料的压缩性能。

### 3.3 PI/EP 复合材料电性能研究

石英纤维(QF)增强环氧复合材料因其优异的介电性能和绝缘性能而广泛应用于飞机、火箭、海陆基雷达及天线罩等领域。PI 纤维的介电性能、绝缘性能等与石英纤维相当, 其强度和模量比石英纤维更高, 同时密度仅为 1.44 g/cm<sup>3</sup>, 用于透波复合材料具有增强和减重的双重性能优势。

PI/EP 复合材料的室温介电性能<sup>[13-14, 18]</sup>见表 4。1#组中 DGEBA 基体引入了自合成的超支化 FDE 环氧树脂, PI/EP 复合材料的介电常数和介电损耗明显降低, 复合材料界面性能良好, 层间剪切强度为 53.2

MPa<sup>[14]</sup>。QF/EP 复合材料的介电常数与 PI/EP 复合材料基本相当, 介电损耗略低。目前研究人员正在从化学结构设计的角度制备更低介电常数和介电损耗的 PI 纤维来满足先进透波复合材料的性能需求。WANG 等<sup>[24]</sup>制备一种含氟低介电共聚型 PI 纤维, 其在 10 GHz 频率下介电常数和介电损耗分别仅为 2.746 和 8×10<sup>-3</sup>, 在低介电复合材料方面具有很好的应用前景。PI/EP 复合材料的介电强度为 29.00 kV/mm, PPTA/TDE-85、PPTA 织物/EP、玻纤织物/EP 复合材料的介电强度分别为 27.98、14.57 和 23.60 kV/mm。由于预浸工艺、成型工艺不同, 纤维增强环氧复合材料的孔隙率、内部缺陷水平存在差异, 因此其介电强度的测试值要低于理论值。后续通过调控 PI 纤维化学结构、优化成型工艺、减少复合材料内部缺陷等方式可将 PI/EP 复合材料的电性能优势发挥最大化。

表 4 高性能纤维增强环氧树脂复合材料介电性能

Tab. 4 Dielectric properties of high performance fiber reinforced epoxy composites

序号	复合材料	介电强度/kV·mm <sup>-1</sup>	介电常数	介电损耗/10 <sup>-3</sup>	测试频率
1#	S35/(DGEBA/FDE)	-	3.40~3.48	9~10	1~30 MHz
2#	S35/TGDDM	-	3.58~3.62	-	0~10 MHz
3#	S35/TDE-85	29.00	3.70~3.75	9~10	7~18 GHz
4#	PPTA/TDE-85	27.98	3.89~4.00	16~17	7~18 GHz
5#	QF/EP	23.60	3.60~3.80	7~10	12~18 GHz

### 3.4 PI/EP 复合材料抗冲击性能

PI 纤维具有高强、高韧的力学性能特点, 其增强复合材料的抗冲击性能良好。林松等<sup>[25]</sup>研究了湿法缠绕工艺制备的 PI/EP 复合气瓶和碳纤维/EP 复合气瓶性能。PI/EP 复合材料 NOL 环试样拉伸强度在 1 708 MPa, 纤维强度发挥率为 80%。水压爆破试验中 PI/EP 复合气瓶的容器特征系数为 32.2 km, 而 T300/EP 复合气瓶的容器特征系数为 29.2 km。同时通过声发射采集的 PI/EP 复合材料气瓶损伤信号明显少于 T300/EP 复合气瓶。将碳纤维与 PI 纤维进行混杂设计可以有效提高碳纤维复合材料的抗损伤包容性。孔维夷等<sup>[15]</sup>采用 PI 纤维/碳纤维(T800)混编方式形成预制体, 然后通过 RTM 成型工艺制备的 PI/T800 混编增强环氧复合材料飞机风扇包容机匣。在钛合金弹片冲击试验中的 PI/T800 混杂复合材料的临界冲击动能比 T800/EP 复合材料的临界动能提升了 107%, 碎片侵彻损伤深度下降 40%, 包容机匣减重 33 kg。通过对包容机匣进行适应性优化和纤维混杂模式设计, 有望提升包容机匣和发动机的可靠性和稳定性。

PPTA 纤维、芳 III 纤维、超高分子链聚乙烯纤维

(UHMWPE) 纤维由于具有低密度、高强度、高断裂伸长率的力学性能优势而广泛应用于防弹装甲领域。UHMWPE 纤维密度仅为 0.98 g/cm<sup>3</sup>, 但是其耐热性和抗蠕变性差, 服役环境受到限制。与目前应用成熟的“防弹纤维”Kevlar<sup>®</sup>相比, 高强高模 PI 纤维的力学性能和耐环境适应性更高, 在防弹装甲材料领域具有巨大的应用潜力。Cunniff<sup>[26]</sup>曾提出纤维增强树脂基复合材料的防弹性能与纤维的 Cunniff 速度呈正相关的关系, 而 Cunniff 速度与纤维的拉伸强度、拉伸模量、拉伸断裂应变均呈正相关, 与纤维密度呈负相关。何业茂等<sup>[27]</sup>研究几种高性能有机纤维的基本力学性能和 Cunniff 速度。结果表明 PI 纤维、PPTA 纤维、芳 III 纤维的 Cunniff 速度分别为 670、611 和 662 m/s。从理论模型角度证明了 PI 纤维的防弹性能更佳。

弹体侵彻纤维增强复合材料靶板是一个高速、动态、瞬时过程。WANG 等<sup>[28]</sup>利用霍普金森杆模拟了高强高模型 PI 纤维在高应变率下的动态拉伸响应。随着应变率从 0.01 s<sup>-1</sup> 提高至 1 200 s<sup>-1</sup>, PI 纤维的断裂强度和弹性模量均不断增加, 最高达到 6.5 和 500 GPa。王博尧<sup>[29]</sup>利用霍普金森杆模拟了 PI/EP 复

合材料高速压缩动态响应。当应变率为1 000、1 500和2 000 s<sup>-1</sup>时,PI/EP复合材料断裂应力逐渐提高至355 MPa,断裂伸长率为3.19%。其压缩破坏模式为扭结带失效,有分层和屈曲现象,表现为韧性破坏。弹体侵彻PI/EP复合材料靶板,其迎弹面破坏形式为剪切破坏,背弹面破坏形式为拉伸破坏,原纤化严重,符合Cantwell<sup>[30]</sup>侵彻过程模型。

### 3.6 PI纤维混杂增强环氧复合材料性能

PI纤维的密度低,强度和断裂伸长率较高,将PI纤维与碳纤维进行混杂设计可以提高混杂复合材料的抗冲击韧性,同时降低其结构质量。贺斌<sup>[31]</sup>采用模压成型工艺制备的PI织物/T700碳纤维织物混杂增强环氧树脂复合材料具有优异的抗冲击性能和压缩性能。当PI/T700混杂比为44%,采用“CF层/PI层/CF层”共3层组成一夹层组的铺层方式设计的混杂复合材料筒支梁冲击强度达到324.3 kJ/m<sup>2</sup>,弯曲模量为70.07 GPa,达到CF/EP复合材料弯曲模量的92%;当碳纤维含量为52wt%时,采用该夹层组铺层设计的混杂复合材料压缩强度为889 MPa,其压缩拉伸比接近0.5,比PI/EP复合材料压缩强度提升3.21倍;弯曲强度达到1 498 MPa,层间剪切强度为60 MPa。同时采用夹层组铺层设计要优于“PI层/CF层”的交替铺层设计,纤维层间界面数越少,混杂复合材料的层间剪切强度、弯曲强度和压缩强度则更高。将PI纤维与石英纤维、UHMWPE纤维等进行混杂设计还可以提升先进透波复合材料、防弹复合材料的整体功能性。

## 4 结语

高性能PI纤维的拉伸强度与T300碳纤维基本相当,但是其模量只有T300碳纤维的一半,以PI纤维、PPTA纤维、芳Ⅲ纤维、PBO纤维等高性能有机纤维为增强体制备的环氧树脂基复合材料都存在刚性不足且纵向压缩性差的缺点。目前通过调控化学结构和纺丝工艺条件来提高纤维模量的方式还不能弥补这一缺陷。然而高性能PI纤维具有高强、高模、高断裂伸长率的力学性能优势和优异的功能特性,PI/EP复合材料的抗冲击性能、介电性能、绝缘性能、防弹性能等均较为突出,同时PI/EP复合材料的成型工艺趋于成熟和稳定,在压力容器、透波材料、包容机匣、防弹装甲等领域具有明显的性能优势。相比碳纤维、石英纤维增强环氧复合材料,使用PI/EP复合材料及PI纤维混杂增强环氧复合材料,其减重效果可以提升20%以上。未来通过继续提升PI纤维的本体力学性能、选用工艺性能匹配的高性能环氧树脂、优化部件结构设计、利用有限元模拟和试验验证结合等方法可实现PI/EP复合材料在特殊功能材料、结

构功能一体化材料领域更为广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 丁孟贤. 聚酰亚胺:化学、结构与性能的关系及材料[M]. 北京:科学出版社,2012:3-10.
- [2] DING M X. Polyimide: relationship between chemistry, structure and properties and materials [M]. Beijing: Science Press, 2012: 3-10.
- [3] 武德珍. 高性能聚酰亚胺纤维及应用[M]. 科学出版社,2020:139-172.
- [4] WU D Z. High performance polyimide fiber and applications [M]. Science Press, 2020:139-172.
- [5] ZHANG M. Y, NIU H Q, QI S L, et al. Structure evolutions involved in the carbonization of polyimide fibers with different chemical constitution [J]. Materials Today Communications, 2014, 1(1-2):1-8.
- [6] CHANG J J, NIU H Q, WU D Z. High performance polyimide fiber-science direct [J]. Structure and Properties of High-Performance Fibers, 2017, 10:301-323.
- [7] ZHANG M Y, NIU H Q, WU D Z. Polyimide fibers with high strength and high modulus: preparation, structures, properties, and applications. [J]. Macromolecular rapid communications, 2018, 39(20):121-141.
- [8] FANG Y T, GAN, F, DONG J, et al. Preparation of high-performance polyimide fibers with wholly rigid structures containing benzobisoxazole moieties [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2022:1-10.
- [9] BAO F, DONG Z X, ZHANG R, et al. Preparation and properties of high-performance polyimide copolymer fibers containing rigid pyrimidine and benzoxazole moieties with hydrogen bonding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12:1143-1156.
- [10] DAI X M, BAO F, LONG J, et al. High-performance polyimide copolymer fibers derived from 5-amino-2-(2-hydroxy-4-aminobenzene)-benzoxazole: Preparation, structure and properties[J]. Polymer, 2018, 150:254-266.
- [11] ZHANG C L, ZHANG Q, XUE Y H, et al. Effect of draw ratio on the morphologies and properties of BPDA/PMDA/ODA polyimide fibers [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2014, 30(1):163-167.
- [12] LIN D L, JIANG M, Li R X, et al. Structure and properties of polyimide fiber prepared from polyamic acid solution with high solid content and low viscosity [J]. Materials Letters, 2022,312.
- [13] TIAN G F, CHEN B B, QI S L, et al. Enhanced surface free energy of polyimide fibers by alkali treatment and its interfacial adhesion behavior to epoxy resins [J]. Composite Interfaces, 2016, 23(2):145-155.
- [14] 张梦颖,牛鸿庆,韩恩林,等. 高强高模聚酰亚胺纤维及其应用研究[J]. 绝缘材料,2016,49(08):12-16.
- [15] ZHANG M Y, NIU H Q, HAN E L, et al. High strength

and high modulus polyimide fiber and its application research [J]. *insulating materials*, 2016, 49 (8):12-16.

[13] 温友, 孟祥胜, 范卫锋, 等. 聚酰亚胺纤维增强树脂基复合材料的研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(01): 57-61.

WEN Y, MENG X S, FAN W F, et al. Study on polyimide fiber reinforced resin matrix composites [J]. *New Materials in chemical industry*, 2019, 47(01):57-61.

[14] 吴赵盛. PI纤维/混合环氧复合材料的制备及性能研究[D]. 北京化工大学, 2019.

WU Z S. Study on preparation and properties of PI fiber/ epoxy composite [D]. Beijing University of Chemical Technology, 2019.

[15] 孔维夷, 徐焱, 张璇, 等. 复合材料风扇包容机匣关键性能提升[J]. *航空动力*, 2022(01):52-54.

KONG W Y, XU Y, ZHANG X, et al. Key performance improvement of composite fan containment case [J]. *Aero power*, 2022(01):52-54.

[16] 卓航, 李是卓, 田国峰, 等. 高强高模聚酰亚胺纤维/环氧树脂复合材料力学性能与破坏机制[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(09):2101-2109.

ZHUO H, LI S Z, TIAN G F, et al. Mechanical properties and failure mechanism of high strength and high modulus polyimide fiber reinforced epoxy composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(09): 2101-2109.

[17] 焦亦彬, 王昭军, 孟庆杰, 等. 聚酰亚胺纤维增强复合材料工艺性研究[J]. *化纤与纺术*, 2021, 50(07):23-24.

JIAO Y B, WANG Z J, MENG Q J, et al. Study on polyimide fiber reinforced composites [J]. *Chemical Fiber and Spinning*, 2021, 50(07):23-24.

[18] 卓航. 高性能聚酰亚胺纤维增强环氧树脂复合材料制备及性能研究[D]. 北京化工大学, 2019.

ZHUO H. Preparation and properties of high performance polyimide fiber reinforced epoxy composites [D] Beijing University of Chemical Technology, 2019.

[19] HE B, WANG B Y, WANG Z W, et al. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber [J]. *Polymer*, 2020, 204.

[20] 易凯, 耿东兵, 杨智勇, 等. 树脂含量对F-8H3/602芳纶复合材料性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(02): 59-63.

YI K, GENG D B, YANG Z Y, et al. Effect of resin content on properties of F-8 H 3/602 aramid composites [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2015, 45(02): 59-63.

[21] American Society for Testing and Materials. ASTM D 3039 standard test method for tensile properties of polymer

matrix composite materials [S]. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2017.

[22] MISHRA A, NAIK N K. Inverse micromechanical models for compressive strength of unidirectional composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(10):1199-1211.

[23] OPELT C, CANDIDO G, REZENDE M. Compressive failure of fiber reinforced polymer composites—A fractographic study of the compression failure modes [J]. *Materials Today Communications*, 2018, 15: 218-227.

[24] WANG Z Q, ZHANG M Y, HAN E L, et al. Structure-property relationship of low dielectric constant polyimide fibers containing fluorine groups [J]. *Polymer*, 2020: 122884.

[25] 林松, 牛鸿庆, 李文斌. 聚酰亚胺纤维与碳纤维缠绕复合气瓶性能对比研究[J]. *材料科学与工艺*, 2018, 26(06): 23-29.

LIN S, NIU H Q, LI W B. Comparative study on performance of polyimide fiber and carbon fiber composite cylinders. [J]. *Materials Science*, 2018, 26(06):23-29.

[26] CUNNIFF P M. Dimensionless parameters for optimization of textile based body armor systems [C]. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*. Lancaster: Technomic Publishing, 2020, 32(7):842-848.

[27] 何业茂, 焦亚男, 周庆, 等. 弹道防护用先进复合材料弹道响应的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(05): 1331-1347.

HE Y M, JIAO Y N, ZHOU Q, et al. Research progress in ballistic response of advanced composite materials for ballistic protection [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(05): 1331-1347.

[28] WANG B Y, ZHANG M Y, HAN E L, et al. Mechanical behavior of polyimide filament tows under high strain rate tension [J]. *High Performance Polymers*, 2020, 32 (2) : 095400832090414.

[29] 王博尧. 高强高模聚酰亚胺纤维动态力学响应与防弹性能研究[D]. 北京化工大学, 2021.

WANG B Y. Dynamic mechanical response and ballistic resistance of high strength and high modulus polyimide fiber [D]. Beijing University of Chemical Technology, 2021.

[30] CANTWELL W J, MORTON J. The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP [J]. *Composite Structures*, 1989, 13(2):101-114.

[31] 贺斌. 聚酰亚胺纤维/碳纤维混杂增强环氧树脂基复合材料力学性能研究[D]. 北京化工大学, 2020.

HE B. Study on mechanical properties of polyimide/carbon fiber hybrid reinforced epoxy composites [D]. Beijing University of Chemical Technology, 2020.