

http://pmse.scu.edu.cn

玻璃纤维增强热塑性复合材料在航空领域的应用进展

王文才¹, 宋伟², 张焱², 姚佳楠¹, 刘刚¹, 陈春海¹

(1. 东华大学材料科学与工程学院纤维材料改性国家重点实验室先进低维材料中心, 上海 201620;

2. 南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 玻璃纤维增强高性能热塑性复合材料具有抗冲击损伤、高韧性、耐电化学腐蚀、低成本等优点, 近年来在民航客机、军用运输机等航空领域得到了应用和发展。文中首先概述了目前国外玻璃纤维增强高性能热塑性复合材料在航空领域的应用实例, 并分析了国内从原料到复合材料制造技术之间存在的差距。对比了国内制备的HS6高强玻璃纤维增强聚芳醚酮热塑性预浸料同国外同类型S2/PEEK预浸料的表现质量和力学性能。通过对比发现, 国产预浸料的浸渍质量和力学性能跟国外仍有一定的差距, 需对预浸料的制备工艺做进一步探索改善。

关键词: 玻璃纤维; 热塑性复合材料; 复合材料成型; 力学性能; 航空应用

中图分类号: TQ327.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2023)11-0156-09

自20世纪以来, 树脂基复合材料在航空航天、轨道交通等高技术领域得到了长足的发展。相比传统的金属材料, 树脂基复合材料具有高强高模、质轻、耐腐蚀等优点, 其用量已成为衡量飞机结构先进性的指标之一, 成为航空结构的主要应用材料之一^[1-3]。

树脂基复合材料根据树脂基体的不同可分为热固性复合材料和热塑性复合材料。目前, 复合材料的应用主要以热固性复合材料为主, 但随着航空航天等领域对复合材料性能需求的不断提升, 以环氧、双马来酰亚胺等树脂为基体的高性能热固性复合材料逐渐难以满足现有的需求, 如高韧性、原材料的储存周期等性能要求。与传统热固性复合材料相比, 高性能热塑性复合材料具有高抗冲击和损伤容限、高韧性、良好的耐环境性、预浸料无需低温贮存等优点^[4,5]。另外, 热塑性复合材料在装配过程中, 结构件之间可焊接成型, 无需钻铆, 大大降低了飞机的质量和制造成本, 且结构效率得到了有效提高^[6]。尤其是它所具有的可回收、可重复利用等特性很好地适应了当今世界对材料产业所提出的环保要求, 对可持续发

展有重要意义。

玻璃纤维增强热塑性复合材料(Glass fiber reinforced thermoplastic composites, GFRTP)是以玻璃纤维作为增强体、高性能热塑性树脂如聚醚酰亚胺(PEI)、聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)等为基体复合而成的一类新兴复合材料。GFRTP不但具有热塑性复合材料抗冲击损伤的优点, 相比碳纤维增强热塑性复合材料还具有成本低、耐电化学腐蚀的独特优势, 因此, 低成本玻璃纤维增强热塑性复合材料在汽车、机电等领域得到广泛应用。近年来随着高性能热塑性复合材料制造技术的进步, 在军机和民机等高技术领域也得到了成功实践^[7-11]。

1 玻璃纤维增强热塑性复合材料的应用

GFRTP的相关研究应用可以追溯到20世纪80年代。荷兰Fokker公司首次将GFRTP通过热压成型工艺制备了飞机舱内地板, 并成功将其应用于Fokker 100支线喷气式飞机, 开启了GFRTP在航空领域的实际应用, 并相继在其他航空零部件上逐步得到应用,

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0251

收稿日期: 2023-02-04

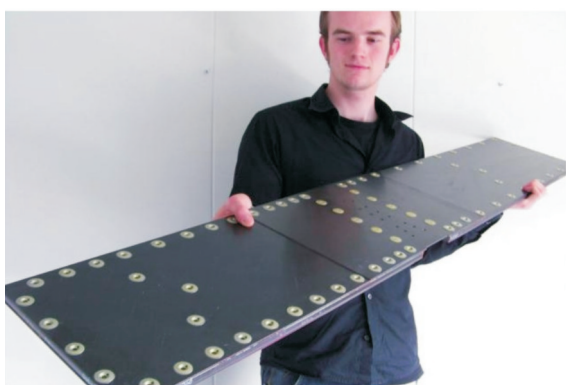
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3701600); 工信部民机专项(MJZ1-11N22)

通讯联系人: 姚佳楠, 主要从事热塑性复合材料研究, E-mail: yjn@dhu.edu.cn

Tab. 1 Main application models and parts of glass fiber reinforced thermoplastic composites

Company	Material	Aircraft type	Used part
Fokker	GF/PEI	Fokker 100	Floor
Airbus/Fokker	GF/PPS	A340-500/600	Leading edge
	GF/PPS	A380	Leading edge
GKN	GF/PPS	A400M	Ice protection plates

如 Tab.1 所示。90 年代, GFRTTP 的成功应用引起了欧洲 Airbus 公司的重视, Airbus 公司与 Fokker 公司联合开发了 A340-500/600 机翼前缘, 并取得了巨大的成功, 后来又重新设计将其应用于大型客机 A380 的机翼前缘。GFRTTP 不仅在民用飞机上得到了应用, 英国 GKN 公司在 2013 年为大型军用运输机 A400M 制备了除冰保护板并通过了验收, 玻璃纤维增强热塑性复合材料在航空领域的应用日趋成熟。

Fig. 1 Floor panels and floor beams of Gulfstream G550 and G650 cabins^[14]

热塑性复合材料夹层结构的应用是过去已经取得进展的领域之一。20 世纪 90 年代, 湾流 G400, G550, G650 公务机以及 Airbus 白鲸运输机的舱内地板是通过黏合碳纤维增强 PEI 热塑性复合材料饰面与

蜂窝夹层结构复合而成, 如 Fig.1 所示。欧盟国家采用此类材料生产了带有压制成型加强筋的 A400M 驾驶舱地板, 而这些应用早在 80 年代后期是采用玻璃纤维 PEI 热塑性复合材料进行前期探索研究的, 并在 Fokker100 型支线飞机上得到了应用, 用以取代飞机舱内地板所使用的传统金属材料^[12]。

Fokker100 型支线飞机所使用具有夹层结构的地板蜂窝为 Nomex 材料, 饰面材料采用 Tencate 复合材料公司的 Cetex-TC1000, 该材料采用无碱连续玻璃纤维增强, PEI 为树脂基体, 层压板在 320°C/2MPa 条件下采用热压成型工艺进行制备^[13]。

由 Fokker 公司设计制造的“J 形机头”是 GFRTTP 在民航客机上的典型应用之一, 如 Fig.2 所示。Airbus 公司重新设计的 A340-600 民航客机机翼前缘具有独特的外形结构, 因此通常被称为“J 形机头”, “J 形机头”采用 GF/PPS 热塑性复合材料取代了由传统五部分组成的“D 形机头”铝金属材料。这种重新设计的结构与传统设计相比, 其质量减轻了 20% 以上, 同时改善了鸟击碎片造成的冲击损伤性能, 降低了服役过程中维修维护成本, 测试结果满足 Airbus 的所有设计预期。

A380 作为 Airbus 公司大型客机机型, 尽管碳纤维增强材料可以进一步减轻质量和提高结构力学性能, 但 A380 的“J 形机头”仍然保留了玻璃纤维增强热塑性复合材料的使用, 因为 GFRTTP 的刚度足以满足设计

Fig. 2 A380 J-shaped head^[15]

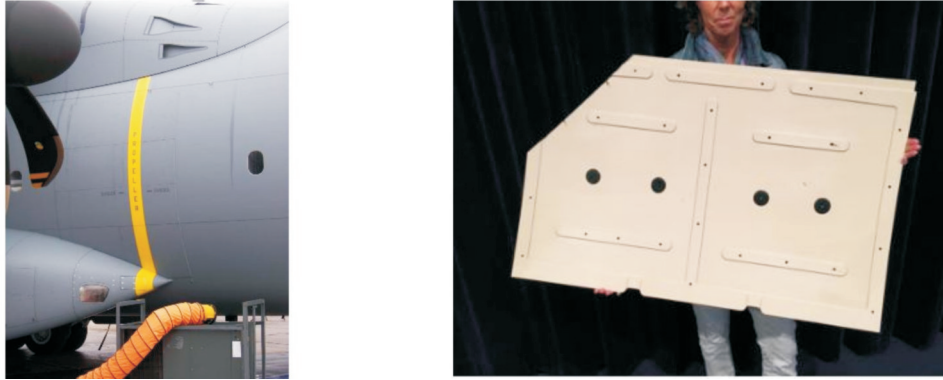


Fig. 3 Ice protection plates of A400M military transport aircraft^[16]

要求。A340的“J型机头”开发计划开始时,Fokker使用了由Tencate公司提供的Cetex[®]预浸料,但由于A380的“J形机头”蒙皮部分进一步加长(长度为3.5 m),无法在传统压机中进行成型。因此,Fokker和TenCate公司合作开发了一种由玻璃纤维织物和Fortron[®] PPS薄膜复合而成的新型半预浸料,通过在高压釜中进行固化成型制备蒙皮结构,采用热压成型和快速冲压成型工艺制备肋条和加强筋,最终将肋条和加强筋焊接在蒙皮上得到抗冲击的单体壳结构^[15-17]。Fokker公司认为“J型机头”仍有改进的空间,这需要进一步提高零件集成度,相关制造研究正在进行中。

Airbus公司仍在继续关注热塑性复合材料在飞机领域的应用,并有望大幅增加其使用量,例如,方向舵和副翼等控制面结构目前由多个部件组成,需要在其结合处使用铆钉,这为显著减少部件和紧固件数量提供了潜力。

近年来,Airbus公司推出全新A400M军用运输机,其亮点之一是其最新安装的除冰保护板材料,除冰防护板由Fokker公司负责设计制造,在恶劣天气条件下,可以有效防护机身侧面免受螺旋桨上进裂冰块的损害,如图3所示。其材料继续选用了A380“J形机头”所使用的TenCate Cetex[®]半预浸料,之所以继续选用GF/PPS热塑性复合材料是因为它具有出色的抗冲击性和耐化学性,可以有效抵抗如去污液等化学试剂的腐蚀。制作的新型除冰保护板在A400M得到使用,是GF RTP在军用飞机领域应用的再一次成功实践,相信将来玻璃纤维增强热塑性复合材料会在该领域得到进一步的扩展应用。

2 国内技术现状与差距分析

从原料到制品,国内GF RTP的发展应用与国外相比均存在一定的技术差距,亟待国内相关科研单位、

企业加大技术研发力度和市场开拓。

2.1 高性能热塑性树脂

高性能热塑性树脂主要包括聚醚酰亚胺、聚苯硫醚、聚醚醚酮等聚合物,此类聚合物具有耐高温、高韧性、可重复利用、储存成本低等优点,处于热塑性树脂的金字塔顶端^[18-21]。

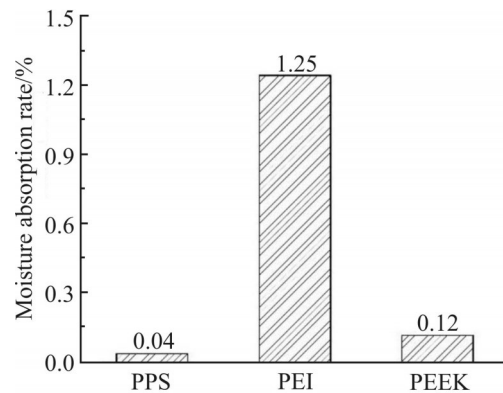


Fig. 4 Hygroscopicity comparison of high-performance resins^[26]

PEI树脂表现出优异的尺寸稳定性和力学性能,但由于树脂为非结晶聚合物,其耐溶剂和吸湿性表现不尽人意,图4对比了3种聚合物的吸湿性,PEI树脂的吸湿率超过了PPS和PEEK树脂10倍。PPS树脂为半结晶聚合物,既表现出了良好的耐化学性能,同时其较低的加工成本一度成为了热塑性复合材料树脂基体的首选^[22]。PEEK作为另一种高性能半结晶热塑性树脂,表现出更为优异的力学性能和耐热性能,随着树脂生产技术的成熟和应用范围的拓展,逐渐发展成为高性能热塑性复合材料的主要树脂基体之一。

为了进一步拓宽应用范围,热塑性树脂生产商Victrex开发了聚芳醚酮(PAEK)树脂系列,并生产了牌号VICTREX AE[™] 250商用化热塑性预浸料,其熔融温度仅305 °C,显著改善了材料的加工性能。Tencate公司开发的TC1225预浸料树脂基体采用了该树脂体

系,并成功取得了商业化应用。Arkema公司开发了聚醚醚酮(PEKK)树脂体系,PEKK是一种可以针对不同温度和结晶度进行定制的共聚物。根据原料对苯二甲酸基(T)和异邻苯二甲酸基(I)比例差异分别有牌号KEPSTAN™ 6000, KEPSTAN™ 7000 和 KEPSTAN™ 8000,随着T/I的降低,其力学性能趋于下降,但其加工性能改善明显,玻璃化转变温度无明显下降。热塑性预浸料TC1320采用该类型树脂基体被广泛应用于自动铺放技术,使其成为未来热塑性复合材料商业增长的主要候选者^[23-25]。

国内关于PEEK树脂的研究开发始于20世纪,现阶段已有多种与国外对标的树脂进入了商用化阶段,值得关注的是东华大学先进低维材料中心热塑性复合材料科研团队(原吉林大学团队)在近20年合成及改性工作后得到了性能稳定低熔融温度的PAEK树

脂,目前已实现批量化生产,如Tab.2所示。

2.2 高强玻璃纤维

Argosy Minerals Limited(AGY)公司是美国一家高性能玻璃纤维厂商,市场供应品种广泛,其中S2玻璃纤维由AGY公司专门制造,是一种高强玻璃纤维,力学性能优异。相比T700级别以上碳纤维,虽然在力学性能及其他性能上有所不足,但玻璃纤维产量高、生产技术成熟、性价比高优点而作为增强材料、绝缘材料、隔热材料得到广泛应用。

应国内需求,南京玻璃纤维研究设计院有限公司研发了HS系列高强玻璃纤维,与美国AGY公司的S2玻璃纤维同属于硅-铝-镁三元体系的S级高强玻璃纤维,其主要成分如Tab.3所示。国内HS6(高强6号)玻璃纤维与美国S2玻璃纤维对标,力学性能与之相当,Tab.4给出了两者的性能对比。

Tab. 2 Properties of high-performance thermoplastic resins^[27-29]

Type	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$	Tensile strength /MPa	Bending strength /MPa
PEI (Ultem® 1000)	321-357	215	129	167
PPS (Fortron® 0203)	280	90	33	135
PEEK (VICTREX™ 450G)	343	143	98	125
PEKK (KEPSTAN™ 6000)	305	160	88	128
PEKK (KEPSTAN™ 7000)	332	162	110	168
Domestic PAEK	317	157	96	151

Tab. 3 Composition comparison of high-strength glass fibers

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Others
S-2	65%	25%	10%	Impurities<1%
HS series	55%~65%	23%~25%	7%~16%	Auxiliary<9.4%

Tab. 4 Properties comparison of high-strength glass fibers

Property	S-2	HS6
Single filament tensile strength/MPa	4500~4890	4600~4800
Single filament tensile modulus/GPa	84.7~86.9	86~88
Strain to failure/%	5.4	5.3
Density/(g·cm ⁻³)	2.49	2.50
Impregnated strand tensile strength/MPa	≥3700	≥3750
Impregnated strand tensile modulus/GPa	92	92.5

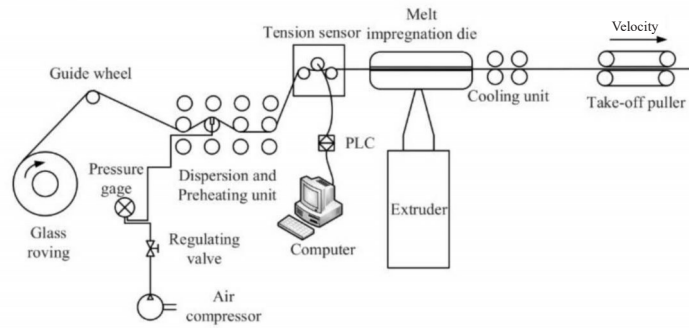


Fig. 5 Schematic diagram of melt impregnation method^[33]

Tab. 5 Mechanical properties of high-strength glass fiber reinforced thermoplastic composites^[41,42]

Property	Test method	S2/PEEK (TC1200)	S2/PEEK (APC-2)	HS6/PAEK
Tensile strength(0°)/MPa	ASTM D 3039	1520	1170	1575
Tensile modulus(0°)/GPa		52.0	55.0	61.6
Compressive strength (0°) /MPa	ASTM D 6641	1600	1100	1218
Compressive modulus (0°) /GPa		53.0	55.0	40.6
Flexural strength (0°) /MPa	ASTM D 790	1600	1550	1453
Flexural modulus (0°) /GPa		53.0	55.0	51.8
In plane shear strength/MPa	ASTM D 3518	77		68
In plane shear modulus/GPa		3.3		4
Interlaminar shear strength/MPa	ASTM D 2344	86		83

note: volume fraction of TC1200, APC-2 and HS6/PAEK fiber is 56%, 60% and 57%, respectively
TC1200、APC-2 和 HS6/PAEK 纤维体积分数分别为 56%、60% 和 57%。

2.3 预浸料制备工艺

纤维增强热塑性预浸料是由热塑性树脂基体浸渍纤维束制备而成,是制造热塑性复合材料制品的中间材料,因此,预浸料的质量直接影响到复合材料板材的整体性能。国内外开发了多种热塑性预浸料的制备工艺,如溶液浸渍法、熔融浸渍法、纤维混编法、粉末浸渍法、薄膜叠层法等,现阶段商用化热塑性预浸料制备方法主要以熔融浸渍法制备工艺为主^[30-32]。熔融浸渍法制备热塑性预浸料具有设备简单、制备周期短、减少环境污染、可连续生产等优点,但存在一定的技术壁垒,即如何实现高黏度熔体条件下纤维达到快速均匀地进行浸渍,不理想的浸渍效果会导致纤维束内孔隙率高,树脂长时间在高温条件下会导致力学性能的下降,其熔融浸渍法工艺如图 5 所示^[33,34]。

早在 1982 年,英国 ICI 公司通过熔融浸渍法相继研制出了 APC-1 和 APC-2 等 CF/PEEK 热塑性复合材料单向预浸带,开启了热塑性复合材料的研究应用,

随后多家公司均采用此方法推出了自己的商业化产品,相关产品日趋成熟和多样化。随着荷兰 Tencate 公司被日本 Toray 公司收购,比利时 Solvay 公司收购美国 Cytec 公司之后,现阶段生产高性能热塑性预浸料公司主要以日本 Toray、比利时 Solvay 和德国 Evonik 为主要生产商。

为加快热塑性复合材料的工程应用,欧盟及相关飞机生产商相继推出了 Clean Sky, TAPAS (Thermoplastic affordable primary aircraft structures) 和 Wing of Tomorrow 等一系列热塑性复合材料研究计划,此过程大致经历了 3 阶段,第 1 阶段热塑性复合材料主要应用于非承力部件,第 2 阶段则用于飞机受载较小部位,而目前正尝试进入第 3 阶段,用于飞机主盒段结构^[35-37]。

国内应用差距较大,国内关于热塑性复合材料研制工作起始于 20 世纪 80 年代中后期,起步相对较晚,目前国内多家公司相继开发出了多种型号的碳纤维增强热塑性复合材料预浸带,主要从事此项研发的企

Tab. 6 Mechanical properties of EC9 8 satin fiberglass fabric reinforced thermoplastic composites^[43,44]

Property	Test method	TC1000(EC9/PEI)	TC1100(EC9/PPS)
Tensile strength (0°) /MPa	EN2747-3	516	494
Tensile modulus (0°) /GPa	EN2747-3	25.0	21.2
Tensile strength (90°) /MPa	EN2747-3	442	369
Tensile modulus (90°) /GPa	EN2747-3	24.2	20.0
Compressive strength (0°) /MPa	ASTM D 6641	613	470
Compressive modulus (0°) /GPa	ASTM D 6641	292	26.2
Compressive strength (90°) /MPa	ASTM D 6641	490	316
Compressive modulus (90°) /GPa	ASTM D 6641	27.6	24.3
Flexural strength (0°) /MPa	ISO 178	781	659
Flexural modulus (0°) /GPa	ISO 178	24.5	23.1
Flexural strength (90°) /MPa	ISO 178	617	467
Flexural modulus (90°) /GPa	ISO 178	22.2	19.3
In plane shear strength/MPa	AITM 1-0002		98
In plane shear modulus/GPa	AITM 1-0002		4.1
Open hole tensile strength/MPa	AITM 1-0007 iss. 2		180
Open hole compressive strength/MPa	AITM 1-0007 iss. 2		192

业主要集中在广州金发科技、江苏韩塑、南京特塑、苏州挪恩、青岛中集创赢等公司,该项研究的有关高校和研究所主要有东华大学、中科院宁波材料所、北京航空材料研究院、山东理工大学、吉林大学等。但有部分产品仍存在纤维含量低、纤维分布不均匀、浸渍质量偏低、品种单一等问题且性能稳定性有待提高^[38],民机方面尚无热塑性复合材料装机应用先例,仅在军机方面有少量应用,而且局限于少量非承力部件上,现阶段处于热塑性复合材料工程应用的第一阶段。而低成本玻璃纤维增强高性能热塑性复合材料相关产品更是无商业化报道,需要企业与科研单位加强合作推进商业化突破。

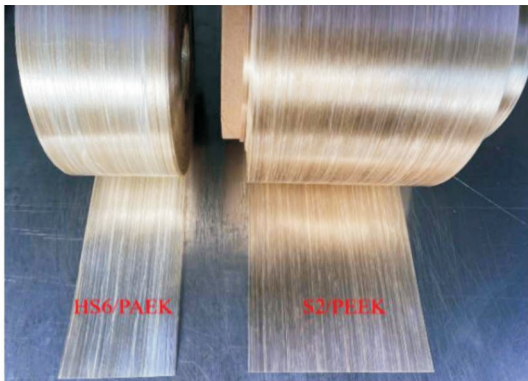


Fig. 6 Comparison of apparent mass of HS6/PAEK and S2/PEEK

为填补国内在 GF RTP 领域应用的市场空白,近期国内黑龙江英创新材料报道了一种玻璃纤维增强热塑性预浸料,目前处于初研阶段,该预浸料采用熔融浸渍工艺制备了 HS6/PAEK 预浸料,预浸料的表现质量如图 6 所示。在研制过程中搭建了包含纤维展纱、树脂熔融、纤维浸渍、热辊挤压、预浸料收卷等工序的单向预浸料生产线,如图 7 所示。通过与国外 S2/PEEK 预浸料对比发现,国产 HS6/PAEK 预浸料的质量有待进一步提高,主要存在树脂浸渍不均,内部存在较多的缺陷。



Fig. 7 Equipment for continuous fiber hot-melt prepreg

2.4 复合材料的力学性能

玻璃纤维增强热塑性预浸料主要有 2 种形式,即

玻璃纤维增强热塑性单向带和玻璃纤维织物增强热塑性预浸料。日本 Toray 公司的 S2/PEEK(TC1200)和比利时 Solvay 公司的 S2/PEEK(APC-2)是 2 款玻璃纤维增强 PEEK 热塑性预浸料单向带的成熟产品,得到了市场的广泛认可^[39,40]。Tab.5 为国内单向玻纤预浸料 HS6/PAEK 与 APC-2 和 TC1200 的力学性能对比数据,从表可知,国内 HS6/PAEK 预浸料部分性能达到了 APC-2 的水平,但整体性能较 TC1200 仍有差距,尤其是压缩性能,因此,预浸料的制备工艺有待进一步改善。

另外,日本 Toray 公司生产的以 PEI 和 PPS 树脂为基体、玻纤织物为增强材料同样得到了市场的认可,在早期的航空结构中得到了实际应用,Tab.6 为 2 种玻纤织物增强热塑性预浸料的力学性能对比数据。具笔者所知,目前国内仍没有相关的预浸料的产品及应用报道。

3 结语

(1) 经过前期几十年的技术积累,国外 GFRTP 具备了成熟的制备经验。目前国外纤维、树脂原材料种类广泛,复合类型具有更广的选择空间,结合先进的预浸料制备工艺,形成了多种以单向带和织物增强热塑性预浸料牌号类型。现阶段 GFRTP 在舱内地板、机翼前缘、防冰保护板等多种航空结构部件中得到成功应用,随着进一步研究开发,具有更低成本的 GFRTP 将会在航空领域得到更广泛的拓展应用。

(2) 国内 GFRTP 的应用尚未得到实际应用,正处于初期预浸料开发阶段,与国外具有较大差距。国内应进一步稳定树脂生产工艺,降低成本,在现有的基础上通过合作开发性能优异的玻璃纤维增强热塑性预浸料,结合国外的先进复合材料制备经验,首先在支架等较小零件或较小的内部组件中得到初步应用,为下一步机翼、地板等主次承力结构件应用开发提供经验。

(3) 对比了国内单向玻纤预浸料 HS6/PAEK 与国外同类型预浸料 S2/PEEK 的力学性能。通过对比,国产 HS6/PAEK 虽然部分性能达到了 APC-2 同一水平,但仍存在整体性能相对较差的问题,需进一步从原料到预浸料制备工艺改进研究,以满足国内市场需求。

参考文献:

- [1] Norkhairunnisa M, Chai Hua T, Sapuan S M, *et al.* Evolution of aerospace composite materials[M].[S.l.]: Springer, Cham International Publishing, 2022:367-385.
- [2] Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, *et al.* Polymer composite materials: a comprehensive review[J]. *Composite Structures*, 2021,262:113640.
- [3] Koumoulos E, Trompeta A, Santos R, *et al.* Research and development in carbon fibers and advanced high-performance composites supply chain in Europe: a roadmap for challenges and the industrial uptake[J]. *Journal of Composites Science*, 2019,3: 86.
- [4] Alshammari B A, Alsuhybani M S, Almushaikeh A M, *et al.* Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. *Polymers*, 2021,13:2474.
- [5] Vieille B, Casado V M, Bouvet C. Influence of matrix toughness and ductility on the compression-after-impact behavior of woven-ply thermoplastic- and thermosetting-composites: a comparative study[J]. *Composite Structures*, 2014,110:207-218.
- [6] 王兴刚, 于洋, 李树茂, 等. 先进热塑性树脂基复合材料在航天航空上的应用[J]. *纤维复合材料*, 2011,28(2):44-47.
Wang X G, Yu Y, Li S M, *et al.* Application of advanced thermoplastic resin matrix composites in aerospace[J]. *Fiber Composite*, 2011, 28(2):44-47.
- [7] 罗云烽, 姚佳楠. 高性能热塑性复合材料在民用航空领域中的应用[J]. *航空制造技术*, 2021,64(16):93-102.
Luo Y F, Yao J N. Applications of high performance thermoplastic composites in civil aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021,64(16):93-102.
- [8] 周冰洁, 张代军, 张英杰, 等. 高性能热塑性复合材料在航空发动机短舱上的应用[J]. *航空制造技术*, 2020,63(7):86-91.
Zhou B J, Zhang D J, Zhang Y J, *et al.* Applications of thermoplastic composites on aero-engine nacelles[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020,63(7):86-91.
- [9] 刘士琦, 周红霞, 王玉, 等. 热塑性复合材料的应用研究[J]. *化学与粘合*, 2021,43(1):72-75.
Liu S Q, Zhou H X, Wang Y, *et al.* Research progress in the application of environment friendly thermoplastic composite materials[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2021,43(1):72-75.
- [10] Khurshid M F, Hengstermann M, Hasan M M B, *et al.* Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites - a review[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020,54:1925-1944.
- [11] Middendorf P, Metzner C. 18 - Aerospace applications of non-crimp fabric composites[M]. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2011: 441-449.
- [12] Muzzy J D, Kays A O. Thermoplastic vs. thermosetting structural composites[J]. *Polymer Composites*, 1984,5:169-172.
- [13] 陈亚莉. 高性能热塑性复合材料在飞机上的应用[J]. *航空维修与工程*, 2003(3):28-30.
Chen Y L. Application of thermoplastic composites on aircraft [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2003(3):28-30.

- [14] Offringa A. New thermoplastic composite design concepts and their automated manufacture [J]. JEC Composites, 2010,58:45-49.
- [15] Gardiner G. Thermoplastic composites gain leading edge on the A380[EB/OL]. (2006- 03- 01) [2023- 08- 14]. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-gain-leading-edge-on-the-a380>.
- [16] Offringa A. Thermoplastic composites: current production and new developments[EB/OL]. (2020-09-16)[2023-08-14]. <https://www.assocompositi.it/wp-content/uploads/2020/11/Offringa.pdf>.
- [17] PORA J. Composite materials in the airbus A380 - from history to future[C]/Bellonte M. Extended Abstracts of the 13th International Conference on Composite Materials. Beijing: ICCM,2001:55.
- [18] Wu J, Li C, Hailatihan B, *et al.* Effect of the addition of thermoplastic resin and composite on mechanical and thermal properties of epoxy resin[J]. Polymers, 2022,14:1087.
- [19] 莫小龙, 张园园, 李元庆, 等. 聚醚醚酮/聚醚酰亚胺合金的热学性能与力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023,39(5):118-124.
- Mo X L, Zhang Y Y, Li Y Q, *et al.* Thermal and mechanical properties of polyetheretherketone/polyetherimide alloy[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023,39(5):118-124.
- [20] 肇研, 刘寒松. 连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J]. 材料工程, 2020,48(8):49-61.
- Zhao Y, Liu H S. Preparation and application of continuous fiber reinforced high- performance thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020,48(8):49-61.
- [21] 周鹏, 周中波. 复合材料用高性能纤维及热塑性树脂发展现状 [J]. 合成纤维, 2015,44(8):21-26, 41.
- Zhou P, Zhou Z B. Development status in high performance fiber and thermoplastic resin for composites[J]. Synthetic Fiber in China, 2015,44(8):21-26, 41.
- [22] 狄鑫俊, 廖俊波, 周晓东. 耐高温热塑性树脂的研究进展[J]. 上海塑料, 2011(3):5-10.
- Di X J, Liao J B, Zhou X D. Progress in high temperature-resistant thermoplastic resin[J]. Shanghai Plastics, 2011(3):5-10.
- [23] Arkema. Kepstan® PEKK general brochure[EB/OL]. [2022-08-14]. https://page.arkema.com/rs/253-HSZ-754/images/kepstan-pekk-general-brochure.pdf?mkt_tok=MjUzLUhTWi03NTQAAA GGnJHACVF6kUUDamoDOhgXIp--dC5grdMTiaSgBuEuFsXpRoHCVlcWoNR4g39pESEvVMGgc-iuc0_S-CaVNjEQvacafyNjNvHRrorRQrxKvCrmyA.
- [24] Toray. TenCate Cetex TC1225 product datasheet[EB/OL]. (2020-11-10)[2023-08-14]. https://www.toraytac.com/media/3bd72fac-0406-48e4-bfc4-2ffd2398ac0c/zipxIA/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1225_PAEK_PDS.pdf.
- [25] Toray. TenCate Cetex TC1320 product datasheet[EB/OL]. (2022-03-28)[2023-08-14]. https://www.toraytac.com/media/409dcc72-6aff-4643-86b8-20b5f464f038/INO6TA/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1320_PEKK_PDS.pdf.
- [26] Favaloro M. Continuous reinforced thermoplastic composites for aircraft applications[C]// International SAMPE Technical Conference. Memphis: SAMPE,2008.
- [27] Mitsubishi. Duratron® U1000 PEI product datasheet[EB/OL]. [2023- 08- 14]. https://www.mcam.com/mam/38072/AEP-Duratron%C2%AE%20U1000%20PEI_en_US.pdf.
- [28] Celanese. FORTRON® 0203 product datasheet[EB/OL]. (2022-08-22)[2023-08-14]. <https://tools.celanese.com/en/products/pdf/SI/FORTRON%C2%AE%200203-en.pdf>.
- [29] Victrex. VICTREX™ PEEK 450G™ product datasheet[EB/OL]. (2019- 11- 30) [2023- 08- 14]. https://www.victrex.com/-/media/downloads/datasheets/victrex_tds_450g.pdf.
- [30] 许云鹏, 颜春, 刘东, 等. 连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2020(8):123-128.
- Xu Y P, Yan C, Liu D, *et al.* Research progress in preparation process of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg[J]. Composites Science and Engineering, 2020(8):123-128.
- [31] 刘延宽, 顾子琛, 王志平. 连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺与发展趋势[J]. 中国塑料, 2022,36(2):172-181.
- Liu Y K, Gu Z C, Wang Z P. Preparation process and development trend of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg[J]. China Plastics, 2022, 36(2): 172-181.
- [32] 陈培忠, 王克俭. 预浸料的制备工艺及应用[J]. 塑料包装, 2020, 30(3):14-19.
- Chen P Z, Wang K J. Preparation technology and application of prepreg[J]. Plastics Packaging, 2020,30(3):14-19.
- [33] Ren F, Yu Y, Cao M, *et al.* Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36:1554-1563.
- [34] 陈同海, 贾明印, 杨彦峰, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料制备与熔融浸渍机理研究[J]. 工程塑料应用, 2013,41 (7):52-56.
- Chen T H, Jia M Y, Yang Y F, *et al.* Study on the preparation and melt impregnation mechanism of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41 (7):52-56.
- [35] BLACK S. Thermoplastic composites technology: a view from Europe [J]. Composites World, 2015,53:34-39.
- [36] Yevgenii T, Viacheslav H, Mykola T. Thermoplastic materials-a new stage in the life of aircraft construction[J]. Proceedings of National Aviation University, 2020,3:57-62.
- [37] Zeyrek B Y, Aydogan B, Dilekcan E, *et al.* Review of thermoplastic composites in aerospace industry[J]. International

- Journal on Engineering Technologies and informatics, 2022,3:1-6.
- [38] 孙银宝, 李宏福, 张博明. 连续纤维增强热塑性复合材料研发与应用进展[J]. 航空科学技术, 2016,27(5):1-7.
- Sun Y B, Li H F, Zhang B M. Progress and application of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Aviation Science and Technology, 2016, 27(5):1-7.
- [39] Littlefield A G, Hyland E J. 120mm prestressed carbon fiber/thermoplastic overwrapped gun tubes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012,134:41008.
- [40] August Z, Ostrander G, Michasiow J, *et al.* Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. SAMPE Journal, 2014,50:30-37.
- [41] Toray. TenCate Cetex TC1200 product datasheet[EB/OL]. (2019-11-13)[2023-08-14]. https://www.toraytac.com/media/7765d981-1f9f-472d-bf24-69a647412e38/Pr7gdw/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1200_PEEK_PDS.pdf.
- [42] Solvay. APC-2(PEEK)/S2 product datasheet[EB/OL]. (2017-10-11) [2023-08-14]. <https://www.e-aircraftsupply.com/MSDS/145937cytec%20APC-2%20PEEK.pdf>.
- [43] Toray. TenCate Cetex TC1000 product datasheet[EB/OL]. (2021-01-15)[2023-08-14]. https://www.toraytac.com/media/3f5498bb-fe0e-40db-8112-38987e15cb44/aMrDRA/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1000-Design_PEI_PDS.pdf.
- [44] Toray. TenCate Cetex TC1100 product datasheet[EB/OL]. (2021-01-27) [2023-08-14]. https://www.toraytac.com/media/221a4fcf-6a4d-49f3-837f-9d85c3c34f74/smphpw/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1100_PPS_PDS.pdf.

Application and Development of Glass Fiber Reinforced High-Performance Thermoplastic Composites in Aviation Field

Wencai Wang¹, Wei Song², Yan Zhang², Jianan Yao¹, Gang Liu¹, Chunhai Chen¹

(1. Center for Advanced Low-Dimension Materials, State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Nanjing Glass Fiber Research & Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210012, China)

ABSTRACT: Glass fiber reinforced high-performance thermoplastic composites have the advantages of impact damage resistance, high toughness, electrochemical corrosion resistance, low cost, etc. They have been applied and developed in the aviation fields such as civil aircraft, military transport aircraft, etc., in recent years. In this paper, the application examples of glass fiber reinforced high-performance thermoplastic composites in the aviation field abroad were summarized, and the gap between raw materials and composite manufacturing technology at home and abroad was analyzed. The apparent mass and mechanical properties of HS6 high-strength glass fiber reinforced poly (aryl ether ketone) thermoplastic prepreg prepared were compared with those of S2/PEEK prepreg of the same type abroad. Through comparison, it is found that the impregnation quality and mechanical properties of domestic prepreg still have a certain gap with those of foreign countries, and the preparation process of prepreg needs further exploration and improvement.

Keywords: glass fibers; thermoplastic composites; composite molding; mechanical properties; aviation application