

芳香族聚酰胺纤维在航空领域的研究进展

徐小伟^{1,2} 闫超¹ 田亦瑶¹ 李祎燊¹ 薛红前²

(1 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

(2 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘 要 介绍了国内外芳香族聚酰胺纤维的历史发展, 归纳了其优异的热力性能、稳定性和电绝缘性, 分类概述了其在军民领域的应用潜力, 进而系统阐述了芳香族聚酰胺纤维及其复合材料在蜂窝材料、压力瓶、飞机轮胎、发动机等航空领域的应用, 总结出我国在发展芳香族聚酰胺纤维方面面临高性能和高产能的需求。

关键词 芳香族聚酰胺, 航空, 蜂窝结构材料, 轮胎

中图分类号: TQ342

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.01.003

Research Progress of Aromatic Polyamide Fiber in Aviation Field

XU Xiaowei^{1,2} YAN Chao¹ TIAN Yiyao¹ LI Yishen¹ XUE Hongqian²

(1 AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089)

(2 School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The historical development of aromatic polyamide fiber at home and abroad is briefly introduced. The excellent thermo-mechanical properties, stability, and electrical insulation are summarized, and then the potential application in military and civil fields is classified and outlined. After that, the application of aromatic polyamide fiber and its composites in honeycomb materials, pressure bottles, aircraft tires, engines, and other aerospace fields are systematically elaborated. The analysis above can be concluded that China is facing the demand for high-performance and high productivity in developing aromatic polyamide fiber.

Key words Aromatic polyamides, Aerospace, Honeycomb structural materials, Tires

0 引言

芳香族聚酰胺纤维(Aromatic polyamide fibers, 缩写AF)是一类新型的高性能纤维, 又称芳纶纤维或芳纶, 最初被美国杜邦公司所发明, 拥有卓越的机械性能和优异的热稳定性, 最初设想应用于宇航研究材料等领域, 现已成为一类重大的军用战略物资而受到国际关注。减重对航空航天领域来说有着特别重大的意义, 也是航空航天设计师除了安全性以外最为关注的性能指标。研究表明, 飞机每减质量1 kg, 可节约30 000美元, 而使用先进的复合材料是达到减重目标的唯一途径^[1], 芳香族聚酰胺纤维作为一种非常优异的结构材料, 在航空领域中获得了广泛应用^[2], 例如波音757客机的起落架舱门^[3]。本文首先简要介绍芳香族聚酰胺纤维的发展历程以及性能指标, 然后对芳香族聚酰胺纤维在航空领域的应用研究进行描述, 最后指出我国应加快芳香族聚酰胺纤维及其复合材料产品的自主研发进度, 以解决中

国航空工业对先进复合材料技术的需求。

1 芳香族聚酰胺纤维的简介

芳香族聚酰胺纤维又称芳纶纤维, 于1967年由美国杜邦公司率先完成了间位芳香族聚酰胺纤维的商品化生产, 1972年对位芳香族聚酰胺纤维进入了工业化, 1974年, 美国商业总会命名为“Aramid fibers”^[2]。从分子角度来看, 芳香族聚酰胺纤维是指大分子主链中含有85%以上的酰胺基团直接连接在苯环的C原子上。由于芳香族聚酰胺纤维大分子链中苯环和酰胺的平面共轭效应以及分子链之间的氢键作用, 赋予了其卓越的高强、高模、阻燃、耐热、绝缘等特性, 是一类新兴的特种人工合成高分子材料。目前, 市场上销售的芳香族聚酰胺纤维主要是美国杜邦公司生产的间位芳香族聚酰胺纤维(Nomex)与对位芳香族聚酰胺纤维(Kevlar)。正是由于芳香族聚酰胺纤维卓越的耐热性与高模量, 芳香族聚酰胺纤维广泛应用于航空结构材料领域^[4]。

收稿日期: 2022-08-01

第一作者简介: 徐小伟, 1982年出生, 研究员, 主要从事航空材料的设计与制备工作。E-mail: xuxw001@avic.com

1.1 芳香族聚酰胺纤维的发展

自芳香族聚酰胺纤维首次出现以来,该特种高分子材料得到了飞速的发展,目前国外研究芳香族聚酰胺纤维集中在美国、日本和俄罗斯,主要生产公司有:美国尼莫尔·杜邦公司、日本帝人株式会社、俄罗斯特威尔化纤股份公司、俄罗斯卡明斯克化纤股份公司、韩国科隆工业公司、韩国晓星集团^[5]。20世纪60年代,美国尼莫尔·杜邦公司率先研制成功了芳香族聚酰胺纤维,1967年,间位芳香族聚酰胺纤维(商品名为Nomex)首次商品化生产,1972年,对位芳香族聚酰胺纤维(商品名为Kevlar)实现了工业化生产。同年,日本帝人株式会社完成了间位芳香族聚酰胺纤维(产品名为Conex)的商业化,日本帝人株式会社生产的对位芳香族聚酰胺纤维产品共有2个牌号,分别为Technora和Twaron,

其中Technora是日本帝人株式会社1987年自行研发并工业化的商品,而Twaron是日本帝人株式会社2000年并购的荷兰阿克苏诺贝尔公司的产物,另外,日本帝人株式会社在1987年完成了共聚改性芳香族聚酰胺纤维(产品名为Technora)的工业化。1985年,俄罗斯特威尔化纤股份公司完成了共聚改性芳香族聚酰胺纤维的工业化,商品名Armoc。20世纪90年代中期,俄罗斯卡明斯克化纤股份公司开始研制芳香族聚酰胺纤维,目前该公司共生产5个牌号的芳香族聚酰胺纤维,商品名为APMOC、Pycap、apmek、apyc和CBM。1979年,韩国科隆工业公司开始研制对位芳香族聚酰胺纤维,2005年实现商业化,商品名为Heracron,2009年韩国晓星集团实现对位芳香族聚酰胺纤维的产业化。图1是国外芳香族聚酰胺纤维的发展史。

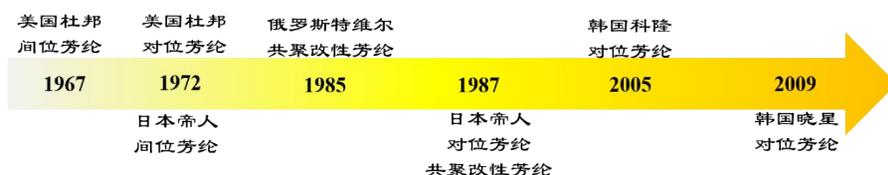


图1 国外芳香族聚酰胺纤维的发展史

Fig. 1 The development history of aromatic polyamide fiber in abroad

我国芳香族聚酰胺纤维起步较晚,但发展速度较快。芳香族聚酰胺纤维作为高技术研究发展项目,被列入国家“863”计划,20世纪80年代,国内有多家公司进行了研究,如中蓝晨光化工研究院、北京橡胶工业研究设计院、西安交通大学等^[6]。20世纪90年代,中蓝晨光化工研究院掌握了对位芳香族聚酰胺纤维的制造技术,2005年,中蓝晨光化工研究设计院实现了芳纶Ⅲ(杂环芳香族聚酰胺纤维)的产业化,商品名为STARAMID F-3。1999年,烟台泰和新材料公司启动建设了国内第一个间位芳香族聚酰胺纤维项目,2004年顺利实现间位芳香族聚酰胺纤维的工业化生产,商品名为泰美达,2009年投资对位芳香族聚酰胺纤维产业化项目,2011年完成工业化,商品名称Tapanan。2011年,苏州兆达特纤科技有限公司与东华大学合作,采用国产原材料、国产专用设备,进行间位和对位芳香族聚酰胺纤维正常连续化制造以及销售,已有产品芳纶1414长丝、芳纶纱线、芳纶短纤维、芳纶布、芳纶有色长丝等。2011年,株洲时代新材料科技股份有限公司开始自主研发高性能间位芳纶材料,2019年第一批芳纶纸实现正式投产。2013年,烟台民士达特种纸业股份有限公司研制并商业化生产了间位芳香族聚酰胺纤维纸(商品名为Metastar)。此外,广东彩艳股份有限公司研发并产业化了间位芳香族聚酰胺纤维以及共聚改性芳香族聚酰胺纤维;河北硅谷化工有限公司研发并生产了对位芳

芳香族聚酰胺纤维(芳纶Ⅱ),商品名为特威纶^[7];江苏圣欧集团(中国)有限公司生产了X-FIPERTM超美斯芳纶纸、芳纶纤维,是国内间位芳香族聚酰胺纤维第二大制造企业,实现了芳香族聚酰胺纤维纸规模化,芳香族聚酰胺纤维绝缘纸生产能力也名列世界第二;四川力通自主建设了间位芳香族聚酰胺纤维蜂窝生产线,依托国产化的芳香族聚酰胺纤维纸及浸渍树脂等技术,研发生产出各种高品质的蜂窝芯材制品;四川辉腾科技股份有限公司生产了杂环芳香族聚酰胺纤维(芳纶Ⅲ)及其复合材料,目前已具备年产50t芳纶Ⅲ的生产能力。以上研究表明我国的芳香族聚酰胺纤维发展速度极快,在不久的将来会赶上并超越国外水平。

1.2 芳香族聚酰胺纤维的品种

芳香族聚酰胺纤维根据元素类型可分成两大类:全芳香族聚酰胺纤维和杂环芳香族聚酰胺纤维。全芳香族聚酰胺纤维按照酰胺基团和苯环上的C原子的连接情况不同划分为对位芳香族聚酰胺纤维(酰胺基团连接在苯环的对位上)和间位芳香族聚酰胺纤维(酰胺基团连接在苯环的间位上)。杂环芳香族聚酰胺纤维(又成芳纶Ⅲ)是由含有其他元素如氮、硫、氧和杂原子之间的二胺和二酰氯缩聚而成的芳香族聚酰胺纤维。在航空复合材料领域中,目前对位芳香族聚酰胺纤维和间位芳香族聚酰胺纤维应用最为普遍^[2],随着杂环芳香族聚酰胺纤维的深入研

究,未来其在航空复合材料领域中将会得到广泛应用。目前,产业化的对位芳香族聚酰胺纤维商品名有 Kevlar(杜邦)、Technora(帝人)、Twaron(帝人)等;产业化的间位芳香族聚酰胺纤维商品名有 Nomex(杜邦)、Conex(帝人)等,虽然二者化学元素组成相同,但由于酰胺基团和苯环的连接方式不同,造就了二者的性能特性差别很大,且应用领域也各有不同。

1.3 芳香族聚酰胺纤维的性能

由于苯环和酰胺的平面共轭效应以及分子链之间的氢键作用,赋予了芳香族聚酰胺纤维强大的物理化学性能^[8],如图2所示。

(1)优异的机械特性。芳香族聚酰胺纤维具有很大的强度,为一般优良钢铁的5~6倍,模量则为普通钢铁及玻璃纤维复合材料的2~3倍,弹性则为普通钢铁的2倍,密度却仅为普通钢铁的1/5,其中对位芳香族聚酰胺纤维的强度为2.8~3.5 GPa,模量为72~175 GPa^[9],目前,国产芳纶Ⅲ的强度可达为2.2 GPa,模量为115 GPa。

(2)优良的阻燃、耐热等特性。间位芳香族聚酰胺纤维的极限氧指数(LOI)约等于28,属难燃纤维,不能在室内自燃,且不会助燃,具备高自熄性,拥有“防火纤维”之美誉^[10-11],对位芳香族聚酰胺纤维的耐热性能要优于间位芳香族聚酰胺纤维,在560℃高温下不分解、不融化,芳纶Ⅲ的极限氧指数(LOI)可达42,在600℃下开始分解。

(3)杰出的化学结构稳定性。稳定的化学结构使芳香族聚酰胺纤维拥有良好的耐一般化学品的特性,耐一般无机酸及化工产物的腐蚀、抗蒸气腐蚀性强,比如 Kevlar-49 在90℃下的H₂SO₄和NaOH中各浸泡4d,纤维的拉伸模量仍保持在初始模量的84%和73%^[12-13]。

(4)优异的耐辐射性能。芳香族聚酰胺纤维耐α、β、γ辐射和紫外光线辐照的特性都非常突出,如 Kevlar-29 在强紫外辐照168h后,其拉伸强度和断裂伸长率保持在初始拉伸强度和断裂伸长率的52.10%和55.53%^[14]。

(5)良好的材料耐久性能。芳香族聚酰胺纤维具有优异的抗摩擦与耐刺伤性等特性,例如 Kevlar 具有优异的抗刀割和抗尖刺测试性能,可应用于个人防护材料以及防弹衣的设计^[15-16]。

(6)极佳的电绝缘能力。芳香族聚酰胺纤维介电常数特别低,为世界公认的优秀绝缘材料,例如间位芳香族聚酰胺纸具有优异的电气性能,其介电常数为1.5~2.5,是一种优异的绝缘材料,此外芳香族聚酰胺纤维在高温、低温、高湿等条件,都可维持极佳的电绝缘能力^[17-18]。



图2 芳香族聚酰胺纤维的主要性能指标

Fig. 2 Main performance indexes of aramid fiber

1.4 芳香族聚酰胺纤维的应用

芳香族聚酰胺纤维拥有轻质、高强度、耐磨性好等优异特点,在宇航、军用、建筑、交通运输、电子电气、体育及运动器械制造等诸多领域中均有广泛应用,如图3所示。

(1)航空航天领域:芳香族聚酰胺纤维密度低、硬度高、耐腐蚀性好,能够作为运载火箭发动机壳体或者航空器的机翼前缘、尾翼前缘、鼻锥等部位作为承载冲击能量的结构部件^[19],以及航空器的翼面尾部,作为功能性透波材料^[20]。

(2)军用领域:由于化学、核和新型军事兵器的迅速发展,人们对于军事防护服的特性也有着越来越多新的需求:坚固耐用、轻巧、防弹、阻燃,以及优异的环境适应性与伪装性能等。在防弹背心与钢盔材料中加入适量芳香族聚酰胺纤维,会使成品体积小、质量轻。此外,芳香族聚酰胺织物还可以粘附于结构物的内壁,达到高效吸附爆轰波,从而避免弹片对人体的危害^[21]。

(3)建筑工程领域:芳香族聚酰胺纤维的延伸性好、密度小、加工自由灵活多样,是一种理想的建筑工程增强材质。用芳香族聚酰胺纤维编织成钢筋状,可用作大规模建筑工程的混凝土增强骨架材质,具备结构高强、质轻,还能耐腐蚀,并同时发挥了良好的抗剪功能^[22]。

(4)交通运输领域:芳香族聚酰胺纤维具有密度低、耐高低温,以及能与橡胶形成良好的界面结合等特性,可用作车辆及航空器上的轮胎帘子线。采用芳香族聚酰胺纤维制造的车轮质量轻、车轮薄、滑动阻低、强度高、耐磨性好、抗切割性能和抗穿刺特性均十分优异^[23]。

(5)电子电气领域:芳香族聚酰胺纤维具有较低的介电系数(与空气的介电常数接近)、优异的透波性能和力学性能、良好的化学稳定性,因此芳香族聚酰胺纤维在变压器的芯线、电路板基材、雷达天线等

电气绝缘以及电子领域中有广泛应用。此外,芳香族聚酰胺纤维优异的力学性能保障了细小且软弱的光缆在拉伸时不会伸长变形可用于制造成光缆中的“张力构件”^[24]。

(6)其他领域:由于芳香族聚酰胺纤维的物理化学性能和稳定性较好,而且耐酸碱腐蚀,既轻质又坚固,因此可用作油田深井的缆绳。芳香族聚酰胺纤维耐热、抗疲劳性很好,可以制成质量较高的手球棍、钓鱼竿、冰橇、单板滑雪、溜达杆、弓箭、赛艇、高尔夫球运动竿等,还可以来制成对户外运动要求较严酷的高山鞋靴、拳击手套、赛艇头盔、赛艇车身之类。芳香族聚酰胺纤维代替石棉生产的强化橡胶保护板和密闭件,可用作车辆空气制动的衬垫与衬圈^[25]。



图3 芳香族聚酰胺纤维的主要应用领域
Fig. 3 Main application areas of aramid fibers

2 芳香族聚酰胺纤维在航空领域中的应用

减轻质量对飞机和航天来说都有着特殊重要性,航天器每减重1 kg,可节约近30 000美元经费,因此选择先进的纤维复合材料是达到减重目标的唯一途径^[1]。采用芳香族聚酰胺纤维制备的复合材料具备比强度高、比模量高和抗耐疲劳性好等优势,用于大中型飞机、商用航空器以及运载火箭等重要结构部件,能在有效降低飞机自重的同时,提高飞行器的有效载荷,并节约动力能源。如美国三叉戟战术飞弹第三级运载火箭发动机壳体使用了对位芳香族聚酰胺纤维/聚砜树脂碳纤维复合物,该复合材料与普通玻纤/环氧树脂碳纤维复合物相比能使发动机壳体减重30%~40%,在减重的同时并提升壳体的机械性能。用对位芳香族聚酰胺纤维帘子线取代了尼龙帘线作为橡胶骨架材料,也能够促进飞行轮胎轻量化和增长寿命。此外对位芳香族聚酰胺纤维还能够用于飞机发动机,以便在发动机产生故障的情形下,保护整体结构不被破坏。

2.1 蜂窝结构材料

芳香族聚酰胺纤维蜂窝是指一类仿照大自然中蜜蜂蜂巢构造、由树脂材料浸渍的芳香族聚酰胺纤

维纤维纸构成的非金属复合材料。芳香族聚酰胺纤维蜂窝复合材料,具有低密度、高强度、高抗冲击力,此外还具有减振、透波、可设计性强等优点。在航空应用领域,芳香族聚酰胺纤维蜂窝是最重要的非金属建筑材料,堪称“瘦身专家”^[26]。

杜邦公司的Kevlar和Nomex制成的蜂窝结构材料在国际通用,使用芳香族聚酰胺纤维蜂窝材料所制成的飞机舱地板、行李舱和隔墙板能够协助飞机制造商降低总载重^[27-28],在大型飞机上所占的比例是60%~70%,在战斗机结构上占了10%~15%。除体重更轻以外,蜂窝材料还具备了极低的导电和耐高温性能,达到了行业规定的安全标准;出色的隔热和隔声特性增加了乘车的舒适性^[29-30]。20世纪80年代,波音767和空客A320等商用班机使用了3%~5%的对位芳香族聚酰胺纤维或与碳纤维材质结合的蜂窝材质,减轻了飞机的质量;此外欧盟的巨型客机空客A380和美国的波音787的飞机舱地板、内饰件、机翼配件等均大量使用了间位芳香族聚酰胺纤维蜂巢材料,在减重的同时达到了减震的效果;美国采用了大规模的芳香族聚酰胺纤维纤维蜂窝芯制备了低成本轻型的美军F35战斗机。中国将Nomex蜂窝所制造的夹层构造运用在军机和民机上,如飞机的襟板、副翼、发电机、座舱、货柜、飞机前缘、直升机螺旋桨、飞机尾梁等部件。近年来,由于国内科技水平的不断突破,烟台泰和新材料股份有限公司生产的间位芳纶蜂窝材料在国产直升机中有了广泛的应用,烟台民士达特种纸业股份有限公司研发的间位芳纶蜂窝材料,通过了中国航空工业集团的技术鉴定^[31],株洲时代新材料科技股份有限公司制备的间位芳香族聚酰胺纤维蜂窝材料,通过了AS9100:2016国际航空航天产品质量管理体系的现场验证评估等。目前,国产大飞机C919等开始使用国产的芳香族聚酰胺纤维蜂窝代替Kevlar和Nomex蜂窝材料^[32-33],来实现飞机减重,应用于大飞机的行李架、顶板等部位,这表明我国的芳香族聚酰胺纤维蜂窝材料的设计水平已在努力追赶世界步伐,但从国产和国外芳香族聚酰胺纤维蜂窝材料的使用量上看,我国与国外仍存在差距。

2.2 纤维缠绕压力瓶

缠绕压力瓶主要使用在呼吸机(如消防吸氧控制系统、登山、老年及疾病吸氧、飞行及飞行控制系统等)和车用压缩天然气燃油气瓶两大应用领域。纤维缠绕压力瓶首先在20世纪50年代用于军事和飞机,压力瓶主要作为军用飞机的喷射控制系统,紧急激励控制系统和发动机重启应用控制系统等,又或者被用作飞行实验室的氧气瓶以及导弹系统的气

压源。每一架飞机都用了相当数量的复合气瓶,用作飞机舱内压缩空气和推进器以及控制系统的动力。

20世纪70年代,美国联邦交通部允许使用玻璃纤维和芳香族聚酰胺纤维制造的环绕气瓶,航空器上带有高压氢气(或其他气体)的瓶子采用了Kevlar纤维细丝制成的外壳,有助于降低航空器的总质量。一般的金属合金气瓶很可能引起爆裂,或喷射出高速的金属碎屑对航空器产生破坏。而使用Kevlar纤维细丝制成的气瓶则只会引起韧性损伤,而不至于破碎为许多碎屑,这就极大地减少了对航空器的损伤危险性。ZHELEZINA等^[34]人开发了一种芳香族聚酰胺复合层板结构,该层压板和由交替的金属片和对位芳香族聚酰胺纺织层组成,具有优异的高速冲击稳定性。WAGIH等^[35]人发明了碳纤维-对位芳纶/环氧树脂混合复合层压板,其中对位芳纶/环氧树脂层为核心,碳纤维/环氧树脂层为面板,这种设计有望利用对位芳纶/环氧树脂复合材料的高能量吸收能力,使复合材料在受到冲击以后,较其他复合材料的强度损失小。结果表明,芳香族聚酰胺纤维复合材料可以减少冲击时带来的损伤,在纤维缠绕压力瓶有着极大的应用前景。

2.3 飞机轮胎

飞机轮胎作为飞机的主要安全性部件,用于保证飞机的平安起落。由于高性能车轮需要同时具有安全可靠、舒适性、质量较小、易于收回和节油等综合性能,因此对于飞机轮胎,安全性与减量尤为重要,这也就对飞机轮胎上提供支撑强度的帘子线提出了更高的性能要求。通过高性能帘子线,能给车轮提供更高的拉伸强度和更强的承载能力,在满足航空器同等载重能力的同时降低了飞机轮胎的质量,从而为增加军事航空载弹载油的体积、民用飞机运载量,给航空器及其他配件创造了更大的设计要求空间。

目前,用于飞机轮胎的尼龙帘子线由于硬度低,耐负荷小、容易变型等缺陷,现在广泛使用对位芳香族聚酰胺纤维制备飞机轮胎的帘子线。芳香族聚酰胺纤维具有优异的耐高温、低密度等特性,能够降低飞机轮胎载重的同时降低了车轮的滑动阻力,有助于提高轮胎韧性和热稳定性^[36-42]。日本帝人公司^[43]开发的Tworon,由于高模量的特性,可以最大限度地减少飞机轮胎的增长,与轮胎的低磨损性能提高100%的着陆次数。程莉等^[44]人制备了一种对位芳纶/锦纶复合帘线,与常规锦纶帘线航空轮胎相比,复合帘线提高了轮胎强度,减轻了轮胎质量,降低了油耗和滚动阻力。JUNG等^[42]人通过将制备的对位芳

纶纳米纤维加入橡胶材料中,制备得到的纤维增强橡胶复合材料可以提高轮胎的整体性能要求,如耐磨性能和节油性能。吴春齐等^[39]人采用对位芳纶制备了芳纶帘线,然后加入粘合增进剂AIR-201进一步改善了芳纶帘线和胶料之间的粘合性。结合以上的研究,可以得知芳香族聚酰胺纤维用于轮胎的帘子线,将提高飞机轮胎的抗冲击变形能力、胎体硬度和机械综合性能,是飞机轮胎的理想骨架材料。

2.4 发动机

随着科技水平的不断提高,对航空发动机的减重也迫在眉睫,航空发动机减重是在保证结构强度、安全性的前提下,尽可能降低其总质量。芳香族聚酰胺纤维及其复合材料具有高比强度、比模量、抗疲劳、吸波、减震等一系列优点,已经在航空发动机风扇机匣等部件上得到广泛应用^[45-48]。

风扇机匣是航空发动机最大的静止部件,采用对位芳香族聚酰胺纤维复合材料包覆的风扇机匣,又称为风扇包容环,其结构是在铝制机匣上缠绕多层Kevlar编织物,最外层用树脂对其进行固化,发动机的质量比之前减轻50%^[48]。由于芳香族聚酰胺优异的伸以及抗割裂等性能,当飞机发动机发生故障,风扇叶片碎片撞击到风扇机匣后,会被芳香族聚酰胺编织物层所捕获,从而保证了飞机发动机的安全性^[47]。易凯等^[49]人开发了一种基于对位芳香族聚酰胺纤维的混杂纤维复合材料层板应用于风扇机匣,采用碳纤维或玻璃纤维与Kevlar纤维制备的混杂纤维复合材料层板具有比纯Kevlar复合层板更优异的抗弹冲击性能,表明可以通过加入第三组分与Kevlar混杂来进一步增强飞机发动机风扇机匣的力学性能。此外芳香族聚酰胺纤维还具有抗颤振和抗声疲劳的特点,可用于航空发动机风扇机匣内侧的消声结构,如CFM56和GE90等航空发动机的消声板均使用了对位芳香族聚酰胺纤维复合材料,张丽娜等^[50]人的研究表明对位芳香族聚酰胺纤维增强复合材料的力学性能满足风扇消音板材料的需求。

3 结语

如上所述,芳香族聚酰胺纤维以密度低、比强度和比模量高、耐磨蚀、耐冲击、低阻燃性等优势,广泛应用于航天航空、建筑材料、交通、电子电气和运动器械等领域。在飞机中广泛应用于二次结构件、飞机轮胎、压力瓶以及发动机等方面。但芳香族聚酰胺纤维的发展仍然存在以下问题。

(1)国外芳香族聚酰胺纤维研究技术水平与生产工艺条件日益完善,国内芳香族聚酰胺纤维加工和生产能力上,和国外水平仍然存在着很大的差距。

(2)国内生产的芳香族聚酰胺纤维仅作为国内

市场的军用战略商品和民用重点物资,在国外市场上亟待投资与开发。

(3)芳香族聚酰胺纤维在航空中虽然有了很大的用途,但为了进一步实现航空减重目标,需进一步开发具有更高性能的芳香族聚酰胺纤维。

(4)芳香族聚酰胺纤维的来源仍然是石油基,对于绿色来源的芳香族聚酰胺纤维的开发也应该得到重视。

参考文献

[1] 王双成,李春霞,邵正丽,等. 对位芳纶在复合材料领域应用的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2013(2): 52-56.

WANG S C, LI C X, SHAO Z L, et al. Research on the application of para-aramid in the field of composite materials [J]. High-tech Fibers and Applications, 2013, 38(2): 52-56,61.

[2] 陈超峰,王凤德,彭涛. 对位芳纶及其复合材料发展思考[J]. 化工新型材料, 2010, 38(6): 1-5.

CHEN C F, WANG F D, PENG T. Thoughts on the development of para-aramid and its composite materials [J]. New Chemical Materials, 2010, 38(6): 1-5.

[3] 马友美,于彦存. 芳纶纤维复合材料在航空领域中的应用与发展[J]. 东方企业文化, 2013,36(24):107.

MA Y M, YU Y C. Application and development of aramid fiber composite materials in aviation [J]. Oriental Enterprise Culture, 2013,36(24):107.

[4] 王红,楚久英. 芳香族聚酰胺纤维研究进展及应用[J]. 国际纺织导报, 2020, 48(4): 4,6-9.

WANG H, CHU J Y. Research progress and application of aramid fiber[J]. International Textile Herald, 2020, 48(4): 4, 6-9.

[5] 张蓓. 我国芳纶纤维的发展概况[J]. 精细与专用化学品, 2010, 18(10): 6-9.

ZHANG B. Development of aramid fiber in my country[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2010, 18(10): 6-9.

[6] 高启源. 高性能芳纶纤维的国内外发展现状[J]. 化纤与纺织技术, 2007(3): 31-36.

GAO Q Y. Development status of high-performance aramid fibers at home and abroad [J]. Chemical Fiber and Textile Technology, 2007(3): 31-36.

[7] 马祥林. 我国对位芳纶实现国产规模化生产[J]. 合成纤维工业, 2013, 36(5): 54.

MA X L. Our country's domestic large-scale production of para-aramid [J]. Synthetic Fiber Industry, 2013, 36(5): 54.

[8] ZHANG B, JIA L, TIAN M, et al. Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review [J]. European Polymer Journal, 2021, 147: 110352.

[9] YANG M, CAO K, SUI L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: a new nanoscale building block [J]. ACS Nano,

2011, 5(9): 6945-6954.

[10] 左键. CrossFit 运动服新材料[J]. 中国纤检, 2015(21): 36-37.

ZUO J. CrossFit sportswear new material [J]. China Fiber Inspection, 2015(21): 36-37.

[11] KIM M, CHOE J. Development of the fire-retardant sandwich structure using an aramid/glass hybrid composite and a phenolic foam-filled honeycomb [J]. Composite Structures, 2016, 158: 227-234.

[12] MIAO L, JIANG T, LIN S, et al. Asymmetric forward osmosis membranes from p-aramid nanofibers [J]. Materials & Design, 2020, 191: 108591.

[13] SPRINGER H, OBAID A A, PRABAWA A, et al. Influence of hydrolytic and chemical treatment on the mechanical properties of aramid and copolyaramid fibers [J]. Textile Research Journal, 1998, 68(8): 588-594.

[14] LI M, CHENG K, WANG C, et al. Functionalize aramid fibers with polydopamine to possess UV resistance [J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2021, 31(7): 2791-2805.

[15] RODRIGUEZ-MILLAN M, DIAZ-ALVAREZ A, ARANDA-RUIZ J, et al. Experimental analysis for stabbing resistance of different aramid composite architectures [J]. Composite Structures, 2019, 208: 525-534.

[16] RAO H M, HOSUR M V, JEELANI S. Stab characterization of STF and thermoplastic-impregnated ballistic fabric composites [M]. Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection. Woodhead Publishing, 2016: 363-387.

[17] ZHU H, NIU M, FENG Z, et al. Synthesis of aromatic polyamide copolymers with reduced dielectric constant [J]. Polymer Science, Series B, 2021, 63(3): 239-244.

[18] QIAN X, YUE L, JIANG K, et al. Nano-modified meta-aramid insulation paper with advanced thermal, mechanical, and electrical properties [J]. Processes, 2021, 10(1): 78.

[19] YANG W, ZHANG X, YANG K, et al. Shear property characterization of aramid paper and its application to the prediction of honeycomb behaviors [J]. Composite Structures, 2020, 254: 112800.

[20] KHATAVKAR N, BALASUBRAMANIAN K. Composite materials for supersonic aircraft radomes with ameliorated radio frequency transmission—a review [J]. RSC Advances, 2016, 6(8): 6709-6718.

[21] CHOI W H, CHOE H S, NAM Y W. Space hypervelocity impact-shielding and microwave absorbing composite composed of cobalt-coated aramid fibers [J]. Composite Structures, 2021, 266: 113875.

[22] YAMDADA H, TATEYAMA K, SASAKI H, et al. Impact resistance to ballistic ejecta of wooden buildings and a simple reinforcement method using aramid fabric [J]. Journal of

Volcanology and Geothermal Research, 2018, 359: 37-46.

[23] 杨京辉, 李红卫, 袁金琪, 等. 芳纶复合帘布在半钢子午线轮胎骨架材料中的应用[J]. 橡胶科技, 2020, 18(3): 0158-0161.

YANG J H, LI H W, YUAN J J, et al. Application of aramid composite cord in semi-steel radial tire frame material [J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(3): 158-161.

[24] PISANI M A. Long-term behaviour of beams prestressed with aramid fibre cables; Part 2: an approximate solution [J]. Engineering Structures, 2000, 22(12): 1651-1660.

[25] PALOLA S, JAVABSHOUR F, KOLAHGAR A S, et al. One surface treatment, multiple possibilities: broadening the use-potential of para-aramid fibers with mechanical adhesion [J]. Polymers, 2021, 13(18): 3114.

[26] WANG C, CHEN X, CHENG L, et al. High-cycle and very-high-cycle fatigue properties of CFRP-aramid honeycomb sandwich structure in three-point bending [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: 106576.

[27] 刘杰, 罗玉清. 高密度芳纶纸蜂窝的力学性能及应用前景分析[J]. 化工新型材料, 2018, 46(2): 252-255.

LIU J, LUO Y Q. Mechanical properties and application prospects of high density aramid paper honeycombs [J]. New Chemical Materials, 2018, 46(2): 252-255.

[28] KIM G, HE Y, KULKARNI S, et al. The influence of aircraft fluid ingestion on tensile properties of aramid fiber composites [J]. Advanced Composite Materials, 2021, 30(4): 365-379.

[29] 许启灏. NOMEX 蜂窝材料切边加工损伤抑制试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.

XU Q H. Experimental study on damage suppression of NOMEX honeycomb material trimming process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[30] 王芙蓉, 陈黎娟. SPC 在芳纶纸蜂窝质量控制中的应用[J]. 质量与可靠性, 2018(4): 31-34

WANG F R, CHEN L J. Application of SPC in quality control of aramid paper honeycomb [J]. Quality and Reliability, 2018(4): 31-34

[31] 牟发章. 烟台美士达航空级蜂窝芯材用间位芳纶纸通过技术鉴定[J]. 造纸信息, 2011(11): 46.

MU F Z. Yantai Meister's Meta-aramid paper for aviation-grade honeycomb core material passed the technical identification [J]. Papermaking Information, 2011(11): 46.

[32] 裕静. C919 成功起飞看我国高性能纤维发展的四大亮点[J]. 纺织装饰科技, 2017(3): 26-27.

YU J. The successful take-off of C919 sees the four highlights of the development of high-performance fibers in my country [J]. Textile Decoration Technology, 2017(3): 26-27.

[33] 喻媛. C919 上用了哪些新材料[J]. 收藏, 2018(1): 28-31.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023年 第1期

YU Y. What new materials are used in C919 [J]. Collection, 2018(1): 28-31.

[34] ZHELEZINA G F, VOINOV S I, SOLOV' EVA N A, et al. Aramid textile laminate for shock-resistant elements of aviation constructions [J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2019, 92(3): 404-409.

[35] WAGIH A, SEBAEY T A, YUDHANTO A, et al. Post-impact flexural behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid composites [J]. Composite Structures, 2020, 239: 112022.

[36] 邓海燕. “芳纶化”和“子午化”是航空轮胎的发展方向[J]. 中国橡胶, 2004, 20(23): 14-15.

DENG H Y. "Aramidization" and "Meridianization" are the development directions of aviation tires [J]. China Rubber, 2004, 20(23): 14-15.

[37] 程莉, 卢秀萍. 芳纶/锦纶复合帘线在航空轮胎中的应用[J]. 轮胎工业, 2013, 33(12): 746-747.

CHENG L, LU X P. Application of aramid/nylon composite cord in aerospace tires [J]. Tire Industry, 2013, 33(12): 746-747.

[38] 安雯. 固特异公司新款芳纶增强轮胎[J]. 橡胶科技, 2005(5): 30-38.

AN W. Goodyear's new aramid reinforced tire [J]. Rubber Science and Technology, 2005(5): 30-38.

[39] 吴春齐, 刘蓉, 俞华英. 粘合增进剂 AIR-201 对航空轮胎芳纶帘布胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2011, 58(6): 339-342.

WU C Q, LIU R, YU H Y. Effect of adhesion promoter AIR-201 on properties of aramid cord rubber for aerospace tires [J]. Rubber Industry, 2011, 58(6): 339-342.

[40] PARK N, SEO J, KIM K, et al. Sidewall-insert compound based on ZnO-treated aramid pulp fibers for run-flat tires [J]. Composite Interfaces, 2016, 23(8): 781-796.

[41] JUNG J, SPDANO H A. Aramid nanofiber reinforced rubber compounds for the application of tire tread with high abrasion resistance and fuel saving efficiency [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(11): 4874-4884.

[42] JUNG J, SPDANO H A. Synergetic effect of aramid nanofiber-graphene oxide hybrid filler on the properties of rubber compounds for tire tread application [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022: 51856.

[43] VAN Der Made, 王云海. 帝人芳纶在轮胎中的应用和开发[C]//中国橡胶工业协会橡胶骨架材料中外技术论坛暨会员大会. 中国橡胶工业协会, 2012.

VAN Der Made, WANG Y H. Application and development of teijin aramid in tires [C]//China Rubber Industry Association Rubber Skeleton Materials Sino-Foreign Technology Forum and Member Conference. China Rubber Industry Association, 2012.

[44] 程莉, 卢秀萍. 芳纶/锦纶复合帘线在航空轮胎中的应用[J]. 轮胎工业, 2013, 33(12): 746-747.

CHENG L, LU X P. Application of aramid/nylon composite

cord in aerospace tires [J]. Tire Industry, 2013, 33 (12): 746-747.

[45] 何泽侃, 宣海军, 胡燕琪. 芳纶纤维布缠绕增强软壁轻质机匣包容性设计研究[C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集(下), 2018.

HE Z K, XUAN H J, HU Y Q. Research on the inclusive design of soft-wall light-weight casing reinforced by aramid fiber cloth winding [C]//Abstracts of the 2018 National Conference on Solid Mechanics (Part 2), 2018.

[46] ZEKAN H E, HAIJIN X, CPNGER B A I, et al. Containment of soft wall casing wrapped with Kevlar fabric [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(4): 954-966.

[47] 沈尔明, 王志宏, 赵凤飞, 等. 风扇机匣材料应用现状与发展[J]. 航空制造技术, 2013, 433(13): 92-95.

SHEN E M, WANG Z H, ZHAO F F, et al. Application status and development of fan case materials [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2013, 433(13): 92-95.

[48] 沈尔明, 王志宏, 滕佰秋, 等. 连续纤维增强复合材料在民用航空发动机上的应用[J]. 航空发动机, 2013, 39(2): 90-94.

SHEN E M, WANG Z H, TENG B Q, et al. Application of continuous fiber reinforced composites in civil aero engines [J]. Aero Engines, 2013, 39(2): 90-94.

[49] 易凯, 孙建波, 杨智勇, 等. 混杂纤维复合材料层板的抗弹冲击性能[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(1): 82-85.

YI K, SUN J B, YANG Z Y, et al. Ballistic impact resistance of hybrid fiber composite laminates [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(1): 82-85.

[50] 张丽娜, 杨坚, 邢彬, 等. 蜂窝夹层结构消音板平压试验研究[J]. 科技创新与应用, 2016 (28): 118.

ZHANG L N, YANG J, XING Bin, et al. Flat compression test of honeycomb sandwich structure muffler panels [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016 (28): 118.