

北京三大科学城协同发展民用航空碳纤维复合材料的研究

李 稼

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘 要: 本文通过分析国内外民用航空碳纤维复合材料产业的发展现状与市场前景, 结合国产大飞机碳纤维复合材料的应用水平, 提出我国民用航空碳纤维复合材料产业面临的三个亟待解决的问题: 基于适航的标准体系完善问题、制造复合材料的核心工艺装备自主化问题、激活其他碳纤维复合材料应用领域的市场需求问题。为解决这三大问题, 深入分析北京三大科学城的创新资源, 对三大科学城协同促进碳纤维复合材料产业发展的路径进行了分析。

关键词: 北京三大科学城; 科技创新中心; 民用航空; 碳纤维复合材料

中图分类号: F410 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2019.05.005

碳纤维是指碳元素的重量占 95% 以上的纤维状碳材料, 其与树脂、金属、陶瓷等基体复合而制成的材料即碳纤维复合材料。其中聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维增强-环氧树脂基体复合材料是最主要的民用航空复合材料, 是世界各国复合材料研究与应用的主要对象^[1,2]。北京作为全国科技创新中心, 在组织实施重大科技项目、突破战略性新兴产业关键技术上具有得天独厚的优势^[3,4]。本文围绕突破“民用航空领域高性能碳纤维复合材料”的产业化技术, 展开三大科学城对北京科创中心建设的贡献路径分析。

1 民用航空碳纤维复合材料发展现状

1.1 碳纤维复合材料的应用领域

碳纤维复合材料的应用分为三大领域: 航空航天、体育用品和一般工业。其中, 一般工业应用主要包括风电叶片、汽车、压力容器、混配模成型、

建筑、碳/碳复合材料、电子电气、船舶、电缆芯等领域^[5,6]。2015—2017 年, 全球碳纤维总销量约 22.9 万吨, 航空航天占 26%, 体育用品占 15%, 一般工业占 59% (见图 1)。同期, 中国碳纤维总销量约 6.0 万吨, 航空航天占 3%, 体育用品占 58%, 一般工业占 39% (见图 2)。可以看到, 我国碳纤维的应用主要集中在人力密集型的体育用品领域, 航空航天领域的需求严重不足, 与国际水平差距显著。

2015 年至 2017 年, 全球碳纤维销售额约 68.9 亿美元, 航空航天占 49%, 体育用品占 9%, 一般工业占 42%。航空航天领域中, 民用航空占 68%, 军用航空占 16%, 航天等其他领域占 16%, 民用航空产业是其应用重点^[6] (见图 3)。

1.2 碳纤维复合材料在国产大飞机上的应用

碳纤维复合材料能够同时满足强度高、变形小、重量轻、耐高温且成本较低的要求, 在航空工业中一直在逐步替代传统的铝合金、钛合金等单一材料。几

作者简介: 李稼 (1989—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为重点科技领域研究。

项目来源: 北京市科委软科学研究资助课题“‘三大科技城’创新生态系统分析与比较研究” (Z171100003217022); 中国科学技术信息研究所重点工作“重点科技领域深度分析与研究 2018” (ZD2018-01); 青海省科技计划资助项目“青海省‘互联网+’绿色产业发展” (2018-0303-ZJC-0023)。

收稿日期: 2019-04-21

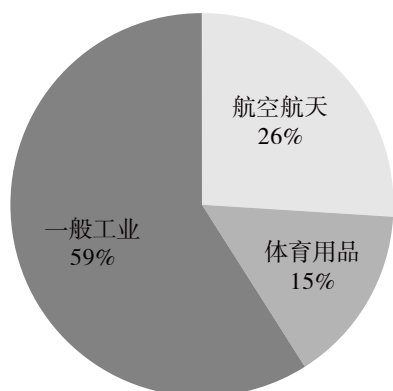


图1 2015至2017年全球碳纤维销售量领域分布

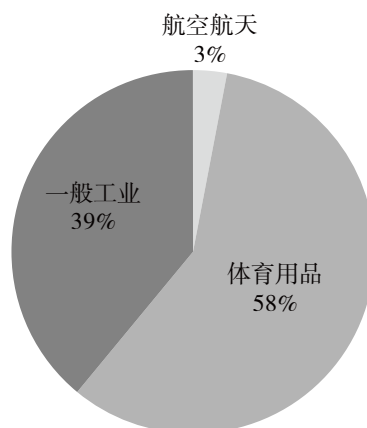


图2 2015至2017年中国碳纤维销售量领域分布

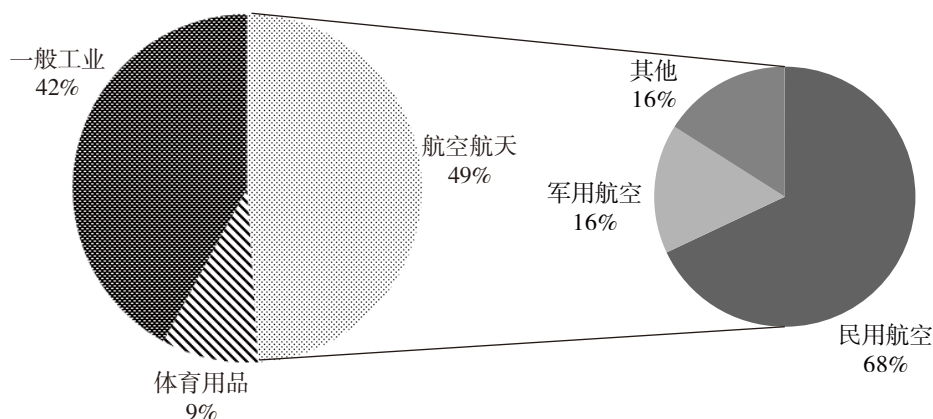


图3 2015至2017年全球碳纤维销售额航空领域分布图

种飞机常用结构材料性能与价格比较如表1所表示。

2018年11月6日，中国商飞公司发布《中国商飞公司2018—2037年民用飞机市场预测年报》指出，到2037年中国机队规模将达到9 965架，预计交付9 008架客机^[7]。我国支线客机ARJ21-700的复合材料技术应用大致上处于欧美20世纪80年代水平，约占飞机结构重量的2%，未来的ARJ21-900会将这一比例提高到30%。单通道干线客机C919复合材料占比达到了12%，与已有几十年历史的对标机型B737MAX和A320neo 15%~20%的水平相比仍有差距，若对比同时代庞巴迪CS300和俄罗斯联合航空制造公司（UAC）MC21超过40%的复合材料占比，则差距更为明显。

代表民航大飞机最先进水平的双通道干线客机波音B787和空客A350复合材料占比分别达到

50%和52%，若我国与俄罗斯联合研制的双通道干线客机CRJ929也能达到50%，则未来20年我国民用大飞机结构用碳纤维复合材料累计市场规模超过650亿美元。具体分析如表2所示，其中，支线客机代表机型包括加拿大CRJ-900、巴西E175-E2、俄罗斯SSJ100、中国ARJ21和日本MRJ90；单通道干线客机代表机型包括美国B737、欧洲A320、加拿大CS300、俄罗斯MC21和中国C919；双通道干线客机代表机型包括美国B787、欧洲A350和中俄联合研制中的CRJ929。

1.3 我国民用航空碳纤维复合材料产业面临的问题

国际上聚丙烯腈（PAN）基碳纤维的生产从20世纪60年代起步，技术壁垒与巨额投入使得国际上真正具有碳纤维研发和规模化生产能力的公司屈指可数，行业全球集中度高。日本是全球最大的

表 1 飞机常用结构材料性能与价格比较表

材料	抗拉强度 (σ_b / MPa)	弹性模量 (E / GPa)	密度 (ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比强度 ($\sigma_b \cdot \rho^{-1} / 10^5 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	比模量 ($E \cdot \rho^{-1} / 10^7 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	价格 (p / $\text{yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$)
航空铝合金板	420	70	2 700	1.56	2.59	45
航空钢板	1 200	210	7 850	1.53	2.68	10
航空钛合金板	1 000	120	4 500	2.22	2.67	250
高强碳纤维 - 环氧树脂预浸料	1 500	140	1 450	10.34	9.66	1 050

表 2 未来 20 年涡扇发动机客机结构性碳纤维复合材料市场测算

测算 机型	单价 (亿美元)	结构重量 ^[8] (吨)	CFRP 结构重量占比 (%)	全球民机交付量 (架)	全球民机 CFRP 需求量 (万吨)	全球民飞 CFRP 市场 (亿美元)	中国民机交付量 (架)	中国民机 CFRP 需求量 (万吨)	中国民机 CFRP 市场 (亿美元)
支线客机	0.47	16.4	30	4 816	2.37	83.0	942	0.46	16.1
单通道干线客机	1	36.1	40	29 691	42.87	1 500.4	5 964	8.61	301.4
双通道干线客机	3.12	92	50	8 195	37.70	1 319.5	2 102	9.67	338.5
合计	—	—	—	42 702	82.94	2 902.9	9 008	18.74	655.9

注：航空航天用碳纤维复合材料按平均 35 万美元 / 吨计价^[6]。

碳纤维生产国，在航空航天应用为主的小丝束碳纤维市场具有统治地位，东丽、帝人东邦和三菱丽阳目前拥有全球丙烯腈基碳纤维 50% 以上的市场份额；美国是世界上最大的碳纤维消费国，代表企业有赫氏（Hexcel）和氰特（Cytec），在碳纤维复合材料设计与制造上具有很大优势；德国的西格里（SGL）公司以大丝束碳纤维生产为主，在汽车用碳纤维复合材料上有较多的技术积累。

1.3.1 产业标准——基于适航的标准体系完善问题

我国碳纤维工业的起步可以追溯到 1962 年，总体上与日本碳纤维的研发同步进行，但在产业化生产和集中度方面却存在较大差距。在民用航空领域，中国商飞的碳纤维供应商目前仍为东丽。截至 2017 年底，中国大陆地区具有超过 1 000 吨产能的碳纤维生产商 7 家，500~1 000 吨 4 家，100~500 吨 7 家，还有 2 家公司产能不足 100 吨，总产能约为 2.6 万吨，不到东丽的 2/3；2017 年国产碳纤维销量仅为 7 400 吨左右，销量 - 产能比为 28.5%，自给率仅为 31.5%。我国主要碳纤维复合材料生产企

业的碳纤维产能规模如图 4 所示。由此可以看到，制约我国民用航空碳纤维复合材料产业壮大的主要因素包括：行业集中度低、技术水平低、企业低端竞争激烈。为引导行业有序发展并提高技术能力，必须在较高的行业标准，尤其是在适航标准的指导下进行研发与生产。

1.3.2 核心设备——制造复合材料的工艺装备问题

我国在航空碳纤维复合材料生产技术与设备上存在短板，致使复合材料构件成本居高不下。航空领域碳纤维复合材料生产工艺大致可分为预浸料 - 热压罐固化成型工艺和液体成型工艺。前者是目前的主流生产工艺，其制造航空领域碳纤维复合材料的成本构成为：材料 15%，预浸料铺叠 25%，装配 45%，固化 10%，紧固工艺 5%，而自动铺放技术则是实现预浸料高效铺叠的关键，也是我国碳纤维复合材料制造技术领域的主要差距所在^[9,10]。

1.3.3 发展策略——一般工业领域复合材料市场需求牵引问题

民用航空碳纤维复合材料产业虽然利润丰厚，

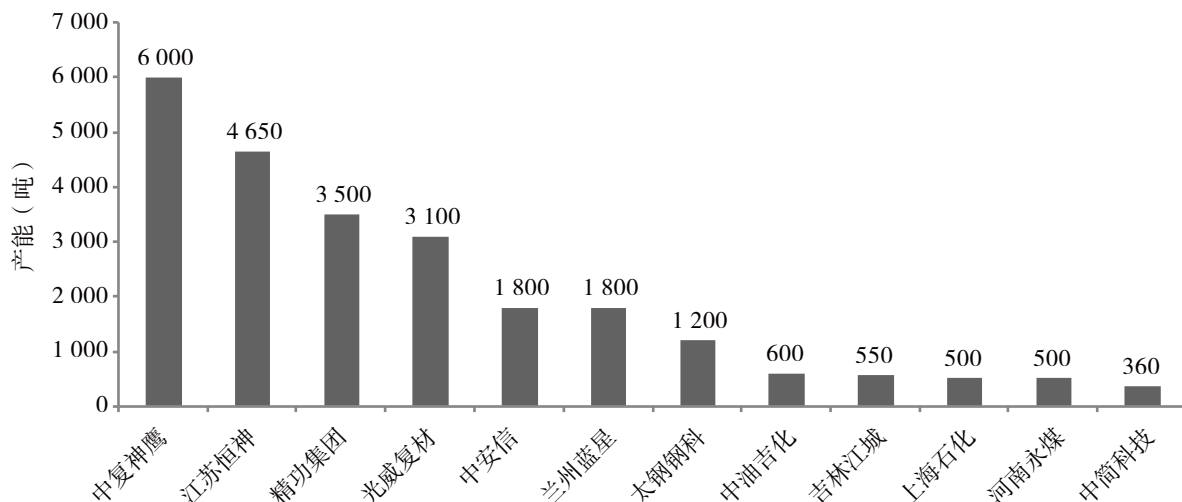


图4 我国主要碳纤维及其复合材料生产企业的产能规模

但门槛过高，不能让所有碳纤维复合材料产业链上的企业全都聚焦于这一需求。事实上，碳纤维产业的发展已分化出两个不同侧重的价值链，包括以航空航天需求为代表的高性能碳纤维和以汽车、风电^[6,11]等一般工业需求为代表的低成本碳纤维。为使整个产业能够生存下去，最终形成合理的产业结构，应当考虑以汽车、风电为代表的中低端应用牵引产业发展，推动航空航天领域的高端应用，并引导自身优势产业更多地采用碳纤维复合材料，实现整个产业的协同发展。

综上所述，为促进我国民用航空碳纤维复合材料产业发展，需要解决上述三个重要问题，北京三大科学城能够为此发挥关键作用。下面就对其创新资源及其作用进行分析。

2 三大科学城的创新资源

2.1 中关村科学城

中关村科学城的创新资源可以概括为深厚的人才与技术积淀，具有很强的原始创新能力，其临近区域内与航空航天领域碳纤维复合材料研究密切相关高校与科研机构共7家，其中域内包括北京航空航天大学、清华大学和中国科学院化学研究所；域外临近区域包括北京化工大学、中国航空发动机集团北京航空材料研究院（621所）、中国航天科技集团北京航天材料及工艺研究所（一院703所）、

中航工业北京航空制造工程研究所（625所）和航天特种材料及工艺技术研究所（三院306所）等。

上述科研机构承担过诸多以原863计划、973计划为代表的重大科技项目，例如863计划课题高强高模碳纤维研制及其应用工艺性研究、国产碳纤维系列预浸料制备与应用关键技术研究；973计划课题超高性能与低成本聚丙烯腈碳纤维的科学基础及共性问题研究、超高模量型碳纤维有机-无机转化多重结构调控与性能相关性研究等。

2.2 怀柔科学城

对于在建的怀柔科学城，在航空碳纤维复合材料方面，预计可以利用到的创新资源为2018年新建的高能同步辐射光源——“北京光源”。“北京光源”由中国科学院高能物理研究所主导，2018年开建，计划2024年建成，耗资48亿元。同步辐射光源的工作原理是接近光速运动的电子在储存环的环形轨道上，通过不同强度的磁场做恒速率、变方向的运动，并产生性能优异的电磁辐射。

同步辐射光源经历了三代快速发展阶段。第一代同步辐射光源是依托于高能物理实验专用的高能对撞机的兼用机；第二代同步辐射光源是基于同步辐射专用储存环的专用机；第三代同步辐射光源是基于性能更高的同步辐射专用储存环的专用机；现在正在研究的基于自由电子激光器的高强度光源设施属于第四代技术。高能同步辐射光源是前

沿基础科学、工程物理和工程材料等战略高技术研究不可或缺的手段。

2.3 未来科学城

未来科学城在发展民用航空碳纤维复合材料方面的创新资源在于入驻的中国商飞北京民用飞机技术研究中心。第一批已入驻企业包括国能集团、中国商飞、国家电网、中国国电、中国海油、中国华能、鞍钢、中国宝武、中粮集团、中国铝业、中国电子、中国电信、中国建材、兵装集团、国家核电；第二批拟入驻企业包括航天科技、中航工业、中国兵器、中国大唐、中国华电、中国联通、中化集团和国投集团。

未来科学城已入驻的航空领域企业为中国商飞于2010年2月26日设立的北京民用飞机技术研究中心（简称北研中心）。该中心在民用飞机复合材料产业化研发上具有突出实力，是中国商飞“大型民机复合材料机翼研制攻关”项目的主要承担单位之一，于2018年6月完成了复合材料机翼典型盒段静力和损伤容限试验，验证了结构设计方案和强度分析方法，同时参与了CR929复合材料前机身攻关全尺寸筒段的段研制工作，并于2018年12月总装下线。

3 三大科学城协同促进碳纤维复合材料产业发展路径分析

3.1 总体思路——核心 + 两翼

北京三大科学城在碳纤维复合材料产业、航空航天产业以及相关的加工测试、技术标准制定上，各有其优势特色或巨大潜力，能够很好地助力民用航空领域碳纤维复合材料的发展，其协同创新的总体结构可概括为“核心 + 两翼”结构。

3.1.1 中关村科学城——软件一翼

中关村科学城提供“软件”支撑。中关村科学城及其临近区域拥有以中国科学院化学研究所、北京化工大学、北京航空材料研究院和北京航天材料及工艺研究所为代表的科研院所，在相关领域承担过大量重要科研项目并取得丰硕成果，在全国起到引领作用，与外省市碳纤维复合材料产业相关的企事业单位建立了长效合作关系，技术积淀深厚，科研经验丰富，人才与人脉优势突出。

3.1.2 怀柔科学城——硬件一翼

怀柔科学城提供“硬件”保障。怀柔科学城尚在

建设过程中，由中国科学院高能物理研究所在技术上主导的新一代高能同步辐射光源预计2024年竣工，加之该所具有同步辐射光源实验装置的长期使用和运营维护经验，预计可在前沿基础科学、工程物理和工程材料等研究领域提供有效实验手段，为碳纤维复合材料领域关键共性技术、测试验证技术提供帮助。

3.1.3 未来科学城——核心

未来科学城发挥“核心”牵引作用。未来科学城已入驻中国商飞北研中心，民用飞机机体结构碳纤维复合材料的加工成型工艺及其结构力学性能是其最重要的技术方向，中心的企业背景及其工作主持者长期在空客供职的经历，使得北研中心创新目标明确，能够敏锐察觉市场动向，迅速抓住产业最新动态，促进民用航空产业对碳纤维复合材料产业发展的牵引。

结合“军民融合发展”与“京津冀协同发展”，三大科学城促进民用航空碳纤维复合材料产业发展路径如图5所示。下面就从三个关键问题——产业标准、核心设备与发展策略来予以阐释。

3.2 完善碳纤维复合材料标准与测试体系

三大科学城应在民用航空碳纤维复合材料产业化中发挥指导性、引领性作用，通过大量测试，结合数理统计分析领域的创新，深入研究复合材料失效过程在不同尺度上的力学行为，同时与民航局、中国民航大学和航空航天军工单位横向展开深度合作，完善细化以实验数据为基础的碳纤维复合材料产业标准，并将相应模式与标准移植到复合材料的一般工业应用领域。

3.2.1 借鉴适航管理标准中的复合材料认证测试方法

我国适航管理标准是由中国民用航空局（CAAC）负责制定的，其在很大程度上借鉴了美国联邦航空管理局（FAA）制定的美国适航管理标准，且各国的适航管理标准基本类似。其中，复合材料适航标准，即咨询通告AC20-107B/复合材料认证测试方法，与航空器、发动机、机载设备和材料这4类民用航空产品都有关系^[12]。天津市中国民航大学在研究运输类飞机复合材料结构相关适航规章、美国联邦航空管理局相关咨询通告、政策公告和美国联邦航空管理局技术报告的基础上，总结和分析了近年来国内外民用飞机复合材料结构合格

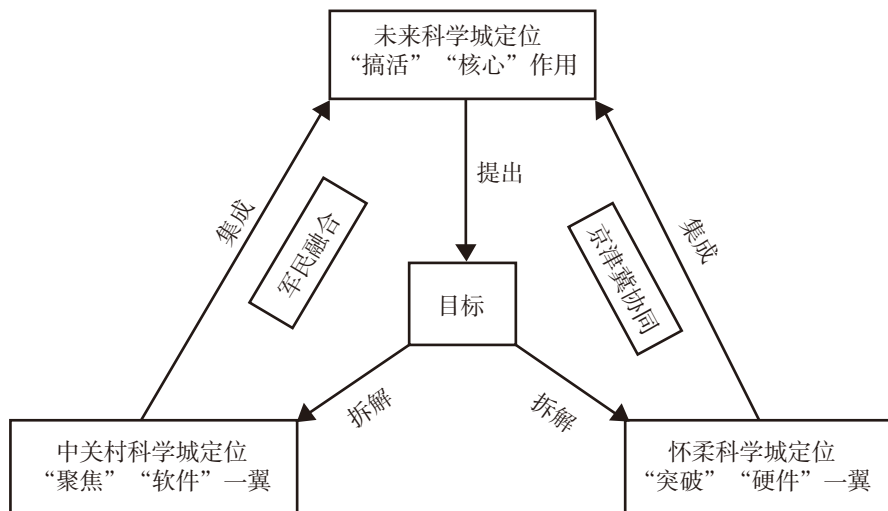


图5 三大科学城协同促进碳纤维复合材料产业发展路径示

审定技术领域的研究成果和应用经验^[13]，结合这一工作，可开展国产碳纤维复合材料的认证测试。

3.2.2 北研中心牵头完善民用航空复合材料适航标准

按照国际惯例，“一流企业制定标准，二流企业创造名牌，三流企业生产产品”，随着中国民用航空局与美国联邦航空管理局之间适航互认的落地，尤其是在ARJ21通过美国联邦航空管理局“影子审查”，中美双方实现适航认证过程和能力的相互认可。北研中心已经开展了大量民用航空碳纤维复合材料的相关研究，下一步应与中国民航局共同牵头完善民用航空复合材料适航标准。以此为基础，应进一步考虑建立并完善风电叶片、新能源车车体、轨道交通装备结构等碳纤维复合材料应用领域的验证测试标准，抢占行业发展制高点。

3.2.3 借助四大航空航天集团的复合材料结构研发测试能力

我国发展碳纤维复合材料的初衷在于国防建设，主要服务于包括各种军机、火箭和导弹在内军工产品的研制，科研主体为现在的中国航空工业集团、中国航空发动机集团、中国航天科技集团和中国航天科工集团这四大军工集团下单位，具有代表性的包括航天材料及工艺研究所（航天—院703所）、北京航空材料研究院（621所）、中航复合材料有限公司，它们在复合材料测试技术上具有雄厚实力，与中关村科学城区域内相关科研院所

有密切合作关系和长期人员交流，可以形成军民融合的“集团作战”优势。

3.3 攻克飞机复合材料构件生产核心装备自动铺放设备

现代大型飞机采用复合材料整体结构部件是明显的发展趋势。用于制造复合材料整体构件的自动铺放设备——自动铺带机（ATL）、自动铺丝机则成为飞机制造的核心工艺装备，极大地降低了制造成本，缩短工时，节约人力。其中，自动铺丝技术难度和复杂程度远大于自动铺带技术，是需要重点攻克的核心工艺装备。

3.3.1 紧密跟踪世界自动铺放设备的发展趋势

随着复合材料构件在现代飞机上越来越广泛应用，航空制造业对ATL/AFP机床需求日益增多，要求也越来越高。市场需求推动ATL/AFP机床进一步发展，主要方向包括：高速生产机床、多机生产环境、多铺放头机床、热塑性纤维铺放机床^[14]、ATL/AFP混合机床、干纤维自动铺放液体成型技术等。

3.3.2 重点突破自动铺放设备的技术与应用难点

我国自动铺放技术亟待突破的难点包括：高效铺带技术、铺放机器人化^[15]、自动铺丝装备可靠性、干铺丝技术特种干丝预浸纱、热塑性铺放技术相关铺放装备、面向自动铺放的复合材料设计等^[16]。在自动铺放技术的应用上，除航空航天领域的需求，应特别注重挖掘其生产汽车车体和轨道交通装备结

构的潜力。

3.3.3 巩固北京在自动铺放设备研制上的领先地位

北京在自动铺放设备研制上处于领先地位。北京航空制造工程研究所（625所）是国内唯一专门从事航空制造技术和专用设备开发的综合性工艺研究所，该所于2014年研制成功我国首台大型自动铺带机；2015年集成引进的纤维束自动铺放头，成功研制自动铺丝机。另一方面，C919机体供货商之一的航天特种材料及工艺技术研究所（三院306所）在自动铺放设备应用上有丰富经验。两家单位可联合成立ATL/AFP生产企业，并针对不同用户需求进行定制化生产。

3.4 坚持高中低端齐头并进的碳纤维复合材料产业发展策略

考虑到我国民用航空产业刚开始重新起步的现状，暂时难以提供足够的市场需求牵引碳纤维复合材料产业发展，因此，应协同其他中低端下游应用领域，支撑京津冀地区相关企业有足够的时间将技术能力升级到满足高端的航空航天领域需求上，给予资金充裕、产能充足的规模以上企业以技术支持，最终实现碳纤维复合材料产业高中低端全覆盖。

3.4.1 着力发展低成本大丝束碳纤维

大丝束碳纤维最大的优点是低成本。日本东丽公司通过对美国ZOLTEK公司的收购成功布局大丝束碳纤维市场；SGL则为宝马i3系列电动车提供了大丝束碳纤维复合材料构件。我国碳纤维生产目前仍以小丝束碳纤维为主，从产业全面升级的角度来说，未来我国的碳纤维复合材料发展要靠大丝束碳纤维^[17]。北京应着力于低成本大丝束碳纤维复合材料的产业化与应用测试研究，及其在风电叶片、新能源汽车、轨道交通装备等一般工业领域的产业化推广，同时进一步从原丝生产、碳化工艺、复合材料构件大规模高效生产等角度进行突破，开发成本更低的大丝束碳纤维。

3.4.2 全力推进新能源汽车的碳纤维复合材料轻量化

新能源汽车产业市场潜力巨大，其轻量化努力为碳纤维复合材料产业提供了广阔前景^[18]。然而，应用于航空航天产业的聚丙烯腈基碳纤维技术路线成本过高，复合材料生产效率低，必须开发出低成本的碳纤维及高效率的复合材料成型工艺以适应汽车产业，德

日两国均已为此投入巨资，我国应尽快布局。

3.4.3 重点研究高铁碳纤维复合材料轻量化

高铁是我国装备制造业的名片，具备较强的自主研发能力，其轻量化技术将是巩固我国轨道交通产业国际市场地位的重要举措。全球各大高铁技术公司都在加紧开发轨道交通用碳纤维复合材料^[19]。我国的中车长客与江苏恒神合作开发出了碳纤维复合材料地铁车体；中车青岛四方和中车株洲所也在车体的车头罩、设备舱、裙板和底板等部位用碳纤维复合材料构件进行了替代。北京应考虑在第二批入驻未来科学城的央企中加进中国中车集团，引导其设立“高铁车体碳纤维复合材料轻量化研究中心”，目标是实现复合材料在轨道交通装备上的产业化应用。

4 结论及建议

北京三大科学城在碳纤维复合材料产业、航空航天产业以及相关的加工测试、技术标准制定上，各有其优势特色或巨大潜力，能够很好地助力民用航空领域碳纤维复合材料的发展。基于这一结论，本文提出如下建议：

北京三大科学城相关科研院所应着力于大丝束碳纤维及其各尺度复合材料构件的微观—细观—宏观力学性能基础研究，努力在数据分析与测试方法上实现创新，争取从原丝生产和碳化工艺角度实现原理性、颠覆性创新，助力相关企业开发出成本更低的大丝束碳纤维。在建的高能同步辐射光源可应用于大丝束碳纤维、基体及两者结合能力、界面性能在微观尺度的表征等基础性研究。

利用北京航空材料研究院等军工科研单位在军品复合材料测试领域的人才与技术，服务于民机研制；利用北京航空制造工程研究所在自动铺放设备上的集成开发能力，以及航天特种材料及工艺技术研究所的使用经验，攻克自动铺放设备研制难题；成立专门企业，尽快实现自动铺放设备的自主化，以及在飞机制造上的商业化应用，进一步探索其在新能源汽车与轨道交通装备车体制造上的潜力。

中国民航大学、中国民用航空局应加强与商飞北研中心的合作，在借鉴研究美国联邦航空管理局复合材料适航认证标准的基础上，形成适合我国产业特点的复合材料验证测试标准体系，以服务于我

国未来新机型甚至其他高端装备的研制。■

参考文献：

- [1] 徐樾华, 王宇. 国产高性能聚丙烯腈基碳纤维技术特点及发展趋势 [J]. 科技导报, 2018, 36 (19): 43-51.
- [2] 李书乡, 马全胜, 张顺. 中国高性能碳纤维产业的创新发展 [J]. 科技导报, 2018, 36 (19): 73-80.
- [3] 张赤东. 北京科技创新中心建设中的企业创新主体分析 [J]. 全球科技经济瞭望, 2018, 33 (2): 16-26.
- [4] 王伟楠, 李浴, 陈健. 北京市“三城一区”问题初探与对策建议 [J]. 全球科技经济瞭望, 2018, 33 (7): 56-62.
- [5] 郑佳, 袁学敏. 碳纤维技术在不同应用领域中的发展状况研究 [J]. 高技术通讯, 2016, 26 (1): 37-44.
- [6] 林刚. 2017 全球碳纤维复合材料市场报告 [J]. 纺织科学研究, 2018 (7): 50-71.
- [7] 中国商飞公司. 中国商飞公司市场预测年报 (摘要) (2018—2037) [J]. 大飞机, 2018 (11): 23-28.
- [8] 尹海莲. 复合材料机体成本计算方法及其在飞机综合设计中的应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] 郑广强, 姚锋, 周晓芹. 自动铺丝技术及其在 A350 制造过程中的应用 [J]. 航空制造技术, 2017 (16): 76-82.
- [10] 韩克清, 严斌, 田银彩, 等. 碳纤维及其复合材料高效低成本制备技术进展 [J]. 中国材料进展, 2012, 31 (10): 30-36+20.
- [11] 杨小平, 隋刚. 碳纤维复合材料在新能源产业中的应用进展 [J]. 新材料产业, 2012 (2): 20-24.
- [12] 沈真, 梁中全, 李国明. 对复合材料体系适航鉴定的解读 [J]. 高科技纤维与应用, 2012, 37 (4): 18-24.
- [13] 邹田春, 冯振宇, 陈兆晨, 等. 民机复合材料结构适航审定现状 [J]. 材料导报, 2010, 24 (21): 94-96.
- [14] 戚梦蝶, 闫宝瑞, 信春玲, 等. 热塑性复合材料自动铺放成型工艺 [J]. 塑料, 2017, 46 (5): 66-68, 80.
- [15] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (3): 1-17.
- [16] 文立伟, 肖军, 王显峰, 等. 中国复合材料自动铺放技术研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (5): 637-649.
- [17] 侯传礼. 大丝束碳纤维应用及展纱设备研究进展 [J]. 碳纤维复合材料, 2015, 32 (1): 51-53.
- [18] 林刚. 纤维复合材料的多形态化与汽车轻量化 [J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39 (5): 26-33, 37.
- [19] 沈真. 交通运输领域复合材料结构低成本之路——四论国产碳纤维产业化 [J]. 新材料产业, 2018 (10): 27-29.

Research on Cooperative Development of Carbon Fiber Reinforced Plastic for Civil Aviation in the Three Science Cities of Beijing

LI Nong

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: By analyzing the development status and market prospects of domestic and foreign carbon fiber reinforced plastic (CFRP) industry for civil aviation, and considering the application level of CFRP for domestic large aircraft, this paper puts forward three urgent problems China's CFRP industry for civil aviation facing: improvement of airworthiness standard system, independence of core technology and equipment for manufacture of CFRP, and activation the market demand of other applications of CFRP. In order to solve these problems, the innovative resources and functions of the three science cities of Beijing are analyzed in depth, and the ways of developing CFRP industry by the three science cities are analyzed.

Key words: the three science cities of Beijing; science and technology innovation center; civil aviation; carbon fiber reinforced plastic