

工程视野下的高性能碳纤维材料发展现状分析

车 晶

(中国科学院大学 科研处, 北京 100049)

摘 要: 高性能碳纤维物化性能优越, 是航空航天等重大工程急需的关键材料, 属于国家战略性资源。因国际封锁, 以及国内生产水平有限, 目前尚无法完全满足市场和战略性需求。介绍了高性能碳纤维的发展历程和现状, 并基于工程科学理论知识, 分析了高性能碳纤维材料的制造流程, 梳理了全流程中的“卡脖子”问题, 对其发展面临的一系列问题进行了探讨。认为对于类似高性能碳纤维这样的重大工程中的关键材料, 应采用工程思维对其制造的全流程进行流程工程学研究, 通过提升关键材料制造水平辐射带动相关基础学科发展和机械制造自动化、智能化升级。

关键词: 高性能碳纤维; 战略性材料; 工程思维; 流程工程学

中图分类号: TB3

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2020)06-0556-08

高性能碳纤维材料(High-Performance Carbon Fiber)是诸多重大工程急需的典型先进性材料, 尤其是在国防军工、航空航天领域等^[1, 2]。业界广为流传着一句话:“一代材料, 一代装备, 一代产业。”在航空领域, 这句话又被具体阐述为:“一代材料, 一代飞机。”^[3]碳纤维材料的出现完美地印证了这句话, 其高强轻质的优异特性使其在轻量化领域尤其是结构减重应用方面成绩斐然。碳纤维及其复合材料在航空航天、轨道交通、海装、建筑、工业应用、新能源(风电)等领域表现出色, 其出现更是促使航空业得到了进一步的蓬勃发展^[4]。而高性能碳纤维是其中的佼佼者。高性能碳纤维突出的高比强度和高比模量, 使其成为了导弹、航天器等军用高端领域的关键材料。

基于长期的知识积累和强大的工业基础, 美国、日本等国关于高性能碳纤维及其复合材料的性能及制备研究已经相当成熟。国内经过数十年的追赶, 也取得了一些可喜的成绩^[1, 5-7], 但其在国内的发展应用依然受限。不仅高强高模等小丝

束碳纤维材料核心技术与国外发展水平仍有较大差距, 高端应用仍依赖进口; 相对容易制造的大丝束碳纤维材料产业化水平也仍需提升, 且随着未来工业界包括风电、汽车行业大规模的使用, 其产能缺口也将进一步加大。本文首先将介绍高性能碳纤维材料的发展历程, 厘清目前国内需求困境的由来。碳纤维的生产制造属于典型的流程制造业, 本研究将基于工程科学的理论对其制造的全流程和“卡脖子”的问题进行梳理, 采用工程思维对其在国内的发展进行探讨, 以期引发相关从业者的思考和讨论。

1 碳纤维材料发展简史

碳纤维是将有机纤维经预氧化、高温碳化后形成的纤维状聚合物碳, 理论上所有含碳高分子均可作为其前驱体材料。因聚丙烯腈(PAN)基碳纤维产量占碳纤维总产量的90%以上, 因此通常所说的碳纤维材料即为PAN基碳纤维材料^[5]。碳纤维及其复合材料具有高强、高模、耐高温、

耐腐蚀、耐疲劳、导电、导热等一系列优异的性能,很快成为了轻量化材料家族的一员^[8,9]。杜善义院士曾说“碳纤维,是具有一定颠覆性的技术,

其本身具有一些优越性,是别的传统材料不可替代的”^[10]。图1以用途结合时间为脉络,梳理了碳纤维材料的发展简史。

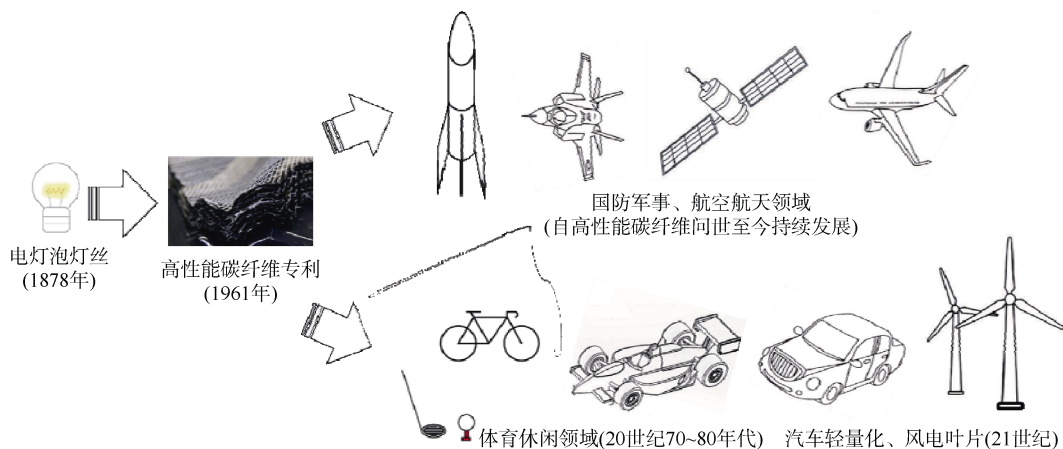


图1 碳纤维材料发展简史

碳纤维最早于19世纪80年代以灯丝的形式诞生于美国^[11]。1960年,美国的罗格·贝肯发现了碳纤维的石墨晶须结构,这一发现成为了高性能碳纤维相关基础研究的里程碑^[11]。然而自发现碳纤维开始,美国主要关注的是人造纤维基碳纤维技术,高性能PAN基碳纤维的研究则由日本开启并发扬。20世纪60年代日本科学家近藤昭男申请了聚丙烯腈制备碳纤维的专利^[12],随之日本科学界和工业界迅速跟进与推广,使得日本一举占据了相关技术的先导地位。1970年日本东丽与美国联合碳化物公司签署了技术互换协议,美国也开始在高性能PAN基碳纤维领域发力。

在国内,对PAN基碳纤维的研究始于1962年,但多年未有进展,生产出的原丝和碳纤维力学性能较差,与国外产品质量差距大。因技术没有根本性突破,参与研发的单位陆续退场,仅中科院山西煤化所、长春应化所、化学所等为数不多的单位相关技术团队默默坚持。国内对于碳纤维材料研发的转折点发生在2000年。我国著名材

料科学家、战略科学家师昌绪院士在2000年提出了要“抓一抓碳纤维”的建议,并于次年给中央提交了《关于加速开发高性能碳纤维的请示报告》^[13]。同年10月,国家科技部设立了碳纤维专项。在师昌绪先生的推动下,国内对于碳纤维的研究陆续有了各个层面的支持。

2 作为国家战略性资源的高性能碳纤维材料

如前所述,碳纤维及其复合材料具有典型的轻量化特征,且材料具有可设计性和易加工性,尤其是高性能碳纤维力学性能达到高端军用领域标准,在国防军事、航空航天高端领域受到各国的青睐。采用高性能碳纤维复材能够实现武器系统的轻量化,提高武器射程、快速反应能力和精确打击能力。20世纪90年代以后,美国的战斗机大量采用了碳纤维复合材料结构构件,包括尾翼、机身蒙皮、机翼壁板和蒙皮等,占比可达30%,满足了战斗机高机动性、超音速巡航及隐身的需

部分型号的碳纤维复合材料能有效地吸收雷达波,美国的p-22超音速飞机、幻影III战斗机、B-2隐形轰炸机等机身材质采用了碳纤维复合材料作为雷达波的吸收件。

求^[14]。碳纤维应用在商用飞机上时, 其减重作用可直接降低飞机运营与维护费用^[15]。高性能碳纤维亦具有优异的空间环境稳定性, 满足太空极端环境对材料的要求, 可用于卫星外壳、仪器安装结构板等本体结构、太阳能电池阵结构、天线结构、桁架结构等^[16, 17]。根据国内公开的文献, 作为我国战略性资源之一, 在高端国防军事领域,

碳纤维材料已被成功应用于卫星结构构件、火箭发动机壳体、火箭导弹壳体、导弹喷管和弹头等多种战略武器。在商用飞机方面, 2017 年首飞的国产大飞机 C919 中碳纤维复合材料的使用量达到了 11.5%左右^[2]; 军用飞机方面, 歼-20 使用了性能优异的 T700 级碳纤维, 复合材料使用量达到了 20%左右。

表 1 2012 年以来碳纤维材料部分政策支持情况

时间、机构及名称	相关内容
2012 年 国务院 《“ 十二五 ” 国家战略性新兴产业发展规划》	新材料产业高性能复合材料部分: 以树脂基复合材料和碳碳复合材料为重点……重点围绕聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维及其配套原丝开展技术提升……加快推广高性能复合材料在航空航天、风电设备、汽车制造、轨道交通等领域的应用。
2012 年 工信部 《新材料产业 “ 十二五 ” 发展规划》	聚丙烯腈碳纤维位列重点产品目录高性能纤维第一位, 其关键技术装备为牵伸机、预氧化炉、低温碳化炉、高温碳化炉。
2013 年 工信部 《加快推进碳纤维行业发展行动计划》	部分行动目标: 高强度碳纤维单线产能产量达到千吨级并配套原丝产业化制备, 高强中模型碳纤维实现产业化, 高模型和高强高模型碳纤维突破产业化关键技术。部分行动计划: 系统研究碳纤维及其复合材料全产业链的关键技术, 优化工程实验和工程化条件, 重点支持高效聚合引发剂、大容量聚合、高速纺丝、快速预氧化等共性工艺技术, 以及宽口径碳化、石墨化等装备的研发。
2016 年 国务院 《“ 十三五 ” 国家科技创新规划》	碳纤维及其复合材料的研发及应用被列入科技创新 2030 重大工程。
2016 年 国务院 《“ 十三五 ” 国家战略性新兴产业发展规划》	加强新材料产业上下游协作配套, 在……碳纤维复合材料……等领域开展协同应用试点示范, 搭建协同应用平台
2016 年 工信部 《石化和化学工业发展规划 (2016~2020 年) 》	化工新材料创新发展工程中: 重点发展高强和高模碳纤维……等高端产品。重点突破高强碳纤维的低成本、连续稳定、规模化生产技术, 加快高强中模、高强高模级碳纤维产业化突破。
2017 年 国家发改委 《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》	高性能碳纤维及其复合材料被列入新材料产业重点产品目录。
2017 年 国家发改委 《增强制造业核心竞争力三年行动计划 (2018~2020 年) 》	高性能碳纤维材料及其应用被列入重点发展计划。
2018 年 质检总局联合工信部、发改委等 《新材料标准领航行动计划 (2018~2020 年) 》	研制碳纤维材料制备相关技术标准。构建高强高模碳纤维标准体系。

注: 内容整理自国务院、工信部等网站公开资料。

部分文件来源网址: http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/20/content_2187770.htm; http://www.gov.cn/gzdt/2012-02/22/content_2073383.htm; http://www.gov.cn/gzdt/2013-11/07/content_2523519.htm; http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm; http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/19/content_5150090.htm; <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/W020191104624321238730.doc>; <http://www.gov.cn/xinwen/2018-09/22/5324533/files/dcf470fe4eac413cabb686a51d080eec.pdf>; <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2017/4/374657.shtm>; http://www.gov.cn/xinwen/2017-11/29/content_5243125.htm。

因其在重大工程中的特殊作用，碳纤维尤其是高性能碳纤维材料及相关技术、设备，和核武器、芯片制造技术等一直都在欧美日对华的禁运名单之列。为尽快实现碳纤维及其复合材料的自主国产化，国家从政策层面给予了碳纤维材料各方面的支持。表 1 给出了 2012 年以来部分与碳纤维相关的发展规划及政策。

可以看出，从“十二五”起，国家密集出台了相关政策与文件，从政策层面大力扶持碳纤维产业，并大力引导全社会资源投入，一时间，诸多碳纤维企业或相关项目在国内纷纷落地。然而，预想中的国际碳纤维产业化新的结构重组和产能扩张仍未出现，国内高性能碳纤维材料“卡脖子”的情况仍未得到有效解决。

3 碳纤维材料的制造流程及难点

碳纤维行业是典型的流程制造业，其完整产业链从一次能源直到终端应用。针对该类型制造业所具有的连续性特征，可采用流程工程学来分析其运行规律和本质特征^[18]。流程工程学的研究对象不是孤立的技术、设备或工序，而是连续的、整体化的制造流程。以 PAN 基碳纤维为例，其上游为用于预浸或增强的 PAN 原丝生产，中游为碳纤维和碳纤维编织布、预浸布等制品生产，下游

为可应用于航空航天、体育休闲、风电叶片、汽车等领域的碳纤维复合材料部件和工业产品生产（图 2）。目前就国内的发展现状来看，上中下游皆存在尚未突破的关键技术和难点^[5]。

（1）上游：PAN 原丝生产。首先从石油、煤炭、天然气等一次能源可以获得丙烯，丙烯经氨氧化后得到单体丙烯腈。丙烯腈经聚合反应和湿法纺丝或干喷湿纺等工艺后得到 PAN 原丝。涉及的操作包括：聚合、脱泡、计量、喷丝、牵引、水洗、上油、烘干收丝等步骤。目前存在的问题是难以稳定获得高纯化、高强度、致密性好、瑕疵少的高性能 PAN 原丝。聚合物原丝碳化时，其原有的聚合物结构包括存在的结构缺陷将完整保留下来，因此原丝的质量高低，是决定碳纤维性能的不可逆转的第一步。为减少因 PAN 均聚物预氧化过程中集中放热造成的大孔缺陷，可将丙烯腈单体与丙烯酸甲酯、衣康酸等单体共聚，但共聚单体的含量和其在聚合物链上的分布会影响原丝结构、纺丝溶液流变性能及预氧化工艺。目前，中科院化学所、长春应化所等研发单位针对 PAN 原丝生产进行了一系列的研究。因聚合物结构与性能之间的关系向来是高分子学科的难点与重点，对碳纤维及其复合材料成分、结构、工艺、性能相关知识的积累与有效转化仍较为缺乏，需

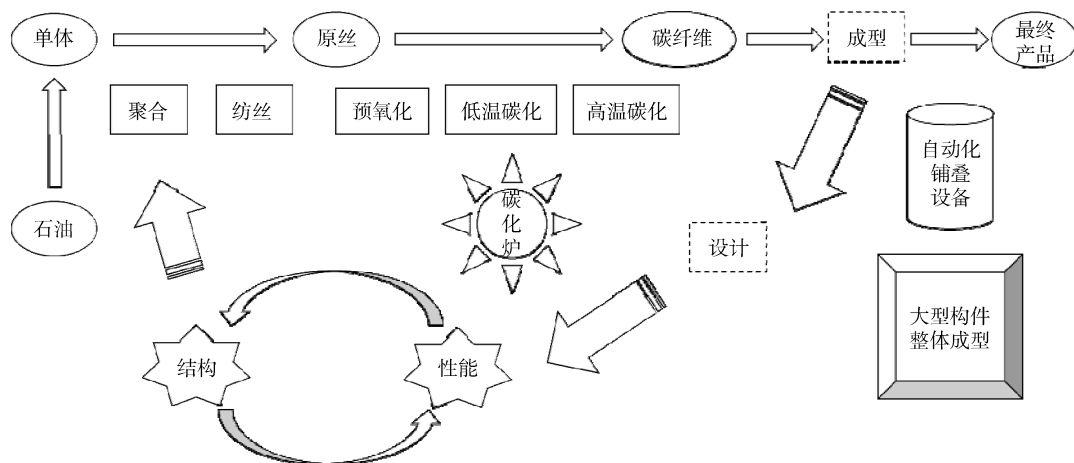


图 2 典型的碳纤维制造全流程简图

要长期的相关基础学科的投入与建设。

此外, 纺丝过程涉及温度和速度的精密控制, 先进的纺丝技术是目前美日等国家在高端原丝方面与我国拉开差距的途径之一。对于 PAN 纺丝溶液的研究有很多, 其溶液中存在的微凝胶对溶液可纺性影响较大。国内有部分生产厂家采用传统的共聚物连续聚合工艺, 来防止聚合过程中的凝胶化。国外技术积累多, 工艺更为先进, 创新性更强。如 2015 年, 在 DAPRA 资助下, 美国佐治亚理工学院研究小组开发了创新的 PAN 基碳纤维凝胶纺丝技术, 采用凝胶将聚合物链联结在一起, 产生了强劲的链内力和微晶取向的定向性, 保证了纤维束在高弹性模量所需的较大微晶尺寸情况下仍具备高强度, 在未损失碳纤维高强度的情况下提升了高模量值。

(2) 中游: PAN 基碳纤维制品生产。原丝先预氧化, 后经低温和高温碳化后得到碳纤维, 经表面处理、上浆后得到碳纤维织物和预浸料。涉及的操作包括: 放丝、预氧化、低温碳化、高温碳化、表面处理、上浆、烘干收丝、卷丝等步骤。如果说上游的原丝尚能通过购买获得, 那么中游的高性能碳纤维制品可以说是受到了最为严格的禁运。例如, 美国国土安全部曾多次“钓鱼执法”, 逮捕所谓试图违规购买碳纤维的中国商人^[19]。这一阶段涉及到的卡脖子技术较多, 举例如下。

1) 预氧丝的制备。预氧化的目的是将热塑性 PAN 线形链结构转化为耐热的梯形结构, 使其在碳化时热力学稳定, 保持纤维态, 该过程包括复杂的物理和化学变化。预氧化的温度需控制在 PAN 聚合物的玻璃化转变温度和热裂解温度之间, 在此过程中, 需要根据重量配比加入多种稳定剂, 如路易斯酸、有机金属络合物盐等。现有研究已表明, 氧气在 PAN 纤维预氧化中起着重要

的作用^[20], 且在设定工艺和运行参数时需要考虑给予 PAN 原丝高温预牵伸所需的张力^[21], 操作复杂, 对设备要求高。可以说, 预氧化过程是碳纤维制备耗能最多、花费最多、耗时最长的工艺过程^[22]。

2) 碳化过程。在碳化过程中, 耐热的 PAN 预氧丝主要结构保持稳定, 较小的梯形结构进一步交联、缩聚, 非碳元素在高温下被逐步排出, 碳逐渐富集, 最终形成乱层石墨结构。中科院化学所的系列研究表明, 碳纤维材料的高模量主要来源于石墨晶体的重新排列, 高强度则主要来源于石墨片之间的连接, 但目前碳纤维的机械性能与其微缺陷融合和形状之间的关系尚不清楚^[5]。碳化时间一般仅为几分钟。就目前的封锁及发展情况来看, 关键设备“碳化炉”是碳纤维生产中最为核心和关键的设备, 其稳定性、可靠性和连续性影响着生产的运行和最终产品的性能。例如, 对于百吨级碳纤维生产, 碳化炉炉口宽度需在 1 m 以上, 且需配套非接触式迷宫密封装置、导排热解废气的排除系统以及张力适度的牵伸系统。而目前国内在此方面的技术储备不够, 只能国产化较小的设备, 国外高端碳化装备(包括石墨化炉及炉体原材料)实行封锁, 生产研发难度大。

(3) 下游: PAN 基碳纤维复合材料及产品成型加工。碳纤维材料与树脂、陶瓷等复合, 经各种成型工艺后得到最终产品。碳纤维从预浸料到最终产品, 需要利用各种相适宜的成型工艺进行加工。常用的成型工艺有喷射成型(汽车车身、船体、储罐过渡层层体)、缠绕成型(圆柱体、球体、筒形)、树脂转移模塑成型(飞机次承力结构件如舱门、检查口盖)、模压成型、注塑成型(汽车轻量化)、热压罐成型(军用运输箱等)、真空导入(船艇方向舵、雷达屏蔽罩、风电叶片、机

碳含量超过 99% 的碳纤维称为石墨纤维, 制备石墨纤维需要石墨化炉, 石墨化炉温度可达 2800℃ 以上, 石墨化时间一般仅为几秒到数十秒。

舱罩、汽车车顶、挡风板、车厢等)层压成型(板材)拉挤成型(型材)等^[23]。传统成型过程中存在增韧组分不均匀、纤维磨损、强度损失等问题,对碳纤维复材制备技术与设备要求高。中科院化学所基于已有研究基础,研制成功了发动机复合材料壳体、专用筒体、专用线轴等产品^[24]。目前,国内大型复材整体成型技术与设备与国外尤其是美国存在代差,因此相应的复材应用程度较低。而这将继续拉大我国与国外碳纤维复合材料技术研发及其在装备性能方面的差距。

总而言之,无论是与日本还是与复合材料强国美国对比,目前国产碳纤维在核心技术、产业化水平的稳定性上均有不小的差距,从制造的全流程来看,基础知识积累、核心设备、核心工艺等方面均是制约因素。碳纤维整个制造流程上下游工序之间联系紧密,生产过程中每一步操作带来的缺陷都将遗传至下一步直至最终成品,其上游工序是下游工序的基础,上游的输出即为下游的输入,上游工序的完成质量直接影响下游直至最终产品的应用^[25]。碳纤维材料的制造流程是多工序协同、递进、集成的复杂系统。

4 高性能碳纤维制造的工程属性分析

从对碳纤维制造全流程的分析可以看出,碳纤维制造具有工程的集成性特征。碳纤维制造全流程涉及化学与化工知识的积累、基础工艺、自动化设备等,需要集成多领域技术和知识以解决单个业务领域的问题。仅从历年来工信部发布的《产业关键共性技术发展指南》就可以看出,高性能碳纤维产业核心技术包括但不限于:碳纤维原丝、预氧化丝、碳化等一体化研发技术;预氧化炉、大型碳化炉等装备关键技术;千吨级装备稳定运转技术;碳纤维高强高模系列品种开发技术;高稳定化干喷湿法纺丝及高倍牵伸工艺;干

喷湿纺碳纤维表面处理技术及与不同树脂基体、不同复合材料成型工艺相匹配的系列化油剂和上浆剂;干喷湿法纺高性能碳纤维技术;快速均质预氧化技术和高效节能预氧化碳化装备等等。以碳纤维为代表的重大工程关键材料“卡脖子”问题的解决,需要不同领域的专家汇聚在统一的工程组织内,便于技术的融合,以实现创新。高性能碳纤维的攻关体现了工程的集成性,涉及跨组织的活动、紧密合作、技术互动,以促进知识的整合。

碳纤维材料的制造具有显著的系统性和连续性。碳纤维材料需从原丝的聚合单体开始,实现一条龙生产,全过程连续进行,任何一道工序出现问题都会影响稳定生产和碳纤维产品的质量。从现有的国内研发与生产实践经历可以看出,参与一线攻关的专家认为把碳纤维研究从技术推动变成需求牵引的“一条龙”项目管理流程是成功的关键^[26]。碳纤维及其复材的制造流程连续化程度高,且随着自动铺叠技术、整体成型技术的发展,从设备机械的角度来看特殊制件、超大型制件均可实现,对碳纤维材料的“设计-性能-结构”之间关系的研究就愈发重要起来。碳纤维从业人员需要对复合材料工艺有足够的理解与创新,需要对碳纤维制造流程进行系统性思考。在实践中,可以借助流程工程学的研究方法和手段,对其制造全流程进行综合考虑,确定相应的工艺条件和参数。

先进材料可以催生新兴行业。重大工程中的关键材料事关国家长期竞争力,需要加强技术、人才储备,建立协同平台,加强核心产品和技术开发与创新,积极研究新领域和新技术^[27]。蒋士成院士提出了围绕三个方向加快高性能纤维发展的建议,其中第一条强调了结构功能一体化,第三条强调了生产加工体系自动化、机械化、智能

文献来源:《产业关键共性技术发展指南(2015年)》(http://www.gov.cn/xinwen/2015-11/18/content_5013935.htm)、《产业关键共性技术发展指南(2017年)》(http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/30/content_5235348.htm)。

化^[28]。通过提升关键材料制造水平,也将辐射带动相关基础学科的发展和机械制造自动化、智能化。采用流程工程学来分析其完整制造流程的运行规律和本质特征,将有助于实现关键材料“卡脖子”技术的突破、降本增效以及相关制造业的数字化、智能化转型升级^[29]。

5 结语

目前,国内碳纤维材料产业热火朝天,生产企业渐具规模,产能数据逐年提高,部分高性能PAN基碳纤维生产技术逐渐接近国际领先水平,初步满足了国防军工的需求。但因碳纤维制造全流程中存在不少“卡脖子”的问题,国内碳纤维材料有效供应量较低,无论是高端还是通用型产品尚无法完全满足国内需求。从碳纤维的制造流程来看,上游高性能原丝的合成及纺丝,中游原丝预氧化、碳化及碳化炉核心设备,以及下游复合材料成型工艺存在的问题不同程度地限制了国内碳纤维材料的应用及产业发展。

随着汽车、建筑修补等的轻量化、风电等工业领域的应用拓展,国内对碳纤维复合材料的需求将快速提升,可以想见,其规模化生产的突破将真正触发碳纤维及其复材的产业化和市场化。工程实践与研究表明,碳纤维制造是多学科、多技术的集成,具有典型的工程属性,对于类似高性能碳纤维这样的重大工程中的关键材料,建议采用工程思维对其制造的全流程进行流程工程学研究,协同攻关,以解决生产制造流程中的问题和难点,提升关键材料制造水平,辐射带动相关基础学科发展,推动机械制造自动化、智能化转型。

参考文献

- [1] 赫晓东,王荣国,彭庆宇,等. 航空航天用纳米碳复合材料研究进展[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 707-718.
- [2] 喻媛. C919 上用了哪些新材料[J]. 大飞机, 2018, (1): 29-31.
- [3] 肖元. 一代材料, 一代飞机(下)[N]. 澎湃新闻·澎湃号·航空知识, (2020-11-04)[2020-11-06]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_9851279.
- [4] Victor G. Structural health monitoring of aerospace composites introduction[M]. Academic Press, 2016: 1-23.
- [5] 刘瑞刚,徐坚. 国产高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 32-42.
- [6] 刘杰,陈健军,苗朋. PAN基高性能活性碳纤维的制备及其性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(6): 35-39.
- [7] 张泽,徐卫军,康宏,等. 高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术几点思考[J]. 纺织学报, 2019, 40(12): 152-161.
- [8] Ashby M F. Drivers for material development in the 21st century[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3-4): 191-199.
- [9] Evans A G. Lightweight materials and structures[J]. MRS Bulletin, 2001, 26(10): 790-797.
- [10] 纪录片《大国之材·碳纤维》. 大国之材|碳纤维: 为制造强国而战[N]. 新材料在线, (2019-09-11)[2020-11-06]. http://www.xincailiao.com/news/news_detail.aspx?id=171088.
- [11] 周宏. 美国高性能碳纤维技术发展史研究[J]. 合成纤维, 2017, 46(2): 16-21.
- [12] 赫士明. 材料图传: 关于材料发展史的对话[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 222-223.
- [13] 李克健. 师昌绪与中国碳纤维研究[N]. 科学时报, A4版, 2010-12-13.
- [14] Legault M. Building a better tail boom[J/OL]. <https://www.compositesworld.com/articles/building-a-better-tail-boom>.
- [15] Marsh G. Boeing's 787: trials, tribulations, and restoring the dream[J]. Reinforced Plastics, 2009, 53(8): 16-21.
- [16] Vasiliev V V, Barynin V A, Razin A F, et al. Anisogrid composites lattice structures - Development and aerospace application[J]. Composites Structures, 2012, 94(3): 1117-1127.
- [17] Hoyt R, Cushing J, Slostad J. SpiderFab TM: progress for on-orbit construction of kilometer-scale apertures[J/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140000422>.
- [18] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [19] 美公布中国公民“走私碳纤维”案详情 为国家航天局工作? [N]. 观察者网, (2016-04-22)[2020-11-06]. https://www.guanacha.cn/military-affairs/2016_04_22_357869.shtml.
- [20] Liu X R, Makita Y, Hong Y L, et al. Chemical reactions and their kinetics of atactic-polyacrylonitrile as revealed by solid-state ¹³C NMR[J]. Macromolecules, 2017, 50(1): 244-253.

- [21] Lian F, Liu J, Ma Z K, et al. Stretching-induced deformation of polyacrylonitrile chains both in quasicrystals and in amorphous regions during the in situ thermal modification of fibers prior to oxidative stabilization[J]. Carbon, 2012, 50(2): 488-499.
- [22] Dunham M G, Edie D D. Model of stabilization for PAN-based carbon-fiber precursor bundles[J]. Carbon, 1992, 30(3):435-450.
- [23] 胡记强, 王兵, 张涵其, 等. 热塑性复合材料构件的制备及其在航空航天领域的应用[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4): 61-70.
- [24] 贾晓龙, 还献华, 齐鹏飞, 等. 碳纤维树脂基复合材料的高性能化[J]. 科学通报, 2018, 63(34): 3555-3569.
- [25] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 14-16.
- [26] 碳纤维 40 年: 国际封锁下的艰难攻关[N]. 中国纺织经济信息网, (2018-08-21)[2020-11-06]. http://news.ctei.cn/Technology/kjjj/201808/t20180821_3777515.htm.
- [27] 李仲平, 冯志海, 徐樾华, 等. 我国高性能纤维及其复合材料发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 28-36.
- [28] 蒋士成. 围绕三个方向加快高性能纤维发展[N]. 中国石化报, 第 005 版, 2020-01-07.
- [29] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪. 工程哲学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

Analysis of the Development of High-Performance Carbon Fiber Materials from the Engineering Perspective

Che Jing

(*Research and Development Office, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: High-performance carbon fiber has superior physical and chemical properties, and as a kind of national strategic resource, it is a key material in major projects such as aerospace. Because of the international blockade and limited level of domestic production, carbon fiber materials are currently unable to meet the domestic market and strategic needs. First, this article introduces the development of high-performance carbon fibers. The manufacturing process of high-performance carbon fiber materials was analyzed based on engineering science knowledge, and the key problem in the entire process was determined. It is believed that for key materials such as high-performance carbon fiber in major projects, engineering thinking should be used to conduct process engineering research on the entire manufacturing process. It is possible to promote the development of related basic disciplines and mechanical manufacturing automation and intelligence by improving the level of key material manufacturing.

Key Words: high-performance carbon fiber; strategic materials; engineering thinking; process engineering