

碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望

唐见茂

(中国材料研究学会, 北京 100048)

摘要: 文章较系统地介绍了碳纤维树脂基复合材料的优异性能、产业背景、新技术国际发展趋势、我国产业化发展现状及存在的主要问题, 并有针对性地提出对策和建议, 可供从事复合材料研究开发的相关人员、产业界人士及有关政府管理部门参考。

关键词: 先进复合材料; 新技术; 发展趋势; 产业化

中图分类号: TH117

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)03-0269-12

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.03.001

0 前言

复合材料是将两种或两种以上不同品质的材料通过专门的成型工艺和制造方法复合而成的一种高性能新材料, 按使用要求可分为结构复合材料和功能复合材料, 到目前为止, 主要的发展方向是结构复合材料, 但现在也正在发展集结构和功能一体化的复合材料。

通常将组成复合材料的材料或原材料称之为组分材料(constituent materials), 它们可以是金属、陶瓷或高聚物材料。对结构复合材料而言, 组分材料包括基体和增强体, 基体是复合材料中的连续相, 其作用是将增强体固结在一起并在增强体之间传递载荷; 增强体是复合材料中承载的主体, 包括纤维、颗粒、晶须或片状物等的增强体, 其中纤维可分为连续纤维、长纤维和短切纤维, 按纤维材料又可分为金属纤维、陶瓷纤维和聚合物纤维, 而目前用得最多的和最重要的是碳纤维^[1-2]。

碳纤维是一种直径极细的连续细丝材料, 直径

范围在 6~8 μm 内, 是近几十年发展起来的一种新型材料。目前用在复合材料中的碳纤维主要有两大类: 聚丙烯腈基碳纤维和沥青基碳纤维, 分别用聚丙烯腈原丝(称之为前驱体)、沥青原丝通过专门而又复杂的碳化工艺制备而得。通过碳化工艺, 使纤维中的氢、氧等元素得以排出, 成为一种接近纯碳的材料, 含碳量一般都在 90%以上, 而本身质量却大为减轻; 由于碳化过程中对纤维进行了沿轴向的预拉伸处理, 使得分子沿轴向进行取向排列, 因而碳纤维轴向拉伸强度大大提高, 成为一种轻质、高强度、高模量、化学性能稳定的高性能纤维材料^[2]。

用碳纤维和高性能的树脂基体复合而成的先进树脂基复合材料是目前用得最多, 也是最重要的一种结构复合材料。此外, 用天然纤维、玻璃纤维和玄武岩纤维作增强体的树脂基复合材料也在快速发展。

表 1 列出了多种碳纤维复合材料(CFRP)和金属材料的性能。

表 1 多种碳纤维复合材料和金属材料的性能
Table 1 Performance comparison between composite and metallic materials

材 料	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	弹性模量 E /GPa	抗拉强度 σ /MPa	比模量 (E/ρ) /[GPa/(g·cm ⁻³)]	比强度 (σ/ρ) /[GPa/(g·cm ⁻³)]	最高使用温度 /°C
钢 SAE1010 (冷轧)	7.87	207	365	26.30	0.05	500~650
钢 AISI4340 (调质)	7.87	207	1 722	26.30	0.22	500~650
铝 6061-T6	2.70	68.9	310	25.52	0.11	150~250
高强度碳纤维-环氧基 (单向)	1.55	137.8	1 550	88.90	1.00	80~215
高模量碳纤维-环氧基 (单向)	1.63	215	1 240	131.90	0.76	80~215

收稿日期: 2010-02-26; 修回日期: 2010-04-15

作者简介: 唐见茂 (1944—), 男, 教授级高级工程师, 中国材料研究学会政府工作咨询服务部咨询专家, 主要从事国家高技术新材料发展动态及产业化咨询, 新材料重点领域规划研究。E-mail: chunrong0625@sina.com。

续表 1

材 料	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	弹性模量 E /GPa	抗拉强度 σ /MPa	比模量(E/ρ) /[GPa/(g·cm ⁻³)]	比强度(σ/ρ) /[GPa/(g·cm ⁻³)]	最高使用温度 /°C
玄武岩纤维- 环氧基(单向)	1.90	70	1 000	36.84	0.53	80~215
E 玻璃纤维- 环氧基(单向)	1.85	39.3	965	21.24	0.52	80~215
芳纶 49 纤维- 环氧基(单向)	1.38	75.8	1 378	54.93	1.00	80~215
碳纤维-环氧基 (准各向同性)	1.55	45.5	579	29.35	0.37	80~215
薄板成型(SMC)复合 材料(各向同性)	1.87	15.8	164	8.45	0.09	80~215

碳纤维复合材料与金属材料或其他工程材料相比, 具有以下许多优良的性能:

1) 比强度和比模量高

由表 1 可看出高强度碳纤维-环氧基复合材料(单向)的比强度是钢 SAE1010(冷轧)的近 20 倍, 是铝 6061-T6 的近 10 倍; 其比模量则超过这些钢和铝材的 3 倍。这些特性使 CFRP 材料的利用效率大为提高, 实际证明用 CFRP 代替钢或铝可减轻重量达 20%~40%, 因而在许多工业领域特别是在航空航天领域得到广泛的应用。业内专家指出, 飞机自重每减少 1 kg, 相当于五百万美元的累积经济效益, 由此可以看出复合材料在航空航天领域内的重要地位。不仅如此, 其他如汽车、海运、交通等与运行速度要求有关的部门都会因采用复合材料而大为受益。

2) 材料性能的可剪裁性(tailorability)

大多数 CFRP 可通过设计增强纤维的取向及用量来对结构材料的性能实行剪裁, 达到性能最佳化。例如, 可把复合材料设计成在主受力方向上有足够的纤维取向来承受载荷, 其他方向有适当的纤维来承受剪切载荷或其他载荷, 而这种多纤维取向结构的成型又可通过不同的成型技术来完成。复合材料的这种性能可剪裁性, 不仅可提高材料的使用效率, 而且有助于从材料到结构的设计和制造实行一体化, 既简化了制造程序, 又降低了制造成本。

3) 成型工艺的多选择性

复合材料技术经过几十年的发展, 到现在有数十种不同的成型工艺可供选择, 如热压罐、模压、纤维缠绕、树脂传递模塑(RTM)、拉挤、注射、喷塑、搓管以及大型复杂部件的共固化整体成型技术等, 实际应用时可根据构件的性能、材料种类、产量规模和成本等因素选择最适合的成型方案。

4) 良好的耐疲劳性能

层压的 CFRP 对疲劳裂纹扩张有“抑制”作用, 这是因为当裂纹由表面向内层扩展时, 到达某一纤维取向的层面时, 会使裂纹扩展在该层面内呈现断裂发散, 这种特性使得 CFRP 的疲劳强度大为提高。研究表明钢和铝的疲劳强度是静力强度的 50%, 而 CFRP 可达 90%。

5) 良好的抗腐蚀性

由于 CFRP 的表面是一层高性能的环氧树脂或其他树脂塑料, 因而具有良好的耐酸、耐碱及耐其他化学腐蚀性介质的性能。这种优点使 CFRP 在未来的电动汽车或其他有抗腐蚀要求的领域上应用具有很强的竞争力^[1, 3]。

1 碳纤维复合材料的应用

碳纤维复合材料主要是以满足航空航天对高性能材料的要求而发展起来的。随着碳纤维复合材料的优异性能越来越多地被认识和接受, 其在能源、交通、汽车、海洋、建筑及其他工业部门的应用近年来在快速地发展。

1.1 在航空领域的应用^[4-6]

为了提高和改善飞机性能, 早在 20 世纪 50 年代, 美国空军材料实验室(AFML)就开始寻求一种新型的结构材料, 碳纤维复合材料正是在这种背景下被列入发展计划。

碳纤维复合材料的研究开发启迪于对玻璃纤维复合材料性能的认识和经验。通常玻璃纤维复合材料的密度要高出碳纤维复合材料的 1/3 以上, 其抗拉强度仅是碳纤维复合材料的 2/3, 而其模量则不到 1/3, 满足不了高性能飞机的要求。因此研究高强度、高模量及低密度的增强纤维成为发展高性

能纤维复合材料的前提。在碳纤维之前，曾经开发过硼纤维，1960 年钨丝芯硼纤维开始了小批量的生产，硼纤维直径约 100 μm，其弹性模量达 400 GPa，拉抗强度达 3 800 MPa；环氧增强的硼纤维（ $V_f \approx 60\%$ ）弹性模量达 200 GPa（相对密度 ≈ 2.0 ），是玻璃纤维复合材料的弹性模量 40 GPa（相对密度 ≈ 1.8 ）的 5 倍，约是铝合金的弹性模量 70 GPa（相对密度 ≈ 2.7 ）的 3 倍。因此美国空军材料实验室将环氧增强的硼纤维复合材料命名为先进复合材料（Advanced composite materials, ACM），并于 20 世纪 60 年代后期开始了在飞机结构上的应用，如飞机水平尾翼和垂直稳定面翼盒结构等。但是，硼纤维生产工艺复杂，成本高，硼纤维本身粗硬，很难在结构上推广应用。

基于这一事实，着手发展碳纤维复合材料，于 20 世纪 60 年代后期，研发成功聚丙烯腈基碳纤维并实现批量生产，从此开始了碳纤维复合材料在航空航天领域应用的里程。

碳纤维复合材料具有优异的综合性能，被看成是一种理想的航空航天结构材料，近 40 年来，在航空航天领域应用得到长足的发展。表 2 是美国 F 系列战斗机上复合材料应用情况。

表 2 美国 F 系列战斗机应用纤维复合材料的情况
Table 2 ACM used in F series of US fighters

机型	应用部位	类型	比例 /%	年份	应用目的
F-15E	水平尾翼等	硼/环氧	2	1970	减重
F-18E/F	机翼蒙皮，水平尾翼等	石墨/环氧	19	1984	减重，高强度，维修性
F-22	蒙皮，框架，进气道等	碳/环氧，碳/双马	22	1998	整体化，隐身，减重

图 1 所示为大型商用飞机复合材料应用发展情况。

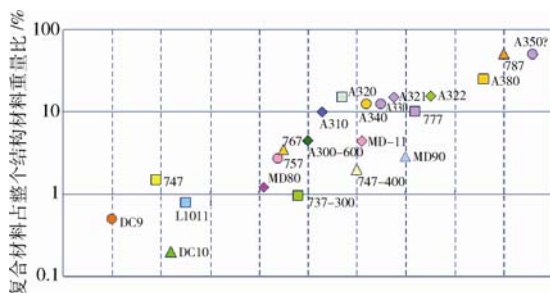


图 1 大型商用飞机复合材料应用趋势

Fig. 1 ACMs applications and trends in large commercial airplanes

由图 1 可以看到：欧洲空客公司的 A320 飞机复合材料用量达 17%，A340 为 14%；波音公司的 B767 复合材料用量为 6%，B777 为 12%。

早期制约复合材料在商用飞机上应用的主要问题是成本和使用经验，进入 21 世纪后，随着低成本技术的开发及使用经验的积累，复合材料在商用飞机上的应用进入大发展阶段。

最近，波音公司在推出的“梦想”（Dreamliner）B787 飞机上，复合材料的用量将占到全机结构总重量的 50%，是世界上第一款采用复合材料机翼和机身等主承力结构件的大型商用喷气式客机。由于大量采用复合材料而使飞机的结构重量大幅度降低，燃油效率可提高 20%。

欧洲空客公司在开发复合材料的应用方面也有突破，A380 超大型客机复合材料用量达到 25%。

1.2 在航天领域的应用^[7]

碳纤维复合材料在航天领域主要应用于导弹弹头、弹体、火箭箭体、发动机壳体的结构部件，以及大型卫星结构体、太阳能电池阵、天线等的主承力结构件。碳/碳和碳/酚醛复合材料用于弹头端头、发动机喷管喉衬等耐烧蚀部件的防热，如美国“侏儒”、“民兵”、“三叉戟”等战略导弹；碳纤维复合材料用于固体发动机壳体，如美国“大力神-4”火箭、法国的“阿里安娜-2”火箭改型、日本的 M-5 火箭等的发动机壳体，其中使用量最大的是美国赫克里斯公司生产的抗拉强度为 5.3 GPa 的 IM-7 碳纤维。以高性能碳（石墨）纤维复合材料为典型代表的先进复合材料作为结构、功能或结构/功能一体化构件材料，在导弹、运载火箭和空间飞行器上也发挥着不可替代的作用，有力地推动了航天技术的发展。

碳纤维增强树脂基复合材料也被用于航天飞机舱门、机械臂和压力容器等。美国航天飞机的防热对于确保安全飞行至关重要，根据使用部位的要求不同，共涉及 8 种材料：低温重复使用表面绝热材料（LRSI），高温重复使用表面绝热材料（HRSI），柔性重复使用表面绝热材料（FRSI），高级柔性重复使用表面绝热材料（AFRI），高温耐熔纤维复合材料（FRIC-HRSI），增强型碳/碳复合材料（RCC），金属，二氧化硅织物。其中增强型

碳/碳复合材料最为重要,需要耐受航天飞机再入大气层时 1700 °C 的高温。

1.3 在能源、汽车及其他工业部门的应用^[3]

随着全球石油资源紧缺局面的加剧,新能源的开发和利用已成为当今十分重要的研究课题,其中风能的开发和利用已形成全球的共识。据预测,未来 10 年内,全球风能市场将保持每年 20% 的增长速度,每年新增风电装机容量将由 2007 年的 2 万 MW 增加到 2017 年的 10.7 万 MW; 全球风电装机总容量也将从 2007 年的 9.4 万 MW 增至 2017 年的 71.8 万 MW。中国的增长速率可能会更快,据估计中国风电叶片的需求量在 2006~2010 年之间约为 7000 多片,2011~2020 年之间将达到 50000 片。MW 级的风机叶片长度在 40 m 以上,10 MW 级的风机叶片长度达 60 m,必须采用碳纤维复合材料才能满足叶片轻质、高强度和高模量的要求。因此风电市场的快速增长将极大地推动碳纤维复合材料产业的发展。

对于未来的汽车工业,碳纤维复合材料将成为汽车制造的主流材料。2001 年宝马公司率先开发和试验高强轻质的碳纤维复合材料(CFRP)车体板和其他部件,所用碳纤维系 Zoltek 公司生产的大丝束产品,目标是 2007 年生产出采用 CFRP 制造的系列汽车。Zoltek 公司总裁确信,碳纤维将引起汽车工业革命性的变革。

英国 Cranfield 大学的研究成果也表明,每年生产 2 万辆的 CFRP 汽车是可行的。这种轻质化材料的汽车将改进其燃料效率,轻质化材料部件的刚性比钢制部件高,在高风阻力下具有良好稳定性,这一点对赛车和运动型车而言更为重要。目前已研制出的 CFRP 汽车长 4.3 m、宽 1.7 m、高 1.4 m,重量只有 570 kg。CFRP 材料由德国 Tenax 公司生产提供。

美国福特公司在数年前研制成功的一款称之为“Sunrise”的体验型全复合材料汽车,并生产出数辆样车,这种以“金牛座”汽车为基型的复合材料汽车,总重量不到“金牛座”的 2/3(即 2000/3314,磅),汽油的使用效能达 38.5 km/L。包括车身和底盘基座等在内的大多复合材料部件采用低成本的整体成型技术,既提高了性能,又降低

了成本。

此外,部分型号的奔驰车车门也采用了 CFRP 材料,目前每年只生产 1000 件这样的车门。加拿大的一家汽车公司认为,目前碳纤维的价格对价值 20 万美元的汽车是可接受的,他们研制的 C-7 豪华双人旅游车便采用了 CFRP 部件,该车的空气动力学车头和仪表板均是由 CFRP 制成的。

除了碳纤维复合材料,其他新型复合材料也在汽车上有广泛应用,例如,汽车的光显示系统采用了塑料光纤,发动机的传感器采用了耐 150~180 °C 高温的耐热塑料光纤,汽车的空调滤材采用熔喷法超细纤维的无纺布滤材(美国 3M 公司采用熔喷法生产的超细纤维聚酯无纺布滤材),汽车的轮胎帘子布采用芳纶帘子布。芳纶是一种高强度纤维,可以用 1 层代替传统的 6 层尼龙帘子布,不仅减轻了重量,而且摩擦阻力小、操控稳定性好,适合高速行驶。米其林公司现在就有一条芳纶子午轮胎生产线。

聚合物树脂基体以及高性能的玻璃纤维、碳纤维和芳纶增强体的复合材料在一些新的应用领域取得进展,如具有防爆功能的装甲复合材料,以天然气作动力的汽车发动机汽缸,机械驱动轴,高速路高架桥承载梁等,在基建、兵器、医疗器械、体育休闲用品等领域都存在巨大的市场潜力。西欧、美国和日本在家居用品方面,复合材料的用量在过去的 20 年间也有很大的增长,而在中国,大规模地采用复合材料成品的市场还有待于进一步开发。

2 碳纤维复合材料国内外发展现状及趋势

在碳纤维复合材料研制中,关键是高性能碳纤维,它是制约先进碳纤维复合材料发展的瓶颈。下面分别对增强体、基体和复合材料的国内外发展情况及趋势进行介绍。

2.1 碳纤维国内外发展现状及趋势

2.1.1 国外碳纤维发展现状及趋势^[8-9]

美国联合碳化物公司(UCC)于 1959 年最早开始生产粘胶基碳纤维。1959 年,日本研究人员发明了用聚丙烯腈(pan)原丝制造碳纤维的新方法。在此基础上,英国皇家航空研究院研制出了

制造高性能 pan 基碳纤维的技术流程，使其得到快速发展，pan 基碳纤维成为当前碳纤维工业的主流，产量占世界总产量的 90% 左右。1974 年，美国联合碳化物公司开始了高性能中间相沥青基碳纤维 (thornel-p) 的研制，目前 thornel-p 系列高性能沥青基碳纤维是最好的产品。这样一来就形成了 pan 基、沥青基和粘胶基碳纤维的三大原材料体系。

根据产品规格的不同，碳纤维目前被划分为宇航级和工业级两类，亦称为小丝束和大丝束。丝束指的是纤维根数，通常用“k”表示，1 个“k”代表 1 000 根丝。48 k 以上的碳纤维称为大丝束碳纤维，包括 48k、60k、120k、360k 和 480k 等；小于 48k 的碳纤维称为小丝束碳纤维，包括 1k、3k、6k、12k 和 24k。宇航级碳纤维为小丝束碳纤维，主要应用于国防军工和高技术，以及体育休闲用品等。工业级碳纤维应用于纺织、医药卫生、机电、土木建筑、交通运输和能源等民用工业。

进入 21 世纪后，碳纤维复合材料的应用迅速发展，用量急剧上升，2005 年世界碳纤维的用量已超过 2 万 t，到 2010 年将突破 3 万 t。图 2 为 21 世纪前 10 年碳纤维用量的分析统计。

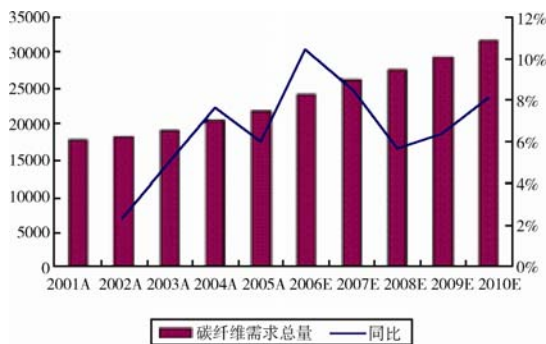


图 2 世界碳纤维用量(单位:t)
Fig. 2 Global marketing amount of carbon fibers(in tons)

表 3 列出了不同应用领域的碳纤维用量的分析统计。从航空航天领域来看，2001 年航空航天领域对碳纤维的用量为 2 690 t；2002 年和 2003 年分别约减少 20%和 9%；2003 年以后航空航天领域对碳纤维的用量出现快速增长：与 2001 年相比，2006 年约增长 40%；2008 年约增长 76%；2010 年预计增长超过 100%。

表 3 世界碳纤维在不同应用领域用量的统计和预测
Table 3 Global marketing analysis of carbon fibers demand amount in different application areas

年份 \ 用量/t	航空航天	运动休闲	工业应用	总计
2001	2 690	4 690	10 520	17 900
2002	2 140	4 670	11 490	18 300
2003	2 457	5 012	11 741	19 210
2004	2 741	5 081	12 858	20 680
2005	3 215	5 101	13 604	21 920
2006	3 775	5 135	15 280	24 190
2007	4 170	5 097	17 003	26 270
2008	4 741	5 107	17 892	27 740
2009	5 201	5 104	19 205	29 510
2010	5 389	5 118	21 408	31 910

注：表中数据引用东丽集团法国 Soficar 公司在“2004 年碳纤维前景会议”所作的报告。

进入 20 世纪 90 年代以后，由于 pan 基碳纤维性能优越，应用领域日益扩展。目前世界 pan 基碳纤维已进入发展旺盛的成熟期，主要表现为：

- 1) pan 基碳纤维产量急剧提高，生产规模大型化，产品品种和规格不断增加，根据不同的使用要求可分为高强高模、高强中模、中强高模等产品；
- 2) pan 基碳纤维生产技术、工艺、设备不断改进，碳纤维性能不断提高，如日本东丽集团公司开发的高强型 T 1000 系列碳纤维弹性模量为 295 GPa，抗拉强度达 7.05 GPa；高强高模型 MSJ 系列弹性模量达 640 GPa，抗拉强度为 3.62 GPa；
- 3) 应用范围从少数高科技领域、军事部门扩展到整个工业民用的各个部门。

目前，聚丙烯腈基碳纤维产量约占全部碳纤维总产量的 90%，每年生产能力约为 31 565 t，其中小丝束碳纤维约为 23 165 t (占 73.4%)，大丝束碳纤维约为 8 400 t。

日本的东丽、东邦和三菱丽阳 3 家公司的高性能小丝束聚丙烯腈基碳纤维每年生产能力合计为 17 500t，占世界高性能小丝束碳纤维总生产能力的 75.5%，基本控制了世界高性能小丝束碳纤维的生产。

福塔菲尔 (Fort afil)、卓尔泰克 (Zoltek)、阿尔迪拉 (Aldila)、爱斯奇爱尔 (SGL) 等 4 家公司几乎垄断了 8 400 t 聚丙烯腈基大丝束碳纤维的生产，其中福塔菲尔公司的产能为 3 500 t (占 41.7%)，居世界的首位。

全球碳纤维供不应求，为了应对供应紧张的局面，世界碳纤维生产巨头都提出了雄心勃勃的增产计划。

日本东丽集团公司最近宣布,将投入160亿日元在爱媛工厂扩建工业用碳纤维生产线,主要用于精细pan基碳纤维1系产品的生产,设计年产量1000t。新生产线投入使用后,爱媛工厂的年生产能力将达到8300t,东丽集团在日本国内的碳纤维年生产能力将提高到1.89万t。精细pan基碳纤维1系产品具有良好的成型加工性能,主要用于自行车架、机器人、飞机零部件等。东丽集团正在实施中长期规划IT2010,2010年碳纤维年产量将达2.5万t。

三菱丽阳公司近日也宣布,为了扩大碳纤维的生产能力,将对广岛县大竹市的大竹事业所投资约120亿日元,新建年生产能力2700t的烧成生产线。新的生产线于2009年第四季度投产后,公司的碳纤维年生产能力将增长33%,由现在的8150t增加到10850t。公司在爱知县丰桥市的丰桥事业所新建的年生产能力2200t碳纤维烧成生产线已于2008年5月投产。

除了上述公司之外,西格里集团作为欧洲唯一一家能够供应碳纤维原丝、独立拥有碳纤维研发技术,并拥有从原材料到复合成品完整增值产业链的供应商,将其核心竞争力定位于高温技术、碳化和石墨化技术。西格里集团有4条生产链,在碳纤维、复合材料、复合组件以及刹车片的年销售增长率将分别超过15%。西格里集团近日也宣布,计划在2010年前将碳纤维年产量增至12000t,包括将提高苏格兰基地的碳纤维年产量(2008年底提高至4000t),扩大美国的生产基地,在德国梅亭根新建一个生产基地,建立全球碳纤维技术与创新中心。整个计划在五年内需投资约3亿欧元。

2.1.2 国内碳纤维发展现状及趋势^[10]

我国从20世纪60年代后期开始研制碳纤维,历经40多年的发展历程。由于国外严格控制封锁,制约了我国碳纤维工业的发展,与国外相比有很大差距。产量不能满足市场发展需求,pan基原丝质量不过关,生产技术及设备落后等。目前国内小规模pan基碳纤维生产企业和科研院所共十余家,其中最大生产企业为吉化公司,其年生产能力号称300t,实际年产量不足100t,且产品质量不稳定,达不到T300级的水平。

20世纪70年代初突破连续化工艺,1976年在中国科学院山西煤炭化学研究所建成我国第一条

pan基碳纤维扩大试验生产线,年生产能力为2t;20世纪80年代开展了高强型碳纤维的研究,于1998年建成一条新的中试生产线,年生产能力为40t。我国主要研究单位有中国科学院山西煤炭化学研究所、上海市合成纤维研究所、北京化工大学、山东工业大学、东华大学、安徽大学、浙江大学、长春工业大学等。

随着我国经济的快速发展,碳纤维需求与日俱增,虽然国际上一些公司T300级原丝和碳纤维产品对我国开始解冻,但碳纤维及其复合材料的生产关系到国防建设,必须立足国内。研制生产高性能、高质量的碳纤维,以满足军工和民用产品的需求,扭转大量进口的局面,是我国碳纤维工业发展亟待解决的问题。碳纤维已被列为国家化纤行业重点扶持的新产品。在国家政策的重点扶持下,国内碳纤维的研究开发和生产呈现出令人鼓舞的发展趋势。

1) 上海市。上海石化公司准备再投资扩大生产规模,采用NaSCN一步法将pan基原丝的年生产能力提高到数千t;上海星楼实业有限公司拟建立年生产能力400t大丝束碳纤维生产线(包括下游产品);上海市合成纤维研究所采用亚矾两步法研制和小批量生产pan基原丝及碳纤维;上海碳素厂也有小型碳化线及碳纤维下游产品生产线。

2) 安徽省。“十五”期间,国家已批准在安徽蚌埠建立年产500t的pan基原丝和200t碳纤维生产线,pan基原丝的亚矾一步法生产技术和预浸料生产线从国外引进,主要生产12k的T300级碳纤维产品;华皖集团(原蚌埠灯芯集团公司)将扩大生产规模使碳纤维年产量达到400t,下游产品的开发也列入发展规划。

3) 浙江省。中宝碳纤维责任有限公司在浙江嘉兴拟建年产400t的大丝束碳纤维生产线,开发预浸料等下游产品,使预浸料年产量达300万m²。成立了浙江省碳纤维工程技术研究开发中心,全面推进碳纤维事业。

4) 广西壮族自治区。桂林市化纤总厂拟建年产200t碳纤维生产线,生产3~12k的小丝束碳纤维产品。

5) 山东省。山东天泰碳纤维有限责任公司作为国家工程示范点将年生产能力扩大到800t,引进预浸料生产线,主要生产12k的T300级碳纤维产品,满足国内高端复合材料产品的要求,还积极开发和生产多种下游产品(如碳纤维布);在青岛

化工学院高分子工程材料研究所(恒晨公司)参与下,青岛将建立年产500 t左右的碳纤维生产线;山东威海光威渔具集团有限公司主要生产钓鱼竿和碳纤维预浸布产品,在山东省的支持下,计划新建年产2500 t原丝和1000 t碳纤维生产线。

6) 北京市。北京化工大学与吉化公司树脂厂采用亚砷一步法技术取代硝酸法生产原丝,依靠自己的技术建立年产500 t原丝和200 t碳纤维的生产线。

7) 甘肃省。兰州化工集团化纤厂作为我国首次从国外引进腈纶生产线的单位,有丰富的生产经验和技術积累,已建立了年产100 t的NaSCN一步法原丝生产线和预氧化生产装置,计划配套碳化装置生产碳纤维。

8) 吉林省。吉林碳素厂是我国小丝束碳纤维生产基地,目前计划扩大产量,正在建立新的小丝束碳纤维生产线。

9) 中国科学院。山西煤炭化学研究所研制碳纤维已有30多年历史,在20世纪70年代中期建成了我国第一条纤维中试生产线,在90年代末期又建成了我国第一条纤维中试生产线;目前国家正加大扶持力度,进行改造和技术升级,争取在产能和产品质量上有更大突破。

10) 江苏省。扬州汇通碳纤维公司采用国产技术新建年产100 t原丝和40 t的T300级pan基碳纤维。

2.2 树脂基体国内外发展现状及趋势^[11]

树脂基体是复合材料的另一个主要组分材料,分为热固性树脂基体和热塑性树脂基体,前者是目前发展的主流。

热固性树脂基体在复合材料的固化和制造成型过程中,分子结构会产生一系列的物理和化学变化,由线性的分子结构转变成三维的网状交联结构;而树脂基体本身由粘流状态转变成不熔的坚实固体状态,将其中的纤维紧紧地固结在一起,形成一种新的多相的材料体系。树脂和纤维的作用是相辅相成的,正是由于树脂的固结和保护,纤维才能有效地发挥承载作用,所生成的复合材料才能用作结构件。

树脂基体的重要性能有使用温度、强度、刚度、耐疲劳性、韧性和耐湿热老化等。随着飞机性能的不斷提高,复合材料被越来越多地使用,除了关注树脂基体的上述性能要求外,还要考虑其制造低成本化。目前发展高性能树脂基体主要方向是:

1) 新型高温型树脂基体,使用温度在300℃以上;

2) 高韧性的树脂基体,如冲击后压缩强度(CAI) > 300 MPa的树脂基体;

3) 适用于低成本的液体成型工艺(如RTM成型工艺)的树脂基体;

4) 能满足复合材料结构功能一体化的新型树脂基体,如具有透波和吸波功能的树脂基体。

要发展高性能树脂基体,主要的技术途径之一就是在原有树脂基础上进行改性。

2.2.1 环氧树脂基体

环氧树脂基体综合性能优异,工艺性好,价格较低,目前仍是碳纤维复合材料中应用最普遍的树脂基体。环氧树脂主要的缺点有韧性不足、耐湿热性差及预浸料贮存期短等,因此,需要对其改性,包括韧性和湿热性的改性。

1) 提高韧性

提高韧性的方法包括橡胶弹性体增韧、热塑性树脂增韧和热致液晶增韧,其中热塑性树脂增韧方法最为有效和实用。国外开发出许多高韧性环氧/碳纤维复合材料。BASF/Narmco公司的Riaidite X5255-3材料的CAI高达345 MPa, Toray-Hexcel公司的3900-2/T800H材料的CAI为368 MPa, ICI-Fiberite公司的977-1/IM7材料的CAI为348 MPa。国内北京航空材料研究院研制的T300/5228和T800/5228热塑性树脂增韧环氧树脂复合材料的CAI分别为190 MPa、250 MPa,在湿热条件下最高使用温度为130℃。

2) 提高湿热性能

改性措施主要有:

① 采用共聚改性方法降低环氧树脂的吸湿率,如用氰酸酯或双马聚酰亚胺与之共聚;

② 采用多功能环氧树脂或含有稠环(如萘环)骨架的环氧树脂,提高玻璃化温度 T_g 。

环氧树脂按使用温度可分为中温型(120℃)和高温型(150~180℃)。国内已进入实用化阶段的环氧树脂主要是中温型,固化体系品种多,如西安飞机工业公司开发的T300级HD58环氧树脂,属于催化的芳香二胺体系,韧性较高,其CAI为192 MPa,耐温80℃。

2.2.2 双马聚酰亚胺树脂基体

双马聚酰亚胺树脂(BMI)的使用温度在

150~250 °C, 其耐热性优于多功能环氧树脂但低于聚酰亚胺树脂, 吸湿率较环氧树脂低, 通过改性使其韧性和耐湿性好于耐热环氧树脂、工艺性优于聚酰亚胺树脂并接近环氧树脂, 以满足飞机主受力结构用复合材料的需要。BMI 增韧性的方法有:

1) 环氧树脂增韧

用环氧树脂增韧除了能提高韧性外, 还能显著地提高制备复合材料的工艺性。国外典型的产品为 Narmco5245C 树脂基体, 属于 BMI/EP/双酚 A 二氰酸酯体系, 经过 204 °C/4 h 固化, $T_g=199\sim 210$ °C, 断裂伸长率 3.8%, 用该树脂生产的 T300/5405 复合材料的 CAI 为 171 MPa, 已用于某军用飞机带整体油箱的机翼。

2) 烯丙基苯化合物增韧

国外 Ciba-Geigy 公司推出用烯丙基苯化合物增韧的 XU292 树脂基体, 经过 180 °C/1 h+200 °C/6 h 固化, $T_g=310$ °C, 断裂伸长率 3.0%, 抗拉强度 93.3 MPa, 弹性模量 3.9 GPa, 是一种耐湿热而且增强增韧的树脂基体。国内北京航空工艺所用烯丙基苯化合物增韧的 QY8911 树脂基体的 CAI 为 156 MPa。国内西北工业大学研制的 4501A 树脂基体的 $T_g=274$ °C, 10 GHz 下的介电损耗角正切为 0.011 7, 适用于飞机雷达罩; 4503 树脂基体的室温粘度 0.2 h·s, 适用于 RTM 工艺。

3) 热塑性树脂 (TP) 增韧

常用的 TP 有: PES, PEK, PBI, PEI, PSU。用热塑性树脂增韧是获得高韧性 BMI 树脂的主要方法。

国外高韧性 BMI 树脂品种有: Narmc05250-4 (T_g 为 237 °C) 和 Narmc05260 (CAI 为 340 MPa, 最高使用温度达 232 °C)。国内在热塑性树脂增韧 BMI 树脂方面已作了许多工作, 北京航空材料研究院分别用新研制的 5428、5429 树脂与 T700 碳纤维制备的复合材料, 它们的 CAI 分别为 268 MPa、290 MPa。

2.2.3 聚酰亚胺树脂基体

热固性聚酰亚胺是一种高温型的复合材料树脂基体, 最高使用温度可达 371 °C, 但加工工艺条件苛刻。大多是单体反应物原位聚合 (in-situ Polymerization for Monomer Reactants, PMR) 的聚

酰亚胺, 主要是以满足航空发动机复合材料部件的需要而开发的。美国 NASA 的 Lewis 中心于 20 世纪 70 年代率先进行了这方面的工作, 并成功地开发出系列产品, 如 PMR-15, PMR-II, PMR-NV-15 等, 耐热性均高于 BMI 树脂, T_g 可达 350 °C 以上。

我国中国科学院长春应用化学研究所研制了类似 PMR-15 的 T300/KH-304 聚酰亚胺复合材料, T_g 为 304~320 °C。

2.3 碳纤维树脂基复合材料低成本成型技术的发展现状及趋势^[7]

复合材料具有多种优良性能, 但居高不下的成本仍然是制约其广泛应用的主要原因。业内专家指出, 用碳纤维复合材料制造的飞机结构件, 与铝合金的同类结构件相比, 成本可高出 1 到 2 倍, 这无疑极大地限制了复合材料在飞机上的大量使用。因而低成本技术已成为复合材料发展的重要趋势。

构成复合材料高成本的主要因素有:

- 1) 原材料的价格高, 碳纤维、芳纶和高性能树脂基体的价格居高不下;
- 2) 手工操作为主, 效率低, 周期长;
- 3) 设备投入和使用费用高, 能耗大, 辅助材料价格高, 用量大;
- 4) 整体设计欠缺, 制件的整体性差, 仍需要使用大量的紧固件。

进入 21 世纪后, 复合材料的市场需求急剧上升, 而成本问题也就更为突出, 为了应对这一局面, 各国都采取了相应的措施和策略, 由过去的性能优先向重视性能成本的折中平衡转变, 实现复合材料结构低成本化而又不牺牲复合材料的强度优势。

在此背景之下, 低成本复合材料结构的开发近年来在世界范围内空前活跃。在欧洲, 低成本复合材料结构在运输机主翼上的适用性研究进入最终阶段; 在美国, 空军及 NASA 制定了各种计划, 其中有代表性的计划是 ACT 计划, 其开发目标是相对于现有铝结构成本降低 25%, 该目标非常之高。

2.3.1 国外低成本成型技术的现状及发展趋势

低成本技术涉及原材料、成型、加工制造以及使用保障等方面, 而低成本成型技术直接关系到复合材料的发展。

低成本成型技术当前发展的主流是湿法成型技术, 也称液体模塑成型技术 (LCM), 主要有树脂传递模塑、真空辅助树脂传递模塑 (VARTM)、树脂渗透成型工艺 (SCRIMP) 和结构反应注射模塑等, 其中最重要的是树脂传递模塑技术 (RTM) 以及由此而发展起来的 VARTM。

RTM 最早提出于 20 世纪 40~50 年代, 直至 80 年代末, 随着美国复合材料的产业转型, RTM 才成为热点。该方法是指先将纤维预型体放在闭合模腔中, 再将液态树脂用专用的设备注入, 树脂在流动充模时完成树脂/纤维的浸润并经固化成制件。与这种方法配套的是三维或二维编织的纤维增强预型件 (用自动化的纤维编织机编织而成)。这种几乎近于“净尺寸”的制件具有整体性能高的优点, 由于纤维预型件中有一定比例的贯穿厚度方向的纤维, 所以大大地提高了制件的抗分层能力, 而分层则是目前用得最多的层压复合材料的致命问题。RTM 可以成型带有夹芯、加筋、预埋件等的大型构件, 可按照结构要求来设计纤维预型件的各种参数, 如纤维种类、纤维含量、纤维的方向和编织程序等。

RTM 免除了将纤维制成预浸料、切割成层片然后再铺叠成预型件的过程, 不用建造昂贵的热压罐, 工艺易于实现自动化, 具有生产周期短、劳动力成本低、环境污染少、制造尺寸精确、外形光滑、可制造复杂产品等优点, 是目前国际上发展应用最快并在航空工业应用最多的低成本技术之一。

从国际上看, 美国在湿法成型技术上处于领先地位, 特别是在航空航天领域内。在过去 10 年里, 美国应用 RTM 的每年增长率为 20%~25%。据美国塑料工程学会预测, 在今后 5 年里美国应用 RTM 的每年增长率将提高到 30%~32%。美国基本形成了 RTM 有关材料体系、制造工艺、技术装备和验证系统, 并在武器装备上得到批量应用, 应用范围从次结构件发展到主结构件。用 RTM 制造的最大尺寸的零部件为美国 F-35 战斗机垂尾, 长 3.6 m, 重约 90 kg; 美国 F-22 战斗机上采用 RTM 制造的各种复合材料部件达 400 件, 占有复合材料结构总量的 1/4, 比原设计节省了约 2.5 亿美元。

欧洲是湿法成型技术发展较快的另一地区, RTM 制件的年增长率达到 8%~10%。业内人士估计, 未来大多数大型的复合材料结构或半结构部件都将是 RTM 制品, 甚至所有重型卡车的复合材料壳体只用 RTM 生产。基于 RTM 开发出来的 VARTM 和 SCRIMP 工艺近年来发展迅速, 这些工艺方法只采用单面硬模 (而 RTM 采用双边闭合模) 来铺放纤维增强体, 另一面则采用真空袋覆盖, 由电脑控制的树脂分配系统先使树脂胶液迅速在长度方向充分流动渗透, 然后在真空条件下向厚度方向缓慢浸润, 大大改善了浸渍效果, 减少了缺陷发生, 产品性能和质量都能得到有效的保证。与手糊制件相比, 这些工艺制件成本节约可达 50%, 树脂浪费率低于 5%, 而制件的强度、刚度及其他物理特性可提高 30%~50% 以上。SCRIMP 工艺还有一个突出的优点是加工过程的环保性, 由于采用闭模成型, 挥发性有机物和有毒空气污染物均受到很好的控制, VOC 排放不超过 5 ppm 的标准; 而采用开模成型, 苯乙烯的挥发量超过 500 ppm。

SCRIMP 使大尺寸、几何形状复杂、整体性要求高的制件的制造成为可能, 目前它可成型面积达 185 m²、厚度为 3~150 mm、纤维含量达 70%~80%、孔隙率低于 1% 的制品。树脂浪费率低于 5%, 劳动成本可节约 50% 以上。英国的 VT (Vosper Thornycroft) 公司自 1970 年以来为英国皇家海军制造了 270 艘复合材料扫雷艇, 最大的扫雷艇长达 16 m。在采用 SCRIMP 之前, 扫雷艇的玻璃钢 (FRP) 制件的重量约占总重量的 30%; 而采用 SCRIMP 后, FRP 制件的重量比例有望提高到 35%~40%。VT 公司应用 SCRIMP 制件开展的项目很广泛, 包括运输船、作业艇、救生艇、海洋港口工程结构、大型冷冻舱等。VT 公司还为 Compton Marine、Westerly 等公司提供技术支持, 用经济的 SCRIMP 替代原有的开模工艺制造出长 14 m 游艇。

瑞典海军的 Visby 轻型护卫舰长达 73 m (舰上有 10.4 m 的梁), 这是目前建造的最大的 FRP 夹芯结构舰艇。该工艺成型速度快, 确保了高纤维含量、制品的优异性能和质量稳定性。Peichell Pugh 公司用 SPX7309 环氧室温固化注射树脂开发了 Corum 游艇 (OD48 系列), 制造周期仅为 30 min。

Ciba-Geigy 公司采用 Injectex 织物/树脂渗透介质/低粘度环氧体系开发了舰船部件。

实践证明 SCRIMP 制造的部件性能可与广泛采用的热压罐工艺的相媲美。随着 SCRIMP 技术从军事应用向民用工业的转移,在汽车、建筑等行业将有很大的拓展空间。以 Lotus 公司为代表的汽车厂家已实现该工艺的大规模生产,用于制造轿车车身、大型卡车车顶和面罩、豪华客车及公共汽车前脸和后尾等部件。

SCRIMP 的另一个主要应用领域是风机叶片的制造。目前,国外采用闭模的真空辅助成型工艺生产大型叶片(叶片长度在 40 m 以上),可以一次整体成型,无需二次粘接。世界著名的叶片生产企业 LM 公司采用这种工艺开发出 56 m 长的全玻璃纤维叶片。

除湿法成型技术外,其他的低成本制造技术还有纤维缠绕、拉挤等。

纤维缠绕主要用于旋转体(如圆柱体)的制造,如压力容器、石油管道、排水管道等。德国 ITV 公司利用开发的环型缠绕技术制造压力容器,在环形缠绕头上配置标准的虹吸式树脂注入单元,采用湿法缠绕,在缠绕全过程中几乎无树脂滴漏,降低了树脂消耗量。

缠绕成型的一种拓展技术为预浸带自动缠绕,采用的是经树脂预浸渍的纤维预浸带,这种方法比一般的纤维束缠绕铺放的效率更高。业内专家介绍,美国波音公司 B787 飞机上使用复合材料的 50%是采用纤维预浸带缠绕工艺制造的,其中也包括整体机身段,其长度和直径都在 5 m 以上,整个机身段的成型仅在 3 天之内就可完成,有效地保证了产品的质量。

拉挤成型具有高度自动化大量生产的特性,特别适合民用产品的成型生产,许多金属件可以被拉挤成型的 FRP 制件来取代,各式各样的制件(如实心方管、实心圆管、工型梁、C 型梁、空心方管、空心圆管以及加肋补强空心制件等)都可拉挤成型,几乎任何截面都可制造出,其截面形状变化能力非常强。复合材料的拉挤成型制件取代金属制件,解决了锈蚀的问题,在建筑和其他民用工业中已取得广泛应用。

2.3.2 国内低成本成型技术的现状及发展趋势

国内复合材料低成本成型技术发展起步较晚,技术水平较低,特别是高端的航空航天产品的低成本制造,目前仅停留在实验阶段,这也从一个侧面反映出我国复合材料产业的总体现状和水平。

承担我国高端的航空航天和军事装备所需求的复合材料生产的企业大都为国营企业,我国航空工业各大骨干企业和材料工艺研究院、所都拥有相当规模的复合材料制备设施,经多年的建设和努力,积累了较丰富的经验,达到了较高的技术水平,多年来承制的波音飞机大型复合材料部件都能通过国际相关标准的验收,赢得了较好的信誉。我国直升机复合材料的占比达 30%以上,关键材料基本实现国产化。航天运载工具的大型壳体结构是采用纤维缠绕方法制造的复合材料构件,性能和质量都满足了我国航天工程发展的要求。

中低端复合材料生产企业主要分布在长三角地区,这类企业在整个复合材料产业中占到 90%,其中民营企业占有相当大的比例。这些企业在民用复合材料的开发应用上发展很快,产品以玻璃纤维复合材料为主,涉及的应用领域极为广泛,现在正朝着发展高端的碳纤维复合材料。

针对高端的航空航天复合材料产品的低成本成型技术研发,由于应用需求问题目前仍处于初级阶段,在原材料、制造设备、成型技术以及产品验证系统和规范标准等方面还未形成自己的体系。

其他民用复合材料的生产目前多以手糊工艺制造为主,占有相当大的比重,但近年来随着复合材料工业对成型工艺产品的质量要求的不断提升,特别是对成型工艺的环保及成本方面的要求越来越高,促使这些企业对复合材料的生产工艺、产品质量进行改进和升级。低成本成型技术(包括湿法 RTM 和 VARTM,缠绕和拉挤工艺)得到了迅速的发展。

从产业规模和生产能力来看,我国企业数量是美国的 6 倍,而年产量仅是美国的 1/3。中小型民营企业数量巨大,目前普遍存在诸如生产工艺落后、缺乏自主设计能力(产品多为来样加工)、无严格的质量检验体系、环境污染严重等一系列问题,这是我国复合材料产业目前的基本情况。

3 碳纤维树脂基复合材料存在的问题、对策及建议

我国的碳纤维树脂基复合材料研制起步于 20 世纪 60 年代末, 至今已有 40 多年的发展历程, 在产品开发、制造加工、产品应用及人才培养等方面都取得了很大进步, 但是同先进国家相比仍有很大差距, 尤其近年来, 由于西方国家的快速发展, 这种差距还有加大的趋势。目前我国碳纤维的品种、质量和产业规模远不能满足国内复合材料快速发展的要求, 仍然是制约我国碳纤维复合材料发展的瓶颈, 这主要表现在:

- 1) 产品质量不完全过关, 缺陷多, 性能分散性大;
- 2) 产品规格和品种少;
- 3) 由于性能和质量上的问题以及生产成本高, 制约了生产规模的扩大。

从技术上看, 造成上述问题的主要原因是基础研究工作薄弱, 造成生产碳纤维的 pan 基原丝质量不高。因此, 以提高原丝质量为目标, 应加强科学基础及工程化研究, 强化国内碳纤维研究生产的自主创新能力, 建立高效的产业创新体系, 坚持原始创新与引进消化吸收并举, 突破瓶颈, 改变我国碳纤维落后局面。

在管理体制上也存在如下一些问题:

1) 碳纤维是多学科和多技术集成的高新技术产品, 国家在项目组织、管理、实施和政策扶持等上应起主导作用, 但多年来这种局面尚未形成, 国家总体上的规划和领导以及集中调控作用不够, 基础研究、技术攻关、中试生产、工业化生产和应用开发之间缺乏有机联系, 因而无论从规模和质量上, 与国外水平的差距越拉越大。

2) 国内碳纤维多元化研发的格局尚未建立。从碳纤维产业的源头到最终产品, 真正拥有完整研发与生产过程的单位不多, 技术水平同国外相比差距较大。潜心研究碳纤维产业发展的气氛不够浓厚, 民营企业中拿来主义现象较为明显, 急于求成、急功近利的思想十分严重。

3) 以应用牵头, 带动碳纤维产业发展的体制未健全, 以往国内航空航天高端产品应用主要依赖进口, 而国产碳纤维得不到应用, 因此也就得不到

改进和提高的机会。

4) 企业之间产、学、研交流相当欠缺。碳纤维产业的发展不仅需要产、学、研相结合, 而且更需要产、学、研、用有机地相结合, 但在现有体制下产、学、研、用这个有机体系尚未真正建立, 因而阻碍了国内碳纤维产业的快速发展。

5) 装备技术研发滞后。有关碳纤维装备技术研发工作长期没有得到相应的重视。到目前为止, 如大容量聚合反应器等被称为碳纤维 7 大关键性设备只有两种设备实现了国产化, 而其余 5 种设备尚需进口, 严重影响着国内碳纤维产业化的进程。

6) 目前国内缺乏具有工程孵化特征的研发基地。科研院所目前更多地承担产品研发, 工程研发放在企业, 而企业又往往缺乏强大的研发力量。因此, 我国需要一个以产业化为目的、以科研院所技术力量为主导、企业积极参与的具有工程孵化功能和特征的研发基地。

其实, 这些问题在国内业界早有所认识, 但长期没有得到认真解决, 主要原因还是在于体制和机制方面的问题。

针对碳纤维产业存在的问题, 提出建议如下:

1) 建立以市场需求为动力的机制。国内航空航天等行业领域的高端产品应加大应用国产碳纤维的力度, 及时解决在应用中发现的问题, 促进高端碳纤维的发展。

2) 建立符合中国市场特征的自主生产的碳纤维产品规格和质量评价体系, 科学论证产品和技术的质量定位, 以终端复合材料的应用来评价碳纤维的质量。建立高、中、低 3 个层次的碳纤维产业和相应的产业标准, 应根据不同的应用目标建立符合中国市场的技术—生产—应用的产业链条, 形成产—学—研—用一体化的研发体系, 既有多功能的开发能力, 又有小批量生产能力。

3) 集中力量进行高端碳纤维的技术和质量攻关。加快碳纤维国产化进程不仅需要明确的产品市场定位、充足的资金支持、发展中市场的及时跟进, 而且需要强大的社会与政府力量的支持、多元化力量的有效介入, 才能有力地推动碳纤维产业化进程。

4) 发展高强度的碳纤维聚丙烯前驱体原丝生产技术, 建立全方位质量保证体系和标准化体系,

重点发展原丝原材料入厂检验和验收标准、生产过程中工艺参数优化和稳定性控制等质量保证体系,保证批量生产质量稳定,在此基础上形成大规模产能并建立碳纤维原材料生产的产业链。

5) 强化碳纤维生产线的全面质量控制与质量保证体系和标准化体系。特别是重点发展前驱体原丝入厂检验和验收标准、碳化过程的工艺参数优化和质量保证体系,保证批量生产的性能和质量稳定,在此基础上形成年产能达千t规模的高性能碳纤维生产基地。

6) 在参考国外碳纤维产品相关标准的同时,尽快建立健全符合中国国情的独立自主的产品标准体系,避免碳纤维发达国家对我国碳纤维产品的限制和干扰。

7) 实现主要生产设备国产化,重点是大规格的反应釜、预氧化炉、碳化炉、收丝机、尾气焚烧炉及高温碳化炉等设备的国产化,耐高温($\geq 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$)、大尺寸($\geq 1500\text{ mm}\times 1000\text{ mm}\times 10\text{ mm}$)石墨等辅助材料的国产化。

针对树脂基体的产品系列不全、性能和质量不高、产业规模较小等主要问题,提出建议:应以环氧树脂为主,结合发展高温型的双马聚酰亚胺树脂,大力发展新型增韧的高强高温树脂体系,形成产品系列,扩大生产规模,与复合材料结构制造形成产业链,以满足航空航天高端产品应用的需要。

低成本成型技术是碳纤维复合材料产业发展的重点方向,目前我国存在的主要问题是高端的航空航天复合材料结构的低成本成型技术尚处于试验阶段,未能形成规模化生产,其他应用领域特别是在航海及风电应用领域,有待于提高低成本成型技术生产的产品品种和规模。

针对低成本成型技术存在的主要问题,提出建议如下:

1) 加快发展高效低成本的树脂基复合材料整体成型技术,包括树脂传递成型技术(RTM)、预浸带自动铺放技术(ATP)、拉挤成型技术、纤维缠绕技术等,形成规模化生产能力,满足航空、航天和民用工业需求,特别是大飞机复合材料次结构件及主结构件制造技术需求。

2) 重点发展集设计、材料成型和配套保障的

技术体系,加快发展纺织用复合材料的液态成型技术和自动化技术(如纤维缠绕、拉挤、编织、丝束铺放、隔膜成型、自动成套裁减、激光样板等);发展高效率的非热压罐固化技术,如微波、电子束、超声波、X射线等新固化技术。

3) 建立飞机复合材料设计中心和试验评价验证中心。跟踪国外的先进经验,研究和发展复合材料结构优化设计的新概念、新方法,推进结构整体化设计和制造技术。

4) 发展复合材料的应用分析方法和分析工具,重点发展用来预测复合材料的加工性能、结构完整性以及耐久性的先进计算机应用分析工具;发展将先进的分析法及模拟方法与数据库技术相结合的智能化设计和验证系统。

参考文献 (References)

- [1] Mazumdar S K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering[M]. USA: CRC press Ltd, 2002
- [2] Lee S. A review of newly developed composite materials, NRCC, NAE ST 358[R], 1984-11
- [3] Lee S. An overview of advanced composite materials and their industrial applications[C]//Inter Forum on High Performance Fibres and Composites Materials. Nanjing, China, 2003-03
- [4] Lee S. A review of advanced composite materials and structures for aircraft applications[C]//Inter Forum on High Performance Fibres and Composites Materials. Xi'an, China, 2007
- [5] Lin K Y. Composite materials for aerospace structures, AA432[R]. Winter Quarter, 2006
- [6] Mangaliril P D. Composite materials for aerospace applications[J]. Bulletin of Materials Science, 1999, 22(3): 657-664
- [7] 杨乃宾. 先进树脂基复合材料[M]//中国材料工程大典: 第十卷, 第七篇. 北京: 化学工业出版社, 2000
- [8] Jeff Engbrecht. Relevant issues of carbon fiber for the emerging wind market[G]. Toray Carbon Fibers America, Inc, 2004-02
- [9] Diefendorf R J, Tokarsky E. High-performance carbon fibers[J]. Polymer Engineering and Science, 1976, 15 (3): 150-159
- [10] Zhang F F. The situation of the carbon fibre supply and demand[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2006, 31(4): 5-9
- [11] 陈祥宝, 包建文. 聚合物基体材料[M]//中国材料工程大典: 第十卷, 第三篇. 北京: 化学工业出版社, 2000