

美、日、英高性能碳纤维技术与产业发展比较

周宏

军事科学院系统工程研究院,北京 100082

摘要 20世纪50年代末至70年代末是世界高性能碳纤维技术的快速发展期。本文梳理了这一时期高性能碳纤维技术的发展史;综述了美、日、英3国的3个企业、2个研究机构与5位科学家的关键技术贡献;运用态势分析方法,从科学研究、工业基础和发展环境3个方面,分析了美、日、英3国发展高性能碳纤维产业的关键成功因素,阐述了其产业结局不同的成因。

关键词 人造丝基碳纤维;PAN基碳纤维;沥青基碳纤维;中间相沥青基碳纤维

1892年,爱迪生发明了将碳化天然纤维用作白炽灯发光体的技术,首次实现了碳纤维的商业化应用。当时的碳纤维力学性能差,容易损坏。此后的近60年间,改进碳纤维力学性能的研究从未停止过,但收效甚微,碳纤维技术陷入休眠期。20世纪50年代末,碳纤维基础理论研究取得突破,为其高性能化发展指明了方向;与此同时,以尼龙和聚丙烯腈纤维为代表的化纤技术步入成熟期,引发碳纤维技术进入了“再发明(reinvented)”时代^[1]。20世纪60至80年代,高性能碳纤维处于发展热潮期,美、日、英相继突破了关键技术,建立了产业。20世纪90年代,高性能碳纤维应用步入爆发期,碳纤维增强树脂(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)已成为了航空航天器等尖端军民装备的主要结构材料^[2]。

20世纪50年代末至70年代末,美国、日本和英国的科学家分别发现了石墨晶须及其超高强特性,指明了高性能碳纤维领域的技术发展方向和目标;发明了

人造丝基、聚丙烯腈(PAN)基、沥青基和中间相沥青基碳纤维制备技术,奠定了高性能碳纤维产业的技术基础。本文基于高性能碳纤维技术与产业发展历程中,美国、日本与英国的3个企业、2个研究机构和5位科学家的贡献,分析这3个国家高性能碳纤维产业结局不同的原因。

1 世界高性能碳纤维技术的发展

高性能碳纤维,是碳含量>92%,具备强度 ≥ 3530 MPa、模量 ≥ 230 GPa、延伸率为0.7%~2.2%等优异力学特性的纤维形态的碳材料^[3-4]。20世纪50年代末,美国科学家关于“石墨晶须”超高强特性的科学发现,揭开了高性能碳纤维技术的发展序幕。此后的20多年里,美国、日本和英国的研究机构与企业持续推进了该领域的技术研发和产业建设。

收稿日期:2018-03-27;修回日期:2018-06-07

基金项目:国家出版基金项目(2016T-008)

作者简介:周宏,高级工程师,研究方向为对位芳纶材质单兵装备技术与国产高性能纤维技术发展战略,电子信箱:13901157176@139.com

引用格式:周宏.美、日、英高性能碳纤维技术与产业发展比较[J].科技导报,2018,36(13):8-15;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.001

1.1 美国

1) 美国联合碳化物公司的成功与失败。

美国联合碳化物公司(Union Carbide Corporation)的前身是1886年成立的美国国家碳材料公司(National Carbon Company),是美国合成碳材料产业的开创者。

20世纪50年代,联合碳化物公司创建了帕尔马技术中心(Union Carbide Corp.'s Parma Technical Center),开展碳材料科学的基础研究。该中心延揽了许多杰出的青年科学家从事他们感兴趣的研究,获得了极其丰硕的成果。1958年,Bacon发现了石墨晶须(graphite whiskers)及其超高强特性,并发明了实验室制备石墨晶须的方法;1959年,Ford和Mitchell发明了高性能人造丝基碳纤维制备技术,生产出了当时强度最高的商业化碳纤维;1964年,Schalamon等发明了2800℃以上高温中“热拉伸”(hot-stretching)人造丝制造高模量碳纤维的技术;1970年,Singer发明了中间相沥青基碳纤维制备技术等。2003年9月17日,美国化学会(American Chemical Society, ACS)确认,帕尔马技术中心曾开展的高性能碳纤维技术研究,是一项“美国历史上的化学里程碑”(national historic chemical landmark)。Bacon和Singer等科学家的发现和发明,为碳纤维增强复合材料的科学技术奠定了基础^[5]。

20世纪60至80年代,联合碳化物公司的高性能人造丝基碳纤维和中间相沥青基碳纤维技术居世界领先水平。20世纪60年代初,美国空军材料实验室(Air Force Materials Laboratory, AFML)使用联合碳化物公司1959年投产的高性能人造丝基碳纤维作为酚醛树脂的增强体,研制了航天器热屏蔽层。这是碳纤维首次替代玻纤和硼纤维作为树脂增强体,制成轻质耐热复合材料制件并获成功应用。纤维增强复合材料技术由此跨入了“先进复合材料”时代^[6]。1982年时,联合碳化物公司生产的Thornel P-SS型中间相沥青基碳纤维连续长丝的模量已达到了830 GPa^[7]。

美国联合碳化物公司在当时本该成为世界高性能碳纤维产业的引领者,但由于盲目扩张和管理混乱,反以悲剧告终。1984年其在印度的分公司发生博帕尔惨案,造成人类历史上迄今为止最严重的化学毒气泄露事故,导致近80万人死伤。这一事件致其倒闭,几经转卖后,其碳纤维业务现为美国氰特工业公司(Cytec Industries Inc.)拥有。

丧失了联合碳化物公司的头雁引领,美国高性能

碳纤维产业未能实现应有的辉煌。目前,美国虽拥有可保障军用的技术、产品和产能,但产品不具性价比优势,没有市场竞争力,故像波音飞机机体结构材料这样的民用需求只能靠日本东丽公司供应。

2) Bacon发现石墨晶须及其超高强特性。

1956年,Bacon开始研究碳三相点处温度和压力的测量问题。使用直流碳弧炉,在近 1.01325×10^7 Pa和3900 K条件下,实验表明,压力较低时,负极上的气态碳生长出了石笋状的长丝,即石墨晶须。石墨晶须的直径只有人头发的1/10,最长约2.54 cm,可弯曲和扭结而不脆断,特性令人惊奇。Bacon研究认为,石墨晶须是由碳片层沿长度轴卷绕而成,结构的高度取向是其具有超高强特性的原因所在,Bacon的发现获得了美国专利,相关研究成果也发表在1960年的《应用物理》(Journal of Applied Physics)上。由此,高性能碳纤维技术发展有了明确的目标和方向(表1)^[8]。

表1 人造丝基碳纤维与石墨晶须性能比较

Table 1 Comparison of mechanical properties of rayon-based carbon fiber and graphite whiskers

高性能纤维	拉伸强度/GPa	杨氏模量/GPa
人造丝基碳纤维	0.35	34~62
石墨晶须	20.7	>800

3) Singer发明中间相沥青基碳纤维。

20世纪60年代,从事碳化机理研究的Singer尝试探索可工业化制造石墨晶须的方法。要制得石墨晶须,首要的是要找到合适的含碳原料。只有结构足够有序、碳含量足够高的含碳原料,才能经2500℃以上热处理,制成含碳量近乎100%且结构高度有序的高硬度纯石墨质材料。此前,科学家曾研究过酚醛、苯酚和聚酰胺等近20种有机物,但它们都不适合用作高性能碳纤维的前驱体。因此,要制造具有石墨晶须特性的高性能碳纤维,需要新的前驱体原料^[9]。

石油基和煤基沥青,是制造碳和石墨的基础原料。沥青是分子量分布很广的数百种芳烃类物质构成的复杂混合物,含碳量90%以上,是高碳含量有机物。Singer研究发现,中间相沥青具有导热、导电、抗氧化、低热膨胀率等优异性能,其重量的80%~90%可转化为碳。1970年,Singer发明了中间相沥青制备方法,并以其为原料制成了中间相沥青基碳纤维^[10]。中间相沥青

基碳纤维具有高强、高模和高导热特性,是制造航天器不可替代的结构材料。

1.2 日本

1) 大阪工业技术试验所和進藤昭男发明 PAN 基碳纤维。

日本政府大阪工业技术试验所(Government Industrial Research Institute, GIRIO)成立于1918年,成立该机构是为日本关西地区的企业提供技术支持。该机构1993年被并入日本产业技术综合研究院(Agency of Industrial Science and Technology, AIST),更名为大阪国立研究所(Osaka National Research Institute, ONRI)^[11]。

20世纪50年代,日本进入经济起飞期,强烈渴望增强自主创新能力。大阪工业技术试验所鼓励科研人员开展自己感兴趣的研究,大力资助可转化为产业的研究项目,允许有实际应用潜力的技术成果申请专利。正是这种有利的氛围,使 PAN 基碳纤维研究结出了果实^[12]。

1959年,大阪工业技术试验所的青年科学家進藤昭男(Akio Shindo),读到了《日刊工业新闻》(Nikkan Kogyo Shimbun)刊登的介绍联合碳化物公司人造丝基碳纤维研究进展的简讯,激发了他强烈的好奇心。之后,在大阪工业技术试验所的资助下,他开始了碳纤维研究。为寻找合适的前驱体纤维,進藤昭男从百货商店收集了各种织物的布头,并对它们进行了1000℃的热处理。他发现美国杜邦公司奥纶(Orlon[®])品牌聚丙烯腈纤维织成的布料的热稳定性非常好,经更高温度热处理后,能以黑色绒毛状小球的形态存在。进一步研究表明,在空气中进行高温热处理,聚丙烯腈分子内的氮和氢反应生成了氨气和氢氰酸而释放,碳转化率达50%~60%;可形成纤维形态完好且强力、模量和耐热性都很好的 PAN 基碳纤维;经更高温度热处理,可得到纤维态石墨。進藤昭男的研究,为实现 PAN 基碳纤维的产业化奠定了技术基础^[13-14]。

大阪工业技术试验所与企业交流频密,知识和技术转移迅速,孵化了大量的商业利益。1959年和1970年,东海碳素公司(Tokai Electrode Mfg. Co., Ltd.)、日本碳素公司(Nippon Carbon Co., Ltd.)和东丽公司(Toray Industries, Inc.)分别获得了该所 PAN 基碳纤维技术的专利授权,为产业建设铺平了道路。

2) 东丽公司的 PAN 基碳纤维产业建设。

东丽公司成立于1926年,前身是东洋人造丝公司(Toyo Rayon Co., Ltd.)。创立之初,该公司雇用多名欧

洲专家,引进先进技术和管理,于1927年建成生产线投产了黏胶纤维;此后,通过持续创新发展,成功进入了合成化学工业领域。20世纪40至60年代,东丽公司先后实现了尼龙、聚酯和丙烯酸等纤维的产业化,并于1961年开始研发碳纤维生产技术,1968年全力投入 PAN 基碳纤维产业建设;通过自主研发、收购兼并和专利转让,1971年实现了 TORAYCA[®] 品牌 PAN 基碳纤维的商业化,并使其逐步实现了从体育用品到航空航天器制造的广泛应用^[15]。

3) 大谷杉夫发明沥青基和中间相沥青基碳纤维。

20世纪50年代中后期,大谷杉夫(Sugio Otani)在群马大学(Gunma University)开始从事碳化技术研究。他研究了许多纯化合物、聚合物,以及沥青的碳化机理,创立了沥青平均模型结构研究方法。期间,他发现,氮气中260℃热处理的吹制沥青、煤基沥青和聚氯乙烯(PVC)都具有很好的可纺性,1000℃热处理聚氯乙烯和吹制沥青可制得性能尚可的碳纤维。此后,他致力于低成本、高质量碳纤维的制备技术研究;研发了以工业石油酸淤渣为原料的“氮气环境-热处理-熔纺-再热处理”的沥青基碳纤维制备技术^[16];发明了高分子量石油基和煤基沥青制备技术,制得的沥青含有稠环芳烃且烷基基团含量低,经空气中熔纺、氮气中碳化,可制成碳含量91%~96.5%的高性能碳纤维^[17];发明了使用四苯并酚制备中间相沥青,再经熔纺和碳化制成具有各向异性特性的中间相沥青基碳纤维的技术,该技术1978年获美国专利。采用大谷杉夫的专利技术,吴羽化学工业公司(Kureha Chemical Ind. Co.)于1970年开始生产沥青基碳纤维。

目前,日本拥有完备的人造丝基、PAN基、沥青基和中间相沥青碳纤维产业,占据着各细分技术的制高点,垄断着所有高端产品的市场。

1.3 英国

1) 英国皇家飞机研究中心 Watt 发明高性能 PAN 基碳纤维。

皇家飞机研究中心(Royal Aircraft Establishment, R.A.E. Farnborough)是英国最早的飞机研究设计基地,其所在地范堡罗市是20世纪初的世界“航空谷”,是鹞式和协和式飞机的诞生地^[18-19]。该中心1961年开始研究玻纤缠绕增强复合材料(glass fiber reinforced plastics, GFRP)火箭发动机部件。玻纤强度虽高,但模量当时只有70 GPa。

Watt 原在该中心从事氧化碳化、热裂解石墨和石墨抗渗核燃料罐等研究,1963 年开始研究高性能碳纤维。Watt 认为,石墨晶须的性能就是碳纤维要达到的目标。为使碳纤维的结构能逼近石墨晶须,Watt 测量分析了聚偏二氯乙烯、聚乙烯醇和聚丙烯腈等纤维的碳残留和热裂解性能。他发现,拉伸并热处理聚丙烯腈纤维,可制得高强(1~2 GPa)高模(200~500 GPa)碳纤维。通过研究聚丙烯腈纤维预氧化和碳化中的化学反应及分子结构变迁,Watt 认为,聚丙烯腈前驱体纤维的结构特性对 PAN 基碳纤维性能具有决定性影响。在考陶尔斯公司(Courtaulds Ltd)和摩根坭坭公司(Morganite R&D Ltd)等英国老牌化纤及碳材料企业的支持下,Watt 发明了高度取向的聚丙烯腈前驱体纤维,并最早制成了高性能 PAN 基碳纤维。Watt 的技术向美、日进行了转让,这极大地促进了世界高性能 PAN 基碳纤维技术的发展^[20]。

同期,英国罗尔斯罗伊斯航空发动机公司,简称罗罗公司(Rolls-Royce PLC)和英国原子能研究中心(Atomic Energy Research Establishment, AERE)也深度参与了高性能碳纤维的研究。

2) 罗罗公司的贡献与遗憾。

Watt 发明高性能 PAN 基碳纤维制备工艺技术后不久,罗罗公司于 20 世纪 60 年代中后期率先实现了高性能 PAN 基碳纤维的连续化生产^[21],并很快就研制了碳纤维增强树脂材质的飞机发动机进气风扇叶片,准备用在当时最先进的涡扇发动机上。但该叶片未能通过撞击试验,加之该型发动机研制严重失误,最终导致罗罗公司破产重组。这给刚刚起步的英国碳纤维产业带来了极为不利的影响。

2 美、日、英 3 国高性能碳纤维技术和产业发展成功因素分析

运用态势分析法(strengths weakness opportunities threats, SWOT)(图 1),从科学研究、工业基础和发展环境等 3 个方面,对美、日、英 3 国 20 世纪 60 至 80 年代发展高性能碳纤维技术和产业期间所面临的优势、弱势、机遇和威胁比较分析如下。

2.1 科学研究

1) 碳材料科学技术基础。

碳纤维就是纤维形态的碳材料。认识碳纤维的微

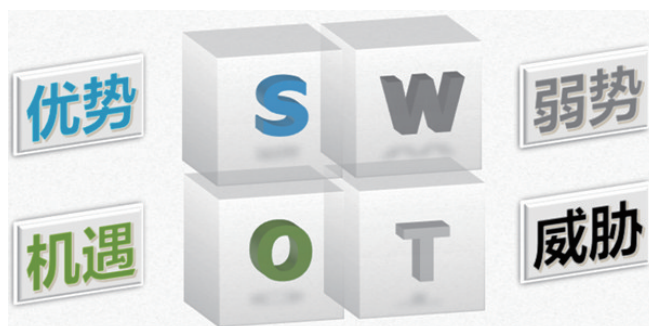


图 1 态势分析法

Fig. 1 SWOT Model

观特性并实现其产业化复制,离不开碳材料科学技术的支撑。

帕尔马技术中心成立时,联合碳化物公司已从事了 50 多年的合成碳材料及制品生产,拥有领先的高性能人造丝基碳纤维技术和产业。

进藤昭男 1952 年加入大阪工业技术试验所时,该所已有 30 多年碳材料和纺织技术研究基础。1959 年开始研究碳纤维时,他已研究了近 7 年高密度碳制品和核反应堆用碳材料^[22],这对他能快速取得初期研究成果助益良多。

皇家飞机研究中心拥有非常好的化学、塑料和碳材料技术研究基础。一方面,1961 年该中心就开始研究玻纤增强树脂(GFRP)导弹结构体技术,故高性能人造丝基碳纤维一出现,Watt 就判断碳纤维将在该领域替代玻纤。另一方面,1963 年进藤昭男在美国碳材料学会(American Carbon Society, ACS)第 6 届双年学术会议上发表研究报告后,Watt 敏锐地把握了其中的关键信息,把技术突破口精准地框定在了聚丙烯腈前驱体纤维上,并快速取得了突破^[23]。

2) 杰出的科学家。

对 Bacon、Singer、进藤昭男、Watt 和大谷杉夫等 5 位科学家来说,进入碳纤维技术研究领域都有些偶然。Bacon 做测量碳三相点温度压力实验时,发现了石墨晶须及其特性。从事碳化机理研究的 Singer,为寻找更好的前驱体原料,发现了中间相沥青;后受同事都在研究纤维的氛围吸引,发明了中间相沥青基碳纤维^[24]。进藤昭男偶然看到报纸简讯,就产生了研究碳纤维的想法,并快速付诸实施。科学的直觉和想象力,让 Watt 幸运地把研究目标聚焦在了高取向度聚丙烯腈前驱体纤维上^[25]。大谷杉夫从研究碳化机理起步,到研究沥青特性与制备,而后才开始研究沥青基碳纤维^[26]。

尽管研究始于偶然,但5位科学家成果斐然的发现发明却奠定了高性能碳纤维发展的科学技术基础。他

们的杰出,就在于能抓住偶然显现的科学现象并揭示其机理,使制造和应用高性能碳纤维成为了可能(表2)。

表2 5位碳材料科学家的基本信息
Table 2 Basic data of the five important scientists

姓名	国家	主要贡献	研究时间及年龄		获基础专利时间及年龄	
			时间	年龄	时间	年龄
罗格·贝肯(1926—2007)	美国	发现石墨晶须及其特性,发明实验室制备技术	1956	33	1960	34
進藤昭男(1926—2016)	日本	发现聚丙烯腈纤维耐熔融特性,发明PAN基碳纤维制备技术	1959	33	1963	37
威廉姆·瓦特(1912—1985)	英国	发明高取向度聚丙烯腈前驱体纤维和高性能PAN基碳纤维制备技术	1963	51	1968	57
伦纳德·辛格(1923—2015)	美国	发明中间相沥青基碳纤维制备技术	1956	37	1977	54
大谷杉夫(1925—2010)	日本	发明沥青基碳纤维和中间相沥青基碳纤维制备技术	1960	34	1978	53

3) 知识的传播与转移。

《日刊工业新闻》报道联合碳化物公司人造丝基碳纤维的技术进展^[27];《应用物理》杂志发表Bacon发现石墨晶须及其特性的论文^[28];在美国碳材料学会的会议上,進藤昭男发布题为《聚丙烯腈纤维的碳化》(On the carbonization of polyacrylonitrile fiber)的学术报告^[29];美国军官William Postelnek提示進藤昭男,PAN基碳纤维的优势在于其力学特性^[30];大阪工业技术试验所向多家企业转让PAN基碳纤维技术;Watt向美、日转让聚丙烯腈前驱体纤维制备技术;东丽公司收购其他日本企业的碳纤维制备技术;东丽公司与联合碳化物公司互换聚丙烯腈前驱体纤维制备和碳化技术等。此外,密集的技术信息传播、学术交流和技术转让等知识的传播与转移活动,大大促进了早期高性能碳纤维技术的快速发展。

2.2 工业基础

1) 化纤工业技术基础。

尼龙是美国杜邦公司发明的第一种真正意义的化学纤维,1939年商业化后获得了巨大成功。20世纪40年代英国帝国化学工业公司(Imperial Chemical Industries)实现了聚酯纤维的产业化,1950年美国杜邦公司开始商业化生产其发明的聚丙烯腈纤维。英国考陶尔斯公司是1794年成立的老牌纺织企业,20世纪60年代时,已有多年的聚丙烯腈纤维的生产技术经验。日本东丽公司1927年开始生产人造丝,其后一直紧跟化纤技

术的发展步伐,于1941、1958和1964年先后实现了尼龙、聚酯和聚丙烯腈纤维的产业化。成熟的化纤工业技术基础为高性能碳纤维的技术突破和产业建设提供了必要条件。

此外,作为化纤技术的创始人,美国杜邦公司也曾一度研发过碳纤维,但当时化纤产业发展较快,因而舍弃碳纤维研发与产业。

2) 企业主导产业建设。

大阪工业技术试验所1959年初步突破PAN基碳纤维技术后,最终放弃了自建产业的想法,把技术转让给了企业。东海碳素和日本碳素两个日本碳材料企业获得大阪工业技术试验所的技术转让后,1959年开始PAN基碳纤维的产业技术研发与建设,因缺乏化纤经验,长期没能突破技术瓶颈。1961年,已具有一定化纤技术基础的东丽公司,恰逢其时地进入该领域,在获得Watt聚丙烯腈前驱体纤维技术和联合碳化物公司碳化技术转让后,率先产业化生产出了高性能PAN基碳纤维^[31]。

3) 杰出企业家。

历时10多年的产业建设竞争期,许多竞争者已半途而废,而东丽公司则坚持下来并获得了空前成功。东丽公司现任高级副总裁安倍光一(Koichi Abe)认为,看准了碳纤维经较长期研发可能应用在飞机上的潜在价值,是东丽公司得以坚持下去的源动力^[32]。

创新和企业家理论创立者、经济学家熊彼得(Joseph Alois Schumpeter)指出,企业家是创新者;没有企

业家的领导,创新不可能成功^[33]。能透视碳纤维潜在价值并为之而不懈努力的企业家,定是同类中的佼佼者。杰出企业家,是日本高性能碳纤维产业得以成功的核心要素之一。

2.3 发展环境

20世纪60至80年代,为应对接续的韩越战争和持续冷战,美国产业政策偏向于军工;尽管碳纤维技术基础研究成就辉煌且较早实现了产业化,但未能有效地开拓民用市场,使产业发展走上了窄路,没有形成经济规模。同期,英国虽科技基础深厚、社会稳定,但经济低迷;技术上图新、图快,引发风险,造成重大失误,给初期的产业发展涂上了阴影。其时,日本经济增长迅速,政府、企业和民众齐心的发展自主创新产业;外部的战时需

求旺盛,使其不仅可以闷声发大财,而且有精力和时间进行高性能碳纤维技术的自主研发和产业建设。

3 结论

尽管美国发现了高性能碳纤维的科学机理,最早建立了产业,但结局却差强人意。英国虽然率先突破高性能PAN基碳纤维生产技术,并开创性地用其研制飞机发动机零件,但终因技术冒进而“败在开始”(end in the beginning)^[34]。因此,日本拥有建设高性能碳纤维产业的多元动力和极佳环境,态势最佳;而美、英则只是依赖科学家的兴趣和企业拓展传统业务的意愿,态势弱势明显(表3)。

表3 美、英、日高性能碳纤维产业早期建设态势分析

Table 3 SWOT analytical factors for three countries' industries of high performance carbon fibers

	S(优势)	W(弱势)	O(机遇)	T(威胁)
美国	科学家发现发明能力强、水平高; 基础科研实力强大; 工业基础雄厚; 化纤技术领先; 军事应用牵引及时	韩战越战接续,长期冷战; 产业政策军工导向,工业应用推广动力不足,产业发展走入窄路; 社会不稳定	获得发展尖端武器新材料; 建设高性能碳纤维产业	技术上形成了对人造丝基碳纤维的路径依赖; 盲目扩张,管理混乱,酿成重大安全事故,自我毁灭
日本	科学家直觉敏锐; 化纤工业基础好; 科研管理效益突出; 全社会倾力经济复苏; 企业主导产业化建设; 杰出企业家领导创新活动; 官产学协同	基础研究水平稍欠	建设新产业,增强自主创新 能力,提升国家经济实力的 愿望与导向	应用市场的不确定性
英国	科学家直觉敏锐; 化纤技术领先; 基础科研实力强、水平高; 飞机部件制造需求牵引方向明确; 企业参与度高	社会处于战后恢复期,民众享受生活意愿高,建设意愿低; 经济表现低迷	传统化纤产业可开拓新的 业务领域; CFRP技术可在飞机发 动机部件制造中发挥减 重效益	低估技术风险; 缺乏对新产业识别能力的 企业家

1) 美国强在科技发达,弱在发展环境差,败在管理混乱。

从白炽灯发光体到航空航天器结构材料,从天然纤维基、人造丝基、PAN基到中间相沥青基碳纤维,美国科学家都一步一个脚印地一路走过。但长期的战争和冷战,产业导向偏军偏窄,社会不稳定;企业盲目扩张、管理混乱,酿成重大灾难,终致垮台,产业发展戛然而止。

2) 英国强在基础厚实,失于技术冒进。

有着杰出科学家和聚丙烯腈纤维产业技术基础,英国快速突破了关键技术,并开拓了尖端应用研究,其探索精神令人赞叹。但技术成熟度低时,贸然研制亟待使用的碳纤维增强树脂(CFRP)飞机发动机叶片,失败自然是大概率事件,进而动摇了产业建设的信心。

3) 日本强在意识敏锐、学习能力强、工匠精神深厚,成在发展环境优、产业通道宽。

日本及时发现高性能碳纤维技术的萌芽,与美、英几乎在同一起跑线上出发;任世界乱云飞渡,内部政通

人和,举国谋经济复苏、谋技术自立、谋建设新产业;市场基于民用,稳步向航空航天高端应用发展、向工业领域拓展;从而成就了其今日高性能碳纤维领域的世界主导地位。

参考文献 (References)

- [1] Roger B, Charles T. Moses, carbon fiber—from light bulb to outer space, high performance polymers: Their origin and development[M]. New York: Springer Netherlands, 1986.
- [2] Toray Industries, Inc. Composite materials research laboratories [EB/OL]. [2018-02-03]. http://www.toray.com/technology/organization/laboratories/lab_004.html.
- [3] 贺福, 赵建国, 王润娥. 碳纤维工业的长足发展[J]. 高科技纤维与应用, 2000, 25(4): 9-13.
He Fu, Zhao Jianguo, Wang Rune. The rapid development of carbon fiber industry[J]. Hi-techFiber & Application, 2000, 25(4): 9-13.
- [4] Toray Industries incorporation. TORAYCA® yarn [EB/OL]. [2018-02-03]. http://www.torayca.com/en/lineup/product/pro_001.html.
- [5] American Chemical Society. GrafTech international in Parma (Ohio), high performance carbon fibers national historic chemical landmark[R/OL]. (2003-09-17) [2018-02-03]. <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatschemistry/landmarks/carbonfibers.html#first-carbon-fibers>.
- [6] Curry E F. Fibrous graphite: US003107152[P/OL]. (1963-10-15)[2018-02-03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=3107152-&idkey=NONE&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fnetahhtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [7] Leonard S. Process for producing high mesophase content pitch fibers: US003919387A119751111[P/OL]. (1975-11-11)[2018-02-03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=3919387&idkey=NONE&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fnetahhtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [8] Roger B. Filamentary graphite and method to produce the same: US002957756[P]. (1960-10-25)[2018-02-03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=2957756&idkey=NONE&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fnetahhtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [9] Akio Shindo. Some properties of pan-based carbon fiber[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2000, 108: 35-40.
- [10] The Plain Dealer. Leonard S Singer (1923—2015), Obituaries [EB/OL]. (2015-10-21)[2018-03-03]. <http://obits.cleveland.com/obituaries/cleveland/obituary.aspx?pid=176177585>.
- [11] AIST. History, about AIST (National Institute of Advanced Industrial Science & Technology, AIST)[EB/OL]. [2018-02-03]. http://www.aist.go.jp/aist_e/about_aist/history/history.html.
- [12] Osamu N. Tsuguyori O. Paper supplement to "Study on the PAN carbon-fiber innovation for modeling a successful R&D management": An excited-oscillation management model[J]. Synthesiology, 2011, 4(2): 119-123.
- [13] The Society of Fiber Science and Technology. High-performance and specialty fibers: Concepts, technology and modern applications of man-made fibers for the future[M]. Berlin: Springer Press, 2016.
- [14] 進藤昭男, 竹中啓恭. PAN系炭素纤维的发明[R/OL]. (2016-12-01) [2018-03-08]. https://sankoukai.org/secure/wp-content/uploads/untold_stories/akio-shindo%20&%20hiroyasu-takenaka_final.pdf.
Akio Shindo. The Invention of PAN-based Carbon Fiber[R/OL]. (2016-12-01) [2018-03-08]. https://sankoukai.org/secure/wp-content/uploads/untold_stories/akio-shindo%20&%20hiroyasu-takenaka_final.pdf.
- [15] Toray Industries Incorporation. About us 1970s[EB/OL]. [2018-03-03]. http://www.toray.com/aboutus/history/his_1970.html.
- [16] Toshikatsu Ishikawa, Masutaka Morishita, Yakohama. Method for the manufacture of carbon fiber: US003552922[P/OL]. (1971-01-05)[2018-02-03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=3552922&idkey=NONE&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fnetahhtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [17] Sugio O. Production of carbon filaments from low-priced pitches: US003629379[P/OL]. (1971-12-21)[2018-02-03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=3629379&idkey=ONE&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fnetahhtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [18] Farnborough Air Sciences. Trust, farnborough aviation's history [EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.airsciences.org.uk/aviaion-history.html>.
- [19] WIKIPEDIA, Royal aircraft establishment[EB/OL]. [2018-02-03]. https://en.wikipedia.org/wiki/Royal_Aircraft_Establishment.
- [20] Mair W N, William W. 14 April 1912 to 11 August 1985, Mansfield, biographical memoirs[M]. London: The Royal Society Publishing, 1987.
- [21] 贺福, 赵建国. 我国碳纤维工业的回顾与展望[J]. 新型炭材料, 1996, 11(1): 1-8.
He Fu, Zhao Jianguo. Review and prospect of carbon fiber industry in China[J]. New Carbon Materials, 1996, 11(1): 1-8.
- [22] World Intellectual Property Organization. A patent that changed an industry[R/OL]. (2012-07-31)[2018-02-03]. <http://www.wipo.int/ipadvantage/en/details.jsp?id=2909>.
- [23] The American Carbon Society. 6th biennial conference-pittsburgh, PA[EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.americancarbon-society.org/node/41>.
- [24] Leonard S. Process for producing high mesophase content

- pitch fibers: US003919387[P/OL]. (1975- 11- 11)[2018- 02- 03]. <http://pdfpiw.uspto.gov/piw?Docid=3919387&idkey=NON-E&homeurl=http%3A%252F%252Fpatft.uspto.gov%252Fne-tahtml%252FPTO%252Fpatimg.htm>.
- [25] Watt W. Carbon work at the royal aircraft establishment[J]. Carbon, 1972, 10(2): 121-143.
- [26] Asao O. Sugio Otani[J]. Carbon, 2010, 48(15): 4217-4218.
- [27] Osamu N. Study on the PAN Carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management[J]. Synthesiology, 2009, 2(12): 154-164.
- [28] Roger B. Growth, structure, and properties of graphite whiskers[J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(2): 283-290.
- [29] The American Carbon Society. 6th biennial conference-pittsburgh, PA[EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.americancarbon-society.org/node/41>.
- [30] AIST. 炭素纤维: 最先进的客运飞机机身结构 50% 采用碳纤维复合材料制成[EB/OL]. [2018-02-03]. http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/story/no2.html.
AIST. Carbon fiber: The most advanced passenger aircraft fuselage structure 50% is made of carbon fiber composite material[EB/OL]. [2018-02-03]. http://www.aist.go.jp/aist_j/aistin-fo/story/no2.html.
- [31] Roger B, Charles T. Moses, carbon fibers, from light bulbs to outer space, high performance polymers: Their origin and development[C]//American Chemical Society. New York: Proceedings of the Symposium on the History of High Performance Polymers at the American Chemical Society Meeting, 1986: 345.
- [32] Toray Industries, Inc. Toray Industrie Incorporation. R&D Philosophy, research and development[EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.toray.com/technology/policy/index.html>.
- [33] 约翰·伊特维尔, 默里·米尔盖特, 彼得·纽曼. 新帕尔格雷夫经济学大辞典(第四卷)[M]. 北京: 经济科学出版社, 1996.
John Eatwell, Murray Milgate, Peter Newman. The New Palgrave-A Dictionary of Economics(The fourth volume)[M]. Beijing: Economic Science Press, 1996.
- [34] Robert D. Adams, 50 years in carbon fibre, 60 years in composites, the structural integrity of carbon fiber composites-fifty years of progress and achievement of the science, development, and applications[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

A comparative study on technologies and industries of high performance carbon fibers in US, Japan and UK

ZHOU Hong

Systematical Engineering Institute, PLA Academy of Military Science, Beijing 100082, China

Abstract In more than 20 years from late 1950s to 1970s, the technology of high performance carbon fibers developed fast. Scientists of US, Japan and UK discovered "graphite whisker" and its characteristic of super high strength and invented the technologies for producing rayon-based, PAN-based, pitch-based as well as mesophase pitch-based carbon fibers. This paper combs the R&D history at that time, summarizes the critical technological contributions by two research institutions, and introduces five scientists and three companies from US, Japan, and UK. Then the paper uses the SWOT model to analyze their successful factors (strength, weakness, opportunity and threat) in R&D, industrial base, and developmental environment of this field. Finally, it comparatively studies the three countries' industries for high performance carbon fibers. The lessons learned from the three countries can be valuable for those who concern the development of China's domestic industry of high performance carbon fibers.

Keywords rayon-based carbon fiber; PAN-based carbon fiber; pitch-based carbon fiber; mesophase pitch-based carbon fiber



(责任编辑 卫夏雯)