

# 碳纤维的制备和电热性能

张 猛<sup>1</sup>, 李 杨<sup>2</sup>

(1.内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010080; 2.西安工程大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:**介绍了碳纤维的基本结构、性能和生产工艺流程,详述了碳纤维的电热性能及其影响因素,以及碳纤维的应用情况。

**关键词:**碳纤维;电性能;热性能;应用

**中图分类号:**TS102.4

**文献标识码:**B

**文章编号:**1673-0356(2015)07-0030-03

碳纤维作为一种高性能的增强材料,由于其低密度、低阻、高强高模、耐腐蚀、耐疲劳、耐辐射、耐高温、导电导热<sup>[1]</sup>等优良性能被广泛应用于航空航天、交通运输、纺织化工、建筑医疗等产业领域,根据目前的市场需要,其开发前景以及潜力非常广泛。近年来,在纺织服装性能方面人们的要求越来越高,在满足产品基本使用性能的同时,越加注重其舒适性以及各种保健功能的附加值<sup>[2]</sup>,因此,碳纤维这种多功能的复合材料越来越受到人们的重视和青睐。

## 1 碳纤维的基本性能、结构和生产工艺流程

### 1.1 基本性能

碳纤维按照原材料可分为聚丙烯腈(PAN)碳纤维、沥青碳纤维和人造丝碳纤维,目前使用最广泛,在复合材料中应用较多的是 PAN 基碳纤维。其中 1K、3K、12K 的 PAN 基碳纤维长丝的主要性能见表 1。

表 1 不同规格碳纤维长丝的主要性能

纤维规格	线密度 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	强度 /GPa	模量 /GPa	伸长率 /%	含碳量 /%	电阻 / $\Omega$
1K	66	1.76	3.5~5.9	230~260	2.12	95	480
3K	200	1.78	3.5~4.5	225~240	1.80	95	150
12K	820	1.80	3.5~4.9	220~250	1.44	95	33

在碳纤维的众多性能中,主要有 2 个特点,一个是碳纤维的高强度,另一个是其高模量。由日本东丽公司在 1970 年生产的 PAN 基碳纤维 T300 就是高强高模纤维的代表,也是目前应用最广泛的碳纤维型号,它的拉伸强度可达到 3 500 MPa 以上,拉伸模量 230 GPa 左右,且在此基础上研究生产出了如 T1000、M(M46、M50)系列及 MJ(M35J、M40J、M46J、M55J、M60J 和 M65J)系列的多种类高强高模碳纤维<sup>[3]</sup>,为增

强型复合材料的广泛应用打下坚实的基础。

此外,碳纤维还具有良好的电热性能,电阻率较小,是电和热的良导体,耐热性好,尺寸稳定,在高温下仍有很高的强度,又因热膨胀系数小,热导率高而不会出现蓄热和过热现象。

### 1.2 纤维结构

碳纤维是指碳元素的质量分数在化学结构中达到 90% 以上的纤维。其微观结构类似于石墨,排列不规整,可模拟成二维有序结晶和孔洞的结合,受孔洞的大小、数量以及分布的影响<sup>[4]</sup>。有序纤维各层面间距大概在 3.39~3.42 Å 之间<sup>[5]</sup>,是网平面间距较大且沿纤维轴向排列的乱层石墨结构。又因为在 PAN 基碳纤维的形成过程中存在皮芯结构,并在预氧化和碳化过程加深了其存在,使得碳纤维结构有不匀的特点。另外,在碳化过程中,纤维的原丝结构以及界面形态等都保持不变<sup>[6]</sup>。

### 1.3 生产工艺流程

PAN 碳纤维是在以聚丙烯腈(PAN)为基质原料的基础上,首先制备聚丙烯腈原丝,再经过预氧化、碳化、石墨化等步骤,最终进行后处理而得到。其工艺流程如图 1 所示。

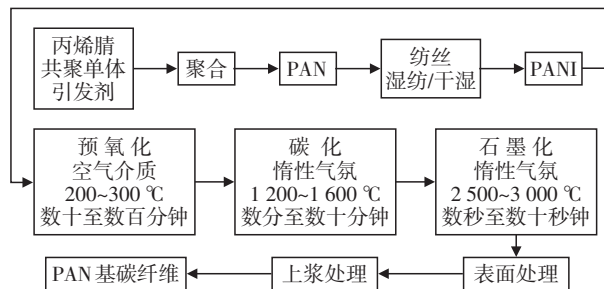


图 1 PAN 基碳纤维的生产工艺流程图

#### 1.3.1 聚丙烯腈原丝的制备

碳纤维的生产工艺流程比较长,较为复杂,尤其是聚丙烯腈原丝的制备,它是影响碳纤维质量的主要因

收稿日期:2015-09-17;修回日期:2015-09-22

作者简介:张 猛(1989-),男,河南项城人,在读硕士研究生,主要研究方向为纺织品功能整理,E-mail:zmovely@163.com。

素之一。其过程是先将丙烯腈与单体共聚,然后用溶剂将其溶解,形成合适的纺丝液,再进行纺丝。在这期间主要需解决的问题包括喷丝工艺、丙烯腈聚合工艺的选择,丙烯腈与引发剂和溶剂的配比等,通常为了不让干法纺丝中因清洗不净而产生的残留溶剂影响碳纤维质量,一般会选择湿法或干湿法纺丝。

### 1.3.2 原丝的预氧化

在聚合成聚丙烯腈纤维后,为了避免其在后续加工高温下熔融,需在空气或其他氧化性气体中进行低温热处理,即为预氧化处理<sup>[7]</sup>,处理温度在200~300℃之间。在这个过程中纤维的颜色由白色渐变为黄色,再过渡到棕褐色,最终变为黑色。同时纤维的内部发生了环化、脱氢、氧化等一系列反应,纤维的取向遭到破坏,发生收缩,需施加一定的外界张力,用以提高碳纤维的模量。此工艺的最终目的就是为将PAN的线型分子链转化为梯型结构,为保持在高温碳化反应中不变形做准备。

### 1.3.3 碳化和石墨化

将预氧化丝在惰性气体氮气的环境下,1200~1600℃之间高温处理,就会发生碳化反应,纤维中除了碳元素以外的H、O、N等元素在各种反应温度下以不同的形式裂解释放,同时为了避免这些残留物黏附在纤维上,造成表面缺陷甚至断裂,通常会在减压的条件下进行碳化反应<sup>[8]</sup>。而石墨化是在2500~3000℃的高温下进行,非碳原子几乎被排除,使其结构更加完善,在张力作用下结晶碳的含量和取向度增加,并且弹性模量也变大,纤维内部由乱层石墨结构变成了类似石墨的结晶结构。

### 1.3.4 后处理与上浆

碳纤维在应用中因为在高温条件下容易发生氧化一般不会单独使用,而是作为其他材料的增强体,因此要进行一些表面处理,增加纤维表面的含氧官能团和粗糙度,增大复合材料各层之间的剪切强度和两相之间的润湿性,进而增强其与界面之间的黏附程度。而上浆工序是对碳纤维起到一种保护的作用,避免了在生产中发生起毛损伤。

## 2 碳纤维的电热性能

碳纤维作为一种非金属材料,除了具有高强高模等一系列优良力学性能外,还具有非常好的电学性能,它的导电性能决定于它的非定域 $\pi$ 电子,其区域越大导电性能越好<sup>[9]</sup>。热传导主要是靠量子化的格波传递,碳纤维的发热一般较为均匀,发热面积大,热转化率高,节省电能。

### 2.1 电性能

碳纤维是电的良导体,其内部的非定域 $\pi$ 电子,使其与金属靠电子导电的原理不同, $\pi$ 电子的存在不仅使其具有导电性,并且能吸收可见光,让石墨呈现出黑色的外观。通常用电阻率表示碳纤维的导电性能,电阻率不仅受原料的影响,同时还与热处理的温度、石墨化程度以及结构的参数等密切相关<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.1 电阻率与热处理温度

PAN基碳纤维的电阻率随温度的升高而逐渐降低,在高温碳化阶段,即1200~1600℃左右,因属于乱层石墨结构,纤维排列整齐,电阻率急剧的降低,导电性能好;在1600℃之后,非定域区扩大,电导率下降缓慢。碳纤维属于半导体材料,在高温下处理,结构越来越完整,随 $\pi$ 电子的增多,取向度提高,导电面积增大,因此电阻率降低,电导率变强。

#### 2.1.2 结晶性与电阻率

在碳纤维石墨化的过程中,不仅石墨层面不断增大,纤维轴向排列有序,结晶区也越来越大,非结晶区以及各种缺陷结构减少,石墨化程度增高,电阻率下降。另外,碳纤维的电阻率还随试样的电阻和长度而变化,与其纤度和密度也有一定的关联。

### 2.2 热性能

碳纤维的热性能主要包括它的热导率、热膨胀、热氧化等,由于碳纤维的内部主要是石墨的层状结构,所以具有各向异性,因此它的各种性能包括力学性能和电学性能等都会有显著的差异。

#### 2.2.1 热导率

热导率是固体介质内的热能流动而进行的传热方式<sup>[9]</sup>。作为非金属材料,碳纤维的热传导与金属依靠电子传递的方式不相同,它是由具有波动性和粒子性的声子即晶格原子的振动波传导,并且在高温条件下,由于晶格振动的加剧,声子间碰撞增加,自由行程缩短,热导率也随之下降。同时结构参数以及内部结构的缺陷或者材料本身密度低、孔隙率大等因素,致使声子散射,都会引起热导率的下降,但若在碳纤维模量提高的情况下,其热导率会随之上升。另外碳纤维的热导率与电阻率呈现反比的关系,纤维的取向度越高,它的电阻率越小,热导率越大。

#### 2.2.2 热膨胀

当碳纤维受热时,由于它自身的乱层石墨结构以及石墨结构,会使当中的碳原子在各方向产生振动,其线度或体积发生变化,产生收缩,这一物理现象称为碳纤维的热膨胀。在膨胀的过程中,温度每变化1℃,长度的改变值称为热膨胀系数。当升高温度时,热膨胀

的现象发生在原子向着原子间距大的方向移动;收缩则发生在原子聚集在原子间距小的位置。碳纤维又因为结构的各向异性,使热膨胀系数随原子热振动强烈的变化,而出现增加或减少,同样,拉伸模量越高,取向度越好,热膨胀系数必然也随之下降。

### 2.2.3 热氧化

碳纤维因石墨化程度高而具有抗氧化性的特点,但在纤维中存在的碱以及碱土金属等催化了其氧化,加深了热氧化的程度,一般碳纤维在空气中可承受 300 °C 的高温,在惰性气体的环境下更是可达到 2 000 °C,但因为这些有害的金属杂质,使其强度等性能会遭到损伤,因此要尽可能的去除并保持无定型的结构,加强碳纤维隔热和耐烧蚀的特性。

## 3 碳纤维的应用

碳纤维作为增强材料,具有很好的抗弯强度和弯度,这为其在建筑领域的应用打下坚实的基础。它可用于制造层压胶合板梁、增强混凝土,也可用于桥梁、隧道、房屋等建筑物的修复,同时在电热电缆方面它也正在推广,它比金属电缆线更加节能,热量转换率高,不易损耗,使用寿命长<sup>[10]</sup>。

应用碳纤维复合材料制造飞机最主要的优势就是减轻了飞机的重量,改善飞机性能,减少燃料的消耗。一般航天用的碳纤维规格主要以高强、中模为主,在应用过程中,既有良好的抗疲劳性能又可抗振,在高温下模量基本无变化,材料整体结构不易破损<sup>[11]</sup>,有良好的尺寸稳定性和导热性,碳纤维复合材料在航天领域的广泛应用实现了其材料的系统配套和自主保障<sup>[12]</sup>。

由于碳纤维具有各种优良的性能,它以不同的形式广泛地应用在各个领域,碳纤维线、碳纤维纸以及碳纤维布等根据各自的特点发挥不同的作用。作为电热元件,在生活中通常用作取暖物品,例如护膝、护腕等。碳纤维发热连续稳定且电热转换效率高,瞬时即可达到保暖的效果,节能环保,可移动性强、安全,并且作为加热原件能够发出在人体吸收范围的远红外辐射波,促进血液循环,有生物学效应,具有保健功能<sup>[13]</sup>。但同时我们需要注意调节发热的温度,过高的温度不但超出人体适用的范围还会造成碳纤维的氧化,带来一定的危险性。碳纤维除以上用途外,还可以制作高尔夫杆、钓鱼竿、船桨等体育休闲用品;在工业行业中开采油田、制作航海构建,生产计算机、手机等电子产品;制作节能环保,轻质安全的汽车以及引擎部件;或者生产绿色且储能效率高的蓄电池、发电机等物件。它的安全高效和多功能的用途,使其在各个不同的领

域和行业都有非常广泛的应用。

## 4 结语

高性能的碳纤维作为一种先进的复合材料,它的应用和发展体现了一个国家在材料方面的发展水平,它以多学科、跨行业的产品形式呈现,在国外已经形成了庞大的产业带,为许多行业实现了制作高质量以及低成本的目标成为可能。在国内碳纤维还处于研制、生产和应用的初始状态,我们还需要完善生产工艺流程,解决好产品开发中出现的一系列问题,制定统一的测量标准等。碳纤维复合材料的开发有广泛的前景,能够创造长期稳定的财富以及收益。

### 参考文献:

- [1] Chung D D L. Comparison of submicron-diameter carbon filaments and conventional carbon fibers as fillers in composite materials[J].Carbon,2001,(39):1 119—1 125.
- [2] 黎小平,张小平,王红伟.碳纤维的发展及其应用现状[J].高科技纤维与应用,2005,(5):28—34.
- [3] 西鹏,张宇峰,安树林.高技术纤维概论[M].北京:中国纺织出版社,2012.54.
- [4] Kuniaki Honjo. Fracture toughness of PAN2 based carbon fibers estimated from strength 2 mirror size relation[J].Carbon,2003,41:979—984.
- [5] 陈蓉蓉,王莘蔚.聚丙烯腈基(PAN)碳纤维的性能、应用及相关标准[J].中国纤检,2010,(11):75—79.
- [6] 黄丽.聚合物复合材料[M].北京:中国轻工业出版社,2012.103.
- [7] Yu V Basova, Hatori H, Yamada Y, *et al.* Effect of oxidation-reduction surface treatment on the electrochemical behavior of PAN2based carbon fibers[J].Electrochemistry Communications, 1999,(1):540—544.
- [8] 杨鸣波,唐志玉.高分子材料手册(上)[M].北京:化学工业出版社,2009.976—977.
- [9] 贺福.碳纤维及石墨纤维[M].北京:化学工业出版社,2010.415—424.
- [10] 李湘洲.碳纤维在建筑领域的新应用:碳纤维电缆地热采暖[J].上海建材,2011,(2):15—17.
- [11] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,(3):201—212.
- [12] 郭玉明,冯志海,王金明.高性能 PAN 基碳纤维及其复合材料在航天领域的应用[J].高科技纤维与应用,2007,(5):1—7.
- [13] 储长流,朱宁.碳纤维的性能与应用[J].北京纺织,2001,(6):39—41.

职务聘任、考核和晋升的重要指标。教师参加实践的总结、考核和评估情况记入教师档案,对积极参加企业实践的教师在评优评先、职称评定上优先推荐。

### 3 初步成效

#### 3.1 教师综合素质明显提高

学院教师在“师·企·问·题”举措推动下,以更加饱满的精神状态投身于教育教学中。近几年参与“师·企·问·题”活动的教师超过了现任教师的三分之二。部分缺乏实际经验的青年教师和博士通过在企业生产实践中的培养和锻炼,及时了解和掌握了企业的先进管理经验和新技术、新工艺;同时通过将实践学习反馈于课堂教学,既增强了教师教学的本领,学生也乐于倾听实践性教学案例。从而提高了教学水平和质量,实现教学相长,这些教师也大多成为了一线教学的骨干。

#### 3.2 师生科研水平有效提升

教师进入企业开展实践活动,其重点和核心是凝练科研题目。在“师·企·问·题”实施过程中,通过组建实践团队,开展学术交流等鼓励教师取长补短,争取选定并及时完成企业科研项目,帮助企业实现科技攻关。在实践过程中教师发现企业在生产、技术方面

存在的问题后,与企业会商解决问题的可行性,从而取得企业资助或通过申报项目开展研究,解决生产中的实际问题。这样,既加快了企业的改革发展和转型升级提高了企业竞争力,同时在此实践中学生也可以深入了解制约企业生产、技术的问题所在,在随后的课堂学习和课外科研活动中有针对性地进行学习和锻炼。

#### 3.3 学院学风大为改善

“师·企·问·题”举措的实施,使教师的综合素质和专业技术水平得到提升,推动了产学研合作和反哺教学,从而帮助学生更好学习,实现学风优化。教师带着学生做课题,学生的科研能力和自主学习能力显著提高。学生课程不及格率下降,英语四、六级通过率高,考研录取比例大,学生参与教师科研、考研出国热情高涨,推动了学院学风良好发展。

#### 参考文献:

- [1] 于成文,刘冰.新常态下高校学风建设的几点思考[J].黑龙江高教研究,2015,(6):77-79.
- [2] 舍娜莉,梁芷铭.浅谈高校学风建设存在的问题与对策[J].教育与职业,2015,(6):38-39.
- [3] 陈志军,向新柱,王田娥.“师·企·问·题”是学生工作重要手段[J].山东纺织经济,2014,(11):52-53.

## Improvement of College Style of Study Construction Based on the Integrated Measures of Teaching & Enterprise & Problem & Research Project

CHEN Zhi-jun, XIANG Xin-zhu, ZHANG Lei, ZHANG Shang-yong\*

(College of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

**Abstract:** From 2012 years, textile science and engineering college of Wuhan textile university began to implement the integrated measures of teaching & enterprise & problem & research project. It encouraged the university teachers to practice and train in enterprise, and set up research projects from enterprise, so as to improve the professional skills and narrow the distance between the textile students and businesses. The college style of study was improved through the virtuous cycle of the measures of teaching & enterprise & problem & research project.

**Key words:** textile college; construction of style of study; measure; effect

(上接第 32)

## Preparation and Electrothermal Performance of Carbon Fiber

ZHANG Meng<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1.Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2.Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The structure, performance and production process of carbon fiber were introduced. The electrothermal performance, its influencing factors and application of carbon fiber were detailed. The application of carbon fiber was summarized.

**Key words:** carbon fiber; electrical performance; thermal performance; application