碳纤维材料高温碳化过程研究进展概述

（恰当、简洁、醒目，能反映文章的中心内容，不超过20字）

欧阳艳艳1 姚雅萱1 刘争1 陈慧2 任玲玲1＊

(1. 中国计量科学研究院，北京 100029；

2. 北京化工大学，北京 100029)

摘要 高温碳化过程直接关系到碳纤维材料中的石墨微晶形成与杂原子脱除，是影响碳纤维性能与质量稳定性的关键步骤。通过概述碳纤维的碳化过程、碳化工艺、设备，及碳化温度等影响碳纤维质量的关键性因素，提出由于目前碳纤维高温碳化炉的结构设计对炉内温度场的准确测量造成的限制，有必要开展高温碳化过程动态模拟研究的建议。建立适用于碳纤维材料高温碳化炉温度分布的热传导模型，模拟碳纤维材料高温碳化温度场分布，并开展温度场修正，对实现温度场准确测量，指导碳化工艺的调控、温度计量和炉体的优化设计具有积极的意义。

（摘要为300字左右，主要反映论文研究目的、研究方法、原理及特点、结果与结论，切忌把研究背景写入摘要，开门见山，突出本文研究方法、关键技术、创见所在，应尽可能多地给出原文中的定性、定量结果。摘要中不得标引参考文献序号，避免复杂数学公式和化学分子式。）

关键词 碳纤维；碳化过程；动态模拟；温度场；测量；调控

（根据文章所讨论的主题内容标出5～8个关键词）

Reviews of the Research Progresses in the High Temperature Carbonization Process of Carbon Fiber

（英文题名不超过10个实词，实词首字母大写，中、英文题名含义应一致）

OUYANG Yanyan1 YAO Yaxuan1 LIU Zheng1 CHEN Hui2 REN Lingling1＊

(1. National Institute of Metrology，Beijing 100029，China；

2. Beijing University of Chemical Technology，Beijing 100029，China)

**Abstract：** High temperature carbonization process was directly related to the formation of graphite microcrystals and removal of heteroatoms in the production of carbon fiber. It was the key step affecting carbon fiber properties and quality stability. This article reviews the carbonization process of carbon fiber, as well as the key factors affecting carbon fiber quality such as carbonization temperature. Due to the structural design of carbon fiber high temperature carbonization furnace, the accurate measurement of temperature field in the furnace is greatly limited, it is necessary to carry out the simulation of high temperature carbonization process. By establishing a heat conduction model suitable for the temperature distribution of carbon fiber carbonization furnace and amending with high accuracy, it is of positive significance to measure the temperature field accurately, regulate the temperature measurement of carburizing process and optimize the furnace body design.

**Key words：** carbon fiber, carburization process, dynamic simulation, temperature field, measure, regulation

**0 引言**

碳纤维材料是一种以聚丙烯腈（PAN）、沥青、粘胶纤维等为原料，经预氧化、碳化、石墨化工艺制得的含碳量在90%以上的特种纤维材料。其由片状石墨微晶纤维沿轴向堆砌而成，具有比重小、比强度高、比模量高、耐高温、耐腐蚀、抗氧化、导电导热等优异的物理和化学性能。碳纤维的直径通常在10 μm左右，7~8根碳纤维排列在一起的直径约等于1根头发丝的直径，其拉伸强度可以达到4800 MPa，约为钢的7~9倍，而比重仅有钢的四分之一，在3000 ℃以上高温仍能保持优异性能。由于其材料本性、产业技术复杂性、应用领域重要性和市场规模性等因素影响，碳纤维被称为“黑色黄金”或“材料之王”。

我国碳纤维初期主要用于制造业的各个细分行业，包括体育器材、汽车、建筑补强、模塑混配等经典应用领域，以及风电、压力容器等新兴领域，随着生产工艺技术的成熟和产品质量的提升，逐步应用于国防科工、航空航天、卫星导弹等尖端科学领域，是国防建设和国民经济中不可或缺的战略性新型材料。在《“十三五”国家科技创新规划》中，碳纤维及其复合材料位列国家重点新材料发展计划的首位。经过多年的研发和约十年的产业化建设，我国初步形成了产业化的碳纤维研发与生产平台，逐步打破了日、美等发达国家长期的技术封锁和市场垄断局面，但是在碳纤维产业质量控制与提升保证的质量基础设施（National Quality Infrastructure，简称NQI，包括计量、标准、合格评定）建设方面几乎空白。从全球碳纤维市场的份额来看，国际碳纤维市场主要为日、美企业垄断，日本东丽、东邦和三菱人造丝三家公司的市场份额超70%[1]。高端碳纤维作为战略新材料长期以来被国外所垄断，主要集中在美国、日本等少数发达国家。美国F-15、 F-16、F-18及欧洲幻影2000、幻影4000等先进战斗机均大量使用碳纤维材料，2010年用于F-35战斗机的碳纤维材料用量占到40%。随着我国歼20战斗机、C919及C929民用大飞机的发展，高端碳纤维的需求越来越大。我国目前已实现低端碳纤维材料的量产，但T800级别以上的碳纤维都还是处于小批量试验生产阶段，产品批次重复性不好、成品率不高，而高温碳化过程的工艺条件可靠控制及高温碳化温场的合理布局是影响高端碳纤维质量的关键因素之一，因此，解决高端高性能碳纤维高温碳化过程涉及的设备加工制造、工艺条件控制等关键制约性的问题迫在眉睫。

（引言部分主要介绍本文的研究背景和目的，请以简短的篇幅叙述相关领域研究概况，说明本研究与前人工作的关系、目前研究热点及存在的问题，对于已有文献的内容不必过多展开，重点指出本研究的意义。）

**1** 正文

**1.1 标题层次**

正文层次标题应简短明确，各层次序号依次为“1”，“1.1”，“1.1.1”等，一律左顶格，后空一格写标题．若“1.1.1”后还有小层次，则分别另起行 (空两格)用“**a.** ”，“**b.** ”，“**c.** ”，… 表示。

**1.2 数学公式**

数学公式中间推导过程尽量精简，未引用公式不编号，仅在叙述中须引用的数学公式才编号。未编号的简短公式一般随文写，但较长且较复杂的未编号公式可另行居中。全文公式统一连续编号；定理、引理、定义、推论等也分别全文统一连续编号。

**1.3** **图表**

图表要精选，出自于已有文献的一律略去，切忌图和表的内容重复或与文字重复。图表均应有序号、图名和表名(中英文均需)。图表中字符和数据应准确无误，且与文字叙述一致。

图应精心设计与绘制，要求布局合理、大小适中、结构紧凑美观，线条粗细均匀。定量坐标图的横纵坐标必须有刻度和刻度值，必须有量和单位，并分别居中置于纵横坐标轴外侧。如图1~2所示。



**图1 两种结构功率变化曲线**

**Fig.1  Power curves of two structures**



**图2 升力系数和阻力系数**

**Fig.2  Lift coefficient and drag coefficient**

彩图和照片图要求图像清晰、层次分明、反差适中，文件格式为.tif，图片分辨率要求为600 dpi。（二维和三维图中的网格请去掉）

表格中各栏数据的有效数字位数应一致，字符和数据应与文字一致．表内“空白”表示未测试或无此项，“—”表示未发现，“0”表示实测结果为零。表内参数单位相同者，将单位置于表的右上方；各栏参数单位不同者，可将单位放于各相应栏目标题的数值旁。表中所须说明的事项，可用简练的文字注于表的底线下方。如表1~2所示。

**表1 系统参数**

**Tab. 1 System parameter**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *x*/cm | *I*/mA | *v*/(m·s-1) | *h*/m | *p*/MPa |
| 1020 | 3025 | 2.54.3 | 43 | 110120 |

表**2** **Yale**人脸库识别一张图片的平均时间 /s

**Tab. 2 Average time of recognizing a picture in yale face database**

|  |  |
| --- | --- |
| 算法 | *L* |
| 5 | 6 | 7 |
| DSNPE | 4.709 1 | 4.839 0 | 5.663 5 |
| 本文 | 2.949 2 | 2.960 7 | 3.438 9 |

**1.4 量和单位**

量和单位必须采用最新国家标准和规定。非法定计量单位必须换算，如：1 bar=1×105 Pa，1 mmHg=133.322 Pa，1 atm=101.325 kPa，1 dgn=1×10-5 N，1 kgf=9.806 65 N，1 tf=9.806 65 kN，1 ppm=1×10-6等。(文中所有变量符号首次出现时必须说明其含义。正斜体：文中单位一律正体，物理量一律斜体)文中变量一律采用单字符表示，须要区分时加下标；下标中由文字转化来的说明性字符用正体，如*Q*out；由变量转化来的用斜体，如*Pi*；单位、词头用正体，如nm，pF等；运算符用正体，如exp，lg，max，min等；几个特殊常量用正体，如e，i，π等。

**2** 结论

碳纤维材料高温碳化生产过程中温度准确测量及温度场分布是影响产品质量与稳定性的重要因素之一，可采用与生产工艺参数相结合的动态模拟方式进行测量研究。主要研究建议如下：

1）高温碳化炉热传导模型建立。考虑研究建立适用于碳纤维材料高温碳化生产线的动态模拟模型。通过对生产线的结构进行建模，建立高温碳化炉的热传导模型。

2）炉内温度场分布求解。根据炉体温度、加热功率、保护气体流量、保护气体压力、气体出口温度等边界条件可求解特定热平衡条件下的炉内温度分布。根据碳纤维材料的几何尺寸与热传导特性可得到碳纤维丝在炉内的温度场。

3）高符合性模型搭建。与非接触式炉膛测温相结合，可对热传导模型中的炉体材料局部导热效率、气体流动状态等条件进行细化调整，并与生产现场相结合，提高模型的模拟准确率。

4）模型不确定度分析。通过组合各个边界条件的取值范围，得到期望工况条件下，生产线内部达到热平衡时碳纤维丝的温度场变化范围。向各个边界条件引入微扰，按实际工况控制规律改变边界条件取值，模拟生产线实际运行时的碳纤维丝温度场变化情况，进而评价其所引入的不确定度，并为温度场精准调控提供技术建议。

5）温度场修正。通过对热传导模型和反应热的理论计算，研究不同位置达到平衡时的状态以及温度场分布的变化规律。从而研究不同位置化学反应对温度场均匀分布的影响，并结合高温碳化工艺，对不同位置的温度进行补偿和修正，消除因加热和反应热造成的温度不均匀，得到均匀、稳定的温度场分布情况。

通过上述研究有望解决碳纤维材料高温碳化反应过程中的温度场分布问题，研究影响温度场分布的主要因素，从而为高质量碳纤维高温碳化生产工艺调控、温度计量与生产设备设计提供技术支持。

（结论部分应完整地阐述本文的研究内容，并包括且不限于：本文的不足之处及在后续研究中的展望。文字内容应观点明确、严谨、完整，表述忌不清不楚，注意用词的准确性，不能用“可能”、“也许”等词。如果结论段的内容较多，可以分条写并给以编号，每条成一段;如果结论段内容较少，可以不分条写，整个合为一段。）

参考文献

参考文献仅限作者亲自阅读过的主要文献，近3年的文献应占30％以上，作者需仔细核对所引参考文献以保证各项内容准确无误。

1．论文应附参考文献(15条以上)。所列参考文献应是公开出版发行的书刊、会议论文集等，必须

引用的非公开出版发行的资料，请做页下注 (写在当页下方)。文献必须按顺序引用，（并在文中标注）文中未引用文献则不列出；

2．外文作者姓在前名在后，且名应缩写 (不加缩略点)

3．“作者”三位以内全部列出，多于三位的列出前三位后加“等”或“et al”；

4．“出版地（保存地点）”请给出城市名，对同名异地或不为人们所熟悉的地名，可在城市名后附州名、省名、国名等。

**以下为参考文献样式，请严格参照GB/T 7714-2015《信息与文献参考文献著录规则》书写**

**1 专著**

［序号］作者．书名[M]．版次(第1版不写)．出版地：出版社,出版年：起始页码-终止页码.

例：

［1］孙家广，杨长青．计算机图形学[M]．北京：清华大学出版社，1995:34-41．

［2］SKOLINK M I．Radar handbook[M]．2nd Edition．New York： McGraw-Hill，1990:45-47．

**2 连续出版物**

［序号］作者．文题[J]．刊名，年，卷（期）：起始页码-终止页码．

**例：**

［3］杨得庆，隋允康，刘正兴，等．应力和位移约束下连续体结构拓扑优化[J]．应用数学和力学，2000，21（1）：17-24．
［4］KUCHEIKO S，CHOI J W，KIM H J，et al．Computer architecture a quantitative approach[J]．Journal American Ceram Soc，1997，80(11)：2937-2940．

**3 论文集、会议集**

［序号］作者．论文名[C].主编.文集名．出版地：出版社，出版年：起始页码—终止页码．

**例：**

［5］贾东琴，柯平.面向数字素养的高校图书馆数字服务体系研究[C].中国图书馆学会.中国图书馆学会年会论文集.北京：国家图书馆出版社,2011:45-52.

［6］MAO D H, HAN D L, ZHANG F W, et al. Water resource, environment and management of the Tarim Basin[C].WANG X H.Symposium Proceedings of Water Resource, Environment and Management of the Tarim Basin. Beijing: China Environmental Science Press, 1998: 84-91.

**4 学位论文**

［序号］作者．论文名［D］．所在城市：保存单位，年．

**例：**

［7］金宏．导航系统的精度及容错性能的研究［D］．北京：北京航空航天大学自动控制系，1998．

［8］PAXSON V．Measurements and analysis of end-to-end internet dynamics[D]．Berkeley：Computer Science Division，University of California，1997．

**5 技术标准**

［序号］作者．技术标准名称：技术标准号［S］．出版地：出版单位，年．

［9］全国信息与文献标准化技术委员会.文献著录：第4部分 非书资料：GB/T 3792.4—2009[S].北京：中国标准出版社，2010：3.

［10］国家环境保护局科技标准司.土壤环境质量标准：GB15616—1995[S/OL].北京：中国标准出版社,1996:2-3[2013-10-14].http://wenku.baidu.com/view/b950a34b767f5acfalc7cd49.html.

**6 报告**

［序号］报告者．报告题名，报告编号[R]．地点：报告机构，完成年．

**例：**

［11］World Health Organization．Factors regulating the immune response：report of WHO Scientific Group[R]．Geneva： WHO，1998．

**7 专利**

［序号］专利申请者．专利题名**：**专利号[P] .发布日期．

**例：**

［12］张凯军.轨道火车及高速轨道火车紧急安全制动辅助装置：201220158825.2[P].2012-04-05.