

文章编号: 1007-8827(2001)03-0058-06

# 低温等离子体技术在炭材料改性方面的应用

邱介山

(大连理工大学 炭素材料研究室, 辽宁 大连 116012)

**摘 要:** 介绍了低温等离子体的基本概念、发生方式及其在炭材料表面改性方面的特点, 围绕碳纤维的表面改性讨论了低温等离子体对改性碳纤维材料的表面性质以及相关复合材料性能的影响, 展望了低温等离子体技术的发展前景。

**关键词:** 低温等离子体; 炭素材料; 表面改性

**中图分类号:** TQ 127.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

## 1 前言

以活性炭和碳纤维为代表的炭材料已在环境保护、复合材料、催化等众多领域获得广泛的应用, 其性能的优劣与材料本身的表面性质密切相关<sup>[1]</sup>。例如, 碳纤维作为先进复合材料的增强剂使用时, 对其表面进行改性处理就有助于提高复合材料的层间剪切强度; 未经表面处理的碳纤维既不能用于航空、航天等主承力构件的制造, 也不能用作先进复合材料的增强剂<sup>[2]</sup>。迄今为止, 人们已研究开发了多种对炭材料进行表面处理的技术方法, 如湿法化学处理、电子束或紫外线处理、以及低温等离子体处理等, 其中低温等离子体表面处理技术既能改变炭材料的表面化学性质, 又能控制材料的界面物性, 在炭材料的表面处理方面显示出广阔的应用前景。本文通过介绍国内外用低温等离子体技术对炭材料进行表面改性的一些研究进展, 阐述等离子体工艺参数对改性炭材料性质/性能的影响, 展望了低温等离子体在炭材料表面改性方面的应用发展前景。

## 2 低温等离子体的特点及其发生方式

等离子体的英文名称为 Plasma, 这个词来源于希腊语, 原意是能够成型的东西, 在生物学上意为血浆、原形质。Irving Langmuir 因发现在电离气体中存在着荷电粒子特有的周期振荡, 喻之为生命的脉动而称其为 Plasma<sup>[3]</sup>。

等离子体是物质在高温或特定激励条件下的一种物质状态, 是除固态、液态和气态以外, 物质的第

四态。等离子体的明确定义为: “等离子体是由大量正负带电粒子和中性粒子组成的, 并表现出集体行为的一种准中性气体”<sup>[3]</sup>。简而言之, 等离子体就是指电离气体, 它是电子、离子、原子、分子或自由基等粒子组成的集合体。

### 2.1 等离子体的分类

等离子体按照粒子温度可以分为两大类, 即热平衡等离子体和非热平衡等离子体<sup>[4]</sup>。当电子温度和离子温度相等时, 就称为热平衡等离子体, 简称为热等离子体(Thermal plasma)。这类等离子体不仅电子温度高, 重粒子温度也高, 在煤炭的加工转化和高性能炭黑的制备方面有很好的应用潜力和前景<sup>[5-7]</sup>。

当电子温度远大于离子温度时, 称为非热平衡等离子体(Nonthermal equilibrium plasma), 其电子温度高达  $10^4$  K 以上, 而离子和原子之类的重粒子温度却只有 300 K ~ 500 K。故又称之为低温或冷等离子体(Cold plasma)。这意味着, 一方面电子具有足够高的能量以使反应物分子激发、离解和电离; 另一方面, 反应物体系又能保持低温, 乃至接近室温, 因此在材料表面改性和新材料制备等领域得到了非常广泛的应用。低温等离子体依据放电引发机制的不同, 可以分为汤生(Thompson plasma)、电晕、无声(也叫介质阻挡放电)、辉光、微波和弧光等离子体等; 此外, 根据气压的高低可分为低压低温等离子体(如: 辉光放电和微波放电等离子体等)和常压低温等离子体[如: 电晕放电和无声放电等离子体等]。根据频率又可分为直流放电、高频放电和微波放电等离子体等。这里主要介绍低温等离子体在炭材料表面

收稿日期: 2000-12-15 修回日期: 2001-09-02

作者简介: 邱介山(1964—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 主要从事新型炭材料和等离子体化工方面的教学和科研工作。

©1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

改性方面的研究进展。

## 2.2 低温等离子体的发生方式

等离子体可以通过多种方法发生,自然界中日光、雷电、日晕和极光都可以产生等离子体。实验室中主要通过气体放电、燃烧、激光和射线辐照等来得到。用于炭材料表面改性的低温等离子体主要由电晕放电、辉光放电和微波放电产生。

### (1) 电晕等离子体

电晕等离子体是在大气压下,对距离很近的两个电极施加交流电压,使电极间的气体被击穿而产生的。在放电时会生成臭氧、自由基、电子、紫外线等。

### (2) 辉光等离子体

在适当低的气压下,施加一定的电压使气体击穿就会产生稳定的辉光等离子体。为了避免通讯广播的干扰,辉光放电通常使用 13.56 MHz 的射频波段,因而也叫射频辉光(RF)等离子体。它又包含两种形式,即感应耦合和电容耦合。前者反应器多为管状,后者反应器通常为钟罩式或圆筒型。

### (3) 微波等离子体

微波等离子体是将微波能量转换为气体分子的内能,使之激发、电离而发生的等离子体。常用的频率为 24.5GHz。

随着等离子体技术应用范围的拓展,等离子体在炭材料科学领域的应用越来越广泛,换言之,等离子体技术作为一种工具引入到炭材料领域,促进了炭材料技术的发展,拓宽了其研究领域。

## 3 低温等离子体与炭材料表面改性

炭素材料在许多应用场合常常需要按使用要求改善其表面性能。为了使炭材料适合各种应用需要,一般有两种作法。一种是利用各种表面改性技术产生一个新的表面活性层,从而改变表面、界面的基本特性;另一种作法是借助功能性薄膜或表面层形成技术,在原表面上敷膜,这两种作法的目的都是为了使材料具有一种或几种表面性能。为此人们研究开发了多种表面处理技术。如化学湿法处理、电子束或紫外线处理、以及低温等离子体处理等。其中低温等离子体表面处理既能改变表面结构,也可控制界面物性,在炭材料表面处理方面显示出巨大的应用潜力。

### 3.1 低温等离子体表面改性的特点

与炭材料表面改性的其它方法相比,低温等离

子体改性首先是一种干式工艺,省去了湿法化学处理工艺中所不可缺少的烘干、废水处理等工序。与放射线处理、电子束处理等其它干式工艺相比,不仅使材料的表面物性显著改善,而且不影响材料的体相结构;而利用放射线或电子束处理时,由于射线和电子束的穿透力强,以致破坏材料体相。此外,低温等离子体改性材料与表面的作用形式多,工艺的适用范围广,便于连续性自动化生产。低温等离子体改性具有以下特点:

(1)干式工艺,无需进行废液、废气的处理,因而节省能源,降低成本。

(2)作用时间短(几秒到几分钟),效率高。

(3)改性只发生在表面层(几个埃到微米级),因而不影响基体固有性能。

(4)工艺简单,操作较方便。污染小,适合环境保护的需要。

### 3.2 低温等离子体表面改性的可行性

材料的表面改性需要通过断开或激活材料表面的旧化学键并形成新的化学键才能实现,这就首先需要低温等离子体中的各类粒子能够具有足够的能量以断开材料表面的旧化学键。低温等离子体作为一种非热平衡等离子体,其粒子能量的参数范围如下:电子(Electrons) 0 eV ~ 20 eV,亚稳态粒子(Meta-stables Excited) 0 eV ~ 20 eV,离子(Ions) 0 eV ~ 2 eV,光子(UV/visible) 3 eV ~ 40 eV。表1所示为各类材料中一些常见化学键的键能。将两者对比可以看出,除离子外,低温等离子体中绝大多数粒子的能量均高于这些化学键的键能,这表明,利用低温等离子体完全可以破坏材料表面的旧化学键而形成新键,从而赋予材料表面新的特性。

低温等离子体与被改性的炭材料表面的作用机制十分复杂,人们对此至今尚无明确统一的认识。其原因在于,低温等离子体中存在的粒子的复杂多样性导致其与炭材料表面的反应复杂多变,而粒子的能量也在作用中不断更新、衰落,反应过程中过渡态的物质更是千差万别,而且这些反应的中间产物无法用在线测试手段进行直观分析测试。因此,研究人员普遍借助 XPS、ESR、IR、SEM 等分析手段研究比较材料改性前后的表面性质来推测反应历程。而在线分析时,即使捕捉到信号,由于得到的图谱极其复杂,也很难进行全面正确的解析,这就很难确知中间产物究竟是何种粒子?其与炭材料表面发生什么反应?其中涉及到什么中间环节?

从目前发展现状来看,实验设备上缺乏在线测

试手段,谱线分析不易解析,而且低温等离子体处理过程中形成的基团复杂,寿命短,难以捕捉,给炭材料表面改性的机理研究造成很大困难。因此,如果能建立可靠的在线分析测试手段及再现性良好的谱图分析法,并判断反应中间产物的种类,分析出低温等离子体体系中过渡态与炭材料表面的最终生成物

及其微观结构的变化规律,并根据处理气体或材料表面物质的变化,对各物质生成前后的能态变化进行理论计算,建立相应的理论模型,对进一步推动低温等离子体改性炭材料的技术发展将具有重要的理论和实用价值。

表 1 一些代表性化学键的键能

Table 1 Bonding energies of some typical chemical bonds

Chemical bond	Bonding energy $E_B/\text{eV}$	Chemical bond	Bonding energy $E_B/\text{eV}$	Chemical bond	Bonding energy $E_B/\text{eV}$
H—C	3.2—4.7	C=C	3.3—7.5	C=O	5.5
H—N	2.1—4.7	C≡C	10	N—N	0.4—2.9
H—O	3.4—5.2	C—N	1.2—3.1	O—O	1.6—2.5
C—C	2.6—5.2	C—O	0.95—3.0	O—N	1.0—2.2

## 4 低温等离子体技术在炭材料改性中的应用

炭材料作为人类最早接触的物质之一,历经数百年的发展,在 20 世纪末期随着以富勒烯为代表的一系列具有新颖结构的炭质材料的出现,进入了快速发展的快车道。炭材料的种类虽然繁多,但它们的化学结构在相当程度上是类似的,几乎都是由六角碳网面构成的微晶积层体形成的多晶体。下面介绍低温等离子体技术在炭纤维材料表面改性中的应用。

### 4.1 炭纤维的表面处理

炭纤维(CF)通常作为聚合物、金属、碳和水泥等基体的增强材料使用,也作为催化剂载体、污染物的吸附脱除介质大量使用,这些应用场合均对炭纤维材料的表面性质有不同程度的要求。比如,炭纤维增强复合材料(CFRC)的力学性能主要取决于基体材料的力学性能、纤维和基体的结合性能以及纤维和基体界面应力的传递方式,而后两种性能与纤维表面性质密切相关。未经表面处理的 CF,活性表面积小( $\leq 0.138 \text{ m}^2/\text{g}$ ),边缘活性碳原子数目也较少,因而表面能低,接触角大,呈现憎液性,导致使 CF 与基体的粘结强度较差。因此,有必要对炭纤维表面进行处理,其目的是清除 CF 材料的表面杂质,在 CF 表面形成微孔和刻蚀沟槽,从类石墨层面改性成石墨状结构以增加表面能,或者在其表面引入具有极性 or 反应性的官能团以及形成与树脂起作用的中间层,从而改善和基体之间的粘结,提高复合材料的力学性能<sup>[8]</sup>。

炭纤维的表面处理方法主要有以下几种:气相

氧化法<sup>[9]</sup>、液相氧化法<sup>[10]</sup>、表面涂层法<sup>[11]</sup>和等离子体处理<sup>[12,13]</sup>等。这些方法各具特色。具有使用价值的表面处理方法至少应具备以下条件:(1)处理效果好,处理后 CF 强度基本不变或略有下降,当然最好升高。(2)处理时间短,可与 CF 生产线相匹配,即处理速度为  $50 \text{ m/h} \sim 150 \text{ m/h}$ 。(3)可连续长时间处理,且操作简单,成本较低。等离子体氧化法是能够满足这些要求的技术方法之一。以下介绍低温等离子体处理的参数对 CF 表面性质及其树脂基复合材料性能的影响。

### 4.2 等离子体处理对炭纤维表面结构和性能的影响

炭纤维表面主要是由碳元素组成,视原料和制备工艺条件的不同,还有一定的氧元素存在。不同的等离子体气氛会在炭纤维表面引入不同的官能团,通常氮气和氨气能使表面形成含氮基团,而氧气和空气不仅能使纤维表面氧化,还能刻蚀去 CF 表面多数的脂肪链结构,使其向石墨化晶体结构发展,同时还将形成各种复杂的碳链断残基。因此,使用含氧气体处理效果较好。另外,在相同的等离子体处理条件下,由不同原料制得的 CF 的表面性质表现出不同的变化。如,聚丙烯晴基(PAN)CF 经氧等离子体处理后,表面会产生羟基和碳氧基团,而沥青基 CF 经处理后表面只产生羟基。

研究纤维表面组成或化学结构的方法很多,X 射线光电子能谱(XPS)技术是常用的技术方法之一。郑安呐等人<sup>[14]</sup>采用俄歇光谱(AES)及 XPS 技术研究了炭纤维在等离子体处理前后的表面性质,其变化用炭纤维表面氧原子与碳原子的数量之比(O/C)表示,结果如表 2 所示。

表 2 不同等离子体处理对碳纤维表面  
极性含氧基团的影响

Table 2 Influence of plasma treatment on  
oxygen-containing functional groups

Treatment method	O/C N/%
Untreated	24.9
O <sub>2</sub> plasma treatment	32.5
O <sub>2</sub> plasma grafting Polymerization with MAH	29.9

由表 2 可知, 经氧等离子体处理后碳纤维表面的 O、C 组成比发生变化, 表面含氧量大为增加, 而经马来酸酐/氧等离子体处理的纤维虽含氧量比未处理纤维有所增加, 但不如用纯氧等离子体处理者为多; 不过, 先在碳纤维表面预涂马来酸酐再用氧等离子体处理, 可在碳纤维的表面形成一层性质不同于原纤维的新接枝层。我们知道纤维表面化学组成的变化势必会导致纤维表面能的变化, 而表面能对于纤维与复合材料的相容性是非常重要的, 若纤维

表面与液体树脂浸润不良, 那么界面上就会产生空隙, 容易导致应力集中而发生开裂; 若能全部浸润, 则树脂与纤维的粘接强度将大于基体的内聚强度。

低温等离子体处理对碳纤维的拉伸强度也有一定影响, 但不同研究小组得出的结论差异较大, 文献报道的结果包括负影响、无影响或正影响三种情况, 这与研究者所使用的等离子体处理条件有关。当使用空气、O<sub>2</sub> 或 NH<sub>3</sub> 等气体时, 适度的等离子体处理将只引起表面官能团变化而不产生降解, 这样纤维的强度将保持不变。然而, 高强度的等离子体处理将会刻蚀到纤维本体, 从而破坏纤维的力学性能。郑安呐等人<sup>[15]</sup> 对 CF 的等离子体处理和等离子体引发接枝聚合进行了研究, 结果如表 3 所示。表 3 列出了不同等离子体处理对 CF 单丝强度的影响, 可以发现随着纤维长度的增加, 强度下降, 延伸率减小。氧等离子体处理后强度和延伸率稍有下降, 但模量却有增加。接枝后的纤维强度和延伸率没有明显下降, 而模量有所降低。

表 3 不同等离子体条件处理后碳纤维单丝的力学性能

Table 3 Mechanical properties of single carbon fiber treated by oxygen plasma

Treatment method	Length L/mm	Tensile strength $\sigma$ /GPa	Tensile modulus E/GPa	Elongation $\epsilon$ /%
Untreated	10	1.48	109.6	1.40
	20	1.32	124.9	1.04
	30	1.23	125.7	0.82
O <sub>2</sub> plasma	10	1.38	122.5	1.21
	20	1.19	116.6	1.14
	30	1.10	131.9	0.78
O <sub>2</sub> plasma followed by grafting polymerization with poly (acrylic acid)	10	1.42	107.6	1.34
	20	1.28	116.9	1.05
	30	1.29	121.8	1.04

4.3 等离子体处理对碳纤维与基体树脂之间界面结合力的影响

在纤维增强树脂基复合材料中, 纤维与树脂基体之间的结合力是使应力由基体向纤维传递的首要因素。低温等离子体处理碳纤维可以通过引入极性或活性基团, 甚至是在碳纤维表面形成一个有较强共价键作用的新的聚合物层来提高纤维与基体间的结合力, 同时也通过改变纤维表面的粗糙度来增强纤维与基体之间的机械作用力。只有纤维与基体之间有良好的界面结合力, 才能使复合材料具有优异的力学性能。因而, 人们常通过测试复合材料的界面剪切强度或层间剪切强度(ILSS)来研究和判断复合材料界面结合的优劣。测量界面强度的方法有复合材料 ILSS 测量法, 单丝纤维拔出法等。利用复合

材料动态力学分析(DMA)和微量冲击法来评价界面结合的好坏也是一个新动向。

Sun 等人<sup>[16]</sup> 的研究表明 PAN 基碳纤维经过低温等离子体处理后, 制得的碳纤维增强环氧树脂复合材料的层间剪切强度提高, 而且没有发生纤维与基体间的脱粘和纤维拔出现象。郑安呐等人<sup>[17]</sup> 则发现, 未处理碳纤维复合材料的界面结合强度很弱以致于不能有效传递载荷, 而表面含 100 nm 厚等离子体接枝聚丙烯酸接枝层的碳纤维复合材料却有较高的 ILSS(比未处理提高 64%), 在断面上拔出的纤维表面不是粘附树脂, 就是遭到较大的破坏, 由此表明该种复合材料在冲击过程中有足够的弹性承载能力, 因而有较高的抗冲击性, 最大冲击载荷达到 9.32 N, 是未处理时的 2.6 倍。Sun 等人<sup>[16]</sup> 用低温

等离子体处理及接枝聚合改性 CF 表面, 向碳纤维复合材料中引入既可塑又防水的混杂界面层, 使 CFRP 的韧性提高 148 %, 材料破坏过程由脆性破坏转变为韧性破坏, 材料模量、ILSS、玻璃化转变温度、松弛活化能有所提高, 耐湿热性能也有很大改善, ILSS 强度保留率由 92.7 % 提高到 97.9 %。

#### 4.4 等离子体处理对纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响

##### (1) 对拉伸强度的影响

纤维增强树脂基复合材料的横向拉伸强度主要取决于树脂强度、树脂与纤维的界面结合力和纤维的强度。显然, 对纵向拉伸强度的主要贡献源于纤维的拉伸强度。如若等离子体处理 CF 能使其强度提高, 且与树脂界面结合力增大的话, 势必也会提高 CFRP 的拉伸强度。Filatovs<sup>[18]</sup> 利用空气微波等离子体处理 AS4 碳纤维, 然后测试 CF 增强环氧树脂 (EP) 复合材料的横向拉伸强度, 发现在 63.2 % 的生存概率下, 经等离子体处理后的材料强度是未处理材料的 2.5 倍, 达到 75 MPa。

##### (2) 对剪切和弯曲强度的影响

纤维增强复合材料的剪切强度和弯曲强度不仅取决于纤维和树脂的结合力, 也与各组分的强度有关。Weisweiler<sup>[19]</sup> 等人采用苯胺 (A)、吡啶 (P)、或苯 (B) 等单体的等离子体聚合方法处理碳纤维, 发现可以在保持碳纤维拉伸强度不变的情况下, 获得具有较高剪切和弯曲强度的 CF/EP 复合材料。

Jang 等人<sup>[20]</sup> 采用氧等离子体处理 CF, 研究纤维表面官能团与 CF/聚醚醚酮 (PEEK) 复合材料界面粘接强度的关系。扫描电镜观察发现, 等离子体处理 3 min 就可使纤维表面粗糙化, 延长处理时间表面又变光滑。复合材料的弯曲强度 ILSS 在处理 3 min 时达到最大, 与处理前相比弯曲强度提高 52 %。

## 5 结束语

用低温等离子体技术对纤维表面进行处理可以有效地改善 CF 与基体树脂的界面结合, 制备高性能的碳纤维树脂基复合材料。但需要注意以下问题: (1) 单纯用某种气体放电产生的等离子体处理, 存在着时间效应, 即随着放置时间延长, 处理后的效果会恢复到原来情况。只有保留在惰性气氛中或者尽快地同基体复合, 方可获得较好的处理效果。可能的解决办法是用等离子体聚合或等离子体接枝聚合使单体在碳纤维表面进行接枝反应, 长出能与基

体紧密结合的界面缓冲层, 从而提高与碳纤维界面的结合力, 因此, 等离子体处理与接枝聚合相结合的技术是很有前途的表面处理方法。(2) 用现有低温等离子体技术处理碳纤维时需要在真空条件下进行, 这使得碳纤维短丝、毛丝容易被抽起并被吸附在真空室的器壁上造成污染, 所以需要经常清洗腔体。另外, 如果采用流水线处理碳纤维, 存在真空的密封问题, 对技术和设备要求都比较高。因此, 需要开发能在大气压下运行的低温等离子体技术。(3) 等离子体处理碳纤维过程的反应机理复杂, 对此至今尚未形成定量和统一的理论, 而且处理效果与许多因素有关。等离子体装置不同, 处理效果也不同。(4) 表征等离子体处理效果的方法很多, 但真正有效的不多。其中, 应用广泛的 XPS 和离子散射光谱 (ISS) 虽能给出良好的表面特性, 但不能显示不同处理方法之间的差异。要更精确地分析鉴别炭材料的物化性能在等离子体处理前后的变化, 需要使用静态二次离子散射质谱 (SIMS) 技术。

低温等离子体技术是对碳纤维表面进行改性的一种行之有效的办法, 它可以使碳纤维表面组成发生明显的变化, 导致接触角的减小以及表面能的提高。同时, 由于含氧极性基团的引入而使纤维与基团界面形成牢固的化学结合力, 提高了复合材料的力学性能。另外, 采用低温等离子体处理碳纤维制备 CFRP 的工艺关键是严格控制好等离子体处理的条件 (气压、处理时间、放电功率、进气位置及反应器形状等), 其中选择合适的气氛尤为重要。等离子体引发接枝聚合既可以改善碳纤维的拉伸强度, 提高碳纤维与树脂基体的结合力, 又可以延缓时间效应, 是一种值得深入研究的有发展前途的技术方法。此外为了更好地弄清等离子体对 CF 的作用机理, 等离子体状态的分析诊断也是迫切需要发展的课题。

#### 参考文献:

- [1] 日本炭素材料学会. 新炭素材料入门 [M]. 中国金属学会炭素材料专业委员会编译. 1999.
- [2] 赵稼祥, 王曼霞. 复合材料用高性能碳纤维的发展和运用 [J]. 新型炭材料, 2000, 15(1): 68-75.
- [3] Boenig H V. Fundamentals of Plasma Chemistry and Technology [M]. Lancaster: Technomic Publishing Co. Inc. 1989.
- [4] 赵化桥. 等离子体科学与工艺 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1993.
- [5] 邱介山, 王谦, 马腾才. 煤在等离子体中热解直接生产乙炔 [J]. 煤化工, 1994, 3: 8-14.
- [6] 邱介山, 王小泉, 王谦, 等. 几种年轻煤在氮热等离子体中的

- 热解研究[J]. 化工学报, 1999, **50**(5): 586-591.
- [7] 邱介山, 王小泉, 王谦, 等. 几种烃化合物在氮热等离子体中的热解[J]. 燃料化学学报, 1998, **26**(6): 481-485.
- [8] 王茂章, 贺福. 碳纤维的制造、性质及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 301.
- [9] Fitzer E, Weiss R. Effect of surface treatment and sizing of C-fibres on the mechanical properties of CFR thermosetting and thermoplastic polymers[J]. Carbon, 1987, **25**(4): 455-467.
- [10] Waltersson K. ESCA studies of carbon fibres; part II-surface reactions of carbon fibres with epoxides[J]. Compos Sci Technol, 1985, **22**(3): 223-240.
- [11] Subramaniam R V, Jakubowski J. Electropolymerization on graphite fibers[J]. Polym Eng Sci, 1978, **18**(7): 590-600.
- [12] Qin R Y, Donnet J B. Study of carbon fiber surfaces by scanning tunneling microscopy, part III. carbon fibers after surface treatments [J]. Carbon, 1994, **32**(2): 323-328.
- [13] Jones C, Sammann E. The effect of low power plasmas on carbon fiber surfaces[J]. Carbon, 1990, **28**(4): 509-514.
- [14] 郑安呐, 胡福增, 吴叙勤, 等. 碳纤维表面处理及其复合材料界面优化的研究, II. 低温等离子体处理对碳纤维表面浸润特性的影响[J]. 华东理工大学学报, 1994, **20**(4): 459-464.
- [15] 郑安呐, 王华, 吴叙勤, 等. 碳纤维表面处理及其复合材料界面优化的研究, V. 碳纤维表面等离子法接枝处理[J]. 华东理工大学学报, 1994, **20**(4): 478-484.
- [16] Sun M, Hu B, Wu Y, *et al.* The surface of carbon fibres continuously treated by cold plasma[J]. Compos Sci Technol, 1989, **34**: 353-364.
- [17] 郑安呐, 吴叙勤, 李世缙. 碳纤维表面处理及其复合材料界面优化的研究, VI. 碳纤维复合材料的界面结合[J]. 华东理工大学学报, 1994, **20**(4): 485-490.
- [18] Filatovs G J. J Mater Sci Lett, 1993, **48**: 121.
- [19] Weisweiler W, Schlitter K. Thin Solid Films, 1992, **207**: 158.
- [20] Jang J, kim H. Improvement of carbon fiber/PEEK hybrid fabric composites using plasma treatment[J]. Polym Compos, 1997, **18**(1): 125-132.

## APPLICATION OF LOW TEMPERATURE PLASMA IN SURFACE TREATMENT OF CARBON MATERIALS

QIU Jie-shan

(Carbon Research Laboratory, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

**ABSTRACT:** Low temperature plasma treatment is a convenient technique for the surface modification of carbon materials for improving the surface properties, which result from introducing functional groups or making cross-links in the surface of carbon materials. In the present paper following the brief description of the characteristics and ignition method of low temperature plasmas, the application of low temperature plasmas in modifying the surface of carbon fibers is discussed in terms of the variation of fiber's surface properties and its effect on the composites, performance. The present status and prospects of low temperature plasma in carbon fiber modification are also summarized.

**KEY WORDS:** Low temperature plasma; Carbon materials; Surface treatment

**Author Introduction:** QIU Jie-shan (1964-), male, Ph. D., Professor, his research interests are mainly on new forms of carbon materials, and coal chemistry and technology.