

# PAN 基碳纤维微晶结构对 拉伸强度的影响

Effect of Crystallites Structure of PAN-based  
Carbon Fibers on Tensile Strength

钟云娇,边文凤

(哈尔滨工业大学 航天学院,哈尔滨 150001)

ZHONG Yun-jiao, BIAN Wen-feng

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, China)

**摘要:** 碳纤维由微晶和非晶碳所构成。利用 X 射线衍射(XRD)和拉曼光谱(Raman)研究聚丙烯腈(PAN)基碳纤维微晶结构对拉伸强度的影响机理。结晶度、石墨化程度、微晶无序化程度、微晶尺寸都对拉伸强度有显著影响。结晶度、石墨化程度越大,微晶无序化程度越小拉伸强度越大。微晶尺寸越大拉伸强度越小。比较 T300 和 T700,结晶度、石墨化程度的增加,微晶无序化程度的减小所导致的拉伸强度增量大于微晶尺寸增加所导致的拉伸强度减小量,从而使得 T700 的拉伸强度大于 T300 的拉伸强度,同理可知 T800 的拉伸强度大于 T700 的拉伸强度。比较 M35J 和 M40J,结晶度、石墨化程度的增加,微晶无序化程度的减小所导致的拉伸强度增量小于微晶尺寸增加所导致的拉伸强度减小量,从而使得 M40J 的拉伸强度小于 M35J 的拉伸强度,同理可知 M46J 的拉伸强度小于 M40J 的拉伸强度。M35J、M40J 和 M46J 内的较大的微晶对拉伸强度的影响起决定性作用。

**关键词:** PAN 基碳纤维;拉伸强度;微晶尺寸;裂纹;结晶度

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000298

**中图分类号:** TB321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2017)12-0037-06

**Abstract:** Carbon fiber is composed of crystallite and amorphous carbon. The X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy were used to investigate the influencing mechanism of the microstructure of crystallites of polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers on tensile strength. The results show that the crystallinity, the degree of graphitization, the degree of crystallites structural disorder and the crystallite size have obvious effects on tensile strength. The larger the crystallinity and the degree of graphitization, the larger the tensile strength; the smaller the degree of crystallites structural disorder, the larger the tensile strength; the larger the crystallite size, the smaller the tensile strength. Comparing T300 with T700, the increment of tensile strength, which is caused by the increase of the crystallinity and the degree of graphitization, and the decrease of the degree of crystallites structural disorder, is larger than the decrement of tensile strength, which is caused by the increase of the crystallite size. Therefore, the tensile strength of T700 is larger than that of T300, and the same with that the tensile strength of T800 is larger than that of T700. When M35J is compared with M40J, the increment of tensile strength, which is caused by the increase of the crystallinity and the degree of graphitization, and the decrease of the degree of crystallites structural disorder, is smaller than the decrement of tensile strength, which is caused by the increase of the crystallite size. Therefore, the tensile strength of M40J is smaller than that of M35J, and the same with that the tensile strength of M46J is smaller than that of M40J. In M35J, M40J and M46J, the bigger crystallite size is a crucial factor that affects the tensile strength.

**Key words:** PAN-based carbon fibers; tensile strength; crystallite size; crack; crystallinity

PAN 基碳纤维诞生于 1959 年<sup>[1]</sup>,经过半个多世纪的发展,已经成为最重要的碳材料之一。如今,碳纤

维广泛应用于航空航天、土木工程、汽车工业、体育产业等领域<sup>[2]</sup>。碳纤维的微观结构决定着其宏观力学性能<sup>[1]</sup>。为提高碳纤维的力学性能,学者们对碳纤维微观结构和形态学进行了研究<sup>[3-7]</sup>。刘福杰等<sup>[8]</sup>和韩赞等<sup>[9]</sup>对高模量碳纤维的微观结构进行了研究。井敏等<sup>[10]</sup>对高强中模型 PAN 碳纤维的微观结构进行了研究与比较。薛林兵等<sup>[11]</sup>研究了牵伸石墨化对石墨纤维结构和拉伸强度的影响。刘福杰等<sup>[12]</sup>研究了 PAN 基碳纤维密度与拉伸强度的关系。郭慧等<sup>[13]</sup>对 T300 和国产碳纤维本体的拉伸强度进行了对比并分析了两者的微观结构异同。井敏等<sup>[14]</sup>对 T300, T700S 和 T800H 三种碳纤维的微观结构与力学性能进行了研究与比较。研制更高强度,更高模量的高性能碳纤维以适应现代社会各方面不断发展的需求具有重要的意义。

碳纤维内部非晶碳和微晶并存,有序和无序共存,因此认为碳纤维是由非晶碳和微晶所构成的是合理的<sup>[15]</sup>。微晶的结构对碳纤维拉伸强度有着重要影

响<sup>[16]</sup>。本工作采用 X 射线衍射和拉曼光谱测试技术对三种高强和三种高模碳纤维微晶的微观结构进行了实验,研究了微晶结构对拉伸强度的影响。

1 实验材料与方法

选取东丽公司生产的 PAN 基碳纤维 T300,T700,T800,M35J,M40J 和 M46J 六种碳纤维作为样本,具体参数见表 1。采用 RINT2000 X 射线衍射仪(XRD)测定碳纤维的微晶结构,CuK<sub>α</sub> 辐射源,波长λ=0.1541nm,加速电压 40kV,电流强度 40mA。测试时将纤维平行一排固定在纤维附件上,分别进行赤道扫描、子午扫描和方位角扫描(用于计算碳纤维结晶度)。赤道、子午扫描间隔 0.02°,方位角扫描间隔 0.504°。采用 LabRAM Xplo-RA 拉曼光谱仪测定碳纤维的石墨化程度和微晶无序化程度参数。激光器波长 532nm,拉曼位移范围1000~2000cm<sup>-1</sup>,显微尺寸范围≥1μm,光谱分辨率 1cm<sup>-1</sup>,曝光时间 10s,累加次数 2 次。

表 1 碳纤维物理与力学性能指标参数  
Table 1 Physical and mechanical properties of the carbon fibers

Type	σ <sub>b</sub> /GPa	L <sub>c</sub> /nm	L <sub>a</sub> /nm	f/%	Π/%	R	B(G)/cm <sup>-1</sup>
T300	3.53	1.6913	3.7304	41.44	79.86	1.3876	111.81
T700S	4.90	1.9250	4.1936	47.89	79.43	1.1298	103.53
T800H	5.49	1.9816	4.6185	53.55	84.02	1.0937	102.87
M35J	4.70	3.3003	9.4670	54.10	86.27	0.9504	76.59
M40J	4.40	3.5770	10.2742	59.16	87.70	0.9216	75.66
M46J	4.02	4.3490	12.8849	64.09	87.89	0.7469	66.05

Note: T700S and T800H are selected as experimental sample from T700 and T800 series carbon fibers.

2 结果与分析

2.1 XRD 分析

图 1,2 分别为 T300,T700,T800,M35J,M40J 和 M46J 六种碳纤维赤道扫描和子午扫描 XRD 图谱。图 1 中约在 2θ=25°处出现(002)晶面衍射峰,图 2 中约在 2θ=43°处出现(100)晶面衍射峰。以微晶堆砌厚度 L<sub>c</sub> 和微晶基面宽度 L<sub>a</sub> 来衡量微晶尺寸大小。这里 L<sub>c</sub> 和 L<sub>a</sub> 分别利用赤道扫描图谱中 002 峰和子午扫描图谱中 100 峰按式(1)来计算<sup>[16]</sup>。

L = Kλ / Bcosθ (1)

式中:θ为晶面衍射峰的衍射角,B是晶面衍射峰的半高宽,K是常数,计算 L<sub>c</sub> 时取 0.94,计算 L<sub>a</sub> 时取 1.84<sup>[16]</sup>。L<sub>c</sub> 和 L<sub>a</sub> 的具体数值见表 1。

图 3 为六种碳纤维方位角扫描图谱,取向度 Π 按

式(2)计算<sup>[17]</sup>。

Π = (180° - H) / 180° × 100% (2)

式中:H为方位角衍射峰的半高宽。Π 的具体实验数据见表 1。

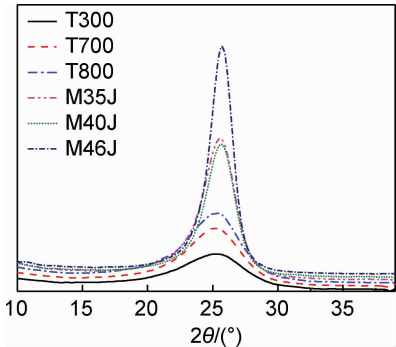


图 1 碳纤维赤道方向 XRD 扫描图  
Fig. 1 XRD scanning pattern of carbon fibers in the direction of the equator

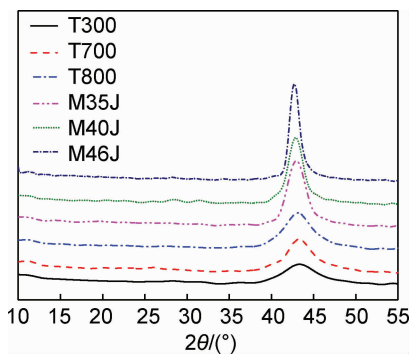


图 2 碳纤维子午方向 XRD 扫描图

Fig. 2 XRD scanning pattern of carbon fibers in the direction of the meridian

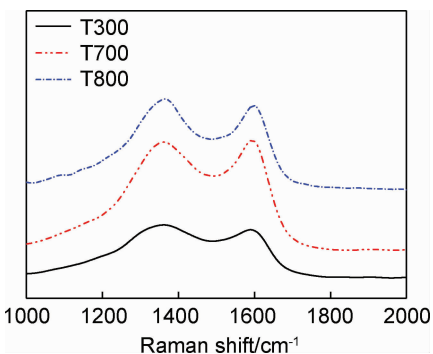


图 4 T 系列碳纤维拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of T series carbon fibers

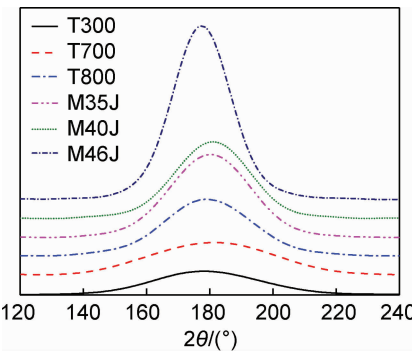


图 3 碳纤维方位角 XRD 扫描图

Fig. 3 XRD azimuth scanning pattern of carbon fibers

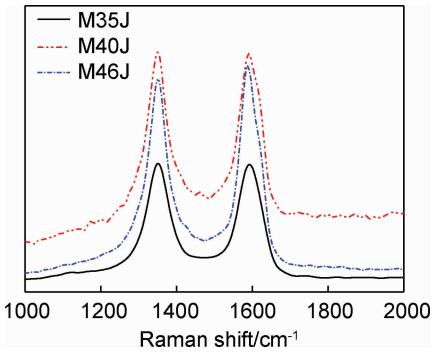


图 5 MJ 系列碳纤维拉曼光谱

Fig. 5 Raman spectra of MJ series carbon fibers

2.2 拉曼光谱分析

激光拉曼光谱可从碳纤维的化学结构角度进行表征<sup>[18]</sup>。各种碳纤维的拉曼光谱均出现了 G(1580~1600cm<sup>-1</sup>)峰和 D(1350~1370cm<sup>-1</sup>)峰,如图 4 和图 5 所示。其中图 4 为 T 系列碳纤维拉曼光谱图谱,图 5 为 MJ 系列碳纤维拉曼光谱图谱。G 峰是石墨化层平面内碳原子(sp<sup>2</sup> 杂化)的伸缩振动峰,D 峰是石墨片层边缘碳原子的伸缩振动峰<sup>[19,20]</sup>。此外在 MJ 系列碳纤维的拉曼光谱中约 1620cm<sup>-1</sup>处还有一个 D'峰<sup>[8]</sup>。D'峰和 G 峰常常发生交叠,如图 5 所示,因此要对图谱进行分峰处理。图 5 中 M40J 和 M46J 的 D'峰较为明显,M35J 的 D'峰并不明显。鉴于 G 峰和 D 峰的物理意义,可以用  $R = I_D/I_G$  计算碳纤维中 sp<sup>2</sup> 杂化碳原子的相对含量,即石墨化程度<sup>[21]</sup>。其中  $I_D$  和  $I_G$  分别是拉曼光谱 D 峰和 G 峰处的衍射强度。 $R$  越小,碳纤维石墨化程度越高<sup>[19,20]</sup>。拉曼光谱 G 峰半高宽( $B(G)$ )是另外一个表征碳材料的重要参数。对 sp<sup>2</sup> 团簇来说,碳原子键长和键角越无序, $B(G)$ 就越大<sup>[22]</sup>。因此, $B(G)$ 成为判断碳纤维内部微晶无序的标准(结晶无序化程度参数)。六种碳纤维的值和  $B(G)$ 值见表 1。

2.3 微晶结构与拉伸强度关系分析

图 6 表示微晶堆砌厚度  $L_c$  和微晶基面宽度  $L_a$  与拉伸强度的关系。从图 6(a),(b)中可知 T 系列碳纤维的拉伸强度随着  $L_c$  和  $L_a$  的增加而增加。从图 6(a),(b)还可知 MJ 系列碳纤维的拉伸模量随着  $L_c$  和  $L_a$  的增加而减小。

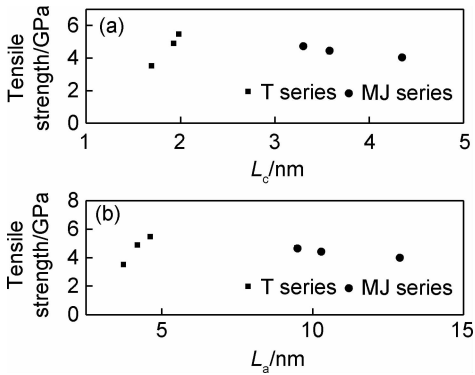


图 6 碳纤维拉伸强度与  $L_c$  (a)和  $L_a$  (b)间的关系

Fig. 6 Plots of tensile strength of carbon fibers versus  $L_c$ (a) and  $L_a$ (b)

图 7,8 分别表示结晶度  $f$ 、石墨化程度  $R$  和拉曼 G 峰半高宽  $B(G)$ 与拉伸强度间的关系。这里结晶度

由公式(3)<sup>[23]</sup>得到。

$$\bar{C} = [f_0 C_0 + f \{TC_1 [I - A] T^T\}_{\text{angle}}] \cdot [I - f \{ (T^{-1})^T A T^T \}_{\text{angle}}]^{-1} \quad (3)$$

式中： $\bar{C}$ 为碳纤维刚度系数； $C_0$ <sup>[16]</sup>， $C_1$ <sup>[24]</sup>分别为非晶碳和微晶的刚度系数； $f$ 为碳纤维中微晶的体积分数，非晶碳的体积分数 $f_0 = 1 - f$ ， $A = S(\Delta CS + C_0)^{-1} \Delta C$ ， $\Delta C = C_1 - C_0$ ； $S$ 为微晶夹杂的四阶 Eshelby 张量<sup>[25]</sup>； $I$ 为单位矩阵； $T$ <sup>[2]</sup>为两坐标系之间的坐标变换矩阵； $\{\cdot\}_{\text{angle}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \cdot \eta(\theta) \sin\theta d\theta d\varphi / 2\pi \int_0^\pi \eta(\theta) \sin\theta d\theta$ ； $\eta(\theta)$ 为微晶的分布密度<sup>[26]</sup>。图 7(a)中，T 系列碳纤维拉伸强度随着结晶度  $f$  的增大而增加，MJ 系列碳纤维拉伸强度随着结晶度  $f$  的增加而减小。图 7(b)中，T 系列碳纤维的拉伸强度随着石墨化程度增加而增加，MJ 系列碳纤维拉伸强度随着石墨化程度的增加而减小。图 8 中，T 系列碳纤维拉伸强度随着微晶无序化程度减小而增加，而 MJ 系列碳纤维拉伸强度随着微晶无序化程度减小而减小。

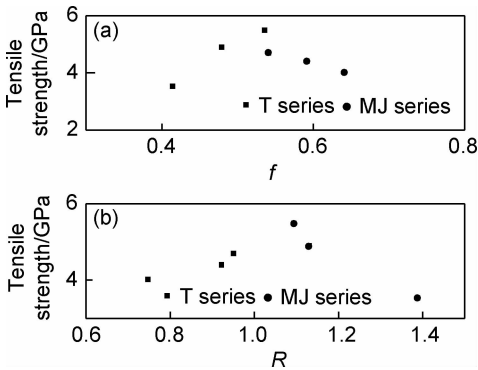


图 7 碳纤维拉伸强度与  $f$ (a)和  $R$ (b)间的关系

Fig. 7 Plots of tensile strength of carbon fibers versus  $f$  (a) and  $R$  (b)

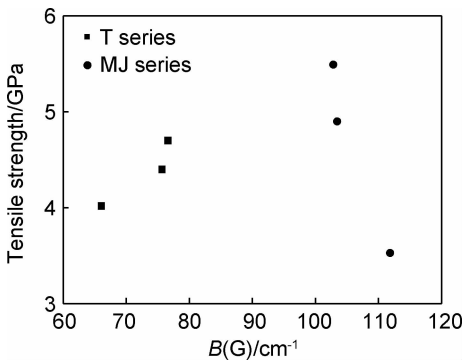


图 8 碳纤维拉伸强度与  $B(G)$ 间的关系

Fig. 8 Plots of tensile strength of carbon fibers versus  $B(G)$

碳纤维内部非晶碳与微晶共存，有序无序共存，其拉伸强度既与微晶有关，也与非晶碳有关，二者所承受

的拉伸载荷不同。理想微晶拉伸强度约为 100GPa<sup>[16]</sup>，而非晶碳的拉伸强度则要小于碳纤维固有的拉伸强度。碳纤维微晶体积分数  $f$  越大，其拉伸强度就越大。在碳纤维拉伸过程中，连接微晶的非晶碳处是裂纹源的发生处，而非微晶内部，因此， $L_c$  和  $L_a$  小，所产生的裂纹就小， $L_c$  和  $L_a$  大，所产生的裂纹也大。碳纤维属脆性材料，可用格里菲斯微裂纹理论解释拉伸强度与裂纹尺寸间的关系<sup>[16]</sup>，裂纹尺寸越大，拉伸强度越低。碳纤维石墨化程度是衡量无序的非晶碳通过结构重排，其晶体接近完善石墨的程度。碳纤维石墨化程度越高，拉伸强度也越大。碳纤维内部微晶并非真正的石墨结构，微晶无序化程度越小，其越接近石墨结构，从而使拉伸强度增大。

比较 T300 和 T700 两种碳纤维，T700 的结晶度  $f$  比 T300 的大 6.45%，石墨化程度参数  $R$  比 T300 的小 0.2578，微晶的无序化程度参数  $B(G)$  比 T300 的小 8.28 $\text{cm}^{-1}$ ，如表 1 所示，结晶度  $f$ 、石墨化程度的增加，微晶无序化程度的减小，都对拉伸强度的提高做出贡献。另一方面，T700 的  $L_c$  和  $L_a$  分别比 T300 的大 0.2337nm 和 0.4632nm，如表 1 所示，微晶尺寸的增加，也就意味着裂纹尺寸的增加，从而使拉伸强度减小。两方面因素综合作用使得 T700 的拉伸强度比 T300 的大 1.37GPa，这说明 T300 与 T700 之间，结晶度  $f$ 、石墨化程度的增加，微晶无序化程度的减小所带来的拉伸强度增加量大于微晶尺寸的增加所导致的拉伸强度减少量。比较 T700 和 T800 也可知，T800 的结晶度  $f$  比 T700 的大 5.66%，石墨化程度参数  $R$ 、微晶的无序化程度参数  $B(G)$  分别比 T700 的小 0.0361 和 0.66 $\text{cm}^{-1}$ ，而 T800 的  $L_c$  和  $L_a$  分别比 T700 的大 0.0566nm 和 0.4249nm，如表 1 所示，从 T800 拉伸强度比 T700 的大 0.59GPa 可知，结晶度  $f$ 、石墨化程度的增加，微晶无序化程度的减小所带来的拉伸强度增加量大于微晶尺寸的增加所导致的拉伸强度减少量。

比较 M35J 和 M40J，M40J 的结晶度  $f$  比 M35J 的大 1.43%，石墨化程度参数  $R$ 、微晶的无序化程度参数  $B(G)$  分别比 M35J 的小 0.0288 和 0.93 $\text{cm}^{-1}$ ，而 M40J 的  $L_c$  和  $L_a$  分别比 M35J 的大 0.2767nm 和 0.8072nm，如表 1 所示，从 M40J 拉伸强度比 M35J 的小 0.3GPa 可知，微晶尺寸的增大所导致的拉伸强度减少量大于结晶度  $f$ 、石墨化程度增加，微晶的无序化程度减小所导致的拉伸强度增加量。相同的比较也可知，M40J 和 M46J 之间，微晶尺寸增大所导致的拉伸强度减少量大于结晶度  $f$ 、石墨化程度增加，微晶的无序化程度减小所导致的拉伸强度增加量。

比较 T700，T800 与 M35J，M40J 和 M46J。由表

1 可知 M35J, M40J 和 M46J 的结晶度  $f$  为 54.10%~64.09%, 石墨化程度参数  $R$  为 0.7469~0.9504, 微晶无序化程度参数  $B(G)$  为 66.05~76.59 $\text{cm}^{-1}$ ; 而 T700, T800 的结晶度  $f$  为 47.89%~53.55%, 石墨化程度参数  $R$  为 1.0937~1.1298, 微晶无序化程度参数  $B(G)$  为 102.87~103.53 $\text{cm}^{-1}$ , 因而可知 M35J, M40J 和 M46J 的结晶度  $f$ 、石墨化程度和微晶无序化程度对拉伸强度的贡献明显高于 T700, T800 相对应的参数对拉伸强度的贡献。对于微晶尺寸来说, M35J, M40J 和 M46J 的  $L_c$  和  $L_a$  分别为 3.3003~4.3490nm 和 9.4670~12.8849nm, 远大于 T700, T800 的 1.6913~1.9816nm 和 3.7304~4.6185nm, 因而 M35J, M40J 和 M46J 的微晶尺寸对拉伸强度的劣化程度必然大于 T700, T800 的微晶尺寸对拉伸强度的劣化程度。而从 M35J, M40J 和 M46J 的拉伸强度小于 T700 和 T800 的拉伸强度这一事实可知, M35J, M40J 和 M46J 内较大的微晶尺寸对拉伸强度的影响起决定性作用。

### 3 结论

(1) 碳纤维拉伸强度是结晶度、石墨化程度、微晶无序化程度、微晶尺寸综合影响的结果。结晶度、石墨化程度越大, 拉伸强度越大, 微晶无序化程度越小拉伸强度越大; 微晶尺寸越大, 拉伸强度越小。

(2) 比较 T300 和 T700 两种碳纤维, 结晶度、石墨化程度的增大, 微晶无序化程度的减小所带来的拉伸强度增加量大于微晶尺寸的增加所导致的拉伸强度减小量, 从而使得 T700 的拉伸强度大于 T300 的拉伸强度。同理可得 T800 的拉伸强度大于 T700 的拉伸强度。

(3) 比较 M35J 和 M40J 两种碳纤维, 微晶尺寸的增加所导致的拉伸强度减小量大于结晶度、石墨化程度的增加, 微晶无序化程度的减小所带来的拉伸强度增加量, 最终导致 M40J 的拉伸强度小于 M35J 的拉伸强度。同理可得 M46J 的拉伸强度小于 M40J 的拉伸强度。M35J, M40J 和 M46J 内的较大的微晶尺寸对拉伸强度的影响起决定性作用。

#### 参考文献

- [1] CHUNG D D L. Carbon fiber composites [M]. Boston: Butterworth Heinemann, 1994:55-77.
- [2] ZHONG Y J, BIAN W F, WANG M L. The effect of nanostructure on the tensile modulus of carbon fibers [J]. J Mater Sci, 2016, 51(7):3564-3573.
- [3] OBERLIN A. Carbonization and graphitization [J]. Carbon, 1984, 22(6):521-541.
- [4] JOHNSON D J. Structure-property relationships in carbon fibers [J]. J Phys D: Appl Phys, 1987, 20(3):286-291.
- [5] JOHNSON D J. Structural studies of PAN-based CFs [M]// Chemistry and Physics of Carbon Vol 20. New York: Marcel Dekker, 1987: 1-58.
- [6] OBERLIN A, BONNAMY S, LAFDI K. Structure and texture of carbon fibers [M]//Carbon Fibers. New York: Mercel Dekker, Inc, 1989: 85-159.
- [7] 张保法. 化学气相沉积中的气相生长碳纤维[J]. 材料工程, 2015, 43(11): 9-12.  
ZHANG B F. Vapor grown carbon fibers produced in chemical vapor deposition[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(11): 9-12.
- [8] 刘福杰, 王浩静, 范立东, 等. MJ 系列碳纤维微观结构的剖析[J]. 化工新型材料, 2009, 37(1):41-43.  
LIU F J, WANG H J, FAN L D, et al. Analysis on the microstructure of MJ series carbon fibers [J]. New Chemical Materials, 2009, 37(1):41-43.
- [9] 韩赞, 张学军, 田艳红, 等. PAN 基高模量碳纤维微观结构研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5):65-71.  
HAN Z, ZHANG X J, TIAN Y H, et al. Microstructure of PAN-based high modulus carbon fibers [J]. Space Craft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(5):65-71.
- [10] 井敏, 谭婷婷, 王成国, 等. 3 种高强度中模型 PAN 基碳纤维的微观结构比较[J]. 功能材料, 2014, 45(8): 8028-8032.  
JING M, TAN T T, WANG C G, et al. Comparison on the microstructure of three high-strength and middle-modulus PAN-based carbon fibers [J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(8): 8028-8032.
- [11] 薛林兵, 王浩静, 李东风. 牵伸石墨化对石墨纤维结构和力学性能的影响[J]. 新型炭材料, 2006, 21(3):243-247.  
XUE L B, WANG H J, LI D F. Effect of stress graphitization on the microstructure and mechanical properties of graphite fibers [J]. New Carbon Materials, 2006, 21(3):243-247.
- [12] 刘福杰, 王浩静, 范立东. PAN 碳纤维在高温石墨化过程中密度的变化规律[J]. 化工新型材料, 2007, 35(1): 43-45.  
LIU F J, WANG H J, FAN L D. The change of density under high temperature heat treatment in PAN-based carbon fibers [J]. New Chemical Materials, 2007, 35(1): 43-45.
- [13] 郭慧, 黄玉东, 刘丽, 等. T300 和国产碳纤维本体的力学性能对比及其分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2068-2072.  
GUO H, HUANG Y D, LIU L, et al. Comparison of mechanical property of unsized T300 and chinese carbon fibers [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2068-2072.
- [14] 井敏, 谭婷婷, 王成国, 等. PAN 基碳纤维的微观结构与力学性能相关性分析[J]. 航空材料学报, 2013, 33(1): 78-85.  
JING M, TAN T T, WANG C G, et al. Correlation between microstructure and mechanical properties of PAN-based carbon fibers[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(1): 78-85.
- [15] TANAKA F, OKABE T, OKUDA H, et al. The effect of nanostructure upon the deformation micromechanics of carbon fibres [J]. Carbon, 2013, 52:372-378.

- [16] 贺福. 碳纤维及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
HE F. Carbon fiber and its application techniques [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] 贺福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
HE F. Carbon fiber and graphite fiber [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [18] 杨序钢, 吴琪琳. 拉曼光谱的分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
YANG X G, WU Q L. Raman spectroscopy analysis and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
- [19] 贺福. 用拉曼光谱研究碳纤维的结构[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 20—25.  
HE F. Raman spectroscopy studies on structure of carbon fibers [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 20—25.
- [20] NIKIEL L, JAGODZINSKI P W. Raman spectroscopic characterization of graphites: a re-evaluation of spectra structure correlation [J]. Carbon, 1993, 31(8): 1313—1317.
- [21] 王浩静, 王红飞, 李东风, 等. 石墨化温度对碳纤维微观结构及其力学性能的影响[J]. 新型炭材料, 2005, 20(2): 157—163.  
WANG H J, WANG H F, LI D F, et al. The effect of graphitization temperature on the microstructure and mechanical properties of carbon fibers [J]. New Carbon Materials, 2005, 20(2): 157—163.
- [22] CHRISTOPHE D, ALI E. Tribology of diamond-like carbon films fundamentals and applications [M]. New York: Springer, 2008.
- [23] ZHONG Y J, BIAN W F. Analysis of the tensile moduli affected by microstructures among seven types of carbon fibers[J]. Composites Part B, 2017, 110:178—184.
- [24] SPENCE G B. Extended dislocation in the anisotropic elastic continuum approximation[C]//Proceedings of the Fifth Conference on Carbon. Pennsylvania: American Carbon Society, 1963: 531—538.
- [25] QIU Y P, WENG G J. On the application of Mori-Tanaka's theory involving transversely isotropic spheroidal inclusions [J]. Int Engng Sci, 1990, 28(11): 1121—1137.
- [26] SHIOYA M, TAKAKU A. Rotation and extension of crystallites in carbon fibers by tensile stress[J]. Carbon, 1994, 32(4): 615—619.

---

**基金项目:**国家自然科学基金(11072069)

**收稿日期:**2016-03-15;**修订日期:**2017-06-12

**通讯作者:**边文凤(1963—),女,教授,博士生导师,博士,研究方向:复合材料结构力学、断裂损伤力学、车辆及船舶动力学,联系地址:山东省威海市哈尔滨工业大学(威海)土木工程系(264209),E-mail: bianwf@163.com

(本文责编:解 宏)