

引用格式:于瑶瑶,谭晶,开吴珍,等. 激光石墨化沥青基碳纤维的力学性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 21–27.

YU YaoYao, TAN Jing, KAI WuZhen, et al. Mechanical properties of laser graphitized pitch-based carbon fiber[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(6): 21–27.

激光石墨化沥青基碳纤维的力学性能研究

于瑶瑶¹ 谭晶¹ 开吴珍^{2*} 杨卫民¹ 程礼盛¹

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 纺织工业科学技术发展中心, 北京 100027)

摘 要: 为提升沥青基碳纤维的力学性能,采用自制的激光超高温石墨化装置对中间相沥青基碳纤维进行石墨化处理。通过改变实验过程中的激光功率、牵伸力及碳纤维直径等 3 个因素制备了多组样品,研究了沥青基碳纤维拉伸强度随温度的变化规律,并分析了石墨化过程中牵伸力及碳纤维直径对其力学性能的影响。结果表明:沥青基碳纤维石墨化能承受的最大激光功率为 360 W,对应的温度约为 3 050 ℃,在此条件下处理得到的碳纤维拉伸强度由 1.0 GPa 提升至 2.5 GPa;在碳纤维的承受范围内,其力学性能随着温度、牵伸力的增加而提高;直径较小的碳纤维力学性能提升更大。

关键词: 中间相沥青基碳纤维; 力学性能; 激光; 模量; 石墨化

中图分类号: TQ314 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.06.004

引 言

沥青基碳纤维是以稠环芳烃和杂环化合物的混合物为原料,经过纺丝、预氧化、碳化、石墨化而形成的一种特种纤维,因其本身具有较高的强度和模量并且耐高温从而备受关注,在航天及国防工业等领域具有重要应用。沥青基碳纤维的石墨化过程是影响其强度和模量的关键技术^[1]。现阶段石墨化过程通常是在石墨炉中通过高温加热的方式实现,常用的有等离子炉、塔姆式电阻炉^[2]等设备,但由于碳纤维加工条件以及耐高温性能的限制,难以实现 3 000 ℃ 以上的超高温连续化加热,不能最大程度地提升沥青基碳纤维的性能。刘强等^[3]的研究表明激光在应用于金属材料的表面强化处理上具有较好的效果。同时,激光辐射也是聚合物材料改性的重要手段^[4–6]。谭晶等^[7–8]的研究表明激光作用于碳纤维可以提高其石墨化程度,可控的激光技术可以

用来改善纤维表面的结构和性能。因此本文通过激光加热沥青基碳纤维的方式来诱导其石墨化,以提高其力学性能。首先基于沥青基碳纤维高模量、低成本的特性,通过改变不同的工艺参数对沥青基碳纤维进行石墨化处理,研究了温度、牵伸力、直径等因素对碳纤维力学性能的影响,最终在最优工艺条件下达到提高其强度的目的。

1 实验部分

1.1 原料

沥青基碳纤维(1k),北京化工大学国家碳纤维工程技术中心自制,预氧化条件为 0~200 ℃,升温速度 1.5 ℃/min,终温 300 ℃下恒温 15 min,再经过 1 000 ℃ 碳化。

1.2 试样制备

沥青基碳纤维石墨化实验采用实验室自制的碳纤维激光石墨化实验装置,如图 1 所示。导向轮提供固定的走丝速度,碳纤维在氩气的环境下以一定的走丝速度通过激光超高温照射实验装置,纤维的末端通过砝码提供一定的牵伸力,整个过程在激光照射下获得石墨化后的沥青基碳纤维。实验中的高纯氩气来自苏州瑞泽气体净化设备有限公司生产的 RZ-YA-4D 型氩气净化机,激光器采用北京热刺公

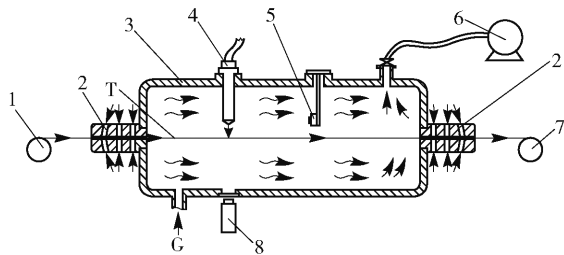
收稿日期: 2019-05-22

第一作者: 女,1994 年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: kk932@126.com

司制造的光纤激光器,激光束直径约为 2 mm。



1—放丝导向轮;2—密封装置;3—石墨化炉;4—激光器;5—观测摄像机;6—微型真空泵;7—收丝导向轮;8—红外测温仪;G—氩气;T—碳纤维。

图1 石墨化实验装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of the experimental graphitization device

1.3 测试与表征

1.3.1 直径测试

采用 Olympus BX51 型显微镜以及配套的 ProgRes capturePro 碳纤维专用测量软件(北京元中锐科集成检测技术有限公司),在 20 倍放大条件下对碳纤维的直径进行测量,每根单丝在 3 个位置取平均值,每个实验组至少测量 25 个有效试样。

1.3.2 力学性能测试

采用 YG001A 型纤维电子强力仪(太仓纺织仪器厂)测试碳纤维的单丝拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率^[9]。在坐标纸上刻出夹持距离为 25 mm 的空框用来固定碳纤维单丝,再用仪器进行拉伸。每组碳纤维进行多次测试,取 25 个有效试样,计算拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率。

用 Weibull 分布函数对实验所得数据进行统计分析。Weibull 分布函数表达式为

$$F(\delta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

根据表达式(1)可以推导出单丝拉伸强度的平均值 $\bar{\delta}$ 、标准差 S 和变异系数 C_v 关于 m 和 δ_0 的函数关系式

$$\bar{\delta} = \delta_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (2)$$

$$S = \delta_0 \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{\delta}} = \frac{\sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (4)$$

式中, Γ 为伽马函数, $\Gamma(S) = \int_0^{+\infty} e^{-x} x^{S-1} dx$; $F(\delta)$ 为累积概率分布函数; δ 为纤维的强度测试值, GPa; δ_0 为尺寸参数, GPa; m 为纤维的形状参数。

1.3.3 微观结构分析

取激光照射后的纤维丝束放于样品台上,采用日本日立公司的 S-4700 冷场发射扫描电镜,在电压 10.0 kV,放大倍数分别为 1 000、1 500 和 2 000 下进行表面形貌观测。

采用英国 Renishaw 公司的 RM2000 型显微共聚焦 Raman 光谱仪对不同激光功率处理后的纤维进行拉曼光谱检测,激光波长 514 nm,积分时间 10 s,扫描范围 1 000 ~ 2 000 cm^{-1} 。

1.3.4 取向度测试

采用荷兰帕那科公司的 X'Pert PRO MPD 高分辨衍射仪对纤维进行取向度测试,测试条件为:管压 40 kV,管流 150 mA,角度 $5^\circ \sim 90^\circ$,步宽 0.05° 。通过 Jade 软件对实验所得数据进行处理,经过平滑处理后得到 2D 谱图,进而对其峰值进行分析,得到碳纤维微晶的晶面间距 d_{002}

$$d_{002} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{002}} \quad (5)$$

式中, θ_{002} 为 (002) 峰散射角; λ 为 X 射线的波长。

2 结果与讨论

2.1 激光功率对碳纤维力学性能的影响

在氩气的保护环境,碳纤维于 0.196 N 牵伸力下以 0.4 mm/s 的速度通过石墨化装置。实验中用不同功率的激光器对碳纤维进行照射,当功率为 160 W 时温度在 1 500 ~ 1 700 $^\circ\text{C}$ 范围内波动,200 W 时的温度范围为 1 700 ~ 2 200 $^\circ\text{C}$,300 W 时温度范围在 2 500 ~ 3 000 $^\circ\text{C}$ 。当激光功率为 360 W 时,温度在 3 050 $^\circ\text{C}$ 左右波动,此为沥青基碳纤维所能承受的最大激光功率,超过此功率将会由于温度过高导致碳纤维被烧断,无法获得完整的纤维。

激光功率与所得石墨化碳纤维模量的关系如图 2 所示。显然,随着功率的升高,碳纤维的模量总体呈现上升的趋势,在激光功率低于 160 W 时,变化趋势不明显;激光功率大于 160 W 后,模量与功率几乎成线性增长的关系;360 W 激光照射时,模量最高可达 300 GPa。这是因为随着温度升高,微晶层间距变小,纤维结构更加致密,能够达到石墨化的效果。

激光功率与所得石墨化碳纤维强度的关系如图 3 所示。从图中可知,激光功率越大,激光照射给予的温度越高,石墨化沥青基碳纤维的拉伸强度越大。大于 160 W 后,纤维拉伸强度增长迅速,相较于未经激光处理的碳纤维性能有了非常大的提升,360 W 激光功率照射时,拉伸强度最高可达到 2.5 GPa。这说明经过激光超高温处理后的碳纤维石墨化程度高,具有更优异的力学性能。这一结果也说明了温度对碳纤维的石墨化程度有直接影响。

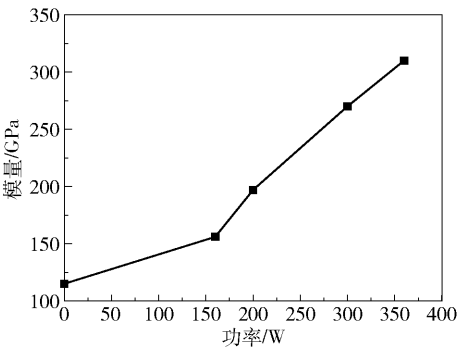


图 2 不同激光功率处理下的碳纤维模量
Fig. 2 Carbon fiber modulus when using different laser powers

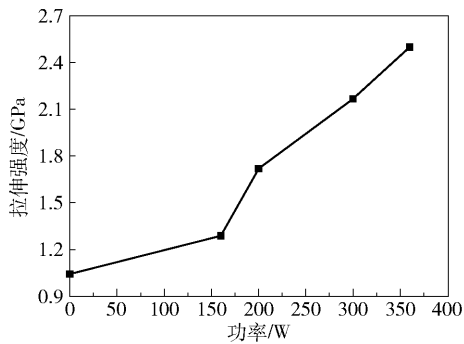


图 3 不同激光功率处理下的碳纤维拉伸强度
Fig. 3 Tensile strength of carbon fiber when using different laser powers

碳纤维属于脆性材料,其单丝拉伸强度具有较大的离散性,对选取的 25 根沥青基碳纤维有效试样的检测结果用 Matlab 软件进行拟合,不同激光功率照射下碳纤维单丝拉伸强度的 Weibull 分布参数见表 1。表 1 中的形状参数 m 反映了不同情况下碳纤维拉伸强度的离散程度,形状参数的数值越大,表明拉伸强度性能越稳定;尺寸参数 δ_0 反映拉伸强度的高低,尺寸参数越大,拉伸强度越高。可以看出,在表 1 的 4 种情况中,200 W 激光

功率照射时,碳纤维稳定性最优,出现纤维断裂、表面毛刺多等情况较少,拉伸强度的数值在一个区间稳定性最优;300 W 功率时的稳定性次之。累积概率分布拟合曲线如图 4 所示,从图中可以看出,200 W 激光照射时概率曲线最陡^[10],说明其强度分布较为集中,获得的石墨化纤维具有较好的均匀性,未处理的丝束和 300 W 激光照射的碳纤维均匀性次之。因此碳纤维在 200 W 的激光照射下性能最稳定。

表 1 不同激光功率下拉伸强度的 Weibull 分布参数
Table 1 Weibull distribution parameters of tensile strength for different laser powers

激光功率	形状参数 m	尺寸参数 δ_0/GPa	变异系数 C_v	标准偏移 S
未处理	7.97	1.05	0.38	0.38
160 W	4.33	1.33	0.24	0.49
200 W	9.98	1.58	0.33	0.50
300 W	6.63	1.66	0.39	0.61

图 5 分别是未经过激光照射的原样,160 W、200 W 和 300 W 激光处理下碳纤维的拉曼图谱。由图可以看出,随着激光功率的增加,D 峰和 G 峰的半高宽减小,两峰逐渐分离,表明纤维石墨的晶格缺陷、无序结构逐渐向 sp^2 杂化的石墨片层有序结构演变,边缘缺陷碳结构减少^[11],拉伸性能提高。激光功率 200 W 时 G 峰已开始高于 D 峰,300 W 时 G 峰明显升高,表明随着激光功率的增加,纤维逐渐向三维有序石墨结构转变,有利于纤维模量的增加,也进一步验证了图 2 的实验结果。

表面缺陷也是造成纤维拉伸强度偏低的重要原因之一。图 6 所示为不同激光功率下碳纤维的表面形貌,可以看出原丝的 SEM 图中表面杂质、缺陷较多;对纤维施加一定的激光功率可较好地去除纤维表面的杂质,且对纤维无破坏作用,高温条件下石墨微晶的重新排列使表面趋于光滑平整,因此纤维强度增大,这也与拉伸测试的结果吻合。

2.2 牵伸力对碳纤维力学性能的影响

表 2 为 9 ~ 16 μm 直径范围内的碳纤维在 200 W 激光功率下施加不同牵伸力作用进行石墨化处理获得的碳纤维力学性能。由表中数据可知,随着牵伸力的增加,断裂伸长率减小,表明纤维得到了有效的拉伸。200 W 功率下增加 0.196 N 牵伸力,

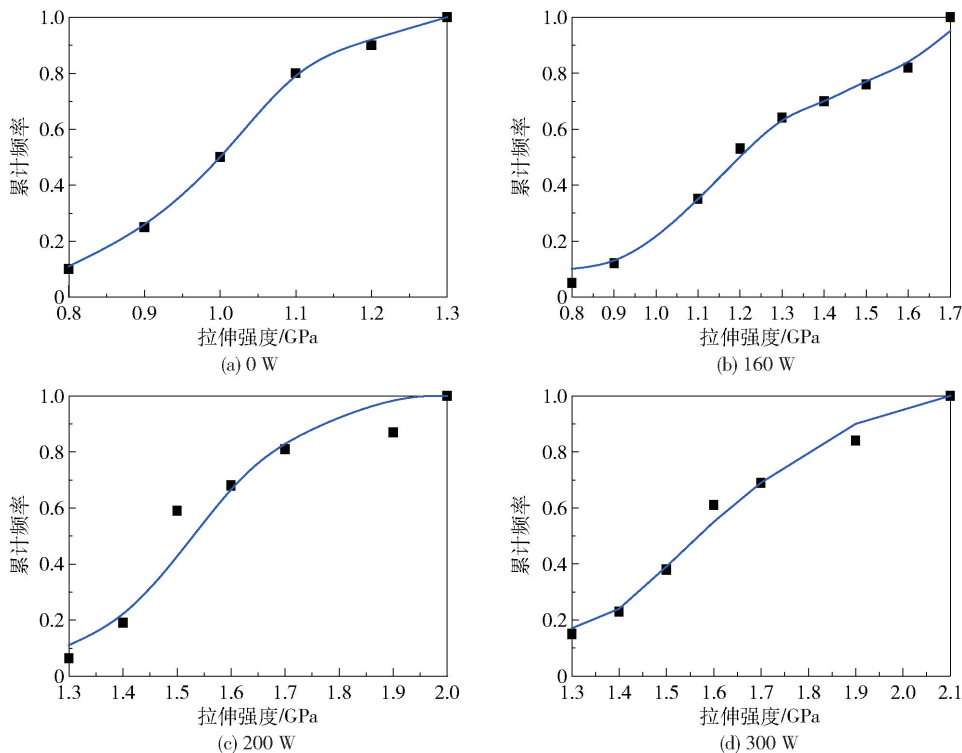


图4 不同激光功率下拉伸强度拟合曲线

Fig. 4 Tensile strength fitting curves when using different laser powers

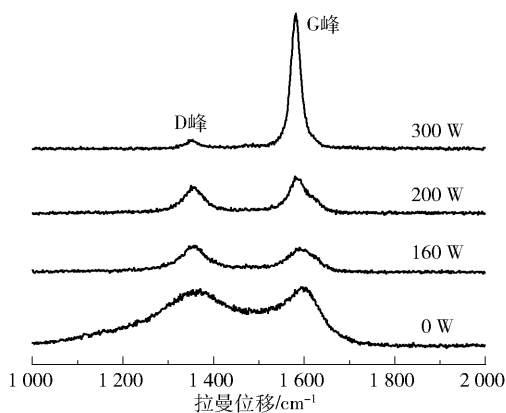


图5 0 W、160 W、200 W 及 300 W 激光照射下碳纤维的拉曼光谱图

Fig. 5 Raman spectra of materials obtained with 0 W, 160 W, 200 W and 300 W laser irradiations

拉伸强度提升了 12%, 拉伸模量提升 47%。若继续增加, 会导致纤维因无法承受较大的牵伸力而断裂。因而在一定的激光功率下, 适当增加牵伸力有助于提高纤维的拉伸强度。

图 7 是不同牵伸力下碳纤维的表面形貌。可以看出, 随着牵伸力增加, 碳纤维表面更加趋于平整; 施加 0.392 N 牵伸力时, 碳纤维表面几乎没有缺陷,

较为平整。牵伸力大于 0.392 N 时, 碳纤维极易断裂, 无法获得较完整的纤维。而在 200 W 功率下施加 0.196 N 牵伸力时的碳纤维具有一定的表面粗糙度, 表面结构存在一定的缺陷。文献表明, 表面缺陷是造成纤维拉伸强度低的重要原因之一^[12-13]。因此本文通过增加牵伸力, 抑制轴向收缩, 有效减少了表面缺陷, 增加了沥青基碳纤维的拉伸强度, 提高了其力学性能。

图 8 是不同牵伸力下碳纤维的 XRD 赤道扫描图。如图所示在 26° 和 53° 出现了衍射峰, 分别代表碳材料的 (002) 峰和 (004) 峰。(002) 峰的变窄说明石墨微晶尺寸增大, (004) 峰的锐化说明碳纤维的微晶结构沿着碳纤维的轴向生长^[14]。路忠跃等^[15]研究发现, 纤维结构的致密性会在内部产生缺陷, 影响其强度和模量, 优化纤维结构有助于纤维拉伸强度的提升。由图 8 可知, 随激光功率增大, 碳纤维 (002) 峰向更高的 2θ 方向移动, 表明纤维层间距减小^[16], 同时微晶尺寸增大, 纤维结构更加致密, 更不易于被拉断, 印证了 2.1 节中提高石墨化温度可以提高拉伸强度的实验结果。

图 8 中, 施加 0.392 N 牵伸力比施加 0.196 N 牵

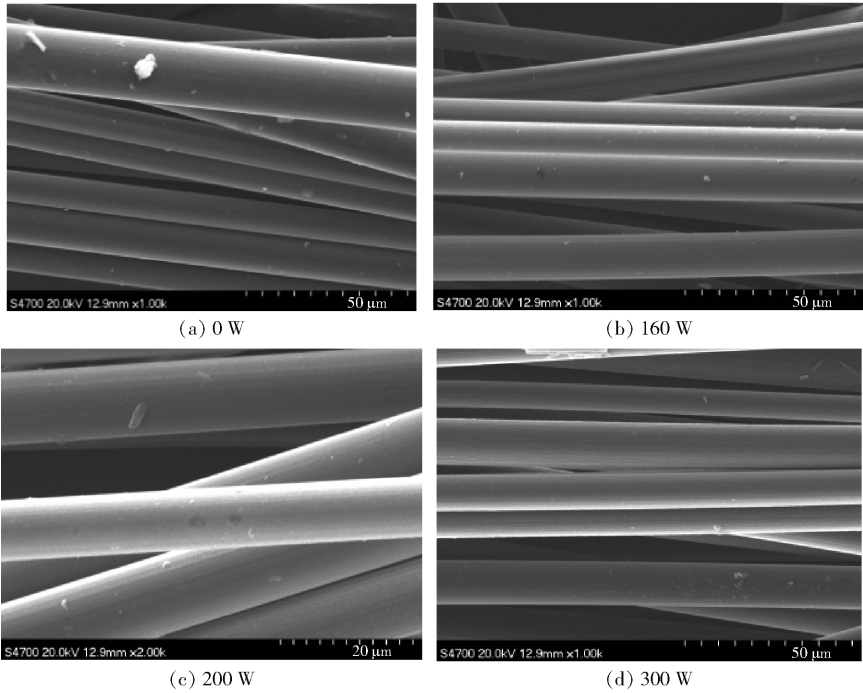


图 6 不同激光功率处理碳纤维的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of materials obtained when using different laser powers

表 2 不同牵伸力下碳纤维的力学性能

Table 2 Mechanical properties of carbon fibers under different drafting forces

牵伸力/N	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂伸长率/%
0. 196	1 719	197	1. 01
0. 392	1 940	291	0. 65

伸力时的(002) 峰更尖锐,说明增大牵伸力可提高微晶晶粒的尺寸。同时,随着激光功率的增大,石墨微晶层间距减小至 0. 340 nm,十分接近于理想石墨晶体的片层层间距(0. 335 nm),表明增大牵伸力,层间距减小,取向度增大,纤维结构更加致密,从而可提高碳纤维的力学性能。

2.3 直径对碳纤维力学性能的影响

在有效试样中分别选取直径小于 10 μm 、10 ~ 15 μm 、16 ~ 20 μm 和大于 20 μm 的 4 种规格的纤维进行力学性能测试,计算其单丝平均拉伸强度和拉伸模量,对比不同直径规格的计算结果。表 3 列出了各个激光功率下不同直径范围的碳纤维的平均拉伸强度和模量。由表中数据可知,对于未进行激光处理的碳纤维,较大的直径具有更大的拉伸强度和模量。经过激光处理后,随着激光功率的增加,碳纤维的强度和模量相比未处理都有不同程度的提高,

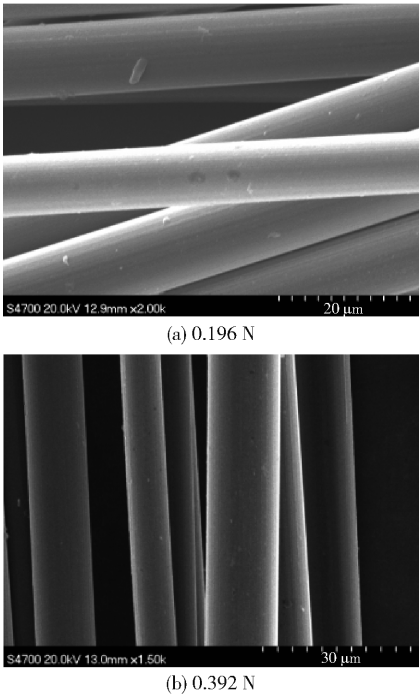


图 7 不同牵伸力下的 SEM 图

Fig. 7 SEM images under different drafting forces

但较小直径的纤维增加的程度更大,表现出更优异的性能,其平均拉伸强度和模量都高于较大直径的纤维。这是因为对于较小直径的沥青基碳纤维,随着石墨化温度的升高,在相同的反应时间里纤维

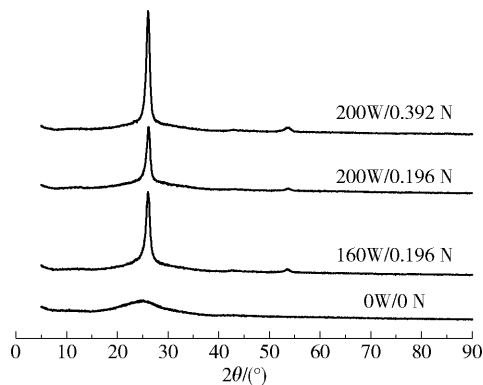


图 8 经不同处理的碳纤维的 XRD 赤道扫描图

Fig.8 XRD patterns of carbon fibers obtained with different processing parameters

微晶在生长过程中更容易提高其结构的有序度,片层结构各向异性扩展形成较强的内应力,减小了缺陷,形成三维有序石墨结构,从而更容易被石墨化,导致其强度和模量大幅提高。大直径碳纤维升温速率慢,较易形成皮芯结构,从而力学性能较低。所以,较小直径的碳纤维激光石墨化后具有更优异的力学性能。

3 结论

(1)对于激光石墨化沥青基碳纤维,随着温度的升高,碳纤维的强度和模量增加。碳纤维可承受的最高功率为 360 W,相应的温度约 3 050 ℃。在此

表 3 各激光功率下不同直径碳纤维的性能

Table 3 Performance of carbon fibers having different diameters under various laser powers

激光功率	拉伸强度/MPa				拉伸模量/GPa			
	< 10 μm	10 ~ 15 μm	16 ~ 20 μm	> 20 μm	< 10 μm	10 ~ 15 μm	16 ~ 20 μm	> 20 μm
未处理	90	1 021	1 062	1 071	82	96	98	103
160 W	1 530	1 471	1 432	1 195	150	142	114	114
200 W	1 813	1 722	1 601	1 582	278	164	154	150
300 W	1 900	1 860	1 611	1 620	290	276	260	193

条件下可获得拉伸强度 2.5 GPa、模量 300 GPa 的石墨化碳纤维。碳纤维在激光功率为 200 W 时性能最稳定。

(2)适当增加牵伸力能使碳纤维表面更加趋于平整,石墨微晶层间距减小,纤维结构更加致密,取向度增大,进而获得更高的力学性能。

(3)经过激光石墨化处理,直径较小的纤维的平均拉伸强度和模量都比大直径纤维提升得更多。

参考文献:

[1] 赵家森,曹秀格. 中间相沥青碳纤维制取、结构与性能[J]. 合成纤维工业,1993, 16(6): 40-45.

ZHAO J S, CAO X G. Manufactures, structures and properties of mesophase pitch-based carbon fibers[J]. Synthetic Fiber Industry, 1993, 16(6): 40-45. (in Chinese)

[2] 高爱君. PAN 基碳纤维成分、结构及性能的高温演变机理[D]. 北京:北京化工大学, 2012.

GAO A J. Study on the high temperature evolution and structure of PAN-based carbon fiber structural components [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)

[3] 刘强,郑莹娜,李定华. 激光加工技术的现在与未来[J]. 广东机械学院学报,1996, 14(1): 16-21.

LIU Q, ZHENG Y N, LI D H. Looking ahead to laser processing technology [J]. Journal of Guangdong Mechanical Institute, 1996, 14(1): 16-21. (in Chinese)

[4] 李小明,任耘,张建妮. 激光技术在材料科学领域的应用及展望[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 7-9.

LI X M, REN Y, ZHANG J N. Application and prospects of laser in material science[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, 21(1): 7-9. (in Chinese)

[5] 邱星武. 激光技术在材料加工领域的发展及应用[J]. 稀有金属与硬质合金, 2010, 38(1): 60-63.

QIU X W. Development and application of laser technology in the field of material processing[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2010, 38(1): 60-63. (in Chinese)

[6] TIMAKOVA K, TARASOV A, FEDOTOV Y A, et al. Modification of polymer films, coatings, and membranes [J]. Petroleum Chemistry, 2012, 52(7): 505-513.

[7] 谭晶,沙扬,黎三洋,等. 激光隧道炉碳纤维超高温石墨化处理方法[J]. 炭素技术, 2016, 35(6): 47-50.

TAN J, SHA Y, LI S Y, et al. A method of ultra-high temperature graphitization for carbon fibers via laser tunnel furnace [J]. Carbon Techniques, 2016, 35(6): 47-

50. (in Chinese)
- [8] 姚良博,谭晶,杨卫民,等. 激光与碳纤维相互作用的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报,2017,31:392-397, 402.
- YAO L B, TAN J, YANG W M, et al. Research status and development trend of interaction between laser and carbon fiber[J]. Materials Reports, 2017, 31: 392-397, 402. (in Chinese)
- [9] KOYANAGI J, HATTA H, KOTANI M, et al. A comprehensive model for determining tensile strengths of various unidirectional composites[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(18): 1901-1914.
- [10] 王自柯,咸贵军,李惠. 国产碳纤维拉伸性能研究[J]. 工业建筑,2013,43(6): 1-4.
- WANG Z K, XIAN G J, LI H. Study of the tensile properties of domestic carbon fibers[J]. Industrial Construction, 2013, 43(6): 1-4. (in Chinese)
- [11] WANG Y, ALSMEYER D C, MCCREERY R L. Raman spectroscopy of carbon materials: structural basis of observed spectra[J]. Chemistry of Materials, 1990, 2(5): 557-563.
- [12] 侯锋辉,邓红兵,李崇俊,等. 碳纤维结构的常用表征技术[J]. 纤维复合材料,2008,25(3):18-20,31.
- HOU F H, DENG H B, LI C J, et al. Common characterization methods of carbon-fiber structures[J]. Fiber Composites, 2008, 25(3): 18-20,31. (in Chinese)
- [13] JOHNSON J W, THORNE D J. Effect of internal polymer flaws on strength of carbon fibers prepared from an acrylic precursor[J]. Carbon, 1969, 7(6): 659-661.
- [14] DOBIÁŠOVÁ L, STARÝ V, GLOGAR P, et al. Analysis of carbon fibers and carbon composites by asymmetric X-ray diffraction technique[J]. Carbon, 1999, 37(3): 421-425.
- [15] 路忠跃,迟伟东,沈曾民,等. 炭化温度对中间相沥青基碳纤维性能的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2008,35(1):50-53.
- LU Z Y, CHI W D, SHEN Z M, et al. The influence of carbonization temperatures on mesophase pitch-based carbon fibers [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2008, 35(1): 50-53. (in Chinese)
- [16] 黎三洋,张有忱,沙扬,等. 激光石墨化过程中激光功率和牵伸力对聚丙烯腈基碳纤维化学结构和微观结构的影响[J]. 化工进展,2018,37(2):658-663.
- LI S Y, ZHANG Y C, SHA Y, et al. Effect of laser power and stretching force on chemical structure and microstructure of PAN-based carbon fibers during laser graphitization [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(2): 658-663. (in Chinese)

Mechanical properties of laser graphitized pitch-based carbon fiber

YU YaoYao¹ TAN Jing¹ KAI WuZhen^{2*} YANG WeiMin¹ CHENG LiSheng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Textile Industry Science and Technology Development Center, Beijing 100027, China)

Abstract: In an attempt to improve the mechanical properties of pitch-based carbon fibers, graphitization of mesophase pitch-based carbon fibers using a custom-built ultra-high temperature laser graphitization device has been investigated. Multiple sets of samples were prepared by changing the laser power, drafting force and carbon fiber diameter during the experiment. The variation in tensile strength of pitch-based carbon fibers as a function of temperature was studied, and the influence of the drawing force and carbon fiber diameter on mechanical properties during graphitization was analyzed. The results show that pitch-based carbon fibers can withstand a maximum laser power of 360 W during graphitization, under which conditions the tensile strength of the resulting material can be increased from 1.0 GPa to 2.5 GPa. In the carbon fiber tolerance range, the mechanical properties of the materials increase with increasing temperature and drafting force. In particular, the mechanical properties of carbon fibers with smaller diameter increase most significantly.

Key words: mesophase pitch based carbon fiber; mechanical property; laser; modulus; graphitization

(责任编辑:吴万玲)