

高导热碳/碳复合材料微观结构及导热性能

Microstructure and thermal conductivity
of high thermal conductivity carbon/
carbon composites

姚彧敏,李 红,刘正启,杨 敏,任慕苏,孙晋良
(上海大学 材料科学与工程学院 复合材料研究中心,上海 200072)

YAO Yu-min,LI Hong,LIU Zheng-qi,YANG Min,

REN Mu-su,SUN Jin-liang

(Research Center of Composite Materials,School of Materials Science
and Engineering,Shanghai University,Shanghai 200072,China)

摘要:采用国产沥青基碳纤维与中间相沥青制备多孔碳/碳(C/C)复合材料,通过化学气相渗透法(CVI)与前驱体浸渍裂解法(PIP)复合工艺增密,经不同温度高温热处理(HTT)后制备单向 C/C 复合材料和两向正交 C/C 复合材料。利用 SEM,XRD 对不同温度热处理的材料进行微观结构分析,并结合导热机理,分析材料导热性能。结果表明:2300 ℃热处理后,高导热 C/C 复合材料结构致密,单向 C/C 复合材料 X 向(平行于碳纤维轴向)、两向正交 C/C 复合材料 X 向、Y 向表现出优异的导热性能;3000 ℃热处理后,C/C 复合材料石墨片层结构明显,石墨化度提高了 18.84%,微晶尺寸增大,导热性能进一步提高。两向正交 C/C 复合材料 X 向、Y 向导热系数可由单向 C/C 复合材料 X 向、Z 向导热系数计算推导。
关键词:碳/碳复合材料;微观结构;石墨化度;导热性能;复合材料设计

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000250

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)11-0155-07

Abstract: Porous carbon/carbon (C/C) composites prepared by pitch-based carbon fiber and mesophase pitch were densified by chemical vapor infiltration (CVI) and precursor impregnation process (PIP). After different heat temperature treatment (HTT), the unidirectional C/C composites and bidirectional C/C composites were obtained. The microstructure of C/C composites was investigated by SEM, XRD, and the thermal conductivity was analyzed based on the thermal conductivity mechanism. The results show that unidirectional C/C composites and bidirectional C/C composites have dense structures and excellent thermal conductivity along the fiber axis. After 3000 ℃ treatment, the structure of graphite flat layers become more distinct and the graphitization degree is increased by 18.84%, leading to higher thermal conductivity. Furthermore, the thermal conductivity in X direction and Y direction of the bidirectional C/C composites can be calculated from that of unidirectional C/C composites in X direction and Z direction.

Key words: carbon/carbon composites; microstructure; degree of graphitization; thermal conductivity; composites design

随着空间技术的迅速发展,飞行器制造正面临严峻挑战:高速运转的飞行器在长时间服役中易产生大量热量,对引擎等部件造成过量热载荷从而影响其正常工作;飞行器内部高度集成的复杂电子器件亦需及时散热;一些敏感部件对工作温度有严格要求^[1-3]。传统热疏导材料已无法满足飞行器制造的特殊要求。高导热 C/C 复合材料作为一种由碳纤维和基体碳构成

的先进复合材料,具备优异的导热性能、力学性能和良好的结构设计性,可广泛应用于超音速飞行器的热再分配热防护系统、卫星、航空电子装置的热疏导系统等电子、航空航天领域^[4-10]。

目前,研究者们对高导热 C/C 复合材料的制备与导热性能进行了大量研究。Manocha 等^[11]将不同种类碳纤维浸渍沥青后堆叠,再次高压浸渍沥青制得 C/

C 复合材料,结果表明:中间相沥青基碳纤维增强的 C/C 复合材料沿纤维轴向的导热性能最佳。Zhang 等^[12]分别采用树脂浸渍法和 CVI 法对中间相沥青基碳纤维束增密,制备两种 C/C 复合材料,结果表明:与树脂碳相比,热解碳的导热性能更好。日前,高导热 C/C 复合材料多采用进口沥青基碳纤维作为增强体,相关文献中对材料预制体结构与导热性能间关系分析较少^[13-14],因而本工作采用国产中间相沥青基碳纤维与中间相沥青粉末低温热模压、炭化后,通过 CVI 法和 PIP 法补充增密制备高导热 C/C 复合材料,探究不同热处理温度对材料微观结构的影响,并结合导热系数的测试结果及导热机理对 C/C 复合材料的导热性能进行分析,为高导热 C/C 复合材料导热性能的研究提供结构与性能间的关系分析。

1 实验

1.1 C/C 复合材料的制备

将国产沥青基碳纤维(TC-HM-20)与中间相沥青

粉末交替层铺,采用低温热模压法制备单向(1[#])和两向正交(2[#])复合材料坯体,其中,两向正交复合材料坯体中 X 向、Y 向纤维体积比为 1 : 1。模压成型的坯体炭化、石墨化后制得 1.50 g/cm³ 的多孔 C/C 复合材料。以丙烯为碳源,通过 CVI 法沉积热解炭,当材料密度达到 1.72 g/cm³ 左右,采用糠酮树脂通过 PIP 法对材料进一步增密处理,最后,经 2300 ℃和 3000 ℃高温热处理,制备高导热 C/C 复合材料。此外,本工作还选用国产沥青基碳纤维(TC-HM-70)采用上述工艺方法制备单向 C/C 复合材料(3[#])和两向正交 C/C 复合材料(4[#]),其中两向正交 C/C 复合材料 X 向、Y 向碳纤维体积比为 2 : 1,3[#],4[#] 两试样高温热处理温度为 2300 ℃。

1.2 性能测试

采用阿基米德排水法测量试样的密度及开孔率,经不同温度热处理后,C/C 复合材料的密度均无明显变化,C/C 复合材料的基本参数如表 1 所示。采用 Phenom Prox-SE 台式扫描电子显微镜(SEM)观察试样微观结构。

表 1 C/C 复合材料基本参数
Table 1 Basic parameters of C/C composites

Sample	Structure	Volume fraction of C _f /%	Direction of C _f axial and ratio of C _f (X : Y)	Density/(g · cm ⁻³)	Open porosity/%
1 [#]	Unidirection	60	X direction	1.90	4.79
2 [#]	Bidirection	60	X,Y directions (1 : 1)	1.92	4.72
3 [#]	Unidirection	60	X direction	1.94	5.82
4 [#]	Bidirection	60	X,Y directions (2 : 1)	1.93	6.02

石墨化度 g 是在 Franklin 模型的基础上,通过 Mering 和 Maire 公式计算所得,简化形式^[15]为:

$$g = \frac{d_{002} - 0.3440}{0.3354 - 0.3440} \tag{1}$$

式中: g 为石墨化度,%;0.3340 nm 为完全未石墨化碳的层间距;0.3354 nm 为理想晶体的层间距; d_{002} 为(002)面的层间距,nm。计算平均微晶尺寸 $L_{c(002)}$ 的 Scherrer 公式^[16]为:

$$L_{c(002)} = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta_{002}} \tag{2}$$

式中: λ 为入射 X 射线波长,nm; β 为半峰宽; θ_{002} 为(002)峰的衍射角。采用型号为 D/MAX2500V+/PC 的 X 射线衍射光谱仪测定 θ 角,选用粉末试样,管电压为 40 kV,管电流为 250 mA,扫描范围 10°~80°,步进宽度和速率分别为 0.02°和 2 (°)/min 的连续扫描。

热扩散系数采用 Netzsh 闪射法热导仪 LFA467 测定,试样尺寸为 10 mm×10 mm×4 mm,测试方向分别为平行于纤维轴向和垂直于纤维轴向,图 1 为测

试示意图及试样测试方向示意图,测试温度分别为 25,100,200,300,400 ℃,每个温度点的热扩散系数测试 3 次取平均值。试样导热系数 λ 的计算公式为:

$$\lambda = \alpha \rho C_p \tag{3}$$

式中: α 为试样的热扩散系数,cm²/s; ρ 为试样密度,g/cm³; C_p 为试样的比热容,J/(g · K),本实验中比热容采用石墨比热容。

2 结果与讨论

2.1 热处理温度对 C/C 复合材料微观结构的影响

图 2 为 2300,3000 ℃高温热处理后单向 C/C 复合材料(1[#])及两向正交 C/C 复合材料(2[#])SEM 图像。从图 2(a-1),(a-2)可看出,单向 C/C 复合材料中,中间相沥青基碳纤维呈明显的内辐射外洋葱的混合型结构,热解炭层(pyrolytic carbon,PyC)均匀沉积于多孔 C/C 复合材料的较小孔隙内,纤维与基体结合

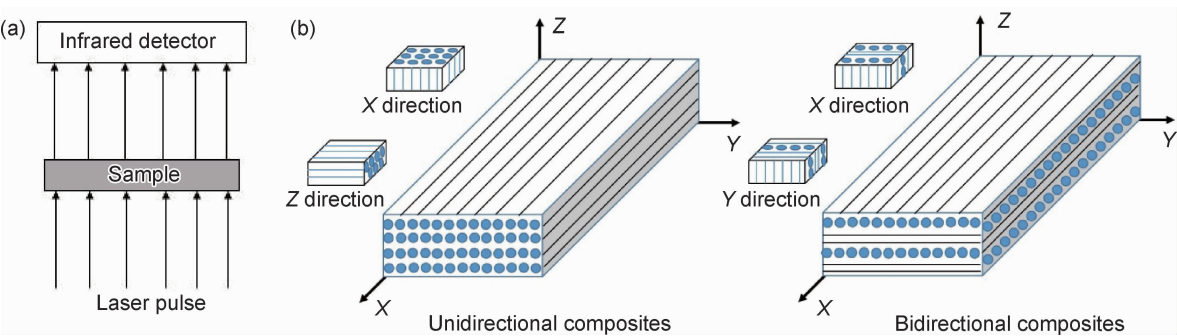


图 1 热扩散系数测试示意图(a)和试样测试方向示意图(b)
Fig. 1 Schematic diagrams of thermal diffusion coefficient test (a) and test directions (b)

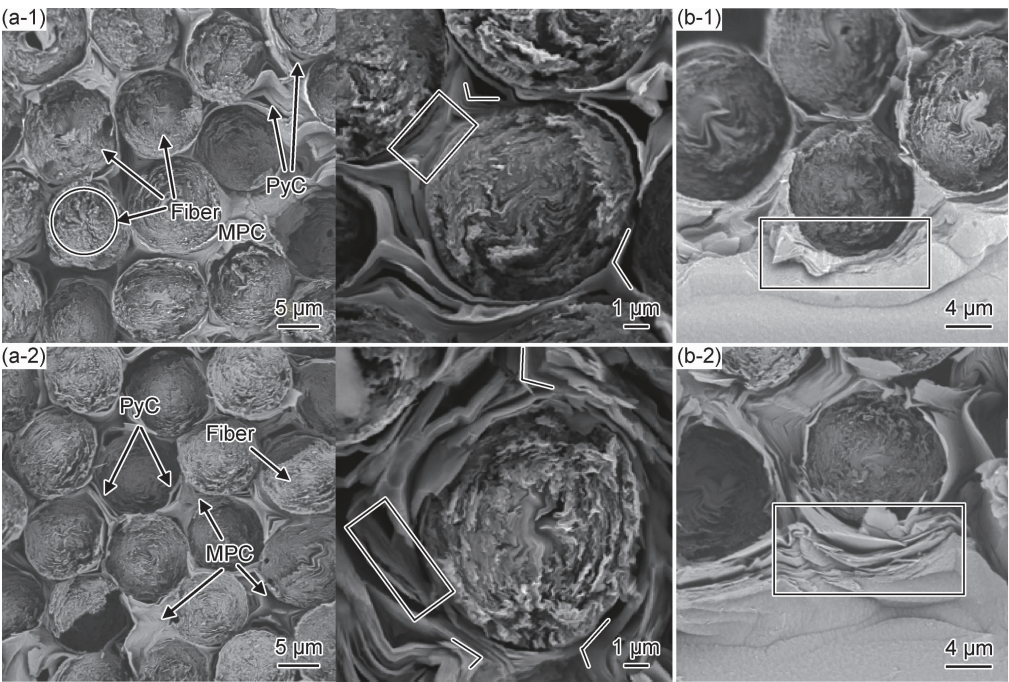


图 2 2300 °C (1), 3000 °C (2) 高温热处理后单向 C/C 复合材料(a)和两向正交 C/C 复合材料(b) SEM 照片
Fig. 2 SEM images of unidirectional C/C composites (a) and bidirectional C/C composites (b) after heat treatment at 2300 °C (1), 3000 °C (2)

良好,基体间存在的微量孔隙均小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,材料致密度高,有利于提高其导热性能;3000 °C 高温热处理后,试样单位面积内中间相沥青炭(mosephase pitch carbon, MPC)基体片层结构含量明显提高。观察 2300, 3000 °C 高温热处理后单向 C/C 复合材料局部放大图,可知:3000 °C 高温热处理后,碳纤维内部片层结构更加致密、清晰,表明碳纤维内石墨微晶生长良好,数量增多,碳网面堆积更加紧密,碳纤维轴向取向度提高。基体沥青炭片层结构更加清晰明显,片层结构围绕碳纤维向外交错扭折,片层方向平行于纤维轴向,形成包鞘结构(parallely oriented graphite, POG),该结构为长程有序的晶体结构,表明 3000 °C 高温热处理后,高导热 C/C 复合材料发生了明显的晶

型转变。从图 2(b-1), (b-2) 可看出,随热处理温度提高,两向正交 C/C 复合材料中同向碳纤维和基体炭微观结构与单向 C/C 复合材料微观结构变化一致, X 向、Y 向碳纤维交界处的沥青炭片层结构转变尤为明显。

图 3 为 2300, 3000 °C 高温热处理后 C/C 复合材料 XRD 图谱。3000 °C 高温热处理后, C/C 复合材料 (002) 峰强度明显增大, 特征峰向右移动, 峰宽变窄, 表明 3000 °C 高温热处理后, 有序排列的晶体含量提高, C/C 复合材料结晶度提高。结合表 2 C/C 复合材料晶格参数可知, 3000 °C 热处理后, 材料石墨层间距 d_{002} 减小, 接近理想石墨晶体层间距, 平均微晶尺寸 L_c 增大, 晶格尺寸增大, 石墨化度提高了 18.84%, 表明随热处理温度提高, 碳原子组成的六角网平面由

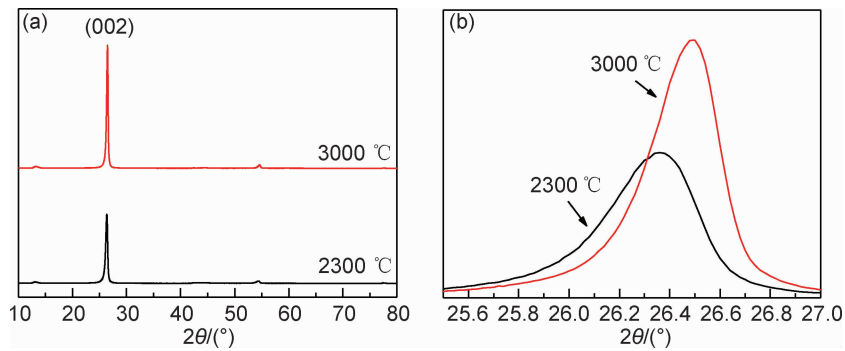


图 3 C/C 复合材料 XRD 图谱 (a)10°~80°;(b)25.5°~27°
Fig. 3 XRD patterns of C/C composites (a)10°~80°;(b)25.5°~27°

ABCABC…平行堆积向 ABAB…规则堆积转变,即高导热 C/C 复合材料实现由乱层结构向石墨结构有序转化。

表 2 不同热处理温度后 C/C 复合材料微观结构参数

Table 2 Microstructure parameters of C/C composites after different heat treatment temperatures

HTT/℃	2θ/(°)	<i>d</i> ₀₀₂ /nm	<i>L</i> _c /nm	<i>g</i> /%
2300	26.360	0.33782	35.16	71.86
3000	26.489	0.33620	46.96	90.70

2.2 C/C 复合材料导热性能分析

现代热传导理论指出^[17-20]:在任意状态下,不同物质的热传导都是由其微观粒子相互碰撞、传递所致,对于大多数无机非金属材料,热传导主要依靠晶格原子的热振动实现,量子理论认为,晶格振动的能量是被量子化的,晶格振动的“量子”即为“声子”。高导热 C/C 复合材料增强体与基体的基本结构均为石墨结构,石墨片层是由碳原子以 *sp*² 杂化轨道组成的六边形晶格,热能在石墨片层中以非谐性的弹性波在六边形晶格内单向传导,在此过程中,声子与声子间的碰撞以及声子与晶界、缺陷等的作用引起能量散射,从而降低导热系数。

图 4 为 2300,3000 °C 高温热处理后单向 C/C 复合材料(1[#])及两向正交 C/C 复合材料(2[#])X 向导热系数曲线。相同测试温度下,3000 °C 高温热处理的 C/C 复合材料导热系数明显提高,这是由于 C/C 复合材料经 3000 °C 热处理后,材料晶格尺寸增大(见表 2),声子间距离增大,热振动时,声子间碰撞减少,从而减少了热能在声子间传导时的散射;同时,材料石墨化度提高,C/C 复合材料内部石墨晶体结构增多,材料结构有序性增强,可供热能单向传导的连续石墨片层含量提高,减少了热传导在晶界和缺陷处的能量散射。此外,从图 4 中不难看出,对于同一 C/C 复合材料,当

测试温度升高时,热振动过程中,声子振动幅度增大,声子间及声子与晶界、缺陷等的碰撞增多而引起能量散射加剧,热传导过程中热能损失严重,导致高导热 C/C 复合材料 X 向导热系数随测试温度升高不断减小。相同温度热处理的单向 C/C 复合材料和两向正交 C/C 复合材料 X 向导热系数下降趋势一致,由此推断不同预制体结构的 C/C 复合材料 X 向导热系数存在一定关系。

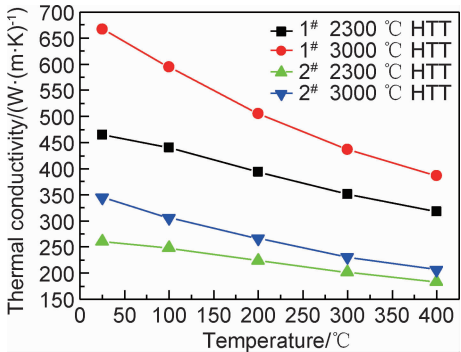


图 4 C/C 复合材料 X 向导热系数
Fig. 4 Thermal conductivity of C/C composites in X direction

根据高导热 C/C 复合材料各方向的导热系数(见表 3),经计算发现,两向正交 C/C 复合材料(2[#])X 向导热系数(λ_{BC})与单向 C/C 复合材料(1[#])X 向、Z 向导热系数(λ_X, λ_Z)满足如下关系式:

$$\lambda_{BC} = \frac{1}{2}\lambda_X + \frac{1}{2}\lambda_Z \tag{4}$$

表 4 为两向正交 C/C 复合材料(2[#])X 向导热系数计算值。随测试温度变化,计算值相对误差波动小;3000 °C 热处理后,C/C 复合材料导热系数计算值的相对误差明显减小。结合单向 C/C 复合材料及两向正交 C/C 复合材料微观形貌(图 2),可将单向 C/C 复合材料 X 向结构等价于两向正交 C/C 复合材料中 X 向结构,单向 C/C 复合材料 Z 向结构等价于两向正交 C/C 复合材料中 Y 向结构,因此,两向正交 C/C 复合

表 3 C/C 复合材料(1[#],2[#])导热系数(W·(m·K)⁻¹)

Table 3 Thermal conductivity of C/C composites (1[#],2[#])(W·(m·K)⁻¹)

Sample	HTT/℃	Thermal conductivity/(W·(m·K) ⁻¹)				
		25 ℃	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃
1 [#] (X direction)	2300	465.03	440.28	393.79	351.21	318.16
	3000	667.27	594.09	505.43	437.07	386.90
1 [#] (Z direction)	2300	16.15	15.84	15.26	14.27	13.20
	3000	25.34	23.26	20.62	18.19	16.43
2 [#] (X direction)	2300	259.64	248.50	223.97	201.61	182.80
	3000	344.63	305.01	265.98	231.36	205.97

表 4 两向正交 C/C 复合材料(2[#])X 向导热系数的计算值(W·(m·K)⁻¹)

Table 4 Calculated value of bidirectional C/C composites (2[#]) in X direction (W·(m·K)⁻¹)

Test temperature/℃	HTT 2300 ℃			HTT 3000 ℃		
	Measured	Calculated	Relative deviation/%	Measured	Calculated	Relative deviation/%
25	259.64	240.590	7.34	344.63	346.305	0.49
100	248.50	228.060	8.23	305.01	308.675	1.20
200	223.97	204.525	8.68	265.98	263.025	1.11
300	201.61	182.740	9.36	231.36	227.630	1.61
400	182.80	165.680	9.37	205.97	201.665	2.09

材料即为单向 C/C 复合材料 X 向、Z 向结构“并联”构成,如图 5 所示,图中碳纤维及基体炭均为规则片层结构,基体片层方向平行于碳纤维轴向,为 POG 结构,热处理温度越高,该结构越完整。根据图 5,由于两向正交 C/C 复合材料中 X 向、Y 向碳纤维体积比为 1∶1,不难看出式(4)中系数 1/2 即为两向正交 C/C 复合

材料中 X、Y 两向碳纤维占整体纤维体积的比值。3000 ℃热处理后,两向正交 C/C 复合材料 X 向导热系数的计算相对误差减小是因为随热处理温度提高,两向正交 C/C 复合材料中碳纤维、基体炭取向度均提高,微观结构趋近于理想石墨结构,POG 结构趋于完整。由归纳推理可知,两向正交 C/C 复合材料中 X

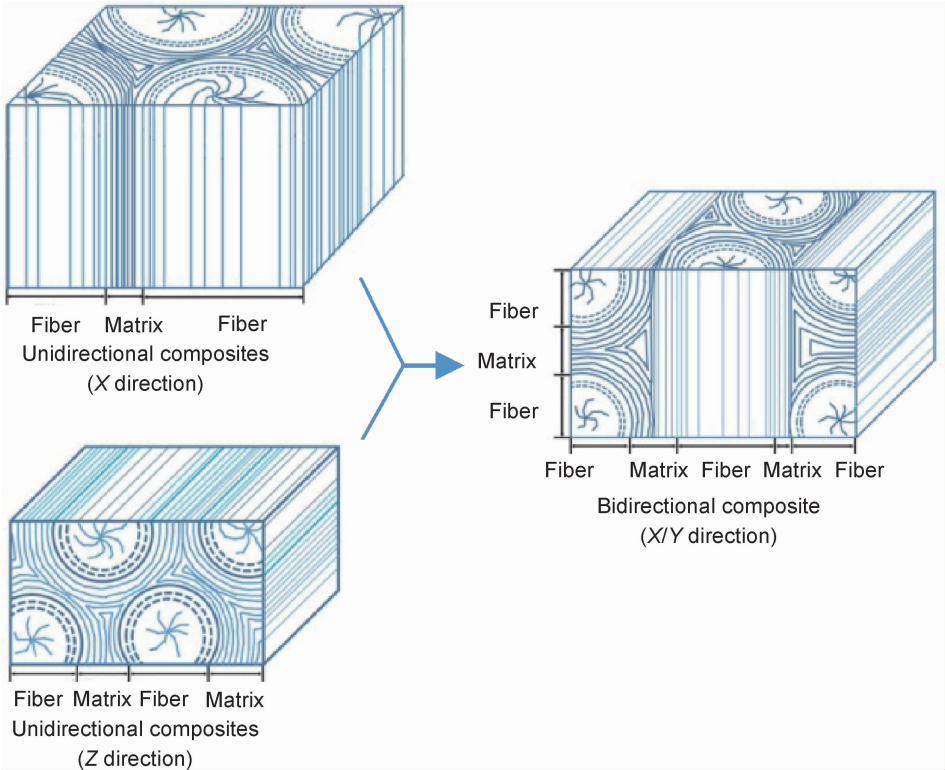


图 5 C/C 复合材料微观结构简化图

Fig. 5 Simplified diagram of C/C composites microstructure

向、Y 向导热系数的一般式如下：

$$\lambda_{BC} = k_x \lambda_X + k_y \lambda_Z \tag{5}$$

式中： k_x, k_y 为 X 向、Y 向碳纤维分数占纤维总体积含量的比值； λ_X, λ_Z 为单向 C/C 复合材料 X 向、Z 向导热系数。

为验证式(5)的正确性，测试 3[#]、4[#] 试样的导热系数，随机选取热扩散系数测试温度：25、300 ℃，测试结果如表 5 所示。表 6 为两向正交 C/C 复合材料(4[#])X 向、Y 向导热系数计算值，其 X 向与 Y 向碳纤维体积比为 2：1。与测试值比较，计算值相对误差均低于 2.02%，表明即便选用不同碳纤维增强的 C/C 复合材料仍能通过式(5)由单向 C/C 复合材料 X 向、Z 向导热系数计算出同种碳纤维增强的两向正交 C/C 复合材料 X 向、Y 向导热系数。

表 5 C/C 复合材料(3[#]、4[#])导热系数(W·(m·K)⁻¹)

Table 5 Thermal conductivity of C/C composites (3[#], 4[#])(W·(m·K)⁻¹)

Sample	Thermal conductivity/(W·(m·K) ⁻¹)	
	25 ℃	300 ℃
3 [#] (X direction)	508.64	369.96
3 [#] (Z direction)	31.68	24.41
4 [#] (X direction)	343.71	253.54
4 [#] (Y direction)	193.19	142.47

表 6 两向正交 C/C 复合材料(4[#])导热系数的计算值(W·(m·K)⁻¹)

Table 6 Calculated value of bidirectional C/C composite (4[#])(W·(m·K)⁻¹)

Test direction	Test temperature/℃	Measured	Calculated	Relative deviation/%
X direction	25	343.71	349.325	1.63
	300	253.54	254.772	0.49
Y direction	25	193.19	190.500	1.39
	300	142.47	139.588	2.02

3 结论

(1)与 2300 ℃热处理后的高导热 C/C 复合材料相比，3000 ℃热处理后碳纤维微晶结构趋于完整，基体碳片层结构更明显，含量增多，形成典型的 POG 结构，C/C 复合材料石墨化度提高了 18.84%。

(2)国产沥青基碳纤维增强的高导热 C/C 复合材料导热系数较高。经 3000 ℃热处理后，单向 C/C 复合材料和两向正交 C/C 复合材料的导热系数均明显提高。

(3)结合单向 C/C 复合材料与两向正交 C/C 复合材料的结构特征，根据单向 C/C 复合材料 X 向、Z 向导热系数可推算出两向正交 C/C 复合材料 X 向、Y 向

导热系数，应用于 C/C 复合材料结构设计。

参考文献

[1] YUAN G, LI X, DONG Z, et al. Pitch-based ribbon-shaped carbon-fiber-reinforced one-dimensional carbon/carbon composites with ultrahigh thermal conductivity[J]. Carbon, 2014, 68: 413-425.

[2] 樊桢,余立琼,李炜,等. 高导热碳/碳复合材料的设计与制备[J]. 中国材料进展, 2017, 36(5): 369-376.

FAN Z, YU L Q, LI W, et al. Design and preparation of carbon/carbon composites with high thermal conductivity[J]. Materials China, 2017, 36(5): 369-376.

[3] 陈洁,熊翔,肖鹏. 高导热 C/C 复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(11): 431-435.

CHEN J, XIONG X, XIAO P. Research and development of high thermal conductivity carbon/carbon composites[J]. Materials Review, 2006, 20(11): 431-435.

[4] SUK S K, BHOWMIK S R, WINDHORST T, et al. Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications[J]. Materials & Design, 1997, 18(18): 11-15.

[5] 刘皓,李克智,李贺军,等. 微观结构对中间相沥青基碳/碳复合材料力学性能的影响[J]. 无机材料学报, 2007, 22(5): 968-972.

LIU H, LI K Z, LI H J, et al. Effect of microstructure on mechanical properties of mesophase pitch-based C/C composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(5): 968-972.

[6] LIT Q, XU Z H, HU Z J, et al. Application of a high thermal conductivity C/C composite in a heat-redistribution thermal protection system[J]. Carbon, 2010, 48(3): 924-925.

[7] MANOCHA L M, WARRIER A, MANOCHA S, et al. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials—II bidirectional composites[J]. Carbon, 2006, 44(3): 488-495.

[8] ZHAO Y, LIU Z, WANG H, et al. Microstructure and thermal/mechanical properties of short carbon fiber-reinforced natural graphite flake composites with mesophase pitch as the binder[J]. Carbon, 2013, 53(3): 313-320.

[9] FENG W, QIN M, FENG Y. Toward highly thermally conductive all-carbon composites: structure control[J]. Carbon, 2016, 109: 575-597.

[10] 王荣国,武卫莉,谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004.

WANG R G, WU W L, GU W L. Introduction to composite materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.

[11] MANOCHA L M, WARRIER A, MANOCHA S, et al. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials—I unidirectional composites[J]. Carbon, 2006, 44(3): 480-487.

[12] ZHANG X, LI X, YUAN G, et al. Large diameter pitch-based graphite fiber reinforced unidirectional carbon/carbon composites with high thermal conductivity densified by chemical vapor infiltration[J]. Carbon, 2017, 114: 59-69.

[13] FENG Z H, FAN Z, KONG Q, et al. Effect of high temperature treatment on the structure and thermal conductivity of 2D

- carbon/carbon composites with a high thermal conductivity[J]. *New Carbon Materials*, 2014, 29(5):357-362.
- [14] GALLEGO N C, EDIE D D. Structure-property relationships for high thermal conductivity carbon fibers[J]. *Composites; Part A*, 2001, 32(8):1031-1038.
- [15] 黄启忠. 高性能炭/炭复合材料的制备、结构与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- HUANG Q Z. Fabrication, structure and application of high-performance carbon/carbon composites[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [16] 宁淑丽. 石墨烯/中间相沥青基复合碳纤维的制备及其结构性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- NING S L. Preparation and structure properties of graphene/mesophase pitch-based composite carbon fiber[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [17] BURGER N, LAACHACHI A, FERRIOL M, et al. Review of thermal conductivity in composites: mechanisms, parameters and theory[J]. *Progress in Polymer Science*, 2016, 61:1-28.
- [18] 赵建国, 李克智, 李贺军, 等. 碳/碳复合材料导热性能的研究[J]. *航空学报*, 2005, 26(4):501-504.
- ZHAO J G, LI K Z, LI H J, et al. Research on the thermal conductivity of C/C composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(4):501-504.
- [19] CARSON J K, LOVATT S J, TANNER D J, et al. Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(11):2150-2158.
- [20] 奚同庚. 无机材料热物性学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1981.
- XI T G. Thermophysical properties of inorganic material[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1981.
-
- 基金项目:**上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”(18SG34); 军委科技委基础加强计划重点基础研究项目(2017-JCJQ-ZD-035)
- 收稿日期:**2019-03-19; **修订日期:**2019-11-15
- 通讯作者:**李红(1979—), 女, 研究员, 博士, 现主要从事碳基及陶瓷基复合材料研究, 联系地址: 上海市宝山区上大路 99 号上海大学复合材料研究中心(200444), E-mail: lihong2007@shu.edu.cn
- (本文责编: 杨 雪)