

三维编织复合材料热物理性能实验

姜黎黎*, 徐美玲, 李振国, 周新伟, 卢成江, 曾涛

(哈尔滨理工大学 工程力学系, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对不同编织工艺参数的三维四向编织复合材料, 进行了热环境下的热物理性能实验研究, 获得了热环境下三维四向编织复合材料的热物理性能变化规律及其分布特征, 分析了环境温度和编织角对材料的热膨胀系数(CTE)、热传导系数(CTC)、比热(SH)以及热扩散率(TD)的影响, 得到了一些重要结论。这些结果为三维编织复合材料的热物理性能数值分析以及进一步研究材料的热力耦合行为奠定了实验基础。

关键词: 三维编织复合材料; 热膨胀系数; 热传导系数; 比热; 热扩散率

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)12-2734-07

Experimental investigation on thermo-physical properties of 3D braided composites

JIANG Lili*, XU Meiling, LI Zhenguo, ZHOU Xinwei, LU Chengjiang, ZENG Tao

(Department of Engineering Mechanics, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The thermo-physical property experiments had been done for the 3D 4-directional braided composites with different braiding parameters in thermal environment. The changing rule and distribution characteristics of the thermo-physical properties for the 3D 4-directional braided composites were obtained. The effects of temperature and braiding angle on the coefficients of thermal expansion (CTE), the coefficients of thermal conduction (CTC), the specific heat(SH) and the thermal diffusivities (TD) were investigated at the same time, by which some important conclusions were drawn. These results can provide an experimental basis for the numerical analysis on the thermo-physical properties and the further studies on the thermo-mechanical coupling behaviors of 3D braided composites.

Keywords: 3D braided composites; coefficients of thermal expansion; coefficients of thermal conduction; specific heat; thermal diffusivities

三维编织复合材料由于其增强体为三维整体结构, 突破了传统复合材料层合板结构的概念, 在提高构件层间及层内强度、抗冲击、断裂韧性和损伤容限的方面具有巨大的优势和潜力, 广泛用于航空、航天等高科技领域。三维编织复合材料在实际的工程应用中, 一些构件常处于恶劣的热环境, 并伴随着热传导现象, 这将引起结构件的应力和应变变化产生热应力, 从而影响结构构件的正常工作和材料的力学性能, 因此要求编织复合材料具有高度的环境适应性, 能在剧烈环境变化中保持结构的高度稳定性。作为结构材料使用的三维编织复合材

料能否适应其工作环境的温度变化, 与其热物理性能密切相关。三维编织复合材料的热传导性能决定了其与外界的热能交换和自身温度变化, 影响构件的传热和散热性能; 其热膨胀性能决定了其结构尺寸的稳定性, 直接影响应力分布状态、抗热震和抗热冲击性能, 并关系到构件间的连接匹配, 对构件使用寿命和使用范围有很大的影响。

国内外已发表了一些研究编织复合材料热物理性能的文献, Wang 等^[1]对三维编织复合材料的热膨胀系数(CTE)进行了数值预报并作了相应的实验进行验证。Gowayed 等^[2]开展了三维编织复合

收稿日期: 2017-04-20; 录用日期: 2017-06-16; 网络出版时间: 2017-07-06 18: 05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170706.1805.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11502061)

通讯作者: 姜黎黎, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料及其力学性能 E-mail: lljfree@163.com

引用格式: 姜黎黎, 徐美玲, 李振国, 等. 三维编织复合材料热物理性能实验[J]. 复合材料学报, 2017, 34(12): 2734-2740.

JIANG Lili, XU Meiling, LI Zhenguo, et al. Experimental investigation on thermo-physical properties of 3D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(12): 2734-2740 (in Chinese).

材料热传导性能的实验研究。Schuster 等^[3]研究了三维机织复合材料沿厚度方向的热传导率。姚学峰等^[4]分别对二维和三维编织复合材料的热膨胀特性进行了实验研究。Mohajerjasbi、Liang、Cheng 和庞宝君等^[5-8]利用有限元法预测了三维编织复合材料的 CTE。程伟、夏彪和卢子兴等^[9-11]研究了三维编织复合材料的热物理性能, 并与实验结果进行了对比。Liu 和李典森等^[12-13]基于单胞几何模型, 分别对三维四向和五向编织复合材料的热传导性能进行了研究。张琳^[14]用实验研究了三维编织复合材料和层合复合材料的热传导性能。Wang、Noofouzi 和 Delouei 等^[15-17]研究了纤维增强复合材料的热传导问题。Maxime 等^[18]用实验研究了碳纤维复合材料层合板的热传导性能并建立了相应的数值模型。Zhang 等^[19]研究了三维编织结构对碳纤维增强陶瓷基复合材料热膨胀系数的影响。Hu 等^[20]对三维编织 C/C 复合材料的 CTE 进行了数值模拟。

显然, 针对三维编织复合材料热物理性能的研究已经取得一些显著成果, 但研究中考考虑环境温度变化对材料热物理性能影响的则鲜有报道。本文对三维四向编织复合材料进行了热环境下的热物理性能测试, 获得了热环境下材料的热物理性能变化规律及其分布特征, 分析了环境温度和编织角对三维四向编织复合材料的 CTE、热传导系数(CTC)、比

热(SH)以及热扩散率(TD)的影响, 得到了一些重要结论。

1 实验材料

本实验采用的试件均为天津工业大学复合材料研究所制备的三维四向编织复合材料; 基体为 TDE-86 环氧树脂(EP); 增强纤维为日本东丽公司生产的 T700-12K 碳纤维(CF)。组分材料的力学性能如表 1 所示^[21]。组分材料的热物理性能如表 2 所示^[9], 表中弹性常数的角标 3 表示纤维主方向, 角标 1 和 2 表示纤维横向。

2 热膨胀实验

2.1 CF/EP 实验件及实验方法

三种编织参数的三维四向编织复合材料试件相关参数如表 3 所示。试件编号中的符号 L 表示纵向(编织方向), 符号 T 表示横向。应用德国 Netzsch 公司生产的 DIL 402CL 型热膨胀仪测试材料的 CTE。测试原理如图 1(a)所示, 其中 LVDT 为位移传感器, 其上连有推杆, 通过与样品的接触获取样品长度的变化信号即可获得样品的热膨胀图谱。热膨胀系数测试如图 1(b)所示, 测试温度范围为 25~ -200℃, 升温速率为 3 K/min。

2.2 CF/EP 实验结果及分析

不同编织角度的三维四向编织复合材料的

表 1 碳纤维和环氧树脂的力学性能^[21]

Table 1 Mechanical properties of carbon fiber(CF) and epoxy resin(EP)

Materials	E_{33f}/GPa	E_{22f}/GPa	G_{32f}/GPa	G_{12f}/GPa	E_{m}/GPa	γ_{32f}	γ_{m}
Carbon fiber	215.6	17.21	12.92	9.3	—	0.3	—
Matrix	—	—	—	—	3.45	—	0.35

表 2 碳纤维和环氧树脂的热物理性能^[9]

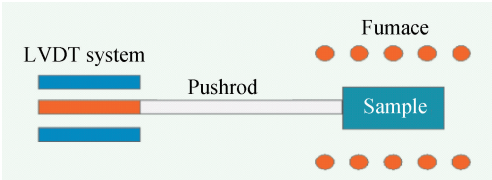
Table 2 Thermo-physical properties of carbon fiber and epoxy resin

Materials	$\alpha_{33f}/$ ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{22f}/$ ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\alpha_{\text{m}}/$ ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\lambda_{33f}/$ ($\text{W}(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	$\lambda_{22f}/$ ($\text{W}(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	$\lambda_{\text{m}}/$ ($\text{W}(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)
Carbon fiber	-0.3	3.1	—	8.0	1.0	—
Matrix	—	—	31.7	—	—	0.18

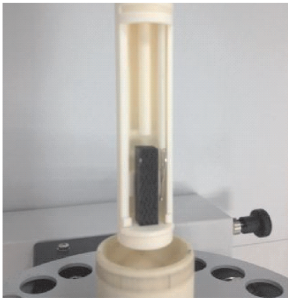
表 3 三维编织 CF/EP 复合材料热膨胀试件的工艺参数

Table 3 Process parameters of thermal expansion specimens for 3D braided CF/EP composites

Specimen number	Braiding angle/($^{\circ}$)	Specimen size/mm	Fiber volume fraction/%
a-103-L	25	25×6×6	58
a-103-T	25	25×6×6	58
a-202-L	35	25×6×6	58
a-202-T	35	25×6×6	58
a-302-L	45	25×6×6	58
a-302-T	45	25×6×6	58



(a) Schematic diagram of CTE test



(b) Test of CTE

图 1 CTE 测试及其原理

Fig. 1 Schematic diagram and test of thermal expansion coefficient (CTE)

热膨胀系数随温度的变化情况如图 2 和表 4 所示。

由图 2(a)可见，材料的纵向 CTE 随温度的升高而下降，均为负值或零值情况，这主要是由于碳纤维与基体具有不同的 CTE 和弹性模量，特别是碳纤维在纤维方向具有负的纵向 CTE，在垂直于纤维方向具有正的横向 CTE，而基体具有正的 CTE。由图还可看出，随着温度的升高，大编织角复合材料的纵向 CTE 下降幅度较大。图 2(b)表明，材料的横向 CTE 随温度的升高而上升，均为正值，温度越高，横向 CTE 上升幅度越大。且横向 CTE 随编织角的增大而减小。

此外，由表 4 可知，三维四向编织复合材料的纵向与横向 CTE 差异很大，这说明三维四向编织复合材料的热膨胀行为具有明显的各向异性特征，且编织角越小，各向异性特征越明显；对于同一个

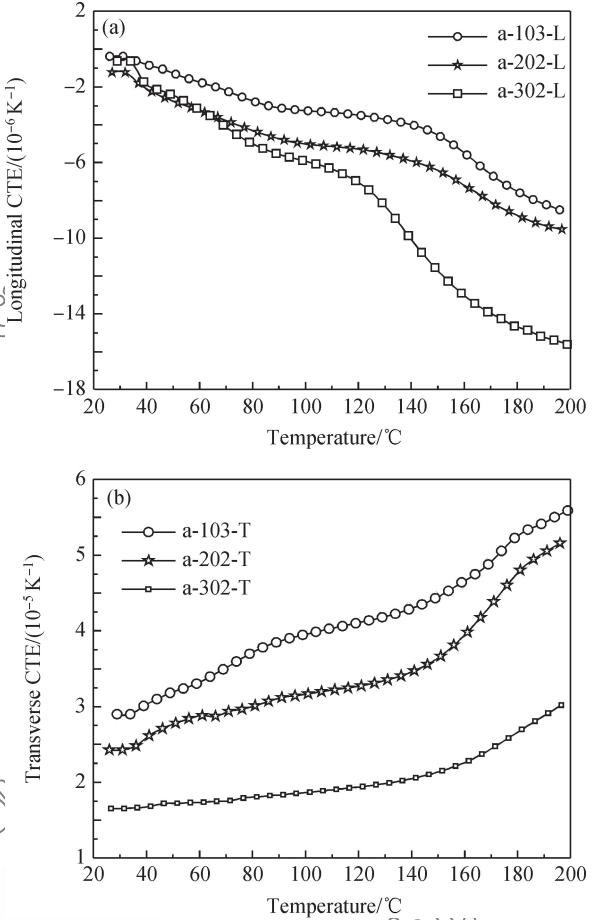


图 2 三维编织复合材料 CTE 随温度的变化

Fig. 2 CTE variation with temperature of 3D braided composites

编织角度，温度越高，各向异性特征越明显。

由上述实验结果可知，温度升高对三维四向编织复合材料存在不利影响，构件不易保持物体原来的形状，易产生纵向收缩与横向膨胀，温度越高这种效果越明显，但是小编织角复合材料比大编织角复合材料尺寸稳定，抗热震和热冲击性能较好。因此，工程上应通过选择合理的编织参数，使材料在某一特定方向上的 CTE 较小，甚至趋于零，使构件能在温差较大的条件下保持尺寸的稳定性，从而

表 4 三维编织 CF/EP 复合材料在不同温度下纵向和横向 CTE 的对比

Table 4 Comparisons of longitudinal CTE with transverse CTE of 3D braided CF/EP composites under different temperatures		27℃		100℃		200℃	
Specimen number	Braiding angle/(°)	CTE/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Difference/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	CTE/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Difference/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	CTE/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Difference/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)
a-103-L	25	-0.39		-3.34		-8.67	
a-103-T	25	28.1	28.49	39.60	42.94	56.10	64.77
a-202-L	35	-1.24		-5.15		-9.68	
a-202-T	35	24.30	25.54	31.60	36.75	52.20	61.88
a-302-L	45	-0.63		-5.93		-15.60	
a-302-T	45	16.50	17.13	18.60	24.53	30.80	46.40

满足航空航天、精密仪器等领域的尺寸稳定性和耐久性方面的要求。

3 热传导实验

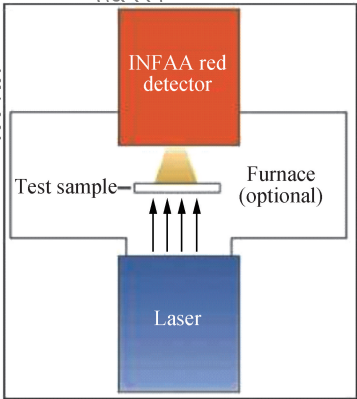
3.1 CF/EP 实验件及实验方法

三种编织参数的三维四向编织复合材料试件相关参数如表 5 所示。试件编号中的符号 L 表示纵向, 符号 T 表示横向。应用德国 Netzsch 公司生产的

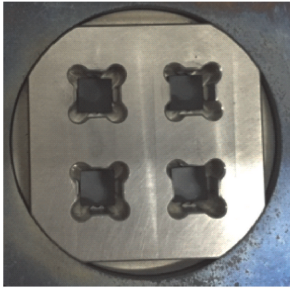
LFA467 型脉冲激光导热仪测试材料的热传导性能。测试的基本原理如图 3(a)所示, 在一定的设定温度下, 由激光源在瞬间发射一束光脉冲, 均匀照射在样品下表面, 使其表层吸收光能后温度瞬时升高, 并作为热端将能量以一维热传导方式传播, 从而测得样品在设定温度下的 CTC、CTE 和 SH。热传导系数测试如图 3(b)所示, 测试温度范围为 25~200℃。

表 5 三维编织 CF/EP 复合材料热传导试件的工艺参数
Table 5 Process parameters of thermal conduction specimens for 3D braided CF/EP composites

Specimen number	Braiding angle/(°)	Specimen size/mm	Fiber volume fraction/%
c-103-L	25	6×6×1	58
c-103-T	25	6×6×1	58
c-202-L	35	6×6×1	58
c-202-T	35	6×6×1	58
c-302-L	45	6×6×1	58
c-302-T	45	6×6×1	58



(a) Schematic diagram of CTC test



(b) Test of CTC

图 3 CTC 测试及其原理
Fig. 3 Schematic diagram and test of thermal conduction coefficient(CTC)

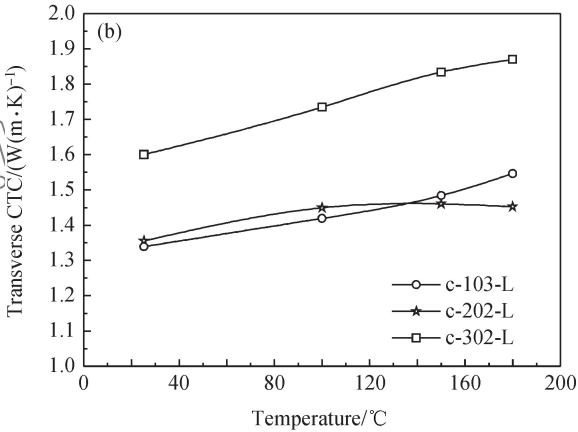
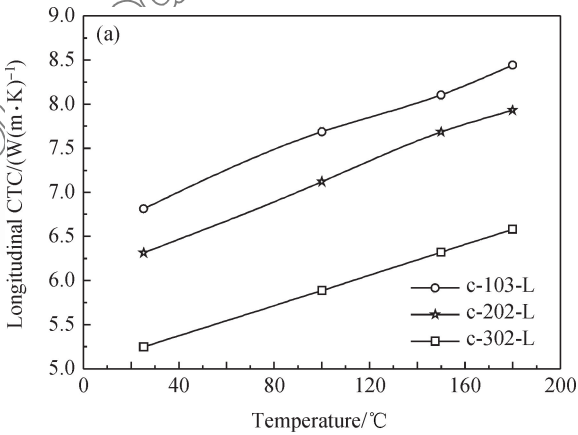


图 4 三维编织 CF/EP 复合材料 CTC 随温度的变化趋势
Fig. 4 CTC variation with temperature of 3D braided CF/EP composites

3.2 CF/EP 实验结果及分析

3.2.1 热传导系数

不同编织角度的三维四向编织复合材料的 CTC 随温度的变化情况如图 4 和表 6 所示。

由图 4(a)可见, 材料的纵向 CTC 随温度的升

高而上升, 且线性增长。这主要是由于温度升高, 材料固体分子热运动加剧, 同时材料孔隙中空气

表 6 三维编织 CF/EP 复合材料在不同温度下纵向和横向 CTC 的对比

Table 6 Comparisons of longitudinal CTC with transverse CTC of 3D braided CF/EP composites under different temperatures

Specimen number	Braiding angle/(°)	25℃		100℃		180℃	
		CTC/ (W(m·K) ⁻¹)	Difference/ (W(m·K) ⁻¹)	CTC/ (W(m·K) ⁻¹)	Difference/ (W(m·K) ⁻¹)	CTC/ (W(m·K) ⁻¹)	Difference/ (W(m·K) ⁻¹)
c-103-L	25	6.813	5.474	7.687	6.268	8.442	6.896
c-103-T	25	1.339		1.419		1.546	
c-202-L	35	6.341	4.986	7.119	5.679	7.930	6.478
c-202-T	35	1.355		1.440		1.452	
c-302-L	45	5.248	3.648	5.886	4.151	6.581	4.711
c-302-T	45	1.600		1.735		1.870	

对流和孔壁间的热辐射作用增加，碳纤维的热传导性能随温度的升高而上升。纵向热传导系数随编织角的增大而不断减小，编织角的变化对材料的纵向热传导系数影响较大，这主要是由于编织角较小的三维四向编织复合材料趋向于单向纤维增强树脂基复合材料，且纤维束沿纤维方向具有较高的导热性能，使材料的纵向热传导系数得以提高。由图 4(b)可见，材料的横向热传导系数随温度的升高而上升，且当温度低于 130°时，其横向 CTC 随编织角的增大而增大。从数值上看，温度和编织角的变化对材料的横向 CTC 影响均较小。

由表 6 可知，材料的纵向与横向 CTC 差异较大，这说明材料的热传导行为具有明显的各向异性特征，且编织角越小，各向异性特征越明显，同一编织角度，温度越高，各向异性特征越明显。由上述实验结果可知，随着温度的升高，材料的导热能力也随之提高，大编织角复合材料的保温隔热性能优于小编织角复合材料，从目前的产品性能来说，导热系数越大，织物就不能做得很薄。

3.2.2 比热

不同编织角度的三维四向编织复合材料的 SH 随温度的变化情况如图 5 所示。可见，材料的比热随温度的升高而上升，且线性增长，但是编织角的变化对材料比热的影响较小。这主要是由于比热是表示物质热性质的物理量，是物质的一种属性，是单位质量物体改变单位温度时吸收或释放的内能，与物质的种类和状态有关，与分子之间的作用力及分子本身大小相关，温度的变化会影响分子之间的作用力，而编织角的变化对材料的上述物理性质的影响较小。

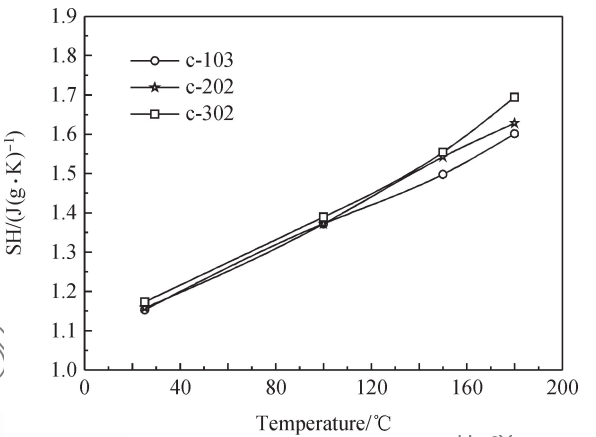


图 5 三维编织 CF/EP 复合材料 SH 随温度的变化趋势
Fig. 5 Specific heat (SH) variation with temperature of 3D braided CF/EP composites

上述实验结果说明，当温度升高时，材料吸收或放出热量后，自身的温度变化越来越小，无论是在室温还是在高温环境下，编织角对比热的影响都非常小。

3.2.3 热扩散系数

不同编织角度的三维四向编织复合材料的 TD 随温度的变化情况如图 6 和表 7 所示。

由图 6 可知，材料的纵向 TD 随温度的升高而下降，且呈线性变化，随编织角的增大而不断减小，编织角的变化对材料的纵向热扩散系数影响较大。材料的横向热扩散系数随温度的升高也下降，且呈线性变化，随编织角的增大而不断减小。

由表 7 可知，材料的纵向与横向 TD 差异较大，这说明材料的热扩散行为具有明显的各向异性特征，且编织角越小，各向异性特征越明显，同一个编织角度，温度越低，各向异性特征越明显。

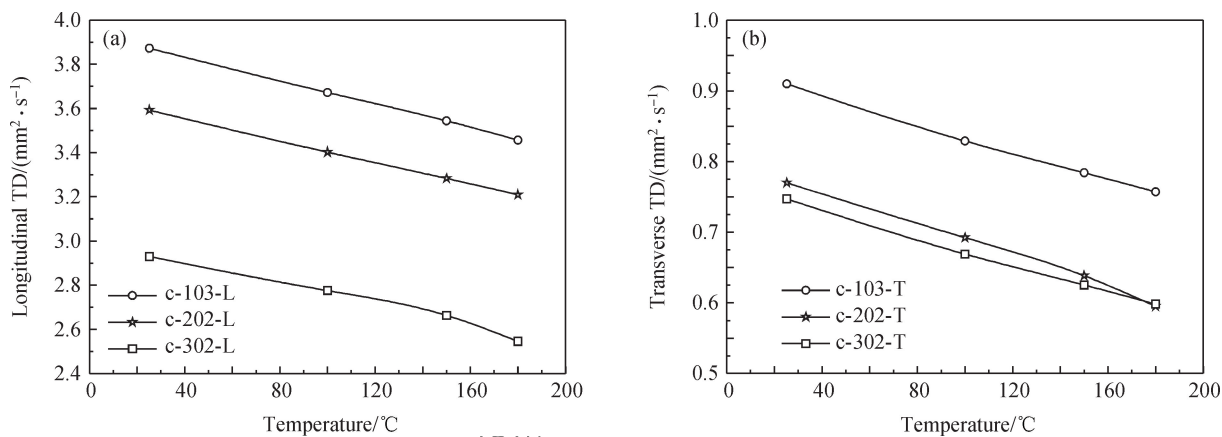


图 6 三维编织 CF/EP 复合材料 TD 随温度的变化趋势
Fig. 6 Thermal diffusion coefficient(TD) variation with temperature of 3D braided CF/EP composites

表 7 三维编织 CF/EP 复合材料在不同温度下纵向和横向 TD 的对比

Table 7 Comparisons of longitudinal TD with transverse TD of 3D braided CF/EP composites under different temperatures							
Specimen number	Braiding angle/(°)	25℃	Difference/(mm²·S ⁻¹)	100℃	Difference/(mm²·S ⁻¹)	180℃	Difference/(mm²·S ⁻¹)
		TD/(mm²·S ⁻¹)		TD/(mm²·S ⁻¹)		TD/(mm²·S ⁻¹)	
c-103-L	35	3.873	2.936	3.672	2.843	3.456	2.699
c-103-T	35	0.910		0.829		0.757	
c-202-L	35	3.592	2.822	3.462	2.764	3.209	2.614
c-202-T	35	0.770		0.638		0.595	
c-302-L	45	2.929	2.182	3.775	2.150	2.545	1.947
c-302-T	45	0.747		0.625		0.598	

上述实验结果表明,当温度升高时,材料中的热能扩散随之变慢,材料中温度变化传播得越慢,热交换强度降低。这主要是由于三维四向编织复合材料的比热随温度的升高而升高,材料温度升高所吸收的热量也随之增多,剩下更少热量继续向物体内部传递,使物体各点的温度变化较慢。

4 结 论

- (1) 温度对三维四向编织复合材料的热膨胀性能影响较大,随着温度的升高构件易产生纵向收缩与横向膨胀,温度越高变形效应越明显。
- (2) 综合考虑温度对三维四向编织复合材料的热传导系数(CTC)、比热(SH)和热扩散系数(TD)的影响,可以发现,随着温度的升高,构件与外界的热能交换降低,自身温度变化趋势减缓。
- (3) 编织角对三维四向编织复合材料的热物理性能影响较大,随温度的升高,小编织角复合材料的尺寸稳定性优于大编织角复合材料,而大编织角复合材料的保温隔热性能优于小编织角复合材料。
- (4) 三维四向编织复合材料的热膨胀行为和热传导行为均具有明显的各向异性特征。

参考文献:

[1] WANG A S D, MOHAJERJASBI S. Thermo elastic properties of 3D braided composites; Experiment and predictions american society of mechanical engineers[J]. Noise Control and Acoustics Division (Publication) NCA, 1995, 20: 275-293.

[2] GOWA KED Y, HWANG C J. Thermal conductivity of composite materials made from plain weaves and 3D weaves[J]. Composites Engineering, 1994, 5(9): 1177-1186.

[3] SCHUSTER J, HEIDER D, SHARP K, et al. Measuring and modeling the three-dimensionally woven fabric composites [J]. Mechanics of Composite Materials, 2009, 45 (2): 165-174.

[4] 姚学峰, 杨桂, 姚振汉, 等. 编织结构复合材料热膨胀特性的实验研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 20-25.

YAO Xuefeng, YANG Gui, YAO Zhenhan, et al. Experimental study of thermal expansion behavior on braided structure composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(4): 20-25 (in Chinese).

[5] MOHAJERJASBI S. Predictions for coefficients of thermal expansion of three-dimensional braided composites[J]. AIAA Journal, 1997, 35(1): 141-144.

[6] LIANG Jun, DU Shanyi, CHEN Xiaofeng. Thermal expan-

- sion coefficients of 3D braided composites with penny-shaped microcracks[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1998, 15(3): 103-107.
- [7] CHENG Ling. Thermal expansion coefficients of carbon/epoxy braided composites[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(1): 108-111.
- [8] 庞宝君, 曾涛, 杜善义, 等. 含微裂纹三维多向编织复合材料热膨胀系数的细观力学分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2001, 33(2): 155-157.
- PANG Baojun, ZENG Tao, DU Shanyi, et al. Micromechanics analysis of thermal expansion coefficients of 3D composites with microcracks[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001, 33(2): 155-157 (in Chinese).
- [9] 程伟, 赵寿根, 刘振国, 等. 三维四向编织复合材料等效热特性数值分析和试验研究[J]. *航空学报*, 2002, 23(2): 102-105.
- CHENG Wei, ZHAO Shougen, LIU Zhengguo, et al. Thermal property of 3-D braided fiber composites experimental and numerical results[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(2): 102-105 (in Chinese).
- [10] 夏彪, 卢子兴. 三维编织复合材料热物理性能的有限元分析[J]. *航空学报*, 2011, 32(6): 1040-1049.
- XIA Biao, LU Zixing. Finite element analysis of thermo-physical properties of three-dimensional braided composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1040-1049 (in Chinese).
- [11] 卢子兴, 王成禹, 夏彪. 三维全五向编织复合材料弹性性能及热物理性能的有限元分析[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 160-167.
- LU Zixing, WANG Chengyu, XIA Biao. Finite element analysis of elastic property and thermo-physical properties of three-dimensional and full five-directional braided composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 160-167 (in Chinese).
- [12] LIU Zhengguo, ZHANG Haiguo, LIU Zixing, et al. Investigation on the thermal conductivity of 3-dimensional and 4-directional braided composites[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(4): 327-331.
- [13] 李典森, 卢子兴, 刘振国, 等. 三维五向编织复合材料导热性能的有限元分析[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(8): 1455-1460.
- LI Diansen, LU Zixing, LIU Zhengguo, et al. Finite element analysis of thermal conductivity of three dimensional and five directional braided composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(8): 1455-1460 (in Chinese).
- [14] 张琳. 维编织复合材料热传导性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
- ZHANG Lin. Experimental investigation on heat-conduction properties of braided composites[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2015 (in Chinese).
- [15] WANG Huiming. Analytical solution of two-dimensional transient heat conduction in fiber-reinforced cylindrical composites[J]. *International Journal of Thermal Science*, 2013, 69(9): 43-52.
- [16] NOROUZI M, DELOUEI A A, SEILSEPOUR M. A general exact solution for heat conduction in multilayer spherical composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2013, 106(12): 288-295.
- [17] DELOUEI A A, NOROUZI M. Exact analytical solution for unsteady heat conduction in fiber-reinforced spherical composites under the general boundary conditions[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, 137(10): 701-705.
- [18] VILLIERE M, LECOINTE D, SOBOTKA V. Experimental determination and modeling of thermal conductivity tensor of carbon/epoxy composite[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 46(1): 60-68.
- [19] ZHANG Deke, CAO Yingbin, LIU Rongjun, et al. Effect of 3D-braided structure on thermal expansion of PIP-Cf/SiC composites[J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2014, 52(11): 722-726.
- [20] HU Chunxia, LI Qiejun, ZHANG Shouyang. Numerical simulation on thermal expansion coefficient of 3D braided C/C composites[J]. *Rare Metals*, 2014, 33(1): 99-106.
- [21] 郭颖. 三维六向编织复合材料力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- GUO Ying. Investigation on mechanical properties of three-dimensional six-directional braided composites[D]. Harbin: Harbin Polytechnic University, 2012 (in Chinese).