

碳纤维增强树脂基复合材料层合板的传热性能研究

邱雪琼^{1,2}, 金熠³, 陈琳^{1,2}

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司复合材料中心, 上海 200123;
2. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心民用飞机结构与复合材料北京市重点实验室, 北京 102211;
3. 中国科学技术大学先进技术研究院, 合肥 230088)

[摘要] 随着复合材料在飞机结构中的应用增加, 复合材料与金属混杂结构中的热应力问题越来越受到重视。为了分析结构中的热应力, 准确的结构温度场必不可少, 而材料的传热性能参数对结构温度场的分析至关重要。复合材料传热性能的各向异性, 以及铺层依赖性, 给传热性能测量带来不便。依据 ASTM E1461 标准, 设计了不同铺层的试验件, 采用闪光法测量 T800 级碳纤维增强树脂基复合材料层合板沿厚度方向和面内方向的热传导率。研究各种铺层层合板的热传导率规律, 验证了复合材料层合板面内方向热传导率的热叠层理论计算公式。此研究结果可应用于碳纤维增强树脂基复合材料层合板热传导率的快速计算。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 层合板; 热传导率; 闪光法; 热叠层理论

Heat Transfer Performance of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Laminated Composites

QIU Xueqiong^{1,2}, JIN Yi³, CHEN Lin^{1,2}

(1. Composite Center, COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd., Shanghai 200123, China;
2. Beijing Key Laboratory of Civil Aircraft Structures and Composite Material, COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China;
3. Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China)

[ABSTRACT] With the increase of applications of composites in airplane structures, the thermally-induced stresses are critical issues in composite-metal hybrid structures. In order to analyze thermally-induced structural stresses, accurate structural temperature field value is necessary, while the heat transfer performance of the materials is of great importance for the structural temperature field analysis. Due to the anisotropy of heat transfer performance of composites, which is dependent on the layer and structure of laminates, it results in difficulties in evaluation of thermal conductivities. Based on the ASTM E1461, the samples with different structures were designed, and the thermal conductivities in depth direction and in-plane direction of the T800 carbon fiber reinforced resin laminates were tested through flash method. The thermal conductivities for laminates in different stack types were studied. And also, the thermal stack theory of thermal conductivity for composite laminates in in-plane direction was verified. This work provided a fast approach for evaluation of thermal conductivity of carbon fiber reinforced resin matrix laminated composites.

Keywords: Carbon fiber reinforced composite; Laminate; Thermal conductivity; Flash method; Thermal lamination theory

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.091

在飞机设计初期, 材料性能参数对材料选用及飞机尺寸定义等分析至关重要。随着复合材料在航空领域的推广应用, 复合材料与金属混杂结构中的热应力问题受到越来越多的关注, 国内外运输类飞机^[1-2]适航标准以及复合材料飞机结构咨询通告^[3]都规定了必须充分评估温度对结构静强度和疲劳寿命的影响。为此, 需要准确预测和评估结构中的热应力, 而结构热应力的分析, 需要准确的结构温度场输入, 而热学性能参数对温

度场的精确分析至关重要, 尤其是具有强各向异性复合材料的热传导率数据。过去的飞机结构设计中复合材料的表征主要涉及对力学性能测试, 热学性能参数数据比较欠缺。

复合材料较强的可设计性是在飞机结构中得以推广应用的显著优势之一, 采用不同的铺层和厚度设计可满足结构设计中各种尺寸、承载和传力需求。然而, 复合材料的各向异性也给传热性能表征带来不便。飞

机复合材料结构设计中往往包含大量的铺层库,而复合材料热传导率受铺层影响显著,工程上对所有铺层复合材料的热传导率进行测试是不可取的,因此需对复合材料层合板的传热性能进行研究,采用合理工程计算方法批量快速获取各种铺层复合材料的热传导率将是一个主要的技术途径。复合材料的热传导率测试与机理研究已表明,材料的热传导率与纤维体积含量、传热方向、温度、铺层、树脂材料等因素密切相关^[4-9]。文献[5]给出一种由纤维、树脂体积含量、纤维、树脂热导率为变量计算碳纤维复合材料低温热传导率的理论方法。该方法以纤维和树脂基的参数为自变量,而飞机结构分析,尤其是有限元分析中通常以单层性能参数和铺层顺序为自变量,因此更需要一种通过单层性能计算层合板性能的方法以实现大量不同铺层性能的快速批量计算。

本文采用复合材料层合板热传导系数的闪光法测量技术,以飞机结构中使用较多的某 T800 级碳纤维增强树脂基复合材料为研究对象,根据 ASTM E1461 标准试验的要求,设计了试验件铺层及构型,测试了单向铺层、正交铺层和准各向同性铺层这 3 种铺层复合材料,沿厚度和面内方向的热传导系数,研究了铺层对热传导率的影响规律,并验证了复合材料层合板面内方向热传导系数的热叠层理论^[10]。

1 试验方法

材料的热传导率标准测试方法有:防护热板法^[11]、热流计法^[12]、热线法^[13]和闪光法^[14]等。各种方法的适用范围及测量温度范围对比如图 1 所示,图 1 中还展示

了室温下各种常见材料的热传导率。碳纤维增强树脂基复合材料热传导率一般在 0.1~10W/(m·K)量级,从图 1 可见闪光法能完全覆盖这一范围,因此本试验采用闪光法进行碳纤维增强树脂基复合材料层合板的热传导率测量。

闪光法测量热扩散的测试原理如图 2 所示,在一定的设定温度 T_0 (由炉体控制的恒温条件)下,由激光源或闪光氙灯在瞬间发射一束光脉冲,均匀照射在样品上表面,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向冷端(下表面)传播。使用红外检测器连续测量样品下表面中心部位的相应温升过程,得到温度(检测器信号)升高对时间响应的关系曲线。

样品在温度 T_0 下的热扩散系数 α 通过样品厚度及下表面温度达到最高温度一定百分比所花的时间计算获得。即,

$$\alpha = 0.1388 \times d^2 / t_{50} \quad (1)$$

式中, α 为热扩散率, mm^2/s ; d 为样品厚度, mm ; t_{50} 为样品下表面温度达到最高温度 50% 所花的时间。

热导率由试验测得的热扩散率获得,计算公式如下:

$$\alpha = \lambda / (C_p \cdot \rho) \quad (2)$$

式中, λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$; ρ 为密度, g/cm^3 。

2 试验

2.1 试验矩阵

试验件为某 T800 级碳纤维增强树脂基复合材料层

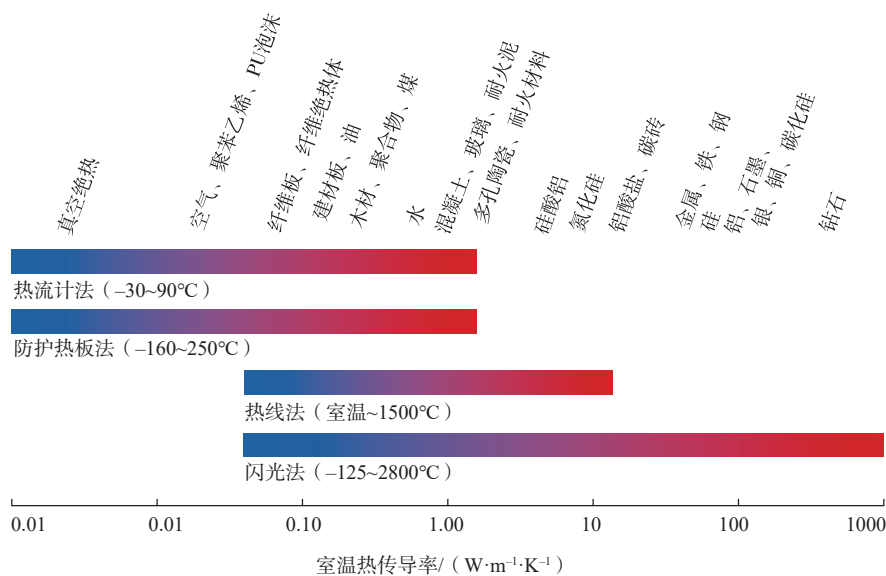


图1 材料的热传导率范围及各种测量方法的覆盖区间

Fig.1 Thermal conductivities for different materials and cover ranges for different test methods

合板。试验件构型为圆饼形薄片,如图 3 (a)所示,直径(12.6±0.05)mm,厚度约 1.5mm。设计 0° 铺层、90° 铺层、正交铺层及准各向同性铺层的试验件,分别测试沿厚度方向和面内方向的热传导率,试验矩阵如表 1 所示。测面内方向热传导率的试验件,试验件切割示意图如图 3 (b)所示,圆柱轴线沿着层合板 X 轴方向。测厚度方向(即层合板 Z 方向)热传导率的试验件,试验件切割示意图如图 3 (c)所示,圆柱轴线沿着 Z 轴方向。

2.2 试验环境

根据民用飞机运营的温度范围选择试样的测试温度范围为 -55~100℃,选取温度点: -55℃、-25℃、0℃、室温、50℃、75℃、100℃进行测量。

2.3 试验设备

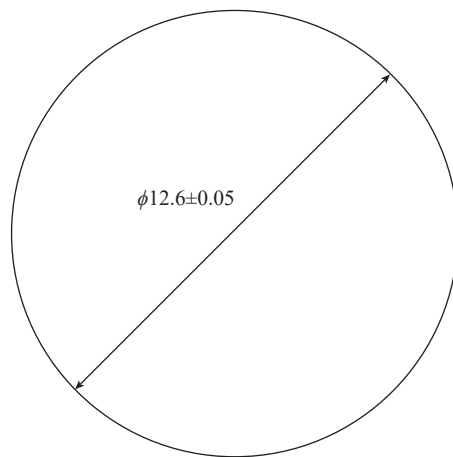
测试仪器为 NETZSCH 公司 LFA457,利用天平测量试样质量,利用千分尺测量试样直径和厚度,计算试样的密度。在测试热传导率之前,对待测样品的两个面喷涂一层薄而均匀的石墨,以提高试样吸收能量的能力。试验件安装如图 4 所示,每批测量中放入一个标准样品作参照,标准样品采用 NETZSCH 公司的高温陶瓷 9606。

3 结果与讨论

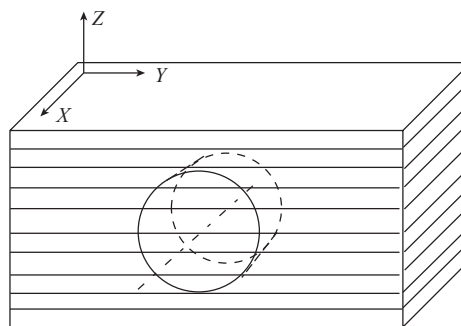
测量热扩散率和比热,由式(2)计算各种铺层层合板厚度及面内方向的热传导率,计算结果见图 5。

从试验结果可见,单向铺层、正交铺层与准各向同性铺层的厚度方向热传导率基本相同,在 -55~100℃ 区间,热传导率在 0.34~0.65W/(m·K) 之间,并且在所测试的温度范围内随温度升高稍有增加。所以,厚度方向热传导率基本不受铺层影响。

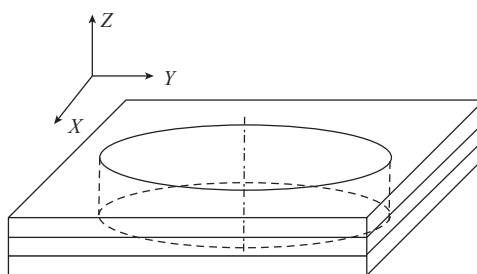
在面内方向,90° 铺层方向的热传导率与厚度方向的热传导率相当,在 0.45~0.82W/(m·K) 之间。0° 铺层方向的热传导率则高一个数量级,且随温度升高而明显增加,在 -55~100℃ 区间,热传导率在 4.41~9.06W/(m·K) 范围。文献 [15-16] 均显示了纤维与树脂的热传导率随温度升高而增加,碳纤维沿轴向热传导率在 10W/(m·K) 左右,径向热传导率在 1W/(m·K) 左右,



(a) 试验件示意图



(b) 面内方向热传导率试验件切割示意图



(c) 厚度方向热传导率试验件切割示意图

图3 试验件切割示意图

Fig.3 Schematic for sample cutting

表1 层合板热传导率试验矩阵

Table 1 Test matrix of thermal conductivity test for laminated composites

序号	测试方向	铺层顺序	层数	试片厚度/mm
1	X 向	0° 铺层	108	1.50
2	X 向	90° 铺层	108	1.50
3	Z 向	0° 铺层	8	1.53
4	X 向	[0/90] _{27s}	108	1.50
5	Z 向	[0/90] _{2s}	8	1.53
6	X 向	[45/-45/0/90] _{14s}	112	1.50
7	Z 向	[45/-45/0/90] _s	8	1.53

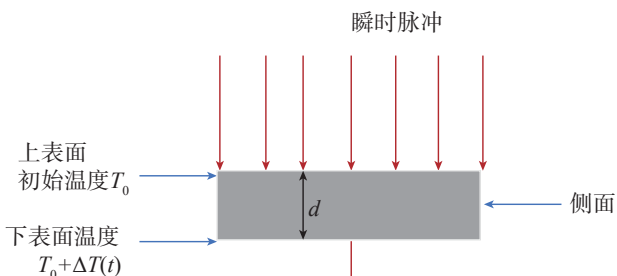


图2 闪光法示意图

Fig.2 Schematic of flash method

树脂的热传导率在 0~1W/(m·K),由于 0° 铺层热传导沿纤维轴向,其热传导率接近纤维轴向热传导率,而 90° 铺层方向与厚度方向的热传导则由基体与纤维径向主导。

正交铺层与准各向同性铺层的面内方向热传导率则介于 0° 铺层方向的热传导率与 90° 铺层方向的热传导率之间,且基本重合,热传导率随温度升高而增加。不难理解,这两种铺层层合板面内方向的整体热传导率,受纤维的轴向、径向以及树脂热传导的共同影响。不同铺层复合材料层合板的热传导率与 0° 铺层方向和 90° 铺层方向热传导率之间的关系可由热层叠理论计算^[10]。

4 热层叠理论

在飞机结构设计中,层合板一般由含不同比例的



图4 热传导率试验件装样图

Fig.4 Samples loading for thermal conductivity test

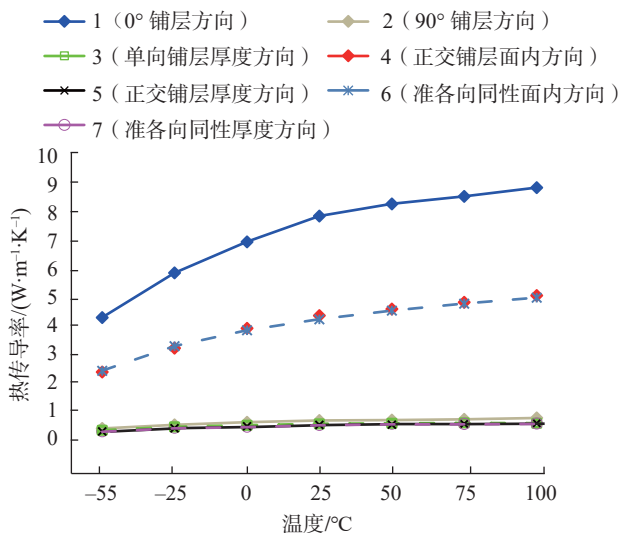


图5 层合板热传导率

Fig.5 Thermal conductivity of laminated composites

0°、±45°、90° 铺层单向带铺贴而成,若层合板各单层材料相同,可根据 0° 和 90° 铺层热传导率试验数据,采用热层叠理论计算不同铺层层合板的面内热传导率。先求出各单层在层合板主方向(x方向)和次方向(y方向)的热传导率,如图 6 和式(3)所示,然后按各单层铺层数量加权平均得到等效的层合板的热传导率,设板内 0°、±45°、90° 的铺层百分比例为 i : j : k,则层合板的等效热传导率可由式(4)计算^[10]。

$$\begin{cases} K_{x(\alpha)} = \frac{k_x + k_y}{2} + \frac{k_x - k_y}{2} \cos 2\alpha \\ K_{y(\alpha)} = \frac{k_x + k_y}{2} - \frac{k_x - k_y}{2} \cos 2\alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_x = \frac{K_{x(0)} \cdot i + K_{x(\pm 45)} \cdot j + K_{x(90)} \cdot k}{i + j + k} \\ K_y = \frac{K_{y(0)} \cdot i + K_{y(\pm 45)} \cdot j + K_{y(90)} \cdot k}{i + j + k} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_x 为单层在纤维方向的热传导率; k_y 为单层在垂直纤维方向的热传导率; α 为单层纤维方向与层合板主方向的夹角; $K_{x(\alpha)}$ 为 α 铺层在层合板主方向上的等效热传导率; $K_{y(\alpha)}$ 为 α 铺层在层合板次方向上的等效热传导率; K_x 为层合板主方向等效热传导率; K_y 为层合板次方向等效热传导率; $K_{x(0)}$ 为 0° 铺层在层合板主方向上的等效热传导率; $K_{y(0)}$ 为 0° 铺层在层合板次方向上的等效热传导率; $K_{x(\pm 45)}$ 为 ±45° 铺层在层合板主方向上的等效热传导率; $K_{y(\pm 45)}$ 为 ±45° 铺层在层合板次方向上的等效热传导率; $K_{x(90)}$ 为 90° 铺层在层合板主方向上的等效热传导率; $K_{y(90)}$ 为 90° 铺层在层合板次方向上的等效热传导率。

由式(3)可分别计算 0°, 90° ±45° 铺层在层合板主方向和次方向的热传导率:

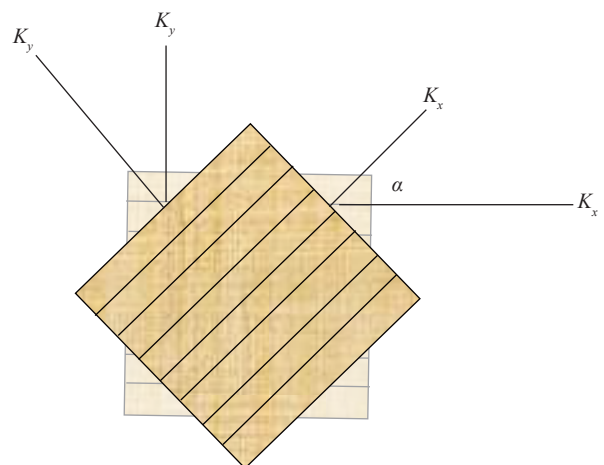


图6 单层在层合板主、次方向热传导率

Fig.6 Thermal conductivity of lamina in principle direction and vertical-principle direction

$$K_{y(0)}=K_x, K_{y(90)}=K_y;$$

$$K_{x(90)}=K_y, K_{x(0)}=K_x,$$

$$K_x(\pm 45)=\frac{k_x+k_y}{2}, K_y(\pm 45)=\frac{k_x+k_y}{2}。$$

对正交铺层, $i:j:k=50:0:50$, 对准各向同性铺层, $i:j:k=25:50:25$, 由式(4)计算, 均可得:

$$K_x = K_y = \frac{k_x + k_y}{2}$$

可见正交铺层与准各向同性铺层的层合板理论结果相同, 且 x, y 方向热传导率相等。

代入试验测得的 $0^\circ, 90^\circ$ 方向热传导率, 计算正交铺层与准各向同性铺层的层合板理论结果, 计算结果与试验结果对比见图 7。试验及理论结果均显示正交铺层与准各向同性铺层的热传导率相同, 且随温度升高而增大。试验值与热叠层理论计算值两者差异在 3.82%~9.12% 内, 试验值相对理论值整体稍偏高, 随着温度升高, 热传导率增大, 误差也变大。测量的正交铺层与准各向同性铺层面内方向热传导率的重叠性很好, 与理论预期一致, 说明不同铺层角度与 $0^\circ, 90^\circ$ 方向热传导率之间的关系是同时符合热层叠理论规律的。误差来源可能与试验件密度的测量精度相关, 试验中试样的密度由天平测量质量, 千分尺测量直径和厚度计算获得, 由于试样较小, 在不同铺层试验件的质量测量和尺寸测量中存在一定误差, 给热传导率的计算整体带来误差。也可能是随着温度升高, 纤维轴向传热性能的贡献稍稍增大, 使得层合板整体面内方向的热传导率稍偏高。

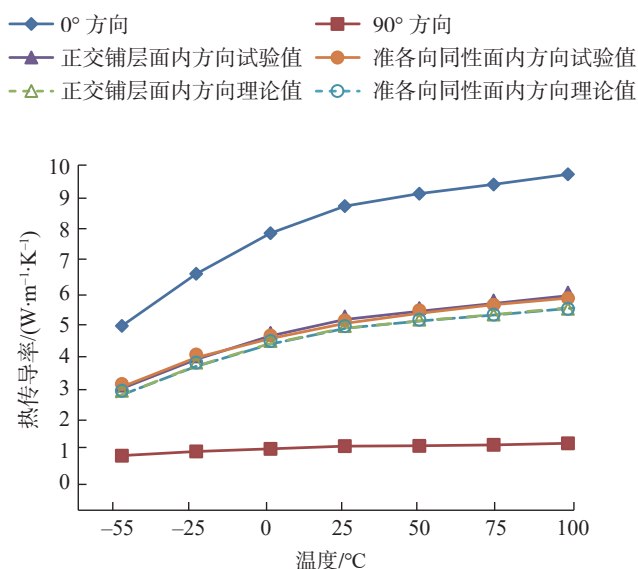


图7 试验值与理论值对比

Fig.7 Comparison between test values and calculated values

5 结论

研究了闪光法应用于复合材料层合板热传导系数的测量技术, 以某 T800 级碳纤维增强树脂基复合材料为对象, 测量了单向铺层、正交铺层和准各向同性铺层的层合板沿厚度方向及面内方向的热传导率。所测得的数据验证了复合材料层合板热叠层理论分析方法。该结论可在飞机结构设计中用于快速计算同种材料铺层设计的层合板热传导率, 大大减少复合材料结构热分析的工作量, 为温度场分析、热应力研究提供支持。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [2] Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 Airworthiness standards: Transport category airplanes[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011.
- [3] Federal Aviation Administration. Federal Aviation Regulation Part 25: Airworthiness standards: Transport category airplanes[S]. Washington: Federal Aviation Administration, Department of Transportation. 2003.
- [4] Department of Transportation Federal Aviation Administration. Advisory circular 20-107B, composite aircraft structure[S]. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2009.
- [5] 张建可. 树脂基碳纤维复合材料的热物理性能之一——导热系数 [J]. 中国空间科学技术, 1987, 7(3): 55-60.
- [6] ZHANG Jianke. The one of thermal physical properties of carbon fibre/epoxy—resin composites—thermal conductivity[J]. Chinese Space Science and Technology, 1987, 7(3): 55-60.
- [7] 张建可. 碳纤维复合材料低温热导率的实用计算方法 [J]. 中国空间科学技术, 1994, 14(6): 39-42.
- [8] ZHANG Jianke. The calculated method of thermal conductivity of carbon fibre composites at low temperatures[J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, 14(6): 39-42.
- [9] 沈蓉影. 导热系数测定中的影响因素研究 [J]. 材料工程, 1992, 20(6): 39-41.
- [10] SHEN Rongying. The effect of factors on measured results of thermal conductivity[J]. Journal of Materials Engineering, 1992, 20(6): 39-41.
- [11] 沈蓉影. 碳纤维复合材料导热系数研究 [J]. 材料工程, 1993, 21(3): 4-5.
- [12] SHEN Rongying. Study on thermal conductivity of carbon fiber composites[J]. Journal of Materials Engineering, 1993, 21(3): 4-5.
- [13] 肖俐. 热线法测试纺织纤维导热系数的方法研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- [14] XIAO Li. Study on the characterization of thermal conductivity of fibers by hot wire method[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.
- [15] 杨帆, 曾杜娟, 田建东, 等. 纤维增强复合材料宏观传热分析 [J]. 强度与环境, 2014, 41(4): 58-63.
- [16] YANG Fan, ZENG Dujuan, TIAN Jiandong, et al. Micro-macro scale heat transfer analysis of fiber reinforced composites[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(4): 58-63.

(下转第102页)

参考文献

[1] WEISS V, ANDOR L, RENNER G, et al. Advanced surface fitting techniques[J]. Computer Aided Geometric Design, 2002, 19(1): 19-42.

[2] BRUJIC D, AINSWORTH I, RISTIC M. Fast and accurate NURBS fitting for reverse engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(5): 691-700.

[3] KINERI Y, WANG M, LIN H, et al. B-spline surface fitting by iterative geometric interpolation/approximation algorithms[J]. Computer-aided Design, 2012, 44(7): 697-708.

[4] SEDERBERG T W, ZHENG J M, BAKENOV A, et al. T-splines and T-NURCCs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 477.

[5] SEDERBERG T W, CARDON D L, FINNIGAN G T, et al. T-spline simplification and local refinement[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 276.

[6] ZHENG J M, WANG Y M, SEAH H S. Adaptive T-spline surface fitting to z-map models[C]//Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia - GRAPHITE '05. New York: ACM Press, 2005: 405.

[7] YANG X N, ZHENG J M. Approximate β -spline surface skinning[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(12): 1269-1276.

[8] WANG Y M, ZHENG J M. Curvature-guided adaptive β -spline surface fitting[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(8-9): 1095-1107.

[9] LIN H W, ZHANG Z Y. An efficient method for fitting large data sets using T-splines[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2013, 35(6): A3052-A3068.

[10] FENG C, TAGUCHI Y. FasTFit: A fast T-spline fitting algorithm[J]. Computer-Aided Design, 2017, 92: 11-21.

[11] SCOTT M A, LI X, SEDERBERG T W, et al. Local refinement of analysis-suitable T-splines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 342: 206-222.

[12] LI X, ZHENG J M, SEDERBERG T W, et al. On linear independence of T-spline blending functions[J]. Computer Aided Geometric Design, 2012, 29(1): 63-76.

[13] LI X, SCOTT M A. Analysis-suitable T-splines: Characterization, refineability, and approximation[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2014, 24(6): 1141-1164.

[14] CASQUERO H, LIU L, ZHANG Y J, et al. Isogeometric collocation using analysis-suitable T-splines of arbitrary degree[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 301: 164-186.

[15] BAZILEVS Y, HSU M, SCOTT M A. Isogeometric fluid-structure interaction analysis with emphasis on non-matching discretizations, and with application to wind turbines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 249: 28-41.

[16] CHOI B K, CHUNG Y C, PARK J W. Application and extension of Z-map model[C]// Proceedings of the 3rd Pacific Conference

on Computer Graphics and Applications. Seoul, 1997.

[17] MENG T W, CHOI G P T, LUI L M. TEMPO: feature-endowed teichmüller extremal mappings of point clouds[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2016, 9(4): 1922-1962.

[18] RUSINKIEWICZ S. Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes[C]//2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. New York: IEEE, 2004.

[19] WANG J, LEACH R, CHEN R, et al. Distortion-free intelligent sampling of sparse surfaces via locally refined T-spline metamodelling[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020, 67: 10.1007/s40684-020-00248-w.

[20] LASERDESIGN. Impeller model[EB/OL]. [2020-9-10]. <https://www.laserdesign.com/sample-files/impeller/>.

[21] PIEGL L, TILLER W. The NURBS book[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997.

通讯作者: 徐龙, 高级工程师, 硕士, 研究方向为精密仪器与测量技术, E-mail: xulong@hust.edu.cn.

(责编 阳光)

(上接第95页)

[10] ROLFES R. Efficient thermal analysis of anisotropic composite plates using new finite elements[C]//Developments in the Science and Technology of Composite Materials. Stuttgart, 1990: 743-748.

[11] ASTM International. ASTM C177 Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[12] ASTM International. ASTM C518 Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of Heat Flow Meter Apparatus[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

[13] ASTM International. ASTM C1113 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique)[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[14] ASTM International. ASTM E1461 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[15] DONG K, GU B H, SUN B Z. Comparisons of thermal conductive behaviors of epoxy resin in unidirectional composite materials[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(2): 775-789.

[16] 龙巍, 郑学林, 臧建彬. 基于碳纤维复合材料热性能的研究进展综述[J]. 应用化工, 2019, 48(9): 2251-2255.

LONG Wei, ZHENG Xuelin, ZANG Jianbin. Review of research progress based on thermal properties of carbon fiber composites[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(9): 2251-2255.

通讯作者: 邱雪琼, 博士, 高级研发工程师, 研究方向为飞机结构静强度分析、热分析, E-mail: qiuxueqiong@comac.cc.

(责编 阳光)