

基于实测数据的复合材料层合板热导率预测方法



张肖肖,张赐宝,秦强,丛琳华

中国飞机强度研究所,陕西 西安 710065

摘要:针对一般混杂铺层的复合材料层合板,本文提出了一种预测其 X 向、 Y 向和 Z 向等效热导率的预测方法,并指出了激光导热仪(LFA)在测试层合板 X/Y 向等效热导率方面的局限性。该预测方法不依赖纤维和基体热导率,采用少量混杂铺层试样的热导率实测数据,计算得到不同角度单向铺层的热导率,根据层合板 X/Y 向传热的并联传热模型和 Z 向传热的串联传热模型得到未测试铺层试样的等效热导率预测结果,与实测数据对比证明该方法预测精度较高。

关键词:热导率;预测方法;层合板;传热模型

中图分类号:TB332

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.06.003

随着复合材料(复材)在飞机制造领域的使用日益广泛^[1-2],在考虑复材传热性能进行热应力分析或者环控系统等相关设计时需要复材不同温度下的热导率数据。由于复合材料的各向异性和可设计性,即使对于相同基体、相同纤维、相同纤维体积分数组成的复合材料,由于其铺层顺序不同,导致其热导率数据存在差异,并且在 X 向、 Y 向和 Z 向呈现出显著差别。通过试验测试可以获得复材试样不同方向的热导率,但必须制造测试试样,此外存在测试周期较长、测试对硬件条件依赖度高等问题,对于采用新的铺层顺序设计的层合板,又需要重新制造试样进行测试,不能满足结构设计中的缩短周期需求,无法支撑复材结构优化、环控系统设计等的快速评估迭代,因此需要研究复合材料层合板不同方向热导率的预测方法。

目前,有多种碳纤维复合材料面内和厚度方向热导率计算模型^[3-5]。李仕通^[3]梳理了在不同铺层角度情况下碳纤维复合材料(CFRP)单向铺层面内和厚度方向热导率计算模型及测试方法,分析了不同树脂体系和增强体,以及工艺方法等因素对CFRP热导率的影响。钟铁峰^[4]采用单胞变分渐近均匀化方法构建了一种新的细观力学模型来预测非均质复合材料的有效热导率,该模型并不适用于由单向铺层组成的复材层合板。李仕通^[5]还研究了铺层角

度对三种复材层合板导热性能的影响规律,采用解析方法、有限元方法,以及数值拟合方法建立了碳纤维复合材料导热性能预测模型,并与试验数据进行了验证分析,其研究的是单向铺层并非混杂铺层。以上研究多针对单向铺层预测,并且普遍依赖基体和纤维的热导率数据,因此在使用前需要先获取基体、纤维的相关数据,不能直接以一般混杂铺层试样的实测数据分析出单向铺层热导率,更难以应用于混杂铺层热导率的预测。参考文献[6]在对复材蒙皮与内饰组合结构热阻预测过程中,将特定混杂铺层的复材 Z 向热导率实测值进行拟合来预测不同温度下的热导率,并未对 Z 向热导率与各角度铺层之间的关系进行探讨。目前也有采用有限元法来预测复合材料有效热导率的相关研究^[7-11]。例如,程磊^[7]建立以不同体积球形颗粒填充型复合材料模型,预测了相应颗粒体积填充量下的有效热导率,该模型不能用于预测纤维增强层合板的热导率预测。左可军^[9]研究了平纹编织结构的三维纤维随机模型,该模型可给出三维编织复合材料的等效热导率,并不对 X 、 Y 、 Z 向进行区分。有限元法预测则对分析模型的准确性要求更高,十分依赖使用者的经验,不易操作,适用于计算颗粒增强型、编织体型等微观结构更为复杂的复合材料热导率。目前缺少能够直接根据一般混杂铺层层合

收稿日期: 2022-01-15; 退修日期: 2022-02-26; 录用日期: 2022-04-02

引用格式: Zhang Xiaoxiao, Zhang Cibao, Qin Qiang, et al. Prediction method for the thermal conductivity of the composite material laminates based on test data[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(06): 14-19. 张肖肖, 张赐宝, 秦强, 等. 基于实测数据的复合材料层合板热导率预测方法[J]. 航空科学技术, 2022, 33(06): 14-19.

板热导率实测数据对未测试的混杂铺层试样在 X 、 Y 和 Z 向热导率进行预测的方法。

本文基于稳态传热理论,建立复材层合板 Z 向、 X/Y 向热导率与单一角度铺层热导率的关系式,按照线性方程组求解和统计思想,从少量实测热导率数据中计算得到单一角度铺层的热导率平均值,再根据该关系式来计算待测试样的热导率预测值,最后通过对比实测值与预测值的相对误差,分析本文预测方法的正确性。

1 Z 向热导率预测方法

Z 向传热串联模型如图1所示, Z 向热导率预测方法的计算思路如图2所示。对于每一个热导率实测数据 K_e ,其对应试样的等效热阻

$$R_t = d/K_e \quad (1)$$

式中: d 为复材试样厚度。由于在激光导热仪(LFA)的激光脉冲作用下试样的温升幅度很小,可以认为各铺层的温度相同,因此相同角度铺层的热导率相同,同时由于各铺层厚度相同可以得到相同角度铺层的热阻相同。根据串联热阻理论,可以得到试验件等效热阻等于各向铺层的热阻之和

$$R_t = N_0 R_0 + N_{45} R_{45} + N_{-45} R_{-45} + N_{90} R_{90} \quad (2)$$

式中:下标代表单一铺层角度; R_t 为复材试样的等效热阻; N 为试样中当前角度铺层的总层数; R 为相应角度铺层的热阻,式(2)消去单层厚度后认为 $R=K^{-1}$, K 为该角度铺层的热导率,此时 $R_t=N_t/K_e$, N_t 为试样铺层层数。

对于每一个混杂铺层试样的实测数据,都可以根据式(2)得到一个以 R_0 、 R_{45} 、 R_{-45} 、 R_{90} 为未知数的四元一次方程。求解4个未知数至少需要4个方程联立,从同一温度下各个试样实测数据对应的四元一次方程中进行任意组合,这样的方程组一共有 C_n^4 个(n 为当前温度下实测数据的个数),每一组方程组均为以下形式

$$\begin{cases} N_0^1 R_0 + N_{45}^1 R_{45} + N_{-45}^1 R_{-45} + N_{90}^1 R_{90} = R_t^1 \\ N_0^2 R_0 + N_{45}^2 R_{45} + N_{-45}^2 R_{-45} + N_{90}^2 R_{90} = R_t^2 \\ N_0^3 R_0 + N_{45}^3 R_{45} + N_{-45}^3 R_{-45} + N_{90}^3 R_{90} = R_t^3 \\ N_0^4 R_0 + N_{45}^4 R_{45} + N_{-45}^4 R_{-45} + N_{90}^4 R_{90} = R_t^4 \end{cases} \quad (3)$$

式中:上标代表不同样本的编号。

根据线性代数理论,线性方程组 $AX=B$ 的解为 $X=A^{-1}B$,前提是矩阵 A 满秩,每求解一组式(3)表示的方程组便得到一组 R_0 、 R_{45} 、 R_{-45} 、 R_{90} 的值。求解所有存在数学解的方程组,考虑到热阻均大于0,再筛选出满足物理意义的数学解,形成大样本的各向铺层热阻数据,便得到分别关于 R_0 、 R_{45} 、 R_{-45} 、 R_{90} 数值的4个样本。再计算得到此样本的平均值,便

得到了不同温度下 -45° 、 45° 、 0° 和 90° 铺层热阻平均值 $\bar{R}_0$ 、 $\bar{R}_{45}$ 、 $\bar{R}_{-45}$ 、 $\bar{R}_{90}$ 。然后,根据待预测试样的铺层顺序,再次采用串联热阻理论,计算得到当前铺层复材的热阻预测值

$$R_p = N_0 \bar{R}_0 + N_{45} \bar{R}_{45} + N_{-45} \bar{R}_{-45} + N_{90} \bar{R}_{90} \quad (4)$$

再结合该试样铺层层数 N 便可得 Z 向热导率预测值

$$K_{ef} = N/R_p \quad (5)$$

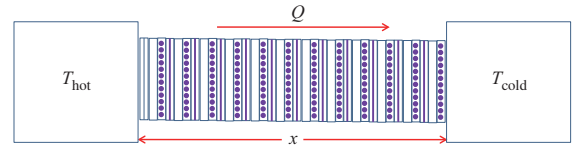


图1 Z 向传热串联模型

Fig.1 Series-wound thermal conduction model in Z -orientation

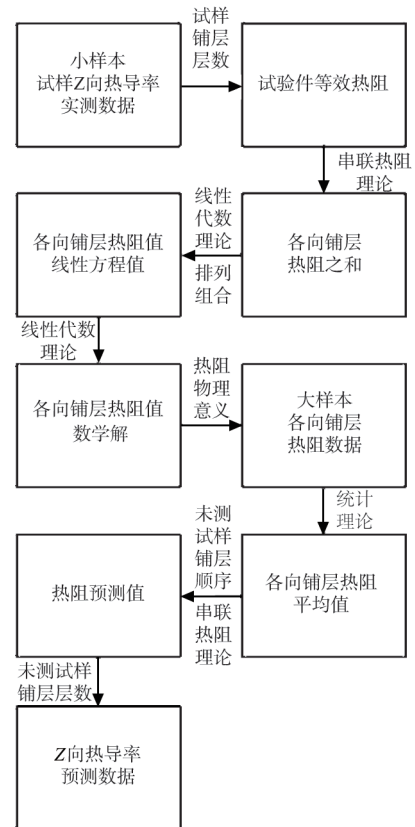


图2 Z 向热导率预测方法示意图

Fig.2 Scheme of the prediction method for thermal conductivity in Z -orientation

2 X/Y 向热导率预测方法

X/Y 向传热并联模型如图3所示,根据传递的总热量一致,可以建立以下方程

$$N_0 A_0 K_0 \left(\frac{\Delta T}{x} \right) + N_{45} A_{45} R_{45} \left(\frac{\Delta T}{x} \right) + N_{-45} A_{-45} R_{-45} \left(\frac{\Delta T}{x} \right) + N_{90} A_{90} R_{90} \left(\frac{\Delta T}{x} \right) = A_{\text{total}} K_e \left(\frac{\Delta T}{x} \right) \quad (6)$$

式中:下标代表单一铺层角度; N 为相应角度铺层的层数; A 为相应角度铺层的横截面积; x 为试样厚度; A_{total} 为试样总截面积; K_e 为复材试样的等效热导率; ΔT 为热端与冷端的温差。式(6)可进一步简化为

$$K_e = r_0 K_0 + r_{45} K_{45} + r_{-45} K_{-45} + r_{90} K_{90} \quad (7)$$

式中: r 代表各角度铺层占总层数的比例。

当得到一批试样的实测数据之后,可以利用式(7)参照 Z 向热导率的预测方法求出同一温度下 -45° 、 45° 、 0° 和 90° 铺层热导率平均值 $\bar{K}_0$ 、 $\bar{K}_{45}$ 、 $\bar{K}_{-45}$ 、 $\bar{K}_{90}$,然后再利用式(7)求出待预测铺层的 X/Y 向热导率。但是,从式(7)中可以看到, X 向或 Y 向热导率与不同角度铺层的占比有关,由于LFA检测区域内包含的只是一部分铺层(见图4),测试获取的并不是试样整体沿 X 向或 Y 向的等效热导率,并且受检测区域形状影响,不同角度铺层在其中的位置不同则横截面积不同,式(7)并不适用,单层铺层对测得的热导率数据的贡献跟其处在检测区域中的位置有关。

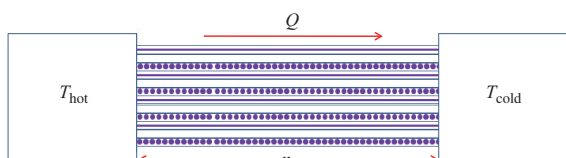


图3 X/Y 向传热并联模型

Fig.3 Shunt-wound thermal conduction model in X/Y -orientation

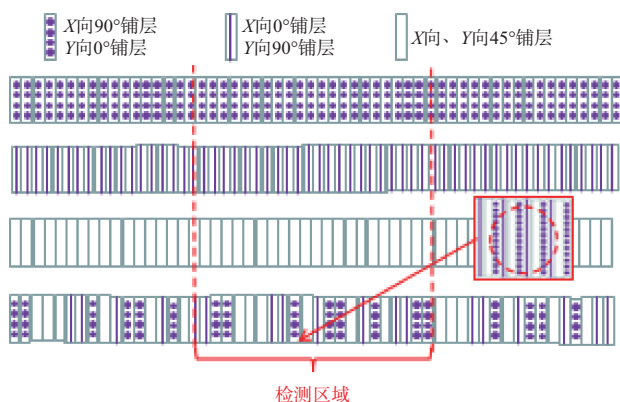


图4 LFA检测区域示意图

Fig.4 Sketch map of detection area of LFA

当试样为单一角度 θ 铺层时,如纯 0° 铺层、纯 45° 铺层,由于该角度所有铺层的总面积等于试样总面积,式(7)可以简化为

$$K_e = K_\theta \quad (8)$$

式中: K_θ 为该角度铺层的热导率。从式(8)可以看到,对于单一角度铺层的试样,测得的热导率可以认为是该角度铺层的热导率。通过测试由单一角度铺层组成的层合板 X 向和 Y 向热导率,就可以采用式(7)对常规非单一角度铺层的热导率进行计算。由对称性可知, 0° 铺层的 X 向和 Y 向热导率应分别与 90° 铺层的 Y 向和 X 向热导率相同,而 45° 铺层的 X 向和 Y 向热导率与 -45° 铺层相同,因此在实际测试中只需要测试纯 0° 铺层和纯 45° 铺层的试样在 X 向和 Y 向的热导率,就可以采用式(7)预测采用常规铺层方式的试样的热导率。

3 热导率测试

试样为88种采用不同铺层方式的复合材料层合板,平面尺寸分为 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 和 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 两种,厚度 $2 \sim 6\text{mm}$,每种试验件有两件,共计176件,用于测试 Z 向热导率的试验件有28种共56件,用于测试 X/Y 向热导率的试验件均为30种共60件。试验件外形如图5所示,取样方向如图6所示,部分铺层信息见表1, X 向和 Y 向试样中包含纯 0° 和纯 45° 铺层试样,其余均为一般混杂铺层,并且除单一角度铺层试样外, X 向和 Y 向试样的铺层顺序是 Z 向试验铺层的若干次循环叠加,以满足测试对试样平面尺寸的要求。每件试验件依次进行 -70°C 、 -50°C 、 -30°C 、 -10°C 、 10°C 、 30°C 、 50°C 、 70°C 、 90°C 共9种温度环境下的热导率测试。测试装置为耐驰LFA467激光导热仪(见图7)。

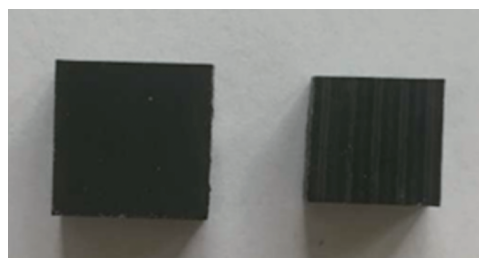


图5 试样

Fig.5 Test samples

4 预测值与实测值对比

首先利用表1中 Z 向试样实测得到的28种铺层在9种温度环境下的 Z 向热导率实测数据(共计252个),以及 X/Y

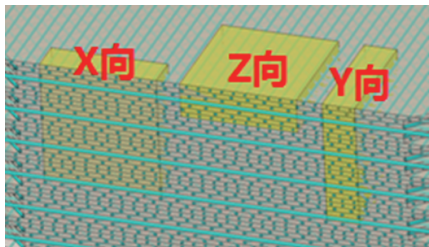


图6 取样方向

Fig.6 Sampling orientation



图7 LFA467激光导热仪

Fig.7 LFA467 laser flash apparatus

表1 试样铺层顺序

Table 1 Stacking sequence of test samples

序号	Z向试样	X/Y向试样
1	$[\pm 45/0/90/\pm 45/90/0/-45/45]_5$	$[\pm 45/0/90/\pm 45/90/0/-45/45]_5$
2	$[\pm 45/0_2/90/\pm 45]_8$	$[\pm 45/0_2/90/\pm 45/-45/45/90/0_2/-45/45]_4$
3	$[\pm 45/0/90/0/90/\pm 45/0]_8$	$[\pm 45/0/90/0/90/\pm 45/0_2/-45/45/90/0/90/0/-45/45]_3$
...	...	...
28	$[\pm 45/90_2/0/\pm 45/0/90_2/-45/45]_4$	$[\pm 45/90_2/0/\pm 45/0/90_2/-45/45]_4$
29		$[0]_{54}$
30		$[45]_{54}$

向试样实测得到的30种铺层在9种温度环境下的X/Y向热导率实测数据(X、Y向各270个),按照前述热导率预测方法计算得到各试样在相应温度下的热导率预测值。为分析热导率预测方法的预测精度,对比实测值与相应铺层顺序下的预测值之间的相对误差,相对误差按式(9)计算

$$e = \frac{|\text{实测值} - \text{预测值}|}{\text{实测值}} \quad (9)$$

将预测值与实测值的相对误差分别在1%、3%、5%、10%、15%和20%以内的数据个数进行统计,计算不同相对误差范围内的数据占比,三个方向预测值与实测值相对误差分布情况如图8~图10所示。由此可以看到,在当前测试数据下96%的Z向热导率和97%的X向热导率预测值和实

测值相对误差在20%以内,85%的Y向预测值和实测值相对误差在20%以内。相较于参考文献[5]中基于纤维和基体热导率,采用三种预测模型得到的单向铺层热导率预测结果与实测结果之间仅有40%(parallel model)、67%(network model G)、7%(network model H)的数据相对误差在20%以内,本方法预测精度较高。此处X向和Y向热导率预测值是采用纯0°铺层和纯45°铺层的热导率数据按照式(7)进行预测的,在前述内容中提到对于一般混杂铺层,LFA测试到的不是试样整体沿X向或Y向的等效热导率,之所以预测值仍然与LFA实测值整体比较接近,是由于用于测试X向和Y向热导率的试样铺层方式为一定铺层顺序的循环排列,因此检测区域的传热特性与整体的传热特性比较接近。

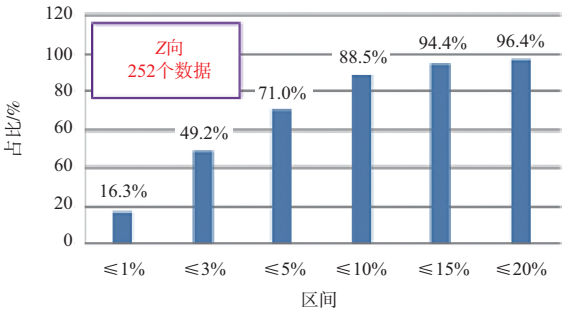


图8 Z向预测值与实测值相对误差分布情况

Fig.8 Distribution of relative error between the predicted and test value in Z-orientation

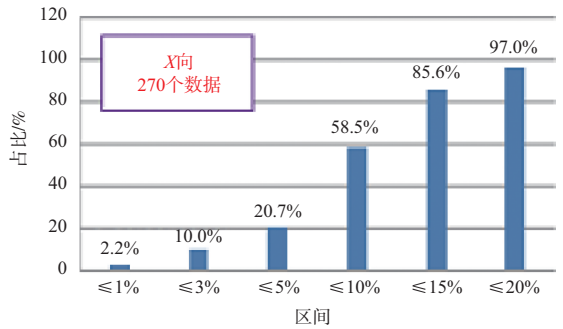


图9 X向预测值与实测值相对误差分布情况

Fig.9 Distribution of relative error between the predicted and test value in X-orientation

5 结论

针对一般混杂铺层的复合材料层合板,提出了预测其X向、Y向和Z向等效热导率的预测方法,指出了LFA在测试层合板X/Y向等效热导率方面的局限性,得到了以下结论:

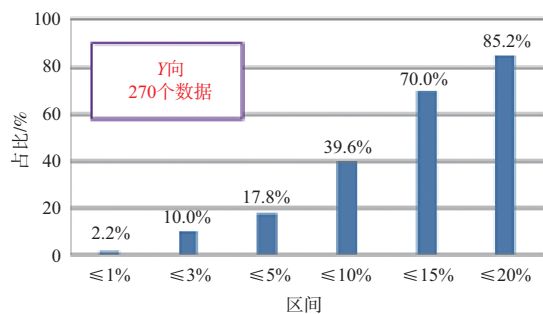


图10 Y向预测值与实测值相对误差分布情况

Fig.10 Distribution of relative error between the predicted and test value in Y-orientation

(1) 混杂铺层层合板等效热导率与单向铺层热导率的关系可以用 X/Y 向热导率并联传热模型、 Z 向热导率串联传热模型描述。

(2) LFA在测试单一角度铺层试样 X/Y 向热导率时可以认为测得的是等效热导率,而测试一般混杂铺层 X/Y 向热导率时测得结果并不代表等效热导率。

(3) 提出的复材层合板三向热导率预测方法不依赖纤维和基体数据、不包含复杂参数、适用于混杂铺层试样,预测精度较高。

AST

参考文献

- [1] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
Ma Limin, Zhang Jiazhen, Yue Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2015, 32(2): 317-322. (in Chinese)
- [2] 程健男, 徐福泉, 张体磊. 树脂基复合材料在直升机的应用及其制造技术[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 109-114.
Cheng Jiannan, Xu Fuquan, Zhang Tilei. Application and manufacturing technology of composites in helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 109-114. (in Chinese)
- [3] 李仕通, 彭超义, 邢素丽, 等. 导热型碳纤维增强聚合物基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(7): 79-84.
Li Shitong, Peng Chaoyi, Xing Suli, et al. Research progress on thermal conductivity of carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Materials Review, 2012, 26(7): 79-84. (in Chinese)
- [4] 钟铁峰, 张亮亮, 周小平, 等. 复合材料热传导性能的变分渐近均匀化细观力学模型[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 1173-1178.
Zhong Yifeng, Zhang Liangliang, Zhou Xiaoping, et al. Variational asymptotic homogenization micromechanics model for thermal conductivity of composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2015, 32(4): 1173-1178. (in Chinese)
- [5] 李仕通. 铺层方式对碳纤维/环氧复合材料导热性能的影响研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Li Shitong. Study on the effect of lay-up on the thermal conductivities of carbon fiber/epoxy resin composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 张肖肖, 赵旭升, 秦强, 等. 飞机蒙皮与内饰组合结构热阻预测方法研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(6): 43-49.
Zhang Xiaoxiao, Zhao Xusheng, Qin Qiang, et al. The prediction method for the thermal resistance of the assembled structure made of the skin and the interior[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(6): 43-49. (in Chinese)
- [7] 程磊. 三维互穿网络结构复合材料有效热导率的有限元计算[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Cheng Lei. Finite element calculation of effective thermal conductivity of three-dimensional interpenetrating network structure composites[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [8] Gou J J, Zhang H, Dai Y J, et al. Numerical prediction of effective thermal conductivities of 3D four-directional braided composites[J]. Composite Structures, 2015, 125: 499-508.
- [9] 左可军, 闻洁. 预测平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的三维纤维随机模型[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1326-1335.
Zuo Kejun, Wen Jie. Three-dimensional fiber random model to predict effective thermal conductivity of plain braided C/SiC composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1326-1335. (in Chinese)
- [10] Zhang Y F, Zhao Y H, Bai S L, et al. Numerical simulation of thermal conductivity of graphite filled polymer composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 106: 324-331.
- [11] Yan D, Wen J, Xu G. A Monte Carlo simulation and effective thermal conductivity calculation for unidirectional fiber reinforced CMC[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 94: 827-835.

Prediction Method for the Thermal Conductivity of the Composite Material Laminates Based on Test Data

Zhang Xiaoxiao, Zhang Cibao, Qin Qiang, Cong Linhua

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: In this paper, a prediction method for the equivalent thermal conductivity in X, Y and Z-orientation of hybrid-laminated composite material is present, including the localization in the test for the equivalent thermal conductivity in X/Y-orientation using laser flash apparatus (LFA). Under this method the thermal conductivity in the different orientation of single angle laying could be calculated through the test data of a few of hybrid-laminated samples, which is not related with the thermal conductivity of the fiber or the matrix. Then the predicted value of the equivalent thermal conductivity of untested laminated sample could be achieved by the shunt-wound thermal conduction model in X/Y-orientation and the series-wound thermal conduction model in Z-orientation. This prediction method shows good consistency comparing predicted value with the test data. And then the prediction software is designed.

Key Words: thermal conductivity; prediction method; laminates; thermal conduction model

飞机疲劳可靠性专辑



执行主编 鲍 蕊

有成效的研究。

由《航空科学技术》策划出版的“飞机疲劳可靠性”专辑，在第一期面向工程需求背后的科学问题，发现新现象，研究新规律，提出新方法的基础上，本期进一步聚焦于航空主机厂所的研究人员针对在新材料、新工艺、新结构、新方法应用过程中出现的一些新问题，对现有方法所做的改进、对新材料和新结构以及新的疲劳失效模式开展的试验、对虚拟试验方法等进行的探索等。

希望这些研究成果能够在工业界得到更广泛的应用；同时，也期望学术界的研究人员能够从中发现更多的科学问题，开展更深入的研究，以更好地支撑我国飞机型号的寿命评定和管理，共同提升结构的设计水平。

