

界面热阻实验装置与碳纤维增强板胶接热阻研究

王向往¹, 胡 芑¹, 刘 阳²

(1.中国科学技术大学热科学和能源工程系,安徽合肥 230027;2.上海跃盛信息技术有限公司,上海 200240)

摘要: 碳纤维增强板(CFRP)胶接结构是高精度固面反射器的重要组成部分,而热载荷是反射器在轨飞行的主要载荷,胶接部位的界面热阻对高精度固面反射器在轨运行状态的温度分布有重要影响.根据界面热阻测量原理,设计了一套可测量真空环境中不同温度下CFRP单片结构的热导率和胶接结构的界面热阻的实验装置.并且通过304不锈钢热导率的实验测量值与标准值的对比,验证了实验装置的准确性.通过对环氧树脂胶添加高热导材料,提高了它的热导率.实验中采用了3种添加剂:氮化硅(β - Si_3N_4)、氧化铝(Al_2O_3)、石墨烯.实验结果表明,随着添加剂体积分数的增加,热导率也随之增大,进而可以强化胶接部位的传热,减小界面热阻.在其他条件一致的情况下,胶接件的界面热阻随温度的升高而减小.

关键词: 热导率;界面热阻;传热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.07.010

引用格式: 王向往,胡芑,刘阳,等. 界面热阻实验装置与碳纤维增强板胶接热阻研究[J]. 中国科学技术大学学报,2018,48(7):600-604.

WANG Xiangwang, HU Peng, LIU Yang, et al. Study on experimental device and measurements for interface thermal resistance of adhesive structure of CFRP[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(7):600-604.

Study on experimental device and measurements for interface thermal resistance of adhesive structure of CFRP

WANG Xiangwang¹, HU Peng¹, LIU Yang²

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Shanghai Yuesheng Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The adhesive structure of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) is an important part of the high precision solid surface reflector, the thermal load is the main load of the reflector in orbit, and the interface thermal resistance has an important influence on the temperature distribution of high precision solid surface reflector in orbit. According to the principle of interface thermal resistance measurement, an experimental device was designed to accurately measure the thermal conductivity of CFRP monolithic structure and the interface thermal resistance of cementation structure at different temperatures. The accuracy of the experimental device was verified by comparing the measured thermal conductivity of 304 stainless steel with the standard values. To improve the thermal conductivity of epoxy resin, three single

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(51576187)资助.

作者简介: 王向往,男,1992年生,硕士.研究方向:固体界面接触热阻. E-mail: wxxw@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 胡芑,博士/副教授. E-mail: hupeng@ustc.edu.cn

additives were introduced: silicon nitride ($\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$), alumina (Al_2O_3), and graphene. The experimental results show that as the volume fraction of additives increases, the thermal conductivity also increases, thus enhancing the heat transfer at the bonding sites and reducing the interface thermal resistance. Under the same conditions, the interface thermal resistance of the adhesive decreases with the increase of temperature.

Key words: thermal conductivity; interface thermal resistance; heat transfer

0 引言

碳纤维增强板(CFRP)作为一种优质的复合材料,具有质量轻、耐疲劳强度高、耐腐蚀和热性能优异等特点,因而被广泛应用于工程中,例如桥梁加固^[1]、维修及各类民工建设^[2]。此外,由于它的优良性质,还被广泛应用于军事、航空、赛车等领域^[3]。针对我国新一代遥感气象监测卫星、深空探测卫星对高精度反射器的需求,将 CFRP 这种材料用作固面反射器的材料具有很大优势。然而,高精度固面反射器在轨飞行时,会经历极为恶劣的热环境,为保证反射器正常工作,需要对反射器进行严格的温度控制。空间热载荷作为其主要载荷,会使其产生热应力和热变形。为有效预测高精度固面反射器在轨运行状态的温度分布,以便对其实施合理的热控设计,需要构建出精确的热分析模型,得到其温度场分布。因为固面反射器中界面热阻对温度场的影响很大,所以需要对接接件中界面热阻进行测量和传热优化工作。

目前有很多文献都对界面热阻进行过归纳总结^[4-5],也有不少文献对界面热阻进行了比较深入的理论分析^[6],但是大部分介绍的都是固体界面直接接触,界面热阻产生的原因主要是由于表面并非绝对光滑^[7],需要考虑压力等因素对界面热阻的影响。而胶接结构是用环氧树脂胶直接粘接,因此胶体本身的热物性对界面热阻影响比较大。所以对界面热阻优化的主要目标就放在了优化胶体本身的传热性能上。通过给胶体添加高热导材料,例如石墨烯、石墨等^[8],可以提高胶体的热导率。江悦^[9]详细介绍了添加石墨烯对环氧树脂胶热导率的影响。周柳^[10]也对胶体添加其他高热导材料制成的复合材料热物性进行了详细的介绍。界面热阻测量最常用的方法就是稳态法,也有用瞬态法来测试界面热阻的。徐烈^[11]等介绍了低温环境下固体界面的界面热阻研究情况,采用的双热流法减少了辐射的影响,能测量圆柱型或者薄片型试样间的界面热阻,还能同时测量材料本身的热导率。但其研究的也是固面直接接

触,没有涉及胶接结构。CFRP 胶接件所构成的固面反射器在轨飞行时热环境极其恶劣,因此我们搭建了一套真空环境下从低温到高温都能准确测量的装置,并且研究了添加不同高热导材料对胶体和界面热阻的传热性能的优化。

1 实验原理与装置

热分析模型的建立需要通过地面试验和测试来获取必要的的数据,因而需要一套适合的试验装置来进行所需的实验测量。固面反射器中常见的结构为 CFRP 板胶接结构,分为插接和对接,所以试验装置要求既能测量单一薄片状 CFRP 板传热过程中的温度分布,又能对接接结构的 CFRP 试件传热过程中的温度场进行准确测量。同时,通过温度场的分布及其他数据,能计算得到胶接部位的界面热阻。固体界面热阻的实验研究有很多^[4],方法主要有稳态法和瞬态法这两种,其中稳态法的应用更为广泛。稳态法是通过构建一维导热过程,当热量通过两个部件的接触面并达到热稳定状态时,测量出通过接触面的热流密度和接触面两侧的温度降,便可根据公式(1)计算该界面热阻^[12]。

$$R = \frac{A\Delta T}{Q} \quad (1)$$

式中, R 为界面热阻; A 为接触面积; ΔT 为两接触面的温度差; Q 为通过界面的热流。

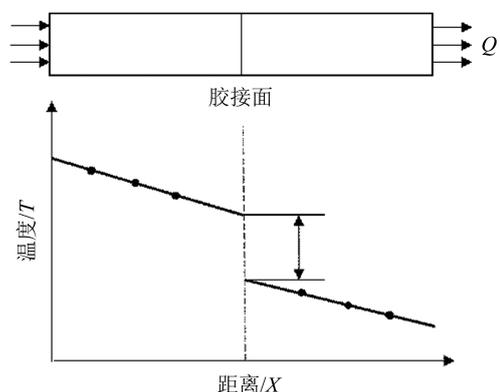
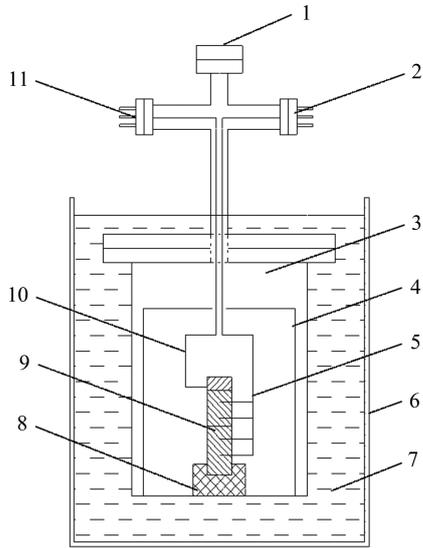


图 1 接触界面温降示意图

Fig.1 Schematic diagram of temperature change at the contact interface

根据图 1 所示,通过在试样上布置适当数目的热电偶测得各个位置的温度,可以得到温度与距离的关系.如果忽略辐射和对流,那么温度点在图中应为直线,然后把温度点连线延伸至胶接界面,便可以得到界面处温差.热流量可以通过电加热功率计算或由样品材料的热导率和温度梯度计算得到^[10].

参照美国国家标准 ASTM D5470-17 中的测试方法^[13],再根据界面热阻产生的机理和实验原理,我们设计了一套真空实验测试装置,如图 2 所示.



1.真空法兰,接真空泵;2.引线法兰,接数据采集仪;3.真空容器;4.防辐射屏;5.热电偶;6.液氮容器;7.恒温液;8.夹持片;9.测试件;10.加热导线;11.引线法兰,接电源.

图 2 界面热阻实验测量装置

Fig.2 The device for experimental measurement of interface thermal resistance

其中测试件部分为长条薄片型结构.测量 CFRP 板和 304 不锈钢热导率时,试件规格都为 $80\text{mm} \times 28\text{mm} \times 0.6\text{mm}$.测量胶接结构界面热阻时,所采用的试件为两个规格为 $40\text{mm} \times 28\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 的 CFRP 板相对粘接而成,整体规格也为 $80\text{mm} \times 28\text{mm} \times 0.6\text{mm}$.

实验时,从测试件中部,分别在上下方向每隔 10 mm 取 1 个采集点,上下各取 2 个温度采集点,共 4 个,如图 3 所示.实验过程中,保证相邻温度采集点温差不超过 10 K,认为此时两个采集点的平均温度为测试件热导率或者界面热阻对应的温度值.

实验中真空容器内的真空度可达到 6.5×10^{-3} Pa,因此可以忽略实验中的对流,在测试件的周围有多层隔热组件用来隔热辐射换热.实验过程中,试样底部直接夹持在真空容器底部,同时,把真空容

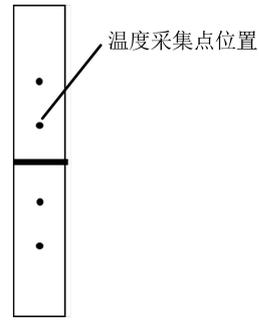


图 3 测试件温度采集点位置

Fig.3 Position of temperature collection point of test piece

器整个放入液氮中,这样夹持装置温度与液氮温度相同,起到热沉的作用.实验中,为了避免较大温差所带来的误差,在较高温度范围内测量时,液氮可换成干冰或者冰水混合物.试样上部用薄膜电加热片进行温度控制,同时为了进一步减小辐射热损,在隔热组件上部也同样使用薄膜电加热片控制其温度与试件相同,进一步减小辐射热损.温度采用铜-康铜热电偶(美国 OMEGA)测量,使用前进行校正,热电偶线径仅 0.254 mm,可尽量减小导热热损.

2 结果与分析

为了验证实验装置测量的准确性,首先测量了 304 不锈钢的热导率.以德国 NETZSCH 公司生产的 LFA 457 型号的激光热导仪测得的数据作为标准值,与实验装置测得的实验值进行对比.图 3 为实验值与标准值对比结果,其中均偏差为 2.01%,说明实验装置测得的数据是可信的.在高温时误差比低温大,主要是由于高温时辐射损失相对较大.

图 4 是用装置测得的不同温度下 CFRP 板的热导率,从 180K 到 420K,每 60K 测 1 个点.从图中可以

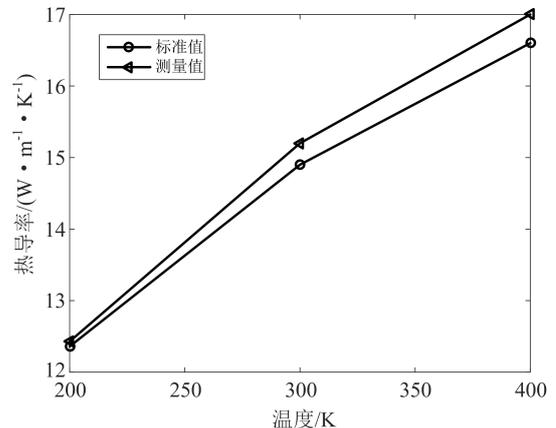


图 4 304 不锈钢热导率标准值与测量值比较

Fig.4 Comparison of standard values and measured values of the thermal conductivity of 304 stainless steel

看到,热导率随温度的升高而降低,但整体范围变化不大,最大值与最小值之差为 $0.184\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

本研究采用氮化硅($\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$)、氧化铝(Al_2O_3)、石墨烯三种高导热粉末材料增强环氧树脂热导率。 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 为灰白色粉末状晶体,粉末粒度 20 nm,热导率可达 $180\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [14],由国药集团化学试剂有限公司提供。 Al_2O_3 为半透明粉末,热导率可达 $36.0\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [15],由国药集团化学试剂有限公司提供。石墨烯热导率为 $1210\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,由苏州碳丰石墨烯科技有限公司提供。

图 5 为 300 K 时复合材料热导率随高导热材料质量分数变化的测量值。由图可知,在添加高热导材料后,胶体热导率有明显提高,特别是石墨烯粉末在添加到质量分数 15% 时,热导率提高了约 200%。但是持续添加更大比例高热导材料粉末时,则会导致胶体黏度过大,无法混合均匀,且可能会降低胶体的黏结强度。

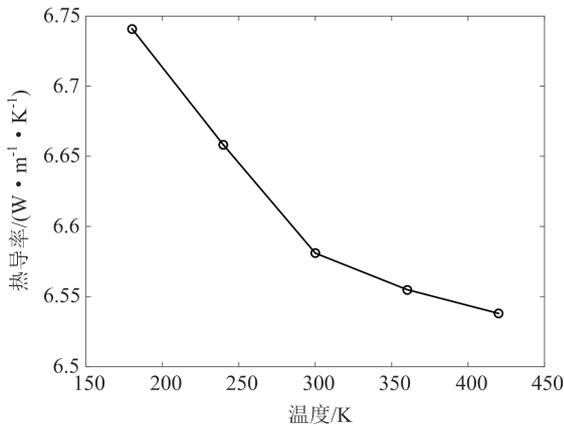


图 5 不同温度下 CFRP 板热导率

Fig.5 Thermal conductivity of CFRP at different temperatures

添加颗粒物的复合材料的热导率也可用 Hamilton-Crosser(H-C)模型计算[16]:

$$\frac{k_c}{k_o} = \frac{k_p + (n-1)k_o - (n-1)(k_o - k_p)f}{k_p + (n-1)k_o + (k_o - k_p)f} \quad (2)$$

式中, k_p 是添加剂的热导率; k_o 是胶体的热导率; f 是添加剂的体积分数; n 值随添加剂形状的不同而有不同取值。本研究中,所添加的高导热材料粉末中,氮化铝与氮化硅都可近似为球体,取 $n=3$,石墨烯为片状结构,取 $n=8.33$ [17]。H-C 模型的计算结果如图 6 所示,与实验值符合较好,测量值与计算值之间的平均偏差对于氧化铝为 3.12%,氮化硅为 4.83%,石墨烯为 2.69%。因此 H-C 模型能够较好地计算环氧树脂复合材料的热导率。

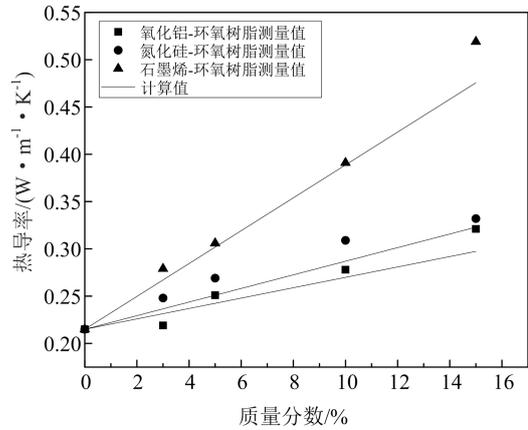


图 6 环氧树脂胶添加不同添加剂后的复合材料热导率对比
Fig.6 Comparison of thermal conductivity of epoxy resin with different additives

图 7 是胶接结构中胶体添加不同材料(质量分数 10%) 时界面热阻随温度变化的测量结果,温度范围从 180 K 到 420 K,每 60 K 测 1 个点。实验中胶体层均为 0.20 mm 左右,以保证胶体本身的粘接作用。如图 7 所示,温度是影响界面热阻的一个重要因素,温度越高,界面热阻越小,但是下降趋势会逐渐变缓。这主要是因为胶体的热导率随着温度的升高而升高。同时,不同的添加剂也对界面热阻有一定影响,其中石墨烯因自身热导率最大,对减小界面热阻的影响最大,因此可以有效改善碳纤维增强板胶接结构的传热特性。

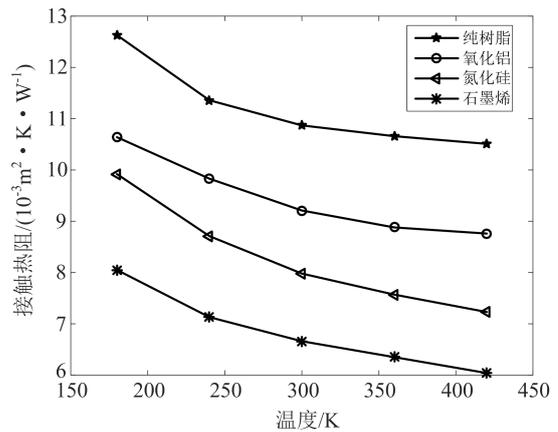


图 7 胶接结构中胶体添加不同材料(质量分数 10%) 时界面热阻随温度变化

Fig.7 The interfacial thermal resistance vary with different temperatures when colloids added by different materials (10% mass fraction) in the bonding structure

3 结论

本文采用稳态法设计了一套实验装置,并且用

这个装置测量了不同温度下材料的热导率和胶接结构的界面热阻.同时,对环氧树脂添加了高导热材料以改善胶体本身和胶接试件的传热性能.最终得出以下结论:

(I)所搭建的试验台能够在真空环境下和 180~420K 温度范围内测量材料热导率和胶接结构的界面热阻.

(II)通过在胶体内添加高导热材料可有效提高其热导率,添加材料的热导率越高,所制成的复合胶体材料热导率也越高,在石墨烯质量分数达到 15% 时,热导率提高了近 200%.而且环氧树脂热导率与添加高导热材料的质量分数之间的关系可以比较好地符合 H-C 模型.

(III)在胶体层厚度一定的条件下,由于胶体本身的热导率随温度的升高而增大,因此界面热阻随温度的升高而减小.同时,在用导热填料改善胶接件传热性能时,添加石墨烯的复合胶体所连接的胶接件界面热阻最小.

参考文献(References)

- [1] 陈开利. CFRP 材料在桥梁加固工程中的应用[J]. 桥梁建设, 2001(1):44-45.
CHEN Kaili. The application of CFRP in the strengthening of bridges[J]. Bridge Construction, 2001(1):44-45.
- [2] 王奇. CFRP 材料在土木工程中的应用现状及前景[J]. 水泥工程, 2010(1):63-65.
WANG Qi. Application state of Carbon Fiber Reinforced Polymers in strengthening technology of civil engineering[J]. Cement Engineering, 2010(1):63-65.
- [3] 肖加余, 曾竟成, 彭超义. 碳纤维复合材料作为主承力结构在航空航天上的应用[C]// 第十三届全国复合材料学术会议论文集, 2005: 1258-1264.
- [4] 张平, 宣益民, 李强. 界面接触热阻的研究进展[J]. 化工学报, 2012, 63(2):335-349.
ZHANG Ping, XUAN Yimin, LI Qiang. Development on thermal contact resistance [J], CIESC Journal, 2012, 63(2):335-349.
- [5] 任红艳, 胡金刚. 接触热阻的研究进展[J]. 航天器工程, 1999(2):47-57.
REN Hongyan, HU Jingang. The development of thermal contact resistance[J]. Spacecraft Engineering, 1999(2):47-57.
- [6] 湛利华, 李晓谦, 胡仕成. 界面接触热阻影响因素的实验研究[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(9):40-43.
ZHAN Lihua, LI Xiaoqian, HU Shicheng. Experiment research for the interfacial thermal contact resistance [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2002, 30(9):40-43.
- [7] ROSTAMI A A, HASSAN A Y, LIM P C. Parametric study of thermal constriction resistance[J]. Heat & Mass Transfer, 2001, 37(1):5-10.
- [8] BALANDIN A A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials[J]. Nature Materials, 2011, 10(8):569.
- [9] 江悦. 石墨烯/环氧树脂复合材料导热性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- [10] 周柳. 环氧树脂基导热绝缘复合材料的制备与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- [11] 徐烈, 张涛. 双热流法测定低温真空下固体界面的接触热阻[J]. 低温工程, 1999(4):185-189.
XU Lie, ZHANG Tao. Using double heat flux meter method to measure the thermal contact resistance of solid material at low temperature and vacuum [J]. Cryogenics, 1999(4):185-189.
- [12] MO Y, SEGAWA S. Thermal contact resistance measurements[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2012, 19(6):561-569.
- [13] ASTM D5470-17, standard test method for thermal transmission properties of thermally conductive electrical insulation materials[S]. West Conshohocken, PA, USA:ASTM International, 2017.
- [14] WATARI K, LI B C, POTTIER L, et al. Thermal conductivity of β -Si₃N₄ single crystal [J]. Key Engineering Materials, 2000, 181-182: 239-242.
- [15] BERGMAN T L, LAVINE A, INCROPERA F P, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. 7th ed. John Wiley & Sons, 2011: 987.
- [16] HAMILTON R L, CROSSER O K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1962, 1(3): 187-191.
- [17] SHAFIE S, GUL A, KHAN I. Molybdenum disulfide nanoparticles suspended in water-based nanofluids with mixed convection and flow inside a channel filled with saturated porous medium [J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1775(1): 030042.