

CFRP 板胶接结构传热性能的数值模拟

宋晓倩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: 应用 ANSYS 有限元分析研究了碳纤维增强复合材料(CFRP)格栅反射器中对接和插接典型胶接结构形式的稳态传热特性, 并对环氧树脂添加氧化铝、氮化硅、石墨烯等高导热材料对传热的影响进行了对比分析. 结果表明, 随着环氧树脂胶热导率的提高, 胶接界面热阻减小, 胶接部位温差减小, 温度分布均匀性更高. 此工作为有效预测固面反射器在轨运行状态的温度分布和热变形大小提供了研究基础.

关键词: 碳纤维增强复合材料(CFRP)格栅反射器; 对接; 插接; 界面热阻

中图分类号: V229+.9 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.06.008

引用格式: 宋晓倩, 胡芑, 刘阳. CFRP 板胶接结构传热性能的数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(6): 487-493.

SONG Xiaoqian, HU Peng, LIU Yang. Numerical simulation of heat transfer performance of CFRP plate adhesive structure[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(6): 487-493.

Numerical simulation of heat transfer performance of CFRP plate adhesive structure

SONG Xiaoqian¹, HU Peng¹, LIU Yang²

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

Abstract: The steady-state heat transfer characteristics of typical bonding structures such as butting and splicing in carbon fiber reinforced composite (CFRP) grille reflector were analyzed by ANSYS finite element method. The effects of epoxy resin with high thermal conductivity materials such as alumina, silicon nitride and graphene on heat transfer were compared and analyzed. The results show that with the increase in thermal conductivity of epoxy resin adhesives, the thermal resistance of the bonding interface decreases, the temperature difference of bonding site decreases, and the temperature distribution uniformity is higher, thus providing a research basis for effectively predicting the temperature distribution and thermal deformation of solid reflectors in orbit.

Key words: carbon fiber reinforced composite (CFRP) grille reflector; butt; splice; interface thermal resistance

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-02-20

作者简介: 宋晓倩, 女, 1993年生, 硕士生. 研究方向: 传热. E-mail: sasong@mail.ustc.edu.cn

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

0 引言

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced composite 或 carbon fiber reinforced plastic, 简称 CFRP)是一种优质的复合材料,因其质量轻、比刚度高、热性能优异以及可设计性强等优点而在航空航天领域具有广泛的应用^[1-2]. 此时复合材料的连接成为不可避免的问题,胶接连接相比于机械紧固件具有质量轻、密封性好以及抗疲劳等优点^[3],其应用日渐广泛.

近年来,国内外学者对胶接结构开展了大量研究工作. Na^[4]制备出对接接头、单搭接接头和围中接头,通过实验获得了接头强度与温度场的关系. Hu 等^[5]通过接头准静态剪切强度试验、响应面法、目视观察和扫描电镜观察,得出长期温度暴露会导致接头强度和破坏位移下降. Banea^[6]通过实验和数值模拟探究了温度对单搭接接头强度的影响,利用双线性内聚损伤模型预测出两者之间的关系. 庞博^[7]通过实验及仿真的手段探究了循环温度场对钢/铝 T 型搭接的非平衡胶接接头强度破坏的影响,提出胶黏剂层的疲劳退化模型,进而更加准确地预测 T 型搭接在循环温度场中疲劳强度破坏的进程. 曹蕾蕾^[8]利用有限元方法对单搭接接头承受热载荷时的温度场和热应力分布进行了数值模拟,得出峰值热应力出现在搭接区边缘,并且随着胶层厚度的增加热应力分布趋于均匀. Korta^[9]利用有限元分析研究了恶劣环境对多材料粘接接头剪切强度和抗拉强度的影响,得出温度膨胀系数是影响异种材料接头性能的关键因素. Deb^[10]研究了温度和应变

速率对环氧粘接双搭接(DLS)钢接头准静态响应的影响;并利用 Von Mises 和 Raghava 屈服准则对提出的考虑材料非线性的粘接 DLS 接头的力学行为的半解析解法进行预测,得出在高温 82℃ 下,接头表现出较高的应变速率敏感性,与常温下相比,接头强度明显降低.

以上研究主要针对恶劣环境对接头胶接强度、失效及破坏机理的影响,但对复杂胶接结构的温度场分布研究甚少,且实验研究对象多为金属材料. 温度分布的均匀性直接影响胶接结构热稳定性,进而影响 CFRP 板固面反射器的精度. 本文运用有限元方法模拟 CFRP 板垂直对接、倾斜对接及插接等典型胶接结构的温度场分布,并通过增大环氧树脂胶热导率,探究界面热阻对胶接结构温度场的影响,为 CFRP 板固面反射器在轨运行过程中胶接结构热分析优化问题提供一定的研究基础.

1 胶接结构有限元模型建立

1.1 胶接结构物理模型

本文利用 ANSYS Workbench 平台稳态传热模块对垂直对接、倾角为 30° 和 60° 的斜对接以及插接等胶接结构的温度场分布进行仿真分析计算. 以上胶接结构的物理模型如图 1 所示. 被粘物为碳纤维增强复合板(CFRP),其模型结构尺寸如图 2 所示,分别为 $L=80\text{mm}$, $w=28\text{mm}$, $t=0.6\text{mm}$. 粘接剂为环氧树脂胶,胶层厚度均设定为 $t_1=0.2\text{mm}$. 为简化模型,不考虑粘接剂受挤压溢出被粘物形成的胶瘤. 环氧树脂胶和 CFRP 板热导率取值分别为 $\lambda_{\text{epoxy}}=0.215\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_{\text{CFRP}}=6.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[11].

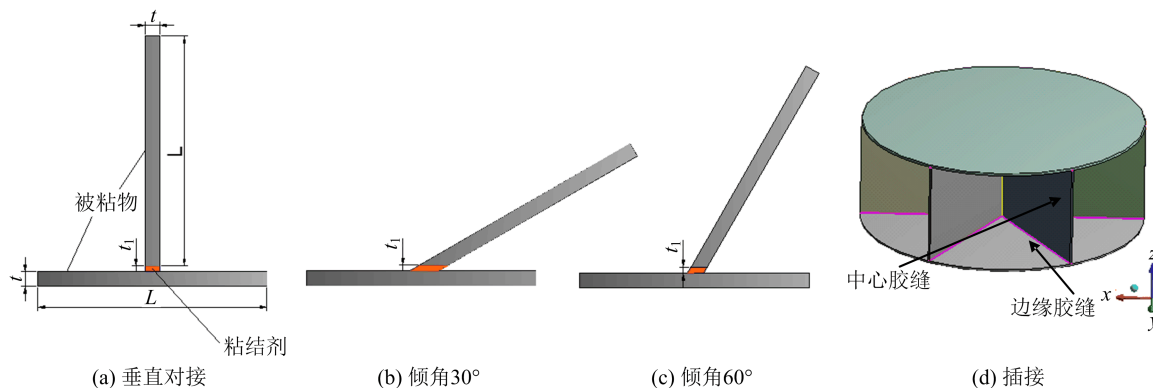


图 1 胶接结构物理模型

Fig. 1 Physical model of the cementing structure

1.2 网格划分

胶接结构形状规则,因此在进行网格划分时采

用六面体单元,运用局部网格 Sweep Meshing 进行划分. 为保证计算精度,对胶层及粘接部位网格进行

加密. 以垂直对接为例, 网格划分如图 3 所示. 另外网格过疏或过密也会影响计算结果的准确性, 需对网格进行独立性验证. 本文通过监视胶层中心点温度的变化来选择合适的网格数量, 最终得到垂直对接网格单元数 9682, 节点数 69042.

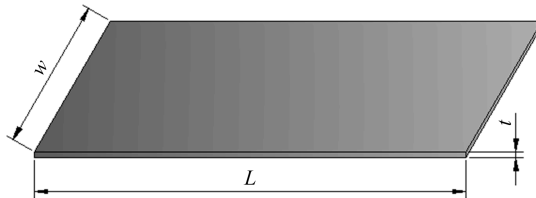


图 2 CFRP 板尺寸图

Fig. 2 Size chart of the CFRP board

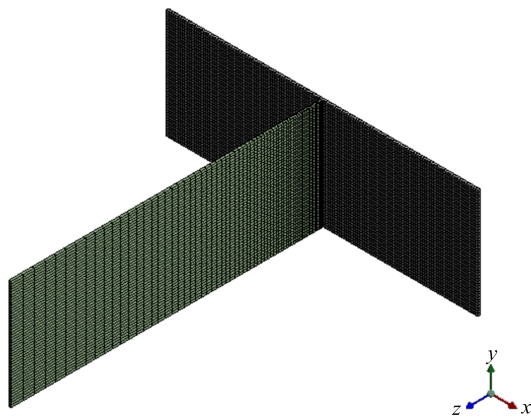


图 3 垂直对接有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh of the vertical docking

1.3 边界条件

太空环境具有超真空、低温及微重力的特点^[11], 因此 CFRP 格栅反射器的传热形式为热传导与热辐射. 利用 ANSYS Workbench 平台进行稳态热分析时, 其有限元平衡方程为

$$[K] \{T\} = \{Q\}$$

式中, $[K]$ 是热传导矩阵, 包括传热系数、对流系数、辐射系数和形状系数; $\{T\}$ 是节点温度向量; $\{Q\}$ 是节点热流率向量, 包括热生成.

为后续开展试验验证工作(试验拟采用液氮进行冷却), 因此在进行模拟计算时, 背景黑体温度设置为 -196°C . 以垂直对接为例, 在水平板两端同时加载相同的热流密度, 冷端为垂直板上端, 与环境进行辐射换热, 辐射率为 0.96, 如图 4 所示. 最终当结构达到稳态时, 温度分布为热传导/辐射耦合的结果.

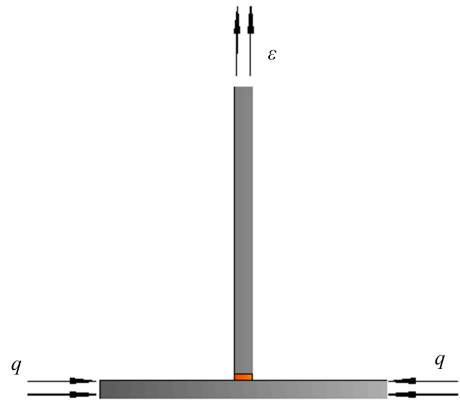


图 4 热边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of thermal boundary conditions

2 胶接结构仿真分析

2.1 对接胶接结构温度场分布

CFRP 格栅反射器进入轨道后, 所接受的外热流主要来源于太阳直接辐射热流和地球红外辐射热流, 其热平衡关系如下:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6$$

式中, Q_1 为太阳直接辐射加热; Q_2 为地球对太阳的反照加热; Q_3 为地球红外辐射加热; Q_4 为反射器内热源; Q_5 为反射器导热、辐射换热; Q_6 为反射器内能变化.

外热流的分布具有周期性, 在地球阴影区内, 格栅反射器不能接受到太阳热流的照射, 其太阳辐射热流为零, 而在日照区为 1353 W/m^2 ; 地球红外辐射热流取全年平均为 220 W/m^2 ^[12]. 考虑热流分布周期性的影响, 在对垂直、斜接等对接胶接结构进行仿真分析时, 设定热流密度 220 W/m^2 . 不同对接结构温度场云图如图 5 所示. 通过观察各结构温度场分布可以发现, 在对接结构中温度分布规律相同, 均呈线性分布, 但不同倾斜角度的胶层附近的温度分布存在差异. 图 6 为对接结构水平 CFRP 板的温度曲线, 可以发现在水平 CFRP 板中温度从板两端向中心呈对称递减趋势, 在板中心即胶层位置处温度达到最低值, 其中垂直对接比倾斜对接结构温度略高, 温度为 32.8°C . 这是由于粘接角度不同, 三种对接结构胶层宽度分别为 $W_{\text{垂直}} < W_{\text{倾角}60^{\circ}} < W_{\text{倾角}30^{\circ}}$, 环氧树脂胶热导率远小于 CFRP 板, 因此在中心胶层处, 垂直对接温度略高. 图 7 为对接结构倾斜 CFRP 板的温度曲线, 可以发现倾斜 CFRP 板中温度从胶层位置向端部呈递减趋势, 尤其是在胶层附近温差较大, 其中在垂直对接结构中温

差最大,在距胶层 4 mm 处达到 0.7℃.

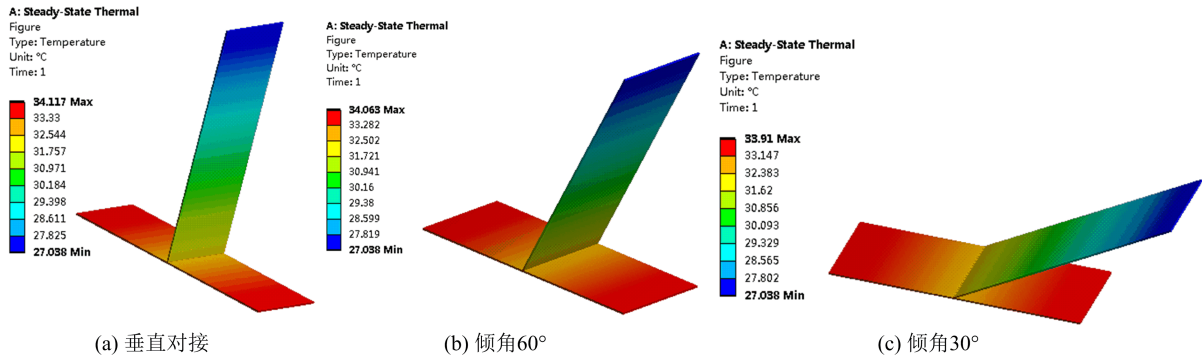


图 5 对接结构温度场云图

Fig. 5 Temperature field cloud chart of the docking structure

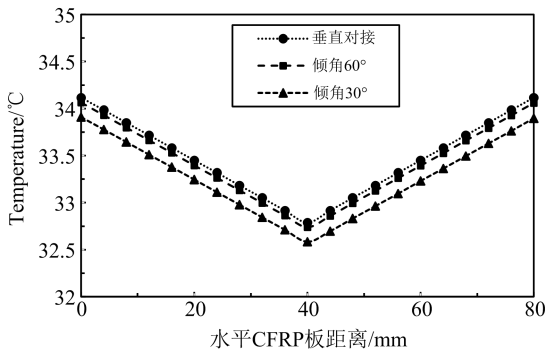


图 6 不同对接结构水平 CFRP 板温度曲线

Fig. 6 Temperature curves of horizontal CFRP plates with different docking structures

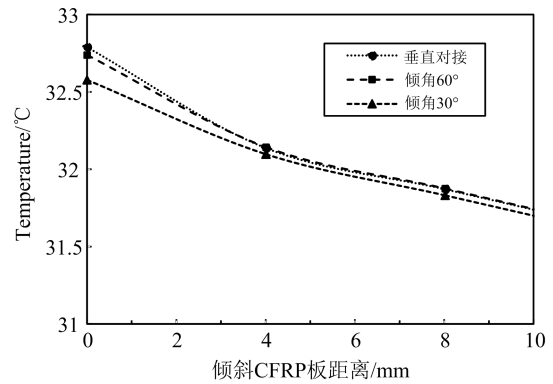


图 7 不同对接结构倾斜 CFRP 板温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of Inclined CFRP plates with different docking structures

2.2 插接结构温度场分布

CFRP 格栅式固面反射器的典型插接结构由相互间隔 60° 的 CFRP 板按上、中、下的顺序拼合胶接而成. 在对插接结构进行仿真模拟时,热流沿着 Z 轴负方向传递. 由图 8 所示的插接结构温度场分布云图可以看出,由于结构的对称性,温度也呈对称分

布,但在同一高度上,中心胶缝与四周 CFRP 板的温度分布存在差异. 为清楚地显示此种差异,取同一高度设置温度测点,如图 9 所示,并将各测点的温度输出绘制为温度曲线图,结果如图 10 所示. 可以明显看到温度关于中心胶缝对称分布,同时向中心胶缝处呈递减趋势,并在中心胶缝处达到最小值.

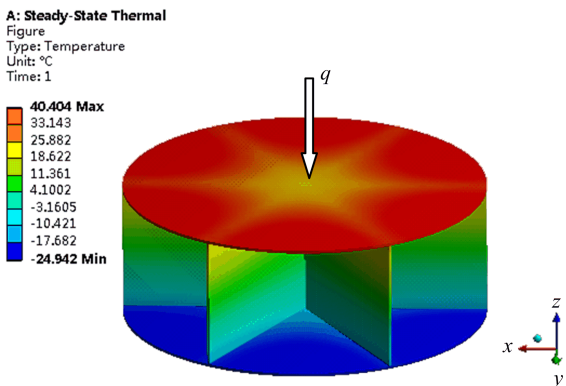


图 8 插接结构温度场云图

Fig. 8 Temperature field cloud chart of the interpolation structure

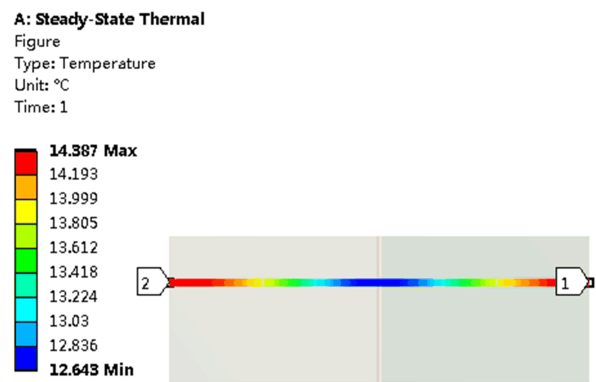


图 9 水平 CFRP 板温度取点分布

Fig. 9 Temperature distribution of the horizontal CFRP plate

图 11 为中心胶缝垂直高度上的温度分布曲线. 从图中可以看到, 温度在垂直高度上呈线性分布, 但

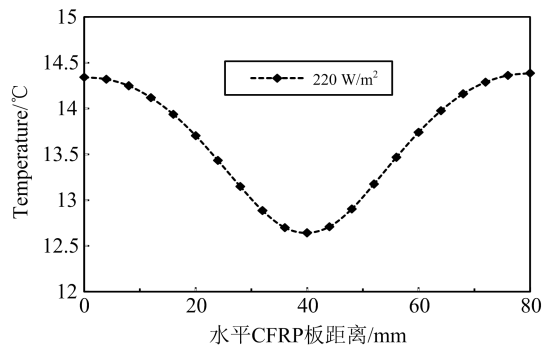


图 10 水平 CFRP 板温度曲线

Fig. 10 Temperature curve of the horizontal CFRP plate

在上下两板胶接处存在较大温差, 这是由于环氧树脂胶热导率远远小于 CFRP 板的热导率.

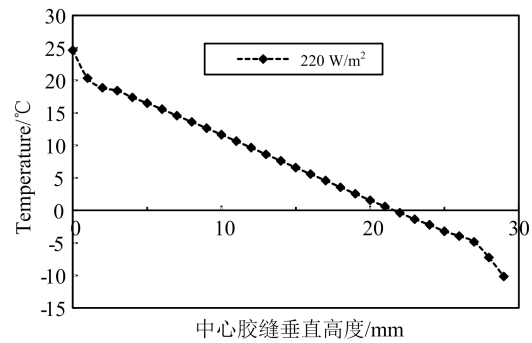


图 11 中心胶缝温度分布曲线

Fig. 11 Temperature distribution curve of the central seam

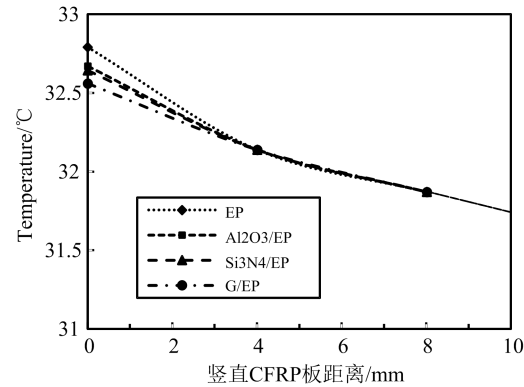
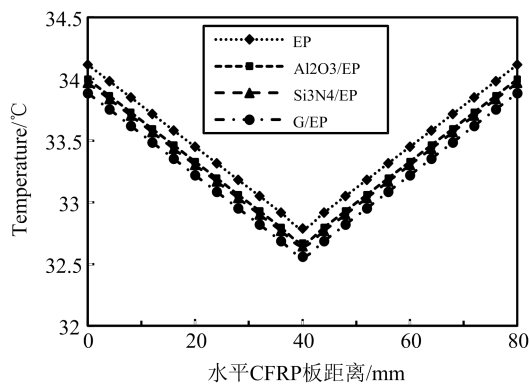
2.3 相同条件不同胶接界面热阻对温度场的影响

2.3.1 对接结构

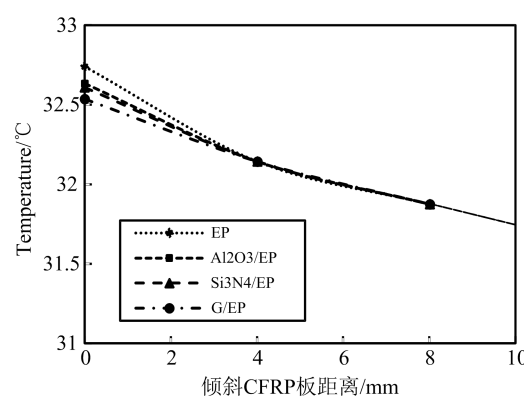
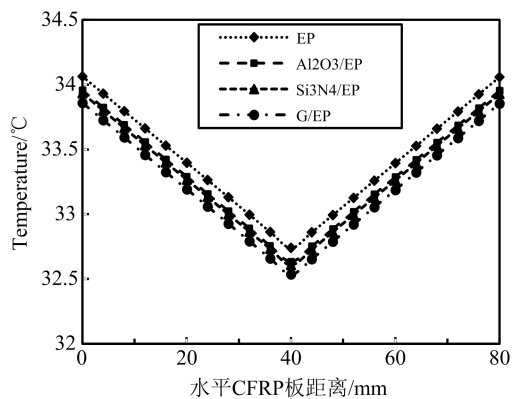
环氧树脂添加高导热填料可有效降低胶接界面热阻. 为了进一步探究界面热阻的改变对整个传热过程温度场分布的影响, 对相同条件不同界面热阻的温度场进行了数值模拟计算. 取氧化铝、氮化硅和石墨烯导热填料的质量分数分别为 15% 时, 环氧树脂复合材料的热导率分别为 0.304、0.336 和 0.491

$W/(m \cdot K)^{[11]}$. 得到不同胶层热阻对温度场分布的影响结果如图 9 所示.

从图 12 可以看到, 随着环氧树脂胶的热导率的增大, 界面热阻的减小, 胶结结构的温差是逐渐减小的, 特别是添加高导材料石墨烯后的环氧树脂胶粘件, 垂直对接、倾角 60°、倾角 30° 的温差分别减小 35.3%、34.2%、26.7%.



(a) 垂直对接



(b) 倾角60°

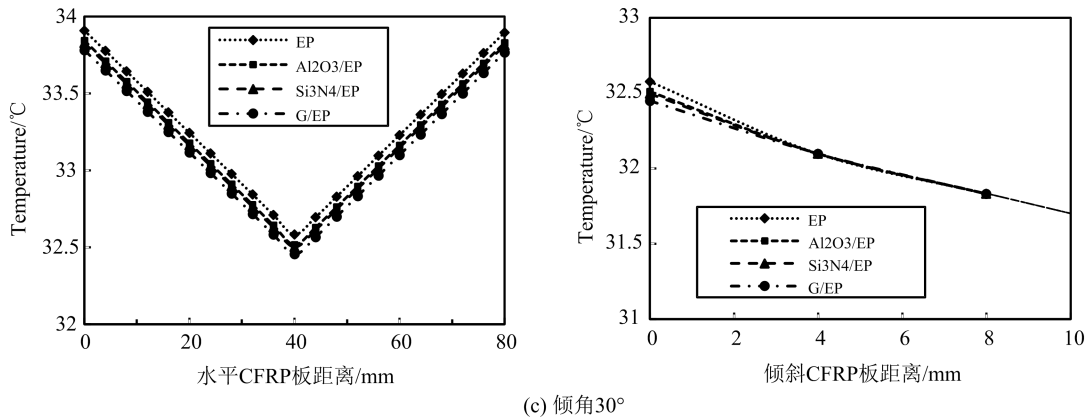


图 12 对接结构不同胶层界面热阻对温度场的影响

Fig. 12 Effect of interface thermal resistance of different adhesive layers on temperature field

2.3.2 插接结构

按照控制变量的标准,在探究环氧树脂胶接界面热阻值对胶层位置温度分布的影响时,通过改变环氧树脂胶热导率的数值来探究胶接界面热阻对温度分布的影响.图 13 为不同胶层中心胶缝温度分布曲线,可以发现四种胶层温度变化趋势相同,均在胶与 CFRP 板胶接处温度突变,这可能是环氧树脂胶的热导率远远小于 CFRP 板的热导率所致.另外随着环氧树脂胶热导率的增大,在胶接处的温度变化变小,即温差变小.尤其是添加石墨烯的环氧树脂,其热导率达到 $0.491\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,如图中所示,在胶与 CFRP 板胶接处温差最小为 1.8°C ,远远小于纯环氧树脂的温差.图 14 为不同胶层对垂直 CFRP 板温度场的影响,其趋势与图 13 一致.图 15 为不同胶层对中心高度上水平板温度分布的影响,当胶层热导率由 $0.215\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增大到 $0.491\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,粘接部位温差降低为原来的 51.4% ,增大胶层热导率能起到明显的强化传热作用.

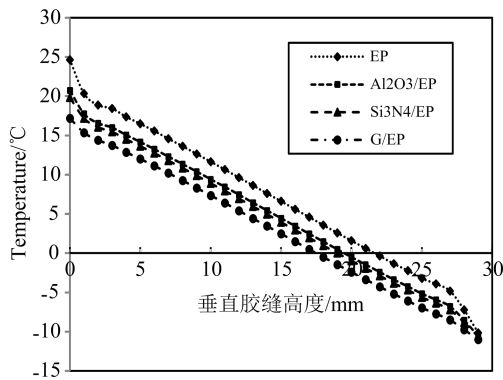


图 13 不同胶层对温度分布的影响

Fig. 13 Effect of different adhesive layers on the temperature distribution

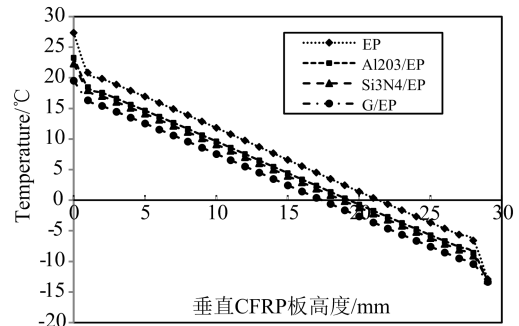


图 14 不同胶层对垂直 CFRP 板温度分布的影响

Fig. 14 Effect of different adhesive layers on temperature distribution of the vertical CFRP plates

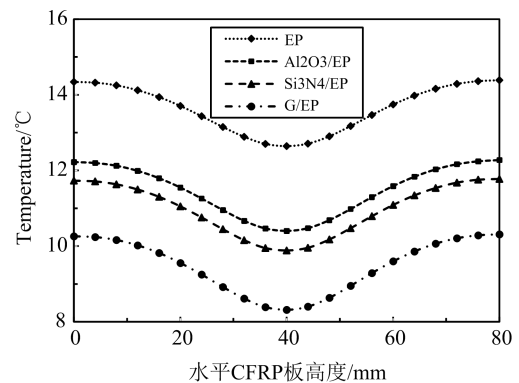


图 15 不同胶层对水平 CFRP 板温度分布的影响

Fig. 15 Effect of different adhesive layers on temperature distribution of horizontal CFRP plates

3 结论

本文对碳纤维增强板的垂直对接、不同倾角斜对接以及插接式对接胶接结构进行了稳态温度场数值模拟计算,分析了相同边界条件下不同胶接结构的温度场分布,以及胶接界面热阻对胶接结构的

温度场分布的影响,得到以下结论:

(I)相同边界条件下,对接结构温度云图变化趋势相同.在垂直接缝中,水平CFRP板温度从两端对称递减,在中心胶层处达到最小值.而倾斜对接则不是呈对称递减,倾斜侧温度较小.插接式对接冷热端温差较大,这可能是与环境辐射换热面积较大所致.

(II)为了探究不同胶层对温度场分布的影响,分别往环氧树脂中添加高热导率的氧化铝、氮化硅和石墨烯,可以明显发现随着环氧树脂胶热导率的增大,胶接界面热阻减小,温度分布更均匀.

参考文献(References)

- [1] 李志君,李学成.高精度碳纤维/环氧复合材料天线的研制[J].工程材料应用,1999,27(5):16-18.
LI Zhijun, LI Xuecheng. Development of fflGH precision carbon fiber/epoxy resin antenna [J]. Engineering Plastics Application, 1999, 27(5): 16-18.
- [2] 冯春春,常海涛.碳纤维增强聚合物基复合材料的性能、制备及应用研究[J].山东化工,2016,23(45):1-4.
FENG Chunchun, CHANG Haitao. Study on the preparation, properties and application of resin matrix composites reinforced by carbon fibers[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 23(45): 1-4.
- [3] 马海全,王倩妮,钱雷,等.胶接结构破坏模式及失效机理[J].失效预防与分析,2012,7(3):162-166.
MA Haiquan, WANG Qianni, QIAN Lei, et al. Damage mode and failure mechanism of cementing structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 162-166.
- [4] NA Jingxin, LIU Yu. Effect of temperature on the joint strength of a silyl-modified polymer-based adhesive[J]. The Journal of Adhesion, 2017, 93(8): 629-639.
- [5] HU P, HAN X. Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subject to extreme temperature environment for automotive industry[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013, 41: 119-126.
- [6] BANEJA M D. Effect of temperature on the shear strength of aluminium single lap bonded joints for high temperature applications [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(14/15): 1367-1381.
- [7] 庞博. T型搭接胶接头循环温度场对其强度的影响[D].大连:大连理工大学,2014.
- [8] 曹蕾蕾,赵宁,郭辉,等.单搭接接头温度场与热应力分布的研究[J].计算机仿真,2009,26(5):307-310.
CAO Lei- lei, ZHAO Ning, GUO Hui, et al. Temperature and thermal stress distribution in single lap joint [J]. Computer Simulation, 2009, 26(5): 307-310.
- [9] KORTA J, MLYNIEC A, UHL T. Experimental and numerical study on the effect of humidity-temperature cycling on structural multi-material adhesive joints[J]. Composites Part B : Engineering, 2015, 79: 621-630.
- [10] DEB A, MALVADE I, BISWAS P, et al. An experimental and analytical study of the mechanical behavior of adhesively bonded joints for variable extension rates and temperatures [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28(1): 1 - 15.
- [11] 王向往.界面热阻实验装置与碳纤维增强板胶接热阻研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [12] 曹罡.基于空间热环境可展开天线结构性能研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.