

引用格式:孙丽莹,孟春玲,王静,等.真空低温下卫星常用材料接触热阻的试验研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(4):54-57.

SUN LiYing, MENG ChunLing, WANG Jing, et al. Experimental study of the thermal contact resistance of materials commonly used in satellites under vacuum and low temperature[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(4): 54-57.

真空低温下卫星常用材料接触热阻的试验研究

孙丽莹 孟春玲* 王静 张刚

(北京工商大学 材料与机械工程学院, 北京 100048)

摘要:真空、低温环境下接触热阻的准确测量对于卫星内部热控制具有重要的实际意义。自行搭建了一套优化的基于稳态法测量接触热阻的试验平台,用于在真空、低温环境下测量由螺栓压紧的材料间的接触热阻。测量了卫星中常用接触对(铝合金-铝合金、铝合金-玻璃钢、铝合金-聚酰亚胺)在不同温度、不同预紧力矩下的接触热阻,研究了预紧力矩、温度、材料对接触热阻的影响,结果表明:玻璃钢与聚酰亚胺的隔热性能优于铝合金;3种接触对的接触热阻均随温度升高而减小,随螺栓预紧力矩的增大而减小。

关键词:真空;低温;卫星;接触热阻;测量

中图分类号: O514 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.04.008

引言

接触热阻是由固体表面不完全接触所导致的热流收缩形成的接触换热附加阻力。接触热阻影响接触面的热流传递,进而影响温度场的分布。卫星在工作过程中要承受真空、冷黑及太阳辐照环境,在这种严酷的温度环境影响下,卫星内部各部分的热变形差异将影响卫星相关测量任务的准确性、灵敏度、分辨率甚至卫星的正常运行。因此,在真空、低温环境下,准确测量卫星内部组件常用接触对的接触热阻可为卫星内部传热控制和结构轻量化等方面提供重要依据,具有重要的应用价值。

目前针对接触热阻的研究有理论与试验测量两个方面。由于接触热阻受粗糙度、表面形貌、接触点变形特征、温度、面压力和导热填料等因素的影响,涉及几何、材料、力、传热等众多学科^[1],虽可以从理论上解释接触热阻产生的机理^[2],却仍无法得到可以准确预测各种接触对的可靠经验公式^[3]。因此理论研究依赖于准确的试验测量,且只能用于

参考,难以实际应用。试验测量是在实际问题中获取接触热阻更为直接和准确的方式。接触热阻的测量方式分为稳态法和瞬态法,其中稳态法虽耗时较长,但因其准确性高且计算简便而被广泛使用。研究者们对基于稳态法的接触热阻的测量进行了大量研究^[4-6],测量方法较为成熟。但关于卫星内部组件常用的材料如铝合金、玻璃钢和聚酰亚胺等所构成的接触对在真空、低温环境下接触热阻的研究较少。

本文针对航空中常用的铝合金(5A06-H112)、玻璃钢(3240)和聚酰亚胺(YS20)3种材料,利用稳态法测量原理自主搭建了真空、低温条件下优化的材料接触热阻的测量装置,测量了不同温度和不同螺栓预紧力矩情况下的铝合金-铝合金、铝合金-玻璃钢和铝合金-聚酰亚胺3种接触对的接触热阻,并对测量结果进行对比分析,以期为接触热阻试验提供数据补充。

1 试验部分

1.1 试验原理

稳态法原理为在相接触的两试件两端维持稳定的温度差,通过测量试件各测点温度值并外推得到接触面温度差,再将此温度差与接触面积、热流量等参数进行运算从而求得接触热阻。

为还原试件在卫星内部的实际工作情况,将试

收稿日期:2019-02-28

第一作者:女,1992年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: mengcl@th.btbu.edu.cn

件加工成直径 20 mm、高 40 mm 的圆柱状,其侧面带有按一定距离轴向分布的直径 2 mm、深 3 mm 的 3 个测温孔。两试件轴向以平面接触,接触面粗糙度 $3.2 \mu\text{m}$ 。试件的温度测点分布如图 1 所示。

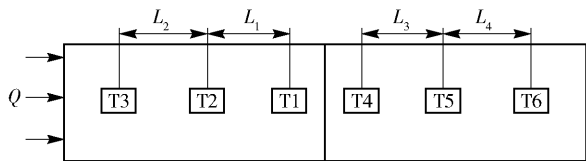


图 1 试件温度测点分布示意图

Fig. 1 Distribution of specimen temperature

真空环境及多个隔热层的包裹使得空气热传导、空气对流传热及试件热辐射散热远小于沿试件轴向的接触传热,可以忽略,因此试验可以采用稳态测量法,按轴向一维导热问题计算接触热阻^[7]。

由傅立叶定律得两相邻温度测点间的热流量 Q_i 为

$$Q_i = \frac{KA\Delta T_i}{L_i} \quad (1)$$

则通过接触面的平均热流量 Q 为

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^4 Q_i}{4} \quad (2)$$

因此接触热阻 R 的计算公式为

$$R = \frac{A\Delta T}{Q} \quad (3)$$

式中, K 为被测温度下试件的热导率; A 为接触面面积; ΔT_i 为试件上相邻两测点间的温度差; L_i 为测点间的距离; ΔT 为接触面处的温度差。由零件各测点所测温度作曲线拟合并外推至接触面,可得到接触面在该零件一侧的温度,两侧温度之差即为 ΔT 。

1.2 试验装置与试验方案

试验系统由真空罐、制冷装置、加热装置、夹紧装置、隔热层、温度采集系统等组成,如图 2 所示。其中,真空罐可提供 10^{-4} Pa 的真空度,在此真空度下可忽略接触面间的空气对流传热^[5];为实现制冷功能,在真空罐内设置液氮容器,由液氮提供低温环境;由于液氮温度远低于试验所需温度范围,为减轻加热装置的负担,减少达到所需温度要耗费的时间,在试件与液氮容器间设置筒状阻热件进行缓冲,并用有限元仿真的方法得到阻热件的合理尺寸。加热装置为紫铜材料的加热片,安装在加热件的方槽中。夹紧装置由上、下两个扁圆柱体组成,包括 6 个均布的 M4 螺栓夹紧试件。为减少辐射散热,试验中采

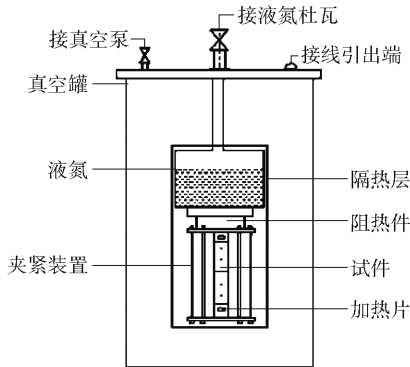


图 2 接触热阻测量装置示意图

Fig. 2 The experimental installation to measurement contact resistance

用多层镀铝涤纶作为隔热层对整个夹紧装置与液氮杜瓦进行包裹。温度采集系统由 Pt100 铂电阻温度计、康铜丝导线及温度仪组成,并由 LABVIEW 软件将电阻值转换为温度值。

试验时,连接好试验装置后,首先通过力矩扳手调整夹紧装置的预紧力矩,再将夹紧装置连同试件一起放入真空罐中。由于卫星中的零件是在室温条件下安装后送入太空的,因此先施加预紧力后抽真空并制冷可以模拟卫星的真实情况^[8]。真空罐内的真空度稳定在 10^{-4} Pa 时,向液氮容器中注入液氮,并将加热片调整至试验温度所需功率后保持恒定,在液氮与恒定加热功率的共同作用下,待试件温度稳定后记录各测点处温度值。调整加热装置的加热功率可改变试件待测表面温度,进而得到不同温度下试件的接触热阻。改变螺栓预紧力,可以实现不同预紧力矩下接触热阻的测量。

2 试验结果与分析

试验测量了真空度 10^{-4} MPa, 温度 193 ~ 313 K, 螺栓预紧力矩 0.5 N·m、1.0 N·m、2.0 N·m 条件下, 铝合金-铝合金、铝合金-玻璃钢、铝合金-聚酰亚胺 3 组接触对轴向不同位置的温度值。由公式 (1) ~ (3) 计算得到的不同预紧力矩下 3 组接触热阻随温度变化曲线如图 3(a) ~ (c) 所示。

由图 3 可知,在本文的真空条件、试验温度和预紧力矩范围内,铝合金-铝合金接触对的接触热阻为 $3.75 \times 10^{-5} \sim 2.09 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$, 铝合金-玻璃钢接触对的接触热阻为 $7.82 \times 10^{-4} \sim 3.05 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$, 铝合金-聚酰亚胺接触对的接触热阻为 $1.40 \times 10^{-3} \sim 6.77 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。铝合金-玻璃钢、铝合金-聚酰亚胺接触对的接触热阻远大于

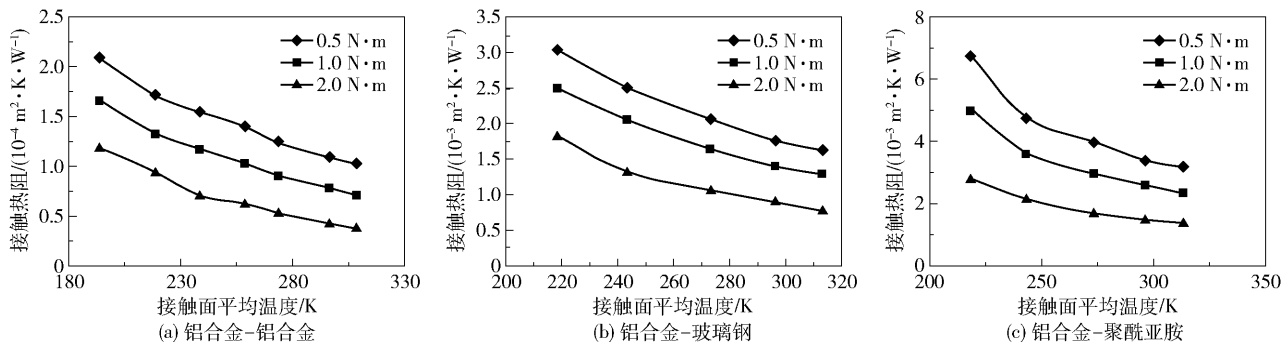


图3 铝合金-铝合金、铝合金-玻璃钢及铝合金-聚酰亚胺的接触热阻

Fig. 3 TCR of aluminum alloy to aluminum alloy joints, aluminum alloy to FRP joints, and aluminum alloy to polyimide joints

铝合金-铝合金接触对的接触热阻,说明玻璃钢与聚酰亚胺具有比铝合金更强的隔热能力。

在预紧力矩不变的情况下,3种接触对的接触热阻均随温度升高而减小,且铝合金-聚酰亚胺接触对的接触热阻变化最为显著。这是由于温度升高导致材料的热导率升高,且由于试件与紧固件的热胀系数不同,温度升高时界面接触质量的提高也会导致通过接触面的热流收缩,因此接触热阻减小。

以温度为218.15 K时3种接触对的接触热阻为例,3种接触对的接触热阻随预紧力矩的变化如图4所示。由图可知,在温度不变的前提下,3种接触对的接触热阻均随预紧力矩的增大而减小,原因是预紧力矩增大,接触面变形导致接触面积增大,热流的阻碍作用减小,从而减小了接触热阻;且由于3种材料中聚酰亚胺的硬度最小,导致3组接触对中铝合金-聚酰亚胺间的接触质量受预紧力矩影响最为明显,因此该接触对的接触热阻随预紧力矩变化最为明显。

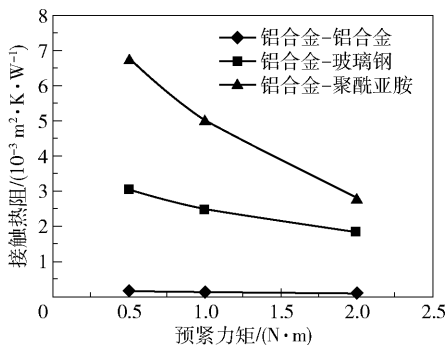


图4 接触热阻随预紧力矩的变化

Fig. 4 TCR versus pre-tightening torque

3 结论

本文自行搭建了一套基于稳态法测量卫星常用

材料间接触热阻的优化测量平台,测量了真空、低温环境下,航天中常用材料(铝合金、玻璃钢和聚酰亚胺)接触面的接触热阻。对几种材料的接触热阻与温度、预紧力矩之间关系的研究结果表明,在本文的真空条件、试验温度和预紧力矩范围内,铝合金-铝合金接触对的接触热阻为 $3.75 \times 10^{-5} \sim 2.09 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$, 铝合金-玻璃钢接触对的接触热阻为 $7.82 \times 10^{-4} \sim 3.05 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$, 铝合金-聚酰亚胺接触对的接触热阻为 $1.40 \times 10^{-3} \sim 6.77 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$ 。玻璃钢与聚酰亚胺的隔热性能优于铝合金。3种接触对的接触热阻均随温度升高而减小,随螺栓预紧力矩的增大而减小。

参考文献:

- [1] WANG A L, ZHAO J F. Review of prediction for thermal contact resistance[J]. Science China(Technological Sciences), 2010, 53(7): 1798-1808.
- [2] 牟健, 洪国同. 真空低温环境导热填料界面接触热阻实验研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(1): 19-25.
MOU J, HONG G T. The thermal contact resistance of two interfaces at low temperature in vacuum[J]. Vacuum & Cryogenics, 2018, 24(1): 19-25. (in Chinese)
- [3] 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 P, XUAN Y M, LI Q. Development on thermal contact resistance[J]. CIESC Journal, 2012, 63(2): 335-349. (in Chinese)
- [4] 丁昌. 真空环境下玻璃钢界面接触传热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
DING C. Research on heat transfer characteristics of GFRP interfaces under vacuum condition[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [5] 王安良, 马松阳. 一种测量板间接触热阻的新方法[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(11): 2393-2398.

- WANG A L, MA S Y. A new method for measuring the thermal contact resistance between plates[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38 (11): 2393 – 2398. (in Chinese)
- [6] ZHANG P, CUI T F, LI Q. Effect of surface roughness on thermal contact resistance of aluminium alloy[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 992–998.
- [7] 徐圣亚, 洪国同. 真空低温下螺钉压紧的 Cu–Cu 界面间接触热阻的实验研究[J]. 真空与低温, 2010, 16 (3): 153–156.
- XU S Y, HONG G T. Test analysis of thermal contact resistance of screwed copper to copper joints at low temperature in vacuum[J]. Vacuum & Cryogenics, 2010, 16 (3): 153–156. (in Chinese)
- [8] MADDREN J, MARSCHALL E. Predicting thermal contact resistance at cryogenic temperatures for spacecraft applications[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995, 32(3): 469–474.

Experimental study of the thermal contact resistance of materials commonly used in satellites under vacuum and low temperature

SUN LiYing MENG ChunLing* WANG Jing ZHANG Gang

(School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The accurate measurement of thermal contact resistance (TCR) in vacuum and at low temperature has practical significance for internal thermal control in satellite. A set of optimized TCR measurement platforms based on the steady-state method was built to measure the TCR between bolted specimens in vacuum at low temperature. The TCR between materials commonly used in satellites, including aluminum alloy to aluminum alloy joints, aluminum alloy to glass fiber reinforced plastic (FRP) joints and aluminum alloy to polyimide joints, were measured at different temperatures and for different pre-tightening torques. The effects of varying the pre-tightening torque, temperature and material on TCR were investigated. The results show that the heat insulation properties of FRP and polyimide are better than that of aluminum alloy. The TCR of the three contact pairs decreases with the increase of temperature, and decreases with the increase of pre-tightening torque.

Key words: vacuum; low temperature; satellite; contact thermal resistance; measurement

(责任编辑:吴万玲)