

真空低温下螺钉压紧的 Cu-Cu 界面间接触热阻的实验研究

徐圣亚^{1,2} 洪国同¹

(1.中国科学院 理化技术研究所 北京 100190 ;
2.中国科学院 研究生院 北京 100049)

摘要:为满足航天器热控设计的需要,实验测量了真空条件下接触面温度 110 K 时螺钉压接的 Cu-Cu 界面间的接触热阻,比较了不同的螺钉预紧力矩以及不同的导热填料对接触热阻的影响。实验数据表明,界面接触热阻随着螺钉预紧力矩增大成一阶指数衰减,导热填料为铟箔时界面热阻显著的减小,接触热阻最低可以达到 $2.0 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。

关键词:接触热阻;螺钉连接;导热填料;一阶指数衰减

中图分类号:O514

文献标识码:A

文章编号:1006-7086(2010)03-0153-04

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2010.03.006

TEST ANALYSIS OF THERMAL CONTACT RESISTANCE OF SCREWED COPPER TO COPPER JOINTS AT LOW TEMPERATURE IN VACUUM

XU Sheng-ya^{1,2} HONG Guo-tong¹

(1. Technical Institute of Physics and chemistry of CAS, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In need of the design of the spacecraft thermal control, thermal contact resistance (TCR) of copper to copper joints has been measured in vacuum, when the interfacial temperature is 110 K. The influence of different screw preload torque and different thermal conductance fillers to the TCR has been compared. The experimental data indicated that the TCR decreases by the first order exponential decay while the screw preload torque increases, the indium foils exhibits the best performance to degrade the TCR, the lowest value of TCR can be $2.0 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$.

Key words: thermal contact resistance; screw-jointed; thermal conductance fillers; the first order exponential decay

1 引言

航天器在其飞行过程中要经历极为恶劣多变的热环境,其中的探测仪器又往往只能工作在特定的低温温度下。在对探测仪器温度控制过程中,导热过程的控制相当重要,影响实际导热过程的一个重要因素就是构件之间的接触热阻。由于理论预测上的困难,减少和控制接触热阻则有必要进行一定的实验研究^[1,2]。

国内外对两固体表面直接通过外力压接在一起时的接触热阻研究的较多。然而实际应用中,两固体表面多采用螺钉或螺栓连接,这方面的接触热阻的数据较为缺乏^[3]。因此,对螺钉连接时接触热阻的研究很有必要。

收稿日期 2010-07-15.

作者简介 徐圣亚(1987-)男,安徽省濉溪县人,硕士研究生,从事低温接触热阻研究。

在 2 个相互接触的表面间使用合适的填料可有效地改变它们的接触热导率，合适的填料填充了因表面粗糙而造成的微观上的空隙^[4]。因此，在固体接触界面间填充合适的导热填料能够很好的减小接触热阻，本次实验研究了 2 种常用的导热填料，即真空硅脂、铝箔。

2 实验测量原理与装置

2.1 实验测量原理

接触热阻的产生是由于接触界面的不完全接触而引起热流收缩所造成的。可以按界面处温差的大小而定义接触热阻 R 。本次实验采用一维稳态热流法测量样品接触面的接触热阻。接触热阻的计算式

$$R = \frac{F \cdot \Delta T}{Q} \tag{1}$$

式中 Q 是通过界面的热流，通过热流计在稳态时计算得出； F 是界面名义接触面积； ΔT 是两接触面温度差， $\Delta T = T_5 - T_4$ 。

2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。装置由真空容器、真空泵及真空测量系统、温度测量系统、低温冷源等组成。真空容器内真空度高于 5×10^{-3} Pa。采用液氮作为冷沉，通过改变控温加热丝输入使接触面温度恒定在 110 K。加热丝采用直径 0.1 mm 的康铜丝，双绕在上下铜棒上。液氮容器及铜棒外包装由 25 层单层镀铝涤纶薄膜做成的隔热罩，以隔绝辐射换热，使铜棒中只存在一维轴向导热。实验时通过图 1 中的上棒加热器控制接触面的温度恒定为 110 K，在下棒加热器中施加负载热流，通过测定接触面上下两侧的温度 (T_4 、 T_5) 以获得其接触热阻值。在接触面间放置不同的导热填料，并施加不同的螺钉预紧力，以得到不同填料和螺钉预紧力的接触热阻。

法兰面尺寸及温度计布置如图 2 所示。其中上法兰面均匀分布 6 个 M4 螺纹通孔，下法兰面均匀分布 6 个直径 4.5 mm 通孔。法兰接触面粗糙度均为 $R_a = 6.3 \mu\text{m}$ 。 $T_1 \sim T_5$ 测量是同一垂线上的温度， T_1 、 T_2 、 T_3 均为贴片式铂电阻温度计，用低温胶粘接在铜棒表面；其中 T_4 、 T_5 采用的是柱形铂电阻温度计，表面涂抹真空硅脂后插入法兰侧面孔内。

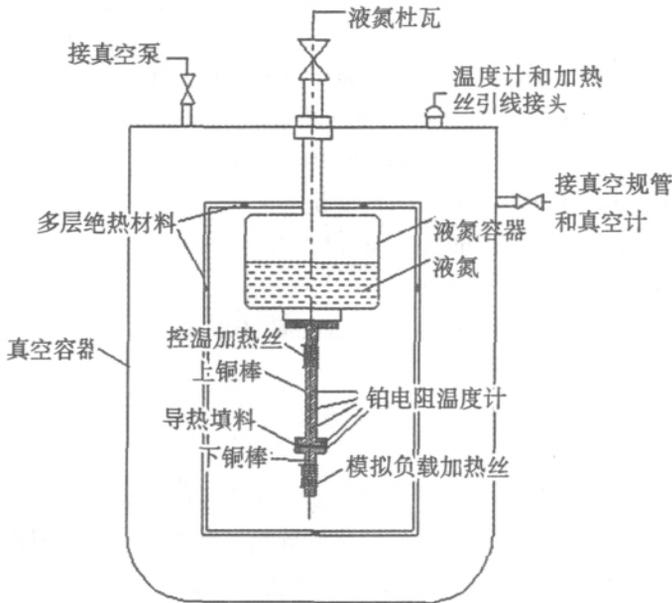


图 1 接触热阻测量实验装置图

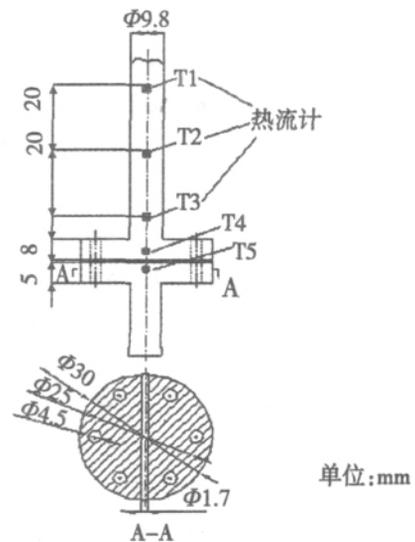


图 2 法兰面尺寸及温度计布置图

3 实验结果与分析

实验测定了导热填料为真空硅脂、厚度为 0.1 mm 和 0.2 mm 的铝箔以及金属裸接触时的接触热阻，螺钉预紧力矩为 1~3 N·m。定义无量纲参数 $E = R/R_{\text{max}}$ ，其中 R_{max} 是同等测实条件下接触热阻的最大值。参数 E 可以直观的反映出接触热阻的变化情况。

参数 E 变化如图 3 所示,预紧力矩为 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时所有接触条件下的接触热阻均最大。预紧力矩从 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 增大到 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,不同接触条件下的接触热阻均有很程度的减小,金属裸接时下降的最多为 62% ,但预紧力矩从 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 增大到 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,接触热阻减小幅度趋于平缓,有“钝化”现象^[5]。导热填料为 0.2 mm 铝箔时接触热阻变化趋势最为平缓,原因可能是铝箔的塑性变形使得压紧力变化很小。

不同接触条件下接触热阻随预紧力矩变化曲线如图 4 所示,从图中可看出同样的预紧力矩时,导热填料为 0.2 mm 铝箔时的接触热阻最小,金属直接压接时的接触热阻最大。相同的预紧力矩、不同接触条件时,其接触热阻大小的排列顺序为 0.2 mm 铝箔 $<$ 0.1 mm 铝箔 $<$ 导热硅脂 $<$ 金属直接压接。通过添加导热材料能够很好的减小界面的接触热阻,导热能力提高约 $1.5\sim 10.0$ 倍。接触热阻随界面压力的升高不断减小,界面压力增大时接触热阻开始减小很快,随着压力进一步增加,接触热阻减小的幅度逐渐趋缓,但金属直接压接时变化趋势还比较明显。因此在材料和连接强度允许的情况下尽可能提高接触面压力,能够很好的减小接触热阻。

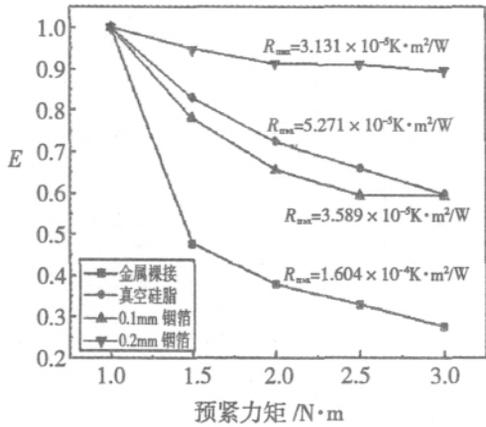
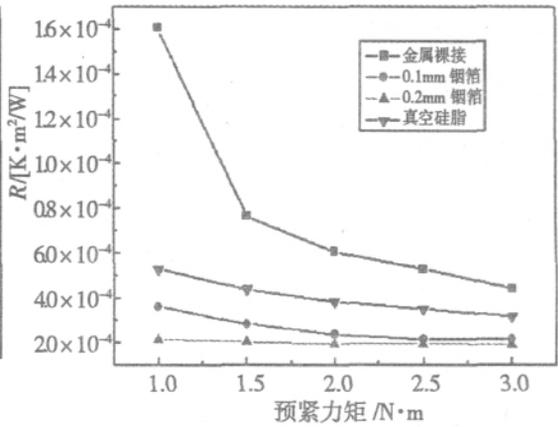
图 3 不同接触条件下参数 E 随预紧力矩变化曲线

图 4 不同接触条件下接触热阻随预紧力矩变化曲线

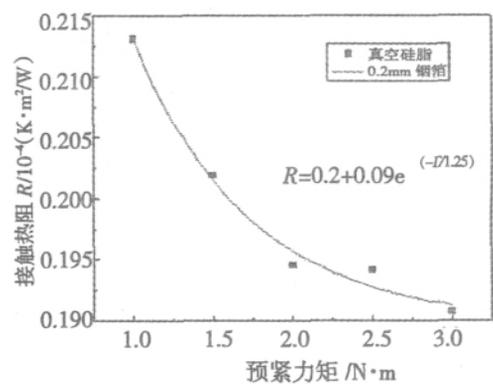
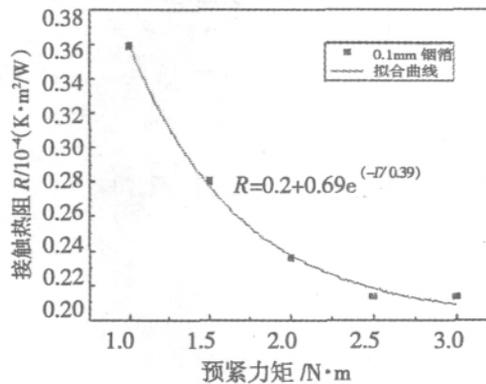
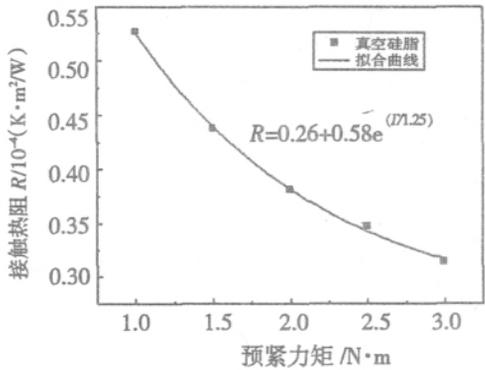
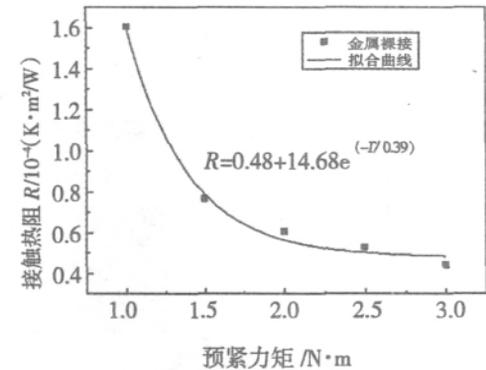


图 5 接触热阻随预紧力变化数据拟合曲线

通过对实验数据分析发现,界面接触热阻随着螺钉预紧力矩增大成一阶指数衰减,即

$$R=a+b e^{-1/c} \quad (2)$$

式中 R 是接触热阻,单位为 $10^{-4}[\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}]$; F 是预紧力矩, a, b, c 是待定参数。

使用函数(2)对实验数据拟合可得图 5 所示曲线,拟合所得曲线与实验数据有很好的相似度。由于接触面压力与预紧力矩的关系难以确定,现有的接触热阻理论都是建立在接触面压力已知的情况下,且中间不含导热填料,因此本实验条件下的理论研究将更加复杂。

4 误差分析

接触热阻的计算式为

$$R = \frac{F \cdot \Delta T}{Q} = \frac{\pi \cdot (d_1^2 - 6d_2^2)}{4} \frac{T_5 - T_4}{Q} \quad (3)$$

式中 d_1 为法兰面直径, d_2 为法兰上孔的直径。

由间接测量的误差传递公式^[6]得,接触热阻的相对误差为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2(d_1 + 6d_2)}{d_1^2 - 6d_2^2} \Delta d + \frac{2 \Delta T}{\min(T_5 - T_4)} + \frac{\Delta Q}{Q} \quad (4)$$

其中,参数 d 是通过精度 0.05 mm 游标卡尺测量后计算得出,所以 $\Delta d=0.05$ mm,温度 T 采用 4 线制铂电阻温度计测量,温度计引线采用 0.1 mm 铜丝,且引线缠绕在铜棒上,忽略导线漏热,数据采集系统采用 Keithley2700 型多通道数据采集器,整体精度为 0.11 K,所以 $\Delta T=0.11$ K; Q 误差包括热流计计算所得误差 ΔQ_1 、法兰面螺钉导热 ΔQ_2 、外界辐射漏热 ΔQ_3 三部分之和。计算可得本次实验接触热阻最大相对误差不超过 15.77%。

5 结论

固体材料接触界面间的接触导热是一个受载荷、温度、接触面材料、材料表面特性(粗糙度、平行度)、材料硬度、接触界面的状况等多种因素影响的复杂问题。实验只测定在端面温度 110 K、通过 5 W 的热流、不同接触条件时,铜铜接触热阻随法兰连接螺钉预紧力矩变化的情况。通过实验可以得出:

- 1) 接触热阻随连接螺钉预紧力矩增大不断减小,所以在允许范围内应尽可能提高连接螺钉力矩;
- 2) 增加导热填料能够很好的提高导热,相同的预紧力矩、不同接触条件时,其提高导热能力的排列顺序为 0.2 mm 钢膜 > 0.1 mm 钢膜 > 导热硅脂 > 金属直接压接,接触热阻最低可以达到 $2.0 \times 10^{-5} \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$;
- 3) 对测得的螺钉连接下不同连接条件下的接触热阻数据进行拟合,得出界面接触热阻随着螺钉预紧力矩增大成一介指数衰减,为下一步理论研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 赵兰萍,徐烈.低温真空下固体界面间接触导热的实验研究[J].中国空间科学技术,2003(2):51~55.
- [2] 石零,王惠龄,余新明.氮化铝与无氧铜低温界面热阻的实验研究[J].真空与低温,2004,10(2):82~84.
- [3] C L YE H, C Y WEN, Y F CHEN *et al.* An experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, (25): 349~357.
- [4] 任红艳,胡金刚.接触热阻的研究进展[J].航天器工程,1999,8(2):47~57.
- [5] 王建,王惠龄,陈进,等.直接冷却中氮化铝与无氧铜低温真空接触热导的实验研究[J].低温工程,2006,(2):30~34.
- [6] 严兆大.热能与动力工程测实技术[M].北京:机械工业出版社,2005.