

一种柔性复合高导热索制备及应用

李春江¹ 马兆昆² 余成武¹ 隋杰¹ 付伟纯¹ 张腾飞¹ 孙艳¹ 郑然¹

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029)



摘要: 针对航天器产品内部移动大功率芯片或对结构稳定性要求较高的大功率芯片温升过快、热蓄积的问题, 研制了一种柔性复合高导热索, 较好地解决了这类大功率芯片的散热问题。给出了柔性复合高导热索的组成, 详细描述了柔性导热索的制备方法, 介绍了该柔性导热索经历的抗拉测试、柔性试验和导热试验情况。结果表明, 该种柔性导热索具有较好的柔性和较高的热导率, 可广泛应用于大功率移动芯片和对结构稳定性要求较高的大功率芯片的散热。

关键词: 轻质; 柔性; 高导热; 导热索

中图分类号: V19 文献标识码: J

Preparation and Application of A Flexible Composite High Thermal Conductivity Cable

Li Chunjiang¹ Ma Zhaokun² Yu Chengwu¹ Sui jie¹ Fu Weichun¹ Zhang Tengfei¹ Sun Yan¹ Zheng Ran¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190;

2. School of Material Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract: In view of the problems of moving high-power chips or high-power chips requiring high structural stability inside spacecraft products such as excessive temperature rise and thermal storage, a flexible composite high thermal conductivity cable is proposed to solve the heat dissipation problem of such high-power chips. The composition of the flexible composite high thermal conductivity cable is presented, and the preparation method of the cable is described in detail. The tensile test, flexibility test and thermal conductivity test of the cable are introduced. The results show that the flexible cable has good flexibility and high thermal conductivity, and can be widely used for heat dissipation of moving high-power chips and high-power chips with high structural stability requirements.

Key words: light weight; flexible; high thermal conductivity; heating conducting cable

1 引言

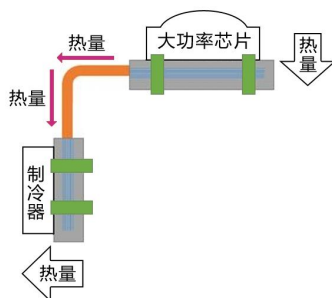


图1 大功率芯片散热通道示意图

移动大功率芯片和成像芯片是航天器 GNC 分系统重点单机产品中较为核心的一类元器件, 在应用过程中存在芯片温升过快导致的热蓄积^[1]问题, 影响了产品的实际性能。其中移动大功率芯片应用在高速执行机构^[2]产品内部, 具有体积相对较小、功耗相对较大且与散热的热沉之间有相对运动的特点, 具有良好的散热通道是高速执行机构正常工作的前提, 一般的刚性散热连接件难以满足其散热需求; 而成像芯片是高精度星敏感器中的核心器件, 对结构的稳定性要求较高, 也存在尺寸相对较小、功耗相对较大的特点, 良好的

作者简介: 李春江 (1981), 高级工程师, 机械电子工程专业; 研究方向: 航天器姿态测量技术。

收稿日期: 2022-03-22

散热能力是实现星敏感器良好热稳定性能的基础,也是产品能够提供高精度姿态信息的重要保障。移动大功率芯片或成像芯片的散热通道如图1所示。

目前大功率芯片的主要散热组件是铜质导热索组件,以铜丝编织网或铜箔作为柔性导热主体,两端通过焊接等方式固定在铜板上,一端连接制冷器,一端连接大功率芯片。但这种铜质导热索组件存在以下三个缺点:纯铜的理论热导率为 $398\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,由其加工而成的柔性导热带,其导热性能存在一个物理上限;铜的密度为 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$,难以满足宇航产品轻量化的要求;铜的热膨胀系数达到 $18\times 10^{-6}/\text{K}$,在产品工作中由于频繁的热端温升和冷端降温从而产生热应力及疲劳,从而影响芯片定位的精度和信号传输的稳定性和质量。

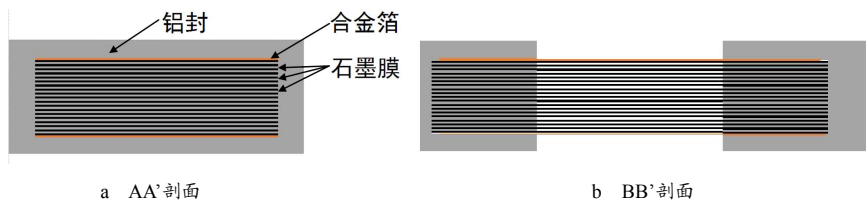


图2 柔性导热索实物外观及两端刚性部分的剖面结构示意图

导热索组件选用的材料:柔性高导热石墨膜(导热率 $\geq 1600\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$);铝合金(牌号2A12-T4);高导热合金箔。

柔性导热索组件的详细组成和功能:柔性部分由40层高导热石墨膜叠加而成(叠加层数根据传热功率和应用空间需求适应性调节),被置于中部,主要起导热主体的作用,最外2层由合金箔组成,起提高导热

针对以上问题,研制了一种柔性复合高导热索(以下简称柔性导热索),该种柔性导热索使用一种导热率更高、柔性更强的新型碳材料作为柔性部分,对其两端金属化后再与高导热、轻质金属复合,可以获得柔性、导热效率高的导热索,满足移动大功率芯片或成像芯片的散热需求。

2 柔性导热索的组成及制备

2.1 柔性导热索的组成

柔性导热索的实物外观形貌如图2所示,主要由中间的柔性高导热碳材料^[3]、两端的刚性铝合金和它们的复合联结三部分组成。

索强度并保护石墨膜的作用;两端刚性部分由高强度铝合金组成,主要起提高强度、和与功率热源和冷却器方便联结的作用;复合联结部分由表面处理的石墨膜及铝合金复合而成。

2.2 柔性导热索制备技术

柔性导热索的制备^[4]工艺技术路线如图3所示。

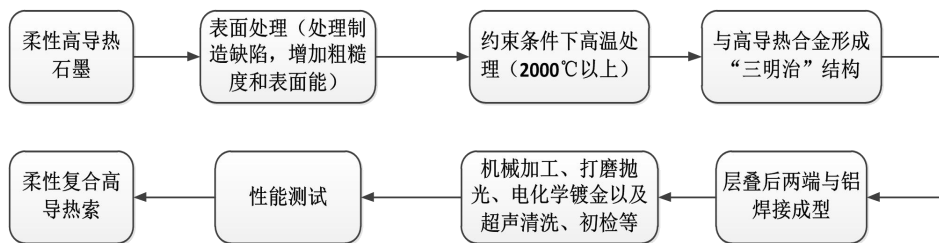


图3 柔性导热索制备工艺路线图

a. 柔性石墨材料的表面处理:增加粗糙度和表面能,可以与金属良好润湿。

b. 约束条件下高温石墨化处理(2000°C 以上):在石墨模具的约束下,除去其他元素,使柔性石墨中碳含量 $\geq 99\%$ 。

c. 柔性高导热石墨裁切成所需尺寸,与高导热金属箔层叠形成“三明治”结构的复合叠层(层数根据

需要叠加)。

d. 将层叠复合叠层的两端与铝合金焊接成型。

e. 对上述导热索两端刚性的铝合金部分按尺寸、粗糙度、平面度等要求在工装夹具上进行机械加工、打孔、打磨抛光等处理。

f. 对导热索两端刚性的铝合金表面进行化学镀金处理,防止氧化,减少热阻。

g. 对电镀后的样品打磨, 然后进行去离子水和酒精的超声波清洗, 去除杂质、碎屑和油脂等。

h. 柔性导热索最终重量为 6g, 而同种规格的铜质导热索重量达到 13.5g。

3 柔性导热索试验

3.1 抗拉强度测试试验

参考 ASTM F152—95 标准《非金属垫片抗张强度的标准测试方法》, 测试柔性导热索的抗拉强度。通过上下夹具垂直夹住柔性导热索的两端硬端铝合金进行恒速下的拉伸, 测量拉断的最大力, 通过与截面积的比获得破坏性的拉伸强度。

测试过程如图 4 所示, 测试得到柔性导热索的抗拉强度为 10.25MPa。



图 4 柔性导热索破坏性拉伸试验示意图

3.2 柔性测试

参考 ASTM D2176—16 标准《纸张和薄膜的抗弯折性能测试》, 模拟柔性导热索的柔性测试。在曲率半径为 10mm 的光滑圆棒上进行 90°弯折 1000 次以上。

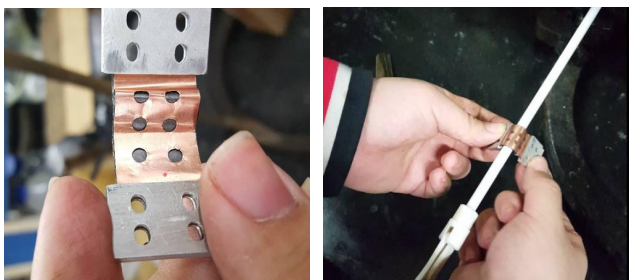
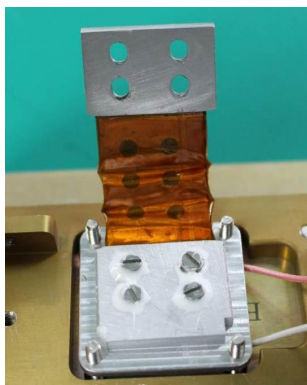


图 5 柔性导热索样品柔性测试示意图

测试过程如图 5 所示, 测试后检查柔性导热索的外观。外观良好、无多余物溢出, 表明柔性导热索通过了柔性测试, 有较好的柔性。

3.3 导热试验

为比较柔性导热索与铜质导热索组件散热性能的差异, 将柔性导热索、铜质导热索组件前后分别装配至某种星敏感器产品结构内部, 其中柔性导热索由于柔性好, 装配较为方便, 而铜质导热索组件由多层铜片层叠而成, 柔性差装配难度较大。如图 6 所示, 置于真空罐内, 产品界面温度分别设置为 20℃、40℃, 在柔性导热索(铜质导热索)两端与成像芯片、制冷器的接口分别贴热敏电阻测温。



a 柔性导热索



b 铜质导热索

图 6 柔性导热索、铜质导热索组件分别在星敏感器产品内部的安装

导热试验测温结果如表 1 所示。根据导热试验测温结果可以得到以下结论: 典型工作模式下(安装界面 20℃), 柔性导热索两端温差 1.5℃, 而铜质导热索两端温差为 2.2℃, 柔性导热索导热性能优于铜质导热索。

表 1 导热试验测温结果 ℃

组件	安装界面温度	成像芯片温度	制冷器端温度	两端温差
柔性导热索	20	24.9	23.4	1.5
	40	42.5	41.1	1.4
铜质导热索	20	26.4	24.2	2.2
	40	43.8	41.9	1.9

3.4 柔性导热索应用

表 2 鉴定级随机振动试验条件

均方根加速度	15.69g _{rms}
时间	2min
方向	垂直及平行与安装面的 X、Y、Z 三个正交方向

该种柔性导热索组件已经应用到甚高精度星敏感器中, 有效解决了宇航产品内部高集成度大功率芯片散热的装配应力问题, 并随产品顺利通过了随机振动、

加速度、冲击等力学试验及热真空试验考核，如表 2～表 5 所示。

表 3 鉴定级加速度试验条件

加载方向	垂直及平行与安装面的三个正交方向
加速度	12g
试验时间/min	达到最大后保持 5
加载、卸载速率/g·s ⁻¹	0.5~1.0

表 4 鉴定级冲击试验条件

频率/Hz	冲击谱加速度(Q=10)
100~500	+6dB/oct
500~4000	1000g
加载方向	垂直及平行与安装面的三个正交方向
每个轴向试验次数	3
试验持续时间	≤20ms

表 5 热真空试验条件

参数	试验条件
试验压力/Pa	≤1.3×10 ⁻³
试验温度/℃	-35~+50
循环次数	12.5 次
升降温速率（平均值）/℃·min ⁻¹	1
允许偏差	高温(0~+4)℃；低温(0~-4)℃

柔性导热索已于 2019 年 11 月随高分七号卫星甚

高精度星敏感器成功在轨应用，提高了甚高精度星敏感器成像组件内部散热效率和在轨热稳定性能，为产品实现高精度姿态测量提供了重要保证。

4 结束语

针对航天器产品内部移动大功率芯片或对结构稳定性要求较高的大功率芯片温升过快、热蓄积的问题，研制了柔性复合高导热索，介绍了柔性复合高导热索的组成和制备方法，该种柔性复合高导热索还开展抗拉试验、柔性试验、抗拉试验、导热试验和相关空间环境试验，试验结果表明，该种柔性导热索具有较好的柔性和较高的热导率。该种柔性导热索现已成功在轨应用，将可广泛应用于未来大功率移动芯片和对结构稳定性要求较高的大功率芯片散热的产品中。

参考文献

1 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京：宇航出版社，1991
2 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京：宇航出版社，2003
3 冯志海, 樊桢, 孔清, 等. 高导热碳/碳复合材料的制备[J]. 上海大学学报（自然科学版）红外, 2014, 20(1): 51~58
4 袁郎明. 高导热炭材料的制备研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2012

XX

（上接第 26 页）

- a. 30CrMnSiA 合金钢和 A286 耐蚀钢螺栓螺纹联接，在模拟实际装配时，当螺栓预紧力达到 10%~40%Fmax（Fmax 为螺栓实际破坏拉力载荷值）时，其预紧力与安装扭矩呈良好的线性关系，当预紧力为 40%~50%Fmax 时，扭矩系数逐渐变小。
- b. 验证了紧固件拆卸并重复安装使用的产品，随着反复拧入次数的增加，达到相同的预紧力时，所需的安装扭矩呈现递增的变化规律，因此二次安装需要考虑安装扭矩变化和产品重复使用次数，建议至多重复使用 3 次。
- c. 螺栓的预紧力与安装扭矩的扭矩系数与螺栓材质、润滑条件及安装次数等多种因素紧密关联。为获

得适宜的预紧力，应结合具体使用要求和实际工况，验证制定合适的安装扭矩和重复使用次数，确保紧固件连接的可靠性和易操作性。

参考文献

1 杨育中. 紧固件连接设计手册[M]. 北京：国防工业出版社，1990
2 李英亮. 紧固件概论[M]. 北京：国防工业出版社，2014
3 倪晋挺. 螺纹紧固件摩擦系数的影响因素试验研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(3): 26~28, 32
4 高学敏. 基于 TC 紧固件在不同头型下扭矩与预紧力关系研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(17): 92~97