文章编号：1672-8785(2018)02-0008-06

红外探测器组件封装中的引线特性研究

汪 洋[1,2,3] 赵振力[1,2,3] 莫德锋[1,2,3] 张晶琳[1,2,3] 蒋梦蝶[1,2,3] 徐 琳[1,2,3]

(1.传感技术国家重点实验室，上海 200083；
2.中国科学院红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；
3.中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083)

摘 要：引线互联是红外探测器封装的关键工艺之一，而采用何种引线则会直接影响红外探测器组件的电学、力学和热学性能。引线互联需要考虑引线的材料、线径、长度和引线工艺，因而红外探测器封装中通过采用多种引线来满足不同需求。系统介绍了红外探测器封装所用引线的电学、力学和热学性能，重点测试和分析了金丝、硅铝丝、铂金丝等引线在大气和真空环境下的熔断电流。大气环境下引线的熔断电流明显大于真空环境下，并与经验公式的结果基本一致。该研究可为航天用红外探测器封装的引线选择提供参考。

关键词：引线互联；熔断电流；红外探测器组件；引线漏热

中图分类号：TN215 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.002

Research on Characteristics of Wires for Infrared Detector Packaging

WANG Yang[1,2,3], ZHAO Zhen-li[1,2,3], MO De-feng[1,2,3], ZHANG Jing-lin[1,2,3], JIANG Meng-die[1,2,3], XU Lin[1,2,3]

(1. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai 200083, China*;
2. *Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*;
3. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract: Wire bonding is one of the key technologies of infrared detector packaging. However, the choice of wires may directly affect the electrical, mechanical and thermal properties of infrared detector modules. Because material, material diameter, material length and lead process need to be considered in wire interconnection, a variety of wires are usually used to meet different demands in the packaging of infrared detectors. The electrical, mechanical and thermal properties of the wires of infrared detector modules are presented systematically. The burn-out current of gold wire, silicon aluminum wire, platinum wire and other wires in atmospheric and vacuum environment is especially tested and analyzed. The burn-out current of wires in atmospheric environment is significantly greater than that in vacuum environment. This result is consistent with the empirical formula substantially. The research is of referential value to the packaging of space infrared detectors.

收稿日期：2017-11-17

基金项目：国家自然科学基金项目(61376052)

作者简介：汪洋(1981-)，男，浙江富阳人，副研究员，主要从事红外探测器组件的封装和测试工作。
E-mail：wangyang@mail.sitp.ac.cn

Key words：wire bonding；burn-out current；infrared detector module；heat leak of wire

0 序言

随着红外探测器组件的不断发展，人们对探测器封装的光学、电学、力学和热学等方面的要求越来越高。而探测器芯片信号引出工艺则是探测器封装过程中的关键工艺。作为实现红外探测器与外部电路联系的桥梁，该工艺关系到探测器组件的电学、力学和热学性能以及可靠性[1]。红外探测器的封装结构包括管壳封装和微型杜瓦封装两种，它们对引线的要求各不相同。其中，管壳封装主要针对近室温工作的红外探测器，主要采用金丝和硅铝丝等；微型杜瓦封装主要针对低温工作的红外探测器，主要采用金丝、硅铝丝、铂金丝、锰铜丝和铜丝等[2]。图 1 为微型杜瓦封装结构的示意图。探测器与读出电路通常采用倒焊互联的方式，读出电路与引线基板之间一般采用金丝或硅铝丝相连，引线基板与引线环之间采用低漏热金属丝相连[3-4]。红外探测器互联引线的特性包括电学、力学和热学性能，主要与引线的材料、直径以及长度有关。关于各种引线的常规电学、力学和热学特性的相关文献以及产品说明有很多，其中也不乏一些精确数据，但是关于引线熔断特性方面的研究较少，尤其是针对红外探测器封装用引线的熔断特性的文献更少。金属丝熔断可以分为两种机制：当能量不是太大时，金属丝熔为液态而断开，称为熔化熔断；当能量很大时，金属丝直接气化而断开，称为气化熔断。王明灼等人采用熔断的物理模型对大气和真空环境下铜丝的熔断特性进行了测试和模拟。该模型可以很好地解释铜丝的熔断特性[5-6]。影响金属丝熔断的因素包括电流大小、丝长、丝截面积、电流脉冲宽度、丝材质、环境温度、热辐射和热对流参数等。利用现有的计算公式无法精确计算所有长度和规格的金属丝的熔断电流[7]。互联引线的熔断特性可直接影响红外探测器组件在封装时采用何种引线，因而需要给予特别关注。生产红外探测器的相关公司和研究机构一般会根据封装应用选择不同的引线，但文献中很少有详细和综合的数据。因此，本文系统地介绍红外探测器封装中所用引线的电学、力学和热学性能，然后测试和分析金丝、硅铝丝、铂金丝等引线在大气和真空环境下的熔断电流，以便为航天用红外探测器封装的引线选择提供全面和详细的参考数据。

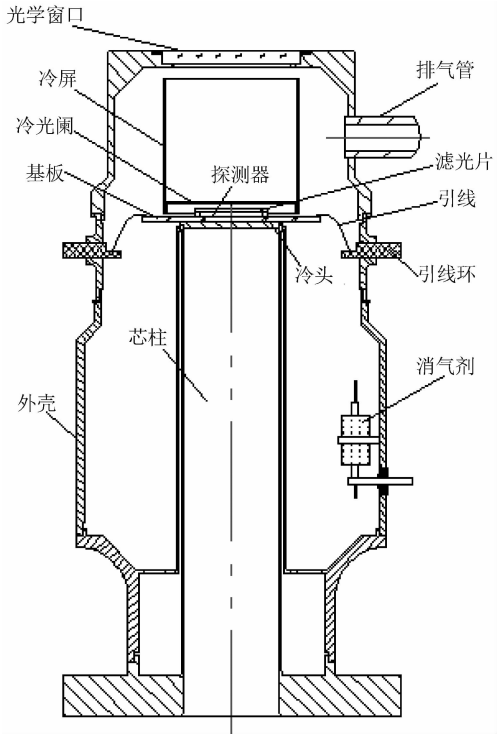


图 1 微型杜瓦的结构图

1 探测器封装用金属丝的选择

1.1 金属丝的常规物理特性

红外探测器封装用金属丝包括金丝、硅铝丝、铂金丝、锰铜丝和铜丝等。其中，金丝是指纯度为 99.99%、线径为 18～50 μm 的高纯金丝。它是通过球焊-楔焊或楔焊-楔焊的键合方式实现探测器的引线互联的。由于具有良好的延伸性及导电性，金丝在用于球焊时无需作防氧化处理，且键压引线弧高低，因而是应用

最为广泛的一种金属丝。但是金丝价格昂贵，并且容易出现塌丝和拖尾现象，这会严重影响键合质量。

与金丝相比，铜丝的导电和导热性能更好，且具有成本低、硬度大、延伸性差、易氧化等特点。它在烧球过程中容易出现高尔夫球以及球形状不圆等现象；在焊线时需要加保护气，否则键合点容易发生裂痕。表 1 列出了金丝与铜丝的力学性能数据[8]。在红外探测器的封装过程中，铜丝主要用于导线基板与外壳引线针的锡焊。

表 1 铜丝与金丝的力学性能对比

线径(mil)	Cu 伸长率(%)	Au 伸长率(%)	Cu 断裂载荷(g)	Au 断裂载荷(g)
0.8	8 ～ 16	2 ～ 8	5～10	3～7
1.0	8 ～ 16	2 ～ 10	8～15	6～12
1.1	10 ～ 20	2 ～ 11	10～20	7～15
1.2	10 ～ 20	2 ～ 12	12～22	8～18
1.5	10 ～ 20	2 ～ 13	20～30	12～24
2.0	15 ～ 25	2 ～ 16	40～55	20～40

硅铝丝具有良好的导电导热能力和抗蚀性，容易与集成电路芯片的铝金属化布线形成良好的键合，并且很稳定；易于拉制成细丝，且价格比金丝便宜。金丝容易与芯片上的铝金属化布线层形成有害的金属间化合物(紫斑或白斑)，导致键合接触强度下降，接触电阻增大，进而降低电路的可靠性。红外探测器组件的集成读出电路采用铝合金布线，因此硅铝丝是一种常用的探测器封装用键合金属丝。

作为一种以铜、锰、镍为主要成份的电阻合金，锰铜丝具有电阻率较高、电阻温度系数很小、对铜的热电势低以及电阻长期稳定性好等特点，因而是用于制作标准电阻器、电阻元件和分流电阻的主要材料。对于红外探测器的封装来说，低导热系数是锰铜丝的优点。所以它通常用于探测器引线基板与外壳之间的锡焊，以满足探测器组件低漏热的封装设计要求。

对于红外探测器组件来说，铂金丝是一种很好的低漏热引线材料，同时还具有一定的延伸性。它可以制成直径为 18～50 μm 的引线。在用于球-楔焊接时，无需作防氧化处理，且具有一定的硬度，不容易造成塌丝；由于价格昂贵，属于小众类金属引线，通常用于在低温环境下工作的半导体器件封装。

在红外探测器组件的封装过程中，除了要考虑金属引线的力学及工艺可行性之外，我们更为关心引线的电学和热学性能。表 2 列出了不同金属丝的常规电学和热学性能数据。从中可以看出，金、铜、银和铝的电阻率都非常小，在焊线两端没有温度梯度时均是导线的理想材料。但是在焊线两端存在温度梯度时，这几种材料的导热系数很大，而引线漏热又是杜瓦传导漏热的一部分，尤其是在引线数目很大的情况下，传导漏热会变得非常严重。因此，在满足电学性能要求的前提下，红外探测器封装引线应尽量选用导热系数较小的材料。铂金丝的电阻率比前面几种金属丝稍大，但是其引线的导热系数却小很多，而且在红外探测器的封装过程中，引线都只有几十毫米，引线电阻并不明显。因此，当焊线两端存在温差梯度时，铂金丝是一种很好的引线材料。在红外探测器的封装过程中，有时会遇到引线密度大和引线较长的情况，此时铂金丝之间可能由于相互交叉而导致引线短路，这是因为铂金丝的表面没有绝缘保护层。在这种情况下，带漆包线的锰铜丝和铜丝的优势就会体现出来。其中，锰铜丝的导热系数很低，比铜丝更适合探测器封装。但是锰铜丝的电阻率大，且熔断电流小，因此在考虑电学性能时，铜丝也有特定的应用场合。

1.2 金属丝的传导漏热计算

金属引线主要以传导方式造成红外探测器组件的漏热，而且这也是其传导漏热的主要部分。作为红外探测器封装的关键指标之一，漏热会直接限制红外探测系统的制冷功率。人们在航天应用中尤为关注该项指标。传导漏热主

表 2 不同金属丝的常规电学和热学性能数据

金属丝材料	平均电阻率 ($10^{-8}\Omega\cdot$m)	平均导热系数 (W/(m·K))
铂金丝	10.6	71.6
硅铝丝	1.52	276.29
铜丝	0.99	414.10
金丝	1.35	311.42
银丝	0.97	441.59
锰铜丝	48.21	17.83

要受引线长度、引线材料、引线粗细以及引线两端温差的影响。单根引线的传导漏热可以利用式(1)进行精确计算[4]：

$$Q=\bar{\lambda}A\frac{T_2-T_1}{L} \quad (1)$$

式中，$\bar{\lambda}$ 为引线材料在 $T_2\sim T_1$ 温度下的平均导热系数(W/(cm•K))；A 为引线材料的导热横截面积(cm^2)；L 为引线的有效长度(cm)；T 为绝对温度(K)；T_1 和 T_2 为金属引线两端的温度(K)。

由式(1)可知，导线的导热系数越小，线径越细，温度梯度越小，就越有利于减少红外探测器组件封装的传导漏热。在此封装过程中，需要综合考虑引线的导电性能、机械性能、化学稳定性、热学性能、可键合性以及工艺实现等诸多因素。

2 探测器封装用金属丝的熔断电流

2.1 互联引线的熔断电流经验公式

虽然互联引线熔断模型可以很好地解释引线熔断现象，但是互联引线的熔断电流与电流大小、丝长、丝截面积、电流脉冲宽度、丝材质、真空度、熔断时间、环境温度、热辐射和热对流参数等因素都有关系。现有的计算公式无法精确计算每种规格引线的熔断电流，因此一般采用 Raytheon 公司经验公式计算引线在标准大气压下的熔断电流：

$$I=Ad^C \quad (2)$$

式中，I 为 4～9 s 的引线熔断电流。A 为熔断系数：硅铝丝为 9989；金丝为 12675；铜丝为 20500。d 为引线直径。C 为常数：硅铝丝为 1.45；金丝为 1.46；铜丝为。引线长度为 10 mm。

图 2 所示为根据经验公式计算的三种金属丝的线径与熔断电流的关系曲线。随着线径的增大，引线的熔断电流变大，在三种金属丝中，铜丝的熔断电流最大，金丝次之，硅铝丝最小。

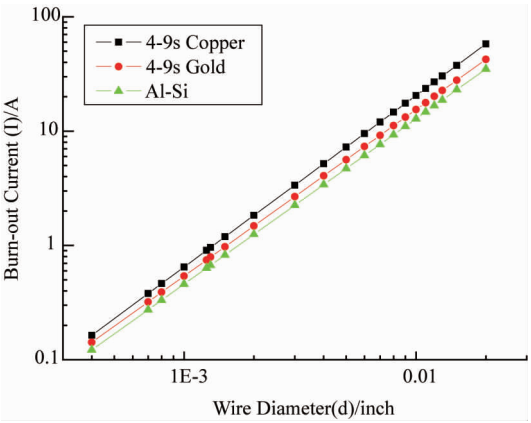


图 2 三种金属丝的熔断电流与线径关系曲线

金属引线的熔断电流会随引线长度的增加而减小。当引线较短时，该电流随长度的增加而迅速减小，在达到一定长度后则变化不明显。图 3 为 Sumitomo Metal Mining 公司产金丝的熔断电流与引线长度的关系图。其中，引线直径为 30 μm。

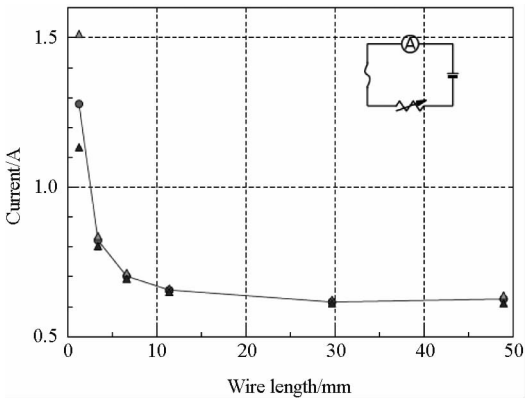


图 3 金属丝的熔断电流与长度关系曲线

2.2 互联引线的熔断电流试验

由于红外探测器一般工作在低温真空环境中，其封装用引线的熔断电流还需考虑真空条

件。表 3 列出了本文研究的金属丝样品及其测试状态，包括红外探测器封装常用的几种不同长度、线径和材料的金属引线。其中，锰铜丝和铜丝采用漆包线的形式。本试验结合航天用红外探测器的实际应用环境，在大气环境(20±5℃、1 个标准大气压)和真空环境(20±5℃、6×10^{-3} Pa)两种条件下进行金属引线熔断电流试验。

表 3 熔断电流试验的样品状态

金属丝材料	长度 L (mm)	直径 D (μm)	环境状态
铂金丝	15	25	大气、真空
硅铝丝	15	50	大气、真空
铜丝	50	60、100	大气、真空
金丝	15	25	大气、真空
锰铜丝	30、50、100	60、80、100	大气、真空

图 4 为金属丝熔断电流测试系统的原理框图。我们采用泰克公司生产的 PWS4305 型电流源表提供金属引线的测试电流及电流显示，并采用泰克公司生产的 TDS2014B 型数字存储示波器实现熔断电流的熔断时间分辨。电源开关 S1 用于控制整个测试回路的通断。金属引线采用定制线夹进行力学固定和电学连接，并被一起放置在真空腔体中。线夹通过真空接插件与外部回路连接。在大气环境测试中，将金属引线制作成所需长度并将其装入线夹。设置测试电流，打开 S1 开关，观察示波器波形。当熔断时间在 3～9 s 时，记录熔断电流。而在真空环境测试中，则需要将真空腔体抽真空至 6×10^{-3} Pa 以下后再开始测试。

因为熔断电流受温度和湿度等多种环境因素的影响，所以对每组熔断电流测试三次并取其平均值。在测试过程中发现，用从小往大多次加电流的方式所获得的测试熔断电流值比用一次加大电流方式所获得的熔断电流值高，尤其是采用漆包线涂层的锰铜丝和铜丝。因此根据使用条件，熔断电流为 3～9 s 一次熔断的电流。表 4 列出了大气和真空环境下不同金属丝

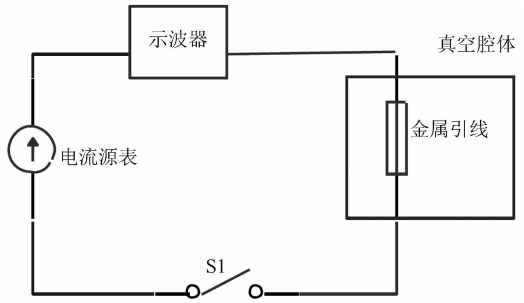


图 4 金属丝熔断电流测试系统的原理框图

的熔断电流测试结果。在红外探测器封装常用的引线规格中，熔断电流从高到低依次为铜丝、锰铜丝、硅铝丝、金丝和铂金丝；而且真空环境下的引线熔断电流远小于大气环境下的熔断电流，这与陈雁等人研究真空和大气环境下铜丝熔断电流时所获得的结果一致[5]。该现象主要是由于引线自身产生的电阻焦耳热在两种环境下的散热途径不同。焦耳热可以通过空气对流、热传导和热辐射等方式散热，但在真空条件下，焦耳热无法通过空气对流的方式散热。因此，在真空环境中，引线的焦耳热更容易堆积从而引发其熔断。红外探测器封装所用锰铜丝的长度处于熔断电流随长度变化的平坦区域，因此锰铜丝的熔断电流与长度关系不大。随着引线线径的增大，几种规格引线的熔断电流都得到了提高。其中，金丝和硅铝丝在大气下的熔断电流与用前述经验公式计算的数据基本相符，而铜丝的熔断电流则明显小于经验公式计算值。这主要是因为本文采用铜漆包线，影响了铜丝的散热。在测试锰铜丝的熔断电流时，用一次加大电流的方式所获得的熔断电流明显小于用从小到大多次加电流方式所获得的熔断电流，因为在低电流时，焦耳热会引起漆包线涂层的挥发，从而使引线更容易散热。

3 结论

(1)金丝、硅铝丝、铂金丝、锰铜丝和铜丝在电学、力学、热学以及工艺可行性方面各有特点。因此，针对红外探测器封装中的不同应用场合，需要根据引线互联的具体要求进行合理的引线选择。

表 4 大气和真空环境下不同金属丝的熔断电流对比

金属丝材料	长度 L (mm)	直径 D (μm)	环境状态	熔断电流 I (A)
铂金丝	15	25	大气	0.4
铂金丝	15	25	真空	0.15
硅铝丝	15	50	大气	1.1
硅铝丝	15	50	真空	0.4
铜丝	50	60	大气	1.6
铜丝	50	100	大气	3.5
铜丝	50	60	真空	0.7
铜丝	50	100	真空	2.0
金丝	15	25	大气	0.5
金丝	15	25	真空	0.2
锰铜丝	30、50、100	60	大气	0.66、0.65、0.64
锰铜丝	30、50、100	80	大气	0.99、0.97、0.96
锰铜丝	30、50、100	100	大气	1.44、1.41、1.40
锰铜丝	30、50、100	60	真空	0.51、0.50、0.50
锰铜丝	30、50、100	80	真空	0.72、0.70、0.69
锰铜丝	30、50、100	100	真空	0.92、0.90、0.89

(2)在红外探测器封装常用的引线规格中，熔断电流从高到低依次为铜丝、锰铜丝、硅铝丝、金丝和铂金丝，而且真空环境下的引线熔断电流远小于大气环境下的熔断电流，这主要是因为真空环境下引线电阻的焦耳热无法通过空气对流的方式进行散热。

(3)红外探测器封装用引线的熔断受材料、线径、环境温度、热辐射和热对流等多种因素的影响，因而有待于对熔断机理进行深入研究。

参考文献

[1] 龚海梅，邵秀梅，李向阳，等. 航天先进红外探测器组件技术及应用 [J]. **红外与激光工程**，2012，**41**(12)：3130-3140.

[2] 武文. 多通道光导线列器件的陶瓷封装基板与系统设计[D]. 北京：中国科学院研究生院，2011.

[3] 夏王. 长线列长波碲镉汞红外焦平面杜瓦组件封装技术研究[D]. 北京：中国科学院研究生院，2012.

[4] 田立萍，朱颖峰，王微，等. 制冷型红外焦平面探测器引线键合质量优化研究 [J]. **红外技术**，2012，**34**(12)：699-704.

[5] 陈雁，张伟. 航天用安装铜导线熔断特性研究[J]. **航天器环境工程**，2013，**30**(4)：407-410.

[6] 王明灼，王永华，周玉刚. 金属丝熔断特性的研究 [J]. **四川理工学院学报(自然科学版)**，2008，**21**(5)：12-15.

[7] 杨国祥，孔建稳，郭迎春，等. 一种半导体封装用键合金丝的研制 [J]. **贵金属**，2010，**31**(1)：13-16.

[8] 陈永泰，谢明，王松，等. 贵金属键合丝材料的研究进展 [J]. **贵金属**，2014，**35**(3)：66-70.