

# 双金属复合圆管层间 高温接触热阻测试方法的选择

## Selection of Test Method for High Temperature Contact Thermal Resistance Between Layers of Bimetallic Composite Circular Tubes

摘要：双金属复合圆管因其优越的特性在越来越多的领域得到广泛应用，而其层间接触热阻是这种圆管作为换热管时的重要性能指标。本文针对这种双金属复合圆管层间接触热阻的测试需求，分析和对比了现有用于接触热阻测试的各种稳态和瞬态方法，得出了闪光法是更合适测试方法的结论。本文还专门介绍了闪光法用于测试双金属复合圆管层间接触热阻的优势，以及后续还待解决的具体技术问题。

### 1. 项目背景

随着科学技术的迅速发展，石油勘测、深海开发、航空航天和国防军工等领域中管材的应用面临着服役环境愈加苛刻，工况载荷愈加复杂等问题，因而对于能同时满足不同服役环境要求、综合性能更好的双金属复合管材的需求日益迫切。双金属复合管兼具两种金属材料的优点，能够同时满足高强度、耐腐蚀、耐高温、耐磨损等服役需求，并且可以节约贵金属和稀有金属的用量。例如广泛应用于反应堆蒸汽发生器中的双金属圆管，其典型结构如图1所示，其层间接触热阻TCR (thermal contact resistance) 是换热管的重要性能指标。

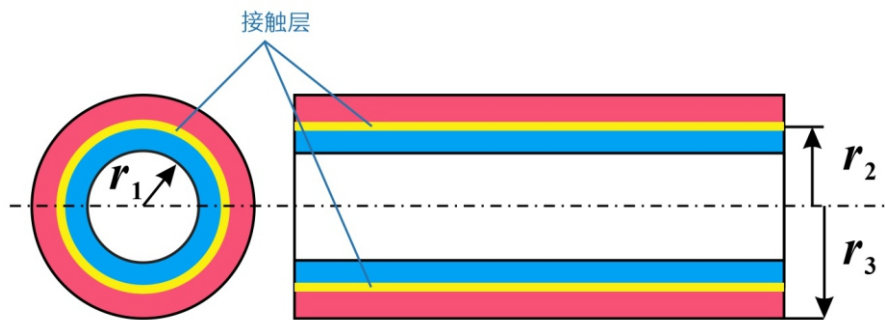


图1 双金属复合圆管层间接触面示意图

为了测试图1所示结构换热管的接触热阻，客户要求测试的具体指标如下：

- (1) 温度范围：50~1200℃；
- (2) 真空度范围：0.01Torr~760Torr（绝对压力）；
- (3) 内管内径10mm左右，内管外径12mm左右，外管外径14mm左右，样品长度400mm。

从上述指标可以看出，此项目的接触热阻测量面临着以下几方面的挑战：

- (1) 面临高温条件下进行测试的挑战，还未见到如此高温接触热阻测试的相关报道。
- (2) 真空条件下的测试会使得接触热阻发生数量级的改变，这使得接触热阻的变化范围非常宽泛。

(3) 管径和长度之比很大，在温度均匀性和测试装置的复杂程度上将面临挑战。

针对上述挑战，首先需要的是选择合适的接触热阻测试方法。为此，本文对现有的各种接触热阻测试方法进行分析和对比，希望最终能找到适合此项目的测试方法及其所需的改进要点。

## 2. 热阻测试方法分析

在过去的四十年中，已经开发了十多种接触热阻测试方法，有关这些接触热阻测试方法的综述在文献[1]中有详细报道，本文在这里不再赘述。本文仅在此综述文献的基础上，按照稳态法和瞬态法两大类测试方法，结合双金属圆管层间接触热阻测试，做进一步的重点分析对比。

### 2.1 稳态法

稳态法是目前最常用的接触热阻测试方法，其依据的标准是ASTM D5470，所依据的测量原理是傅里叶一维稳态传热定律。稳态法常用于测量平面形状接触面之间的接触热阻，但对于本项目所涉及的双金属圆管层间接触热阻测试，存在以下几方面的不足：

(1) 按照傅里叶传热定律和ASTM D5470，接触热阻的测量需要获得流经热阻层的热流密度和以及此热流在热阻层上形成的温度差。对于平面形状接触面，可以在平面热阻层的两侧增加棒状热流计和多只温度传感器，由此来实现对热流密度和温度差的测量。但对于圆管样品，由于圆管内径很小，如果直接将圆管作被测样品，则根本没有布置热流计和多只温度传感器的空间。

(2) 如果对双金属复合圆管进行取样测试，并将样品曲面进行平面化近似处理，也可勉强使用ASTM D5470进行接触热阻测量，但测试模型的近似会带来系统误差。同时，在高温和真空下，需要增加复杂的护热装置以避免高温热流计侧向热损带来的严重误差。

(3) 在高温和真空条件下，热阻层两侧的温差测量也是一个很大的问题。如果温差测量采样热电偶温度传感器，则在热电偶安装时需要采取特殊手段以避免带来空隙，否则在真空条件下这些空隙会给温度测量带来严重误差。如果采用红外图像测温方式，则需考虑样品边缘在高温下的热辐射影响。

由上分析可以看出，稳态法并不适合双金属复合圆管层间高温接触热阻的测量。

### 2.2 瞬态法

瞬态法是在温度均匀且稳定的被测样品上施加热扰动后通过测量动态响应信号而得到相应热物理性能参数的一类方法。可用于接触热阻测量的瞬态法有热像法、闪光法、光声法、3Omega法和热反射法等几类。下面我们分析这些瞬态法用于双金属复合圆管层间高温接触热阻测量的可行性。

(1) 根据高温条件，首先就可以排除掉3Omega法、热像法和光声法，因这三种方法只能用于温度不高条件下的测试。

(2) 闪光法是一种应用最为广泛的瞬态法，非常适合高温和真空条件下的材料热物性测量，也有大量文献对闪光法测量接触热阻进行过报道，其测量原理如图2所示。

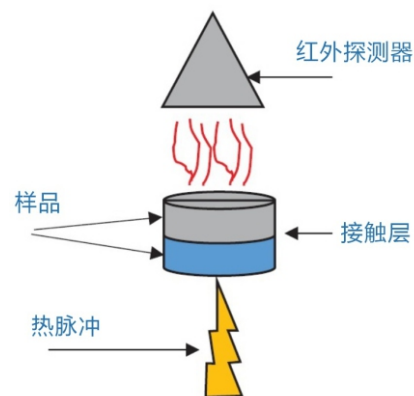


图2 闪光法接触热阻测量原理图

(3) 闪光法作为一种成熟的接触热阻测试方法，是基于平板三层样品测试模型，即已知图2中样品的热物性参数来根据整体测量曲线求解接触层的未知热阻，而对于圆柱状闪光法多层结构测试模型，还未见相应的研究报道，还需开展相应的测试模型研究及其试验验证。

(4) 热反射法作为近一二十年来新发展起来的瞬态法，多用于维纳尺度材料的热物性测试。尽管也尝试用于接触热阻测试，如文献[2]报道用于双壁换热管层间接触热阻测试，但在具体测试中还存在很多工程问题，还无法进入实用测试阶段。

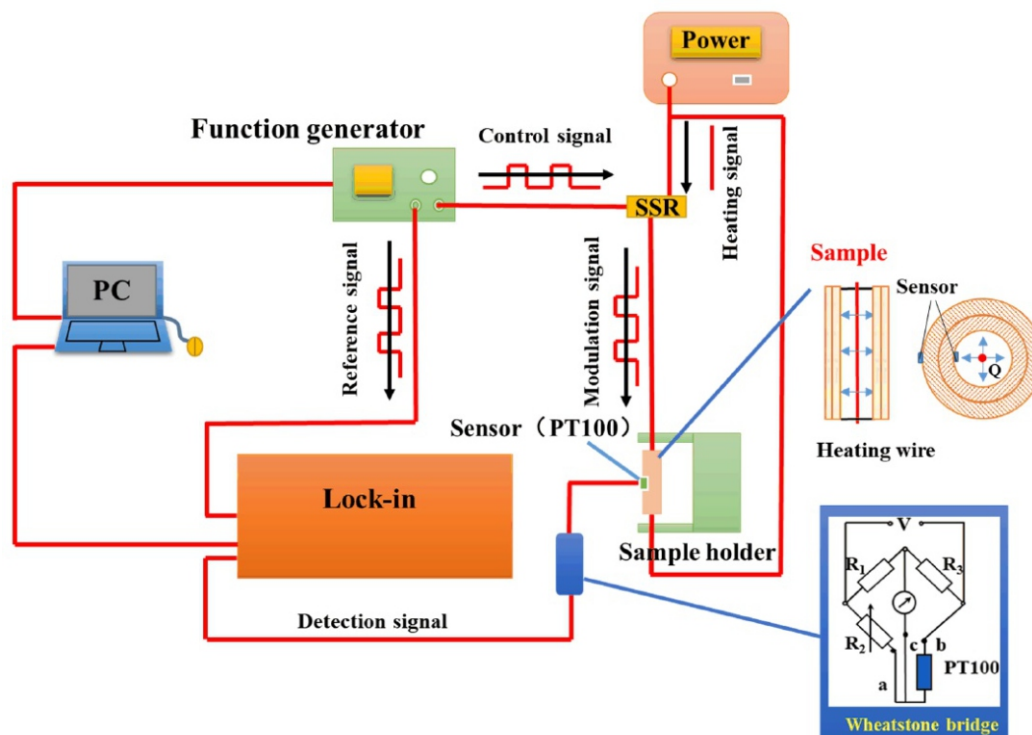


图3 瞬态热反射法接触热阻测量装置结构示意图

(5) 热反射法测量装置如图3所示，其最大特点是采用金属丝辐射加热代替传统热反射法的激光加热，这样可以在金属管内壁形成具有一定频率的可调制温度波变化。但这种通过金属丝进行内壁加热温度波调制所带来的问题有：一是金属丝的加热冷却响应速度要远低于激光加热，所以很难实施高频加热来测试较小的接触热阻，仅能通过低频加热调制测试较大接触热阻；二是金属丝温度波是通过改变加热电流的周期和幅度来进行调制，这种开环调制形式需要较长时间温度波才能达到稳定，同时此温度波同时会改变金属圆管的温度，从而使得整个测试过程不可控。

### 3. 总结

综上所述，对于双金属圆管层间高温接触热阻的测量，比较合适的方法是闪光法，主要体现在以下几个方面：

(1) 闪光法很适合高温和真空环境下的测试，可以很方便的将400mm长的细圆管样品整体加热到1200°C高温，且对控温精度并未有太高要求，相应的真空环境也很容易实现和准确控制真空度。总之，配置闪光法需要的内部具有高温加热和隔热防护的水冷真空腔体较易工程实现，温度和真空度控制系统也具有较高的技术成熟度。

(2) 闪光法的另一个技术关键是管状样品内表面的闪光形式的加热，但对加热波形并未有严格的要求，只需满足一定的窄脉冲宽度即可。对于双金属复合圆管热扩散系数的整体测试，由于所用材质为热扩散系数较低的镍基合金，且接触面存在接触热阻，所以可以采用脉冲宽度较大的热脉冲，这就为热脉冲的实现提供了便捷，例如无需采用脉冲激光加热这种窄脉冲形式，可以采用电阻脉冲加热来提供脉冲加热，就像文献[2]中提到的金属丝发热体。

(3) 如图2所示，目前常用的闪光法都是采用红外探测器测量样品的背面温升，但对于双金属圆管被测样品，如果圆管内部进行脉冲加热，那么再用红外探测器测量圆管外表面的温升则会引起曲面导致探测器光学聚焦偏离所带来的误差。但闪光法还可以直接用热电偶来测量圆管外表面温升，这也是红外探测器未出现前闪光法所常用的温升测量手段，文献[2]中也采用了这种热电偶形式。由于双金属复合圆管是金属材质，可以很容易将热电偶直接焊接在样品的外表面，由此采用焊接热电偶方式可很好的解决样品背面温升和样品温度测量问题。

尽管闪光法比较适合双金属复合圆管层间高温接触热阻测试，但还存在以下问题有待解决：

(1) 闪光法测量双金属复合圆管层间接触热阻是一个柱坐标三层测试模型，还需对这种测试模型进行相应的推导求解，由此可根据推导公式，并依据已知参数和背温测试曲线，计算得到接触热阻值。

(2) 布置在圆管轴线方向上的发热体和脉冲加热电源装置是另一个需要解决的关键问题，这其中涉及到确定发热体的材质和直径，确定脉冲加热电源的形式、功率参数和脉冲宽度调节范围等。

## 4. 参考文献

[1] Murwamadala R D, Veeredhi V R. Advances in thermal contact resistance studies[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237 (1) : 201-222.

[2] 王亚飞, Babar Hayat, 张若谷,等. 基于相敏瞬态热测量的双壁换热管层间接触热阻实验研究[J]. 实验力学, 2022, 37(6):10.