

**摘要：**重材院为航空领域研制的双支式 PtRh20 外套管铠装 R 型热电偶，开展材料匹配、工艺控制研究。选用热膨胀系数匹配、力学性能相近的材料作为外套管，制订并优化制造工艺，减少对偶丝污染，确保精度和稳定性，并对贵金属套管铠装热电偶的结构尺寸、使用温度、分度、长期稳定性、高温绝缘电阻、绝缘材料压实密度等性能进行了验证。使用温度达到 1500℃，精度达到  $\pm 0.25\%$ ，各项性能满足研制要求。克服了高温合金外管贵金属铠装热电偶稳定性差，使用温度受限的不足，稳定性优于装配式贵金属热电偶指标要求。

**关键词：**贵金属套管；铠装热电偶；稳定性。

中图分类号：TH811

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2020)08-0027-04

收稿日期：2020-05-28

# 航空用贵金属套管铠装热电偶研究

张立新<sup>1</sup> 肖翔<sup>1</sup> 陈洁<sup>1</sup> 唐青松<sup>2</sup> 任侃<sup>2</sup>

1. 重庆材料研究院有限公司，重庆 400770；2. 苏州长风航空电子有限公司，江苏苏州 215011

## 一、前言

1957年，荷兰飞利浦公司研制出一种类似于电缆的热电偶，将偶丝、绝缘材料和金属套管三者经旋锻或拉拔而制成可绕的组合物，称之为铠装热电偶。与装配式热电偶相比，铠装热电偶体积小、重量轻、可绕性好，而且机械强度高，耐冲击、振动、地震等，适用于高温、高压、冲击、振动等环境。根据铠装体内部偶丝芯线材料，主要有贵金属铠装热电偶和廉金属铠装热电偶两类。

1999年，我国制订了《JB/T8901 贵金属铠装热电偶电缆》标准，以 GH3030、GH3039 等高温合金作为外套管材料，使用上限温度为 1100℃，精度等级除 I、II 级外，专门增加了 P（普通）级，允差为 0.5%，且对其稳定性未做要求。在高温下，廉金属外套管中部分元素向贵金属热电极扩散，改变贵金属偶丝的成分，导致热电势漂移，引起测量误差<sup>[1]</sup>，精度难以保持，稳定性不理想，使用温度上限与廉金属铠装热电偶相比优势不明显。高温合金系列外套管的贵金属铠装热电偶的推广应用受到限制。

重庆材料研究院有限公司针对航空领域高可靠使用要求，采用铂铑合金作为外套管材料，研制了双支

式贵金属套管铠装热电偶，在选材、工艺以及精度、长期稳定性等方面开展研究和验证。

## 二、材料选择

贵金属套管铠装热电偶由贵金属外套管、贵金属热电偶丝、绝缘材料三部分组成。在铠装热电偶设计时除了套管材料的高温强度，通常还要考虑三种材料的物理匹配性，避免使用过程中三种材料的膨胀系数差异过大，受热产生内应力，引起测量误差。由于外套管及热电极均为铂铑材料，不存在化学兼容性问题<sup>[1]</sup>。铂及铂合金是理想的套管材料。纯铂在高温下强度较低，易受自身重量或高温冲击、振动而致损坏，在铂中添加铑元素可以提高材料的高温强度和抗温度冲击能力。通常含铑量低的铂铑合金在大气中可使用到 1500℃，Rh 质量分数大于 20% 的铂铑合金在大气中可使用到 1700℃<sup>[2]</sup>。从表 1 各种偶丝、保护套管材料、绝缘材料的膨胀率与温度关系<sup>[3]</sup>中可以看出，PtRh20 与 Pt、PtRh13 以及 MgO 的热膨胀匹配性较好。

为保证热电偶工作温度、高温强度、材料匹配等要求，同时兼顾拉拔减径的工艺要求，选用 PtRh20 合金作为外套管材料，高纯电熔 MgO 作为绝缘材料，

表 1 偶丝、保护管、绝缘材料膨胀率与温度关系<sup>[3]</sup> (单位: %)

	200℃	400℃	600℃	800℃	1000℃	1100℃
PtRh20	0.15	0.35	0.55	0.70	1.02	1.16
Pt	0.15	0.35	0.55	0.68	1.00	1.12
MgO	0.20	0.43	0.62	1.03	1.32	1.45

表 2 铂铑合金材料物理性能<sup>[4]</sup>

材料	熔点 (℃)	密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	电阻率 (μΩ·cm) (20℃)	抗拉强度 (MPa) (20℃)	伸长率 (%)
PtRh20	1905	18.74	20.8	490	20
PtRh10	1847	20.0	18.9	314	35
PtRh13	1860	19.61	19.6	344	35
Pt	1769	21.46	10.4	137	40

PtRh13-Pt (R 型) 偶丝作为热电极, 偶丝精度、不均匀电动势满足 GB/T1598 中 II 级精度要求。

三、工艺控制

为确保贵金属套管铠装热电偶精度及稳定性, 套管及偶丝均经过严格清洗; 采用控制烧结温度, 以获得合适的氧化镁绝缘柱硬度, 避免因过硬, 在拉制过程中压伤贵金属偶丝; 因硬度过低, 组装时造成绝缘柱缺损。根据 PtRh20 合金的抗拉强度与加工率、退火温度与抗拉强度的关系<sup>[4]</sup>, 以及表 2 外套管、偶丝的延伸率等, 设计

并优化制备工艺。

四、性能验证

1、尺寸

贵金属套管铠装热电偶尺寸、横截面形貌分别见表 3 和图 1。通过严格控制原材料尺寸及制造工艺, 贵金属套管铠装热电偶的壁厚、绝缘层厚度、偶丝尺寸较为均匀, 分布合理。

2、分度

对 3 支贵金属套管铠装热电偶的热电势精度进行测量, 装炉时通过焊接前热接点位置的标注, 确保标准偶热接点与铠装热偶内部热接点处于同一径向截面上, 减少测量端位置不准确对校准结果带来的影响<sup>[5]</sup>, 检定结果见表 4。偏差均小于 ±0.25%t 的 II 级精度允

差要求。

3、长期稳定性

将贵金属套管铠装热电偶样品在 1100℃ ±50℃ 进行 250h 稳定性试验, 并分别在 100h、200h、250h 对 1084.62℃ 温度点对热电势检测, 检测结果见表 5。试验前后热电势最大变化为 1.31℃。其稳定性优于 GB/T 30429-2013

表 3 贵金属套管铠装热电偶尺寸 (批号: KR2180509; 报告编号: 2019C232)

壁厚 (mm)			绝缘层厚度 (mm)			丝径 (mm)			
位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3	1	2	3	4
0.40	0.40	0.41	0.30	0.35	0.38	0.47	0.49	0.48	0.48

表 4 贵金属套管铠装热电偶电动势 (规格: Φ3mm; 单位: mV)

温度点 (编号)	要求	X1#-1	X1#-2	01#-1	01#-2	02#-1	02#-2
650℃	6.138 ~ 6.176	6.158	6.157	6.142	6.155	6.153	6.152
1084.62℃	11.603 ~ 11.677	11.665	11.668	11.672	11.646	11.644	11.644
1200℃	13.186 ~ 13.270	13.262	13.265	13.228	13.245	13.242	13.243

表 5 贵金属套管铠装热电偶长期稳定性试验 (试验参数: 1100±50℃ 250h 长期稳定性; 检定温度点: 1084.62℃; 型号规格: Φ3mm; 单位: μv)

样品编号	要求	0h	102h	Δt (℃)	200h	Δt (℃)	250h	Δt (℃)	最大差 (℃)
X1#-1	≤ 3℃	11665	11674	0.69	11654	-0.85	11658	-0.54	1.23
X1#-2		11668	11677	0.69	11662	-0.46	11660	-0.62	1.31

备注: X1#-1、X1#-2 分别是双支式热电偶例试样品的两对热电极。



图 1 铠装热电偶样品横截面形貌

工业热电偶<sup>[6]</sup>对装配式贵金属热电偶热电势变化不大于 1.5℃或 0.0025t<sub>max</sub> 的稳定性要求。

#### 4、压实密度

$$\text{压实密度 } D = \frac{W_{16} - W_{38}}{D_{23} + \frac{W_{16} - W_{38}}{D_{24}}} \quad (1)$$

其中,  $W_{16}$ —浸泡前重量 (mg)

$W_{27}$ —浸泡后重量 (mg)

$W_{38}$ —去粉后重量 (mg)

$D_{23}$ —吸收液密度 = 870mg/cm<sup>3</sup>

$D_{24}$ —氧化镁密度 = 3580mg/cm<sup>3</sup>

经检测, 贵金属套管铠装热电偶氧化镁压实密度为 2889mg/cm<sup>3</sup>, 大于氧化镁理论压实密度的 80%, 高于协议规定的 2506mg/cm<sup>3</sup> 的要求。

#### 5、高温绝缘电阻

将贵金属套管铠装热电偶插入热电偶检定炉中, 插入深度 300mm, 炉温升至 1000℃ ± 20℃, 恒温 10 分钟, 试验电压 250V, 结果见表 6。

表 6 贵金属套管铠装热电偶高温绝缘电阻试验

编号	技术要求 (MΩ)	丝—壁 (MΩ)	丝—壁 (MΩ)	丝—丝 (MΩ)
01#-1	≥ 0.10	0.10	0.11	0.20
01#-2		0.15	0.12	0.19
02#-1		0.14	0.10	0.18
02#-2		0.12	0.12	0.17

试验结果满足协议要求。

根据参考文献, 绝缘电阻为 0.1MΩ, 将引入 0.04% 的热电势误差<sup>[8]</sup>。贵金属套管铠装热电偶在 1000℃, 高温绝缘电阻均大于 0.10MΩ, 引入的热电势误差小于 0.04%, 与精度要求的 0.25%t 相比, 高温绝缘电阻带来的误差可以忽略。

#### 6、1500℃热电势检定

表 7 贵金属套管铠装热电偶 1500℃热电势检定

样品编号	热电动势 (μV)		
	2 级	X1#-1	X1#-2
1500℃	17398 ~ 17504	17500	17502

1500℃热电势检定结果见表 7, 试验表明可满足 2 级精度要求。

## 五、结论

采用 PtRh20 合金外套管的铠装热电偶克服了高温合金外管贵金属热电偶稳定性差, 使用温度受限等不足。重庆材料研究院研制的贵金属套管铠装热电偶材料匹配性好, 精度达到 ± 0.25%t; 在 1100℃、250h 稳定性试验后, 热电势漂移小于 1.5℃; 套管内绝缘材料压实密度、高温绝缘电阻性能良好, 可满足航空领域高性能要求。

## 参考文献

- [1] 侯素兰. 铠装贵金属热电偶存在的问题及解决方法 [J]. 辽宁计量与管理, 2000, (5): 30-30.
- [2] 张健康, 刘毅, 李伟, 等. 贵金属铠装热电偶的发展及应用 [J]. 贵金属, 2016, (s1): 23-27.
- [3] 《功能材料及其应用手册》编写组. 功能材料及其应用手册 [M]. 机械工业出版社, 1991.
- [4] GB T 36010-2018, 铂铑 40- 铂铑 20 热电偶丝及分度表 [S].
- [5] 侯运安, 赵雪茹, 王兵利, 等. 铠装贵金属热电偶测量端位置的确定方法 [J]. 计测技术, 2015, (4): 65-67.
- [6] GB/T 30429-2013, 工业热电偶 [S].
- [7] ASTM D2771-83, 氧化镁压实密度试验方法 [S].
- [8] 钱富和. 铠装热电偶绝缘电阻及其影响因素 [J]. 工业仪表与自动化装置, 1991, (2): 58-62.

## The Research of Mineral-Insulated Noble Metal-Sheathed Thermocouple Used in Aircraft

ZHANG Li-xin<sup>1</sup>, XIAO Xiang<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, TANG Qing-song<sup>2</sup>, REN Kan<sup>2</sup>

(1. Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400770, China; 2. AVIC SUZHOU CHANGFENG AVIONICS Co., Ltd., Suzhou 215011, China)

**Abstract:** The property of type R PtRh20 sheathed thermocouples was investigated for using in the aviation fields. The compatibility, such as coefficient of thermal expansion, mechanical property of between the thermoelements and the sheath alloy, processing

technology of the thermocouples were discussed. The calibration, stability, high temperature insulation resistance and compaction density properties of the PtRh20 sheathed thermocouples were tested and verified. The using temperature of the PtRh20 sheathed thermocouples were up to 1500°C with an accuracy of  $\pm 0.25\%$  and the stability were better than that of assembled noble metal thermocouples that meet the technology requirements. The integrity property of the PtRh20 sheathed thermocouples were better than that of superalloy sheathed thermocouples.

**Key words:** noble metal-sheathed; thermocouple; stability

### 作者简介

张立新: 重庆材料研究院有限公司, 高级工程师, 高

性能矿物绝缘电缆创新团队首席专家, 传感器部部长, 研究方向为高性能矿物绝缘电缆技术、温度传感器技术、加热器技术研究。

通信地址: 重庆市北碚区蔡家工业园

邮编: 400770

邮箱: 2607283107@qq.com

肖翔: 重庆材料研究院有限公司, 高级技师, 主要从事铠装热电偶电缆及传感器开发。

陈洁: 重庆材料研究院有限公司, 高级工程师, 主要从事温度传感器及元件产品研究与开发。

唐青松: 苏州长风航空电子有限公司, 研究员级高工, 主要从事航空机载传感器研发。

任侃: 苏州长风航空电子有限公司, 高级工程师, 主要从事航空机载传感器研发。