

# 不同热电偶套管对温度测量准确性影响的对比实验研究

邹峙剑, 刘大蔚, 张科\*

(国能浙江北仑第三发电有限公司, 宁波 315800)

**摘要:** **目的** 解决电厂烟道等高温腐蚀环境下, 常规 K 型热电偶因灰尘冲刷、高温腐蚀导致的测温误差大、寿命短等问题, 同时明确 GH3039 材质保护套管 K 型热电偶加装堵头对测温性能的影响。 **方法** 实验以 HFY-203D 型黑体辐射炉模拟高温工况, 34970A 数据记录仪采集数据, 对比 301 型(无堵头)与 302 型(带堵头)K 型热电偶。通过单独/同时放置两种方式, 在 800~950 °C 升温、650~950 °C 降温节点测试(每组重复 3 次), 数据经 Origin 2017 软件分析。 **结果** 单独检测时, 302 型 K 型热电偶平均温差 2.805 °C(较 301 型 4.345 °C 降低 35.5%), 平均响应时间 113.333 s; 同时检测时, 两种 K 型热电偶响应时间均为 73.333 s, 302 型 K 型热电偶平均温差 4.293 °C, 且堵头可阻断粉尘与腐蚀气体侵入。 **结论** 302 型热电偶高温测温精度与稳定性更优, 响应时间虽延长但满足工业需求, 适用于高粉尘强腐蚀场景; 301 型 K 型热电偶可用于低粉尘低腐蚀场景控成本, 可为高温环境热电偶选型提供可靠依据。

**关键词:** K 型热电偶; 标定; 对比; 堵头

## 0 引言

K 型热电偶是工程上广泛使用的温度传感器<sup>[1]</sup>, 被应用于各个行业的温度测量中。电厂需要使用较多的热电偶对温度进行监测, 然而, 电厂烟道环境对热电偶的耐用性与测温稳定性构成严峻挑战: 一方面, 烟道内高温, 通常为 600~1000 °C, 会加速热电偶保护套管的氧化与热疲劳, 且 316 L 不锈钢套管在 900 °C 下长期使用时, 年氧化速率可达 0.2 mm; 另一方面, 燃煤产生的飞灰冲刷套管表面, 导致套管壁厚均匀性下降, 甚至出现局部穿孔, 使内部热电偶丝直接暴露于腐蚀环境中<sup>[2]</sup>。因烟道灰尘冲刷与高温腐蚀, 常规 K 型热电偶的平均使用寿命较短, 且报废前测温误差过大, 并因误差过大而造成较大的经济损失。

为解决上述问题, 可采用带 GH3039 材质保护套管的 K 型热电偶<sup>[3]</sup>, 但套管是否加装堵头的设计差异尚未得到系统研究。若堵头能阻断灰尘与腐蚀气体进入套管内部<sup>[4]</sup>, 可减少热电偶丝污染与腐蚀, 提升测温精度; 但堵头可能增加热传导阻力, 延长响应时间。基于此, 本研究设计带

堵头(302 型)与无堵头(301 型)两种 K 型热电偶, 通过实验标定<sup>[5]</sup>, 从测温精度、响应时间、稳定性三方面展开对比, 为电厂等高温工业场景的热电偶选型提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

HFY-203D 型黑体辐射炉(精度±0.25%, 上海福源光电技术有限公司); 34970A 数据记录仪(精度±0.08%, 用于热电偶测试, 美国安捷伦科技有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 黑体辐射炉

实验采用 HFY-203D 型黑体辐射炉作为标准热源, 其核心功能是提供稳定、均匀的高温环境, 模拟电厂烟道的高温工况。为确保热源精度, 实验前需对黑体辐射炉进行溯源校准: 使用检定合格的标准 S 型铂铑热电偶(分度号 S, 测量范围 0~1600 °C, 允许误差±0.1 °C), 在 500、800、1200、1600 °C 4 个关键温度点进行校准, 校准结果显示各点实际

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(E621200032)

第一作者: 邹峙剑, 技师, 主要研究方向为火电厂热工设备管理。E-mail: 12051830@ceic.com

\*通信作者: 张科, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为火电厂锅炉设备管理。E-mail: 20094402@chnenergy.com.cn

温度与设定温度的偏差均小于 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。具体参数为: 温度调节范围  $500\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 黑体辐射强直径  $40\text{ mm}$ , 温度分辨率  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度精确度 $\pm 0.25\%$ (满量程), 有效发射率  $0.99$ , 温度稳定性 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度传感器为双铂铑热电偶。该黑体辐射炉采用刚玉辐射腔, 辐射腔内涂高温涂料(发射率在  $0.9$  以上), 稳定性和均匀性好, 黑体辐射炉外部尺寸为  $600\text{ mm}\times 460\text{ mm}\times 610\text{ mm}$ , 腔体尺寸具体见图 1, 辐射炉见图 2。



图 1 黑体辐射炉腔体尺寸

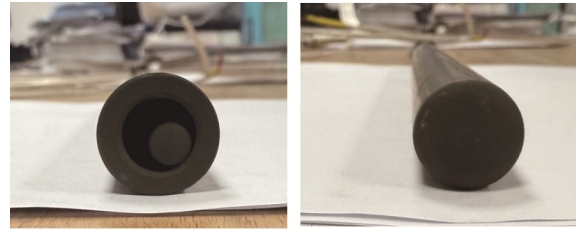


图 2 HFY-203D 型黑体辐射炉

### 1.2.2 测试热电偶

两种测试热电偶的核心结构参数保持一致, 仅保护套管端部是否加装堵头存在差异。保护套管选用 GH3039 材质, 该材质的铬元素<sup>[6]</sup>在高温下可形成连续致密的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜, 氧化膜与基体结合力强, 在  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  空气中的年氧化速率小于等于  $0.1\text{ mm}$ , 远低于  $316\text{ L}$  不锈钢( $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  年氧化速率约  $0.3\text{ mm}$ ); 同时, 钼、铈元素可抑制  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等腐蚀性离子对套管的侵蚀, 适配电厂烟道中含硫<sup>[7]</sup>、含氯<sup>[8]</sup>的腐蚀环境, 避免套管内壁因腐蚀产生剥落物污染热电偶丝, 确保测温稳定性。热电偶丝采用镍铬-镍硅材质(分度号 K), 直径  $0.5\text{ mm}$ , 其在  $-200\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内的热电势与温度线性度良好, 误差小于 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.75\% t$  ( $t$  为测量温度)。302 热电偶的堵头同样采用 GH3039 材质, 堵头端面为弧形设计, 可减少灰尘冲刷时的局部应力集中, 降低磨损速率。

为验证堵头对于热电偶的耐磨性影响, 分别使用了带有堵头的 K 型热电偶与不带堵头的 K 型热电偶, 其余部件均保持一致。不带有堵头的 K 型热电偶记编号为 301, 带有堵头的 K 型热电偶记编号为 302, 见图 3。



(a) 301 热电偶

(b) 302 热电偶

图 3 两种 K 型热电偶

### 1.3 数据采集仪器

采用 34970A 型数据记录仪记录 K 型热电偶的实时温度数据。该记录仪配备 20 通道输入模块, 支持热电偶、电阻、电压等多种信号类型, 本次实验选用 K 型热电偶专用通道, 采样频率设定为每  $10\text{ s}$  采集 1 个数据点, 温度分辨率  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 测量误差 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 确保数据采集的精度与时效性。

为减少数据干扰, 数据记录仪与黑体辐射炉的距离保持在  $2\text{ m}$  以上, 避免炉体电磁辐射对记录仪的影响; 信号传输线采用屏蔽双绞线<sup>[9]</sup>(型号 RVVP  $2\times 0.5\text{ mm}^2$ ), 屏蔽层接地电阻小于  $1\text{ }\Omega$ , 有效抑制外界电磁干扰。采集的温度数据自动存储为表格格式, 便于后续通过软件进行曲线绘制与数据统计分析。

此外, 实验环境严格控制温度保持在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $50\%$ , 通过空调与除湿机实现; 实验台采用防震设计, 避免人员走动或设备运行产生的振动影响热电偶与黑体辐射炉的对接精度, 确保热电偶探头位于辐射腔中心位置, 减少因位置偏移导致的温度场不均匀误差。

### 1.4 数据处理

本研究通过 301 型 K 型热电偶与 302 型 K 型热电偶单独放置在黑体辐射炉中与两种热电偶同时放置在黑体辐射炉中进行测试, 每组实验重复进行 3 次, 数据采集使用安捷伦 34970A 数据记录仪进行收集并上传至电脑软件中, 导出数据后用 Origin 2017 软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 测试方法与结果

测试两种带有不同型式不锈钢保护套管的热电偶测温性能、响应时间, 采用黑体辐射炉作为标准热源, 34970A 数据记录仪作为数据读取仪器。实验工况为升温阶段保持到 800、850、900、950 °C, 4 个节点直到热电偶读数稳定后再进行升温, 降温节点为 950 °C 降至 800 °C。同时测试时加有 750、700、650 °C 3 个降温节点。

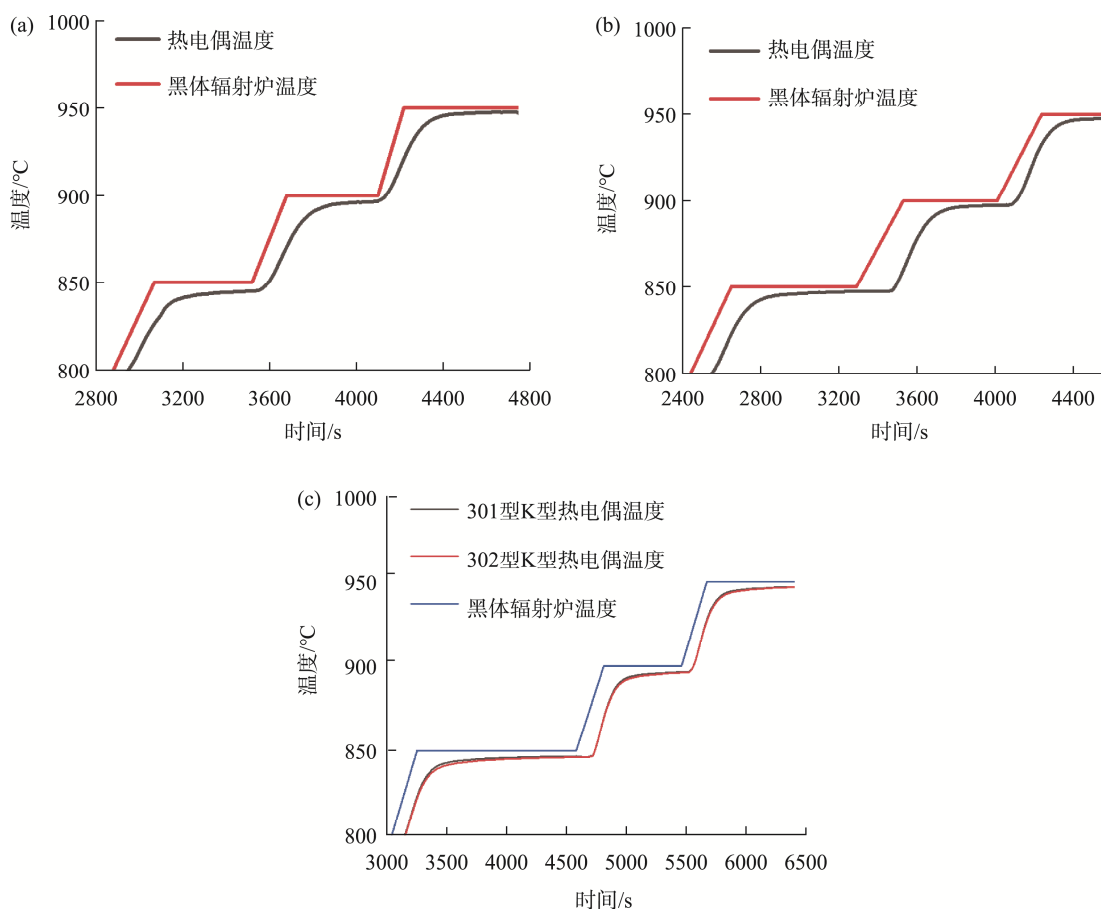
图 4(a)~(c)分别是 301、302 型 K 型热电偶单独放置以及 301 型与 302 型 K 型热电偶同时放入黑体辐射炉中的温度/时间曲线图。

结合图 4 中数据可得出, 如图 4(a)所示, 301 型 K 型热电偶在黑体辐射炉升至 800 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 5.011 °C, 升温后响应时间为 40 s; 在黑体辐射炉升至 850 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 5.152 °C, 升温后响应时间为 50 s; 在黑体辐射炉升至 900 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.345 °C, 升温后响应时间为 40 s; 在黑体辐

射炉升至 950 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.89 °C。平均响应时间为 43.333 s, 平均温差为 4.345 °C。

如图 4(b)所示, 302 型 K 型热电偶在黑体辐射炉升至 800 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.43 °C, 升温后响应时间为 70 s; 在黑体辐射炉升至 850 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 2.67 °C, 升温后响应时间为 190 s; 在黑体辐射炉升至 900 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 2.62 °C, 升温后响应时间为 80 s; 在黑体辐射炉升至 950 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 2.50 °C。平均响应时间为 113.33 s, 平均温差为 2.805 °C。

如图 4(c)所示, 301 型 K 型热电偶在黑体辐射炉升至 800 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 5.000 °C, 升温后响应时间为 40 s; 在黑体辐射炉升至 850 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.492 °C, 升温后响应时间为 120 s; 在黑体辐射炉升至 900 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.611 °C, 升温后响应时间为 60 s; 在黑体辐射炉升至 950 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.10 °C。平均响应时间为 73.333 s, 平均温差为 4.673 °C。



注: a. 301 型 K 型热电偶单独检测; b. 302 型 K 型热电偶单独检测; c. 301 型与 302 型 K 型热电偶同时检测。

图 4 不同 K 型热电偶测试结果

由图 4(c)所示, 302 型 K 型热电偶在黑体辐射炉升至 800 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 6.081 °C, 升温后响应时间为 40 s; 在黑体辐射炉升至 850 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.841 °C, 升温后响应时间为 120 s; 在黑体辐射炉升至 900 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 4.021 °C, 升温后响应时间为 60 s; 在黑体辐射炉升至 950 °C 时, 热电偶与黑体辐射炉温差为 3.232 °C。平均响应时间为 73.333 s, 平均温差为 4.293 °C。

## 2.2 不同工业场景的选型建议

基于实验结果, 针对不同高温工业场景, 提出以下热电偶选型建议。

高粉尘<sup>[10]</sup>、强腐蚀场景: 如燃煤电厂锅炉烟道、垃圾焚烧炉排气道, 优先选用 302 型 K 型(带堵头)热电偶。此类场景中, 粉尘浓度可达 50~100 g/m<sup>3</sup>, 腐蚀性气体(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)浓度高, 302 型的堵头可有效延长热电偶使用寿命, 降低维护成本; 低粉尘、温度快速变化场景: 如燃气轮机排气道、航空发动机测试台, 温度变化速率可达 10~20 °C/min, 可选用优化后的 302 型 K 型热电偶(如采用薄壁堵头, 壁厚 0.5 mm), 将响应时间缩短至 50~80 s, 兼顾精度与响应速度; 低粉尘、低腐蚀场景: 如石油化工加热炉, 粉尘浓度低于 5 g/m<sup>3</sup>, 腐蚀性弱, 可选用 301 型 K 型(无堵头)热电偶, 以较低成本满足测温需求。

## 3 结论

综上所述, 带堵头的 302 型 K 型热电偶在高温环境(800~950 °C)下的测温精度显著优于无堵头的 301 型 K 型热电偶: 单独检测时, 302 型 K 型热电偶的平均温差(2.805 °C)较 301 型 K 型热电偶(4.345 °C)降低 35.5%; 同时检测时, 302 型 K 型热电偶的平均温差(4.293 °C)较 301 型 K 型热电偶(4.673 °C)降低 8.1%, 温度稳定性更突出。

堵头会导致热电偶响应时间延长: 单独检测时 302 的

平均响应时间(113.333 s)较 301 型 K 型热电偶(43.333 s)延长 161.6%, 但延长后的响应时间仍满足工业场景需求, 且同时检测时两者响应时间一致(73.333 s), 说明环境一致性可抵消部分响应时间差异。

堵头的核心作用是阻断粉尘与腐蚀性气体侵入保护套管内部, 避免热电偶丝污染与腐蚀, 同时优化套管端部热场分布, 是提升测温精度的关键因素。

302 型 K 型热电偶测试温度与黑体辐射炉标定温度差距小, 因此带有堵头的 K 型热电偶具有更好的测试性能, 其在高温环境下的平均温差显著低于 301 型 K 型热电偶常规热电偶, 温度测试精度与稳定性更突出, 且堵头设计未对响应效率产生实质性负面影响, 满足高温场景下对“高精度+稳定响应”的双重需求。

## 参考文献

- [1] 王安敏, 孔令布, 孟海彦. 基于 K 型热电偶的测温装置设计[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(12): 2611-2614.
- [2] 王灿明, 孙宏飞. 循环流化床锅炉用高温耐磨蚀热电偶保护套管[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 80-82.
- [3] 陈清清. K 型热电偶高温测温特性的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- [4] 梁柏宏. 1000 MW 超超临界机组测温热电偶选型研究[J]. 电力设备, 2008(1): 13-15.
- [5] 濮加佳, 秦振华, 曹丹丹. 装配式热电偶保护套管对测量的不确定度影响和误差分析[J]. 中国新技术新产品, 2015(21): 26-28.
- [6] GH3039 奥氏体固溶强化型合金[Z]. 热处理技术与装备, 2018, 39(4): 42.
- [7] 高河亮. 燃煤电厂脱硫脱硝工艺参数优化及效果评价[J]. 清洗世界, 2024, 40(3): 4-6.
- [8] 邵云霞, 王睿, 曹嵩山, 等. 燃煤电厂烟气脱氯技术进展[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(5): 716-726.
- [9] 邱超, 宋艳萍. 通信工程中有线传输技术的应用与改进[J]. 网络安全技术与应用, 2019(9): 97-98.
- [10] 鄢晋, 李维, 王璐. 电厂粉尘仪的应用分析[J]. 仪器仪表与分析监测, 2022(1): 13-16.