

热电偶在高温环境下的测量精度与误差分析

徐涛, 吴亮, 邹子涵

(浙江春晖仪表股份有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘要 为了提升热电偶在高温环境中的测量精度, 本文重点分析了影响热电偶测量误差的因素, 如材料特性发生的变化、温度梯度、热辐射所产生的效应以及氧化与结构出现的变化等, 通过对误差来源展开探讨, 提出了优化热电偶材料选取、改进安装方式、减小热辐射影响以及优化冷端补偿等办法, 以提高高温环境下的测量精度。研究表明, 运用高稳定性的材料、合理的安装以及补偿技术可降低误差, 提高热电偶在高温环境下的可靠性与准确性。

关键词 热电偶; 高温环境; 测量精度; 误差

中图分类号: TH811

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.15.004

0 引言

热电偶通过两种不同金属导体接触点因温差而产生热电动势, 以此来进行温度测量工作, 由于其有响应速度快、结构较为简单、成本相对较低等优点, 热电偶在高温环境中的应用日益普遍。不过在高温环境当中, 热电偶的测量精度容易受到多种因素的影响, 导致热电偶输出信号出现误差, 对测量结果的准确性造成影响, 了解误差的来源以及它们对测量精度的影响, 对于提升热电偶在高温环境下的测量性能具有重要的价值^[1]。本文对高温环境下热电偶的误差来源展开详细探讨, 分析如何借助优化热电偶材料的选取、改进安装方式以及采取补偿措施降低误差, 提高测量精度, 同时介绍冷端补偿技术、定期校准以及误差修正等方法, 实现更为精准的温度测量。

1 热电偶的工作机理

热电偶是由两种不同材料的导体构成的, 当接触点处于不同温度时, 会在电路当中产生热电动势, 该现象被称作塞贝克效应, 其本质是由于电子在不同温度区域的扩散速率存在差异, 使电势差形成。热电偶回路是由测量端以及参考端所组成的, 测量端处于被测量的环境中, 参考端一般维持在已知的温度。由于不同材料的费米能级有所不同, 在温度梯度的作用之下, 载流子的分布发生了变化, 最终形成了一个稳定的电动势, 该电动势的大小和两端的温差有一定的函数关系, 对于理想的热电偶而言, 其输出电动势可通过以下公式来进行表示:

$$E = \int_{T_r}^{T_m} S(T) dT \quad (1)$$

式中: E 为热电动势, V; T_m 为测量端温度, K; T_r 为参考端温度, K; $S(T)$ 为材料的热电势系数, V/K,

该系数的具体数值取决于材料自身的电子结构以及温度特性。

2 高温环境下热电偶测量误差的主要来源

2.1 热电偶材料特性变化对测量的影响

不同金属在高温时的扩散速率存在差异, 电极材料的成分会随着时间的推移产生改变, 导致热电势系数不稳定, 晶界扩散以及合金化效应有可能造成热电偶电极的成分不均匀, 不同测量点的电势梯度发生变化, 会对测量精度产生影响。材料在高温状态下可能会出现再结晶现象, 金属内部的微观结构发生变化, 影响电子传输特性, 导致测量误差不断积累。某些金属在高温环境中可能会发生元素挥发的情况, 电极材料的组成不再均匀, 影响热电偶的长期稳定性^[2]。

2.2 环境温度梯度对测量的影响

当热电偶于高温环境下开展工作, 其测量回路可能会受到温度梯度的作用, 导致热电势的产生并非单纯取决于测量端和参考端之间的温度差, 导线的不同部位可能会处在不同的温度区域, 让材料内部的电子扩散出现不均匀的情况, 最终导致附加热电势的产生。安装位置的热传导特性会对热电偶的温度分布造成影响, 导致实际测量温度偏离真实温度。在温度梯度较大的环境中, 导线有可能产生寄生热电势, 使热电偶的输出信号出现误差, 温度梯度表现出的非线性分布会让热电偶的测量值难以凭借简单的温差计算进行修正, 增加误差的预测难度。

2.3 热辐射对测量的影响

在高温环境中, 热电偶可能吸收来自周边环境的红外辐射, 导致测量端的温度高于实际温度, 由于不同材料对辐射能量的吸收能力存在差异, 使热电偶的

外层包覆材料对测量端的实际温度产生影响。热电偶自身也可能作为一个辐射源向外界释放热量，导致测量端的温度低于实际温度，特别在高温低导热的环境中，这种情况更为明显，在测量过程中，若周围环境的热辐射强度出现变化，那么热电偶的测量温度可能会随之产生波动，对测量的重复性和可靠性造成影响。

2.4 高温氧化和结构变化对测量的影响

当热电偶在高温环境中长时间开展工作时，电极材料可能会与周围的气氛产生氧化反应，促使电极成分出现改变，对热电势的稳定性造成影响。金属氧化层的形成会让材料的电导特性发生改变，导致热电偶的电势产生漂移，如果长期暴露在高温环境之下，电极会出现晶粒长大情况，导致电子传输路径发生变化，对热电势的产生带来影响。部分金属在高温状态下会出现结构重组现象，热电偶的温度响应特性出现偏移。环境中的腐蚀性气体可加快电极材料的退化速度，让误差随着使用时间的增长而不断增大^[3]。

2.5 参考端温度漂移对测量的影响

热电偶测量得到的温度数值，依赖于测量端和参考端之间存在的温差情况，但是参考端温度出现漂移现象时，会导致产生测量误差。如果参考端没有可维持稳定的温度状态，输出的热电势就会跟着出现波动，导致测量得到的数值不准确。环境温度发生变化时，有可能会对参考端的温度稳定性造成影响，最终测量结果产生随机误差。当参考端受到外部热源施加影响时，它的温度有可能会升高，也有可能降低，让测量温度的计算结果出现偏移状况。在长时间运行的系统当中，参考端的温度漂移现象有可能由于设备出现老化或者环境发生变化而变得更加严重，使测量的长期稳定性受到一定影响。

3 提高高温环境下热电偶测量精度的方法

3.1 优化热电偶材料选择

不同材料在导电性能、热电势稳定性以及抗氧化能力方面在高温环境中表现出较大的差别，在高温情况下，材料的成分稳定性决定了热电偶长期运行的可

靠性，一些合金材料在高温时可能出现元素挥发或者相变的情况，热电势系数产生改变。为提升测量精度，要选择有良好抗氧化性、低温漂以及高稳定性的材料，贵金属热电偶由于化学稳定性高，在高温下可维持较为稳定的热电特性，不过成本较高，适用于对精确测温需求比较高的应用场景^[4]。廉价的金属热电偶在高温环境下可能会由于氧化或扩散作用导致测量误差，需要在保护环境采取特殊工艺提升耐久性。对于不同的工业应用而言，合理的材料选择可有效地提高测量的可靠性和寿命，如表 1 所示。合理的材料选择能提高热电偶的长期稳定性，还可以减少高温环境对测量精度的影响，通过合理匹配材料特性和应用需求，可有效地降低测量误差，提高测量系统的可靠性。

3.2 优化测温位置与安装方式

测温误差的大小和热电偶的安装位置以及固定方式密切相关，合理进行布置可提升测量精度，在安装时，温度传感部分应尽量去接触被测介质，减少因接触不良而产生的误差。针对管道或者炉膛内部的测温需求而言，传感端要伸入足够深的位置，防止外部环境对测量结果造成影响。固定方式的选择同样重要，松动的安装状态容易使测量信号出现波动，读数产生较大偏差，为了保证测温端与目标介质充分接触，一般会采用焊接、法兰连接或者螺纹固定的方式，避免外力作用使热电偶出现偏移或者变形。环境因素对测温稳定性具有关键影响，强气流、高温梯度或者热辐射可能会造成局部温度出现异常，影响测量数据的准确性。在高温炉膛或者热处理设备当中，热电偶应当避开火焰直接冲刷的区域，减少温度波动对测量信号的干扰，对于多点测量需求，合理分布传感器可获得更为均匀的温度场信息，提升测量系统的可靠性。测温端合适的保护套管可减少氧化、腐蚀以及机械损伤，延长热电偶的使用寿命。不同应用环境需要选择合适的材料，比如：在高温腐蚀环境下可以采用氧化铝或者高温合金作为保护层，降低环境因素带来的影响。

3.3 减少热辐射误差

当温度梯度相对较大时，辐射热流会导致测温端

表 1 常见热电偶材料及其高温特性

材料类型	最高工作温度 (°C)	热电势稳定性	抗氧化能力	适用环境
S 型 (铂铑 10-铂)	1 600	极高	优异	高精度实验、高温工业
K 型 (镍铬-镍硅)	1 200	中等	良好	普通工业高温测量
B 型 (铂铑 30-铂铑 6)	1 800	极高	优异	超高温熔炼、科研实验
N 型 (镍铬硅-镍硅镁)	1 300	高	良好	航空、能源行业
R 型 (铂铑 13-铂)	1 600	极高	优异	高温炉、玻璃制造

温度出现偏离实际值的情况,当热电偶处于强辐射区域时,传感端会吸收周围物体所释放出的红外辐射,造成测量结果偏高。为了降低误差,可借助调整安装位置,让热电偶与高温辐射源保持一定距离,或者增添屏蔽结构减少热辐射所带来的影响。保护套管选用高反射率材料当作外层涂覆,减少热量吸收,比如:采用陶瓷保护管或者高温合金保护管不仅可有效降低辐射影响,还可以提升耐高温能力。在测温系统中,适当增加隔热层可以阻挡外部辐射热量进入传感区域,让热电偶所测温度更加接近真实值。环境辐射的影响不仅体现在直接热流方面,还会经设备结构反射进入传感端,合理设计测量腔体或者反射屏蔽板可减少误差。在高精度测量需求的情况下,可以采用双层保护管结构,其中外层用于隔绝环境辐射,内层用于稳定测量信号。另外,在高温辐射较强的工业炉或者高温试验装置中,优化周围材料的辐射特性,如降低壁面发射率,也可减少对测量系统的干扰^[5]。

3.4 降低高温氧化和结构变化的影响

在高温环境之中,热电偶材料存在发生氧化、腐蚀以及微观结构产生变化的可能性,热电势特性会出现偏移,对测量精度造成影响。金属材料在高温气氛中易和氧、硫、碳等元素发生反应,形成氧化层或者脆化区域,导致导电性能下降,为减缓氧化作用,可选择抗氧化能力强的合金材料,或者在热电偶表面涂覆耐高温氧化层,以此提升使用寿命。高温环境有可能引发合金元素扩散或者晶界析出,让热电偶的热电势变化加剧,优化材料配比可减少成分变化对测温特性的影响,比如采用贵金属合金作为热电极,提高高温环境下的化学稳定性,使用多层保护结构可有效降低外部气氛对材料的影响,延长传感器的使用寿命。机械结构发生变化有可能导致测温误差,在高温作用下,热电偶可能会出现变形、弯曲或者断裂的情况,影响接触稳定性和信号输出,合理的安装方式可减少机械应力带来的影响,比如使用柔性支撑结构或弹性固定方式,提高高温环境下的可靠性。

3.5 优化冷端补偿技术

热电偶的测量原理是依据温差信号,冷端温度发生变化会对测量结果产生影响,需要采用补偿技术进行修正。传统的冷端补偿方式依靠恒温箱或者补偿电路,然而在高精度测量应用中,冷端温度出现波动仍旧可能导致测量误差,优化补偿算法可提升测量精度,如采用热敏电阻或者半导体温度传感器实时监测冷端温度,并且凭借计算实施动态修正。依据热电偶测量原理,热电势的计算公式如下:

$$E = \int_{T_{ref}}^{T_{meas}} S(T) dT \quad (2)$$

式中: T_{meas} 为测量端温度, K; T_{ref} 为冷端温度, K; $S(T)$ 为热电偶材料的热电势系数, V/K。

优化之后的补偿方法可有效减少由于冷端漂移所引发的测量偏差,让计算得出的结果更为精准。半导体传感器有较高的温度测量稳定性,如果将它和数字信号处理技术相互结合起来,可提高冷端补偿的精度。补偿方法进行优化后,一方面可以减少测量误差,另一方面还可以提升系统的抗干扰能力,如此一来热电偶在不同的环境条件下都可保持可靠的测量结果。

3.6 定期校准与误差修正

热电偶长期使用之后,其热电特性有可能会出现问题,导致测量数据逐渐偏离实际数值,定期校准可对误差进行修正,提升系统的准确性。在实验室或者工业现场,校准一般会采用标准温度源,通过对比已知温度和测量值之间的偏差,对热电偶的信号做出调整。在高温环境下,热电偶会受到材料变化、氧化或者机械应力的影响,使热电势特性发生改变。误差修正方法可依据长期测量数据进行趋势分析,构建补偿模型,让测量系统可以实现自适应调整,合理确定校准周期可提高测温的精准程度,让系统长期维持稳定状态^[6]。

4 结束语

热电偶在高温环境中的测量精度会受到多种因素的影响,如材料特性发生变化、存在温度梯度、有热辐射效应以及出现氧化等情况,通过优化热电偶材料的选择、改进安装的方式、降低热辐射误差以及运用有效的冷端补偿技术,可有效提升热电偶在高温环境下的测量精度,而定期校准以及误差修正措施对于保障热电偶长期稳定性与测量精度非常关键。

参考文献:

- [1] 崔志文,李文军,虞思思,等.基于自回归与长短期记忆网络混合模型的热电偶动态补偿方法研究[J].中国测试,2023,49(09):63-72.
- [2] 李岩峰.基于高温炉的热电偶时间常数测试系统[J].计量与测试技术,2024,51(07):1-4.
- [3] 凤建刚,李文,王发科.高温加热炉柔性热电偶稳定性分析与研究[J].工业仪表与自动化装置,2023(05):89-92.
- [4] 孙强,黄贤武,金冉,等.连续热电偶测温系统在高温老化系统中的应用[J].宇航计测技术,2024,44(05):92-96.
- [5] 王昌伟.热电偶温度测量技术在能源行业中的应用与技术改进探析[J].仪器仪表用户,2024,31(07):58-60.
- [6] 韩剑.热电偶测温技术的研究[J].自动化应用,2024,65(21):134-141,144.