

基于传热计算的管道内热电偶测温误差分析^①

张丽^{②*} 罗建国^{**} 闵琪^{③*} 吴莘馨^{*}

(^{*}清华大学核能与新能源技术研究院,教育部先进反应堆工程与安全重点实验室 北京 100084)

(^{**}华北电力设计院工程有限公司 北京 100120)

摘要 从传热学角度计算了热电偶在测量管道温度时其自身的温度分布,提出了影响热电偶测温精度的关键因素。研究了管道内流体温度场对热电偶测温精度的影响,分析了热电偶保护管插入深度与测量误差的关系,通过实例计算给出了确定热电偶保护管合理插入深度的方法,并给出了电力行业中几种常见工况下热电偶的插入深度计算结果。

关键词 热电偶, 测量误差, 插入深度, 传热, 保护管

0 引言

热电偶是常用的测温元件,它因有测温范围宽、性能稳定、测量精度高、热响应快等优点而得到广泛使用^[1]。为了提高热电偶测温精度,需进行测量误差分析。当用热电偶测量管道内流体温度时,通常要求热电偶插至管道中心位置,但发现在管内流体流速较高的情况下,热电偶插入深度越深,就越难保证其结构完整性,从而会对测量精度产生影响。针对这一问题,本文通过详细的传热计算,分析了测量管道内流体温度时热电偶及保护管的温度分布、管道内流体的温度场对热电偶插入深度的影响,在此基础上给出了热电偶保护管合理插入深度的确定方法,最后通过典型案例的计算说明了该方法在实际工程中的应用。

1 热电偶的基本结构及安装

热电偶通常由热电极、绝缘套保护管和接线盒等部分组成,如图 1 所示。绝缘套保护管材质内填充有绝缘介质,如氧化镁等。当管道内被测流体的压力或温度非常高时,需在被测管道上焊接如图 2 所示的绝缘套保护管,将感温元件插入保护管内,以便热电偶的维修或更换。

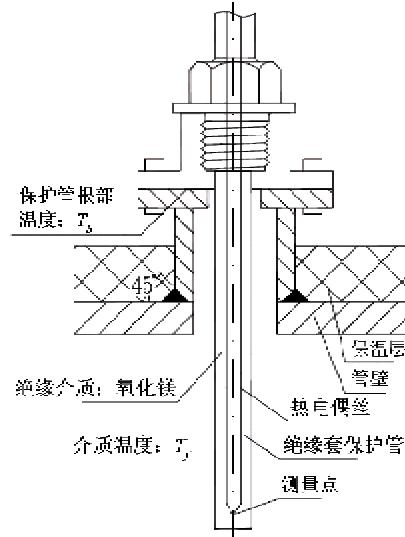


图 1 热电偶基本结构示意图

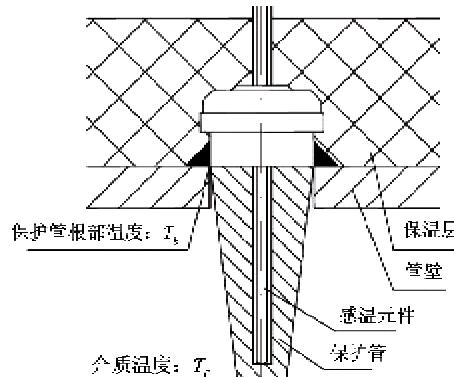


图 2 绝缘套保护管示意图

① 国家重大科技专项(ZX06901)资助项目。

② 女,1981 年生,硕士,工程师;研究方向:反应堆结构力学分析,核岛设备抗震抗冲击分析及系统设计等;E-mail: li-zhang@tsinghua.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: minq86@tsinghua.edu.cn

(收稿日期:2014-02-24)

热电偶在使用中会受到各种因素的影响,如热电偶的选型、稳定性、材料均匀性,参考端温度变化,以及热电偶安装使用是否得当等,这些因素都会带来测量误差。从传热学角度分析和选择热电偶的正确插入深度,安装时注意保温要求,避免选型和保温错误引起测量误差,是本研究重点考虑的问题。

传统经验认为管道中心的温度是最高的,为了测到这里的温度,减小测量误差,热电偶端点需要插至管道中心,保证热电偶测点在管道中心线上^[2]。然而在电厂及核电站常规岛中由于受到热电偶保护管材料强度的限制,插入主蒸汽管道等高压高流速管道中心线的热电偶极有可能发生保护管断裂事故,危及汽机运行安全^[3]。因而,通过传热计算和分析,正确选择和安装符合技术性能和安全性能要求的热电偶至关重要。

2 热电偶测温的传热分析

2.1 热电偶及保护管的温度分布

管道内的介质通过对流及辐射将热量传导至热电偶绝缘套保护管(见图1或图2)(下文统称保护管),再经保护管根部通过热传导或对流向管道外界散热,其传热模型可用图3描述。图中 H 表示保护管长度, h_t 为保护管顶部的表面传热系数, $q(x+dx)$ 和 $q(x)$ 分别表示 dx 微元吸入和传出的热量, q_{conv} 表示管内流体向 dx 微元传导的热量。通过求解保护管的温度分布,可以得到热电偶所测值与实际值的差别。

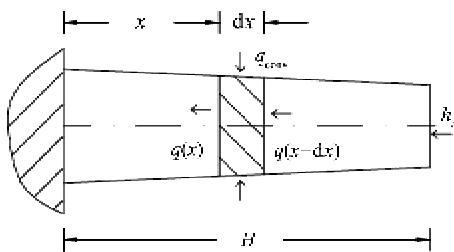


图3 热电偶或保护管热平衡分析图

为了简化分析,对图3中的模型作如下合理假定:

- (1) 保护管材质均匀,其导热系数 λ 为常数;
- (2) 因多数情况下管道内为旺盛紊流场,层流层厚度极小,可认为表面传热系数 h 为常数;
- (3) 表面上的换热热阻 $1/h$ 远远大于套管的导热热阻 δ/λ ,其中 δ 为保护管壁厚,因而在任一截面

上套管的温度是均匀的;

(4) 保护管顶端的表面传热系数为 h_t ;图2中保护套内小孔直径为9mm,且其中插有直径为8mm的热电偶感温元件,可将感温元件与保护套视为一体,因此该小孔忽略不计;

(5) 保护管根部温度 T_b 保持不变。

经过上述简化,所研究的问题变成一维稳态导热问题。保护管的某一截面的热平衡方程如下:

$$q(x) = q(x+dx) + q_{\text{conv}} \quad [4] \quad (1)$$

$$q_{\text{conv}} = hP(x)dx(T(x) - T_f) \quad (2)$$

$$\frac{dq(x)}{dx} + hP(x)(T(x) - T_f) = 0 \quad (3)$$

$$q(x) = -\lambda A(x) \frac{dT(x)}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}\left(A(x) \frac{dT(x)}{dx}\right) - \frac{hP(x)}{\lambda}(T(x) - T_f) = 0 \quad (5)$$

其中 $A(x)$ 是保护管截面的外表面面积, $P(x)$ 是保护管截面的外表面周长, T_f 是管道内流体温度, $T(x)$ 是保护管沿 x 方向的温度分布。令温差 $\theta(x) = T(x) - T_f$,则可得:

$$\frac{d}{dx}\left(A(x) \frac{d\theta(x)}{dx}\right) - \frac{hP(x)}{\lambda}\theta(x) = 0 \quad (6)$$

边界条件是其中 T_b 为热电偶保护管根部的温度:

$$\theta(x)|_{x=0} = T_b - T_f = \theta(0) \quad (7)$$

$$-\lambda \left(\frac{d\theta}{dx}\right)|_{x=H} = h_t\theta(H) \quad (8)$$

当保护管为等截面时, $A(x)$ 和 $P(x)$ 均为常数,分别记为 A 和 P ,方程求解为

$$\theta(x) = \theta(0) \cdot \frac{\cosh[m(H-x)] + N \sinh[m(H-x)]}{\cosh(mH) + N \sinh(mH)} \quad (9)$$

其中 $N = h_t/m$, $m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A}}$ 。令 $x = H$,得到保护管顶端温度与管内介质温度的差 $\theta(H)$,可由下式计算:

$$\begin{aligned} \theta(H) &= T(H) - T_f \\ &= \theta(0) \frac{1}{\cosh(mH) + N \sinh(mH)} \quad [5] \end{aligned} \quad (10)$$

$\theta(H)$ 即为热电偶的测量误差。从式(10)可知,增大 m 和 N 可减少误差,因此理论上可以从以下几个方面进行改进:

- (1) 感温元件应与保护管顶部良好接触,否则热电偶所测的温度为感温元件与保护管间的空气温

度,而不是流体的真实温度,并且会增加响应时间。

(2) 加强管道保温,提高保护管根部温度 T_b 。对于图 2 的结构,保护管根部与管外壁接触, T_b 等同于管道外壁温度。管内介质热量通过对流换热到管内壁,之后通过热传导经管外壁至保温层外壁,根据相关规定,保温层外壁不得高于 50℃。因此,通过计算对流换热热阻 R_1 、管壁热阻 R_2 和保温层热阻 R_3 ,可以求得管外壁温度:

$$T_b = T_f - \frac{(T_f - T_e) \cdot (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2 + R_3)} \quad (11)$$

其中 T_e 为保温层外壁温度。对于图 1 的结构, R_3 为安装法兰与环境的换热热阻。从式(11)中可以看出,增大 R_3 有利于提高保护管根部温度 T_b 。

(3) 通过增加保护管高度,减小壁厚也可以提高测量精度,但这两个参数的改进同时受到材质强度的制约,保护管高度过高以及壁厚过薄会导致热电偶容易断裂。

此外应选用导热系数较小的材料做套管^[6],但保护管导热系数过小将使得导热热阻相对于表面换热热阻不能忽略,截面的温度不均匀,会增加热电偶响应时间,因此实际中导热系数的选择范围是受到限制的。如条件允许应强化套管与流体间的换热,管内湍流管的表面换热可以通过努赛尔数 Nu 来表征,该值在湍流充分发展段就与管道长度无关。但当管径、介质、流速确定时,换热系数是确定的,可以通过 Petukhov 方程式求得,若通过增加保护管肋片等办法强化换热,将受到安装方面的限制,也可能改变管道内的流场,在实际工程中应用较少。

2.2 管道内流体速度温度场对热电偶测温的影响

由于受到材料强度的影响,保护管的高度和壁厚受到制约。在一些特殊情况下,需要考虑尽量减小插入深度来满足强度要求,以免保护管断裂。通常认为管道中心的温度是最高的,偏离管道中心后温度会很快下降。因此在安装保护管时,要求保护管的顶部要略超过管道中心以保证热电偶的测量点正位于最高温度点,这样做使得保护管插入管内长度较长。但如果管道内的介质流速较高,温度和压力也高,恶劣的工作条件很可能破坏保护管的结构完整性。

当流体进入圆管时,流动边界层有一个从零开始增长直到汇合于管子中心线的过程。同样,当流体与管壁之间有热交换时,管壁的热边界层也有一个从零开始增长直到汇合于管子中心线的过程^[1]。当流动边界层及热边界层汇合于管子中心线后称流动

或换热已经充分发展,此后的换热强度将保持不变。根据雷诺数 R_e 判断当前流场性质,当 R_e 小于时,如图 4(a)所示,管内流动属于层流或过渡区。此时管道内的流体温度以管道中心为最高,离开中心线后温度会很快的降低并沿管道直径方向呈抛物线变化,越接近管壁,温度就越低。在流场稳定区域,热电偶均应插至管道中心线;当 R_e 大于 10^4 时,如图 4(b)所示,管内流动处于湍流,管道内流体分子相互作用加强,只有紧靠管壁的一薄层流体还保持着层流性质,热边界层是一个微小量,热边界层至管中心的对流换热充分,温度基本相当,热电偶只需插过热边界层即可。

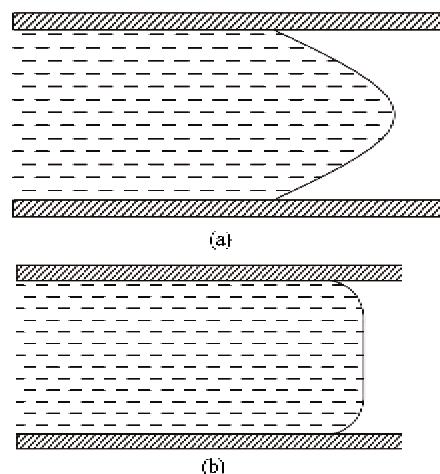


图 4 不同雷诺数下管内流体温度场示意图

电厂中常用的水和过热蒸汽的运动粘度均较小,在 10^{-6} 量级,而流速通常会大于 0.5m/s ,管道内径也大于 0.1m ,雷诺数 R_e 依然远大于 10^4 ,在稳定流动管道区域处于旺盛湍流区。因此,电厂中水管、蒸汽管的热电偶不需插入管道中央。但对于运动粘度在 10^{-4} 量级的流体,则需要进一步核算流动状态才能确定是否需要插到管道中央。

3 热电偶插入深度计算方法

以锅炉给水为例,温度为 $T = 350\text{K}$,流度为 $u = 2.21\text{m/s}$,管道内径 $d = 0.353\text{m}$,运动粘度 $\nu = 3.67 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$,普朗特数 $Pr = 2.22$,导热系数 $\lambda = 0.6745\text{W/m} \cdot \text{K}$ 。首先确定管内流体在此状态下的雷诺数:

$$R_e = \frac{ud}{\nu} = 2.13 \times 10^5 >> 10^4 \quad (12)$$

据此可判断管内为旺盛湍流。可根据 Petukhov 方

程式确定努赛尔数:

$$Nu = \frac{R_e Pr f/2}{1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1) \sqrt{f/2}} \quad [6] \quad (13)$$

其中 $0.5 < Pr < 2000$, $10^4 < R_e < 5 \times 10^6$, $f = (1.58 \ln R_e - 3.28)^{-2}$, $h = \frac{\lambda}{d} Nu$, 分别求得: $Nu = 623$, $h = 1190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

锅炉给水管道热电偶不需要额外安装保护管,直接采用 20mm 直径的热电偶垂直插入管道内。假设热电偶导热系数 $\lambda_t = 30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 可以得到 $m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A}} = 89$ 。

介质温度与保护管根部温度之差 $\theta(0)$ 约在 1 ~ 5°C, 取 5°C 用于计算误差。

表 1 热电偶插入深度

介质	锅炉给水	主蒸汽	三次风	NH ₃
流体温度(K)	350	849	350	323
流速(m/s)	2.21	60	52	2
管道内径(m)	0.35	0.26	0.57	0.05
管道温度(K)	349	848	338	317
流体运动粘度(m ² /s)	3.67×10^{-6}	1.16×10^{-6}	2.08×10^{-4}	1.70×10^{-5}
R _e	$2.13E \times 10^5$	1.36×10^7	1.43×10^5	5.88×10^3
Pr	2.22	1.31	0.70	0.88
表面换热系数(W/m ² ·K)	1.19×10^3	4.94×10^3	11.58	12.84
误差小于 1°C 时热电偶插入深度(m)	0.1	0.05	0.25	0.25

从表 1 中的计算结果可以看到, 电厂中给水和主蒸汽管道的换热系数均在 300 W/m² · K 以上, 热电偶插入管内 0.1m 时, 因传热所产生的误差即小于 1°C。而烟风及 NH₃ 管道内流体的换热系数较低, 需要适当增加管内长度, 但如果受到强度限制, 则可以通过加强测点处管道保温, 提高热电偶在管壁接触点的温度以减小误差。

4 结 论

综合以上分析可知, 为了减小热电偶测温误差, 应加强测点位置的保温, 尽量保证保护管根部温度与管壁温度一致; 其次在强度允许的前提下, 热电偶丝直径应选用 16mm 或者更小; 应做好热电偶裸露在空气中部分的保温; 当管内介质粘度处于旺盛湍流状态时, 保护管不必插到管道中心。电厂及核电站常规岛中运输水和蒸汽的管道基本都处于旺盛湍

根据前文式 (10) 可以求得: $\theta(0.05) = 0.058^\circ\text{C}$, $\theta(0.1) = 0.0005^\circ\text{C}$ 。从计算结果中可以看出, 插入深度在 0.05m 时的温差已小于 1°C, 插入深度在 0.1m 时的温差仅为 0.0005°C。考虑到边界层以及热电偶测量点并非最顶点等因素, 可插入深度 0.1m。

采用以上方法以锅炉给水管道、汽机主蒸汽管道、锅炉三次风管道、NH₃ 供应管道为例进行了计算比较, 其中主蒸汽管道采用图 2 型式热电偶, 其余采用图 1 型式热电偶。假设热电偶导热系数 $\lambda_t = 30 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 计算得到流体实际温度与热电偶测量值之差小于 1°C 时的插入深度, 如表 1 所列。

流状态, 因此热电偶插入深度均可选为 0.1m, 根据具体参数计算还可以适当减小插入深度。但对于气体管道, 如烟风及 NH₃ 管道, 由于管道内流体的换热系数较低, 则应适当增加热电偶在管内的插入长度。当测量运动粘度在 10⁻⁴ 量级或更大的介质温度时, 则需要进一步核算流动状态才能确定是否需要插到管道中央。

参 考 文 献

- [1] 蔡锡松. 对热电偶温度计量误差与修正方法的分析. 科技资讯, 2011, 17(11):113
- [2] 李忠虎. 热电偶应用问题综述. 工业计量, 2007, 17(02): 34-37
- [3] 王琦, 白建云. 提高超超临界机组热电偶测量可靠性的措施. 热力发电, 2011, 40(03):87-88
- [4] 杨世铭, 等. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [5] Warren M R, James P. Handbook of Heat Transfer Fundamentals. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Book

Company, 1985

- [6] Yener Y, Kakac S. Heat Conduction. 4th Edition. New York: Taylor & Francis, 2008

Error analysis of in-pipe temperature measurement by thermocouple based on heat transfer computation

Zhang Li * , Luo Jianguo ** , Min Qi * , Wu Xinxin *

(* Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety, Ministry of Education of China,
Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

(** North China Power Engineering Co., LTD of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120)

Abstract

The temperature distribution of a thermocouple which is applied to measurement of the temperature of a fluid in a pipe was computed based on the heat transfer theories, and the key factors affecting the temperature measurement accuracy were presented. The influence of the fluid's temperature distribution in the pipe on the thermocouple's measurement accuracy was studied, and the relationship between the insertion depth of the thermocouple's thermowell in the pipe and the measurement error was analyzed. Then, a method for determining a rational insertion depth for a thermocouple was put forward based on example computations, and the results of computing the thermocouple insertion depth in industrial applications under several actual measurement conditions were given.

Key words: thermocouple, measurement error, insertion depth, heat transfer, protecting thermowell