

文章编号:1006-7329(2001)06-0056-05

感温火灾探测器预警时间的传热分析

王厚华, 罗嘉陵, 郭勇

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:分析了感温火灾探测器的传热机理,建立了考虑辐射传热影响的数学模型,并经数值积分获得了求解预警时间的一种新算法。计算表明:当环境温度较低,而探测器的响应温度设置过高时,辐射传热对预警时间的影响不应忽略。本文对消防工程的安全评估及报警系统的选型设计具有一定的参考价值。

关键词:火灾探测器; 响应时间; 传热分析

中图分类号: TU998.12

文献标识码: A

感温火灾探测器在消防技术方面的应用已有100多年的历史,由于其结构简单,可靠性高,对环境的要求低以及价格低廉等优点,至今仍广泛应用在许多不宜安装感烟探测器的场所,如:娱乐厅、汽车库、会议室、吸烟室等。喷淋灭火系统中的洒水喷头的开启控制也依赖于热敏元件的感温动作。但感温火灾探测器的灵敏度及响应速度均不及感烟火灾探测器,因此《火灾自动报警系统设计规范》^[1]中强调:在最后选定探测器类型之前,必须对感温火灾探测器动作前火灾可能造成的损失作出评估。当建筑物功能确定以后,室内可燃物种类、数量、堆放方式、室内装修情况可大致估计。一旦发生火灾,火势的发展也可大致估计,此时,感温火灾探测器的响应时间是评估防火措施的合理性、有效性、可靠性及经济性的重要依据之一。根据室内环境温度、探测器热敏元件性能及设定的探测器响应温度,如能正确地计算出响应时间,将为报警系统设计师选择探测器类型、设定响应温度,并为消防建审人员提出控制室内可燃物数量等措施提供决策依据。

计算感温火灾探测器的响应时间,关键在于建立正确的传热模型。目前,国内外有关响应时间的计算式大多沿用 Heskestad 等人提出的传热模型^{[2][3][4]},该模型未考虑探测器表面与周围环境间的辐射传热,当环境温度过低或响应温度设定过高时,采用该模型得到的计算结果将会出现较大误差。本文将就感温火灾探测器的传热机理进行分析,建立更为完善的传热模型,经数值积分求解,获得一种响应时间的新计算方法,最后对两种计算方法的结果进行分析比较。

1 感温火灾探测器的传热模型

感温火灾探测器的工作原理是:火灾发生时,感温探测元件表面与周围环境之间发生热量传递,本身温度逐渐上升,当其温度达到或超过设定的响应温度后,即发出火警信号。感温探测元件表面与周围环境之间的传热过程是一个复合传热过程,包括火灾产生的浮力羽流撞击顶棚后形成的顶棚射流外掠探测元件表面的对流传热过程^[5]和探测元件表面与围护结构内表面之间的辐射传热过程。

$d\tau$ 时间内,探测元件表面与烟气间的对流传热量为:

$$dQ_c = hA(T_g - T)d\tau$$

· 收稿日期:2001-03-29

基金项目:重庆市科委课题(99507)

作者简介:王厚华(1952-),男,贵州安顺人,副教授,主要从事强化传热研究。

探测元件为金属制成,其导热系数远大于建筑材料的导热系数,因此探测元件吸热后的温度上升速率远大于室内围护结构的温度上升速率。在探测器响应温度的时间内,可合理地假设围护结构内表面温度维持恒定的环境温度。因此 $d\tau$ 时间内,探测元件表面与围护结构内表面的辐射传热量为:

$$dQ_r = \varepsilon \cdot c_b \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] A d\tau$$

$d\tau$ 时间内,探测元件与周围环境之间的传热量为上述两项之和,即:

$$dQ = dQ_c + dQ_r = \left\{ h(T_g - T) + \varepsilon \cdot c_b \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \right\} A d\tau$$

应用能量守恒定律应有:

$$\left\{ h(T_g - T) + \varepsilon \cdot c_b \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \right\} A d\tau = m c dT \quad (1)$$

式(1)即为考虑对流传热与辐射传热共同作用下感温火灾探测器的传热模型。与 *Heskestad* 模型的区别为,该模型考虑了辐射传热对响应时间 τ 的影响。

积分式(1),可得感温火灾探测器的响应时间为:

$$\tau = \frac{m c}{A} \int_{T_0}^{T_b} \frac{dT}{h(T_g - T) + \varepsilon \cdot c_b \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]} \quad (2)$$

式中: h :对流换热系数, $J/m^2 \cdot K \cdot s$; A :探测元件的外表面积, m^2 ; T_g :烟气的温度, K ; T :探测元件的温度, K ; ε :探测元件的相当发射率; c_b :黑体辐射常数, $5.67 J/m^2 \cdot K^4 \cdot s$; T_0 :环境的温度, K ; T_b :探测器的响应温度, K ; m :探测元件的质量, kg ; c :探测元件的比热, $J/kg \cdot K$ 。

2 响应时间的计算方程

2.1 对流换热系数 h

根据 Cooper^[5]等人的研究,在火灾发展过程中,烟气羽流受浮力驱动上升到顶棚,撞击顶棚后烟气流动方向发生偏转并形成一股具有较高温度与速度的顶棚射流。顶棚射流沿着顶棚表面,以羽流撞击点为中心向四周做径向水平运动。对于安装在顶棚下的感温火灾探测器来说,其圆筒形探测元件处于顶棚射流的冲刷之中。根据流体外掠单圆管对流传热的实验结果^[6],其准则方程为:

$$Nu = C Re^N Pr^{0.37}$$

烟气的主要成分为羽流上升过程中卷吸进来的空气,视烟气为空气,其普朗特数 Pr 可近似取为 0.7,因此上式可改写为:

$$Nu = 0.88 C Re^N \quad (3)$$

大量的实验计算结果证实:雷诺数 Re 处于 40~103 范围内,因此 C 与 N 可分别取为, $C=0.51$, $N=0.5$ 。这一结果与 *Heskestad* 等人的分析一致,即:

$$h \propto u^{1.2}$$

式(3)中,雷诺数 Re 与努谢尔特数 Nu 分别定义为:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (5)$$

由式(3)与式(5)可求得的对流换热系数 h ,即:

$$h = 0.88 \frac{\lambda}{d} C Re^N \quad (6)$$

式中: u : 烟气的速度, m/s ; λ : 烟气的导热系数, $\text{J/m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$; ν : 烟气的运动粘滞系数, m^2/s ; d : 探测元件的外径, m 。

以上公式中, 定性温度为烟气温度 T_g , 速度为顶棚射流最大速度。探测器通常根据规范的要求安装在最佳位置, 即处在最高烟气温度和最大烟气速度处, 因此可取公式中的 $T_g = T_{\max}$, $u = u_{\max}$ 。

2.2 响应时间的数值积分方程

利用 Newton-Cotes^[7]插值型数值积分求解积分式(2), 令:

$$B = \frac{mc}{A} \quad (7)$$

$$F(T) = \frac{1}{h(T_{\max} - T) + \epsilon \sigma_b \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]} \quad (8)$$

将积分区间 $[T_0, T_b]$ n 等分, 步长 $g = \frac{T_b - T_0}{n}$, 取等距节点

$$T_k = T_0 + kg, \quad (k = 0, 1, \dots, n)$$

$$\text{则} \quad \tau = B \int_{T_0}^{T_b} f(T) dT \approx B(T_b - T_0) \sum_{k=0}^n C_k^{(n)} f(T_k)$$

计算表明, 取 $n=4$ 已足够保证精度, 因此 Newton-Cotes 系数为:

$$C_0^{(4)} = \frac{7}{90}, \quad C_1^{(4)} = \frac{16}{45}, \quad C_2^{(4)} = \frac{2}{15}, \quad C_3^{(4)} = \frac{7}{90}$$

响应时间的数值积分计算方程为:

$$\tau = \frac{B(T_b - T_0)}{90} [7f(T_0) + 32f(T_1) + 12f(T_2) + 32f(T_3) + 7f(T_4)] \quad (9)$$

2.3 物性参数计算方程

为便于计算机求解, 将物性参数的表列函数拟合成如下计算公式:

$$\nu = \left[13.73 + 8.4 \left(\frac{T_{\max} - 273}{100} \right) + \left(\frac{T_{\max} - 273}{100} \right)^2 \right] \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$\lambda = \left[2.41 + 0.8 \left(\frac{T_{\max} - 273}{100} \right) \right] \times 10^{-2} \quad (11)$$

在 $T_{\max} = 353 \text{ K} \sim 372 \text{ K}$ 之间, 式(10)、(11)的计算结果与表列函数完全相同。

3 算法比较及误差分析

如不考虑辐射传热的作用, Heskestad 传热模型的积分结果为:

$$\tau' = \frac{B}{h} \ln \left(\frac{T_{\max} - T_0}{T_{\max} - T_b} \right) \quad (12)$$

为比较两种算法的误差, 已将式(3)~式(12)编制成应用软件, 以双金属型定温火灾探测器为计算对象, 求出了不同输入变量情况下, 该类火灾探测器的响应时间 τ 和 τ' , 以及相对误差 $\Delta = \left(\frac{\tau - \tau'}{\tau} \right) \times 100\%$ 。探测器的基本情况为: 外壳为圆筒型不锈钢外壳, 其质量 $m = 0.7 \text{ g}$, 比热 $c = 470 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 圆筒外径为 $d = 4 \text{ mm}$, 外表面积 $A = 1.28 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。 T_{\max} 、 u_{\max} 的取值参考了大火荷情况下的实测研究报告^[8]。实测结果表明: 火灾初期顶棚下方的烟气水平流速不超过 0.5 m/s , 即使火灾中期亦不超过 1 m/s ; 而自然补风, 自然排烟的情况下, 着火室内火灾初期的烟气温度一般在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。考虑到火灾发生的偶然性, 探测器外壳由于氧化等原因将变粗糙, 因此发射率 ϵ 取值为 0.2 和 0.3 。各组计算的输入数据见表 1。

表1 计算程序各组输入数据

序号	$T_{max}(K)$	$u_{max}(m/s)$	$T_0(K)$	ϵ
1	353	0.5	341	0.2
2	353	0.5	341	0.3
3	353	0.5	331	0.2
4	373	1.0	341	0.3

图1~图4所示为1~4组输入数据的条件下,考虑辐射传热影响的响应时间随环境温度 T_0 。

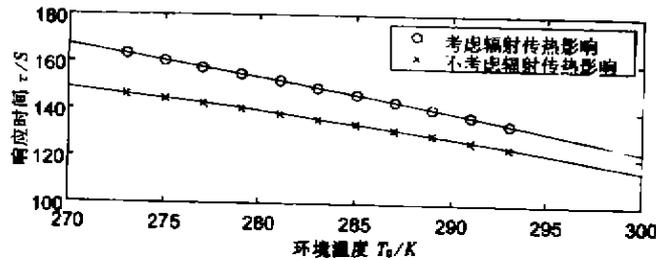


图1 输入第1组数据计算所得的响应时间曲线

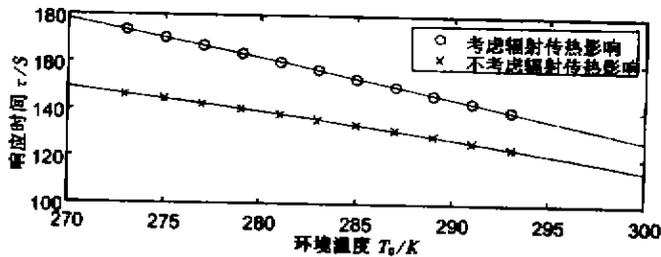


图2 输入第2组数据计算所得的响应时间曲线

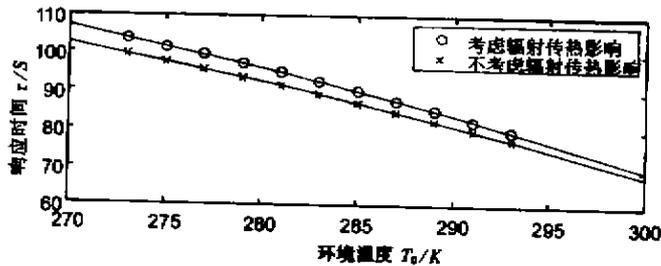


图3 输入第3组数据计算所得的响应时间曲线

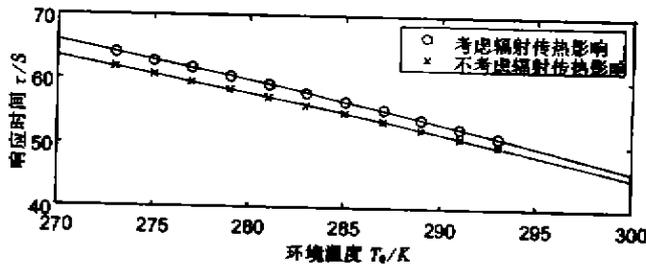


图4 输入第4组数据计算所得的响应时间曲线

的变化曲线,为便于比较,图中还描绘了按式(12)计算的的变化曲线。图5为相对误差 Δ 随环境温度 T_0 的变化曲线。

从图中可见:

1) 随着响应温度的 T_0 的增大,发射率 ϵ 的增大,响应时间 τ 将增大,同时热辐射损失增大,两种算法的计算误差相应增大。从图2中可以看出,当输入第二组数据,环境温度 $T_0=273 K$ 时,相对

误差高达 15.6%,说明辐射传热的影响不可忽略。

2) 随着环境温度 T_0 的降低,计算误差增大。

3) 随着 u_{\max} 的增大,对流换热系数 h 增大,计算误差减小(参看图 5),此时可忽略辐射传热的影响。

4 结论

本文针对感温火灾探测器的传热机理,建立了完善的传热模型,并提出了计算响应时间的一种新方法。与 Heskestad 等人提出的传热模型相比,新方法显然是更准确合理的。四组输入数据的计算结果表明:当环境温度较低,探测器的响应温度设置较高时,辐射传热对响应时间的影响不应该忽略。按本文公式编制的计算机软件,能在不同输入数据的条件下计算出响应时间,为消防工程的安全评估及报警系统的选型设计提供较重要的参考依据。

参考文献:

- [1] GBJ116—88,火灾自动报警系统设计规范[S].
- [2] R. L. Alpert. Calculation of Response Time of Ceiling—Mounted Fire Detectors[J]. Fire technology, 1972, (8): 181—195.
- [3] 袁理明, 范维澄. 建筑火灾中人员安全疏散时间预测[J]. 自然灾害学报, 1997, 2(6):
- [4] 公安部天津消防研究所. 地下大型商场火灾特性专题研究报告[R]. 2000.
- [5] Davis, W. D., Cooper, L. Y. Computer Model for Estimating the Response of Sprinkler Links to Compartment Fires with Draft Curtains and Fusible Link-Actuated Ceiling Vents[J]. Fire Technology, 1991, 27(2): 113-127.
- [6] Advances in Heat Transfer[J]. Vol. 8, Academic Press, 1972.
- [7] 徐萃薇. 计算方法引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [8] 公安部四川消防研究所. 地下商业街火灾烟气流动特性实验研究报告[R]. 2000.

Analysis of Heat Transfer during the Response Time of Temperature Sensor Fire Detector

WANG Hou-hua, LUO Jia-ling, GUO Yong

(Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper analyzes the heat transfer principle of temperature sensor fire detector, establishes mathematical model of heat transfer with considering the effect of radiation heat transfer and presents a new calculation method for the response time. The results of calculation show that when the environment temperature is rather low and the response temperature is set higher, the effect of radiation heat transfer on response time shouldn't be neglected. This paper may be helpful in appraising fire safety and designing alarm system.

Keywords: fire sensor; response time

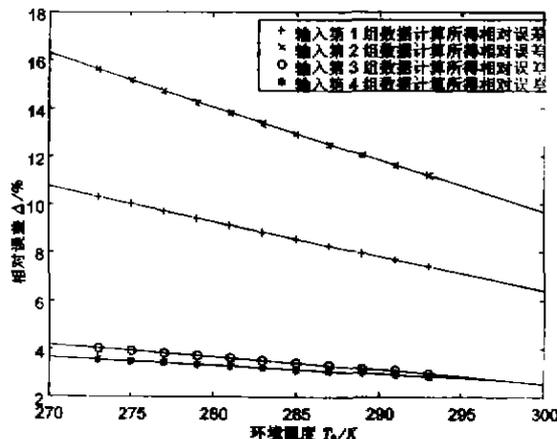


图5 输入各组数据的误差曲线