

高原环境下吸气式火灾探测器采样 管道内部流动的研究

刘勇¹, 张永明¹, 邓志华¹, 于春雨¹, 刘申友¹, 陈涛², 袁宏永²

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027;

2. 清华大学公共安全研究中心, 北京 100084)

[摘要] 高原环境下高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部流动特征直接决定了该火灾探测器的有效探测面积。分析了高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道在单采样孔条件下内部流动特征; 从理论上推导出在高原环境下和常压下这种采样管道在单采样孔条件下管道内部流动速度和采样孔流动速度的关系式, 给出了管道内部流动速度相同的情况下高原环境下采样管道折损长度, 为设计在高原环境下高灵敏度吸气式火灾探测器以及采样管道提供了依据。

[关键词] 高原环境; 吸气式; 管道流动; 火灾探测

[中图分类号] X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2007)04-0089-05

引言

高灵敏度吸气式火灾探测器是20世纪90年代出现的一种新型火灾探测设备, 主要应用在高度洁净空间实现极早期的火灾探测, 具有探测灵敏度高、无源探测的优点。高灵敏度吸气式火灾探测器主要由气体采样管网和探测主机构成, 其中气体采样管网的作用是采集被保护区域内的空气样本。气体采样管上设置采样孔, 由于探测主机内吸气泵的作用, 管网内产生负压, 形成一个稳定的气流, 被保护区域内的空气样本被抽入采样孔, 通过采样管网进入探测主机^[1], 完成气体采样。

高灵敏度吸气式火灾探测器的气体管网流动特征和效率决定了其灵敏度、探测算法及工程应用的设计。国际上对高灵敏度吸气式火灾探测器管道效率进行了大量的研究。West等人调查并得出了不同材料的采样管道的烟雾粒子的损失率^[2]。Gormley和Kennedy等人提出了层流条件下烟雾粒子由于扩散作用而在采样孔损失的模型^[3]。Stratmann等人提出了烟雾粒子在管道中热迁移效率

的计算模型^[4]。Hangal和Willeke提出了计算大粒径烟雾粒子(直径大于 $1\mu\text{m}$)在管道内沉降损失的计算模型^[5]。Pui等人提出了计算烟雾粒子撞击采样管壁面而损失的模型^[6]。Fissan等人对不同粒径的粒子在两种不同速度下的损失率进行了研究^[7]。Gary Geschwind和Russell Moulton等人对测试高灵敏度吸气式火灾探测器的粒子进行了分析和研究^[8]。国内也有这方面的研究, 冉鹏等人对采样管网的设计进行了分析, 得到了不同采样孔间距下最大允许管长^[1]。国内外的研究主要关注烟雾粒子在高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部的损失和采样管网的设计, 较少关注采样管道内部流动的特征。尚未见高原环境下采样管道内部流动特征研究和高原环境下高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道设计的研究。

高原环境是指高原上低气压的环境, 在这种环境下, 高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部流动的特征将和常压下不同, 对它的研究将有助于高原环境下采样管道内部烟雾粒子损失的研究, 同时为高原环境下高灵敏度吸气式火灾探测器采样管网

[收稿日期] 2006-02-27

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目

[作者简介] 刘勇(1979-), 男, 陕西子洲县人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室研究生

设计提供依据。

1 管道流动模型

高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道一般为圆管。以圆管轴线方向 x 建立柱坐标如图 1 所示：

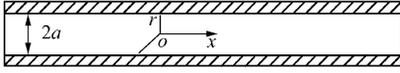


图 1 管道内部柱坐标设定图

Fig.1 Cylindrical coordinates sketch in pipe

考虑到高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部为定常流动，并且除采样孔附近外，其余绝大部分管道是完全发展状态下的流动，忽略采样孔附近的非完全发展状态的流动，认为整个采样管道内部为完全发展状态下的流动，其特点如式 (1) 所示：

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad u_{\theta} = 0 \quad (1)$$

所以连续方程为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0 \quad (2)$$

因为在壁面位置的 $u_r = 0$ ，所以可以根据连续方程式 (2) 得到：

$$u_r \equiv 0$$

根据式 (1) 和式 (2)，可以得到简化后的动量方程：

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad (5)$$

在完全发展状态下的流动，流动速率 u_x 在 x 方向上变化为 0，所以在管道上任意一个垂直于管道轴线截面上的速度场相同，这说明管道内部的压降主要是管道内部摩擦阻力造成，摩擦阻力在相同流速和相同管壁材料上一致，因此在单位长度上的压降相同，即：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \text{const} = -G \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3) 可以得到：

$$\mu \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{du_x}{dr} \right] = -G \quad (7)$$

若采样管道的内径为 $2a$ ，对式 (7) 积分可以得到管道内速度的关系式：

$$u = \frac{G}{4\mu} (a^2 - r^2) \quad (8)$$

由式 (8) 可知最大速率在轴线上，且大小为

$$u_{\max} = \frac{Ga^2}{4\mu} \quad (9)$$

由式 (7) 可以推导出采样管道内流量的计算公式，如式 (10) 所示，

$$W = \int_0^a 2\pi r \cdot \rho u dr = \frac{\pi \rho G a^4}{8\mu} \quad (10)$$

则可以得到采样管道内流动的平均速度：

$$\bar{u} = \frac{W}{\rho \pi a^2} = \frac{Ga^2}{8\mu} \quad (11)$$

2 采样孔流动的近似

采样孔流动近似为管道流动，外部压强是外部的大气压力，内部压强是管道内采样孔处的压强，图 2 为采样孔处流动的示意图。

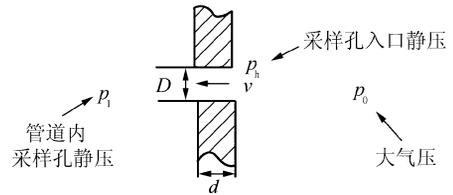


图 2 采样孔处流动示意图

Fig.2 Flow sketch at aspirating aperture

定义采样孔的半径为 R ，即 $D=2R$ ，则根据式 (7) 可以得到采样孔 v 的公式：

$$v = \frac{G_h}{4\mu} (R^2 - r^2) \quad (12)$$

其中， G_h 表示单位长度上的压降。由此可以得到采样孔 G_h 的表达式：

$$G_h = \frac{p_h - p_1}{d} \quad (13)$$

其中， p_h 表示采样孔入口处的静压， p_1 表示采样孔处管道内部的静压， d 表示采样管道的厚度。

由式 (12) 可以计算出采样孔的流量：

$$w = \int_0^R 2\pi r \cdot \rho v dr = \frac{\pi \rho G R^4}{8\mu} \quad (14)$$

同样可以得到采样孔的平均速度：

$$\bar{v} = \frac{w}{\rho \pi R^2} = \frac{G_h R^2}{8\mu} \quad (15)$$

采样孔入口处的平均速度可以根据伯努利定理近似求解，根据连续方程，采样孔入口处的平均速

度必然等于采样孔内部的平均速度，因此利用伯努利定理可以得到采样孔内部流动的平均速率的方程：

$$P_0 - p_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \quad (16)$$

其中， P_0 表示管道外部的大气压强， p_h 表示采样孔入口处的静压， ρ 表示空气的密度。

3 单采样孔的流动模型

单采样孔的流动是在高灵敏度吸气式火灾探测器采样管网上只开一个采样孔的情况下，管道内部的流动特征。这是实际应用过程中最简单的情况。单采样孔管道流动示意图如图3所示：

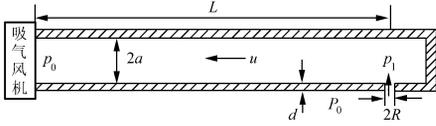


图3 单采样孔采样管道流动示意图

Fig.3 Sketch of flow of aspirating line that have single aspirating aperture

在采样管道内部，吸气风机入口处的压强为 p_0 ，采样孔处的压强为 p_1 ，外面的大气压强为 p_0 ；采样管道内径为 $2a$ ，管道内速度为 u ，管道的厚度为 d ，采样孔内径为 $2R$ ，速度为 v ，采样孔到吸气风机的距离为 L 。根据质量守恒定律可以得到：

$$\bar{u} \cdot \pi a^2 = \bar{v} \cdot \pi R^2 \quad (17)$$

根据式(10)和式(13)可以得到管道内部压降常数 G 和采样孔压降常数 G_h 的表达式：

$$G = \frac{p_1 - p_0}{L} \quad (18)$$

$$G_h = \frac{p_h - p_1}{d} \quad (19)$$

根据式(11)和式(15)可以得到管道内平均速度和采样孔流动平均速度的表达式：

$$\bar{u} = \frac{W}{\rho \pi a^2} = \frac{Ga^2}{8\mu} \quad (20)$$

$$\bar{v} = \frac{w}{\rho \pi R^2} = \frac{G_h R^2}{8\mu} \quad (21)$$

根据式(16)可以得到采样孔内流动平均速度和外界大气压强的关系：

$$p_0 - p_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \quad (22)$$

联立式(17)，式(18)，式(19)，式(20)，式

(21)和式(22)，可知方程组中含有6个方程和6个未知数，即管道内平均速度 \bar{u} ，采样孔平均速度 \bar{v} ，管道内单位长度上的压降 G ，采样孔单位长度上的压降 G_h 、采样孔入口处的静压 p_h 以及采样孔处管道内部的压强 p_1 ，方程组闭合，可以直接求解得：

$$\bar{u} = - (1+k) \frac{8\mu d}{\rho a^2} + \sqrt{\left[(1+k) \frac{8\mu d}{\rho a^2} \right]^2 + \frac{2R^4(P_0 - p_0)}{\rho a^4}} \quad (23)$$

$$\bar{v} = - (1+k) \frac{8\mu d}{\rho R^2} + \sqrt{\left[(1+k) \frac{8\mu d}{\rho R^2} \right]^2 + \frac{2(P_0 - p_0)}{\rho}} \quad (24)$$

其中 k 是常量，其值为：

$$k = \frac{R^4 L}{a^4 d} = \text{const} \quad (25)$$

从式(23)和式(24)可以知道，高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部流动和管道尺寸参数，吸气风机入口处负压 ($P_0 - p_0$)，空气的粘性系数 μ 以及空气密度 ρ 相关。

根据高灵敏度吸气式火灾探测器应用情况，即管道尺寸参数的量级以及环境参数的量级分析式(23)，式(24)和式(25)各项的量级：

$$\begin{aligned} \mu &\propto 10^{-5} & R &\propto 10^{-3} & a &\propto 10^{-2} \\ L &\propto 10^1 \sim 10^2 & (P_0 - p_0) &\propto 10^2 & \rho &\propto 10^0 \\ k &\propto 10^0 \sim 10^1 & (1+k) \frac{8\mu d}{\rho R^2} &\propto 10^{-1} \sim 10^0 \\ \frac{2(P_0 - p_0)}{\rho} &\propto 10^2 \end{aligned}$$

所以，可以将式(24)和式(25)近似为：

$$\bar{u} = - (1+k) \frac{8\mu d}{\rho a^2} + \sqrt{\frac{2R^4(P_0 - p_0)}{\rho a^4}} \quad (26)$$

$$\bar{v} = - (1+k) \frac{8\mu d}{\rho R^2} + \sqrt{\frac{2(P_0 - p_0)}{\rho}} \quad (27)$$

4 高原环境下和常压下单采样孔内部流动的对比分析

根据式(23)和式(24)可以得到高原环境下和常压下单采样孔的管道内部流动平均速度和采样孔处流动平均速度的计算公式，用下标1表示常压下单采样孔的管道内部流动参数，用下标2表示高原条件下单采样孔的管道内部流动参数。

常压下单采样孔的管道内部流动平均速度和采

样孔流动平均速度:

$$\bar{u}_1 \approx -(1+k_1) \frac{8\mu_1 d_1}{\rho_1 a_1} + \frac{R_1^2}{a_1^2} \sqrt{\frac{2(P_{01}-p_{01})}{\rho_1}} \quad (28)$$

$$\bar{v}_1 \approx -(1+k_1) \frac{8\mu_1 d_1}{\rho_1 R_1^2} + \sqrt{\frac{2(P_{01}-p_{01})}{\rho_1}} \quad (29)$$

高原环境下单采样孔的管道内部流动平均速度和采样孔流动平均速度:

$$\bar{u} \approx -(1+k_2) \frac{8\mu_2 d_2}{\rho_2 a_2} + \frac{R_2^2}{a_2^2} \sqrt{\frac{2(P_{02}-p_{02})}{\rho_2}} \quad (30)$$

$$\bar{v} \approx -(1+k_2) \frac{8\mu_2 d_2}{\rho_2 R_2^2} + \sqrt{\frac{2(P_{02}-p_{02})}{\rho_2}} \quad (31)$$

考虑高原环境下和常压下管道的参数均相同, 仅考虑大气压变化对管道流动的影响, 即考虑

$$R_1 = R_2 = R, a_1 = a_2 = a, L_1 = L_2 = L, \\ d_1 = d_2 = d, k_1 = k_2 = k$$

情况下高原环境下和常压下采样管道内部流动的不同。设 $\Delta p_1 = P_{01} - p_{01}$, $\Delta p_2 = P_{02} - p_{02}$, 对比管道内部流动平均速度和采样孔流动平均速度可以得到:

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_2} \approx \left[-(1+k) \frac{8\mu_1 d}{\rho_1 R^2} + \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho_1}} \right] / \left[-(1+k) \frac{8\mu_2 d}{\rho_2 R^2} + \sqrt{\frac{2\Delta p_2}{\rho_2}} \right] \quad (32)$$

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} \approx \left[-(1+k) \frac{8\mu_1 d}{\rho_1 R} + \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho_1}} \right] / \left[-(1+k) \frac{8\mu_2 d}{\rho_2 R} + \sqrt{\frac{2\Delta p_2}{\rho_2}} \right] \quad (33)$$

其中 Δp_1 的物理意义是指在非高原条件下吸气风机在其入口处形成的负压值, Δp_2 的物理意义是指在高原条件下吸气风机在其入口处形成的负压值。

由式 (32) 和式 (33) 可以看出, 高原环境下和常压下采样管道内部流动速度主要是和高原环境下空气粘性系数、空气密度以及吸气风机在其入口处形成的负压相关。

根据完全气体状态方程可知, 高原低压缺氧环境和常压环境在相同的温度下, 大气压强和空气密度之比是常数。

$$\frac{P_0}{\rho} = RT = \text{const} \quad (34)$$

高灵敏度吸气式火灾探测器采用的离心式吸气风机产生的负压值正比于其处于的大气压强, 即:

$$(P_0 - p_0) \propto P_0$$

所以在高原环境下和常压下, 吸气风机形成的负压和空气密度之比近似相等, 即:

$$\frac{\Delta p_1}{\rho_1} \approx \frac{\Delta p_2}{\rho_2} \quad (35)$$

从式 (32), 式 (33), 以及式 (34) 可以知道, 高原环境对高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部流动影响主要是因为高原环境下空气密度和粘性的改变, 主要通过速度求解过程中的 $-(1+k)$ $\frac{8\mu d}{\rho R^2}$ 项产生影响, 根据第三节中量级分析可以知道, 这项的大小决定于 k 值, 而影响 k 值的主要因素是采样管道长度。

在高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道的实际设计中, 更关心缩短多长的管道能达到和常压下相同的采样管道内部流动速度和采样孔流动速度。若只考虑管道长度的变化, 即认为除管道长度外, 采样管道的内径、采样孔孔径以及管道壁厚是相同的, 即 $R_1 = R_2 = R$, $a_1 = a_2 = a$, $d_1 = d_2 = d$ 可以得到常压和高原环境下两个 k 值:

$$k_1 = \frac{R^4 L_1}{a^4 d} = gL_1 \quad (36)$$

$$k_2 = \frac{R^4 L_2}{a^4 d} = gL_2 \quad (37)$$

其中,

$$g = \frac{R^4}{a^4 d} \quad (38)$$

根据式 (28) 和式 (30), 若管道内部流动速度相同, 意味着

$$(1+k_1) \frac{8\mu_1 d_1}{\rho_1 a_1} = (1+k_2) \frac{8\mu_2 d_2}{\rho_2 a_2} \quad (39)$$

即

$$(1+gL_1) \frac{\mu_1}{\rho_1} = (1+gL_2) \frac{\mu_2}{\rho_2} \quad (40)$$

可得

$$L_2 = \frac{1}{g} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} (1+gL_1) \quad (41)$$

从式 (41) 可以得到, 高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道在高原环境下达到和常压下 L_1 长度管道的相同管道内部速度, 管道的长度应为 L_2 。

5 结论

从完全发展状态下的管道流动连续方程和动量

方程出发,对高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道内部流动特征进行了初步分析,推导出在单采样孔条件下采样管道内部流动和采样孔流动方程,并分析了高原环境对高灵敏度吸气式火灾探测器采样管道的影响,指出高原环境下影响采样速率的主因是空气密度和粘性的变化,提出了高原环境下采样管道设计长度折算公式。工程实际应用中可以根据不同海拔高度的空气密度和粘性,利用式(41)即可得到不同海拔高度下单采样孔情况下的等效采样管道长度。

参考文献

- [1] 冉鹏,李宏文,吸气式感烟探测报警系统在高大空间中的应用[J].消防技术与产品信息,2002,(7):13~16
- [2] West J. Particle loss in various types of tubing [J]. Microcontamination, 1985,3(11):86~89
- [3] Gormley P, Kennedy M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube[A]. Proc Royal Irish Academy [C]. 52A, 1949;163~169
- [4] Stratmann F, Otto E, Fissan H. Thermophoretical and diffusional particle transport in cooled laminar tube flow [J]. J Aerosol Sci, 1994,25(7):1305~1319
- [5] Hangal S, Willeke K, Aspiration efficiency: unified model for all forward sampling angles [J]. Environ Sci. Technol, 1990, 24(5): 688~691
- [6] Pui D, Romanay-Novas F, Liu B. Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section[J]. Aerosol Sci Technol, 1987, 7(3): 301~305
- [7] Fissan H, Otto E, Dixkens J. Particle transport in sampling lines used in fire detection systems[J]. Fire Safety Journal, 1997, 29(2,3): 205~215
- [8] Geschwind G, Moulton R, Duke S D. Development of an aerosol challenge for smoke detectors used in semiconductor clean rooms [J]. J Aerosol Sci, 1996, (27):355~35

Research of Flow in Aspirating Lines of Fire Detection System at High Altitude

Liu Yong¹, Zhang Yongming¹, Deng Zhihua¹, Yu Chunyu¹,
Liu Shenyou¹, Chen Tao², Yuan Hongyong²

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Center of Public Safety Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] Researching flow in aspirating lines in altiplane environment can offer gist of designing air aspirating lines of HSASD (High Sensitivity Aspirating Smoke Detector) at tableland. Velocity equation of air aspirating line and velocity equation of aspirating aperture could be derived from continuity equation and dynamics equation. Average velocity of air aspirating line and average velocity of aspirating aperture could be concluded when air aspirating line had only single aspirating aperture. Contrasting average velocity of air aspirating line and aspirating aperture at high altitude and normal atmosphere pressure concluded difference of them and main factors that affected flow of air aspirating lines at high altitude. Flow velocity of air aspirating lines and aspirating aperture is mainly affected by viscosity coefficient, negative pressure at aspirating pump inlet. Equal flow velocity of air aspirating lines and aspirating aperture can be got through shortening aspirating lines length. Equation 4.14 gives a compute method of shortening aspirating lines length in altiplane environment.

[Key words] altiplane environment; air aspirating; pipe flow; fire detection