

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.004

七氟丙烷气体灭火系统沿程压力损失计算方法^{*}

陈 建, 李 鑫, 胡俊康, 王建勇

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对七氟丙烷气体灭火系统管网设计过程中管网压力损失计算的问题,提出了一种基于修正系数的七氟丙烷气体灭火系统管网沿程压力损失计算方法。结合热量传递与伯努利方程推导了灭火系统管道压力损失计算公式,依据管网管道参数和设计流量的关系计算了其对应最小雷诺数,并根据雷诺数大小确定了相应管道的沿程压力损失系数计算值;进而修正了沿程压力损失计算公式,并采用CFD方法求解了压力损失修正系数;最后以七氟丙烷气体灭火系统为例进行了实验验证。研究表明:该计算方法对七氟丙烷气体灭火系统管网压力损失计算有效可行。

关键词:七氟丙烷;管网设计;沿程压力损失;修正系数;CFD

中图分类号:TH49;X932

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)01-0022-06

Calculation method for pressure loss along pipeline of Heptafluoropropane gas fire extinguishing system

CHEN Jian, LI Xin, HU Jun-kang, WANG Jian-yong

(Key Lab of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education/
Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at calculating the pressure loss along pipeline during the process of pipe network design of Heptafluoropropane gas fire extinguishing system, a calculation method of pressure loss along pipeline of heptafluoropropane gas fire extinguishing system based on correction coefficient was proposed. The calculation formula for pressure loss along pipeline of fire extinguishing system was deduced by combining heat transfer with Bernoulli equation. According to the relationship between the pipe network parameters and its designing flow, the corresponding minimum Reynolds number was calculated, and the coefficient of pressure loss along pipeline was determined according to the value of Reynolds number. Further, the calculation formula of pressure loss along pipeline was modified, and the correction coefficient was solved by using CFD. Finally, the pressure loss calculation formula was tested through an experiment of heptafluoropropane gas fire extinguishing system. The results indicate that the calculation method for pipe network pressure loss of heptafluoropropane gas fire extinguishing system accurate and feasible.

Key words: Heptafluoropropane; pipe network design; pressure loss along pipeline; correction coefficient; CFD

0 引 言

七氟丙烷气体灭火系统管网设计中管网压力损

失计算是制约灭火系统管网设计的瓶颈环节。管网压力损失包括沿程压力损失和局部压力损失,虽然沿程压力损失尚不能从理论上很完善地解决,但针

收稿日期:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175473);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E050021);浙江省教育厅资助项目(Y201122752, Y200909905)

作者简介:陈建(1975-),男,山东泰安人,副研究员,主要从事数字化设计与制造、绿色设计、智能设计、灭火系统管网设计方面的研究。

E-mail:chenjian@zjut.edu.cn

对不同介质大量相关研究已广泛开展。Bullen P R 等^[1]通过理论分析和实验验证,计算了不可压缩湍流收缩管的压力损失及其压力损失系数。Niessner H^[2]等采用能量系数和动量系数法计算压力损失。刘洪义^[3]针对氮气高压可压缩特性,研究了氮气(IG100)气体灭火系统管道压力损失。刘洪波等^[4-5]应用CFD模拟三氟甲烷气体灭火系统,研究了三氟甲烷管网中压力损失的计算方法。王致新等^[6]通过研究洁净气体灭火剂在储存容器内的膨胀过程和管道中流动过程的基本规律,提出管道内沿程压力损失的计算公式。李萍等^[7]分别采用Darcy-Weisbach公式和AMESim软件计算了挖掘机工作装置液压管路系统的压力损失。于伟江^[8]计算了几种自动喷水灭火系统枝状管网立管与配水管之间不同铺设方式的压力损失。Roslund J^[9]通过分析热水管网的流动特性,提出了复杂热水管网系统压力损失计算方法。Onea A 等^[10]应用CFD模拟热交换器,研究了热交换器各个局部组件的压力损失。万会雄等^[11]在考虑管道内液压介质与外部环境热交换的情况下,研究了超长管道液压系统的压力损失计算方法。辛喆等^[12]利用计算流体力学软件FIRE和发动机热力循环软件BOOST相耦合的方法,对SCR催化剂压力损失进行了计算。针对七氟丙烷,《气体灭火系统设计规范》认为七氟丙烷在系统管网中流动状态处于紊流粗糙区,并给出了半经验压力降计算公式^[13]。而在工程实际中管网管道粗糙度存在差异,王煜彤等^[14]研究了镀锌钢管绝对粗糙度K值等于0.15 mm情况下的七氟丙烷灭火系统阻力损失计算公式。同时,七氟丙烷在喷放过程中,如果不考虑气化、高压氮气融入问题,理论计算与实际也会产生较大误差。杨志远等^[15]对七氟丙烷气体灭火系统工作状态进行了模拟试验,指出在理论计算时须考虑它的某些二相流特征。

目前对七氟丙烷气体灭火系统管网压力损失研究还不够深入。本研究拟尝试对七氟丙烷气体灭火系统管网压力损失计算公式进行修正,以提高管网沿程压力损失计算的准确性与方便性。

1 沿程压力损失理论模型

管流示意图如图1所示。

七氟丙烷液体在水平圆管内流动,在管内取半径为 r 长度为 l 的微小圆柱体,两端面液体速度、压力、温度、高度分别为 $v_1, v_2, P_1, P_2, T_1, T_2, Z_1, Z_2$ 。

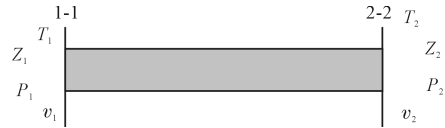


图1 管流示意图

由伯努利方程可得:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

式中: α_1, α_2 —速度系数; h_f —圆管沿程压力损失;

从1-1截面到2-2截面,如果考虑七氟丙烷的温度变化,那么从外界吸收的热量为:

$$q = cm(T_2 - T_1) \quad (2)$$

式中: c —七氟丙烷热比容; q —七氟丙烷吸热量。

因此,如果温度变化对压力的影响也考虑在内,在保证单位统一的条件可得:

$$h_f = (Z_1 - Z_2) + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{(\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2)}{2g} + \beta cm(T_1 - T_2) \quad (3)$$

式中: β —七氟丙烷灭火剂管流热交换修正系数。

由于是水平圆管, $Z_1 = Z_2, \alpha_1 = \alpha_2, v_1 = v_2$,式(3)可简化为:

$$h_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \beta cm(T_1 - T_2) \quad (4)$$

因此,两端面压力差为:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h_f + \rho g \beta cm(T_2 - T_1) \quad (5)$$

将达西公式^[16]代入式(5)可得:

$$\Delta P = \rho \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} + \rho g \beta cm(T_2 - T_1) \quad (6)$$

式中: λ —沿程压力损失系数; ρ —七氟丙烷密度, kg/m^3 。

2 基于管网管径最小设计流量的 λ 计算方法

灭火管网管道的沿程压力损失系数 λ 的选取是压力损失计算准确性的关键之一。管网不同流态其雷诺数(Re)不同,对应的 λ 的计算公式也不同。其中,雷诺系数(Re)的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} 10^{-3} \quad (7)$$

式中: d —管道直径,mm; v —流体流速,m/s; ρ —七氟丙烷液体密度,为 $1407 \text{ kg}/\text{m}^3$; μ —七氟丙烷液体的动力粘度,取值 $2.26 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

在七氟丙烷气体灭火系统中,管道管径一般根据管道的流量来确定^[17],其具体的选取原则如表1所示。

表 1 管道管径选取原则

管道流量大小 $Q/(kg \cdot s^{-1})$	管道直径选取范围 d/mm
$Q \leq 6$	$d = (12 \sim 20) \sqrt{Q}$
$6 < Q \leq 160$	$d = (8 \sim 16) \sqrt{Q}$

七氟丙烷灭火系统工程所用镀锌钢管绝对粗糙度的取值一般为 $\Delta = 0.15 \text{ mm}$, 而管道的管径共 11 种型号。根据表 2 管径选取原则, 可以预先估算出每种规格管径在满足设计要求的情况下对应的最小流量。当管道对应的流量为 $(0 \text{ kg/s}, 6 \text{ kg/s}]$, 那么该管道对应最小流量为:

$$Q_{1\min} = \left(\frac{d}{20}\right)^2 \quad (8)$$

或者管道对应流量在区间为 $(6 \text{ kg/s}, 160 \text{ kg/s}]$, 那么该管道对应的最小流量为:

$$Q_{2\min} = \left(\frac{d}{16}\right)^2 \quad (9)$$

例如管道管径规格为 $d = 15 \text{ mm}$, 根据公式(8) 计算结果为 $Q_{1\min} = 0.5625 \text{ kg/s} \leq 6 \text{ kg/s}$, 满足表 1 管道

流量大小要求; 而根据公式(9) 计算结果为 $Q_{2\min} = 0.8789 \text{ kg/s} > 6 \text{ kg/s}$, 不满足表 1 管道流量大小要求, 所以当管道管径规格 $d = 15 \text{ mm}$ 时, 其最小设计流量应应用公式(8) 进行计算, 最小设计流量为 $Q_{\min} = 0.5625 \text{ kg/s}$

根据管道管径规格, 管道单位时间对应流量为:

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 \rho v \quad (10)$$

则根据式(10) 可推导出对应的最小流速为:

$$v_{\min} = \frac{4Q_{\min}}{\pi \rho d^2} \quad (11)$$

将 $Q_{1\min} = 0.5625 \text{ kg/s}$ 、七氟丙烷液态密度 $\rho = 1407 \text{ kg/m}^3$ 代入公式(11), 可计算出其对应的流速 $v_{\min} = 2.623 \text{ m/s}$ 。代入公式(7), 可进一步计算出其对应的最小雷诺数为 $Re_{\min} = 2.2127 \times 10^5$ 。以此类推, 本研究把工程应用中常用规格管道所对应的最小流量、最小流速及对应最小雷诺数计算出来, 其具体计算结果如表 2 所示。

表 2 管道流量-流速-雷诺数关系

管径规格 $d/(mm)$	最小流量 $Q_{\min}/(kg \cdot s^{-1})$	最小速度 $v_{\min}/(m \cdot s^{-1})$	最小雷诺数 $Re_{\min}$	参考值 $\left(597 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{9}{8}}\right)$
15	0.5625	2.2625	2.1128×10^5	1.0616×10^5
20	1	2.2625	2.8168×10^5	1.4673×10^5
25	1.5625	2.2625	3.5214×10^5	1.8861×10^5
32	2.56	2.2625	4.5074×10^5	2.4898×10^5
40	4	2.2625	5.6342×10^5	3.2003×10^5
50	9.7656	3.5351	1.1004×10^6	4.1135×10^5
65	16.5039	3.5351	1.4305×10^6	5.5259×10^5
80	25	3.5351	1.7607×10^6	6.9799×10^5
100	39.0625	3.5351	2.2008×10^6	8.9716×10^5
125	61.0352	3.5351	2.7510×10^6	1.1532×10^6
150	87.8906	3.5351	3.3036×10^6	1.4157×10^6

由表 2 的数据可以看出, 七氟丙烷灭火系统中, 对于每一种规格的管道, 灭火剂在管道中流动的最小雷诺数值都大于 $\left(597 \left(\frac{d}{\Delta}\right)^{\frac{9}{8}}\right)$, 也就是说适合七氟丙烷气体灭火系统灭火剂管流为完全紊流, 对于完全紊流状态时, 管网压力损失主要有管道管壁的粗糙度决定, 受流体性质影响基本可以忽略, 所以七氟丙烷管流压力损失计算的沿程阻力系数应用希费林松公式:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0.25} \quad (12)$$

式中: λ —沿程阻力系数; d —管道直径, mm; Δ —管道的绝对粗糙度, mm。

将式(12) 代入式(6) 可得沿程压力损失计算公

式为:

$$\Delta P = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0.25} \frac{\rho v^2}{2d} l 10^3 + \rho g \beta c m (T_2 - T_1) \quad (13)$$

式中: l —管段的计算长度, m; d —管段的直径, mm; ρ —七氟丙烷液体密度, 为 1407 kg/m^3 ; Δ —流管的绝对粗糙度, 为 0.15 mm 。

3 管道沿程压力损失修正公式

由于七氟丙烷气体灭火系统管网流动为变高速湍流, 理论计算上还难以准确描述, 为了计算方便和计算准确, 本研究将公式(13) 中的热量传递部分与管道摩擦损失整合在一起, 通过设置系数, 进而得到修正公式:

$$\Delta P = \alpha \cdot 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0.25} \frac{\rho v^2}{2d} 10^3 \quad (14)$$

式中: α —管网压力损失计算修正系数。

本研究利用 CFD 方法来辅助求解压力损失修正系数 α 。由表 1 中对应雷诺系数的值,可知管道内七氟丙烷灭火剂的流动属于湍流流动,由于湍流脉动而引起的动量守恒和组分守恒方程中的应力输运和质量输运要通过湍流模型来封闭,本文采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型^[20]。

本研究建立一根长 2 m、直径 40 mm 的直管三维模型,前 1 m 为紊流充分形成区,后面 1 m 为实验测量区,边界条件为速度入口和自由出流。管道模型图如图 2 所示。

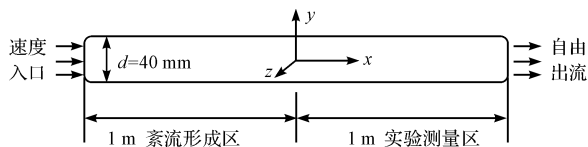


图 2 管道模型图

在软件 fluent 计算过程中,本研究采用 SimpleC 算法求解压力速度耦合方程,动量、组分、湍动能和湍流耗散率方程的离散格式均采用二阶迎风差分格式,管道壁面采用标准壁面函数方法处理^[21]。整个网格数为 284.45 万个。模型网格示意图如图 3 所示。

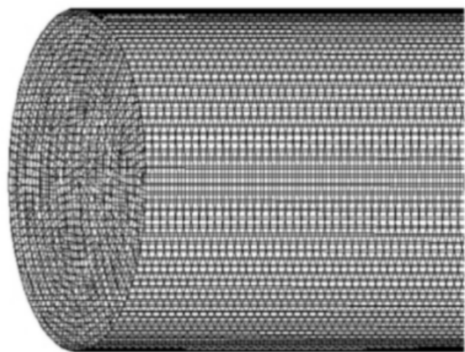


图 3 模型网格划分示意图

经过迭代计算,得出管道压力分布云图如图 4 所示。

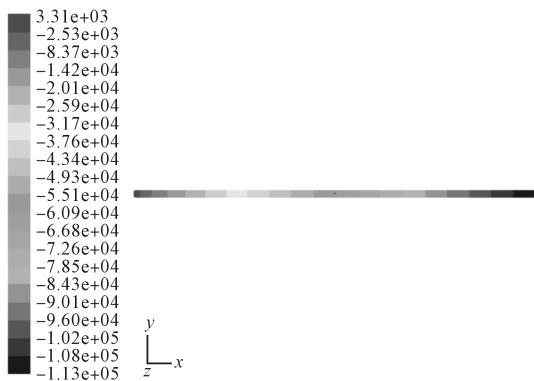


图 4 管道压力分布云图

管道轴向压力变化曲线图如图 5 所示。

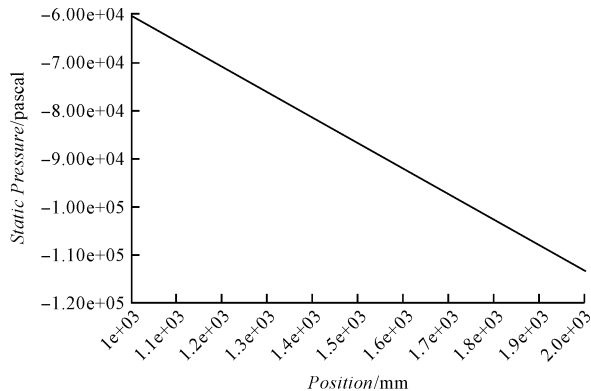


图 5 管道压力变化曲线图

由如上管道压力分布云图和压力变化曲线图可知,在七氟丙烷气体灭火系统中,沿着灭火剂流动方向,压力逐渐减小,管道压力损失在管道径向,越靠近管壁压力损失越大,在管道的轴向压力沿速度方向压力几乎以同一个斜率减小。

对于 $d = 40$ mm 的管道,其 $v_{\min} = 2.2625$ m/s,所以数值计算的速度取 3 m/s 开始计算,变换七氟丙烷流体速度进行计算,可得压力损失值 ΔP 和根据公式 (14) 计算的压力损失修正系数 α ,如表 3 所示。

表 3 不同流速条件下的压力损失及 α

流速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	流体仿真压力损失 $\Delta P/\text{MPa}$	α
3	4 775.32	1.108
4	8 483.03	1.107
5	13 246.78	1.107
6	19 069.66	1.106
7	25 952.19	1.106
8	33 925.35	1.105
9	42 930.33	1.107
10	52 958.20	1.106
11	64 078.61	1.106
12	76 283.21	1.107
13	89 509.20	1.106
14	103 808.42	1.106

根据表 3 中 12 次计算结果可计算出 α 的平均值大小为 1.106,所以公式 (14) 可写为:

$$\Delta P = 1.106 \cdot 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0.25} \frac{\rho v^2}{2d} 10^3 \quad (15)$$

4 管网压力损失实验

七氟丙烷 (HFC-227ea) 气体灭火系统实验条

件为:

(1) 防护区体积 100 m^3 ; (2) 正庚烷作为火灾模拟燃烧物; (3) 木堆 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 四层; (4) 选 $70 \text{ L}/4.2 \text{ MPa}$ 的钢瓶 2 个; (5) HFC-227ea 单瓶药剂质量 33.8 kg ; (6) 采用主从动启动方式启动灭火系统; (7) 1 个喷嘴 (等效开孔尺寸 $D = 15.3 \text{ mm}$); (8) 管径全程为 DN40。

实验管网布置和传感器安装如图 6 所示。

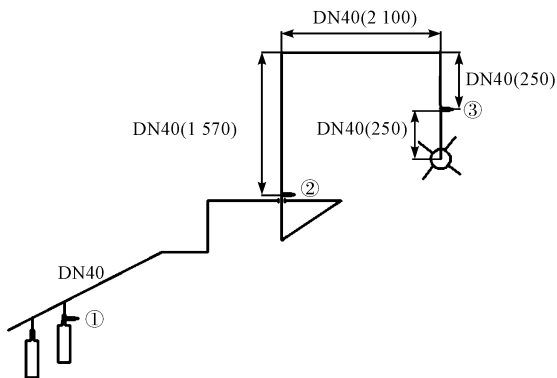


图 6 灭火实验管网布置图

①号传感器安装在钢瓶压力表位置; ②号传感器安装在 5 号点; ③号传感器安装喷嘴前 250 mm 处。

七氟丙烷气体灭火系统的喷放时间为 8.3 s , 除了每瓶 3.5 kg 的剩余量, 管网总的药剂喷放量为 60.6 kg , 则灭火剂的平均喷放流量为 7.3012 kg/s , 灭火系统喷放过程压力随时间变化曲线由压力检测系统 (XSR90) 直接获取数据并绘制曲线, 如图 7 所示。

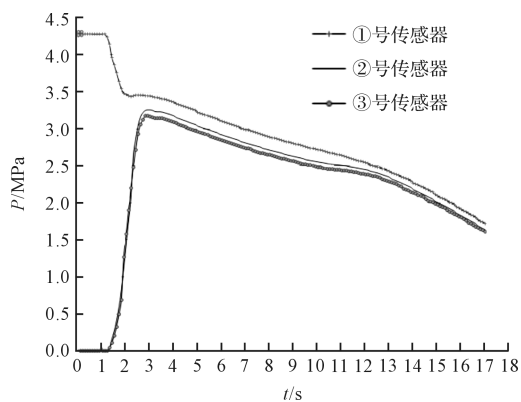


图 7 灭火实验管道压力-时间示意图

②号传感器和③号传感器测量的管网压力如图 7 中的②曲线和③曲线, 它们之间的压力差, 即为两个传感器之间管网的压力损失。从灭火系统开始喷放, 即上图曲线③压力值到达最大值时刻, 每隔 0.5 s 取一次实验数据, 喷放过程两个传感器的压力值和压力损失如表 4 所示。

表 4 点位压力及压力损失

时间/s	②位置压力/MPa	③位置压力/MPa	压差/MPa
0.5	3.231	3.150	0.081
1	3.188	3.100	0.088
1.5	3.117	3.042	0.075
2	3.059	2.976	0.083
2.5	2.991	2.921	0.070
3	2.929	2.858	0.071
3.5	2.878	2.798	0.080
4	2.819	2.752	0.066
4.5	2.774	2.697	0.077
5	2.722	2.655	0.067
5.5	2.681	2.609	0.072
6	2.636	2.572	0.064
6.5	2.598	2.528	0.070
7	2.561	2.495	0.065
7.5	2.531	2.462	0.069
8	2.512	2.446	0.065

由表 4 可计算出管网位置②与位置③之间压力损失的平均值为 0.0726875 MPa 。

由实验管网布置图可知: 管道内径为 40 mm , 即 $d = 40$; 管网位置②与位置③之间管道长度为: $1.57 + 2.1 + 0.25 = 3.92 \text{ m}$, 工程所用镀锌钢管 40 mm 弯头其当量长度取值为 1.85 m , 所以两传感器之间的总当量长度 l 为 $3.92 + 1.85 \times 2 = 7.62 \text{ m}$; 灭火剂的平均喷放流量为 $Q = 7.3012 \text{ kg/s}$; 《规范》中取管道粗糙度为 $k = 0.12$ 。将以上数值带入《规范》中管道沿程压力损失计算公式, 得:

$$\Delta P_1 = \frac{5.75 Q^2 l \times 10^5}{\left(1.74 + 2lg \frac{d}{0.12}\right)^2} = 0.049532 \text{ MPa}$$

将管道平均流量 7.3012 kg/s 带入公式 (11) 得平均喷放速度为 4.130 m/s 。七氟丙烷液体密度为 $\rho = 1407 \text{ kg/m}^3$, 将以上数据代入公式 (15) 得:

$$\Delta P = 0.12166 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0.25} \frac{(l+L)\rho v^2}{2d} 10^3 = 0.06891 \text{ MPa}。$$

《规范》所计算管路沿程压力损失及修正公式所计算管路沿程压力损失与试验测试结果误差率分别为:

$$\delta_1 = \frac{|0.0725875 - 0.049532|}{0.0726875} = 31.86\% ;$$

$$\delta_2 = \frac{|0.0725875 - 0.06891|}{0.0726875} = 5.20\% 。$$

由如上计算结果可知, δ_2 明显小于 δ_1 。因此, 由修正公式计算的的压力损失与实验测量结果更加接近。

5 结束语

本研究提出了一种七氟丙烷气体灭火系统管道沿程压力损失修正公式。修正公式的理论基础是在沿程压力损失推导过程中考虑了能量守恒和热量传递。在沿程阻力系数计算过程中,本研究引入了一种基于工程管道参数计算最小雷诺数的方法,确定了灭火过程中管道内七氟丙烷的流态。同时提供了一种采用CFD软件来求解修正系数的方法。

通过与实验结果对比可知:规范计算公式的误差为31.86%,应用提出的计算方法的误差为5.2%,证明了提出的计算方法的准确性。

参考文献 (References):

- [1] BULLEN P R, CHEESEMAN D J, HUSSAIN L A, et al. The determination of pipe contraction pressure loss coefficients for incompressible turbulent flow[J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 1987, 8(2): 111-118.
- [2] NIESSNER H, CODAN E. Significance of truckenbrodt's energy and momentum coefficients for loss calculation in ramified pipe systems[J]. **Pamm**, 2010, 10(1): 449-450.
- [3] 刘洪义. 氮气 (IG100) 气体灭火系统管道压力损失公式推导[J]. **中外建筑**, 2009(9): 171-172.
- [4] 刘洪波, 刘波, 李小松. 基于CFD的三氟甲烷气体灭火系统管网压力损失计算方法研究[J]. **武汉理工大学学报: 交通科学与工程版**, 2012, 36(2): 315-318.
- [5] 张伟. 三氟甲烷灭火系统压力变化规律的数值模拟研究[J]. **天津建设科技**, 2016, 26(3): 11-14.
- [6] 王致新, 王煜彤. 洁净气体灭火系统管网流动理论及计算方法探讨[J]. **给水排水**, 2009, 35(8): 119-125.
- [7] 李萍, 殷晨波, 叶仪, 等. 基于AMESim的21t液压挖掘机液压管路系统压力损失计算[J]. **液压与气动**, 2013(3): 79-82.
- [8] 于伟江. 自动喷水灭火系统枝状管网压力损失分析探讨

[J]. **河南建材**, 2013(1): 31-32.

- [9] ROSLUND J. Useful pressure loss calculation in complex district heating networks [D]. Lund: Lund University, 2015.
- [10] ONEA A, BOTTCHER M, STRUWE D. Detailed CFD analysis of the pressure loss on the primary side for the heat exchanger of the ELSY fast lead-cooled reactor by applying unit slice models[C]. **Proceeding of the ASME ATI UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems**, Sorrento: ASME, 2010.
- [11] 万会雄, 黄辉, 黄海波. 超长液压管道压力损失的计算与试验分析[J]. **液压与气动**, 2009(10): 23-25.
- [12] 辛喆, 王顺喜, 张寅, 等. Urea-SCR 催化剂压力损失及其对柴油机性能的影响[J]. **农业工程学报**, 2011, 27(8): 169-173.
- [13] GB50370-2005. 气体灭火系统设计规范[S]. 北京: 北京中国计划出版社, 2006.
- [14] 王煜彤, 王致新. 七氟丙烷和三氟甲烷阻力损失的计算方法[J]. **消防技术与产品信息**, 2004(6): 9-11.
- [15] 杨志远, 汪辉, 边福利, 等. 七氟丙烷 (HFC-227ea) 灭火剂管路流动特性[J]. **消防科学与技术**, 2001(2): 26-27.
- [16] 倪玲英. 工程流体力学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2013.
- [17] National Fire Protection Association. Standard on carbon dioxide extinguishing systems[M]. Quincy: NFPA, 2005.
- [18] 熊莉芳, 林源, 李世武. K-e 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. **工业加热**, 2007, 36(4): 13-15.
- [19] 张瑞, 胡天成, 杨晋. 柱塞式液压缸内流场数值研究[J]. **液压气动与密封**, 2015(11): 9-13.
- [20] 雷可铭, 李勇则, 杜宁红, 等. 双吸双流通泵固液两相流动特性分析[J]. **流体机械**, 2016(5): 31-36.
- [21] 陶文栓. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

陈建, 李鑫, 胡俊康, 等. 七氟丙烷气体灭火系统沿程压力损失计算方法[J]. **机电工程**, 2017, 35(1): 22-27.

CHEN Jian, LI Xin, HU Jun-kang, et al. Calculation method for pressure loss along pipeline of Heptafluoropropane gas fire extinguishing system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 35(1): 22-27.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>