

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2024.12.001

# 基于燃气本质安全配件应用条件下的户内燃气管路阻力损失计算方法

李 军, 杨文量, 张 文, 郭宏伟, 李晓鸣  
中国市政工程华北设计研究总院有限公司

**摘 要:** 为准确地得到户内燃气管路本质安全配件应用条件下的阻力损失, 总结了不同管路附件的流量性能, 形成了利用安全配件的流量参数, 提出指定流量下管路附件阻力损失的方法。对管路附件开展流量-压损特性的试验研究, 结合应用示例, 分析管路压力损失各分项组成, 并给出户内燃气管路中典型安全配件的流量参数以及输送用不锈钢软管的摩擦阻力系数。

**关键词:** 燃气本质安全配件; 阻力损失; 试验研究; 水力计算

## 1 概述

近年来户内燃气事故频发, 户内燃气本质安全建设日益得到重视, 以自闭阀为代表的燃气本质安全配件不断推广应用, 陕西省成为国内首个立法强制推广安装自闭阀的省份。GB 50028-2006(2020年版)《城镇燃气设计规范》中对低压燃气管道的摩擦阻力损失给出了详细的计算方法<sup>[1]</sup>。文献<sup>[2]</sup>提出使用当量长度的方法来减小局部阻力损失的计算误差。在城镇燃气调压器的设计标准中给出了天然气调压器的出口压力推荐值, 区域调压器为3.00kPa、楼栋调压器为2.40kPa、表前调压器为2.16kPa。《城镇燃气设计规范》中规定民用燃具的额定压力为2.0kPa(天然气), 从调压设施到燃具的最大阻力损失不大于300Pa。随着燃气本质安全配件如具备安全功能的阀门和输送用不锈钢波纹管使用量的不断增加, 低压管道的局部阻力损失与传统的无安全配件的情景比较存在较大差异, 可能出现下游用气压力不足的情况。因此, 在燃气本质安全配件应用条件下, 准确获得户

内燃气管路阻力损失是必要的。

建筑外立管阀门至燃烧设备的管段多为低压燃气管道, 如图1所示, 常见的建筑用燃气管路安全配件包括燃气立管阀、输送用不锈钢波纹管(以下简称: 输送管)、户内表前阀门、燃气表、灶前阀门(包括球阀、管道自闭阀、电磁式切断阀等)、燃气用具连接用不锈钢波纹管(以下简称: 燃具管)以及弯头、三通等。

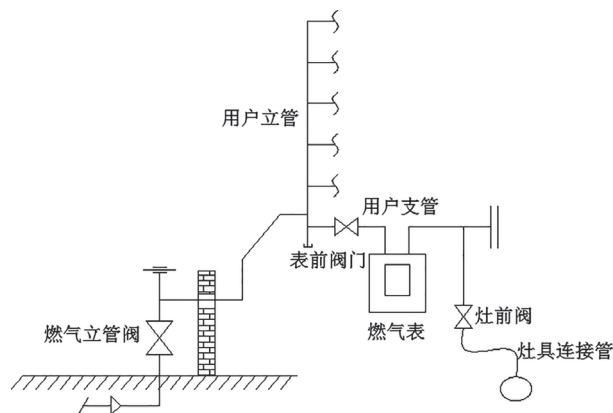


图1 常见的用户燃气管路

本文根据不同管路附件的产品设计标准流量或压力损失的试验方法，对其进行归一化处理，形成统一的阻力损失分量和当量长度计算方法；对电磁式切断阀和输送用不锈钢波纹软管等产品进行流量-压损特性试验，确定其阻力损失参数；根据不同产品的指标要求及试验结果，给出典型工况下，管道的最大阻力损失。

## 2 管路附件阻力损失和输送管当量长度计算方法

### 2.1 阻力损失计算方法

燃气管路中弯头、三通等附件的局部阻力损失及其当量长度在许多文献书籍均有所涉及，在本文中不过多的讨论。本文重点关注燃气管路附件（含安全附件）的阻力损失，如球阀、输送管、燃气表、电磁式切断阀、管道自闭阀、燃具管等。这些配件的主要适用标准及其流量或压力损失的试验方法规定，如表1所示。

由于每种产品的标准中流量或阻力的试验方法不一致，为了充分利用相应产品在检验过程中的流量或阻力数据，本文给出了适用性更强的压力损失计算方法。由于管道流速 $v$ 均与工况流量 $q$ 成比例关系，为方便计算，局部阻力损失公式<sup>[3]-[4]</sup>如式(1)~(3)所示。

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{v^2}{2} = \xi \rho q^2 \quad (1)$$

其中：

$$\rho = \rho_0 \frac{p_1 T_0}{p_0 T_1} \quad (2)$$

$$q = \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0} q_0 \quad (3)$$

式中： $\Delta p$ ——管路附件前后压差，Pa；

$\zeta$ ——局部阻力系数；

$\rho$ ——管路内气体的工况密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$v$ ——管道内气体流速， $\text{m/s}$ ；

$\xi$ ——流量阻力系数；

$q$ ——管道内气体的工况流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$\rho_0$ ——管路内气体的标况密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$p_1$ ——进口的绝对压力， $\text{kPa}$ ；

$p_0$ ——大气的绝对压力， $\text{kPa}$ ；

$T_0$ ——标况的热力学温度， $\text{K}$ ；

$T_1$ ——进口气体的热力学温度， $\text{K}$ ；

$q_0$ ——管道内气体的标况流量， $\text{m}^3/\text{h}$ 。

式(1)可以变形为：

$$\Delta p = \xi \rho_0 \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0} q_0^2 \quad (4)$$

标准中流量或压力损失均使用空气进行试验，其涉及流量数据均为标况流量，结合测试压力和压差关系，可以计算相应阻力系数，如式(5)所示。

$$\xi_i = \frac{\Delta p_{a,i}}{\rho_a \frac{p_0 T_{1a,i}}{p_{1a,i} T_0} q_{a,i}^2} \quad (5)$$

表1 管路附件适用标准及其流量或压力损失规定

产品种类		适用标准	标准中试验方法	
			测试条件	测试结果
燃气阀门	球阀	CJ/T 180-2014《建筑用手动燃气阀门》	进口压力为2.5kPa，满足被测样品的前后压差为100Pa	额定流量
	电磁式切断阀	GB 44016-2024《电磁式燃气紧急切断阀》	进口压力为企业声明值，满足被测样品的前后压差为100Pa	
	管道自闭阀	CJ/T 447-2014《管道燃气自闭阀》	进口压力2.0kPa，满足被测样品的前后压差为300Pa	
输送管		GB/T 26002-2010《燃气输送用不锈钢波纹软管及管件》	/	/
膜式燃气表		GB/T 6968-2019《膜式燃气表》	进口压力为2.0kPa，通过被测试样品的最大流量	压力损失
燃具管		GB 41317-2024《燃气用具连接用不锈钢波纹软管》	进口压力为2.0kPa，满足被测样品的前后压差为100Pa/m	额定流量

式中:  $\zeta_i$ ——第*i*个管路附件的流量阻力系数;

$\Delta p_{a,i}$ ——第*i*个管路附件使用空气进行试验时的前后压差, Pa;

$\rho_a$ ——管路内空气的标况密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$T_{1a,i}$ ——第*i*个管路附件进口空气的热力学温度, K;

$p_{1a,i}$ ——第*i*个管路附件进口的绝对压力, kPa;

$q_{a,i}$ ——第*i*个管路附件通过的标况流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

管路附件的整体阻力损失计算公式如式(6)所示。

$$\Delta p_g = \sum_{i=1}^n \zeta_i \rho_g \frac{p_0 T_{1g}}{p_{1g} T_0} q_g^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_g p_{1a,i} T_{1g} q_g^2}{\rho_a p_{1g} T_{1a,i} q_{a,i}^2} \Delta p_{a,i} \quad (6)$$

式中:  $\Delta p_g$ ——管路附件的整体阻力损失, Pa;

$n$ ——管路附件的数量;

$\rho_g$ ——管路内燃气的标况密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$T_{1g}$ ——进口燃气的热力学温度, K;

$p_{1g}$ ——进口燃气的绝对压力, kPa;

$q_g$ ——管路附件整体通过的标况流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

根据国家标准GB 17820-2018《天然气》中规定天然气计量标准状态是温度20℃(293.15K)和压力101.325kPa(或0.101325MPa)。为方便后续统一计算,在温度20℃(293.15K)的条件下,燃气安全配件的整体阻力损失计算公式如式(7)所示。

$$\Delta p_g = \sum_{i=1}^n \frac{p_{1a,i} q_g^2}{p_{1g} q_{a,i}^2} d \Delta p_{a,i} \quad (7)$$

式中:  $d$ ——天然气12T的相对密度,取0.5548。

## 2.2 户内管路附件的阻力损失计算示例(标准中最低要求)

在此列出户内常用的燃气配件在相应标准中的额

定流量/压力损失规定,如表2所示,依此为数据,计算其压力损失,用量以4.2kW双眼灶和20kW采暖炉,用气量分别为0.89 $\text{m}^3/\text{h}$ 和2.12 $\text{m}^3/\text{h}$ ,总用气量3.01 $\text{m}^3/\text{h}$ ,当进行阻力计算时,取燃气的进口压力 $p_{1g}$ 为2.0kPa,根据表1和表2中的测试条件,进口压力 $p_{1a}$ 为2.5kPa或2.0kPa,此时 $\Delta p_g$ 的计算偏差小于0.5%,可以忽略不计。

按照公式(7)进行计算,并将计算得到的压力损失分项列在表2中。

从分项来看,管道自闭阀、燃具管、电磁阀、膜式燃气表是压力损失的主要来源。表前-灶前的压力损失合计为450Pa,表前-采暖炉前的压力损失合计为286Pa。

显然,当楼栋调压器运行在出口压力下限时(额定值的85%,2.04kPa),如果燃气管路配件的实测结果仅仅符合其产品的标准要求,加上其他如接头、管道的压力损失,灶前压力低于1600Pa,此时,灶具达不到其额定热负荷。

## 2.3 输送管的当量长度计算方法

对于输送管来说,其中国家标准GB/T 26002-2010《燃气输送用不锈钢波纹管及管件》仅对软管的最小内径做出了规定,而对其流量性能无相应技术要求。输送管在使用时一般距离较燃具管长(>2m),且波纹管的波纹状结构相当于增大了管壁粗糙度的低压燃气管道。按照《城镇燃气设计规范》中低压燃气管道摩擦阻力损失计算公式进行计算其压力损失,如式(8)。

$$\Delta p = 6.26 \times 10^7 \lambda \frac{q^2}{D^5} \rho \frac{T_1}{T_0} L \quad (8)$$

式中:  $\lambda$ ——管路的摩擦阻力系数;

表2 户内管路附件阻力损失计算示例

产品种类	口径/规格	标准规定的额定流量/压力损失	压力损失分项(Pa)	
燃气阀门	球阀(全开状态)	表前: DN15	5 $\text{m}^3/\text{h}$	20
		灶前: DN10	3 $\text{m}^3/\text{h}$	11
		采暖炉前: DN15	5 $\text{m}^3/\text{h}$	10
电磁式切断阀	表后: DN15	2.5 $\text{m}^3/\text{h}$ (厂家声明值,进口压力为2.0kPa)	80	
燃具管	灶前: DN10(2m)	0.95 $\text{m}^3/\text{h}$	97	
	采暖炉前: DN15(1m)	1.60 $\text{m}^3/\text{h}$	97	
膜式燃气表	G2.5(带切断阀,最大流量4.0 $\text{m}^3/\text{h}$ )	250Pa	79	
管道自闭阀	灶前: Z0.9	0.9 $\text{m}^3/\text{h}$	163	

$D$ ——管路内径, mm;  
 $L$ ——波纹管的长度, m。

### 3 流量-压损特性试验及阻力损失计算分析

#### 3.1 流量-压损特性试验

为了确定燃气管路配件的实测流量参数,选取每种样品5组进行流量-压损特性试验。球阀、电磁阀、燃具管和膜式表按照其对应标准中的方法进行测试,其中电磁阀的进口压力声明值为2.0kPa。对于输送管,参照燃具管的试验方法开展,进口压力为2.0kPa,分别使用空气和燃气进行试验,测定对应的摩擦阻力系数。

如图2所示,试验系统由空气储罐、流量传感器、前压控制器、压力传感器、被测设备、差压变送器、流量控制器等部分组成。其中流量传感器的量程分别为 $0\text{m}^3/\text{h}\sim 18\text{m}^3/\text{h}$ ,  $0\text{m}^3/\text{h}\sim 160\text{m}^3/\text{h}$ ,精度0.5%;前压控制误差在0.5%以内;差压变送器量程 $0\text{Pa}\sim 500\text{Pa}$ ,精度为0.2%。压力取压位置在被测阻流件上、下游5D处,为环形取压。试验介质采用空气或天然气(12T),空气密度按 $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ,天然气(12T)密度按 $0.669\text{kg}/\text{m}^3$ ;实验室温度为 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 。

球阀、电磁阀、燃具管和膜式表的试验结果如表3所示。

分别使用2m和4m的DN15输送管,气体介质分别为空气和天然气(12T),进口压力为2kPa的流量-压

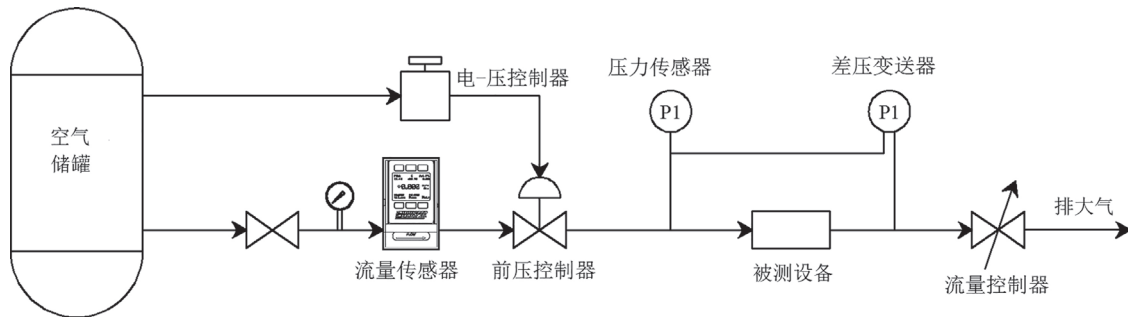


图2 燃气管路附件流量-压损测试系统图

表3 球阀、电磁阀、燃具管和膜式表的试验结果

产品种类		标称规格/尺寸	样品数量	实测额定流量 (m <sup>3</sup> /h) 或压力损失 (Pa)		
				平均值	最大值	最小值
燃气阀门	球阀	DN8 (灶前阀)	5	2.45	2.67	2.21
		DN10	5	3.62	4.19	2.88
		DN15	5	7.85	8.44	6.78
		DN25	5	32.8	36.2	22.6
	电磁切断阀	DN15	5	2.78	3.19	2.32
		DN25	5	7.49	9.81	5.59
燃具管		DN10 (1m)	5	1.40	1.92	1.16
		DN15 (1m)	5	2.94	3.31	2.57
		DN20 (1m)	5	5.62	6.67	4.40
		DN25 (1m)	5	9.80	12.89	8.43
膜式燃气表		G1.6	5	89	116	68
		G2.5	5	142	156	129
		G2.5 (带控制阀)	5	207	216	186

损特性试验结果如图3所示。

根据流量-压损的拟合结果，使用公式(8)，计算管路的摩擦阻力系数 $\lambda$ ，如表4所示。其中管道内径D取15mm。

表4 不同长度输送管的空气和天然气12T对比试验结果

试验管长度 (m)	试验介质	拟合系数	摩擦阻力系数 $\lambda$
2	空气	21.9	0.110
4		43.6	0.110
2	天然气12T	12.2	0.111
4		24.1	0.109

从实测结果来看，不同管道长度和试验介质，管路的摩擦阻力系数 $\lambda$ 的计算结果基本一致。因此，通过试验的方法确定输送管的摩擦阻力系数 $\lambda$ ，然后使

用公式(8)计算压力损失是完全可行的。

选取典型口径各5组输送管进行的流量-压损特性试验，试验介质为空气，进口压力为2kPa，输送管长度为2m，DN10、DN13的管道内径D取15mm，试验结果如图5所示。

一般地，粗糙度为0.1mm的钢管在流速在1m/s~3m/s的情况下，摩擦阻力系数 $\lambda$ 为0.04~0.05。显然，DN15~DN25的输送管的压力损失是同等长度钢管的2倍~3倍，DN13为4倍~6倍，DN10为15倍~18倍。

### 3.3 按实测值进行阻力损失计算

使用表3和表5实测流量参数的平均值，重新对示例中的户内管路附件的阻力损失进行计算，并附加在表前4m长的输送管，计算结果如表6所示。

从分项来看，输送管、管道自闭阀、电磁阀、膜式燃气表、燃具管仍然是压力损失的主要来源。表前-灶前的压力损失合计为349Pa，表前-采暖炉前的

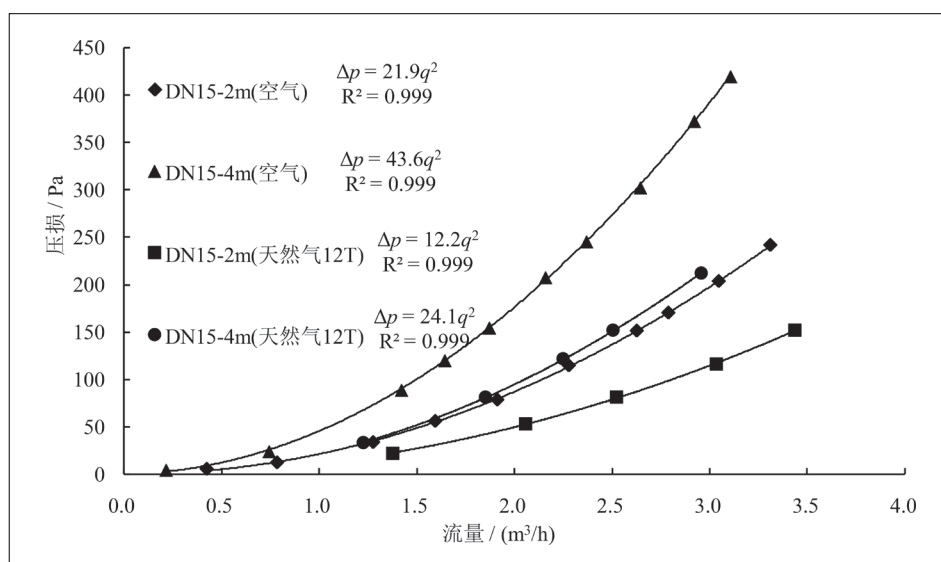


图3 输送管的空气和天然气12T的对比试验结果

表5 不同口径输送管的摩擦阻力系数 $\lambda$

产品种类	标称规格/尺寸	样品数量	摩擦阻力系数 $\lambda$		
			平均值	最大值	最小值
输送管	DN10	5	0.75	0.86	0.59
	DN13	5	0.21	0.25	0.17
	DN15	5	0.10	0.11	0.09
	DN20	5	0.10	0.11	0.09
	DN25	5	0.11	0.12	0.10

表6 户内管路附件阻力损失的计算示例对比

产品种类		口径/规格	压力损失分项 (Pa)	
			使用实测流量参数计算	使用标准最低要求计算
燃气阀门	球阀 (全开状态)	DN15 (表前阀门)	8	20
		DN10 (灶前阀门)	3	11
		DN15 (采暖炉前阀门)	4	10
	电磁切断阀	DN15	65	80
燃具管		灶前: DN10 (2m)	45	97
		采暖炉前: DN15 (1m)	29	97
膜式燃气表		G2.5 (最大流量4.0m³/h)	65	79
管道自闭阀		灶前: Z0.9	163	163
输送管		DN15: 4m	200	/

压力损失合计为177Pa，输送管的压力损失为200Pa，合计720Pa。使用最低标准要求计算比使用实测流量参数计算所得的压力损失更大，尤其是阀、燃具管等燃气安全配件的压力损失分项相差近1倍。

#### 4 结论

燃气本质安全配件的应用改变了传统的户内燃气管路设计，对安全配件开展流量-压损特性的试验研究，结合应用示例分析管路压力损失各分项组成是十分必要的。本文对户内燃气管路阻力损失结论如下：

(1) 输送管、管道自闭阀、电磁阀、燃具管是户内管路压力损失的主要来源；

(2) 燃气波纹软管较钢管具有更大的压力损失，当使用波纹软管进行燃气输送时，宜按同等长度钢管的2倍~3倍摩擦阻力损失进行水力计算。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50028-2006 城镇燃气设计规范 (2020版). 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] 李兴泉, 鞠秀峰, 田贯三. 燃气管道局部阻力的当量长度法计算[J]. 煤气与热力, 2009, 29 (6) : 9-13.
- [3] E.John Finnemore, Joseph B.Franzini. 流体力学及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 128-129.
- [4] 黄小美, 等. 燃气输配与储存[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018: 122-123.

#### 其它消息

### 天津南港两大LNG接收站持续增储 为京津冀保供蓄“气”

2024年11月11日，来自澳大利亚的一艘满载15万m³液化天然气的LNG船靠泊在北京燃气天津南港LNG接收站的LNG专用码头，LNG经气化后，最终输送到京津冀千家万户。

据了解，中国石化天然气分公司天津LNG接收站、北京燃气天津南港LNG接收站共计投产17

个储罐，总罐容346万m³液态天然气。

目前，两大接收站共储液态LNG299万m³。北京燃气天津南港LNG接收站还将在11月再投产3期2个LNG储罐，罐容44万m³，并于11月底前完成3船接卸任务，为冬季供暖提供有力支撑。

(本刊通讯员供稿)