

Optimization Study on the Structure of Pitot Tube for Gas Extraction Pipeline Flow Measurement

Weidong Zhang Liqin Qian*

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China

Abstract

The Pitot tube is one of the most commonly used tools for measuring the flow rate in gas extraction pipelines. However, traditional Pitot tubes suffer from low measurement accuracy, poor stability, and susceptibility to wear when used in gas extraction pipelines. This study focuses on the probe—the core structural component that affects the Pitot tube's disturbance to the flow field and measurement accuracy. A total of seven Pitot tubes with different probe structures were analyzed using FLUENT numerical simulation. The results indicate that, under the same flow velocity conditions, the conical probe Pitot tube exhibits superior pressure difference and stability compared to rectangular-rounded and circular probe Pitot tubes, and both the pressure difference and its stability increase as the probe's taper angle decreases. At flow velocities below 30 m/s, the conical probe Pitot tube shows better calibration coefficient consistency than the other designs, whereas at velocities exceeding 30 m/s, the circular probe Pitot tube achieves the best consistency. Considering the typical flow velocity range in gas extraction pipelines and the structural requirements for Pitot tube total pressure ports, the 15° conical probe Pitot tube is identified as the optimal solution in this study.

Keywords

Pitot tube; Gas extraction; Numerical simulation

瓦斯抽采管道测流皮托管结构优化研究

张卫东 钱利勤*

长江大学机械工程学院, 中国·湖北荆州 434023

摘要

皮托管是瓦斯抽采管道流量测量最常用的工具之一。而传统皮托管用于测量瓦斯抽采管道内部流量时,存在着精度低、稳定性差、易损耗等缺陷,本文以影响皮托管对流场的扰动程度和测量精度的核心结构-探头为研究对象,对7种具有不同探头结构的皮托管进行FLUENT数值模拟,得研究结果表明:在同一流速条件下,相对于矩形圆边和圆形探头皮托管,锥形探头皮托管的压差及其稳定性更优,且其压差及压差稳定性随偏角角度的减小而增大;在30m/s的流速条件以下,锥形探头皮托管的校准系数一致性优于矩形圆边探头与圆形探头皮托管,而当流速超过30m/s后,圆形探头皮托管的校准系数一致性则为最优。综合瓦斯抽采管道的流速范围以及对皮托管全压孔的开孔要求,15°锥形探头皮托管为本研究所得最优解。

关键词

皮托管; 瓦斯抽采; 数值模拟

1 引言

瓦斯抽采是煤矿安全高效生产的治本之策。瓦斯抽放流量检测是抽放系统中最重要的检测项目之一,也是最难检测的项目。皮托管因结构简单、携带方便等优点已成为目前人工现场测量与校验抽放管道瓦斯流量的主要工具^[1]。但测量精度低和稳定性差是皮托管在抽放管道瓦斯流量测量中公认的技术瓶颈。

传统的S型皮托管探头易受煤屑等碰撞磨损而发生结构性的改变,使得测量精度与校准系数一致性大幅度降低,测量重复性差^[2]。为解决这一问题,一些学者在皮托管的探头部位加装保护套。然而,加装了圆形保护套的皮托管探头对流场有较大扰动,“测不准”的问题依然没有解决^[3]。近几年的研究表明,探头形状和几何参数对皮托管测量精度和校准系数的稳定性有较大影响^[4-5]。但对于瓦斯抽放管道流量检测用皮托管的探头形状、开口斜度等缺乏系统研究。

【作者简介】张卫东(1996-),男,中国重庆人,硕士,从事煤炭开采装备技术研究。

【通讯作者】钱利勤,副教授,从事电动汽车锂离子电池组热管理系统的研究。

鉴于此,本文采用数值模拟与风洞试验相结合的方法,研究了不同探头结构对流场的扰动、皮托管全压孔与静压孔之间的压差和校准系数一致性的影响,依托研究结果,设计了瓦斯抽放管道流量检测用高稳定低扰动皮托管。

2 皮托管流速测量原理

皮托管测流速的原理是理想不可压缩气体下的伯努利方程，即在均匀稳定的理想流场内，同一流线上任意两点上的动能、重力势能及压力势能之和相等。其公式表述为：

$$\frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gh_A + P_A = \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho gh_B + P_B \quad (1)$$

式中： ρ ——流体的密度；

v ——流速；

g ——重力加速度；

P ——流体的压力势能；

设流动为不可压缩无粘性流体的稳定流动，驻点处速度为0，即 $v_B^2 = 0$ ，此时，该点的压力达到最大值 P_B 。在测量过程中，总、静压孔所处的高度相同，即 $h_A = h_B$ 。公式(1)可简化为：

$$v = \sqrt{\frac{2(P_B - P_A)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

在实际的测量过程中，由于受管道内流体的粘性影响以及差压 ΔP 取的不是A、B两点的压力差，而是总、静压孔之间的压力差，所以使得实际的流体流速 $v \neq \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ ，此时需要加一个系数 K 加以修正，可得：

$$v = K \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

式中： K ——皮托管的校准系数；

v ——流速，m/s；

ρ ——流体的密度，kg/m³；

ΔP ——皮托管总、静压孔间的压力差，Pa。

3 皮托管测瓦斯抽采管道流速数值模拟研究

以直径 $D_1=400\text{mm}$ 的瓦斯抽放管道为例，取管道长度 $l_1=500\text{mm}$ ，在距离管道入口250mm处安装皮托管。本文针对皮托管的不同探头结构展开研究，建立了不同探头结构的皮托管模型，皮托管直管长度 $l_2=300\text{mm}$ ，直径 $D_2=12\text{mm}$ 。

在瓦斯抽采管道的一般情况下，20℃时，取瓦斯气体密度 $\rho=0.554\text{kg/m}^3$ ，在5m/s、10m/s、20m/s、30m/s、40m/s不同入口流速条件下，研究皮托管不同探头结构对测量精度以及稳定性的影响。

3.1 探头结构对压差 ΔP 的影响

在同一流速条件下，皮托管全压孔与静压孔之间的压差越大，皮托管的精度越高，建立压差 ΔP 的目标函数研究不同探头结构对皮托管测量精度的影响。其中：

$$\Delta P = P_B(\text{总压}) - P_A(\text{静压}) \quad (4)$$

整理数值模拟结果绘制图1曲线，随着流速的不断增大，所研究皮托管全压孔与静压孔之间的压差 ΔP 均越来越大。在所设流速范围内，锥形探头、矩形圆边探头、圆形探头的压差依次降低，其中锥形探头偏角越小压差越大。

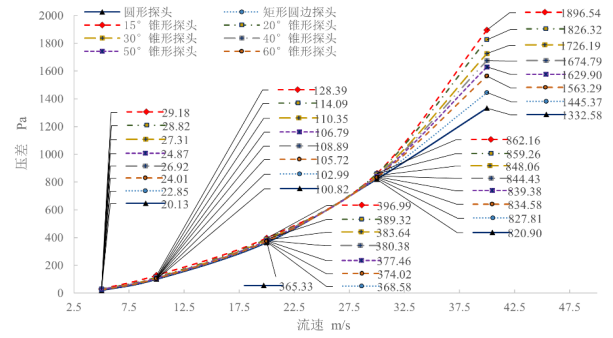


图1 皮托管探头形状对压差的影响

3.2 探头结构对压差相对稳定性系数的影响

在同一流速条件下，皮托管对流场的扰动程度通过压差相对稳定性系数 α 的大小来反映，压差相对稳定性系数 α 越大，则皮托管对流场所造成的扰动越小，测量仪器流速示值波动越小，读取数值就越能接近所测位置的真实值。其中：

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}}{\Delta P_{max} + \Delta P_{min}} \quad (5)$$

整理数值模拟结果绘制图2曲线图，随着流速的不断增大，不同探头结构的皮托管压差相对稳定性系数呈现一致下滑，说明流速越大，皮托管对流场的扰动越强。在所设流速范围内，锥形、矩形圆边、圆形探头压差相对稳定性依次降低，其中锥形探头偏角越小压差相对稳定性越好。说明在所研究的皮托管结构中，15°锥形探头对瓦斯抽采管道流场的扰动程度最小。

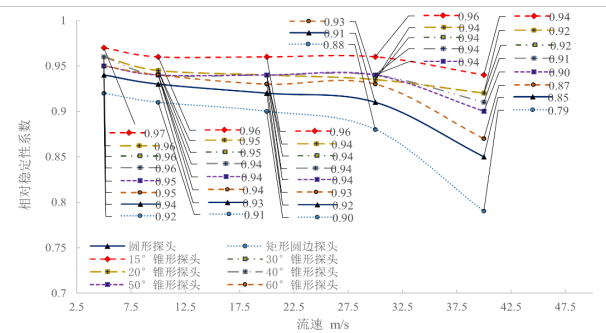


图2 皮托管探头形状对压差相对稳定性系数的影响

3.3 探头结构对皮托管校准系数一致性系数的影响

在不同流速条件下，还需要进一步保证皮托管的校准系数一致性，确保在不对测量准确性产生影响的前提下，适用于更加宽广的测速范围，建立校准系数一致性系数 β 的目标函数，越大皮托管校准系数 β 的一致性越好，越能适用于测量更宽的速度范围。其中：

$$1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K_i - \bar{K})^2} \quad (6)$$

式中： N ——同一结构所作的不同风速实验个数；

K ——皮托管校准系数;

\bar{K} ——皮托管校准系数平均值。

在所设流速范围内,所研究的7种探头结构的皮托管校准系数一致性均相对较好。在入口速度5m/s-20m/s范围内,15°-30°锥形探头校准系数一致性系数最高,为0.99;入口速度20m/s-40m/s范围内,60°锥形探头皮托管校准系数一致性最高,为0.98。

表1 皮托管探头结构对皮托管校准系数一致性系数的影响

入口速度 m/s	皮托管探头类型	校准系数	平均校准系数	校准系数一致性系数
5	圆形	0.81	0.80	0.98
10		0.80		
20		0.78		
30		0.75	0.73	0.96
40		0.70		
5	矩形圆边	0.80	0.76	0.95
10		0.76		
20		0.71		
30		0.68	0.65	0.95
40		0.61		
5	15°锥形探头	0.81	0.80	0.99
10		0.80		
20		0.79		
30		0.72	0.68	0.94
40		0.64		
5	20°锥形探头	0.82	0.81	0.99
10		0.81		
20		0.80		
30		0.71	0.68	0.95
40		0.64		
5	30°锥形探头	0.82	0.81	0.99
10		0.81		
20		0.80		
30		0.75	0.72	0.96
40		0.69		
5	40°锥形探头	0.82	0.81	0.98
10		0.82		
20		0.79		
30		0.72	0.70	0.97
40		0.68		
5	50°锥形探头	0.82	0.81	0.98
10		0.81		
20		0.79		
30		0.76	0.74	0.97
40		0.72		
5	60°锥形探头	0.82	0.81	0.98
10		0.81		
20		0.79		
30		0.75	0.74	0.98
40		0.72		

4 结论

针对现有皮托管用于测量瓦斯抽采管道内部流场压差时,存在着的精度低、稳定性差、易损耗等缺陷,本文以影响皮托管对流场的扰动程度和测量精度的核心结构-探头为研究对象,基于FLUENT数值模拟与风洞试验相结合的方法,对7种具有不同探头结构的皮托管建立了以压差、压差相对稳定性系数、校准系数一致性系数为目标函数的数值模拟研究,数值模拟结果表明:在10m/s-15m/s的瓦斯抽采管道流速范围内,相对于矩形圆边探头皮托管和圆形探头皮托管,锥形探头皮托管的压差、压差稳定性以及校准系数一致性更高,且随偏角的减小而增大,数值模拟得到15°锥形探头皮托管为最优解。主要结论如下:

(1)皮托管探头迎风正面积对皮托管测流精度和对流场的扰动程度存在较大影响,皮托管对流场的扰动程度和测量精度随迎风向正面积的减小而增大,对皮托管探头全压孔侧的外形向更小更尖方向设计,更加有利于提高皮托管的测量精度,减小皮托管对瓦斯抽采管道内部流场的扰动。

(2)皮托管校准系数一致性相关于皮托管迎风侧与背风侧正面积之比,皮托管背风面积与迎风面积之比越大,校准系数一致性越好,将皮托管的背风面向更大方向设计,将皮托管的迎风面外形向更钝方向设计,能有效提高皮托管校准系数一致性。

(3)皮托管对流场的扰动程度、测量精度和皮托管校准系数一致性之间存在相互制约的关系,减少皮托管对流场的扰动提高其测量精度会导致皮托管测量系数一致性的下滑,而要保证皮托管具有较大的测量范围,则要以牺牲皮托管的测量精度、增大对流场的扰动程度为代价。故在为所测管道选择皮托管时,要根据流速范围,在保证校准系数适用于该范围的前提下,选择具有较高精度探头结构的皮托管。综合瓦斯抽采管道流速范围以及全压孔开口要求,15°锥形探头皮托管为最优。

参考文献

- [1] 刘鹏,邹德东. 恶劣环境下矿用压差风速传感器关键技术[J]. 煤矿安全,2021,52(07):89-93.
- [2] 周伟,李刚,贾敏涛,等. 矿用局部通风机风量补给及测定组合装置研发及应用[J]. 金属矿山,2023,(07):153-158.
- [3] 李泽芳. 基于S型皮托管的矿用自校准风速传感器设计[J]. 煤炭技术,2021,40(04):137-139.
- [4] 万勇. CD3(A)型皮托管流量计在瓦斯气体输送管道中的应用[J]. 煤矿安全,2017,48(08):83-86.
- [5] 刘鹏,邹德东. 恶劣环境下矿用压差风速传感器关键技术[J]. 煤矿安全,2021,52(07):89-93.