

◀ 测井录井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021023

引用格式: 张夷非, 魏勇, 余厚全, 等. Simulation and experimental studies on the influencing factors of a thermal flowmeter with constant temperature difference[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 121-126.

ZHANG Yifei, WEI Yong, YU Houquan, et al. Simulation and experimental studies on the influencing factors of a thermal flowmeter with constant temperature difference [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2): 121-126.

## 恒温差热式流量计影响因素模拟与试验研究

张夷非<sup>1</sup>, 魏 勇<sup>1</sup>, 余厚全<sup>1</sup>, 陈 强<sup>2</sup>, 刘国权<sup>2</sup>, 张 学<sup>2</sup>

(1. 长江大学电子信息学院, 湖北荆州 434023; 2. 中国石油集团测井有限公司, 陕西西安 710077)

**摘要:** 针对恒温差热式流量计在井下测量小流量流体时误差较大的问题, 进行了温度、压力的影响研究。根据流量计加热器电功率与被测流体流量的关系, 分析了温度对液态水物性参数的影响, 通过数值模拟研究了不同温度下水流量与流量计换热功率的变化曲线。在此基础上, 搭建了可调节水温和流体流量的试验平台, 在定压(常压)条件下, 通过试验分析了25~40℃下流量计功率与水流量的关系, 试验发现, 流量计的加热器功率与环境温度成单调增关系。理论分析实测条件下恒温差热式流量计的影响因素得到: 流量计位于0~2 000 m井段时, 深度每增加500 m造成的测量误差约为 $2.2 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 位于2 000~4 000 m井段, 测量误差约为 $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。研究表明, 相同流量下, 恒温差热式流量计的输出功率会随井深增加(井筒温度、压力变化)而升高, 导致出现测量误差, 研究结果为该流量计测量结果的校正和有效应用提供了理论依据。

**关键词:** 恒温差热式流量计; 流量测量; 温度; 压力; 数值模拟; 实验室试验

中图分类号: P631.8<sup>+1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)02-0121-06

## Simulation and Experimental Studies on the Influencing Factors of a Thermal Flowmeter with Constant Temperature Difference

ZHANG Yifei<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>1</sup>, YU Houquan<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>2</sup>, LIU Guoquan<sup>2</sup>, ZHANG Xue<sup>2</sup>

(1. Electronics & Information School, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710077, China)

**Abstract:** Due to the fact that the thermal flowmeter with constant temperature difference brings large errors when measuring downhole flow in low flow-rate, the influence of temperature and pressure was studied. According to the relationship between the electric power of the flowmeter heater and the measured flow rate, the influence of temperature on the physical parameters of liquid water was analyzed, and the change curve of the heat transfer power of the flowmeter and flow rate at different temperatures was simulated numerically. An experimental platform with adjustable water temperature and flow rate was built on that basis, and the relationship between the power of the flowmeter and flow rate at 25~40℃ under constant pressure was thereby analyzed, revealing that power of the flowmeter heater increases monotonically with temperature. In terms of theoretical analysis, a 500 m increase in the well depth leads to an error of  $2.2 \text{ m}^3/\text{d}$  when the flowmeter is in the depth from 0 to 2 000 m; while the error is  $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$  when it is in the depth from 2 000 to 4 000 m. The results showed that output power of the thermal flowmeter with constant temperature difference will increase with the increase of well depth (wellbore temperature, pressure change), resulting in measurement errors, which provides a theoretical basis for the correction and effective application of the flowmeter measurement results.

**Key words:** thermal flowmeter with constant temperature difference; flow measurement; temperature; pressure; numerical simulation; laboratory test

随着石油开采技术的发展, 对井下流量测量的要求越来越高。特别是, 井下低流量(流量小于 $5 \text{ m}^3/\text{d}$ )

的检测一直是难点。相关的测量方法中, 热式质量流量计启动流量小、测量精度高, 认为是测量井下

收稿日期: 2020-11-02; 改回日期: 2021-01-26。

作者简介: 张夷非(1994—), 男, 湖北荆州人, 2018年毕业于长江大学测控技术与仪器专业, 电子与通信工程专业在读硕士研究生, 主要进行测井电子仪器与信息处理研究。E-mail: 201872340@yangtzeu.edu.cn。

通信作者: 魏勇, weiyong@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“多维高精度成像测井系列”(编号: 2017ZX05019001)资助。

微小流量的最佳方法。

目前,热式质量流量计通常用于检测气体流量<sup>[1-2]</sup>,将其用于测量井下液相流量方面的研究国内尚不多见;而且,目相关研究主要集中在恒功率热式流量计方面<sup>[3-5]</sup>。与恒功率热式流量计相比,恒温差热式流量计功耗低、响应速度快,不仅适合于低流量测量,而且其加热器对被测流体所在环境温度影响小,特别适合阵列化检测结构。不过,由热式流量计测量原理可知,被测流体的物性参数会随流体温度变化而改变,从而影响流量计的输出(恒温差模式下,会影响加热功率;恒功率模式下,会影响反映温差的输出电压),导致计量误差较大<sup>[6]</sup>。实际应用中,不同深度的井段井温不同,井下环境各异,应用恒温差热式流量计时需考虑井下被测流体温度的变化对测量结果的影响,对其测量结果进行温度校正。

目前,仅有学者研究了热式气体流量计的温度校正算法,并取得了较好的补偿效果<sup>[6-7]</sup>。为此,笔者以水作为测量流体,分析了温度对液体物性参数的影响,研究了温度对恒温差热式流量计测量结果的影响规律,通过数值模拟分析了井下不同深度处温度、压力对恒温差热式流量计测量结果的影响,为井下恒温差热式流量计测量结果的温度、压力校正提供了理论和试验依据。

## 1 恒温差热式流量计测量原理

热式流量计测量的物理基础是热传递。根据传热学知识,热式流量计测量时加热源和流体的热量交换以强迫对流传热为主。流体流动时,强迫对流传热从加热源表面带走的热流量可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$\Phi_f = hA(t_h - t_e) \quad (1)$$

式中: $\Phi_f$ 为强迫对流传热从加热源表面带走的热流量,W; $h$ 为强迫对流平均传热系数,W/(m<sup>2</sup>·°C); $A$ 为加热源换热表面积,m<sup>2</sup>; $t_h$ 和 $t_e$ 分别为加热源和流体所在环境的温度,°C。

对于长度为 $l$ 、直径为 $d$ 的热线式加热源,表面积可表示为:

$$A = \pi l d \quad (2)$$

为了确定换热系数与流体物性参数的关系,引入了努塞尔数( $N_u$ )、普朗特数( $P_r$ )和雷诺数( $Re$ )等3个热力学参数,其表达式分别为:

$$N_u = \frac{hd}{\lambda_f} \quad (3)$$

$$P_r = \frac{\eta C_p}{\lambda_f} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (5)$$

式中: $\lambda_f$ 为被测流体的热导率,W/(m·°C); $\eta$ 为流体的动力黏度,Pa·s; $C_p$ 为流体定压比热容,J/(kg·°C); $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $v$ 为流体速度,m/s。

当流体流动时,可忽略自然对流换热传热的影响,则加热源产生的热流量 $H$ 等于强迫对流流体带走的热流量 $\Phi_f$ 。此时,式(1)可写为:

$$H = \pi l \lambda_f N_u (t_h - t_e) \quad (6)$$

式(6)中,努塞尔数 $N_u$ 是表示对流换热强烈程度的参数。学者们对其进行过深入研究,并提出了一些对流换热公式,也在很多场合进行了应用。根据 H. A. Kramers<sup>[8]</sup>给出的对流换热公式,在一定条件下 $N_u$ 可以表示为:

$$N_u = 0.42 P_r^{0.2} + 0.57 P_r^{0.33} Re^{0.5} \quad (7)$$

式(7)中,与流速成正比的雷诺数 $Re$ 的指数会随流体流速变化而发生变化,0.5仅在一定条件下适用。一般情况下, $Re$ 的指数用 $m$ 代替。因此,综合式(2)—式(7)可以得到:

$$H = \pi l \lambda_f (t_h - t_e) \left[ 0.42 P_r^{0.2} + 0.57 P_r^{0.33} \left( \frac{\rho v d}{\eta} \right)^m \right] \quad (8)$$

令 $A_c = 0.42 \pi l \lambda_f P_r^{0.2}$ , $B_c = 0.57 \pi l \lambda_f P_r^{0.33} (\rho d / \eta)^m$ ,并为了便于表示,将式(8)中各物性参数统一为 $A_c$ 和 $B_c$ ,则式(8)可简化为:

$$H = (A_c + B_c v^m) (t_h - t_e) \quad (9)$$

在常压(1标准大气压)下,对于给定的加热源和确定的流体温度, $A_c$ 和 $B_c$ 反映此时被测流体热导率、普朗特数等物性参数的综合计算结果,可以视为常量。根据式(9),若保持 $t_h - t_e$ 不变,加热源维持温差恒定所产生的热流量 $H$ 与流体流速 $v$ 存在唯一且单调的关系,用这种通过维持温差恒定测量加热源产生的热流量来计算流体流量的方法被称为恒温差法。

根据上述原理,恒温差热式流量计采用了2个相同的温度传感器(一个作为测温探头,测量流体的环境温度;另一个与加热器集成在一起作为测速探头,测量加热器温度)。考虑导热传热对测量有影响,测速探头采用隔热陶瓷,以减少加热器沿探头的热传导。测量时,将测温探头放置在流体的上游,测量流体环境温度;将测速探头放置在流体的下游,测量加热器的温度(见图1)。

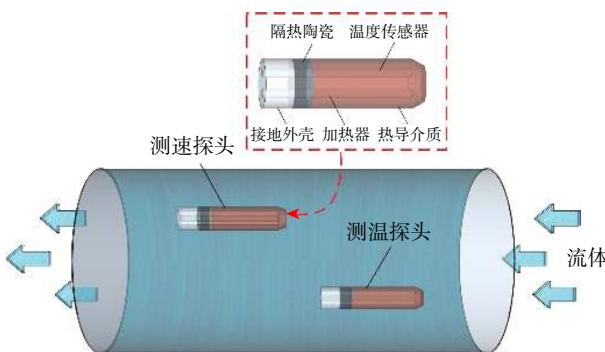


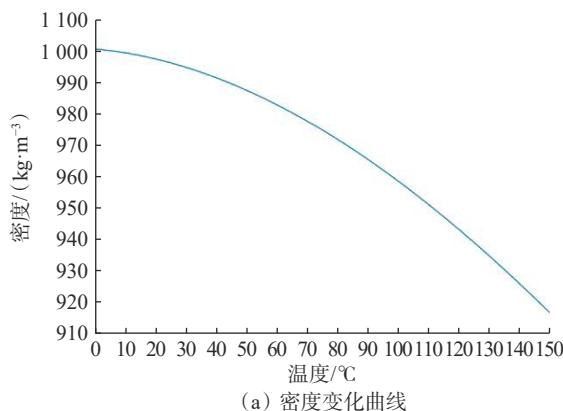
图 1 恒温差热式流量计的测量原理示意

Fig.1 Principle of the thermal flowmeter with constant temperature difference

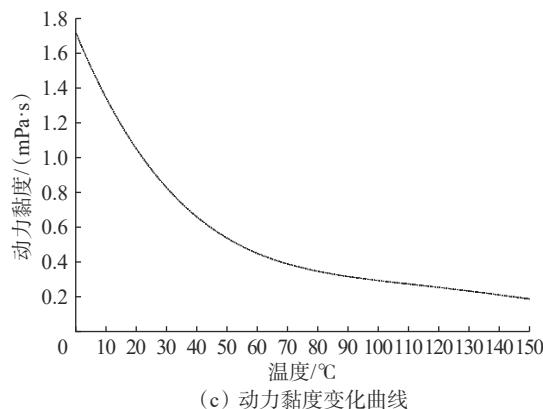
电路工作时, 测速探头加热器接通电源加热, 加热器产生的热流量  $H$  与加热器的功率  $P$  相关<sup>[9]</sup>。在热平衡状态下, 式(9)可改写为:

$$P = k(A_c + B_c v^m)(t_h - t_e) \quad (10)$$

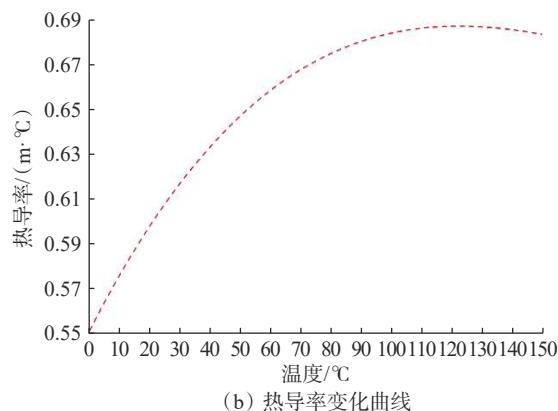
式中:  $k$  为加热器功率因数。



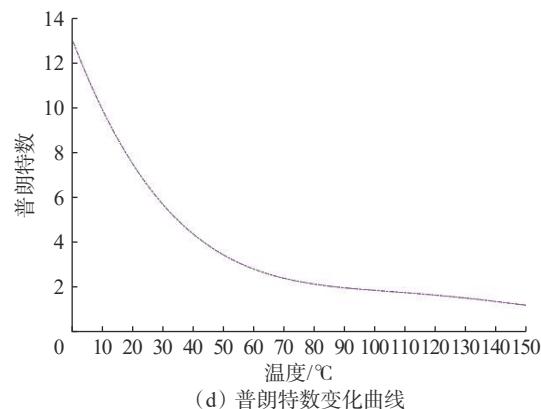
(a) 密度变化曲线



(c) 动力黏度变化曲线



(b) 热导率变化曲线



(d) 普朗特数变化曲线

图 2 0~150 °C 温度下水的物性参数变化曲线

Fig.2 Change curves of physical parameters of water at 0–150 °C

从图 2 可以看出, 当水温由 0 °C 升高至 150 °C 时, 水的物性参数随之变化, 在低温区域(<90 °C)变

化尤为显著。由式(11)可知, 物性参数的改变会导致恒温差热式流量计测量结果变化。

## 2 定压条件下温度对流量计的影响

通过数值模拟和室内试验方式, 分析了常压(1 标准大气压)条件下温度对恒温差热式流量计测量结果的影响情况。

### 2.1 模拟分析

#### 2.1.1 流体温度

由式(8)和式(9)可见,  $A_c$  和  $B_c$  由加热源结构和被测流体物性参数所决定, 是流体的普朗特系数  $P_r$ 、密度  $\rho$ 、热导率  $\lambda_f$  和动力黏度  $\eta$  的函数。由于这些参数会随流体温度变化而变化, 当流体温度发生变化时, 式(10)可改写为:

$$P(t_e) = k[A_c(t_e) + B_c(t_e)v^m](t_h - t_e) \quad (11)$$

因此, 在不同流体温度下, 同样流速的流体会对应不同的输出功率。

根据常压下水的物性参数<sup>[10]</sup>, 可得到水温从 0 °C 升高至 150 °C 时  $P_r$ 、 $\rho$ 、 $\lambda_f$  和  $\eta$  的变化曲线(见图 2)。

### 2.1.2 环境温度

为分析环境温度对强迫对流换热功率的影响, 设加热器为长度 6.4 cm、直径 0.8 cm 的圆柱体, 理想情况下加热器功率因数  $k=1.0$ , 流速指数  $m=0.5$ , 在温差维持 0.5 °C 条件下, 根据式(11)和图 2 所示物性参数, 利用数值模拟法, 分析了环境温度分别为 25, 30, 35 和 40 °C 时水流量与换热功率的关系, 结果如图 3 所示。

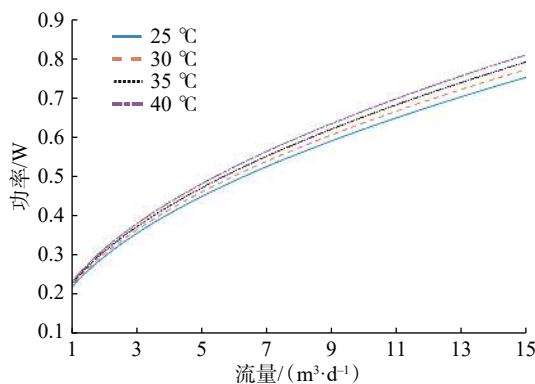


图 3 水流量与换热功率的关系

Fig.3 Relationship between heat transfer power and flow rate

由图 3 可知: 环境温度变化会对反映流速的换热功率产生显著影响; 相同流速条件下, 液体换热功率随着温度升高而增大, 主要原因是空气的动力黏度随温度升高而增大, 而水的动力黏度随温度升高而降低。模拟结果表明, 相同流量下, 恒温差热式流量计的测量结果会随环境温度升高而增大。

## 2.2 试验分析

### 2.2.1 试验平台

基于恒温差热式流量计的理论模型, 为进行等梯度温度试验、验证不同环境温度下流体流速与加热器功率的关系, 搭建了试验平台(见图 4)。标准流量计用来测量流体的实际流量, 并与热式流量计输出信号进行比较; 水泵用于调节实际流量, 最大扬程 6 m, 最大流量 960 L/h; 恒温加热系统由加热带、温度控制器和显示屏组成, 将流体温度控制在设定温度, 误差不超过  $\pm 0.1$  °C; 模拟井筒直径 124.0 mm, 进水口与恒温加热系统相连, 出水口与蓄水箱相连, 在水泵的驱动下, 流体在蓄水箱和模拟井筒中循环, 模拟井筒中流体自下而上的流动状况。

试验的温差采集和恒温差控制方案如图 5 所示。其中, 测温探头用于测量流体环境温度, 测速探头用于测量加热器的温度, 均与电路系统相连, 电路系统最终将测量结果上传至主机显示、保存。

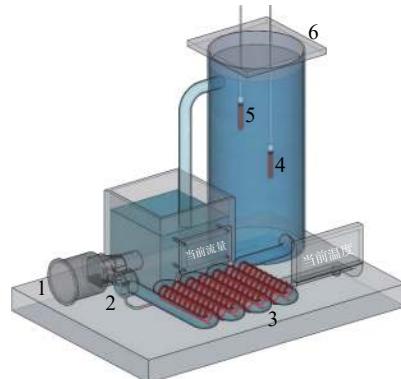


图 4 恒温差热式流量计试验平台

Fig.4 Experimental platform for thermal flowmeter with constant temperature difference

1.水泵; 2.标准涡轮流量计; 3.恒温加热系统; 4.测温探头;  
5.测速探头; 6.模拟井筒

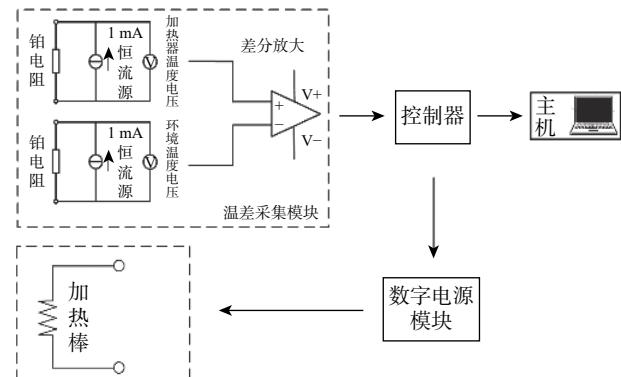


图 5 温差采集和恒温差控制方案示意

Fig.5 Temperature difference acquisition and control scheme of constant temperature difference

测量控制系统的基本技术指标: 1) 恒温差数据采集模块采样间隔为 500 ms, 采集的温差电压精度为 1  $\mu$ V, 温度分辨率可达 0.01 °C; 2) 数字电源模块最大输出电压为 4.8 V, 调整最小幅度单位为 0.1 mV, 输出最大功率为 1 W。

### 2.2.2 试验方式及结果

等梯度温度试验中, 进行每组试验时保持环境温度不变, 流量以  $1 \text{ m}^3/\text{d}$  为增量, 依次获得  $1 \sim 15 \text{ m}^3/\text{d}$  的标准流量。每个标准流量下, 自动调节加热器功率, 使测温探头与测速探头的温差维持稳定(两温度传感器温差电压保持在 2 mV, 偏差不超过  $\pm 0.1$  mV), 记录温差稳定后加热器的功率。

按照上述试验方式, 依次测量环境温度分别为 25, 30, 35 和 40 °C 时, 不同流量下加热器的功率, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 1) 流量相同条件下, 环境温度升

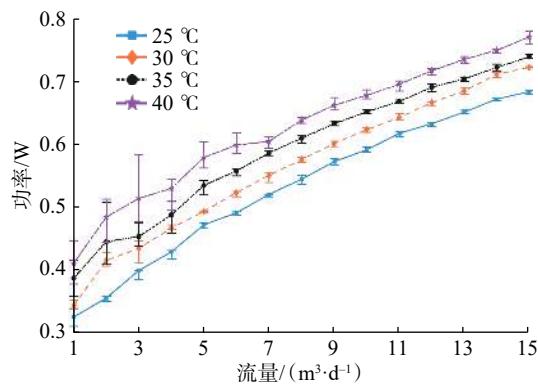


图6 不同环境温度下加热功率与流量的关系

Fig. 6 Relationship between heating power and flow rate at different ambient temperatures

高,会导致恒温差热式流量计的输出功率显著提高,这与数值模拟结果基本一致;2)相对于数值模拟结果,试验结果受环境温度的影响更大,低流量( $<5 \text{ m}^3/\text{d}$ )时受到的影响更大。分析认为,试验结果受环境温度影响较大的原因是:数值模拟仅考虑了强迫对流换热,忽略了其他形式的换热;实际情况是,其他形式换热也不同程度地存在;另外,流量低时井筒内的流体循环速度变慢,维持井筒流体恒温系统的温度调整会呈现较大幅度的延时,导致井筒流体环境温度在设定温度上下发生较大波动,进而影响测量结果。

### 3 实测条件下流量计的影响因素分析

实际测量时,恒温差热式流量计要下入到井中,随着垂深增深,井筒中的温度和压力均会升高,流体的物性参数也会受到温度和压力的综合影响,进而影响流量计的测量结果<sup>[11-12]</sup>。由于条件所限,暂时无法开展现场试验研究,因此只进行了理论分析。

井下特定深度的温度和压力与垂深之间存在线性递增关系,为了研究不同垂深时井筒温度和压力对恒温差热式流量计测量结果的影响,将式(11)改为如下形式:

$$P(D) = k[A_c(D) + B_c(D)v^m](t_h - t_e) \quad (12)$$

式中: $D$ 为油井的垂深, m。

取井深温度梯度为 $3.0 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 压力梯度为 $784 \text{ kPa}/100\text{m}$ , 根据文献[10], 参考温度和表压力, 计算得到不同垂深下水的物性参数(见表1), 并代入式(12), 得到不同垂深下水的流量与加热功率的关系, 结果如图7所示。

表1 不同井深条件下水的物性参数

Table 1 Physical parameters of water at different well depths

井深/ m	温度/ °C	表压力/ MPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W·(m·K) <sup>-1</sup> )	动力黏度/ (Pa·s)	普朗 特数
0	25	0	997.05	0.6072	0.890	6.13022
500	40	3.92	993.93	0.6324	0.653	4.30672
1 000	55	7.84	989.09	0.6530	0.506	3.22393
1 500	70	11.76	982.89	0.6689	0.407	2.53224
2 000	85	15.68	975.57	0.6809	0.338	2.06545
2 500	100	19.60	967.30	0.6898	0.287	1.73663
3 000	115	23.52	958.21	0.6961	0.249	1.49699
3 500	130	27.44	948.39	0.7004	0.220	1.31757
4 000	145	31.36	937.90	0.7030	0.197	1.18040

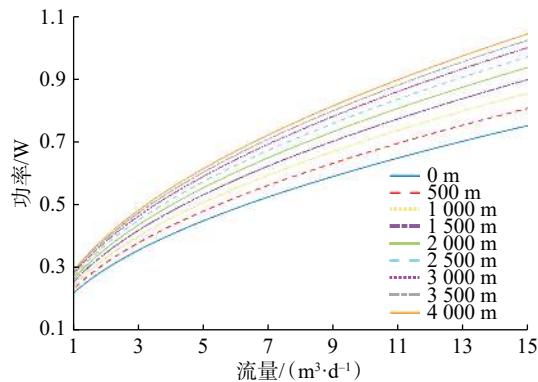


图7 不同垂深下水的流量与加热功率的关系

Fig. 7 Relationship of water flow rate and heating power at different well depths

由图7可知:1)相同流量条件下,垂深增加,温度和压力同步升高,恒温差热式流量计的输出功率也相应升高,表明井筒温度、压力同步升高导致测量误差增大;2)相同流量条件下,尽管随着温度和压力同步升高,恒温差热式流量计的输出功率升高,但升高的幅度逐步减小。垂深0~2 000 m井段,垂深变化对恒温差热式流量计的输出功率影响很大;而在垂深2 000~4 000 m井段,垂深变化对输出功率影响较小。换言之,若恒温差热式流量计的输出功率为0.5 W,在垂深2 000~4 000 m井段对应最大的流量误差约为 $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$ ,在垂深0~2 000 m井段对应最大的流量误差却达到 $2.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其原因在于:垂深较浅的井段,温度、压力都比较低,此垂深下温度和压力变化引起的物性参数变化率高,变化趋势快,对恒温差热式流量计输出功率影响大;而垂深较深的井段,温度一般在 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,对应的物

性参数 $P_r$ 、 $\lambda_f$ 和 $\eta$ 的变化较小,且 $\rho$ 会随温度升高降低、随压力升高而升高,因此总的变化趋势相对平缓,对流量计输出功率的影响减小。

## 4 结论与建议

1)井筒温度和压力的变化会影响恒温差热式流量计的输出功率。在相同流量下,恒温差热式流量计的输出功率会随垂深增加而升高;在垂深浅的井段,温度和压力对该流量计输出功率的影响较大,垂深深井段的影响相对减小。

2)为了获得相对准确的流量检测结果,要对恒温差热式流量计的测量结果进行温度和压力校正,特别是需要校对垂深较浅井段的测量结果。

3)建议通过现场试验获取更全面的数据,分析不同垂深条件下、恒温差热式流量计不同流量下的输出功率,建立可靠的校正图版或网络,以对实测数据进行深度校正,从而获得更准确的测量结果。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 汪余景,翟军勇.基于恒温差的热式空气流量计[J].*仪表技术与传感器*,2017(6):41–43.  
WANG Yujing, ZHAI Junyong. Thermal air flow meter based on constant temperature difference[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(6): 41–43.
- [2] 朱小会,袁玉霞,吴紫君.基于ARM的热式空气流量计的设计[J].*仪表技术与传感器*,2019(10):54–56,60.  
ZHU Xiaohui, YUAN Yuxia, WU Zijun. Design of thermal air flowmeter based on ARM[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(10): 54–56, 60.
- [3] 宋纯高,刘晓磊,王延军,等.井下热式流量计设计与实验研究[J].*石油仪器*,2014,28(3):10–12.  
SONG Chungao, LIU Xiaolei, WANG Yanjun, et al. Design and experimental study of downhole thermal flowmeter[J]. *Petroleum Instruments*, 2014, 28(3): 10–12.
- [4] 姜兆宇,杨韵桐,刘兴斌,等.热式质量流量计测量井下液相流量的探索研究[J].*自动化技术与应用*,2014,33(10):75–77.  
JIANG Zhaoyu, YANG Yuntong, LIU Xingbin, et al. Exploration and study of downhole thermal mass flow measurement of liquid flow[J]. *Techniques of Automation & Applications*, 2014, 33(10): 75–77.
- [5] 汪栋良,余厚全,杨旭辉,等.井下恒功率热式流量计设计与实现[J].*石油管材与仪器*,2018,4(2):20–23.  
WANG Dongliang, YU Houquan, YANG Xuhui, et al. Design and implementation of downhole constant power thermal flowmeter[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2018, 4(2): 20–23.
- [6] 张世荣.热式气体质量流量测量及补偿算法研究[D].武汉:华中科技大学,2007.  
ZHANG Shirong. Research on thermal gas mass flowmeter and compensation arithmetics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [7] 顾宇,叶寒生,冯超,等.一种恒功率热式气体流量计温度补偿实现[J].*仪表技术与传感器*,2015(10):38–39,42.  
GU Yu, YE Hansheng, FENG Chao, et al. Temperature compensation for constant power thermal gas flowmeter[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(10): 38–39, 42.
- [8] KRAMERS H A. Heat transfer from spheres to flowing media[J]. *Physica*, 1946, 12(2/3): 61–80.
- [9] 罗晶,陈平.热式质量流量计测量电路设计[J].*仪表技术与传感器*,2004(10):29–30.  
LUO Jing, CHEN Ping. Measurement circuit design of thermal mass flowmeter[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004(10): 29–30.
- [10] W 瓦格纳,A 克鲁泽.水和蒸汽的性质[M].项红卫,译.北京:科学出版社,2003: 262–280.  
WAGNER W, KRUSE A. Properties of water and steam[M]. Translated by XIANG Hongwei. Beijing: Science Press, 2003: 262–280.
- [11] 魏勇,余厚全,戴家才,等.基于CPW的油水两相流持水率检测方法研究[J].*仪器仪表学报*,2017,38(6):1506–1515.  
WEI Yong, YU Houquan, DAI Jiacai, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(6): 1506–1515.
- [12] WEI Yong, YU Houquan, CHEN Qiang, et al. A novel conical spiral transmission line sensor-array water holdup detection tool achieving full scale and low error measurement[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4140.

[ 编辑 令文学 ]