

基于运行数据的溴化锂烟气余热吸收式热泵COP影响因素分析与预测模型研究

任举卫¹, 杨 艳¹, 杨济宁²

1. 青岛能源集团有限公司; 2. 泰能天然气有限公司

摘 要: 本研究以某燃气供热站内溴化锂烟气余热吸收式热泵系统为研究对象, 基于2023年—2024年及2024年—2025年两个供热季的运行监测数据, 系统评估了热泵系统的实际运行性能。结果表明, 该系统在两个供热季中均表现出较高的综合能效水平。进一步地, 本文对影响热泵性能系数(COP)的关键运行参数——热泵烟气温差与供回水温差进行了量化分析, 明确了热泵COP与烟气温差之间呈正相关关系, 而与供回水温差之间呈负相关关系。基于上述分析, 成功构建了以烟气温差与供回水温差为输入参数的热泵COP预测回归模型。本研究结果对指导供热站运行策略优化、提升系统能效水平及实现精准节能调控具有重要的工程应用价值。

关键词: 燃气锅炉; 溴化锂烟气余热吸收式热泵; 余热回收; 性能系数(COP); 运行特性; 回归模型; 预测

Analysis of Influencing Factors and Research on Prediction Model for COP of Lithium Bromide Absorption Heat Pump for Flue Gas Waste Heat Based on Operating Data

REN Juwei¹, YANG Yan¹, YANG Jining²

1. Qingdao Energy Group Co., Ltd.; 2. Taineng Natural Gas Co., Ltd.

Abstract: This paper evaluated the actual operating performance of the lithium bromide absorption heat pump system for flue gas waste heat in a gas heating station based on the operation monitoring data of two heating seasons of 2023–2024 and 2024–2025. The results indicate that the system demonstrates a high comprehensive energy efficiency level in both heating seasons. Furthermore, this paper quantitatively analyzed the key operating parameters influencing the coefficient of performance (COP) of the heat pump, namely the flue gas temperature difference of the heat pump and the temperature difference between supply and return water. The analysis clarifies that the COP of the heat pump shows a positive correlation with the flue gas temperature difference and a negative correlation with the temperature difference between supply and return water. Based on the above analysis, this paper successfully constructed a prediction regression model for the COP of the heat pump using the flue gas temperature difference and the temperature difference between supply and return water as input parameters. The results have important engineering application value for guiding the optimization of the operating strategy of the heating station, improving the energy efficiency level of the system, and achieving precise energy-saving regulation.

Keywords: gas boiler; lithium bromide absorption heat pump for flue gas waste heat; waste heat recovery; coefficient of performance (COP); operating characteristic; regression model; prediction

1 研究背景

作为集中供热与工业用热系统的核心设备,

燃气锅炉的运行能耗水平直接决定了整个供热系统的经济性能与环保效益。在将燃气、水、电等能源转化为热能的过程中, 燃气锅炉所排放的高温烟气

[第一作者简介] 任举卫, 工程师, 从事城市燃气管理及综合能源供应研究工作。

会携带大量热量,主要包括排烟显热损失与潜热损失,以及通常可忽略不计的散热损失。理论分析表明,烟气温度越高,其排烟显热损失越大,且该部分损失构成锅炉主要热损失;潜热损失则指烟气中所含水蒸气在温度降至露点以下冷凝时所释放的热量。研究表明,每标准立方米天然气燃烧约产生1.55kg水蒸气,其汽化潜热约为3 700kJ/Nm³,相当于天然气低位发热量的10%以上^[1]。目前,在大型燃气锅炉系统中加装烟气余热回收装置,已成为回收烟气中显热与潜热、提升锅炉运行效率、降低能源消耗与减少碳排放的关键技术路径。

溴化锂烟气余热吸收式热泵(以下简称“热泵”)作为1种高效的余热回收设备,其基本原理是通过消耗高品位驱动热源(如燃气、电能、蒸汽或高温热水),将低品位的烟气余热提升为中高品位的可用热能,从而实现“低品位余热向高品位可用热”的转换。该过程中,热泵的性能系数(Coefficient of Performance,简称热泵COP,定义为系统有效输出热量与输入驱动热量之比)的稳定性,是保障系统节能效果、运行平稳性与经济性的关键因素。本文基于燃气锅炉及溴化锂烟气余热吸收式热泵的运行监测数据,构建了热泵COP的二元预测模型,量化了热泵烟气温差与供回水温差对热泵COP的影响关系,成功实现了基于可观测量(热泵烟气温差、供回水温差)的热泵COP预测。该模型对指导供热站运行调控、提升系统整体能效、实现精准节能具有重要的工程实践价值。

2 研究内容与技术路线

本研究基于某燃气供热站2023年—2024年及2024年—2025年两个供热季的运行监测数据,通过采集制热量与耗气量等关键参数,计算出热泵COP,并对热泵烟气温差与供回水温差等变量进行相关性分析,进而探究热泵COP与上述运行参数之间的内在关联。在此基础上,依据散点图的回归特征,构建以热泵烟气温差和供回水温差为自变量的热泵COP多元预测模型,确定模型的耦合系数,并利用实测数据对模型进行拟合验证。进一步通过变量贡献度分析,明确各影响因素的作用强度,最终

实现该模型对实际生产过程中关键运行参数的指导与预测功能。

3 系统概况与研究方法

3.1 实测运行数据分析

为分析系统性能,将全天24h划分为6个时段,每段时长为4h。采用瞬时值替代法计算各时段内锅炉及热泵的制热量与耗气量,并逐级累计得出日数据及整个供热季的总数据,具体结果如表1所示。

表1 系统生产运行数据

机组		2023年—2024年供热季		2024年—2025年供热季	
		制热量 (万GJ)	耗气量 (万m ³)	制热量 (万GJ)	耗气量 (万m ³)
1#机组	燃气锅炉	29.57	876.13	26.81	794.35
	热泵	11.07	209.70	11.08	193.24
2#机组	燃气锅炉	25.48	754.74	26.26	777.88
	热泵	11.76	207.22	10.32	214.06
3#机组	燃气锅炉	36.22	1 072.92	26.19	775.74
	热泵	14.06	276.89	11.71	231.00
4#机组	燃气锅炉	18.25	540.79	17.99	533.06
	热泵	9.06	215.22	9.72	196.06
合 计		155.47	4 153.61	140.08	3 715.39

基于实测数据,将驱动系统运行所需的外界天然气耗能定义为驱动热能($Q_{\text{驱动}}$),热泵实际输出的热量定义为有效热能($Q_{\text{有效}}$),则热泵供热季系统的综合性能系数(COP)可按以下公式进行计算:

$$COP_{\text{实际}} = \frac{Q_{\text{有效}}}{Q_{\text{驱动}}} \quad (1)$$

式中: $COP_{\text{实际}}$ 为系统综合性能系数; $Q_{\text{有效}}$ 为热泵有效输出热量,GJ; $Q_{\text{驱动}}$ 为驱动燃料消耗量×燃料热值,GJ,燃气热值取8 500kcal/m³。

3.2 热泵系统综合COP特性分析

对4台机组在连续两个供热季内的日运行负荷波动情况进行了离散分析。分析结果表明,数值越大,表明热泵运行负荷的波动幅度越大,热泵COP越低;反之,数值越小,则热泵COP越高,具体数据列于表2。在2023年—2024年供热季期间,4#机组有96.90%的运行时间处于75%负荷水平以下。在此低负荷区间,若运行波动加剧,将导致系统辅助

能耗占比显著上升，同时伴随传热条件恶化、溶液循环失衡等一系列问题，致使系统整体能源利用率明显下降。

表2 热泵COP及运行负荷离散情况表

供热季	参数类别	1#机组	2#机组	3#机组	4#机组
2023年—2024年 供热季	热泵COP	1.48	1.60	1.43	1.18
	负荷标准差	139.77	127.08	174.88	203.86
2024年—2025年 供热季	热泵COP	1.61	1.36	1.43	1.39
	负荷标准差	88.72	103.49	94.41	180.97

4 热泵COP预测模型建立

4.1 热泵COP影响因素

本研究以溴化锂烟气余热吸收式热泵为对象，其影响因素可归纳为烟气侧参数、热泵系统自身特性及用户侧运行条件3大类，具体分类情况如表3所示。

在本研究中，假设蒸发器与冷凝器的换热面积保持恒定；烟气酸碱度正常、烟尘含量及结垢状况良好，溴化锂溶液无结晶，其温度与浓度在正常范围内；同时，烟气流量、溴化锂循环量以及热泵系统的供回水流量均保持稳定，且溴化锂溶液的浓度与温度均处于正常运行范围之内。基于上述条件，本文重点记录了烟气温度、排烟温度、产热负荷

以及供回水温度等关键参数。研究旨在深入分析热泵COP与热泵烟气温差与热泵供回水温差之间的相关性，并据此构建相应的预测模型。

4.2 影响因素量化分析

绘制热泵烟气温差与热泵COP关系的散点图，如图1所示。

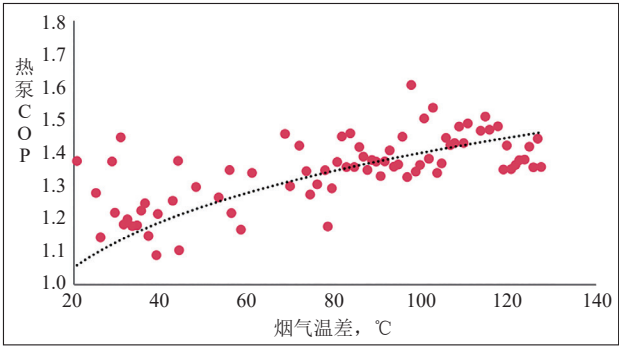


图1 热泵烟气温差和热泵COP散点图

随着热泵烟气温差的增大，热泵COP开始升高得比较快，然后上升得比较平缓。数据表明，烟气温差每增加5℃，COP的平均增幅由0.04逐渐减小至0.01，反映出系统性能随温差变化的非线性特征。在较大烟气温差条件下，烟气向溴化锂溶液的热量传递效率显著提高，从而加速溶液升温至沸腾状态，促进水蒸气与浓溶液的高效分离。水蒸气分

表3 热泵COP影响因素

分类	影响因素	影响趋势
烟气侧参数 ^[2]	烟气温度高低	在系统设计限定的温度区间内，烟气温度与热泵COP呈正相关关系，即烟气温度越高，热泵COP数值越大。
	温度稳定性（负荷稳定性）	烟气温度的稳定运行是热泵COP维持在较高水平的重要保障，波动的温度条件会导致COP值出现显著起伏。
	烟气流量	烟气流量存在最优区间，流量过低时，系统驱动热量供给不足；流量过高则会造成换热过程不充分，同时增加驱动电耗，最终导致热泵COP下降。
	烟气酸碱度	烟气中含有的SO _x 、NO _x 等酸性组分，在接触水汽后易形成强腐蚀性酸性介质，该介质会对蒸发器造成腐蚀损伤，削弱换热效率，间接导致热泵COP降低。
热泵自身特性 ^[3]	烟尘和结垢	烟气中的烟尘、油雾等颗粒物易在蒸发器表面附着并形成污垢层，这一过程会增大传热热阻，降低蒸发温度，使系统能耗增加，最终造成热泵COP急剧下降。
	蒸发器和冷凝器换热面积	经优化设计的蒸发器与冷凝器，其换热面积的增大可有效减小传热温差，通过提升蒸发温度、降低冷凝温度的协同作用，实现热泵COP的显著提高。
	溴化锂溶液浓度及循环量	溴化锂溶液的浓度直接决定其水蒸气吸收能力，是保障系统循环高效运行的核心参数；溶液循环量需与发生器、吸收器的负荷实现精确匹配，该匹配度直接影响系统热量转化效率，进而作用于热泵COP。
	溴化锂溶液洁净度（无结晶析出）及温度	溴化锂溶液需维持良好的洁净度，避免因浓度过高或温度过低导致结晶析出，同时需防止空气进入系统引发溶液酸性增强，以规避结晶和腐蚀问题对热泵COP的不利影响。
用户侧运行条件 ^[2]	热泵回水温度	热泵回水温度与热泵COP呈负相关关系，即回水温度越大，热泵COP越低；反之，温度越低，热泵COP越高。
	热泵供水温度	热泵供水温度通过改变系统传热温差影响热泵COP，供水温度升高会增大冷凝压力与温度，导致热泵COP呈下降趋势，具体变化规律与系统工况密切相关。
	热泵供回水流量	在供回水温差保持不变的条件下，供回水流量的变化直接反映用户侧用热需求的波动，该波动通过影响系统换热效率与负荷匹配度，间接作用于热泵COP。

离程度的提升,增强了其在冷凝过程中所释放的潜热量,进而提高了系统最终可用的制热量(如用于供暖的热水产出),直接推动热泵COP的上升。随着烟气温差进一步加大,然而受限于溴化锂溶液的沸点(通常介于120℃–150℃,具体随溶液浓度变化)以及机组换热材料的耐热性能,热泵COP的上升趋势逐渐趋于平缓。

绘制热泵供回水温差与热泵COP关系的散点图,如图2所示。

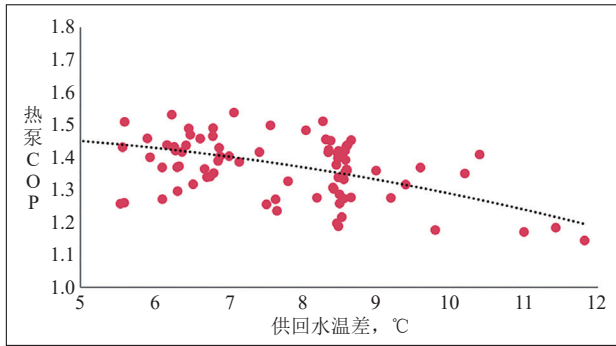


图2 热泵供回水温差和热泵COP散点图

随着热泵供回水温差的增大,热泵COP呈现逐渐下降的趋势,且下降趋势逐渐加快。具体而言,供回水温差每增加1℃,热泵COP的平均降幅由0.02逐步上升至0.05。在系统输出总热量保持恒定的条件下,热泵供回水温差的增大意味着单位质量循环水所需吸收的热量相应增加。为满足热负荷需求,机组需要消耗更多的驱动热能(如燃气消耗量)。在此过程中,驱动能投入的增长率超过了有效热输出的增长率,从而导致热泵COP的降低。

4.3 构建热泵COP预测模型

本研究基于热泵稳定运行、换热过程稳定、溶液无结晶及烟气洁净无垢等设定条件,通过对热泵烟气温差与供回水温差的量化分析表明,热泵COP与烟气温差呈正相关关系,而与供回水温差呈负相关关系。进一步对图1与图2中的散点数据进行回归分析,得到如下关系式:

$$COP_1 = 0.6185 \times \Delta T_1^{0.1774} \quad (2)$$

$$COP_2 = -0.0027 \times \Delta T_2^2 + 0.0088 \times \Delta T_2 + 1.4753 \quad (3)$$

式中: COP_1 为热泵在不同烟气温差下的热泵COP; ΔT_1 为热泵烟气温差,℃; COP_2 为热泵在不同烟气温差下的热泵COP; ΔT_2 为热泵供回水

温差,℃。

热泵COP分别与其烟气温差及供回水温差之间存在独立的单变量函数关系。为构建能够同时反映烟气温差与供回水温差对热泵COP影响的预测模型,首先需要对上述两个变量进行有效整合,将原有的单变量表达式融合为一个双变量函数。通过构建耦合关系并引入权重系数,可实现热泵COP在烟气温差与供回水温差协同作用下的综合表征。

热泵烟气温差与供回水温差分别表征了热泵系统在“热源侧”与“用户侧”的热量传递效率。本质上,热泵COP反映了系统有效利用热量与输入能量之间的比值。当烟气温差与供回水温差达到良好匹配时,系统能够充分利用热源侧的热量输入,高效满足用户侧的热量需求,从而实现最优运行状态。事实上,烟气温差与供回水温差之间通过溴化锂溶液的温度与浓度参数相互关联,形成协同影响系统性能的耦合变量。基于此机理,本研究采用乘法耦合^[4]方式,将两个单变量公式进行整合,以构建能够同时反映热源侧与用户侧热量传递特性的统一热泵COP预测模型,得到如下关系式:

$$COP = K \times (0.6185 \times \Delta T_1^{0.1774}) \times (-0.0027 \times \Delta T_2^2 + 0.0088 \times \Delta T_2 + 1.4753) \quad (4)$$

式中: K 为耦合系数。

4.4 耦合系数的确定以及模型拟合

4.4.1 确定耦合系数

选取29组不同热泵COP工况下的实测热泵烟气温差与供回水温差数据(详见表4),首先采用皮尔逊相关系数对实测热泵COP值与计算热泵COP值之间的相关性进行分析,其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

经计算,相关系数 $r=0.92$, 大于阈值0.8,表明所考察变量之间存在较强的相关性。在此基础上,进一步采用最小二乘法^[5]计算耦合系数,计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (COP_{\text{实测},i} \times COP_{1,i} \times COP_{2,i})}{\sum_{i=1}^n (COP_{1,i} \times COP_{2,i})^2} \quad (6)$$

经计算求得,耦合系数 K 为0.75。基于此耦合

表4 样本数据及热泵COP计算数据表

序号	烟气温差	供回水温差	COP _{实测}	COP ₁	COP ₂
1	26.13	11.82	1.14	1.10	1.20
2	58.38	10.55	1.17	1.27	1.27
3	44.43	11.92	1.18	1.21	1.20
4	32.31	11.55	1.20	1.15	1.22
5	40.36	11.00	1.22	1.19	1.25
6	39.53	10.89	1.26	1.19	1.25
7	63.78	9.41	1.27	1.29	1.32
8	70.66	9.66	1.28	1.32	1.31
9	79.28	10.01	1.29	1.34	1.29
10	64.55	10.25	1.30	1.30	1.28
11	93.53	8.19	1.33	1.38	1.37
12	84.09	9.01	1.34	1.36	1.34
13	92.01	7.69	1.35	1.38	1.38
14	103.62	8.22	1.36	1.41	1.37
15	78.93	7.09	1.37	1.34	1.40
16	83.42	8.46	1.38	1.36	1.36
17	86.51	7.53	1.39	1.36	1.39
18	92.56	7.33	1.41	1.38	1.39
19	101.60	7.81	1.42	1.40	1.38
20	108.51	6.83	1.43	1.42	1.41
21	126.57	7.07	1.44	1.46	1.40
22	78.33	6.91	1.45	1.34	1.41
23	76.01	6.44	1.46	1.33	1.42
24	114.48	6.09	1.47	1.43	1.43
25	112.97	8.05	1.48	1.43	1.37
26	110.50	6.63	1.49	1.43	1.41
27	100.47	5.99	1.50	1.40	1.43
28	114.53	6.94	1.51	1.43	1.41
29	110.35	6.58	1.54	1.42	1.42

系数，对原始模型进行了简化，所得简化模型公式如下：

$$COP = \Delta T_1^{0.1774} \times (-0.0013 \times \Delta T_2^2 + 0.0041 \times \Delta T_2 + 0.6844) \quad (7)$$

式中：COP为热泵在不同烟气温差以及不同供回水温差下的性能系数； ΔT_1 为热泵烟气温差，℃； ΔT_2 为热泵供回水温差，℃。

4.4.2 模型拟合

如图3所示，实测热泵COP值与模型计算COP值之间具有良好的一致性，两者拟合效果较为理想，表明该模型具备可靠的热泵性能预测能力。

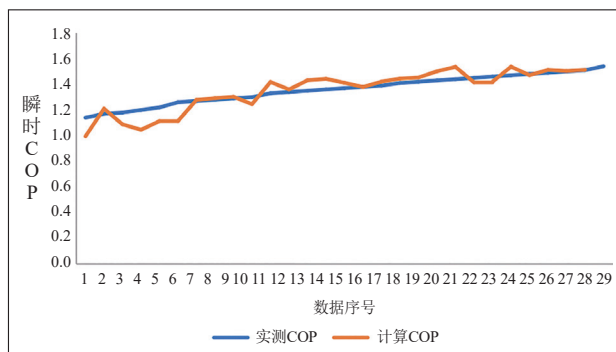


图3 实测COP和计算COP拟合情况

4.4.3 变量影响程度分析

首先，计算实测热泵烟气温差与供回水温差的均值及标准差。随后，基于以下公式，定量评估各变量对热泵COP的影响程度（或贡献度）^[6]。

热泵烟气温差影响程度，如下关系式：

$$ME_1 = |2.2466 \times (27.3 \times Z_1 + 82.36)^2 \times [-0.0027 \times (1.84 \times Z_2 + 8.48)^2 + 0.0088 \times (1.84 \times Z_2 + 8.48) + 1.4753]| \quad (8)$$

$$\text{式中：} Z_1 = \frac{\Delta T_1 - 82.36}{27.3}$$

热泵供回水温差影响程度，如下关系式：

$$ME_2 = |0.8536 \times (27.3 \times Z_1 + 82.36)^{0.1774} \times [-0.0057 \times (1.84 \times Z_2 + 8.48)^2 + 0.0088]| \quad (9)$$

$$\text{式中：} Z_2 = \frac{\Delta T_2 - 8.48}{1.84}$$

基于实测样本数据的计算结果，平均影响值 ME_1 为0.09， ME_2 为0.07，满足 $ME_1 > ME_2$ 。因此可以判断，烟气温差对热泵COP的影响程度高于供回水温差所产生的影响。这表明，在影响热泵COP的因素中，烟气侧情况（以烟气温差为表征）所起的作用大于用户侧热需求（以供回水温差为表征）所产生的作用，稳定可靠的烟气温度和热泵排烟温度提升对热泵COP有决定性作用。

4.5 热泵COP预测模型应用

基于所构建的热泵COP预测模型，可对其不同烟气温差及供回水温差条件下的热泵COP进行预测，进而实现系统运行状态的实时监测，并为供热调节提供科学依据，具体预测结果如表5所示。

热泵烟气温差与热泵COP呈现显著正相关关

表5 不同烟气温差和供回水温差下的热泵COP预测值

$\Delta T_2 \backslash \Delta T_1$	55℃	60℃	65℃	70℃	75℃	80℃	85℃	90℃	95℃	100℃	105℃	110℃
5℃	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45	1.47	1.48	1.50	1.51	1.52	1.54	1.55
6℃	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.44	1.46	1.47	1.49	1.50	1.52	1.53
7℃	1.33	1.35	1.37	1.38	1.40	1.42	1.43	1.45	1.46	1.47	1.49	1.50
8℃	1.30	1.32	1.34	1.35	1.37	1.39	1.40	1.41	1.43	1.44	1.45	1.47
9℃	1.26	1.28	1.30	1.32	1.33	1.35	1.36	1.38	1.39	1.40	1.41	1.43
10℃	1.22	1.24	1.26	1.27	1.29	1.31	1.32	1.33	1.35	1.36	1.37	1.38
11℃	1.18	1.19	1.21	1.23	1.24	1.26	1.27	1.28	1.30	1.31	1.32	1.33

系,然而当烟气温差超过80℃时,COP的提升幅度趋于减缓。另一方面,供回水温差与热泵COP之间则表现为负相关关系,且当供回水温差超过8℃时,COP的下降速率明显增大。

5 结论和建议

(1) 在系统稳定运行条件下,热泵COP与烟气温差呈正相关关系,与供回水温差呈负相关关系,且烟气温差对热泵COP的影响程度显著大于供回水温差。

(2) 基于现场实测数据,本研究构建了以热泵烟气温差与供回水温差为自变量的热泵COP二元预测模型。该模型对历史数据拟合效果良好,相关系数达0.92,能够有效支持热泵COP的实时监测与预测分析。

(3) 建议将所建模型嵌入集中控制系统,实

现热泵COP的实时可视化显示,为判断设备运行效率及优化生产调度提供数据支撑。

参考文献

- [1]李少岩.高效节能板式换热器在燃气锅炉烟气余热回收中的应用[J].山东工业技术,2018(23):58,38.
- [2]胡秋明,王景刚,鲍玲玲.溴化锂吸收式热泵热力循环过程的理论分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2015(1):52-54.
- [3]金星,张小松.换热温差对升温型吸收式热泵回收废热的影晌[J].科学技术与工程,2015,15(19):96-101.
- [4]王宏志,王树勋,戴逸松.乘法噪声中非线性耦合谐波分析[J].电子学报,2001,29(1):75-79.
- [5]郭晓锋,刘永强,李志全.基于最小二乘法的波导耦合系数测量方法[J].光学精密工程,2010,18(8):1784-1789.
- [6]方开泰,全辉,陈庆云.回归模型中因素重要性的度量[J].数理统计与管理,1998,17(2):21-27.

工程信息

新条例落地 广州以科技手段筑牢燃气安全防线

“智慧燃气·平安万家”2026广州城管科技活动周燃气安全进社区活动于5月30日举行。活动聚焦新修订施行的《广州市燃气管理条例》(下称《条例》),通过“科技体验+硬核普法”的创新模式,推动燃气安全治理法治化、精细化。

在VR燃气隐患排查体验区,市民戴上VR头显设备,即可“穿越”至高度还原的家庭厨房与餐饮后厨。

2026年5月1日起,《广州市燃气管理条例》正式施行,为广州燃气“建、储、输、用”全链条安全管理提供法治保障。

广州市城市管理综合执法局相关负责人表示,新《条例》聚焦燃气全链条安全管理,明确了各级政府、企业的安全管理责任,并对居民住户、餐饮经营者、出租人等终端用户的主体责任作出了刚性规定。

(本刊通讯员供稿)