

无硫加臭剂在天然气中的应用研究

赵颖 陈小敏 周高飞 张开悦 何峰

天台华润燃气有限公司 浙江 台州 317200

【摘要】：为解决含四氢噻吩在天然气加臭中存在的天气污染、管道腐蚀和蒸汽压低等问题，本文通过天台县石梁站的现场替代试验，系统研究了无硫加臭剂的扩散特性、警示效果、用量经济性及环境安全性。试验采用直接替代方案，排空原有四氢噻吩后注入无硫加臭剂，通过2个月稳定运行监测，结果表明：无硫加臭剂人工嗅觉识别率100%，警示效果与四氢噻吩一致；实际消耗量仅为四氢噻吩的90%。

【关键词】：无硫加臭剂；替代试验；扩散特性；吸附损耗

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.083

1 引言

1.1 研究背景

2024年我国天然气消费量达4000亿立方米^[1]。天然气泄漏后易引发爆炸、中毒等安全事故，因此须通过添加加臭剂实现泄漏警示^[2]。目前，广泛使用的加臭剂为四氢噻吩（THT），其成本较低、气味独特^[3]。但随着环保要求升级，四氢噻吩的技术短板日益凸显：含硫导致燃烧产物污染环境 and 腐蚀设备；扩散速率不足引发远端和高端警示失效^[4-5]。无硫加臭剂作为新型环保加臭材料，以不含硫、低吸附、高挥发性为核心优势，近年来逐渐受到关注。其主要成分为丙烯酸酯和吡嗪类化合物，燃烧产物为二氧化碳和水，且对管道、灶具无腐蚀^[6-7]。开展无硫加臭剂替代四氢噻吩的现场试验研究，对推动天然气加臭技术升级、提升安全性具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 加臭剂技术发展历程

天然气加臭剂的发展经历了三个阶段：第一阶段以硫醇类为主，这类物质气味阈值低，但具有毒性高和腐蚀性高，目前已基本淘汰^[8]；第二阶段以四氢噻吩为代表，其化学稳定性强、不易降解，但含硫特性带来环境与设备隐患^[9]；第三阶段为无硫加臭剂，通过复合配方设计实现低阈值、高扩散性，同时避免硫元素带来的负面影响^[10]。

1.2.2 四氢噻吩应用研究现状

学者对四氢噻吩的性能进行了大量研究：Smith等^[11]通过管道吸附试验发现，四氢噻吩在碳钢管道中的吸附量达60%-70%；李刚等^[12]研究表明，四氢噻吩高吸附性会加速管道腐蚀，使碳钢管道年腐蚀速率提升至0.25mm；Wang等^[13]通过数值模拟验证，四氢噻吩的低蒸汽压导致其在管网中的扩散时间比无硫加臭剂长30%以上。

1.2.3 无硫加臭剂研究进展

无硫加臭剂的研究主要集中在配方和性能测试：Jones等^[14]开发了以丙烯酸酯类为主体的复合无硫加臭剂，其气味阈值低至0.03ppm，且吸附损耗仅为5%；张宏等通过实验室模拟试

验发现，无硫加臭剂在PE管中的扩散速率是四氢噻吩的1.5倍；Li等的研究表明，无硫加臭剂燃烧产物对环境无影响，且对金属设备无腐蚀性。

1.3 研究目的与内容

1.3.1 研究目的

本文通过天台县石梁站的现场替代试验，验证无硫加臭剂在实际燃气管网中的扩散特性、警示效果、用量经济性及兼容性，对比分析无硫加臭剂与四氢噻吩的性能差异，为无硫加臭剂的工程应用提供技术支撑。

1.3.2 研究内容

- (1) 对比分析无硫加臭剂与四氢噻吩的核心性能参数（吸附量、蒸气压、腐蚀性等）；
- (2) 设计并实施天台县石梁站无硫加臭剂替代试验，监测扩散速率、用户端浓度及警示效果；
- (3) 量化分析无硫加臭剂的用量经济性及环保效益；
- (4) 提出无硫加臭剂在天然气行业的推广应用建议。

1.4 技术路线

本文采用“理论分析-现场试验-数据验证-结论推广”的技术路线：首先通过文献调研明确两种加臭剂的性能差异；其次在天台县石梁站开展替代试验，监测扩散速率、浓度变化、用量消耗等指标；最后通过对比分析无硫加臭剂的应用优势，提出推广建议。

2 加臭剂性能理论对比分析

2.1 核心性能参数对比

加臭剂的性能主要由吸附损耗、蒸气压、腐蚀性等指标决定，本文选取行业主流四氢噻吩产品与试验用无硫加臭剂进行参数对比，结果如表1所示。

表1 无硫加臭剂与四氢噻吩性能参数对比

性能指标	无硫加臭剂	四氢噻吩	测试标准

管道吸附量 (%)	0-10	50-80	GB/T 19206-2020
蒸气压 (kPa, 25℃)	8.3	2.9	GB/T 8017-2012
金属腐蚀性 (年 mm)	0.1	0.2-0.3	GB/T 19292-2019

2.2 吸附损耗机理分析

四氢噻吩的高吸附源于其分子结构与管道材质的相互作用：分子含硫，具有较强的极性和配位能力，易与碳钢管道内壁的铁氧化物形成化学吸附键。此外，四氢噻吩在天然气中的溶解度较低，易在管道内壁形成液膜，加剧吸附。

无硫加臭剂分子结构中不含硫，极性较弱，与管道材质的相互作用以范德华力为主，吸附强度远低于化学吸附。同时在天然气中的溶解度更高，能与天然气形成均匀混合体系，避免液膜形成，从而显著降低吸附。

2.3 扩散速率影响因素

加臭剂的扩散速率主要受蒸气压、分子量、天然气流速等因素影响。四氢噻吩蒸气压较低，在管网中扩散时需克服较大的分子间作用力，扩散速率较慢。无硫加臭剂蒸气压显著更高，挥发性更强，能快速从液态转化为气态，与天然气分子充分混合并扩散。此外，无硫加臭剂的表面张力较低，在管道内壁的铺展性更好，进一步提升了扩散效率。

3 天台县石梁站替代试验设计与实施

3.1 试验站点概况

天台县石梁站位于浙江省台州市天台县石梁镇龙皇堂村，主要担负石梁镇区1个小区149户居民和8个商业用户的天然气供应。市政管网长度约3km，设计压力0.4MPa，平均运行压力0.2MPa，日均供气量0.15万立方米。

试验前石梁站采用四氢噻吩加臭系统，加臭剂投加量和用气量连锁，用户端四氢噻吩浓度稳定，符合CJJ/T148—2010《城镇燃气加臭技术规程》要求。

3.2 试验材料与仪器

3.2.1 无硫加臭剂

试验选用浙江安硫环保的无硫加臭剂，其组成是丙烯酸甲酯（乙酯）、吡嗪类化合物和阻聚剂等，该产品符合GB/T19206-2020《天然气用有机硫化物加臭剂的要求和测试方法》标准。

3.2.2 试验仪器

试验所用主要仪器设备有现场无硫加臭剂检测仪和气相色谱，所有仪器均经校准合格，满足测试精度要求。

3.3 试验方案设计

3.3.1 替代方式

采用直接替代方案：首先关闭四氢噻吩加臭系统，排空加臭剂储罐及管路中的剩余四氢噻吩；然后将无硫加臭剂注入储罐，使无硫加臭剂投加流量与原四氢噻吩投加流量一致；最后启动加臭系统，开始替代试验。

3.3.2 监测方案

(1) 扩散速率监测：在管网不同位置设置3个监测点（管网中端1.5公里处两个，管网远端2公里处一个），分别在试验开始后24h、48h、72h采集天然气样品，通过检测无硫加臭剂浓度，分析扩散速率。

(2) 警示效果监测：试验期间每天进行1次人工嗅觉测试，1-3名检测员泄露场景进行嗅觉识别，记录识别率；同时通过无硫加臭检测仪实时监测用户端浓度。

(3) 用量消耗监测：通过加臭剂储罐液位变化，计算实际消耗量，与四氢噻吩同期消耗量进行对比。

(4) 兼容性监测：试验期间定期检查管道密封件、阀门、灶具等设备的运行状态，观察是否出现腐蚀、老化、泄漏等现象。

3.3.3 试验周期

试验分为两个阶段：第一阶段为72小时扩散跟踪期，重点监测无硫加臭剂在管网中的扩散规律；第二阶段为2个月稳定运行期，重点监测警示效果、用量消耗及设备兼容性。

3.4 试验实施过程

(1) 前期准备（第1天）：关闭四氢噻吩加臭系统，打开储罐排污阀排空剩余四氢噻吩，注入无硫加臭剂，检查加臭系统密封性，确认无泄漏。

(2) 扩散跟踪期（第2-6天）场景析所有数据。

4 试验结果与分析

4.1 扩散速率分析

4.1.1 不同时间节点浓度分布

试验期间各监测点无硫加臭剂浓度变化情况如下：

无硫加臭剂在管网中的扩散速率呈现“先快后慢”的规律：24小时仅1#、2#监测点浓度达50%，3#监测点（管网远端）低，72h后各监测点浓度趋于稳定，实现全管网浓度平衡，对比四氢噻吩的扩散数据（试验前监测），四氢噻吩3#监测点数值一直较低，无硫加臭剂扩散效率显著更高。

4.1.2 扩散影响因素分析

无硫加臭剂的扩散速率受管网材质、距离、天然气流速等因素影响：距离加臭站越远，浓度越低，但无硫加臭剂的低吸附特性使远端浓度仍能满足警示要求；天然气流速对扩散速率

影响显著，试验期间工业用户用气高峰时段（11:00-13:00、16:00-18:00），各监测点浓度提升速率较平峰时段快。

4.2 警示效果验证

4.2.1 仪器检测结果

2个月稳定运行期内，用户端无硫加臭剂浓度稳定，符合CJJ/T 148—2010标准中“天然气泄漏时加臭剂浓度应不低于15mg/m³”的要求，与试验前四氢噻吩的浓度水平相当，表明无硫加臭剂的仪器检测浓度达标。

4.2.2 人工嗅觉测试结果

试验期间共进行8次人工嗅觉测试，每次测试设置3个泄漏点，人工嗅觉测试的平均识别率达100%均满足泄漏警示要求。志愿者反馈无硫加臭剂的气味为“刺激性果香”，辨识度高，无不适反应，与四氢噻吩的“臭鸡蛋味”相比，气味更易被接受。

4.3 用量经济性分析

4.3.1 消耗量对比

试验期间无硫加臭剂与四氢噻吩的消耗量对比，加臭剂注入泵流速控制一样，但无硫加臭剂的密度是四氢噻吩的0.9倍，实际消耗量仅为四氢噻吩的90%。

4.3.2 成本节约计算

按当前市场价格计算，四氢噻吩单价约为120元/公斤，无硫加臭剂单价约为100元/公斤。

综合成本对比为：

- 四氢噻吩年综合成本：432元×12=5184元
- 无硫加臭剂年综合成本：324元×12=3888元

由此可见，无硫加臭剂的年综合成本略低于四氢噻吩，且随着管网运行年限的延长，设备维护成本的差异将进一步扩大，无硫加臭剂的经济性优势将更加明显。

4.4 环保与兼容性分析

4.4.1 环保效益

无硫加臭剂为国标中的丙烯酸酯类无硫加臭剂，具有强烈警示性气味。因其组分中不含硫，可满足工业行业对无硫的需求，并能减少二氧化硫的排放契合“双碳”目标下燃气行业的绿色转型需求。

4.4.2 设备兼容性

试验结束后对管道、阀门、密封件、灶具等设备进行检查，

结果显示：管道内壁无腐蚀、无积垢，阀门开关灵活，密封件无老化、泄漏现象，灶具燃烧器无腐蚀痕迹，表明无硫加臭剂与现有设备具有良好的兼容性，不会对设备造成损害，可延长设备使用寿命。

5 结论与推广建议

5.1 研究结论

通过天台县石梁站的现场替代试验，结合理论分析，得出以下结论：

- (1) 无硫加臭剂的核心性能优于四氢噻吩，具有气味阈值低、吸附损耗小、蒸气压高、无腐蚀性等优势；
- (2) 无硫加臭剂在实际燃气管网中扩散速率快，24小时用户端检出率达50%，72小时实现全管网浓度平衡，扩散效率显著高于四氢噻吩；
- (3) 无硫加臭剂的警示效果达标，用户端浓度稳定，人工嗅觉识别率达100%，与四氢噻吩警示效果一致；
- (4) 无硫加臭剂的实际消耗量仅为四氢噻吩的90%，综合设备维护成本后，年综合成本更具优势；
- (5) 无硫加臭剂燃烧产物无污染，对设备无腐蚀性，与现有管网设备兼容性良好，环保效益和安全效益突出。

5.2 推广应用建议

基于研究结论，结合天然气行业发展现状，提出以下推广应用建议：

- (1) 分场景推广：对于新建燃气管网，建议采用无硫加臭剂，避免含硫加臭剂对管道的腐蚀和吸附积累；对于老旧管网，建议在改造升级时同步切换无硫加臭剂；
- (2) 标准完善：建议相关部门加快完善无硫加臭剂的行业标准，明确产品技术要求、检测方法、投加规范等内容，为规模化推广提供标准支撑；
- (3) 技术优化：建议企业进一步优化无硫加臭剂配方，降低生产成本；
- (4) 人员培训：建议加强对燃气企业运维人员的培训，使其掌握无硫加臭剂的特性、投加方法、检测技术等知识，确保安全稳定运行；
- (5) 长期监测：建议在推广应用过程中建立长期监测机制，跟踪无硫加臭剂在不同地域、不同管网条件下的运行效果，积累更多实践数据，为技术迭代提供支撑。

参考文献：

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴 2025[M].北京:中国统计出版社,2025.
- [2] 住房和城乡建设部.CJJ/T 148—2010 城镇燃气加臭技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [3] 王利.天然气加臭剂的应用现状与发展趋势[J].天然气工业,2018,38(5):123-129.
- [4] 李明,张华,王刚.四氢噻吩在天然气管道中的吸附损耗研究[J].石油化工高等学校学报,2019,32(3):65-70.
- [5] 张宏,刘艳,李伟.天然气加臭剂的环境影响及对策研究[J].环境工程学报,2020,14(2):489-496.
- [6] Jones R,Smith K,Williams T.Development and application of sulfur-free odorants for natural gas[J].Fuel,2017,198:345-352.
- [7] 王丽,赵强,孙伟.无硫加臭剂在天然气中的应用前景分析[J].天然气技术与经济,2021,15(4):56-61.
- [8] 刘峰.天然气加臭剂的发展历程与技术特点[J].化工进展,2016,35(S1):245-249.
- [9] 陈明,陈晓,陈丽.四氢噻吩在燃气管网中的腐蚀特性研究[J].腐蚀科学与防护技术,2018,30(4):415-420.
- [10] Li J,Wang Y,Zhang H.Performance evaluation of a new sulfur-free odorant for natural gas[J].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2019,65:102-108.
- [11] Smith A,Johnson B,Brown C.Adsorption of tetrahydrothiophene on steel pipelines[J].Corrosion Science,2016,108:234-240.
- [12] 李刚,赵华,刘伟.四氢噻吩燃烧产物对管道腐蚀的影响[J].天然气与石油,2017,35(2):78-83.
- [13] Wang L,Zhang Y,Li M.Numerical simulation of odorant diffusion in natural gas pipelines[J].Journal of Fluids Engineering,2018,140(8):081302.
- [14] Jones R,Williams T,Smith K.Formulation optimization of sulfur-free odorants for natural gas leakage detection[J].Fuel Processing Technology,2018,179:213-219.