



加油胶管渗透排放因子测试及本地化 VOCs 减排核算

王振中^{1,✉}, 修德欣¹, 郭燕丽², 朱玲³

1. 中石化安全工程研究院有限公司, 青岛 266100; 2. 中国石化销售股份有限公司北京石油分公司, 北京 100010; 3. 北京石油化工学院环境工程系, 北京 102617

摘要 为进一步完善加油站 VOCs 排放因子体系, 提高 VOCs 排放量统计的准确性, 达到减污降碳效果, 本研究参考美国 UL 330 标准和 HG/T 3037-2019 相关的测试规程, 采用重量测试法, 以市售的普通型加油胶管 CH1~CH5 和低渗透型加油胶管 LH 为样本, 测试胶管渗透排放因子, 分析湿度和温度对汽油渗透排放的影响, 并进行 VOCs 减排本地化的核算。根据统计所得的均值、方差和变异系数, 确定日均渗透量 Q_{d2} 做为统计的数据。常规型胶管汽油 CH 的渗透排放量与时间线性相关, 年渗透排放量为 $0.95\text{--}7.90\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$, 低渗透型胶管 LH 的排放因子较常规型胶管降低 98% 以上。加油胶管内汽油的渗透排放受胶管材质和环境温度的显著影响, 恒湿条件下, 在 5、20 和 38 °C 时 LH 汽油平均渗透排放率 Q_{UL} 为 0.67、0.61 和 $3.60\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。CH 和 LH 的平均渗透排放因子为 $5.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.0834\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 按单站配备 8 根加油管的场景核算, 采用 LH 的情况下全国每年可减少汽油渗透挥发量近 3 700 t, 具有良好的减污降碳效果。
关键词 加油胶管; VOCs 减排; 渗透排放因子; 本地化应用; 效果核算

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次有机气溶胶 (secondary organic aerosols, SOA) 的重要前体物^[1-2]。根据多个城市的 VOCs 源解析结果, 汽油挥发对 VOCs 的贡献率为 $(19.7\pm 7.5)\%$ ^[3-6]。加油站作为汽油分销的主要场所, 是汽油挥发 VOCs 的来源之一。

加油站 VOCs 排放包括 5 个环节: 卸油排放、加油排放、呼吸排放、加油枪滴油和胶管渗透排放^[7]。根据加州空气资源委员会 (California Air Resources Board, CARB) 的统计, 卸油和加油阶段的 VOCs 排放量分别占加油站 VOCs 排放总量 44.0% 和 48.0%, 储罐呼吸和加油枪滴油分别占 4.3% 和 3.5%, 胶管渗透仅占 0.4%^[3]。《加油站大气污染物排放标准》(GB 20952-2020)^[8] 中对加油和卸油过程的油气回收、油气处理装置和在线监测系统提出明确要求, 国内大部分加油站都安装卸油油气回收系统、加油油气回收系统。此外, 对于加油枪滴油环节, 随着《加油站油气排放控制和限值》(DB11/208-2023)^[9] 的发布, 2024 年北京市在全国率先要求加油枪加油完毕后的残油限值不应超过 5.0 mL。而对于胶管渗透, 目前我国尚无明确的控制限值。

胶管渗透排放是指储存在胶管内部的成品油, 通过胶管管壁渗透进而挥发产生的油气排放, 渗透排放因子与油品特性、胶管长度、胶管内径、胶管材质、环境因素等均具有一定相关性, 存在测试周期长, 条件严苛和影响因素多等特点。目前, 美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 和 CARB、欧洲环境署 (European Environment Agency, EEA) 和中国都开展了加油站排放因子研究。在胶管渗透的排放环节, 仅有 CARB 基于典型加油过程现场测试数据, 通过统计学的方法获得在采用普通胶管和低渗透胶管时, 每转移 1L 汽油所排放的 VOCs 质量分别为 $7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10]。北京市环境科学研究院在对北京市通州区加油站汽油加油环节 VOCs 排放测试结果的基础上, 按照倍数对 CARB 加油站汽油排放因子进行校正, 得出北京市加油站胶管渗透的 VOCs 排放因子为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[11]。在中国环境科学研究所完成的第二次全国污染源

收稿日期: 2025-01-13 录用日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52370108); 中国石油化工股份有限公司项目 (320109, 323069)

第一作者: 王振中 (1988—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为油库、加油气站安全环保技术, wangzcn.qday@sinopec.com

✉通信作者

普查—油品储运销项目中,并没有开展胶管渗透量的测试。

需要强调的是,国内外加油站胶管渗透排放因子差异较大^[12],且 20 年来中国汽油标准发生了变化,在编制城市 VOCs 排放清单时,需要充分考虑国内外加油站 VOCs 排放因子适用性。如使用 CARB 因子时,必须充分考虑不同国家油品或者加油设备的差异性,如美国使用的加油胶管通常长度为 3 m,内径为 1.905 cm,我国使用的加油胶管普遍长度为 4.5 m,内径为 2.22 cm,而且普通胶管和低渗透胶管的性能有明显的区别,这些因素均可能导致最终的胶管渗透排放因子产生一定差异,进而导致 VOCs 排放清单存在较大不确定性。

污染排放总量管控的前提是做好污染物排放总量核算^[12],本研究通过重量测试法计算胶管渗透排放因子,并核算 VOCs 的排放量,不仅能完善加油站 VOCs 排放因子体系,还能为油品储运销环节 VOCs 排放研究和清单编制方面提供经验系数,提高 VOCs 排放量统计的准确性,并为加油站行业的 VOCs 减排管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验共选取 5 种型号的市售常规型橡胶软管,覆盖了目前市场占比超过 70% 的主流汽油加油胶管,记录为常规胶管 CH1~CH5;另外 1 种为自行研发低渗透型橡胶胶管,其中增设三元共聚氟树脂薄膜层厚度高于 0.286 mm,记录为 LH。所有胶管总成长度均为 4.5 m,内径为 2.22 cm。

1.2 实验设备

天平为苏州顺强 CHS-D5K,量程 0~8 kg,测量精度为 0.01 g。上海博工 GP/R 系列步入式恒温恒湿实验箱中,实验箱尺寸为 5 m×2 m×3 m(长高宽),温度量程-20~150 ℃,精度为 0.5 ℃,湿度量程 20%~98%RH,精度 2%RH。

1.3 测试方法

本研究借鉴美国 UL 330^[13-14]标准和 HG/T 3037-2019^[15]相关的测试规程,通过重量法测量加油胶管渗透排放因子,测试时间为夏季。

使用 4 根同一型号胶管样品进行平行实验,胶管质量为 m_0 ;其中 1 根作为对比样品,3 根加油胶管样品内部充满 92#汽油,两端使用专用堵头密封,放置于超净工作台中,定期测量 4 根加油胶管质量的变化。根据相关标准,为减少测试周期中由于胶管内汽油蒸发导致胶管内气相空间体积增大,气液两相传质面积增加,影响测试结果的准确性和平行性,一个实验周期为 8~14 d。随后重新充满汽油继续测试,共完成了 3 个周期的测试。

为测试环境温度和湿度对胶管渗透率性能的影响,将注满汽油的胶管密封后放入恒温恒湿实验箱中,检测 24 h 内测试胶管质量变化。控制温度分别为 5、20 和 38 ℃,控制湿度为 20%RH、50%RH 和 80%RH,温湿度共 9 种组合。

1.4 计算方法

在测试周期内,对比实验用胶管自身的质量变化率 ζ 根据式 (1) 计算。测试实验用胶管内汽油的填充质量 m_{eg} 根据式 (2) 计算。测试实验用胶管内汽油的总渗透排放量 Δm_{eg} 根据式 (3) 计算。测试实验用胶管中汽油日均渗透量 Q_d 根据式 (4)~式 (7) 计算。

$$\zeta_b = \frac{m_{b0} - m_{bt}}{m_{b0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ζ_b 为胶管自身的质量变化率,%; m_{b0} 为空白对比实验用胶管的初始质量, g; m_{bt} 为某测试时间时空白对比实验所用胶管的质量, g。

$$m_{eg} = m_{e0} - m_{ez} \quad (2)$$

式中: m_{eg} 为胶管内汽油的填充质量, g; m_{ez} 为胶管的初始质量, g; m_{e0} 为胶管及汽油的初始质量, g。

$$\Delta m_{eg} = m_{et} - m_{e0} - \zeta_b \times m_{ez} \quad (3)$$

式中: Δm_{eg} 为胶管内汽油的总渗透排放量, g; m_{et} 为 t 天后胶管及汽油的重量, g。

$$Q_{d1} = \frac{\sum \Delta m_{eg1}/n}{t_l} \quad (4)$$

式中: Q_{d1} 为胶管内汽油日均渗透排放量, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; Δm_{eg1} 为以最后 1 次测试结果计算的总渗透排放量, g; n 为平行样本的数量; t_l 为最后一次测试与空白实验的间隔时间, d。

$$Q_{d2} = \frac{\sum \Delta m_{eg2}/n}{t} \quad (5)$$

式中: Q_{d2} 为胶管内汽油日均渗透排放量, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; Δm_{eg2} 为以任 1 次测试结果计算的总渗透排放量, g; t 为测试的时间, d。

$$Q_{d3} = \frac{\sum \Delta m_{eg3}/n}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: Q_{d3} 为胶管内汽油每天日均排放量, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; Δm_{eg3} 为以连续两次测试结果计算的总渗透排放量差值, g; Δt 为两次测试的时间间隔, d。

$$Q_{d4} = \frac{\sum n_i Q_{di}}{\sum n_i} \quad (7)$$

式中: Q_{d4} 为胶管内汽油每天日均排放量, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。 Q_{d4} 为 Q_{d1} 、 Q_{d2} 和 Q_{d3} 的算术平均值。

根据 UL330 标准, 实验用胶管中汽油渗透排放率 Q_{UL} 根据式 (8) 计算。

$$Q_{UL} = \frac{\sum \Delta m_{eg}/n}{D(L+2d)\pi t} \quad (8)$$

式中: Q_{UL} 为根据 UL330 标准计算的胶管渗透排放率, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; D 为所测试胶管的内径, m; L 为所测试胶管的长度, m; d 为管帽的深度, m。

根据 HG/T 3037-2019 标准, 实验用胶管中汽油渗透排放率 Q_{HG} 根据式 (9) 计算。

$$Q_{HG} = \frac{\sum \Delta m_{eg}/n}{\rho L t} \quad (9)$$

式中: Q_{HG} 为根据 HG/T 3037-2019 标准计算的胶管渗透排放率, $\text{mL} \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$; ρ 为汽油的密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 自然环境下胶管渗透排放

各型号胶管内汽油渗透排放量在 3 个测试周期的变化如图 1 所示。在测试的起始阶段, 汽油从胶管内壁渗透到外壁, 渗透排放量很低; 随后汽油从胶管外壁挥发到空气中, 渗透排放量升高。随测试时间的延长, 胶管中汽油渗透排放量总体均呈现持续增加的趋势, 第 1 个测试周期为 14 d, 常规胶管总渗透排放量为 19.9~273 g, 第 2 个测试周期和第 3 个测试周期内总渗透排放量分别为 28.6~171.1 g 和 26.5~159.8 g; 低渗透胶管 LH 在 3 个测试周期内总排放量在 0.86~1.87 g。不同类型胶管中汽油的渗透排放量在差异较大, 加油站在进行排放统计时, 需要先获取不同厂家胶管的信息, 再根据相关管理部门的要求开展工作。

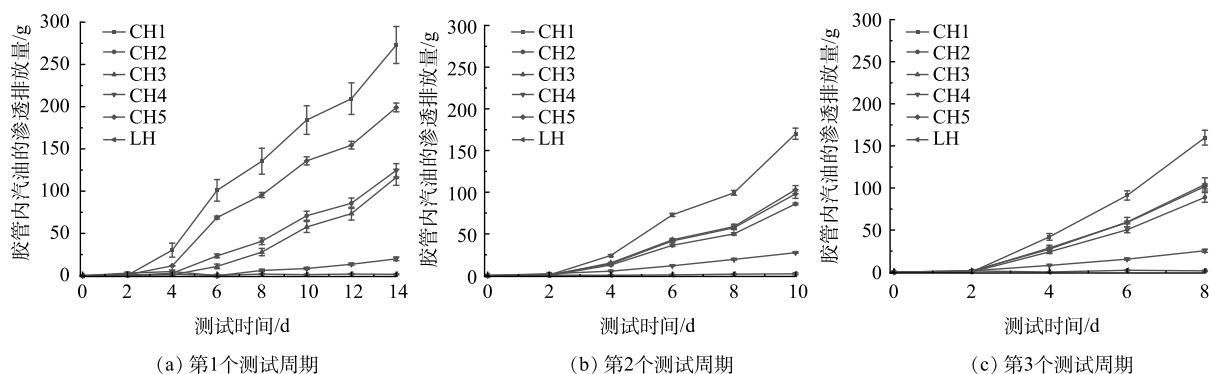


图 1 夏季加油胶管内汽油渗透排放量测试结果图

Fig. 1 Test result of gasoline penetration emission in summer refueling hose

以第一个测试周期为例,根据式(4)~式(6)计算常规胶管 CH1 日均渗透排放量及统计结果见表 1。基于式(5)和式(6)计算所得的样本数分别为 27 和 22 个,选择 Shapiro-Wilk 检验, P 值分别为 0.1 和 0.179;基于式(7)的样本数据共计 52 个,使用 SPSS 软件进行相关性分析,选择 Kolmogorov-Smirnov 检验样本数据的正态分布^[16],计算可得日均渗透量的 $P=0.251$;上述 3 个 P 值均大于 0.05,说明 3 组样本数据都具备正态分布特质,具有一定的规律性。表 1 中 Q_{d2} 方法所得方差和变异系数均最小,结合统计的样本数量和工作量,因此后续选用式(5)计算所得日均渗透排放量 Q_{d2} 进一步统计分析。

在不同测试周期中,不同类型加油胶管内汽油渗透排放量及线性拟合结果见图 2 和表 2。6 种测试胶管日平均渗透挥发量 Q_{d2} 均是倒 U 型的变化趋势,在第 2 个测试周期达到最高值,呈现穿透的现象。低渗透胶管由于多一层增强层,渗透量很低,所以线性趋势不显著,尤其是前 2 个测试周期线性相关系数 R^2 均低于 0.21。此外,根据计算结果,同一测试周期常规胶管的渗透排放量和斜率为递变增长趋势,CH1 渗透排放量最高为 $19.7\sim 26.6\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,拟合方程斜率也最大。

根据 GB/T 7528-2019,软管的渗漏是指气体

表 1 胶管内汽油日均渗透排放量计算结果统计对比
Table 1 Statistical comparison of gasoline penetration emission per day in refueling hose

日均渗透排量	计算方法	样本数	均值 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	P 值	方差	变异系数
Q_{d1}	式(4)	3	19.66	—*	—*	—*
Q_{d2}	式(5)	27	21.65	0.1	8.80	14.02%
Q_{d3}	式(6)	22	19.51	0.179	9.07	15.44%
Q_{d4}	式(7)	52	20.38	0.251	9.00	14.74%

注: *为因样本数少,没有计算。

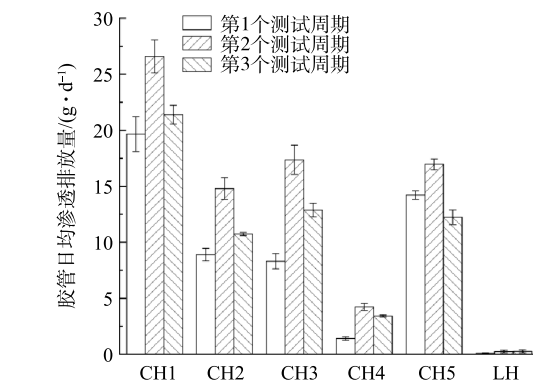


图 2 夏季加油胶管日均渗透排放量
Fig. 2 Permeation emission mass per day of refueling hose in summer

表 2 图 1 线性拟合结果
Table 2 The Linear fitting of the date in Figure 1

胶管型号	第1测试周期		第2测试周期		第3测试周期	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
CH1	$y = 22.492x - 46.561$	0.989 7	$y = 26.401x - 58.76$	0.986 7	$y = 20.699x - 50.782$	0.966 1
CH2	$y = 10.479x - 34.076$	0.961 6	$y = 14.613x - 2.213$	0.986 7	$y = 10.444x - 25.638$	0.966 9
CH3	$y = 9.63x - 35.947$	0.916 7	$y = 17.012x - 36.925$	0.984 3	$y = 12.453x - 30.657$	0.962 4
CH4	$y = 1.365x - 2.936$	0.759 7	$y = 3.947x - 7.1267$	0.990 2	$y = 3.221x - 6.056$	0.975 6
CH5	$y = 16.907x - 40.078$	0.985 1	$y = 16.662x - 35.712$	0.989 1	$y = 11.878x - 28.906$	0.966 1
LH	$y = 0.052x + 0.949$	0.212 3	$y = 0.132x + 0.672$	0.168 6	$y = 0.226x - 0.201$	0.895 4

或者液体透过软管壁渗出和渗透或扩散的过程。汽油在加油胶管内渗漏包括 2 个不同过程。首先是汽油在橡胶胶管的溶胀^[17]。胶管内胶层通常为丁腈橡胶制成,合成过程中橡胶分子在一定温度、压力条件下与硫化剂及其他促进剂发生反应,线型结构通过交联形成立体网状结构的丁腈橡胶,橡胶硫化也是目前国内外厂家为提高加油胶管物理机械性能广泛采用的工艺^[18]。汽油充满丁腈橡胶内壁时,常温下短时间橡胶可以耐受汽油,随着测试时间的延长,汽油溶到丁腈橡胶的纤维缝隙中,发生溶胀反应。尤其是在温度较高的夏季,汽油中的过氧化物会快速增加,过氧化物及自由基对橡胶有强烈的侵蚀作用,因此胶管及汽油的总质量持续降低,同时在胶管内充满汽油放置 16 h 以后,汽油中硫含量增加到 $50.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,未洗胶质增加到 $5.54\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[19]。其次是胶管内汽油的传质和挥发。汽油从内胶层内壁渗透至外胶层,内外胶层均具有微孔结构,汽油吸附在外胶层后挥发,汽油蒸气分子在外胶层的微观孔道内扩散至最外层,进而外扩散传质到外

界大气环境中,胶管内汽油质量随之降低。当胶管吸附汽油达到平衡后,吸附速率降低,汽油蒸发后扩散的速率也相应降低。

图3是常规胶管1在3个测试周期内拟合图,3条拟合曲线的95%的置信区带和95%预测区带基本重合,说明胶管在长期使用过程中的渗透挥发量是时间的线性函数,可通过关联系数进行预测。

根据式(3)计算该段时间的每日渗透量平均值,可算出胶管中汽油渗透排放率胶管如表3所示。低渗透1型胶管的防渗作用明显,胶管整体渗透速度小于 $1\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在HG/T 3037-2019中,软管燃油渗透性能指标中4A型为 $10\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,4B型为 $40\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,本研究中测试所用的5根常规胶管和1根低渗透胶管的数值低于该指标。

2.2 温度和湿度对胶管渗透排放量的影响

除了胶管本身的厚度、材料耐渗透性能等影响因素以外,环境因素也会对胶管的渗透排放过程产生影响。温度和湿度对胶管渗透排放量的影响如图4所示。当温度恒定时,不同湿度环境下胶管的渗透速率保持相对稳定,差别基本在 $\pm 5\text{ g}$ 以内,说明湿度与油品渗透速度无明显的相关性。在湿度恒定时,温度在 $5\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,渗透速率与温度近似呈线性变化。当环境温度升高,胶管内汽油分子获得更多的热能,运动速度加快,同时汽油分子更容易达到蒸发所需的能量阈值,蒸发速度加快;此外,汽油饱和蒸气压是温度的函数,汽油的饱和蒸气压升高,在汽油蒸发后在胶管内形成气相空间内,汽油蒸气分子的数量会增加,多因素协同增加油品渗透速率^[20]。

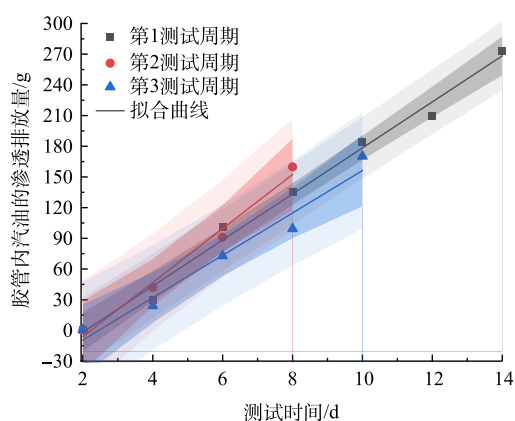


图3 CH1 夏季3次测试周期结果拟合图

Fig. 3 The fitting curve of three test cycle of CH1 in summer

表3 各型号加油胶管日渗透排放量

Table 3 Annual permeation emission amount of different tested hoses

加油胶管样品	$Q_d/(\text{g}\cdot\text{d}^{-1})$	$Q_{UL}/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	$Q_{HG}/\text{mL}\cdot(\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$
CH1	21.65	67.48	6.33
CH2	10.69	33.33	3.13
CH3	11.56	36.03	3.38
CH4	2.60	8.10	0.76
CH5	14.24	44.40	4.17
LH	0.18	0.59	0.05

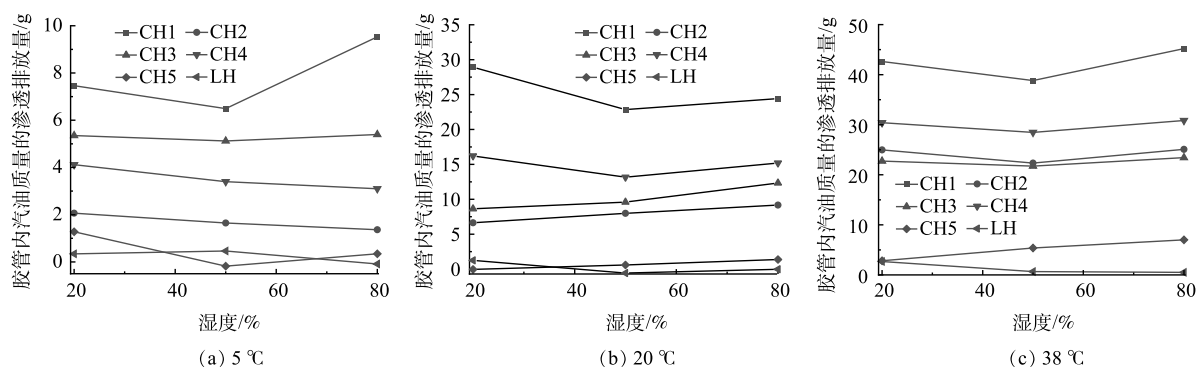


图4 不同温湿度下胶管渗透排放量

Fig. 4 Permeation emission amount of tested hoses under different temperature and humidity

低渗透型胶管 LH 在所有温湿度条件下均表现出良好的抗渗透性能,在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的平均胶管中汽油渗透排放率 Q_{UL} 为 0.67 、 0.61 、 $3.60\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,低于UL330标准中的数值。

本次测试采用的实验油品未覆盖乙醇汽油、甲醇汽油等类型,不同油品的扩散系数可能差异较大;且实验过程中内部油品为常压状态,加油站实际工况下胶管内部油品可能带有压力,对渗透排放因子产生影响;

此外,本研究选取均为全新加油胶管,随着实际使用时间延长,胶管受老化、冲蚀等影响,渗透排放因子也可能会发生变化,值得进一步开展详细研究。

3 本地化应用效果核算

3.1 本地化应用中低渗透胶管的优势

从我国以及北京市加油站述油气回收治理历程来看,大体是参照美国加州标准开展油气回收治理工作,其油气治理过程也与美国加州极其相似。因此,对于控制胶管渗透排放,在 2020 年发布的《加油站大气污染物排放标准(征求意见稿)》编制说明中,提出对加油胶管渗透的控制可以采用低渗透胶管;北京市计划 2030 年 80% 加油站满足 EVR 要求,使用 EVR 低渗透胶管^[21]。

如图 5 所示,普通加油胶管主要由 3 层结构组成,包括外胶层、增强层、内胶层。外胶层和内胶层均为橡胶,增强层为织物或金属丝编织而成,用来增强胶管的抗压性和强度。低渗透加油胶管在最内层进一步增设了防渗阻隔层,目前多使用 PA12、EVOH、PVDF 和 THV 等材料^[22]。本项目测试所用的自行研发低渗透型胶管 LH,为防止油品与丁腈内胶层直接接触产生渗透挥发,增设三元共聚氟树脂做为防渗阻隔层,根据防渗薄膜的渗透性和厚度倒数的关系图^[19],所开发的 LH 中三元共聚氟树脂薄膜厚度大于 0.286 mm。胶管内汽油挥发渗透后形成气相空间,胶管中汽油的扩散呈现稳态扩散特性,汽油存在浓度梯度,在一定程度上符合 Fick 定律。此外,汽油渗透过程中,汽油蒸气分子吸附在多孔的层结构表面,导致不同层结之间存在压力差,汽油分子的渗透扩散受到压力梯度的作用,遵循达西定律^[23]。根据本研究的测试结果,低渗透胶管 LH 在不同实验环境下测试所得渗透量均低于 UL330 标准中低渗透胶管 $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的限值。因此,防渗阻隔层材料的扩散系数和厚度是影响渗透排放因子的重要因素,可根据该指标要求选择合适的材料和厚度,以满足标准要求。



图 5 不同类型加油胶管的结构示意图

Fig. 5 Structures of different types of refueling hose

同时,油品充入 LH 胶管中静置存放 16 h 后,未洗胶质、溶剂洗胶质和硫含量等 3 项指标均未出现明显变化,防渗阻隔层同时起到能有效解决橡胶对油品的污染问题^[22]。

3.2 本地化应用中胶管渗透排放因子的换算

以年销售量为 5 000 t 的加油站为例,根据《汽车加油加气加氢站技术标准》(GB 50156-2021)^[24],该规模的加油站配置 8 把汽油加油枪和 8 根标准加油胶管,胶管内汽油年渗透排放量 Q_a 根据式 (10) 计算,胶管渗透排放因子 U_{ep} 根据式 (11) 计算。

$$Q_a = \frac{Q_d \times 8 \times d}{10^6} \quad (10)$$

式中: Q_a 为胶管内汽油年渗透排放量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; d 为加油站年运行天数, d , 取 365 d。

$$U_{ep} = \frac{Q_a \times 8}{M/\rho} \quad (11)$$

式中: U_{ep} 为胶管内汽油渗透排放因子, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; M 为加油站年汽油销售量, t, 取 500 0 t; ρ 为汽油的密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据《HJ 1118-2020》汽油密度为 $760 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25]。

按照表 3 测试结果,可计算得出不同型号胶管的排放因子如表 4 所示。CH1 型胶管的年渗透量最为 7.90 kg;低渗透 LH 胶管的防渗作用明显,年挥发油品质量预估仅为 0.069 kg。CH 的排放因子为 $1.15 \sim 9.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $5.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。LH 的渗透排放因子较 CH 平均降低 98% 以上,低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对比美国 CARB 得出的常规型胶管渗透排放因子为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与本研究实测得出的胶管渗透排放因子较为接近。

现有研究中给出的胶管渗透排放因子均为按每升加油量排放的汽油质量，根据本研究的实验结果，单个加油站的胶管渗透排放主要与加油站内配备的加油软管数量相关，与加油量相关性不大。此外，胶管材质、环境温度、油品类型等均会对胶管渗透排放因子产生较大的影响。按照加油站配备的不同加油胶管数量，按照常规加油胶管的渗透排放均值计算，可算出典型加油站胶管渗透排放因子，结果如表 5。

3.3 本地化应用中挥发量的核算

参照排放因子法计算得出的渗透排放量在加油胶管数量较少和较多的情况下，会与实际情况有较大误差。此外，按照我国加油站保有量 10.58×10^4 座计算，单站平均销售汽油 2 000 t 测算，则年汽油渗透挥发量为 1 500.24 t，若采用低渗透型加油软管，则年汽油渗透挥发量可降低至 23.22 t。若按单站平均 8 根胶管核算，年汽油渗透挥发量为 3 752.73 t；若均采用低渗透型加油软管，则年汽油渗透挥发量可降低至 58.40 t，具有较为显著的减排效益。

4 结论

- 1) 根据美国 UL 330 标准和 HG/T 3 037-2019 的测试规程，采用数据统计的方法，我国常规型胶管 CH 和低渗透型胶管 LH 的年渗透排放量 $0.95 \sim 7.90 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.069 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ；平均渗透排放因子分别为 $5.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.083 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，低渗透型胶管 LH 的排放因子较常规型胶管 CH 降低 98% 以上。
- 2) 温度影响胶管渗透排放量，恒湿条件下低渗透型胶管 LH 在 5、20 和 38 ℃ 下的平均胶管中汽油渗透排放率 Q_{UL} 为 0.67、0.61 和 $3.60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ；
- 3) 按单站胶管数量平均为 8 根，采用低渗透型加油胶管 LH，全国每年可减少汽油渗透挥发量近 3 700 t。

参 考 文 献

[1] ZHOU X, LI ZQ, ZHANG T J, et al. Multisize particulate matter and volatile organic compounds in arid and semiarid areas of Northwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 300: 118875.

[2] 王涵, 马军, 陈民, 等. 减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 936-944.

[3] 王燕军, 吉喆, 谢琼, 等. 汽油存储过程 VOCs 排放影响因素研究[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 523-529.

[4] 黄玉虎, 胡玮, 李贝贝, 等. 北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 618-625.

[5] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用[J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4103-4109.

[6] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. *环境科学*, 2017, 38(3): 845-854.

[7] 王振中, 朱玲, 李栖楠, 等. 加油站埋地油罐呼吸排放因子法的本地化应用[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(5): 1562-1569.

[8] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 加油站大气污染物排放标准: GB 20952-2020, [S/OL]. (2020-12-28), https://www.mee.gov.cn/yw/gz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrfbz/202012/t20201231_815640.shtml.

[9] 北京市生态环境局. 加油站油气排放控制和限值: DB 11/208-2023[S/OL]. (2023-10-10). <https://sthjj.beijing.gov.cn/eportal/fileDir/bjhrb/resource/cms/article/679767/436248934/2023110613053117479.pdf>.

[10] California Air Resources Board. Revised emission factor for gasoline marketing operations at California gasoline dispensing facilities[R]. SacramentoCA: California Air Resources Board, 2013.

[11] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 北京市 1990-2030 年加油站汽油 VOCs 排放清单[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(7): 945-951.

[12] 赵瀚森, 刘峰均, 张夏夏, 等. 工业园区大气污染物排放总量核算模型优化算法反演性能对比[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(4): 1232-1238.

[13] 美国加利福尼亚空气资源委员会. 油气回收系统认证和测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

[14] Underwriters Laboratories Inc. Hose and Hose Assemblies for Dispensing Flammable Liquids: UL 330-2013[S]. Northbrook, Illinois, USA, Underwriters

- Laboratories, 2013.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 计量分配燃油用橡胶和塑料软管及软管组合件: HG/T 3037-2019[S/OL]. (2019-11-24). <https://max.book118.com/html/2020/1105/5331333131003021.shtml>.
- [16] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用(第4版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [17] 赵君志. 加油机胶管对油品硫含量的影响[J]. 石油库与加油站, 2017, 26(6): 26-28.
- [18] 任连岭, 谭志坚. 车用汽油与橡胶的相容性研究[J]. 石油商技, 2011, 29(5): 46-50.
- [19] 修德欣, 王振中, 张健中, 等. 防污染低渗透加油机胶管研发及测试[J]. 安全、健康和环境, 2017, 17(1): 25-28.
- [20] 朱玲, 陈家庆, 柳岩, 等. 汽油挥发过程的实验分析[J]. 车用发动机, 2011, 2: 68-72.
- [21] 胡玮, 黄玉虎, 梁文俊, 等. 加油站油气处理装置 VOCs 化学组成及二次污染生成贡献[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 709-718.
- [22] 王振中. 加油胶管对油品质量的影响及对策研究[J]. 安全、健康和环境, 2018, 18(10): 42-45.
- [23] ZHU L, CHEN J Q, LIU Y, et al. Experimental analysis of the evaporation process for gasoline[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(6): 916-922.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 汽车加油加气加氢站技术标准: GB50156-2021[S/OL]. (2021-06-28). https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_761415.html.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 车用汽油: GB 17930-2016[S/OL]. (2016-12-23). <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=C45A3554980A86E41F5AA4C6F3D48DC1>.

(责任编辑: 曲娜)

Testing of permeation emission factors for fuel dispensing hoses and localized VOCs reduction accounting

WANG Zhenzhong^{1,*}, XIU Dexin¹, GUO Yanli², ZHU Ling³

1. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co. Ltd., Qingdao 266100, China; 2. SINOPEC Beijing Oil Products Company, Beijing 100010, China; 3. Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

*Corresponding author, E-mail: wangzzcn.qday@sinopec.com

Abstract To further improve the VOCs emission factor system for gas stations and enhance the accuracy of VOCs emission statistics for pollution and carbon reduction, this study referenced the U.S. UL 330 standard and the HG/T 3037-2019 testing protocol. Using the gravimetric method, we measured the permeation emission factors of commercially available conventional fuel hoses (CH1~CH5) and low-permeation hoses (LH), analyzed the effects of humidity and temperature on gasoline permeation emissions, and conducted localized VOCs reduction accounting. Based on statistical mean, variance, and coefficient of variation, the daily average permeation quantity (Q_{d2}) was selected as the representative data. The results showed that gasoline permeation emissions from conventional hoses (CH) exhibited a linear correlation with time, with annual permeation ranging from 0.95 to 7.90 kg·a⁻¹. In contrast, low-permeation hoses (LH) reduced emission factors by over 98%. Gasoline permeation was significantly influenced by hose material and ambient temperature. Under constant humidity, LH hoses demonstrated average permeation rates (Q_{UL}) of 0.67, 0.61, and 3.60 g·(m²·d)⁻¹ at 5 °C, 20 °C, and 38 °C, respectively. The average permeation emission factors for CH and LH were 5.39 mg·L⁻¹ and 0.0834 mg·L⁻¹, respectively. Scenario analysis revealed that replacing conventional hoses with LH (assuming 8 hoses per station) could reduce nationwide gasoline permeation emissions by approximately 3 700 tons annually, demonstrating significant pollution and carbon reduction benefits.

Keywords fuel hose; VOCs emission reduction; permeation emission factor; localization application; effectiveness accounting