

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.004

环境因子对污水管道油脂沉积物物化特性的影响

张志强^{1,2}, 孙逸帆¹, 刘雨欣¹, 张子庚¹, 李 瑾¹, 卢金锁¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 哈尔滨工业大学
城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 油脂沉积物生成及其聚集引起的污水管网淤积堵塞问题突出,严重影响管网的污水收运能效。为此,选择pH、温度及钙离子浓度这3种影响油脂沉积物生成的主要环境因子,分析油脂沉积物颗粒分布、含水率、皂化率、表面基团组成、亲疏水性等物化特性,研究环境因子对油脂沉积物物化性质的影响规律,并采用XDLVO理论分析油脂沉积物颗粒间的热力学聚集趋势。结果表明,油脂沉积物颗粒平均粒径受上述环境因子影响显著,pH、温度及钙离子浓度的增加均可提高钙基脂肪酸盐的生成速率,并使得油脂沉积物的皂化率升高;碱性、低温及低钙离子浓度条件下油脂沉积界面黏附自由能可降至 -44.56 mJ/m^2 ,油脂沉积物聚集黏附过程更易发生。在污水管道淤积管理中,应加强对污水pH和钙离子浓度的监测,需特别注意低温期油脂沉积物淤积堵塞问题。

关键词: 污水管道; 油脂沉积物; 物化特性; 环境因子; 淤积管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0024-07

Impact of Environmental Factors on Physicochemical Properties of Fat, Oil and Grease Deposits in Sewage Pipes

ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, SUN Yi-fan¹, LIU Yu-xin¹, ZHANG Zi-geng¹, LI Jin¹,
LU Jin-suo¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The issue of siltation and blockage in sewage pipe network due to the formation and accumulation of fat, oil, and grease deposits is significant, severely impacting the efficiency of sewage collection and transportation within the network. This study selected the main factors including pH, temperature, and calcium ion concentration affecting fat, oil, and grease deposits formation as influencing variables, and analyzed the physicochemical properties of the deposits, including particle size distribution, moisture content, saponification rate, surface group composition, as well as hydrophilicity and hydrophobicity, aiming to investigate the impact of environmental factors on the physicochemical characteristics of the deposits. Additionally, the thermodynamic aggregation tendency among deposit particles was evaluated using the XDLVO theory. The average particle size of the deposit particles was significantly influenced by the environmental factors. An increase in pH, temperature, and calcium ion

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52370100、U24A20191)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

concentration enhanced the formation rate of calcium-based fatty acid salts and accelerated the saponification process of the deposits. The interfacial adhesion free energy of the deposits decreased to -44.56 mJ/m^2 under alkaline, low temperature, and low calcium ion concentration conditions, thereby facilitating the aggregation and adhesion of the deposits. In the management of sewage pipe siltation, it is crucial to enhance the monitoring of sewage pH and calcium ion concentration. Particular attention should be given to the issue of fat, oil, and grease deposition leading to siltation and blockage during low temperature periods.

Key words: sewage pipe; fat, oil and grease deposits; physicochemical property; environmental factor; siltation management

当前,我国污水管网淤积堵塞问题突出,是最为常见的管网功能性病害问题之一,严重影响污水输运能效。大量研究表明,因油脂沉积物(FOGDs)淤积导致的污水管道堵塞在世界范围内具有普遍性^[1-2],成为限制污水管网运行效能的共性问题。源于厨余废弃物中的油脂污染物进入管道后水解产生游离脂肪酸(FFA),并进一步与钙离子生成钙基脂肪酸盐颗粒,其相互聚集并伴随着未反应的游离脂肪酸的表面积累,最终淤积在管道内部,形成油脂沉积物淤积体,导致管道堵塞。因此,采用隔油池在源头将污水中的油脂污染物进行分离,能够有效控制油脂污染物进入污水管道,从而减少油脂沉积物的生成和淤积。然而,最新研究表明,经隔油池分离后,仍有20%~50%的微细油脂类污染物(粒径 $\leq 45 \mu\text{m}$)及其水解产物FFA进入污水管道,油脂沉积物的生成风险仍然较高。

通过模型预测油脂沉积物的淤积过程是解决污水管道堵塞问题的重要手段^[3]。Iasmin等人结合典型油脂污染物水解及FFA皂化过程,研究了脂肪类型、钙源、pH和温度等因素下油脂沉积物生成动力学,并基于质量作用定律建立了油脂沉积物生成动力学模型,从动力学角度描述实验条件下油脂沉积物的生成过程^[4]。但污水管网环境复杂,该模型未系统考虑不同环境因子下生成的油脂沉积物物化特性的差异性,缺少对油脂沉积物生成及黏附聚集过程的热力学分析,对实际管道中油脂沉积物淤积的预测能力有限。

鉴于此,笔者选取pH、温度及钙离子浓度这3种影响油脂沉积物生成的主要环境因子,以油脂沉积物颗粒分布、含水率、皂化率、亲疏水性为分析对象,研究环境因子对油脂沉积物物化性质的影响规

律,并在此基础上采用XDLVO理论分析油脂沉积物颗粒间黏附聚集的热力学机制,以期油脂沉积物生成预测模型构建和污水管道淤积风险控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 油脂沉积物生成实验

为了避免多因素相互干扰,油脂沉积物采用文献[5]中的方法在实验室生成,具体的生成条件见表1。首先,将一定量 CaCl_2 标准溶液加入600 mL去离子水中,使反应液中的 Ca^{2+} 浓度达到预定值,并采用0.1 mol/L的NaOH和盐酸溶液调节初始pH;然后,在磁力搅拌 $[(400 \pm 20) \text{ r/min}]$ 条件下,向反应液中一次性加入5 mL棕榈油;为了保障每组实验的一致性,最后采用去离子水将反应液定容至700 mL,每组实验均设置3个平行,反应温度通过水浴进行控制。反应结束后收集黏附的油脂沉积物用于后续物化特性分析,同时于西安市实际污水管道中采集油脂沉积物样品进行对比分析。

表1 油脂沉积物的生成条件

Tab.1 Condition of FOGDs formation

编号	pH	$\text{Ca}^{2+}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	编号	pH	$\text{Ca}^{2+}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	5	300	15	9	7	300	23
2	6	300	15	10	7	300	25
3	7	300	15	11	7	150	15
4	8	300	15	12	7	225	15
5	9	300	15	13	7	300	15
6	7	300	15	14	7	375	15
7	7	300	17	15	7	450	15
8	7	300	20				

1.2 油脂沉积物的物化特性分析方法

将采集的油脂沉积物样品分别通过体积法和

重量法测定其密度和含水率。油脂沉积物颗粒粒径分布采用激光粒度分析仪进行分析。油脂沉积物表面基团采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)进行分析,将冷冻干燥的油脂沉积物样品以1:100的比例与KBr混合后压片,在 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围内测定样品的红外吸收光谱。油脂沉积物的钙基脂肪酸盐皂化率根据Benecke等人^[6]的实验方法进行测定,将5 g冷干后的油脂沉积物投加到100 mL二氯甲烷溶液中,混合搅拌18 h,随后静置1 h以上,然后将混合物通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 膜过滤器,分析钙基脂肪酸盐所占比例,计算皂化率。油脂沉积物的亲疏水性采用接触角测量仪进行分析,为了保证测量时油脂沉积物表面的平整性,利用超声波细胞破碎仪将油脂沉积物分散后重新过滤,冷冻干燥后上机测定。

1.3 XDLVO相互作用能分析

油脂沉积物颗粒间的总相互作用能可以表示为范德华相互作用能、静电相互作用能和路易斯酸碱水合能之和,将总能量表示为油脂沉积物颗粒分散距离的函数,假定颗粒为规则球体,根据表面热力学方法计算各自能值。

2 结果与讨论

2.1 油脂沉积物的物理特性及颗粒尺寸分布

密度及含水率是油脂沉积物重要的物理指标,直接影响油脂沉积物聚集和淤积行为特性。不同影响因子条件下油脂沉积物的密度及含水率变化如图1所示。

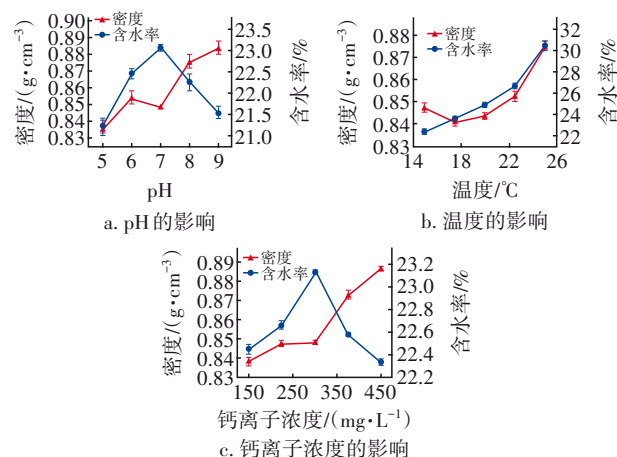


图1 pH、温度和钙离子浓度对油脂沉积物密度及含水率的影响

Fig.1 Effect of pH, temperature and calcium ion concentration on the density and moisture content of FOGDs

从图1可以看出,pH、反应温度及钙离子浓度对油脂沉积物的密度和含水率影响显著。由图1(a)可知,随着pH的升高,油脂沉积物的密度从 0.83 g/cm^3 增至 0.88 g/cm^3 ,当pH在5~7范围内时对油脂沉积物的密度影响最为显著,而当 $\text{pH}>7$ 时,油脂沉积物的密度受pH影响较小;油脂沉积物的含水率随着pH的增加呈现出明显的“火山型”变化规律,当 $\text{pH}=7$ 时含水率达到最高值23.2%。图1(b)显示,油脂沉积物的密度和含水率均随着反应温度的升高而增加。图1(c)显示,随着钙离子浓度的增加,油脂沉积物的含水率先升高再降低,但密度呈持续增加趋势。

从图1还可以看出,尽管随着pH、温度及钙离子浓度的增加,油脂沉积物的密度有所提高,但其最大密度仍小于水的密度,这是因为油脂沉积物中油脂的存在,也说明油脂沉积物形成淤积主要原因在于相互聚集及其与管壁间的黏附作用,而非物理沉积作用。需要指出的是,在实际调研样品中,部分油脂沉积物的密度大于水的密度,这是由于油脂沉积物黏附了无机颗粒(如黏土、砂砾等)。油脂沉积物的含水率与其孔隙率强相关,当pH及钙离子浓度较低时,会影响皂化反应成核速率,当pH或钙离子浓度相对较高时,钙离子的水解作用会抑制钙基脂肪酸盐的生成,导致油脂沉积物的孔隙率较低;而当反应温度提高时,皂化反应速率加快,钙基脂肪酸盐成核速率提升,会形成多孔的油脂沉积物结构。

综上可知,油脂沉积物淤积的主要成因在于初始形成的油脂沉积物颗粒间的相互聚集黏附作用。游离脂肪酸和钙离子的皂化反应是形成油脂沉积物的关键机制,而pH、反应温度和钙离子浓度会影响皂化反应^[7],从而影响反应进程和速度。另外,该实验分析了不同影响因子条件下油脂沉积物颗粒的尺寸分布,结果如图2所示。可以看出,在不同实验条件下油脂沉积物颗粒的粒径分布具有显著差异性。由图2(a)可知,油脂沉积物在中性条件下($\text{pH}=7$)的平均粒径为 $365.9\text{ }\mu\text{m}$,大于酸性和碱性条件下的平均粒径(当pH为5、6、8、9时,平均粒径分别为124.1、156.4、350.4、299.7 μm);总体来看,碱性条件的平均粒径显著高于酸性条件。由图2(b)可知,当反应温度由 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,平均粒径略有减小,从 $307.8\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $304.3\text{ }\mu\text{m}$,但随着反

应温度的进一步升高,油脂沉积物的粒径明显减小,当反应温度分别升至20、23、25℃时,平均粒径依次降至272.0、104.9、70.63 μm,这可能是由于高温条件使得钙基脂肪酸盐成核较快。图2(c)显示,油脂沉积物的粒径随着钙离子浓度的增加而增大,当钙离子浓度由150 mg/L分别增至225 mg/L和300 mg/L时,平均粒径由37.6 μm分别增至99.3 μm和

333.8 μm;但当钙离子浓度高于300 mg/L时,油脂沉积物粒径出现了较大幅度的下降,当钙离子浓度分别为375、450 mg/L时,平均粒径分别降至243.8、78.7 μm。可以看出,钙离子浓度对油脂沉积物的聚集有很大影响,说明钙离子在与游离脂肪酸发生皂化反应生成的钙基脂肪酸盐的聚集过程中发挥了重要作用^[8]。

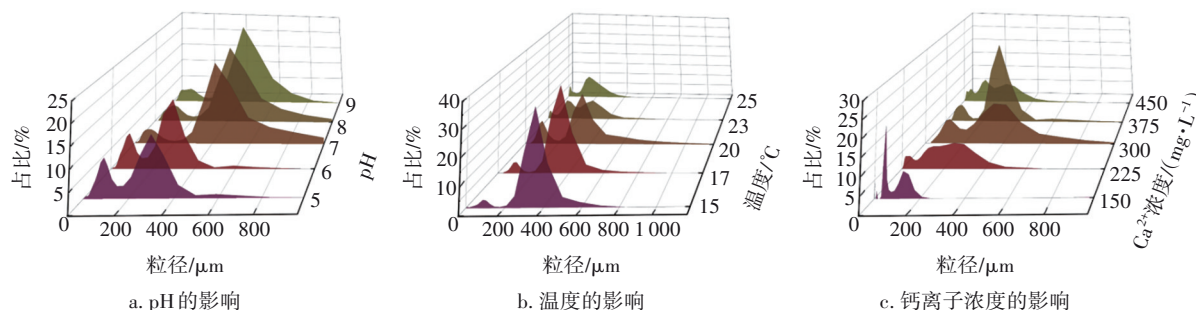


图2 pH、温度和钙离子浓度对油脂沉积物粒径的影响

Fig.2 Effect of pH, temperature and calcium ion concentration on size of FOGDs

以上结果表明,适中的pH条件更有利于游离脂肪酸和钙离子之间的相互作用,促进皂化反应;但过高的pH会导致微溶性氢氧化钙的生成,从而降低溶液中的钙离子浓度,影响油脂沉积物的聚集^[9]。同时,pH会影响游离脂肪酸和钙离子相互作用形成的钙皂的溶解度和稳定性,进而影响油脂沉积物的粒径。温度升高通常会导致反应速度加快,在皂化过程中,这会导致游离脂肪酸和钙离子的反应更加迅速,从而形成更小、更密实的沉积物。钙离子浓度的升高有利于皂化反应,所以当钙离子浓度小幅增加时粒径增大;但是,当钙离子浓度过高时,粒径出现减小的现象,这是因为油在水中的分散状态对沉积物的形成起着至关重要的作用,高浓度带正电的钙离子可能会影响油类的分散状态、亲疏水性等,使沉积物的形成更具难度。

2.2 油脂沉积物的物化性质

皂化率是指油脂沉积物中钙基脂肪酸盐的含量,通过计算油脂沉积物的皂化率来表征皂化反应的进行程度。图3为不同影响因素条件下生成的油脂沉积物的皂化率。可以看出,随着pH、温度和钙离子浓度的升高,油脂沉积物的皂化率亦升高。在图3(b)中,皂化率从15℃的28.2%升至25℃的31.3%,表明温度对皂化率有较大的影响。

研究表明,物质成核过程是颗粒发育生长的重要起点^[10]。在油脂沉积物聚集初期,钙基脂肪酸盐

充当了“核心”的作用,钙基脂肪酸盐的形成是油脂沉积物皂化反应的结果体现。从图3(a)可以看出,随着pH的升高,皂化率也上升,说明碱性条件下更有利于油脂的水解和皂化反应的发生,这与文献报道结果一致^[9]。图3(b)和(c)表明,较高的温度和钙离子浓度提高了皂化反应速率,使得油脂沉积物的生成速率增加^[11]。此外,皂化率的变化与密度变化基本一致,说明皂化过程生成的钙基脂肪酸盐是影响油脂沉积物密度的关键因素。

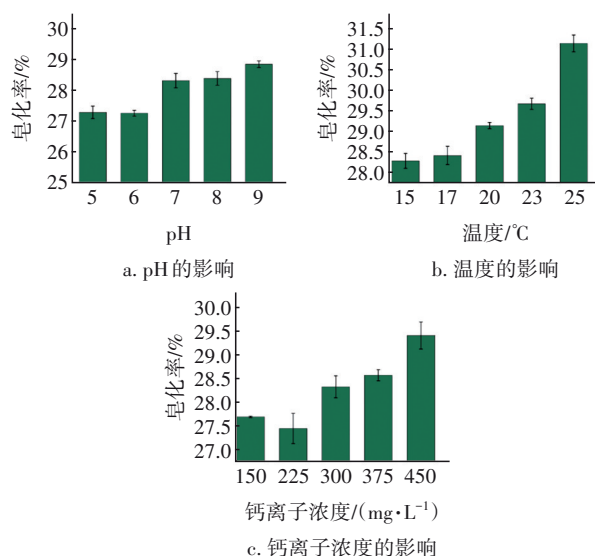


图3 pH、温度和钙离子浓度对油脂沉积物皂化率的影响

Fig.3 Effect of pH, temperature and calcium ion concentration on saponification ratio of FOGDs

利用FTIR对不同条件下形成的油脂沉积物表面官能团进行分析,结果如图4所示。可以看出,在不同条件下生成的油脂沉积物的FTIR图谱基本相似,在 $1\,550\sim 1\,610\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 $-\text{COOH}$ 吸收峰^[12]。根据He等人^[9]的研究,油脂沉积物中存在的 $-\text{COOH}$ 可能代表了中间皂化反应和未反应的过量FFA,这可能有助于油脂沉积物的形成。在 $1\,745$

cm^{-1} 附近的红外吸收峰代表了 $-\text{COOH}$ 的拉伸振动,说明油脂沉积物基质中可能存在未反应的液体脂肪而导致出现了三酰基甘油(TAG)的酯键。此外,在 670 cm^{-1} 附近的光谱观测结果表明 $\text{Ca}-\text{O}$ 键的存在。从图4还可以看出,实验室条件下形成的油脂沉积物与实际管道中的油脂沉积物的红外特征峰相同^[13],说明两者在物化成分上具有一致性。

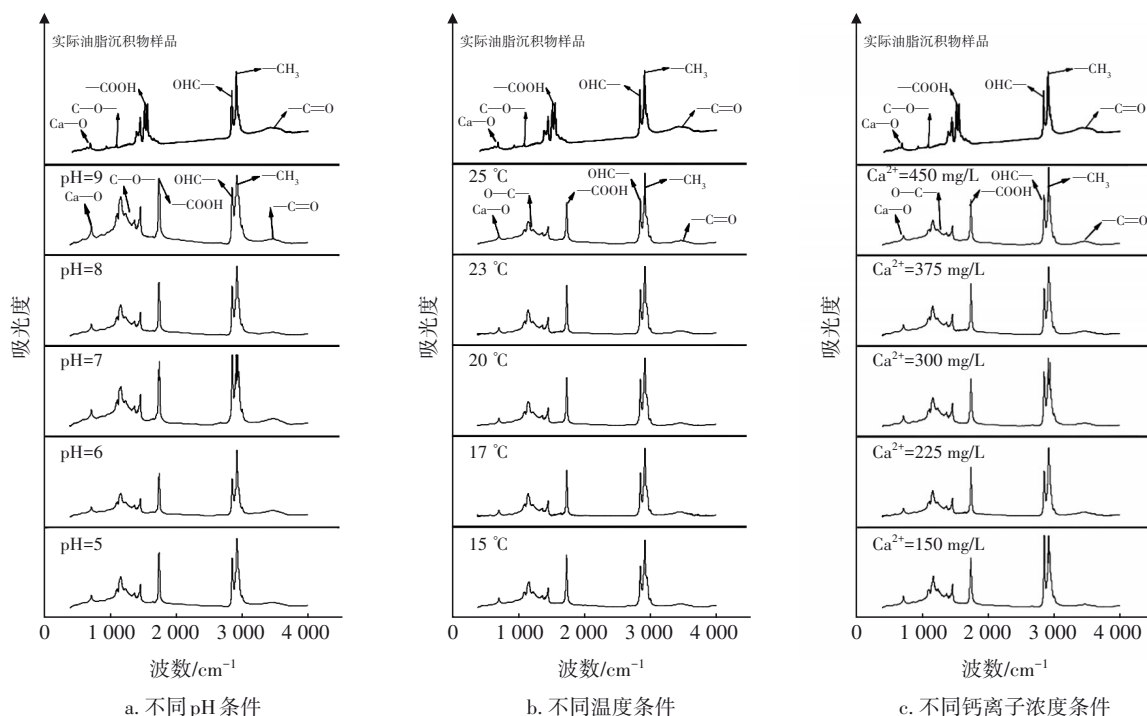


图4 不同条件下生成的油脂沉积物的FTIR图谱

Fig.4 FTIR spectra of FOGDs formed under different conditions

2.3 油脂沉积物界面相互作用

油脂沉积物的亲疏水性是影响其相互黏附的重要指标,疏水性是促进油脂沉积物形成的初始驱动力之一,也是沉积物聚集的关键因素^[14]。如前所述,油脂沉积物表面疏水性的增强有利于促进沉积物聚集,从而形成更紧密的三维颗粒结构^[15]。测定不同条件下生成的油脂沉积物的接触角来表征其亲疏水性,结果如图5所示。

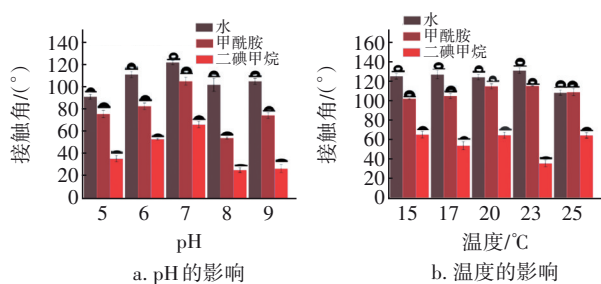


图5 pH、温度和钙离子浓度对油脂沉积物亲疏水性的影响

Fig.5 Effect of pH, temperature and calcium ion concentration on hydrophilicity of FOGDs

从图5(a)和(c)可以看出,油脂沉积物与水的接触角随pH和钙离子浓度的增加呈现先增大后减小的趋势。当 $\text{pH}=7$ 、钙离子浓度为 300 mg/L 时,油脂沉积物呈现出显著的疏水性(接触角为 122.82°);而当 $\text{pH}=5$ 时,疏水性显著下降(接触角为 89.24°)。图5(b)则显示出不同温度下的接触角基

本变化不大,大部分保持在 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 范围内,在温度达到 25°C 后油脂沉积物与水与甲酰胺的接触角分别降至 106.32° 和 106.21° ,与二碘甲烷的接触角升至 66.45° 。

基于以上结果,计算油脂沉积物的自由能及与表面热力学相关的参数,用于分析油脂沉积物颗粒间的黏附具体特性^[16],结果如图6所示。当 $\text{pH}=5$ 时,界面自由能 $\Delta G_{\text{adh}}=-19.62\text{ mJ/m}^2$,在 $\text{pH}>5$ 后,随着 pH 的增加,界面自由能略有波动,但均保持在较低水平。当温度逐步上升时,油脂沉积物的界面自由能从 -38.85 mJ/m^2 逐渐升至 -12.36 mJ/m^2 ,说明较低温度条件下油脂沉积物更容易发生聚集黏附过程^[17]。在钙离子浓度升高过程中,油脂沉积物的界面自由能仅从 -44.53 mJ/m^2 升至 -37.03 mJ/m^2 ,说明钙离子浓度的增加对油脂沉积物的界面自由能影响较小。

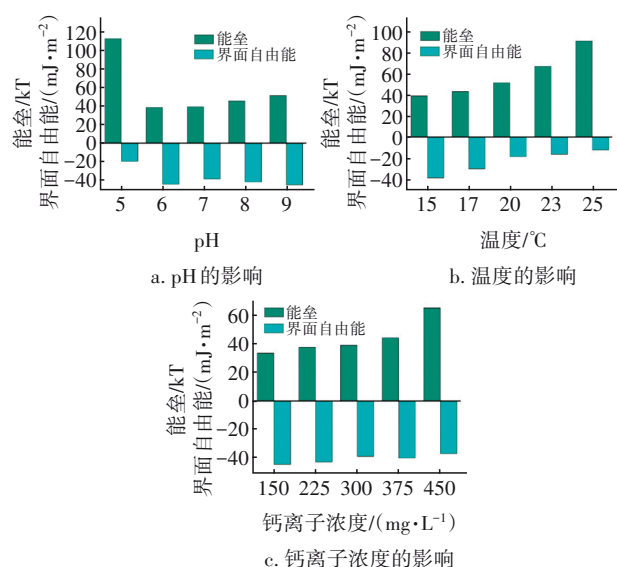


图6 pH、温度和钙离子浓度对油脂沉积物能垒与界面自由能的影响

Fig.6 Effects of pH, temperature and calcium ion concentration on energy barriers and surface free energy of FOGDs

利用XDLVO理论分析油脂沉积物相互聚集过程的颗粒排斥能垒。图6(a)显示,当 $\text{pH}=5$ 时能垒为 113 kT ,当 pH 升至6时能垒降至 38.67 kT ,之后随着 pH 的升高能垒呈上升趋势,说明在中性及碱性条件下更易发生油脂沉积物聚集现象。图6(b)显示,能垒从 15°C 的 39.14 kT 上升至 25°C 的 91.28 kT ,上升趋势和界面自由能一致。如图6(c)所示,

当钙离子浓度由 150 mg/L 增至 300 mg/L 时,能垒仅小幅上升,从 33.59 kT 升至 39.14 kT ,但在钙离子浓度高于 300 mg/L 后,能垒升幅增大,并在钙离子浓度达到 450 mg/L 时激增至 65.38 kT 。上述结果进一步表明, pH 和温度对油脂沉积物聚集和黏附的影响显著,而钙离子浓度增加时油脂沉积物的界面自由能无显著变化,但其颗粒聚集能垒显著提高,说明聚集难度增加。因此,在实际污水管道运维管理工作中,应加强对低温期油脂沉积物淤积堵塞问题的关注。

不同环境因子下油脂沉积物的物化特性相关性分析结果如图7所示。油脂沉积物颗粒间的能垒与 pH 呈负相关,与温度和钙离子浓度呈正相关,其中钙离子浓度对能垒的积极影响最大;另外,能垒与粒径呈负相关,证明能垒越大油脂沉积物越难聚集,粒径和密度的负相关则说明油脂沉积物中油脂量越高则密度越小。同时可以看到, pH 对油脂沉积物粒径和密度的影响最显著,而温度对含水率和皂化率的影响最显著。

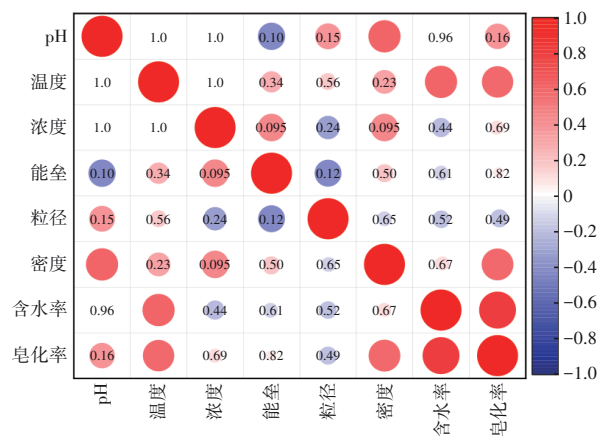


图7 不同环境因子下油脂沉积物的物化特性相关性

Fig.7 Correlation of physicochemical properties of FOGDs under different environmental factors

3 结论

油脂沉积物的密度随 pH 、温度及钙离子浓度的增加而增加,含水率随 pH 及钙离子浓度的升高而呈现“火山型”变化趋势;随着 pH 、温度及钙离子浓度的增加,皂化反应速率加快,其中温度的影响突出,当温度从 15°C 升至 25°C 时,皂化率增加了 11.26% ;中碱性和低温条件下油脂沉积物的界面自由能显著下降,油脂沉积物聚集黏附趋势增加。建议加强对污水 pH 、温度及钙浓度的监测分析,用以

评估油脂沉积物的形成风险,尤其应加强低温期污水管道油脂沉积物淤积问题的管控工作。

参考文献:

- [1] ZAN F, IQBAL A, LU X, *et al.* “Food waste–wastewater–energy/resource” nexus: integrating food waste management with wastewater treatment towards urban sustainability [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118089.
- [2] WILLIAMS J B, CLARKSON C, MANT C, *et al.* Fat, oil and grease deposits in sewers: characterisation of deposits and formation mechanisms [J]. *Water Research*, 2012, 46(19): 6319–6328.
- [3] JIANG Y, LI C, ZHANG Y, *et al.* Data-driven method based on deep learning algorithm for detecting fat, oil, and grease (FOG) of sewer networks in urban commercial areas [J]. *Water Research*, 2021, 207: 117797.
- [4] IASMIN M, DEAN L O, DUCOSTE J J. Quantifying fat, oil, and grease deposit formation kinetics [J]. *Water Research*, 2016, 88: 786–795.
- [5] IASMIN M, DEAN L O, LAPPI S E, *et al.* Factors that influence properties of FOG deposits and their formation in sewer collection systems [J]. *Water Research*, 2014, 49: 92–102.
- [6] BENECKE H P, ALLEN S K, GARBARK D B. Efficient fractionation and analysis of fatty acids and their salts in fat, oil and grease (FOG) deposits [J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66(2): 123–131.
- [7] BUSCH T P, KING A J. Artifact generation and monitoring in analysis of cholesterol oxide products [J]. *Analytical Biochemistry*, 2009, 388(1): 1–14.
- [8] KEENER K M, DUCOSTE J J, HOLT L M. Properties influencing fat, oil, and grease deposit formation [J]. *Water Environment Research*, 2008, 80(12): 2241–2246.
- [9] HE X, IASMIN M, DEAN L O, *et al.* Evidence for fat, oil, and grease (FOG) deposit formation mechanisms in sewer lines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4385–4391.
- [10] ZHANG B, LI W, WU L, *et al.* Rapid start-up of photo-granule process in a photo-sequencing batch reactor under low aeration conditions: effect of inoculum AGS size [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153204.
- [11] IASMIN M, DEAN L O, DUCOSTE J J. Quantifying fat, oil, and grease deposit formation kinetics [J]. *Water Research*, 2016, 88: 786–795.
- [12] POULENAT G, SENTENAC S, MOULOUGUI Z. Fourier-transform infrared spectra of fatty acid salts—kinetics of high-oleic sunflower oil saponification [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2003, 6: 305–310.
- [13] HE X, DE LOS REYES F L, LEMING M L, *et al.* Mechanisms of fat, oil and grease (FOG) deposit formation in sewer lines [J]. *Water Research*, 2013, 47(13): 4451–4459.
- [14] LIU Y, TAY J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, 22(7): 533–563.
- [15] ADAV S S, LEE D J, SHOW K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(5): 411–423.
- [16] BRANT J A, CHILDRESS A E, *et al.* Assessing short-range membrane–colloid interactions using surface energetics [J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 203(1/2): 257–273.
- [17] LIU X M, SHENG G P, WANG J, *et al.* Quantifying the surface characteristics and flocculability of *Ralstonia eutropha* [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 79: 187–194.

作者简介:张志强(1988–),男,黑龙江拜泉人,博士,教授,主要从事城镇给排水管网运行风险控制与低碳运维研究。

E-mail: zzq@xauat.edu.cn

收稿日期:2024-05-11

修回日期:2024-07-12

(编辑:刘贵春)