

DOI: 10.3901/JME.2023.16.204

# 高流速强湍流下关键因素对环烷酸腐蚀的影响行为研究<sup>\*</sup>

饶思贤<sup>1,2</sup> 华晓春<sup>1</sup> 赵新生<sup>1</sup> 郭祥钦<sup>1</sup> 赵 丽<sup>1</sup> 王孝义<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学机械工程学院 马鞍山 243032;

2. 合肥通用机械研究院国家压力容器与管道安全工程技术中心 合肥 230031)

**摘要:** 加工劣质高酸原油时炼油装置中存在较严重的环烷酸腐蚀, 为保障炼油装置的安全性需要明确关键影响因素对环烷酸腐蚀的影响规律, 从而实现准确的腐蚀预测或寿命评估。针对温度、活性硫化物含量、流速、冲刷角、湍流强度等关键因素对环烷酸腐蚀影响规律进行研究, 确定腐蚀速率与温度之间的量化关系; 引入硫化物含量对环烷酸腐蚀速率的等温线评价; 明确环烷酸腐蚀存在由 0°冲刷角下均匀腐蚀向高冲刷角下局部点蚀的转化, 在 0°冲刷角下流速可明显提高环烷酸腐蚀速率, 但不改变均匀腐蚀形态, 当冲刷角达到 15°时即可出现点蚀, 当冲刷角达到 90°时, 环烷酸腐蚀转化为点蚀为主, 且点蚀最大腐蚀深度与局部湍流强度密切相关, 高湍流强度下点蚀更为严重。

**关键词:** 环烷酸腐蚀; 硫化物含量; 流速; 冲刷角; 湍流强度

**中图分类号:** TG172

## Influence of the Key Factors of Naphthenic Acid Corrosion under High Flow Rate and Strong Turbulence

RAO Sixian<sup>1,2</sup> HUA Xiaochun<sup>1</sup> ZHAO Xinsheng<sup>1</sup> GUO Xiangqin<sup>1</sup>  
ZHAO Li<sup>1</sup> WANG Xiaoyi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032;

2. National Engineering Technical Research Center on PVP Safety,  
Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031)

**Abstract:** Serious naphthenic acid corrosion existed during inferior high acid crude oil refining. The influencing rules of the key factors on naphthenic acid corrosion should be confirmed to achieve the goal of precise corrosion predication or lifetime assessment to ensure the safety of crude oil refining equipments. The influence of key factors such as temperature, content of active sulfides, flow rate, flushing angle and turbulence intensity on naphthenic acid corrosion is studied, the relationship between temperature and corrosion rate is confirmed and the isothermal assessment of active sulfides on naphthenic acid corrosion is introduced; the transformation from uniform corrosion at 0° flushing angle to pitting corrosion at high flushing angles is clarified, the increase of flow rate could accelerate naphthenic acid corrosion but could not change its uniform corrosion mode, when the flushing angle is increased to 15°, small corrosion pits formed, when the flushing angle is increased to 90°, naphthenic acid corrosion transformed to pitting corrosion, the maximum corrosion depth of corrosion pits is closely related with local turbulence intensity, naphthenic acid pitting corrosion became more serious under high turbulence intensity.

**Key words:** naphthenic acid corrosion; content of active sulfides; flow rate; flushing angle; turbulence intensity

<sup>\*</sup> 国家科技部国家高技术研究发展计划(2012AA040103)、安徽省科技厅自然科学基金面上(1908085ME148)、安徽省教育厅自然科学重大研究(KJ2016SD09)资助项目。20220828 收到初稿, 20221222 收到修改稿

## 0 前言

炼制劣质高酸原油具有更高收益率，我国每年加工的劣质高酸原油已超 2 亿 t 且进口、加工高酸原油量持续攀升中。但高酸原油中的环烷酸会大范围引发原油蒸馏装置及管线的腐蚀，尤其在常压塔、减压塔、转油线等存在高流速、强湍流的区域环烷酸腐蚀最为严重，目前国内外采用的标准化选材、传统腐蚀防控技术无法应对高酸原油劣质化、多变化引起的局部的、动态的环烷酸腐蚀失效<sup>[1-2]</sup>；为保证安全生产，保障炼油设备正常运行中“不漏不爆”，明确高流速强湍流下的环烷酸腐蚀机制、腐蚀规律并实现准确的腐蚀预测或寿命评估是亟待开展的研究<sup>[3-4]</sup>。

高流速强湍流下的环烷酸腐蚀由高速流冲刷腐蚀和高温环烷酸腐蚀耦合形成。低流速下低湍流下环烷酸腐蚀主要呈均匀腐蚀形貌；高流速强湍流下腐蚀形貌可转为局部边界锐利的凹坑腐蚀形貌<sup>[5-6]</sup>。由于高流速强湍流下局部环烷酸腐蚀最为严重，因此预测、评估高流速下环烷酸腐蚀，应重点关注高流速强湍流下腐蚀凹坑的形成机制，明确腐蚀坑在最大腐蚀深度上的扩展规律，从而有效预测有关设备剩余厚度以保障设备安全运行。

已明确的环烷酸腐蚀影响因素包括材质、温度、酸值(Total acid number, TAN, 以酸中和值表达, 单位 mgKOH/g 表示每克环烷酸中和时需要 KOH 的毫克数)和酸组成、活性硫化物含量等多个因素<sup>[7-12]</sup>。严重的环烷酸腐蚀一般发生于高流速强湍流条件下，因此环烷酸腐蚀还需要考虑流速、流态、冲刷角、相态等多个因素<sup>[13-21]</sup>。

为实现准确的环烷酸腐蚀预测或评价，分别上述众多影响因素对腐蚀的影响规律是极难实现的，有效简化或整合不易量化的腐蚀影响因素是必经途径。由于不同产地高酸原油成分的差异性及环烷酸自身组成的复杂性，酸值、酸组成等因素很难得到统一的量化规律，为整合材质、酸值、酸组成三个

因素，可通过试验标定不同材料在指定温度、极低流速下同产地原油的基准环烷酸腐蚀速率并建立环烷酸腐蚀数据库，此时基准环烷酸腐蚀速率不包含其它因素的影响<sup>[14, 17]</sup>；高酸原油中含有的活性硫化物由于对环烷酸腐蚀影响较为复杂，应单列出来进行研究<sup>[22-25]</sup>。对相态而言，在高温高流速腐蚀试验装置中流体状态本身已接近炼化装置中的实际流体状态，此时通过腐蚀试验得到的结果已包含相态的影响，不再考虑相态这个因素。对流态而言，因为强湍流状态下环烷酸腐蚀具有最高的腐蚀速率，因此主要选择湍流强度替代流态作为可量化的腐蚀影响因素<sup>[26-30]</sup>。

经过整合或转化后，在预测、评估环烷酸腐蚀时需要明确的影响因素包括基准腐蚀速率、温度、硫化物含量、流速、湍流强度和冲刷角。目前基准腐蚀速率方面国内外已有大量的环烷酸腐蚀数据作为支撑，针对特定材质和指定高酸原油可通过高温高流速环烷酸腐蚀试验装置来进行标定，因此这里主要针对温度、硫化物含量、流速、湍流强度和冲刷角五个因素的量化规律进行研究。

## 1 试验材料及试验设备

试验材料选取炼油厂中常用的 Q345R 低碳钢、Cr5Mo 合金钢两种典型材料，Q345R 热处理为正火状态，Cr5Mo 为完全退火状态，两种材料成分见表 1，所有材料均取自制造实际容器的板材余料并加工成外径 18 mm，内径 3 mm，厚度 3 mm 圆环试样，试样表面打磨至 1000#后抛光，除油并去离子水洗后吹干称重。腐蚀介质由高纯度二苄甲基甲苯导热油与精制环烷酸混合而成，酸值由环烷酸含量进行控制。试样取出后用无水乙醇清洗及丙酮除油，后超声波清洗除去腐蚀产物，再次清洗后干燥 24 h 称重。根据失重计算平均腐蚀速率及平均腐蚀深度(见式(1)、(2))，使用 Hirox-7700 视频显微镜观察腐蚀形貌及进行表面 3D 形貌扫描，微观组织分析及腐蚀产物成分分析使用 Nano-430 热场发射高分辨扫描电镜。

表 1 Q345R、Cr5Mo 的化学成分

元素	材料种类	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co
质量分数	Q345R	0.206	0.230	1.27	0.008 6	0.004 5	0.035	0.013	0.015	0.053	0.015	0.005 7
	Cr5Mo	0.07	0.2	0.39	0.009	0.001	4.37	0.06	0.49	—	0.07	—

$$v = \frac{3650 \times \Delta w}{\rho \times S \times T} \quad (1)$$

$$d = v \times 8.76 / t \quad (2)$$

式中,  $v$  为腐蚀速率, mm/a;  $\Delta w$  为金属失重, g;  $\rho$  为金属密度, g/cm<sup>3</sup>;  $S$  为金属暴露面积, cm<sup>2</sup>;  $T$  为浸泡时长, 天;  $d$  为腐蚀深度,  $\mu\text{m}$ ;  $t$  为试验时长, h。

腐蚀试验使用合肥通用机械研究院建立的高温高流速环烷酸腐蚀模拟装置进行(装置示意图见图 1), 该装置能进行 0~400 °C 及 0~100 m/s 流速的环烷酸腐蚀试验, 试验选取温度在 200~400 °C。圆片试样的加载见图 2。

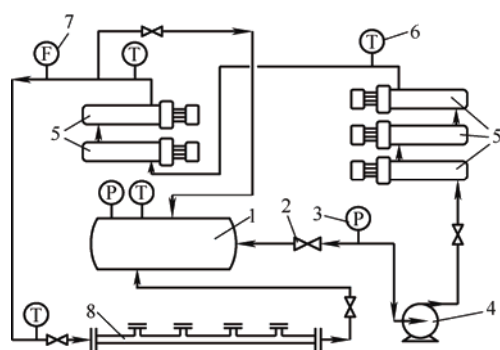


图 1 环烷酸腐蚀试验装置结构简图

1. 储油罐 2. 阀门 3. 压力表 4. 泵  
5. 加热器 6. 热电偶 7. 流量计 8. 试验装置



图 2 腐蚀试样不同冲刷角下的安装示意图

为研究不同冲刷角及湍流强度对环烷酸腐蚀行为的影响, 试样可安装于夹头上并与液流方向形成不同冲刷角(油料流动方向与试样工作面之间夹角定义为冲刷角), 0° 冲刷角下试样表面可保持较好层流状态, 可用于考察流速对腐蚀的影响及用于对比湍流强度对腐蚀的影响, 其他冲刷角下均会形成不同的湍流, 腐蚀试样表面的流体力学状态用 Fluent 软件进行模拟。流体力学分析时使用 GAMBIT 构建管道及管道内试样的三维模型, 试样附近需进行加密处理(图 3), 构建好模型后导入 Fluent 软件中; 单相液流模拟采用二方程的标准  $k-\epsilon$  模型, 使用 SIMPLE 算法对求解区域进行求解, 从而得到试样表面的局部流速、壁面剪切力、湍流强度分布云图, 模拟中需要的参数如管道内径、介质

流速、介质密度和动力学黏度等见表 2。

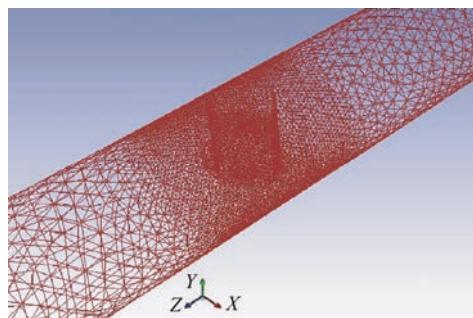


图 3 管道及试样的三维模型加密图

表 2 湍流分析需要的参数表

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	流速 $v_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	管道内径 $d/\text{mm}$	动力学黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
0.95	20~100	36	$1 \times 10^{-2}$

## 2 试验结果分析与讨论

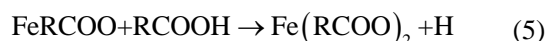
### 2.1 温度对环烷酸腐蚀的影响规律

由于高温环烷酸腐蚀发生于油相中, 环烷酸腐蚀主要依赖环烷酸分子与金属表面的碰撞来完成化学反应和电子交换, 环烷酸腐蚀为热激活的化学反应过程, 具有较高的活化能垒, 因此温度对环烷酸腐蚀速率具有显著的影响。

环烷酸腐蚀的反应式可用下式表示



但实际上环烷酸腐蚀反应不可能和两个环烷酸分子一步完成, 因此环烷酸腐蚀过程可以分解为两个基元反应。



反应式(5)中只是将中间产物  $\text{FeRCOO}$  转化为  $\text{Fe}(\text{RCOO})_2$ , 其反应本身已经与金属腐蚀无关, 两个基元反应中只有反应(4)与金属的腐蚀直接关联, 因此金属的腐蚀过程由反应(4)决定, 其腐蚀速率可用式(6)表征

$$v = k[\text{RCOOH}][\text{Fe}] \quad (6)$$

由于在炼油设备中的油相成分相对稳定, 因此管道同一位置的环烷酸含量可认为是恒定的, 同时金属是固相, 所以反应式(4)中的速率完全由系数  $k$  决定。根据阿累尼乌斯公式  $\ln k = -E_a/RT + C$ , 可以认为腐蚀速率的对数  $\ln v$  也与反应式(4)中的温度负倒数  $-1/T$  ( $T$  为开氏温度)呈线性关系, 且  $\ln v$  ( $-1/T$ ) 的斜率与活化能  $E_a$  呈线性关系。

为验证上面的结论, 对不同酸值下的环烷酸腐蚀数据按照  $\ln v(-1/T)$  的线性关系进行了线性拟合, 具体分析结果如图 4、5 所示。从图 4、图 5 中可以看出, 不同酸值下低碳钢、Cr 合金钢的  $\ln v$  均与  $(-1/T)$  具有较好的线性关系。在图 4 中可以看到, 当酸值含量为 0.3、0.65 时,  $\ln v(-1/T)$  的拟合直线斜率明显高于其他的三条拟合直线, 说明低酸值下, 环烷酸腐蚀具有较高的活化能垒, 因此腐蚀速率较低; 但当酸值超过 1.5 时, 拟合直线斜率基本不再变化, 说明低碳钢的环烷酸腐蚀活化能已趋稳定。对 Cr 合金钢和不锈钢而言, 酸值对活化能影响相对较小, 拟合的直线斜率只有酸值为 0.7 时略高于其他拟合直线, 其他酸值下活化能保持相对稳定。

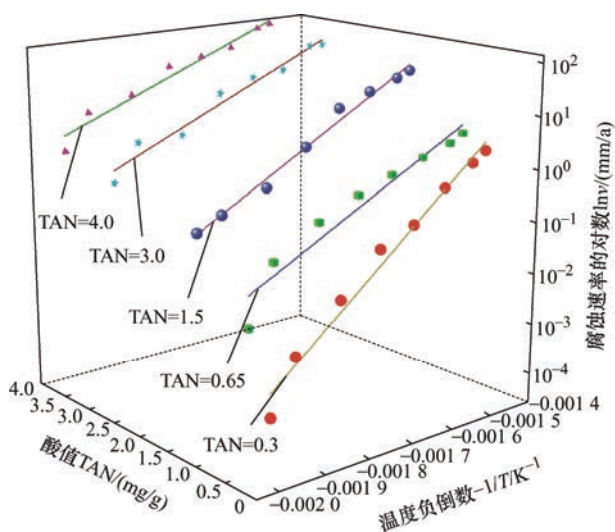


图 4 Q345R 在不同酸值下的  $\ln v(-1/T)$  拟合结果

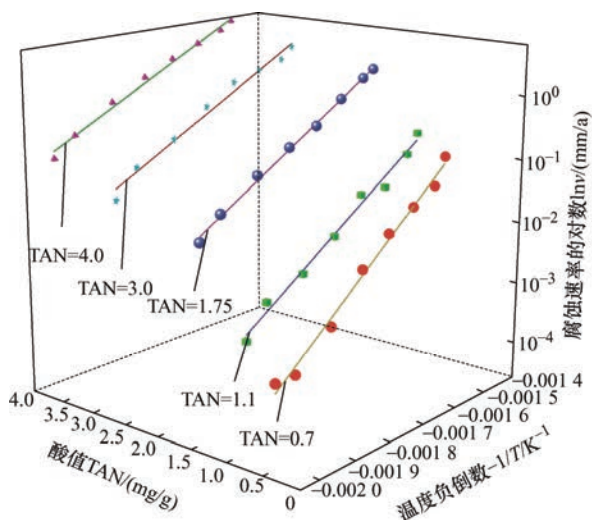
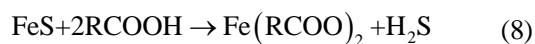
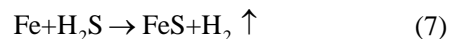


图 5 Cr5Mo 在不同酸值下的  $\ln v(-1/T)$  拟合结果

## 2.2 硫化物含量对环烷酸腐蚀的影响规律

活性硫化物的存在对环烷酸腐蚀影响是较为复杂的, 活性硫化物释放出的  $H_2S$  可与 Fe 化合形成

$FeS$ ,  $FeS$  会参与环烷酸反应, 反应式见式(7)、(8)



当活性硫化物存在时, 高酸原油中的腐蚀实际同时包含环烷酸腐蚀和硫化物腐蚀, 而且硫化物与 Fe 化合的产物  $FeS$  会参与环烷酸腐蚀并降低环烷酸腐蚀的活化能垒; 从图 6 中可以看出当硫化物含量为 0.3 时, 腐蚀速率拟合直线斜率显著高于高硫化物含量下的斜率。

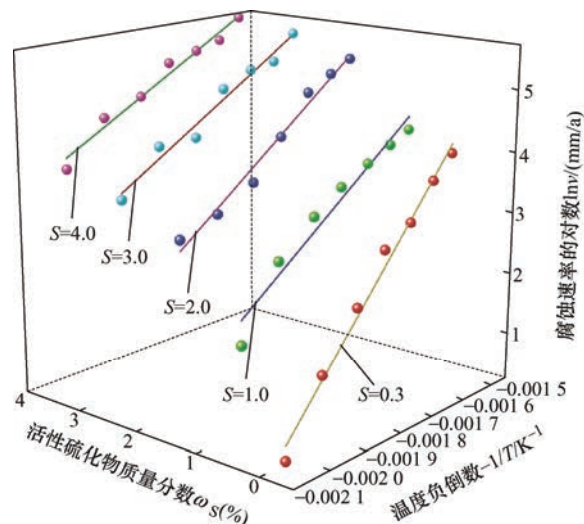


图 6 硫化物含量对腐蚀平均活化能的影响

当硫化物含量较低时, 硫化物腐蚀速率可忽略, 此时总腐蚀速率主要取决于环烷酸腐蚀速率; 但硫化物含量提升到一定程度时, 硫化物腐蚀的产物  $FeS$  可形成较完整的保护膜并阻隔环烷酸对金属基体的直接腐蚀, 因此此时总腐蚀速率会显著降低; 但当硫化物含量持续提升时, 硫化物腐蚀速率将显著上升, 同时  $FeS$  的大量形成又会促进环烷酸腐蚀, 因此总腐蚀速率随硫化物含量增加而再次升高。

由于硫化物含量对环烷酸腐蚀的影响较为复杂, 很难得到类似温度对环烷酸腐蚀速率影响的函数规律。因此要实现硫化物含量对环烷酸腐蚀的影响规律, 只能通过不同硫化物含量下的腐蚀试验, 得到腐蚀数据并通过绘制等温线的方法来评价硫化物含量的影响。

图 7、8 为 Q345R 低碳钢和 Cr5Mo 合金钢在不同硫化物含量下的等温线图, 根据不同硫化物含量下测得的腐蚀数据进行曲线拟合后得到。从两幅图中可以看出, 根据腐蚀数据拟合的曲线可呈现类似的曲线变化规律。在硫化物含量低于 0.2% 时, 无论低碳钢还是 Cr 合金钢在 4.0 mg/KOH 的酸值下均具



有较高的总腐蚀速率,但随着活性硫化物含量的提升,腐蚀速率出现降低且在 0.5% 的硫化物含量左右出现总腐蚀速率的最低值,说明此时活性硫化物形成的硫化物保护膜有效抑制了环烷酸腐蚀的进行;随着硫化物含量的继续提高,硫化物腐蚀速率增加,此时总腐蚀速率又开始显著上升。无论对于低碳钢还是 Cr 合金钢,硫化物含量在 0.5% 左右时均表现出较低的环烷酸腐蚀速率,这个现象对环烷酸腐蚀有效抑制具有指导性意义。

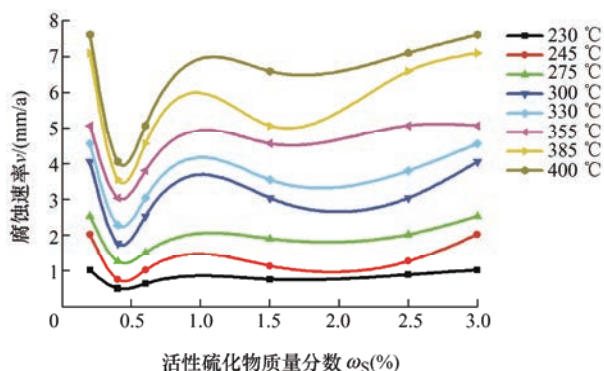


图 7 Q345R 在不同硫化物含量下环烷酸腐蚀等温线 (TAN=4.0 mg)

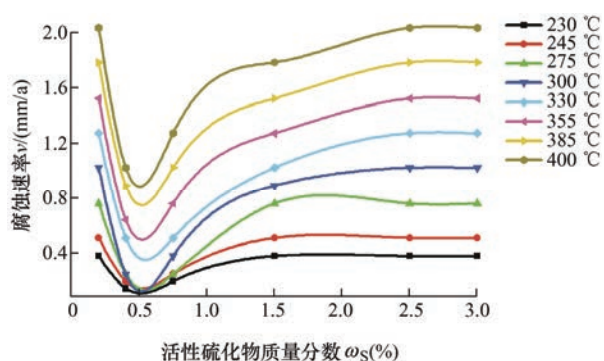


图 8 Cr5Mo 在不同硫化物含量下环烷酸腐蚀等温线 (TAN=4.0 mg)

### 2.3 流速对环烷酸腐蚀的影响

现场经验表明在管道中,如果油相在平直管道中处于层流状态时,即使流速较高时也未出现明显的局部腐蚀;但在管道弯头、三通、大小头等局域流态发生了显著变化并形成湍流时环烷酸腐蚀会显著局部化。

为分析单纯流速对环烷酸腐蚀的影响,在管道内布置与液流方向平行的腐蚀试样并在不同流速下进行试验,根据腐蚀失重分析可以发现单纯的流速对平均环烷酸腐蚀速率存在明显的影响,Q345R、Cr5Mo 的腐蚀速率随流速增加大致呈线性递增趋势(图 9)。层流状态下,即使在酸值 4.0 mg/KOH、温

度为 360 °C、流速达到 40 m/s 时,也可基本保持均匀腐蚀状态,尤其对 Q345R 低碳钢而言,腐蚀深度达到 50  $\mu\text{m}$  时依然较好地保持了均匀腐蚀状态。这个结果和现场是吻合的,炼油管道的管壁在液流平行高速流动时,腐蚀往往不会出现局部腐蚀特征,整体保持了较低的腐蚀速率。

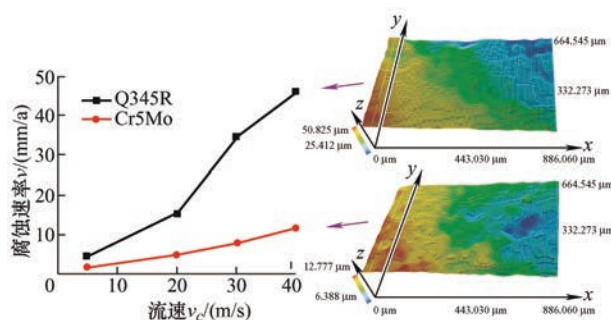
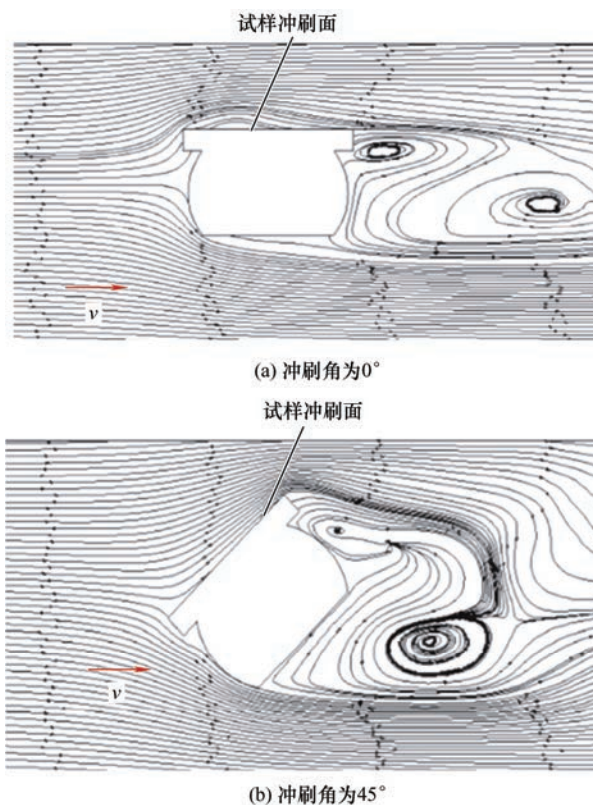


图 9 不同流速下的环烷酸腐蚀速率及最大腐蚀速率下的均匀腐蚀形貌(TAN=4.0 mg/KOH, 温度 360 °C)

### 2.4 冲刷角和湍流强度对环烷酸腐蚀的影响

根据流体力学原理,当流体冲击到一个平面上时,流体将沿平面铺展开来,因此当试样与液流方向不平行时,不同冲刷角下试样周围会形成湍流,导致试样表面的局部流体状态发生明显变化(图 10)<sup>[2]</sup>,在不同冲刷角下环烷酸腐蚀速率及腐蚀形貌也会发生显著变化。为明确冲刷角对环烷酸腐蚀的影响,通过腐蚀试验分析了不同冲刷角对环烷酸腐蚀速率及腐蚀形貌的影响。



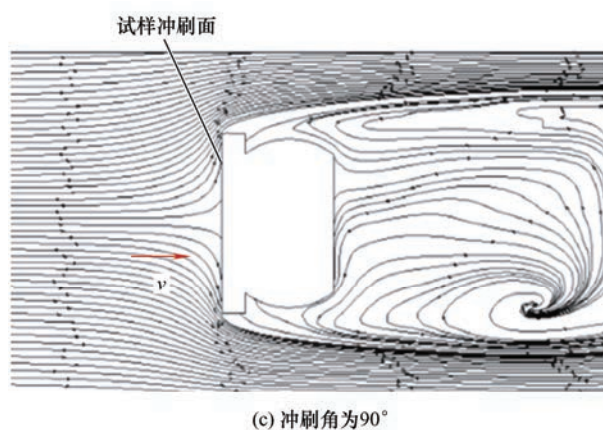
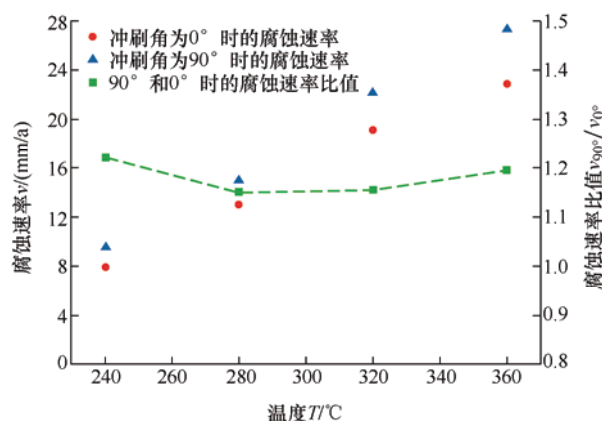
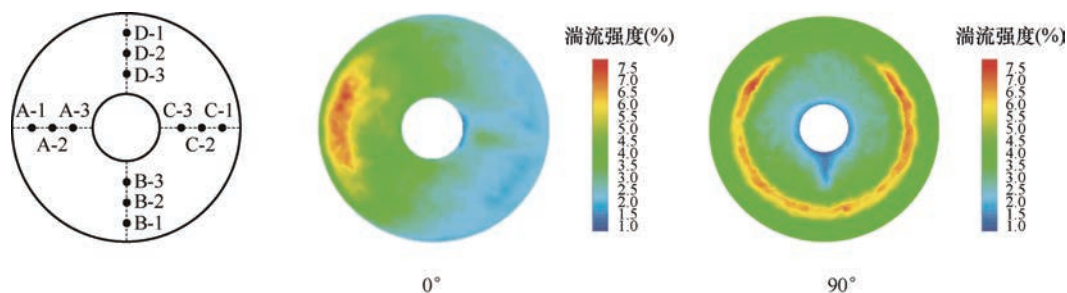


图 10 不同冲刷角下试样表面的流线图

在相同 20 m/s 流速下不同角度冲刷时, 根据腐蚀失重可得到不同温度、不同冲刷角下的平均腐蚀速率。选取  $0^\circ$  与  $90^\circ$  两种极端情况下的平均腐蚀速率进行分析可得到图 11, 从图 11 中可以看出,  $90^\circ$  冲刷角下的平均腐蚀速率  $v_{90^\circ}$  要普遍高于  $0^\circ$  冲刷角下的平均腐蚀速率  $v_{0^\circ}$ , 但两者的平均腐蚀速率差距并不是非常显著,  $v_{90^\circ}/v_{0^\circ}$  的腐蚀速率比值基

本在 1.0~1.2 倍。

但对局部最大腐蚀深度而言, 不同冲刷角下的差异更为显著。为将局部腐蚀深度与试样表面的流体状态关联起来, 在环状试样选取 A、B、C、D 四个区域进行分析, 每个区域在内、中、外各分析三个点, 试样分区及取点状态见图 12 所示。

图 11 不同温度下  $90^\circ$  和  $0^\circ$  冲刷角度下的平均腐蚀速率及其比值图 12 腐蚀试样表面分析区域及  $0^\circ$  和  $90^\circ$  下表面湍流分布情况

由于  $0^\circ$  冲刷试样由于试样厚度导致在迎液流方面处出现较明显的湍流状态, 导致了该区域腐蚀出现加剧, 因此选取远离 A 区的 C 区作为主要分析区域。图 13 中列出了 C 区三个点在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  冲刷角下的最大腐蚀深度变化, 从图 13 中可以看出,

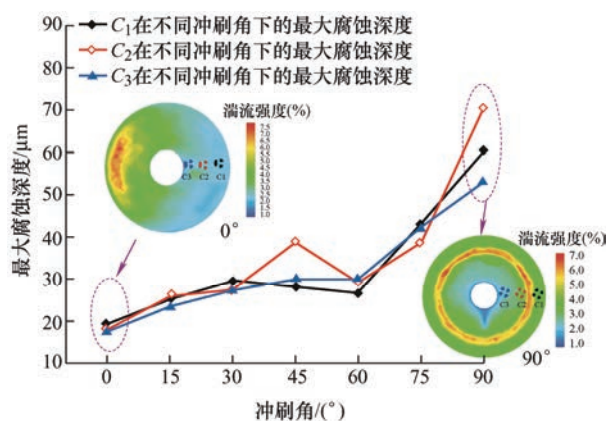


图 13 不同冲刷角下最大环烷酸腐蚀深度变化图

在同一位置, 冲刷角由  $0^\circ$  递增至  $90^\circ$  时, 局部腐蚀深度呈明显的上升趋势, 尤其当冲刷角超过  $45^\circ$  后局部最大腐蚀深度递增趋势更为显著。就最大腐蚀深度而言,  $90^\circ$  冲刷角下的最大腐蚀深度普遍达到  $0^\circ$  冲刷角下最大腐蚀深度的 3.5 倍或更高<sup>[5]</sup>。

局部腐蚀深度加大显然与不同冲刷角下冲击时的流体状态相关, 将试样表面湍流状态与局部点的最大腐蚀深度进行对比后发现, 当处于  $0^\circ$  冲刷角时, C 区三个点均处于较低的湍流状态, 此时 C 区基本处于均匀腐蚀状态, 因此其最大腐蚀深度极为接近(图 14); 但在  $90^\circ$  冲刷角下, 三个区域的湍流强度存在显著的差异, 这个流体状态的差异也导致三个点的最大腐蚀深度出现不同, 此时  $C_2$  点的最大腐蚀深度达到了  $C_3$  点的 1.5 倍左右。对 C 区三个点的腐蚀形貌分析表明, 在  $90^\circ$  冲刷角下 C 区三个点均出现了较大的点蚀坑(图 15), 结合三个点的湍流强度分析, 可以明确高流速强湍流下湍流强度对环



烷酸局部点蚀具有显著的影响(图 16), 而且当冲刷角提高到  $15^\circ$  时即使整体腐蚀速率较低时也可出现小的点蚀(图 17)。

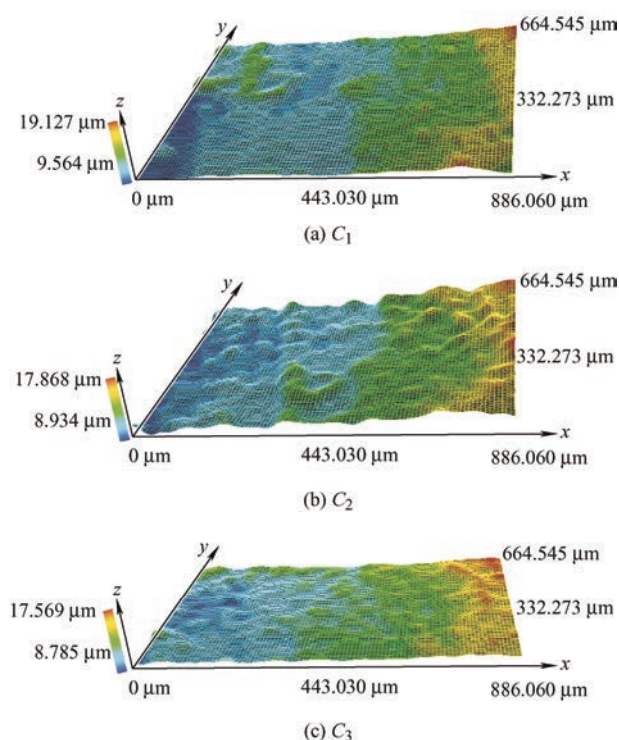


图 14  $0^\circ$  冲刷角度下 C 区三个点表面均匀腐蚀形貌

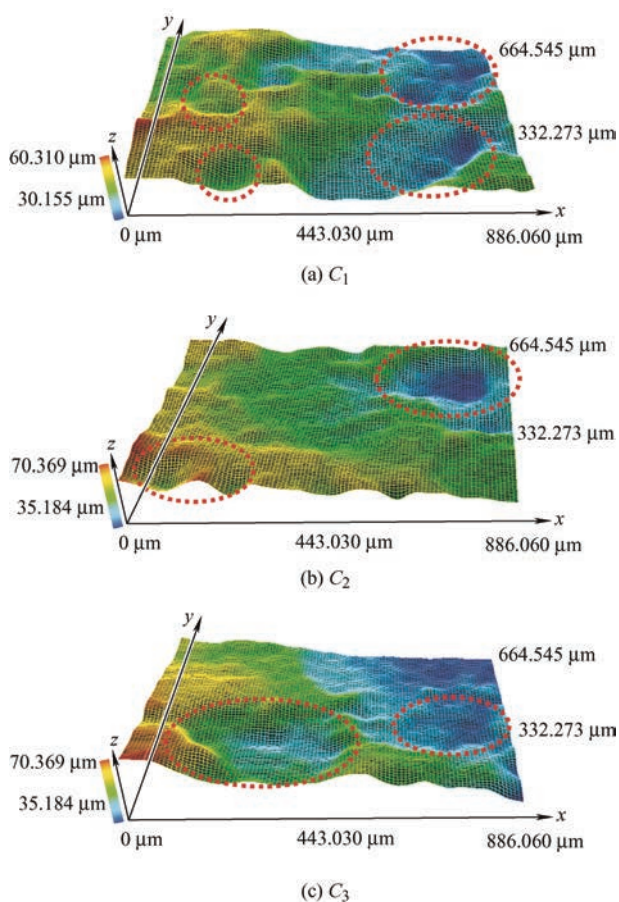


图 15  $90^\circ$  冲刷角度下 C 区三个点的点蚀形貌  
(红色圈出部分为点蚀坑)

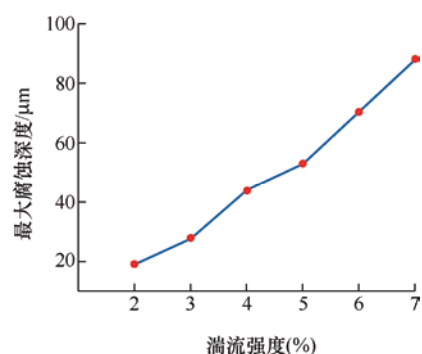


图 16 环烷酸局部最大腐蚀深度与湍流强度关系

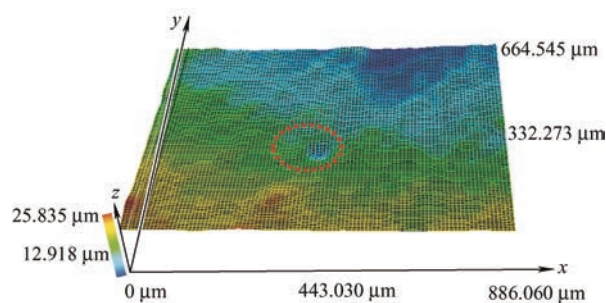


图 17  $C_1$  区在  $15^\circ$  冲刷角下的小蚀坑

### 3 结论

(1) 温度对环烷酸的平均腐蚀速率具有明显的函数规律, 环烷酸腐蚀速率  $v$  与温度  $T$  之间符合  $\ln v \sim (-1/T)$  的线性规律, 且拟合的直线斜率可反映环烷酸腐蚀活化能的水平。低酸值下环烷酸腐蚀的活化能全要高于高酸值下的活化能。

(2) 硫化物对环烷酸腐蚀的影响较为复杂, 但硫化物对环烷酸腐蚀速率的影响可用等温线来进行描述, 不同温度下硫化物含量对环烷酸腐蚀具有较统一的等温线规律, 且硫化物含量在 0.5% 时具有最低的环烷酸腐蚀速率。

(3) 流速、冲刷角、湍流强度对环烷酸腐蚀均具有显著的影响,  $0^\circ$  冲刷角下单纯的流速增加会导致平均腐蚀速率递增, 但可以保留较好的均匀腐蚀形貌; 当冲刷角提高到  $15^\circ$  时点蚀坑即可出现, 随着冲刷角的递增点蚀将逐渐占主导地位; 点蚀坑的扩展与冲刷角变化时的局部湍流强度具有强烈的依存关系, 湍流强度越大的区域局部点蚀会更为严重。

### 参 考 文 献

- [1] SHARIFI-ASL S, LIANG A, COOKE D, et al. High-temperature sulfidic corrosion of carbon steel in model oil/sulfur compound blends[C]//NACE Corrosion, New Orleans, Louisiana, USA: Corrosion 2017, March

- 26, 2017: 4296-4307.
- [2] 吕运容. 石化装置高温环烷酸流动腐蚀行为与工程防护方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LÜ Yunrong. High temperature naphthenic acid flow-induced corrosion behavior and preventive measures of petrochemical unit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [3] 段永锋, 崔新安. 高温环烷酸腐蚀研究的新进展[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 61-66.
- DUAN Yongfeng, CUI Xinan. New progress and overview on naphthenic acid corrosion in refining units[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(10): 61-66.
- [4] MERIEM B M, BOU S B, NASSER M B G, et al. Numerical study of elbow corrosion in the presence of sodium chloride, calcium chloride, naphthenic acids, and sulfur in crude oil[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 198: 108124.
- [5] 张肖飞, 马涛, 华晓春, 等. 高流速强湍流下低碳钢局部环烷酸腐蚀行为[J]. 材料导报, 2021, 35(14): 14136-14141.
- ZHANG Xiaofei, MA Tao, HUA Xiaochun, et al. Localized naphthenic acid corrosion of carbon steel under high flow rate and strong turbulence[J]. Materials Reports, 2021, 35(14): 14136-14141.
- [6] AZZURA I, AZLIZUL A R, NORMAYATI N, et al. Identifying naphthenic acid corrosion mechanism on heat exchanger unit by computational fluid dynamic simulation[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 29(Pt1): 82-87.
- [7] 陈碧凤, 杨启明. 常减压设备环烷酸腐蚀分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007(1): 74-76.
- CHEN Bifeng, YANG Qiming. Kinetics analysis of naphthenic acid corrosion of alloy steels for atmospheric and vacuum equipment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007(1): 74-76.
- [8] 梁春雷, 陈学东, 艾志斌, 等. 环烷酸腐蚀机理及其影响因素研究综述[J]. 压力容器, 2008(5): 30-36.
- LIANG Chunlei, CHEN Xuedong, AI Zhibin, et al. Overview of the mechanism of naphthenic acid corrosion and its influencing factors[J]. Pressure Vessel Technology, 2008 (5): 30-36.
- [9] FERNANDA H, ANA C A, ALYSSON N D, et al. Evaluation of naphthenic acidity number and temperature on the corrosion behavior of stainless steels by using electrochemical noise technique[J]. Electrochimica Acta, 2014, 124: 206-210.
- [10] BHARAT S R, DONG-WOO C, KANGHEE C, et al. Total acid number (TAN) reduction of high acidic crude oil by catalytic esterification of naphthenic acids in fixed-bed continuous flow reactor[J]. Fuel, 2018, 231: 271-280.
- [11] QU D R, ZHENG Y G, JING H M, et al. High temperature naphthenic acid corrosion and sulphidic corrosion of Q235 and 5Cr1/2Mo steels in synthetic refining media[J]. Corrosion Science, 2005, 48(8): 1960-1985.
- [12] TEBBALS, KANE R D. Review of critical factors affecting crude corrosivity[C]//National Association of Corrosion Engineers, Mar 24-29, 1996, Denver, CO (United States): 1996: 6615.
- [13] QI W, MUYANG A, WEN S, et al. Study on corrosion mechanism and its influencing factors of a short distance intermittent crude oil transmission and distribution pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104892.
- [14] 代彦霞, 王印培, 郑文炳, 等. 铬钼钢的高温环烷酸腐蚀行为研究[J]. 化工机械, 2010, 37(4): 401-404.
- DAI Yanxia, WANG Yinpei, ZHENG Wenbing, et al. Study on high temperature naphthenic acid corrosion behavior of chromium molybdenum steel[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2010, 37(4): 401-404.
- [15] ZHANG Xiaofei, MA Tao, HUA Xiaochun, et al. Flow accelerated naphthenic acid corrosion during high acid crude oil refining[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 117: 104802.
- [16] PAULO P A, VANESSA F C L. An overview of naphthenic acid corrosion in a vacuum distillation plant[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(5): 1403-1406.
- [17] WU Xinqiang, JING Heming, ZHENG Yugui, et al. Erosion-corrosion of various oil-refining materials in naphthenic acid[J]. Wear, 2004, 256(1-2): 133-144.
- [18] 刘句. 高温高流速下环烷酸腐蚀模型构建[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- LIU Ju. Construction model of naphthenic acid corrosion under high temperature and high flow rate[D]. Ma'an Shan: Anhui University of Technology, 2017.
- [19] JISHENG T, LIDA W, WEN S, et al. Failure analysis of steam jet pump at top of crude oil vacuum distillation tower[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 103: 9-19.
- [20] RAMESHK M, SOLTANIEH M, MASOUDPANAH S M. Effects of flow velocity and impact angle on erosion-corrosion of an API-5L X65 steel coated by



- plasma nitriding of hard chromium underlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(5): 10054-10061.
- [21] 江克, 杨铁成, 陈学东, 等. 高温高流速环烷酸冲刷腐蚀流场数值模拟研究[J]. *压力容器*, 2010, 27(10): 1-7. JIANG Ke, YANG Tiecheng, CHEN Xuedong, et al. Numerical simulation of naphthenic acid erosion-corrosion in high-temperature and fast-flow environments[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2010, 27(10): 1-7.
- [22] 唐丽丽. 高硫原油加工过程硫化物转化及风险控制技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. TANG Lili. Research on transformation of sulfides and risk control technology in high-sulfur crude oil processing[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [23] MADJID M, BENYEBKA B, NOUREDDINE B. The effect of crude oil in the pipeline corrosion by the naphthenic acid and the sulfur: A numerical approach[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 158: 672-679.
- [24] BRAVO-MÉNDEZ J, GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ J L, DOMÍNGUEZ-AGUILAR M A, et al. High-temperature corrosion of a UNS K03006 steel pipe in a crude oil vacuum residue distillation unit[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 92: 149-162.
- [25] YEPEZ O. Influence of different sulfur compounds on corrosion due to naphthenic acid[J]. *Fuel*, 2005, 84(1): 97-104.
- [26] 胡洋, 程学群, 王省田, 等. 流速和硫含量对原油中环烷酸腐蚀性的影响[J]. *石油学报(石油加工)*, 2010, 26(6): 889-893. HU Yang, CHENG Xuequn, WANG Shengtian, et al. Effect of velocity and sulfur content of crude oil on the corrosion behavior of naphthenic acid[J]. *Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section)*, 2010, 26(6): 889-893.
- [27] 吕运容, 陈学东, 陈志平, 等. 机械设备环烷酸流动腐蚀作用机制研究[J]. *流体机械*, 2018, 46(9): 1-6, 37. LÜ Yunrong, CHEN Xuedong, CHEN Zhiping, et al. Research on the mechanism of naphthenic acid flow-induced corrosion in petrochemical equipment[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(9): 1-6, 37.
- [28] KE J, CHEN X, YANG T. Experiment study of high-temperature and high-flow rate naphthenic acid corrosion[C]//*Materials and Fabrication, Parts A and B*, July 17-21, 2011 Baltimore, Maryland: ASME, 2011: 403-1409.
- [29] JAUSEAU N. Multiphase flow effects on naphthenic acid corrosion of carbon steel[D]. State of Ohio: Ohio University, 2012.
- [30] PENG J, WINSTON R, GHEORGHE B. High-temperature corrosion by carboxylic acids and sulfidation under refinery conditions-mechanism, model, and simulation[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(12): 4329-4339.
- 
- 作者简介: 饶思贤, 男, 1978 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械装备的腐蚀与失效。  
E-mail: snowdrio@126.com