

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.018

油田集输环境低表面能改性聚烯烃的防垢性能

徐广丽¹, 王岚¹, 池坤², 蔡亮学^{1,3}

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500; 2. 长庆工程设计有限公司, 西安 710021; 3. 油气消防四川省重点实验室, 成都 610500)

摘要: 针对油田集输除垢成本高、流程复杂的问题, 以低表面能改性聚烯烃(LH-PE)在油田集输环境中的防垢性能为研究对象, 以长庆油田第五采油厂采出水模拟溶液为介质, 采用室内静态结垢、流动环道动态结垢相结合的方法分析温度、流量、离子浓度对LH-PE表面结垢量的影响。结果表明, 温度较高时, 结垢在短时间内发生, 超过40℃时, 结垢量大幅增加; 流量低于407.68 L/h时, 垢晶析出沉积大于介质流动剥蚀, 结垢量呈增加趋势; 流量超过407.68 L/h后, 30℃时结垢量随流量增大而减少, 40, 50℃时结垢量随流量增大而增加, 这是因为介质高温导致垢晶析出沉积加剧; HCO_3^- 在结垢中起主要作用; 垢晶以松散的文石、球霏石为主。同时, 在长庆油田第五采油厂对LH-PE内衬的钢丝增强复合管进行试用, 高压清水扫线后获得大块垢样, 其表面粗糙且有冲积壅, 这说明扫线可轻易清除污垢。上述结果表明, LH-PE在油田集输中应用时虽不能避免结垢, 但形成的污垢可通过高压清水扫线清除, 能节约除垢成本、简化除垢流程, 可用于油田集输环境。

关键词: 低表面能; 聚烯烃; 集输; 结垢; 垢晶形貌

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0120-06

Anti-scaling Performance of a Low-Surface-Energy Modified Polyolefin in Gathering Environment of Oilfields

Xu Guangli¹, Wang Lan¹, Chi Kun², Cai Liangxue^{1,3}

(1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 3. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610500, China)

Abstract : Considering the high cost and complex process of descaling in oilfields, in order to determine the anti-scaling performance of a low-surface-energy modified polyolefin (abbreviated as LH-PE) in gathering environment of oilfields, the effects of temperature, flow rate, and ion concentration on the amount of scaling were analyzed by laboratory static scaling experiments and flow loop dynamic scaling experiments using the simulated solution of produced water from the fifth oil production plant of Changqing Oilfield as the medium. It is found that scaling occurs in a short time at a high temperature, and the amount of scaling increases greatly when the temperature exceeds 40℃. When the flow rate is lower than 407.68 L/h, the amount of scaling increases as the flow rate increase, because scaling crystallization deposition is greater than medium flow denudation. When the flow rate exceeds 407.68 L/h, the amount of scaling decreases as the flow rate increases at 30℃, while increases as the flow rate increases at 40℃ and 50℃. The reason is that scaling crystallization deposition is enhanced under a higher temperature. HCO_3^- plays a major role in its scaling. The dominant scaling crystal is loose aragonite and vaterite. At the same time, composite pipe reinforced by steel wires with LH-PE as the inner liner was trialed in the fifth oil production plant of Changqing oilfield for 60 days. A large piece of scale with an alluvial-gullied rough surface was obtained after sweeping the composite pipe by tap water under high pressure, which shows that sweeping can easily remove the scale. These results demonstrate that although the LH-PE can not avoid scaling in oilfields, yet the deposited scale is easy to be removed through sweeping by tap water under high pressure, which can save the cost and simplify the process of descaling. Therefore, LH-PE can be applied in the gathering system of oilfields.

Keywords : low surface energy ; polyolefin ; gathering ; scaling ; scale crystal appearance

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0421), 中央高校基本科研业务费专项资金(19CX05007A), 国家自然科学基金项目(51606160; 51779212)

通信作者: 蔡亮学, 博士, 讲师, 主要研究方向为油气管道内检测器研发、非金属管道适用性评价、油气田站场智能化等

收稿日期: 2023-01-03

引用格式: 徐广丽, 王岚, 池坤, 等. 油田集输环境低表面能改性聚烯烃的防垢性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 120-125.

Xu Guangli, Wang Lan, Chi Kun, et al. Anti-scaling performance of a low-surface-energy modified polyolefin in gathering environment of oilfields[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 120-125.

油田开发中后期,采出水矿化度增大,金属管道内壁腐蚀加速,易引发管道穿孔、泄漏等风险^[1]。增强复合管将塑料的耐蚀性能和金属的承压性能集于一身,在油田集输管网中得到了广泛的应用^[2],但由于采出液的高矿化度^[3],仍然存在结垢问题。常采用化学、物理及机械方法进行除垢,成本高、流程复杂。

结垢取决于介质温度、流速、离子饱和度等^[4],常采用静态结垢^[5-6]、流动环道动态结垢^[7-9]、模拟剪切^[10]进行结垢实验研究。已有学者对不同材料表面结垢特性进行了研究,如:Kazi等^[11]研究了铝、铜、不锈钢、黄铜、聚碳酸酯表面CaCO₃垢的沉积,发现污垢沉积量随材料表面能增大而增多;Tang等^[12]发现玻璃钢表面水垢沉积量随表面自由能降低而减少。同时,有学者研发了低表面能涂层以减缓材料表面的结垢^[13]。可见,降低表面能可以使材料具有一定的防垢潜力。故在复合管内衬层采用改性低表面能材料后,研究其在油田集输环境使用时的防垢性能具有重要的意义。

笔者以低表面能改性聚烯烃(LH-PE)为研究对象,采用静态结垢与流动环道动态结垢相结合的方法,模拟长庆油田第五采油厂集输工况,分析温度、流量、离子浓度对结垢量的影响,并通过扫描电子显微镜(SEM)分析试样表面垢晶形貌;将LH-PE内衬的钢丝增强复合管在第五采油厂进行现场试用,验证其防垢性能,为其工程应用提供指导。

1 实验部分

1.1 室内实验

(1)介质。

将长庆油田第五采油厂不同井口采出液进行油水分离后,根据SY/T 5523-2016《油田水分析方法》对采出水性质进行分析,发现pH值均大于7,呈弱碱性,不同井口采出水的水型均为NaHCO₃型,阴阳离子浓度均有较大差异;依照SY/T 0600-2009《油田水结垢趋势预测》,井口采出水有结垢趋势。根据不同井口采出水的主要离子及其浓度,采用氯化钾、氯化钙、氯化镁、氯化钡、碳酸氢钠配置表1所示的两种采出水模拟溶液,分别编号1#,2#模拟溶

表1 长庆油田第五采油厂不同井口水样主要离子及其浓度 mg/L

介质	阴离子		阳离子			
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1#	119.85	36 042.48	2 037.61	781.91	43.90	43.91
2#	2 667.78	4 395.18	12.91	3.78	44.62	44.51

液。药剂等级均为分析纯,厂家均为成都市科隆化学制品有限公司。

(2)材料与实验管段。

LH-PE由浙江伟星新型建材股份有限公司生产,其通过采用含硅、氟等原子的有机化合物对聚烯烃进行改性而制得,其中硅、氟基团与聚烯烃形成了分子互穿网络结构。由于碳氟键、硅氧键键能大,能遮盖聚烯烃的高能量主链,使其表面自由能降低。表面自由能计算如式(1)^[14]所示。

$$\gamma_s = \gamma_l \left(\cos \theta_y - \cos \theta_x \right) \times \frac{(1 + \cos \theta_x)^2}{(1 + \cos \theta_y)^2 - (1 + \cos \theta_x)^2} \quad (1)$$

式中: γ_s ——固体材料表面自由能,mN/m;

γ_l ——测试介质的表面张力,mN/m;

θ_y ——固液后退接触角,°;

θ_x ——固液前进接触角,°。

采用DT-102型全自动界面张力仪测得模拟水样界面张力为60.6 mN/m,采用KRUSS DSA 30S型光学接触角测量仪测得LH-PE与模拟水样接触时的前进接触角、后退接触角分别为73.6°,41.5°。将上述数据代入式(1)可得LH-PE内衬材料表面自由能为24.11 mN/m。

动态结垢测试管段为LH-PE管,现场实验复合管为LH-PE内衬钢丝增强复合管,均由浙江伟星新型建材股份有限公司生产。

(3)主要仪器与设备。

恒温干燥箱:DHG101-2型,上虞市沪越仪器设备厂;

恒温水浴箱:CH1015型,上海衡平仪器仪表厂;

电子天平:JJ1523BC型,常熟市双杰测试仪器厂;

动态实验环道:自制;

X射线衍射仪:X'Pert PRO型,荷兰帕纳科公司;

SEM:ZEISS EVO MA15型,德国卡尔蔡司显微图像有限公司;

光学接触角测量仪:KRUSS DSA 30S型,德国KRUSS公司;

全自动界面张力仪:DT-102型,山东淄博华坤电子仪器有限公司。

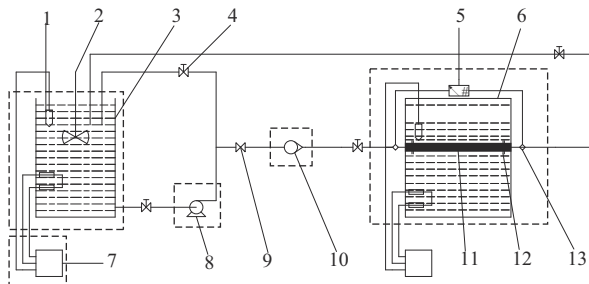
(4)实验方法。

①静态结垢实验。

以1#模拟溶液为实验介质,压力为常压,温度分别为30,40,50,60℃,接触时间分别为5,15,30,45 min。利用恒温水浴箱分析介质在不同温度、不同接触时间条件下的结垢量,并计算出其在接触时间内的平均结垢速率。具体步骤为:将锥形瓶烘干、编号并称重,得到锥形瓶的初始质量,记为 m_1 ;将滤纸烘干并称重,得到滤纸的初始质量,记为 m_2 ;取200 mL模拟溶液装入锥形瓶,按实验方案将其置于不同温度(30,40,50,60℃)水浴箱中,一定时间(5,15,30,45 min)后将锥形瓶取出。过滤后,将滤纸、锥形瓶烘干并称重,得到滤纸、锥形瓶的最终质量,分别记为 m_3, m_4 ;最终质量(m_3+m_4)减去初始质量(m_1+m_2)得到不同条件时的结垢量 Δm ,除以时间即为结垢速率。

②动态结垢实验。

基于相似原理,设计了动态结垢环道装置,如图1所示,主要由温控单元、储存单元、动力单元、计量单元、测试单元以及回路管道组成,其中测试单元由浙江伟星新型建材股份有限公司生产的28 mm×2.5 mm LH-PE测试管段、控温水浴组成,回路管道带有保温层。分别以1#,2#模拟溶液为实验介质,温度取30,40,50℃,流量为219.52,407.68,1 254.40 L/h,实验周期为6,12,18,24 h。具体步骤为:测试管段内壁进行除油、除水,称重后,安装到指定位置;采用自来水清洗系统后,将模拟溶液注入储液罐3中,同时打开温度控制装置7、搅拌器2,使介质保持设定温度;同时,向水浴槽6中注入自来水,打开温控装置,使其达到实验温度;灌泵后打开离心泵8,使介质在环道内循环流动;调节流量为预定值,流动稳定后开始计时,实验周期到达后,关闭离心泵及测试管段两侧的截止阀,拆下测试管段、



1,13—温度传感器;2—搅拌器;3—储液罐;4—闸阀;
5—温度显示仪表;6—水浴槽;7—温度控制装置;8—离心泵;
9—止回阀;10—流量计;11—测试管段;12—法兰

图1 动态结垢实验环道示意图

烘干后称重,确定测量管段的增重量。实验中,定期向储液罐补充新鲜模拟溶液。

1.2 现场实验

以分支管的形式将浙江伟星新型建材股份有限公司生产的75 mm×10 mm的LH-PE内衬的钢丝增强复合管在长庆油田第五采油厂进行现场试用,如图2所示。介质为井口采出液,内径为55 mm,工作压力0.8 MPa,温度40℃左右,运行60 d后采用高压清水扫线,拆开试用分支管道后取垢样。



图2 现场垢样取样

2 结果与讨论

2.1 静态结垢情况分析

图3为不同温度、时间条件下的静态结垢量。由图3可知,随温度升高,结垢量增加;温度为30~40℃时,结垢量较小;温度超过40℃时,结垢量增加的幅度较大,这说明介质温度若超过40℃,会生成大量的垢。图4为不同温度时不同时间内的平均结垢速率。由4图发现,结垢速率随温度的增加而增大;时间为5 min时,所有温度条件下介质的结垢

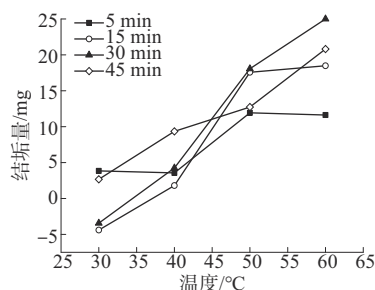


图3 不同温度、时间条件下的结垢量

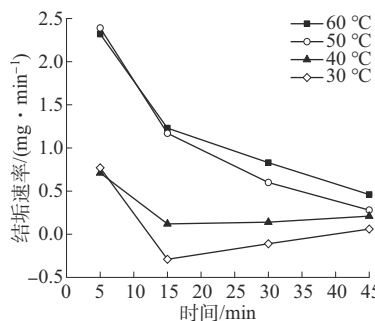
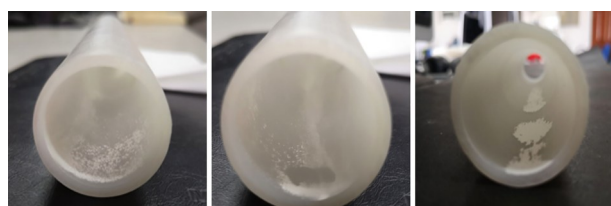


图4 不同温度时结垢速率随时间的变化

速率均达到最大值;随着静置时间的延长,结垢速率逐渐降低,直至介质中的结垢离子完全沉淀;当温度超过 40 °C 时,平均结垢速率随时间急剧下降,表明温度较高时结垢在短时间内发生。

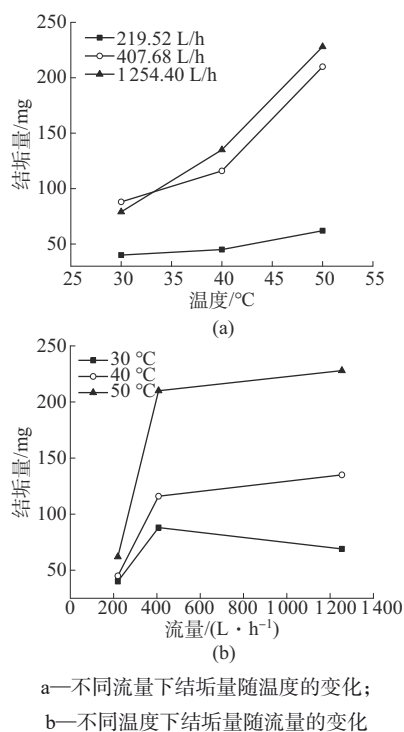
2.2 动态结垢情况分析

图 5 是 LH-PE 测试管段在不同条件下结垢照片,由图 5 可以看出在 LH-PE 表面生成了分散的白色垢晶粉末以及集中的垢晶堆。可见低表面能虽能使材料具有一定的防垢潜力,但无法避免材料表面结垢,不能仅以材料表面能的大小判断材料是否防垢。



(a) 30 °C, 407.68 L/h; (b) 40 °C, 1254.40 L/h; (c) 50 °C, 1254.40 L/h
图 5 不同温度和流量的 LH-PE 实验管段结垢情况

以 2# 模拟溶液在不同流量、温度条件下的结垢量为例,分析流量、温度对结垢量的影响,如图 6 所示。由图 6a 可以看出,无论流量大小, LH-PE 管段表面结垢量随温度升高均明显增多,温度超过 40 °C 时,结垢量增加幅度大,这与静态实验下结垢量随温度变化的结论一致。这是因为随着介质温度升高, CaCO_3 在介质中的溶解度降低,导致更多的离子以垢晶形式析出;同时,温度升高使 LH-PE 表面能增大,污垢热阻增加^[15],导致更多的垢晶析出并沉淀;另外,随着温度升高,垢晶的晶粒形核率增大、晶粒尺寸减小,析出的污垢更坚硬且更难以清洗^[16]。由图 6b 可以看出,在 219.52~407.68 L/h 流量区间内,随着流量的增加,管段的结垢量明显增加,流量增至 407.68 L/h 后,结垢曲线变平缓,结垢速率降低。这是因为结垢是垢晶析出沉积和介质流动剥蚀^[17]两种因素共同作用的结果,流量较小时,垢晶析出沉积占主导,介质流动剥蚀作用小,因而结垢量增加;随着流量增加,垢晶不断析出沉积的同时,介质流动剥蚀作用增强,使得沉积出的结垢量有减少趋势。若流量低于 407.68 L/h,结垢量呈增加趋势,此时沉积作用大于剥蚀作用;若流量由 407.68 L/h 增至 1254.40 L/h, 30 °C 时结垢量呈减少趋势,而 40, 50 °C 时结垢量呈增加趋势,这是因为介质温度的升高导致更多的垢晶沉积。



a—不同流量下结垢量随温度的变化;
b—不同温度下结垢量随流量的变化
图 6 采用 2# 模拟溶液时不同流量、温度条件下 LH-PE 实验管段的结垢量

温度、流量相同时,离子浓度对结垢量的影响如图 7 所示。一般情况下,结垢量与溶液中成垢离子浓度呈正比例关系,成垢离子 Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , 可以 Mg^{2+} , HCO_3^- 等浓度越大,结垢量越大。由图 7 可以看出,2 种模拟溶液的结垢量均随介质流动时间延长而增大,说明现场使用以 LH-PE 为内衬的复合管时,管道内壁面的结垢会不断增大,应该定期清洗。另外,结合表 1 对比 2 种模拟溶液中的 Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 等浓度,发现 1# 模拟溶液中 Sr^{2+} , Ba^{2+} 的浓度分别是 2# 模拟溶液的 158, 207 倍, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子浓度相近,而 2# 模拟溶液中 HCO_3^- 离子浓度是 1# 模拟溶液的 22 倍,环道在 30 °C, 407.68 L/h 的工况下运行 24 h 后,2# 和 1# 模拟溶液对应的结垢量分别为 89, 8 mg。这说明阳离子 Sr^{2+} 和 Ba^{2+} 对结垢的影响小于阴离子 HCO_3^- , HCO_3^- 浓度越大, LH-

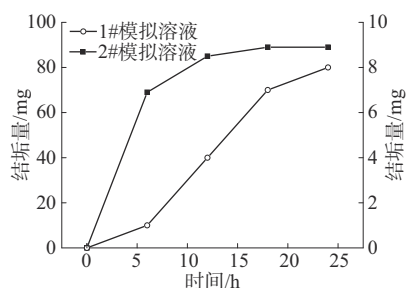
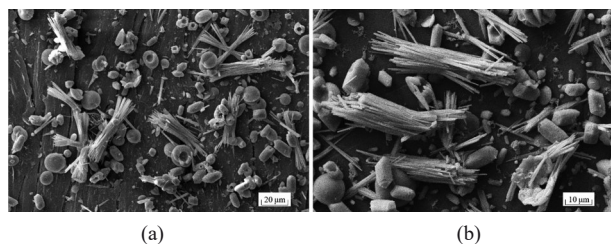


图 7 30 °C, 407.68 L/h 时, 2 种模拟溶液不同流动时间对应的结垢量

PE实验管段的结垢量越大。因此 HCO_3^- 在以LH-PE为内衬的复合管结垢中起主要作用。

2.3 室内垢样形貌

为明确介质在LH-PE表面垢晶的微观形貌,利用切割机、美工刀从LH-PE新管上裁割制备成 $20 \times 10 \text{ mm}$ 的方形试样,将LH-PE方形试样置于 0.1 MPa , 50°C 的介质中静置168 h后,取出喷金后利用SEM观察垢晶(CaCO_3)形貌,如图8所示。由图8可知LH-PE表面垢晶有3种:针状、菱形、球状,以针状和球状为主,菱形较少;3种形状的垢晶分别对应文石、方解石和球霏石,其中文石、球霏石垢松散不易沉积^[18],比较容易清除。这说明低表面能虽无法避免表面结垢,但其表面生成的垢较松散、易去除。



(a) (b)

a—放大500倍; b—放大1 000倍

图8 LH-PE试样表面结垢微观形貌

2.4 现场垢样分析

通过现场扫线将复合管内壁析出的垢进行冲刷,获取的垢样如图9所示,可见垢样长约207 mm,有一定厚度,表面粗糙有冲积壑,横截面有明显断裂痕迹;取小块垢样研磨后采用X射线衍射仪测得的垢样成分为 CaSO_4 和 CaCO_3 。这证实低表面能材料在油田集输中应用时虽不能避免结垢,但其表面析出的垢通过高压清水扫线就可清除,可极大地降低油田除垢的成本、简化除垢流程。



图9 现场垢样

3 结论

通过室内静态、动态结垢实验以及现场应用试验论证了LH-PE材料在油田集输环境使用时的防垢性能,分析了温度、流量、介质离子浓度对其表面结垢的影响。结合垢晶微观形貌及现场成垢情况,得到如下结论:

(1)结垢是由垢晶析出沉积和介质流动剥蚀共同决定的。流量较小时,垢晶沉积强于介质剥蚀,结垢量增加;流量较大时,剥蚀作用增强,若温度高

于 40°C ,结垢量增加,若温度低于 30°C ,结垢量减少,这是因为介质温度升高导致更多的垢晶(CaCO_3)沉积。

(2)成垢阴离子 HCO_3^- 对结垢的影响大于成垢阳离子 Sr^{2+} 和 Ba^{2+} 等,在结垢中起到主导的作用。

(3)LH-PE表面 CaCO_3 垢晶有文石、方解石和球霏石,以文石和球霏石为主。现场垢样为 CaSO_4 和 CaCO_3 ,表面粗糙且有冲积壑。

(4)LH-PE管道在油田集输系统中应用时虽不能避免结垢,但表面析出的垢可通过高压清水扫线清除,大大降低了除垢成本和难度,适合用作油田集输管道。

参考文献

- [1] Wasim M, Shoaib S, Mubarak N, et al. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(3):861–879.
- [2] 徐广丽,田雨,牛振宇,等.聚乙烯对油田加热集输工艺的适用性[J].塑料工业,2021,49(1):105–109,153.
Xu Guangli, Tian Yu, Niu Zhenyu, et al. Applicability of polyethylene to the heating gathering process in the oilfield[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(1):105–109, 153.
- [3] 蔡亮学,朱国承,池坤,等.长庆油田4731B型非金属集输管道老化特性实验研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(6):16–22.
Cai Liangxue, Zhu Guocheng, Chi kun, et al. Experimental study on aging characteristics of 4731B non-metal gathering pipelines in Changqing oilfield[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6):16–22.
- [4] Kamal M S, Hussein I, Mahmoud M, et al. Oilfield scale formation and chemical removal: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171:127–139.
- [5] 彭壮,付田田,李丹.油田管道室内静态结垢模拟实验研究[J].当代化工,2016,45(2):247–249,252.
Peng Zhuang, Fu Tiantian, Li Dan. Indoor simulation experiment research on oil field pipeline fouling[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(2):247–249, 252.
- [6] 豆肖辉,张大磊,荆赫,等.不锈钢在低温地热水环境中的腐蚀与结垢行为[J].腐蚀与防护,2020,41(7):61–66,74.
Dou Xiaohui, Zhang Dalei, Jing He, et al. Corrosion and scaling behavior of stainless steel in low-temperature geothermal water environment[J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(7):61–66, 74.
- [7] Deng Kuanhai, Lin Yuanhua, Tang Wei, et al. Experimental and numerical study on dynamic scaling mechanism of glass fiber reinforced plastics pipeline[J]. Composite Structures, 2019, 225. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111111.

- [8] Lv Yang, Lu Kai, Ren Yongsheng. Composite crystallization fouling characteristics of normal solubility salt in double-pipe heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 156. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119883.
- [9] 廖柠, 黄坤, 孔令圳, 等. 基于动态实验的玻璃钢管道结垢规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(9):35–40.
- Liao Ning, Huang Kun, Kong Lingzhen, et al. Study on scaling laws of FRP crude oil pipeline based on dynamic experiment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(9):35–40.
- [10] 蒋华义, 张定周, 梁爱国, 等. 材料类型对 CaCO_3 析晶污垢生长特性的影响机理研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12):255–262.
- Jiang Huayi, Zhang Dingzhou, Liang Aiguo, et al. Effect mechanism of material type on crystallization growth of CaCO_3 -based scale[J]. Surface Technology, 2018, 47(12):255–262.
- [11] Kazi S N, Duffy G G, Chen X D. Mineral scale formation and mitigation on metals and a polymeric heat exchanger surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14–15):2 236–2 242.
- [12] Tang W, Lin Y H, Ma S Y, et al. The scaling mechanism of glass fiber reinforced plastics pipeline[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159:522–531.
- [13] 钱慧娟, 朱明亮, 侯俞行, 等. PVDF/FEP/ Al_2O_3 /CNT 防垢涂层制备及性能[J]. 塑料工业, 2021, 49(12):164–168, 175.
- Qian Huijuan, Zhu Mingliang, Hou Yuxing, et al. Preparation and performance of PVDF/FEP/ Al_2O_3 /CNTs anti-scaling coating[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(12):164–168, 175.
- [14] Chiboski E. Surface free energy of a solid from contact angle hysteresis[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2003, 103(2):149–172.
- [15] 徐志明, 张一龙, 徐欣. 温度及浓度对析晶污垢沉积特性影响的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(35):6 263–6 270.
- Xu Zhiming, Zhang Yilong, Xu Xin. Simulation study on influent of temperature and concentration on crystallization fouling deposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(35):6 263–6 270.
- [16] 徐志明, 王景涛, 贾玉婷, 等. 温度对纳米氧化镁和碳酸钙混合污垢特性影响[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(8):1 742–1 747.
- Xu Zhiming, Wang Jingtao, Jia Yuting, et al. Effect of temperature on composite fouling characteristics of nanometer magnesia and calcium carbonate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(8):1 742–1 747.
- [17] Kern D. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 1959, 4:258–262.
- [18] 赵亮, 邹勇, 刘义达, 等. 温度对换热器析晶污垢形成的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(8):1 938–1 943.
- Zhao Liang, Zou Yong, Liu Yida, et al. Effect of temperature on formation of crystalline fouling on heat exchanger surface[J]. CIESC Journal, 2009, 60(8):1 938–1 943.

(上接第 105 页)

- [9] 沈忠良, 高云霄, 尤建国, 等. 基于哈弗滑块与齿轮脱螺纹的叉形体注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4):70–74, 79.
- Shen Zhongliang, Gao Yunxiao, You Jianguo, et al. Design of fork trestle injection mould based on half slider and gear thread demoulding mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):70–74, 79.
- [10] 娄用够. 重卡斗箱滑块斜顶复合机构热流道注射模设计[J]. 塑料, 2021, 50(6):114–118.
- Lou Yonggou. Design of hot runner injection mold for heavy truck bucket with slider-lifters compound mechanism[J]. Plastics, 2021, 50(6):114–118.
- [11] 何镜奎, 陈洪土. 汽车侧裙板的热流道大型注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2018, 32(2):134–140.
- He Jingkui, Chen Hongtu. Design of large injection molds with hot runners for automobile side aprons[J]. China Plastics, 2018, 32(2):134–140.
- [12] 张维合, 冯婧, 闫丽静, 等. 汽车高位制动灯盖板大型注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2021, 35(1):98–102.
- Zhang Weihe, Feng Jing, Yan Lijing, et al. Design of large scale injection mold for car bremsleuchte cover[J]. China Plastics, 2021, 35(1):98–102.
- [13] 王建玲, 刘伟, 王永瑛. 豆浆机过滤器注塑模具设计[J]. 塑料, 2019, 48(3):78–81.
- Wang Jianling, Liu Wei, Wang Yongying. Soybean milk machine filter injection mold design[J]. Plastics, 2019, 48(3):78–81.
- [14] 蔡凯武, 李秋奋, 王春鹏. 汽车保险杠装饰条塑料精密模具设计[J]. 塑料, 2022, 51(1):89–93, 144.
- Cai Kaiwu, Li Qiufen, Wang Chunpeng. Precision mould design for bumper decoration strip plastic[J]. Plastics, 2022, 51(1): 89–93, 144.
- [15] 温煌英, 赵利平, 刘付国宇. 汽车前保险杠热流道精密注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):98–103.
- Wen Huangying, Zhao Liping, Liu Fuguoyu. Design of precision injection mold for hot runner of automobile front bumper[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):98–103.
- [16] 熊毅, 王伟. 四面六倒扣异形件二级侧抽芯注射模设计[J]. 中国塑料, 2021, 35(2):101–106.
- Xiong Yi, Wang Wei. Design of two-stage side core-pulling injection mold for special-shaped parts with four sides and six undercuts[J]. China Plastics, 2021, 35(2):101–106.