

页岩油集输管内壁润湿性与黏油性影响因素研究

敬加强^{1,2}, 张文¹, 李雅娇³, 尹然⁴, 孙杰^{1,2}, 刘少钧⁵

(1.西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500; 2.油气消防四川省重点实验室, 成都 611731; 3.国家管网集团北方管道有限责任公司大连输油气分公司, 辽宁 大连 116000; 4.长庆工程设计有限公司, 西安 710003; 5.江苏省天然气销售有限公司, 南京 210000)

摘要: **目的** 解决集油管材界面润湿性与黏油性的不确定性问题。**方法** 选用吉庆页岩油与采出水分别为试验液体与预润滑液体, 采用接触角测定仪和改进的沾滴试验装置, 分别测定 2 种页岩油与采出水在普通钢管、涂层钢管和柔性管及其水预润滑或锈蚀后的接触角与黏油量。**结果** 普通钢管锈蚀前后水相接触角为 52.5°和 124.5°, 锈蚀后的水相接触角增大 72.0°, 润湿性由亲水性转变为疏水性, 油相接触角及润湿性则相反。3 种管材表面的油、水接触角及黏油量随温度升高均表现出不同程度的减小, 涂层钢管的亲油性受温度影响最显著, 在 151#井和 020#井页岩油的油相接触角分别由 104.0°、110.1°降至 43.8°、46.1°, 黏油厚度分别减小 1.45 mm 和 1.16 mm。预润滑使 3 种管材的亲水性增强、亲油性减弱、油相黏附量降低, 其中涂层钢管预润滑使 151#井和 020#井页岩油的黏壁厚度分别减小 1.35、1.13 mm。涂层钢管通过升温或预润滑可改善页岩油的润湿性及流动摩阻。进一步分析固体表面能和黏附功与接触角的关系发现, 随着固体材料表面能和黏附功的增大, 固-液之间的接触角减小。**结论** 测试分析不同因素对集油管道流固界面接触角和黏油性的影响规律, 为油田集输管材基于润湿性与黏油性的比选提供基础数据与参考, 从而极大减少了集输过程中的能量损失。

关键词: 润湿性; 黏油性; 减阻; 接触角; 预润滑; 页岩油

中图分类号: TG174 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)15-0109-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.15.010

Affecting Factors of Wettability and Viscous Oiliness of Shale Oil Gathering and Transportation Pipeline

JING Jiaqiang^{1,2}, ZHANG Wen¹, LI Yajiao³, YIN Ran⁴, SUN Jie^{1,2}, LIU Shaojun⁵

(1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China; 3. Dalian Oil and Gas Transportation Branch of National Pipe Network Group North Pipeline Co., Ltd., Liaoning Dalian 116000, China; 4. Xi'an Chang Qing Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710003, China; 5. Jiangsu Natural Gas Sales Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the uncertain problem of interface wettability and adhesion of oil gathering pipe. The contact angle between two kinds of shale oil and three kinds of pipes under the effect of temperature, water pre-lubrication, rust, surface energy and adhesion work was tested by a contact angle tester. The adhesion of two kinds of shale oil and produced

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-12-25

Received: 2023-07-21; Revised: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (U19B2012, 52106208); 四川省自然科学基金 (2023NSFSC0924)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U19B2012, 52106208); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2023NSFSC0924)

引文格式: 敬加强, 张文, 李雅娇, 等. 页岩油集输管内壁润湿性与黏油性影响因素研究[J]. 表面技术, 2024, 53(15): 109-117.

JING Jiaqiang, ZHANG Wen, LI Yajiao, et al. Affecting Factors of Wettability and Viscous Oiliness of Shale Oil Gathering and Transportation Pipeline[J]. Surface Technology, 2024, 53(15): 109-117.

water in steel pipe, coated steel pipe, and flexible pipe was tested under conditions of water pre-lubrication or temperature change with an improved drop test device. The results showed that the contact angle and the amount of adhesive oil between the three kinds of pipes and the oil phase decreased with the increase of temperature. The amount of adhesive oil in coated steel pipe decreased the most, the contact angle with the two kinds of shale oil decreased by 60.2° and 64° , respectively, and the adhesion thickness between the coated steel pipe and the two kinds of shale oil decreased by 1.45 mm and 1.16 mm, respectively. Pre-lubrication enhanced hydrophilicity, weakened lipophilicity and decreased oil phase adhesion of the three kinds of pipes. Pre-lubrication of coated steel pipes reduced the adhesive wall thickness of shale oil well 151# and well 020# by 1.35 mm and 1.13 mm, respectively. The wettability and flow friction of shale oil could be improved by heating or pre-lubrication of coated steel pipe. After corrosion, surface roughness increased and wettability changed. The contact angles between the steel pipe and 151# shale oil before and after corrosion were 91.5° and 63.8° , and the contact angles between the steel pipe and 020# shale oil were 90.5° and 42.7° , respectively. After corrosion, the steel pipe changed from oleophobic to lipophilic. The relationship between solid surface energy and adhesion work and contact angle was analyzed and it was found that the larger the surface energy and adhesion work were, the smaller the contact angle between solid and liquid was. The effect laws of different factors on the fluid-solid interface contact angle and adhesion of oil gathering pipelines are tested and analyzed, providing basic data and reference for the selection of oil field gathering and transportation pipelines based on wettability and adhesion, thus greatly reducing energy losses in the gathering and transportation process.

KEY WORDS: wettability; adhesion; drag reduction; contact angle; pre-lubrication; shale oil

随着常规油气藏的枯竭,页岩油气已成为我国油气开发的热点^[1-3]。JQ 页岩油含蜡量高,凝点高,易乳化,地面集输具有非常规的特性,因此如何实现安全经济高效集输至关重要^[4]。常用集油方式主要包括加热法^[5]、掺稀法^[6]、掺水法^[7]、乳化法^[8-10]等,尽管这些方法的集油摩阻都能很好地满足生产与集输的需要,但它们都存在各自的不足,如加热法能耗高、排碳量大,掺稀法则需要足够的稀油资源,乳化法需要加剂且污水处理难达标准,而掺水法则后处理负荷大,且输油效率低。为此,学者们试图通过改变管材内壁的物理化学性质^[11-15],增大油相的接触角或管壁疏油性或亲水性,降低管壁对油品的黏附作用,从而达到有效降低原油集输摩阻、输油效率高的目的。

目前 Aspenes 等^[16]以碳钢、不锈钢、玻璃和环氧涂层为研究对象,研究了不同固体表面对水合物附着力的影响。结果表明,水合物与固体表面的黏附力随着固体表面自由能的增加而增加,且认为水合物与管壁的黏附力强烈依赖于水相,当管壁被水润湿时,水合物的黏附力最高。Renata 等^[17]以聚氯乙烯、搪瓷钢、镀锌钢为研究对象,采用一种接触角测量特殊设备,测试了不同温度、pH 值以及盐浓度条件下的固液接触角。结果表明,管壁粗糙度及氧化程度的增加可以极大降低接触角。蒋华义等^[18]选取 9 种不同板材以及 14 种试验液体为对象,分别测试了不同因素条件下的固液接触角,建立得到不同固液界面的接触角模型。结果表明,液体表面张力、固体表面能、粗糙度均影响接触角大小。齐宏媛等^[19]采用循环管路试验平台和接触角测量仪,以 3 种流体和 4 种管材为对象,测试分析了水润湿前后管内接触角与压降。结果表

明,管道内表面水润湿对流动阻力有一定的影响,并非均有益。许道振等^[20]通过测量有机玻璃和钢材表面的接触角,发现碳钢具有憎油性,有机玻璃具有憎水性,预润滑的一相表现出阻碍,另一相有润湿固体表面的倾向。刘延军等^[21]为了评估材料的黏附性能,计算了 2 种材料之间的黏附功。结果表明,沥青和集料之间的黏附主要受 2 种材料的润湿性能影响,同时还发现沥青和集料之间的黏附受集料的表面粗糙度和孔隙度的影响。目前研究对象大都是理想光滑表面或规则粗糙表面,而定量分析实际管材表面的润湿性却鲜见报道,对油田常用实际管材表面润湿行为研究则更少。

鉴于此,本研究选取 3 种油田候选管材与 2 种国产页岩油采出液等液体介质为研究对象,以管道内壁的润湿性和黏油性为关注焦点,采用接触角测定仪和改进的沾滴法,测试分析不同因素对集油管道流固界面接触角和黏油性的影响规律,为油田集输管材基于润湿性与黏油性的比选提供基础数据与参考。

1 试验

1.1 试验液体及材料

试验液体为 JQ 油田提供的 151#页岩油、020#页岩油,采用比重瓶法,测定 20°C 时的 2 种页岩油密度分别为 925 、 917 kg/m^3 。使用 510G 石油产品凝点测试仪,测定凝点分别为 7°C 、 6°C 。使用石油产品水分测定仪,测定含水率分别为 4%、3%。使用 823 型差示扫描量热仪,测定析蜡点分别为 25.13 、 24.58°C 。利用 HAAKE Viscotester iQ 流变仪,测试 2 种页岩油在 $20\sim 70^\circ\text{C}$ 内的流变特性及黏温特性。结果表明,151#

和 020#页岩油均为牛顿流体, 随着温度的升高, 2 种页岩油的黏度迅速降低, 然后趋于平缓, 20 ℃下的黏度分别为 1425.6、765.6 mPa·s。本研究采用油田采出水作为预润滑液体, 测定采出水在 20 ℃下的密度和表面张力分别为 994 g/m³ 和 73.8 mN/m。

试验材料(如图 1 所示)为涂层钢管、普通钢管和柔性管及其切片试件, 6 种材料均取自油田现场, 用游标卡尺和电子计量秤测量其参数, 结果见表 1。测试前, 将试验管段及试件用蒸馏水冲洗、丙酮除油、无水乙醇脱酯, 然后放入烘箱内烘干 30 min。

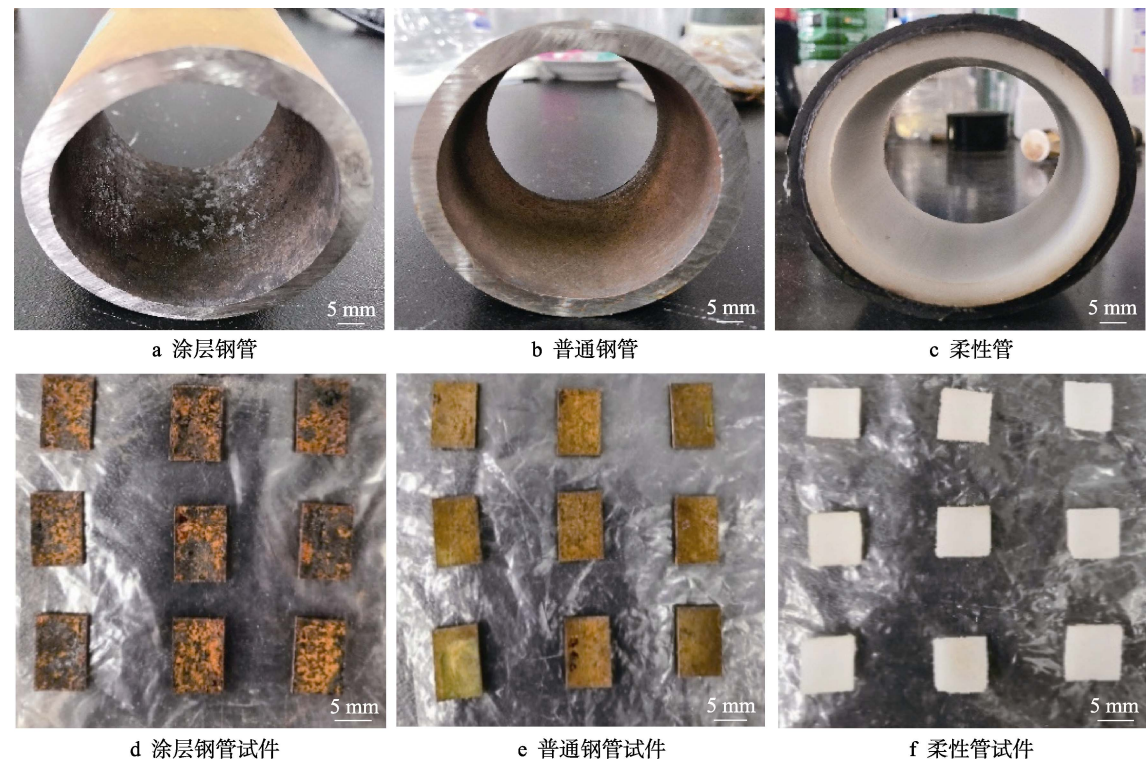


图 1 试验材料
Fig.1 Experimental materials: a) coated steel pipe; b) ordinary steel pipe; c) flexible pipe; d) coated steel pipe specimen; e) ordinary steel pipe specimen; f) flexible pipe specimen

表 1 试验材料参数
Tab.1 Experimental material parameters

Material	Diameter/ mm	Length/ mm	Weight/ g	Specimen size/mm
Coated steel pipe	50.96	50.12	336.19	0.6×7.4×11.3
Steel pipe	50.88	51.06	341.12	0.6×7.4×11.3
flexible pipe	50.24	51.04	77.52	1.1×8.8×9.5

1.2 接触角测量

采用 JC2000D 接触角测定仪, 测量固-液界面形成的接触角。首先将试验液体装入进样器中, 同时将待测试件固定在样品台上, 升降至合适位置。旋开光源, 缓慢调节增大亮度, 使软件屏幕中获得清晰的图像。旋转进样系统, 在针头上形成 3 μL 的液滴, 移动样品台到液滴下方, 液滴滴落到固体表面, 待液滴不再变形时, 记录接触角图像, 用量角法计算固-液界面的接触角。液滴滴落的形状和仪器的校准是影响接触角数值的主要因素, 试验前进行仪器的校准, 所有试验在相同条件下重复 3 次, 结果取平均值, 并做误差棒分析。

1.3 固体表面能

van Oss 理论^[22]将界面张力相关的分子间作用分为非极性和极性两部分, 非极性部分称为色散部分, 也称为 Lifshitz-van der Waals (LW) 作用, 极性部分本质上是电子给体与受体的相互作用, 称为 Lewis acid-base (AB, 酸碱) 作用, 表面张力的分量表达式^[23]:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \tag{1}$$

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \tag{2}$$

式中: γ^{LW} 表示表面张力的色散分量; γ^{AB} 表示表面张力的极性(酸碱)分量; γ^+ 表示表面张力的电子受体(酸)分量; γ^- 表示表面张力的电子给体(碱)分量。

由 Good-Girifalco-Fowkes 几何平均关系^[24], 固液表面张力 γ_{sl}^{LW} 与 γ_{sl}^{AB} 分别表示为:

$$\gamma_{sl}^{LW} = \gamma_s^{LW} + \gamma_l^{LW} - 2\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_l^{LW}} \tag{3}$$

$$\gamma_{sl}^{AB} = 2(\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} + \sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} - \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} - \sqrt{\gamma_l^+ \gamma_s^-}) \tag{4}$$

结合杨氏方程可得到:

$$\frac{(1 + \cos \theta)}{2} \gamma_1 = \sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_1^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_1^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_1^+} \quad (5)$$

实际固液界面需要考虑接触角滞后和三相接触线钉扎等动态现象^[25], 本研究接触角测量仅为静置 10 min 后的稳定静态接触角, 也可估算固体表面的能量特性^[26]。结合式 (1) ~ (5) 可计算得到各固体的表面自由能, 由于多数固体表面能较高, 页岩油易在其表面铺展, 故本研究选用极性液体去离子水和非极性液体二碘甲烷作为测试液体。每种管段重复测试 3 次, 取其平均值。

1.4 黏附功计算

试验液体接触管材内壁, 内壁表面空气被试验液体取代, 过程中液体分子与固体表面分子相互作用。相互作用过程中产生的单位面积 Gibbs 自由能为^[24,26]:

$$\Delta G_1 = \gamma_{sl} - \gamma_{sg} - \gamma_{lg} \quad (6)$$

将固液界面分开所需要的功, 即为黏附功^[27]:

$$W_a = -\Delta G_1 = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{sl} \quad (7)$$

Young^[28]方程为:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (8)$$

联立式 (7) 和 (8) 得固液表面对应黏附功为:

$$W_a = \gamma_{lg} (\cos \theta + 1) \quad (9)$$

其中: θ 为固液表面平衡接触角。

1.5 黏油量测量

为测试不同工况下的页岩油在管道内表面上的黏油量, 本研究借鉴并改进传统的沾滴法试验装置, 自行设计并加工一个带有密封底座的透明容器, 其侧面标有刻度, 以便计量测试管段内流出的液体, 试验装置见图 2。

具体操作步骤: 用游标卡尺测量测试管段内径及长度, 用电子天平称量, 记录数据 m_0 。将管段竖直接入带有密封底座的透明容器内, 从上端倒入液体 (页岩油或采出水), 使液面与管段上端口齐平。如果倒入的是页岩油, 则将试验装置放入设定温度下的烘箱, 到达设定时间后, 取出管段静置 5 min。当管段不再滴落溶液时, 称量并记录数据 m_1 。如果倒入

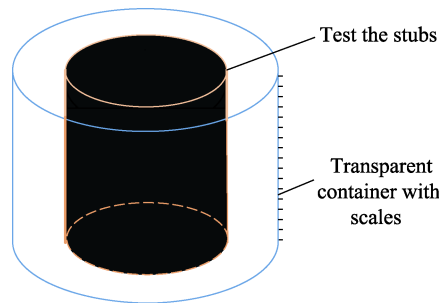


图 2 试验装置

Fig.2 Experimental device

的是采出水, 则润湿 1 h 后, 取出管段静置 5 min, 当管段不再滴落溶液时, 称量并记录数据 m_2 。然后重新放回透明容器内, 并从上端倒入油样, 1 h 后取出管段静置 5 min, 称量并记录数据 m_3 。

未预润滑管段内表面的黏油厚度计算公式:

$$\delta_0 = \frac{m_1 - m_0}{\rho_1 \pi d L} \times 10^6 \quad (10)$$

预润滑管段内表面的黏油厚度计算公式:

$$\delta_1 = \frac{m_3 - m_2}{\rho_2 \pi d L} \times 10^6 \quad (11)$$

式中: δ_0 、 δ_1 为管道内壁面平均黏油厚度, mm; m_0 为试验管段净质量, g; m_1 为油相润湿的管段质量, g; m_2 为水预润滑的管段质量, g; m_3 为油相润湿的预润滑管段质量, g; ρ_1 为页岩油密度, kg/m³; ρ_2 为油田采出水密度, kg/m³; d 为管段内径, mm; L 为试验管段长度, mm。

2 结果与讨论

2.1 温度变化的影响

2.1.1 温度对润湿性影响

在 20~70 °C (间隔 10 °C) 内, 测量 151#页岩油、020#页岩油、采出水在 3 种管材表面的接触角, 结果如图 3 所示。在 20~30 °C 内, 151#页岩油与 3 种管材表面的接触角均大于 90°, 表现出疏油性, 020#页岩油仅与涂层钢管表面的接触角大于 90°。随着温

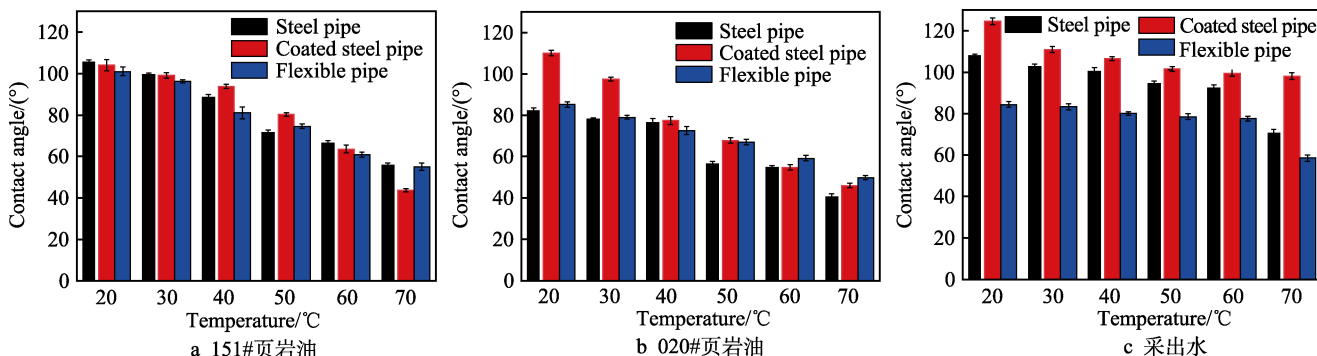


图 3 温度对接触角的影响

Fig.3 Effect of temperature on contact angle: a) 151# shale oil; b) 020# shale oil; c) produced water

度的升高, 3 种管材油相的接触角均不断减小, 亲油性逐渐增强, 水相接触角也表现出减小的趋势, 但变化不明显。另外, 可以发现涂层钢管对温度极为敏感, 与油相的接触角随温度升高减小值最大。

当液体与固体相接触时, 它们之间会存在表面张力和黏附力等相互作用。温度对接触角的影响主要通过液体表面张力和固体表面自由能 2 个方面来实现。随着温度的升高, 液体分子的热运动增强, 使液体表面张力降低。这是因为液体分子在高温下更容易从液体表面逸出, 导致表面张力降低。因此, 液体在高温下与固体表面的接触角通常会比低温下更小, 即液体更容易在固体表面上展开。同时, 随着温度的升高, 固体表面上的粗糙度会减小, 表面分子的振动会增强, 表面能也会随之减小。这会导致液体在固体表面上的展开能力增强, 从而使液滴在高温下的接触角通常会比在低温下小。

2.1.2 温度对黏油性影响

控制试验时间为 1 h, 调节烘箱温度 (20~70 °C), 进而控制油品和测试管段温度, 研究 151# 和 020# 页岩油的黏壁情况, 结果如图 4 所示。2 种页岩油的黏壁厚度随温度的升高而减小, 而且黏壁厚度减小的速率也不断降低。这是因为当温度升高时, 油品的黏度减小, 页岩油中高分子质量的组分 (沥青质、胶质等)

溶解度增大, 形成聚集体的可能性减小, 析出的总量也随之减少, 破坏了固体颗粒之间的键, 因此黏度减小, 进一步导致页岩油和管壁之间的摩擦系数减小, 黏附力减弱, 黏壁厚度减小。对于同种液体、不同管材, 分析发现, 随着温度的升高, 涂层钢管的黏油量变化值最大, 其次为普通钢管, 变化值最小的为柔性管。这与接触角随温度变化规律中得到的结论相近, 即涂层钢管与 2 种页岩油的黏附量和接触角受温度的变化最为明显。对于同种管材、不同液体, 分析发现, 151# 页岩油的黏壁厚度始终大于 020# 页岩油。这是因为 151# 页岩油的胶质、沥青质含量比 020# 页岩油更多, 而胶质、沥青质作为原油中强极性物质, 与含极性基团的金属表面相互作用时, 极性越强, 越容易黏附在金属表面上。因此, 相同条件下 151# 页岩油的黏壁厚度更大。

2.2 水预润滑管壁的影响

2.2.1 预润滑对润湿性影响

使用采出水对管材进行预润滑, 在 25 °C 下测量 151# 页岩油、020# 页岩油、采出水在 3 种管材表面的接触角, 结果如图 5 所示。预润滑之前, 柔性管与水的接触角为 55.8°, 接触角最小, 亲水性最强, 而预润滑之后, 涂层钢管的水相接触角由 94.8° 迅速下降

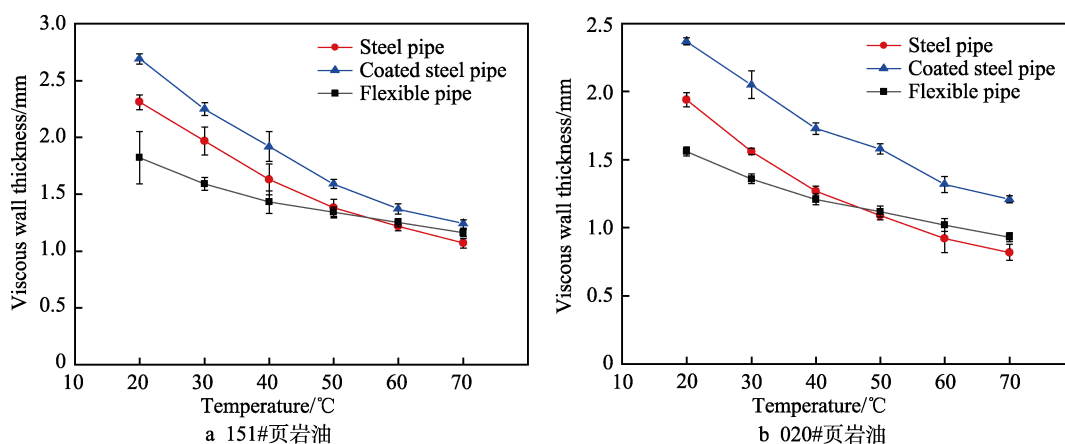


图 4 151# 和 020# 页岩油在不同温度下的黏壁厚度

Fig.4 Adhesive wall thickness of 151# and 020# shale oil at different temperatures: a) 151# shale oil; b) 020# shale oil

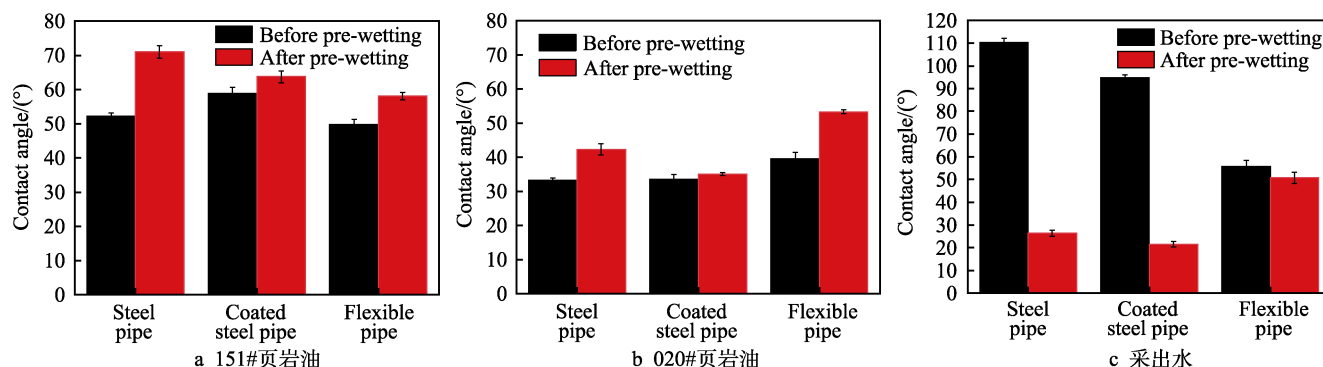


图 5 预润滑对接触角的影响

Fig.5 Effect of pre-lubrication on contact angle: a) 151# shale oil; b) 020# shale oil; c) produced water

为 21.5° ，表现出最强的亲水性。3 种管材与油相的接触角在预润湿后均有所上升，水相接触角均有所下降，表明材料亲油性减弱、亲水性增强，油相黏附程度减弱，有利于油水混输减阻，其中涂层钢管和普通钢管表现尤为明显。这是因为预润湿使固体材料表面被水相液膜覆盖，在电离层的作用下，液膜会倾向于被水相润湿，而阻止固体表面被第三相（油相）润湿，这与齐红媛等^[19]所得的结论一致。

2.2.2 预润湿对黏油性影响

选取涂层钢管、普通钢管、柔性管作为试验材料，以采出水为预润湿液体，以 151# 和 020# 页岩油为试

验介质，测量黏油量，结果如图 6 所示。预润湿后，3 种管材的黏油量都有所减少，这是由于水预润湿会在管段表面形成一层水膜，水膜的存在会抑制油相的黏附，造成油相的黏附量有所下降。其中，涂层钢管的黏附量变化值最大，其次是普通钢管，柔性管的变化最小。这是因为水膜的厚度和质量都会影响黏附量的多少，涂层钢管、普通钢管、柔性管的水膜厚度分别为 0.32、0.27、0.14 mm，因此涂层钢管在预润湿后的黏油量最少。此外，对比分析预润湿对接触角影响规律，最终发现，预润湿对涂层钢管的接触角和黏油量影响程度均为最大。

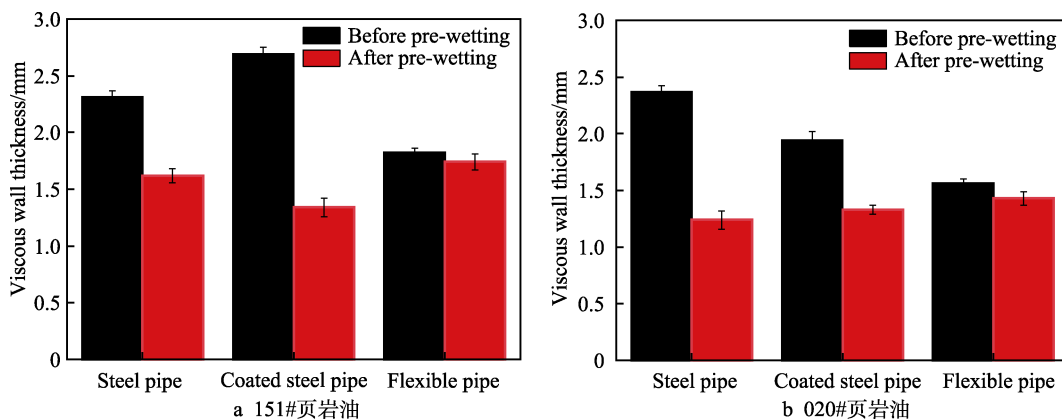


图 6 预润湿对黏壁厚度的影响

Fig.6 Effect of pre-wetting on the thickness of the adhesive wall: a) 151# shale oil; b) 020# shale oil

2.3 锈蚀对润湿性的影响

相比于涂层钢管与柔性管，普通钢管在实际生产过程中更容易发生锈蚀，造成表面粗糙度增大、润湿性发生改变。选取普通钢管为试验材料，以 151# 页岩油、020# 页岩油和采出水为试验介质测量接触角，试验结果见图 7。锈蚀前，普通钢管的水相接触角为 52.5° ，表现出亲水性；锈蚀后，水相接触角增大至 124.5° ，转变为疏水性。普通钢管锈蚀前后与 151# 页岩油的接触角分别为 91.5° 和 63.8° ，与 020# 页岩油接触角分别为

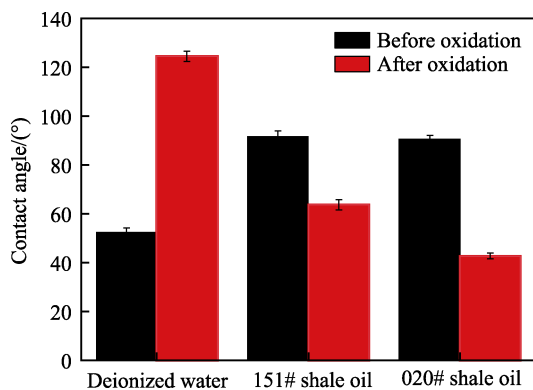


图 7 锈蚀表面对接触角的影响

Fig.7 Effect of the corroded surface on the contact angle

90.5° 和 42.7° ，说明普通钢管锈蚀后由疏油性转变为亲油性。其原因可能为，锈蚀后，普通钢管的表面积减小，低黏流体（水）更不容易占据普通钢管表面上的沟槽，使水合作用减弱，水膜更不稳定，亲水性减弱。

2.4 固体表面能对润湿性的影响

固体表面能计算采用 van Oss 理论，经过对比分析，发现极性液体去离子水与非极性液体二碘甲烷的 γ_L^p / γ_L^d 值分别为 2.36 与 0.05，差距较大，且均不与 3 种试验管材发生反应，符合运用 van Oss 理论的前提条件。因此，以这 2 种液体为试验介质测量接触角，计算 3 种材料固体表面能，进一步分析固体表面能与接触角的关系，测量结果如图 8 和图 9 所示。固-液界面的接触角数值随着固体材料表面能的增大而减小，该结果符合 Young 式方程。造成这种现象的主要原因是，当固体表面能增大时，表面分子之间的相互作用会变强，这会使液滴更容易展开在固体表面上，从而导致接触角的减小。因此，固体表面能和接触角之间具有反比关系，即固体表面能越大，接触角越小。

2.5 黏附功对润湿性的影响

利用接触角测量仪测得乙二醇、甘油、去离子水、

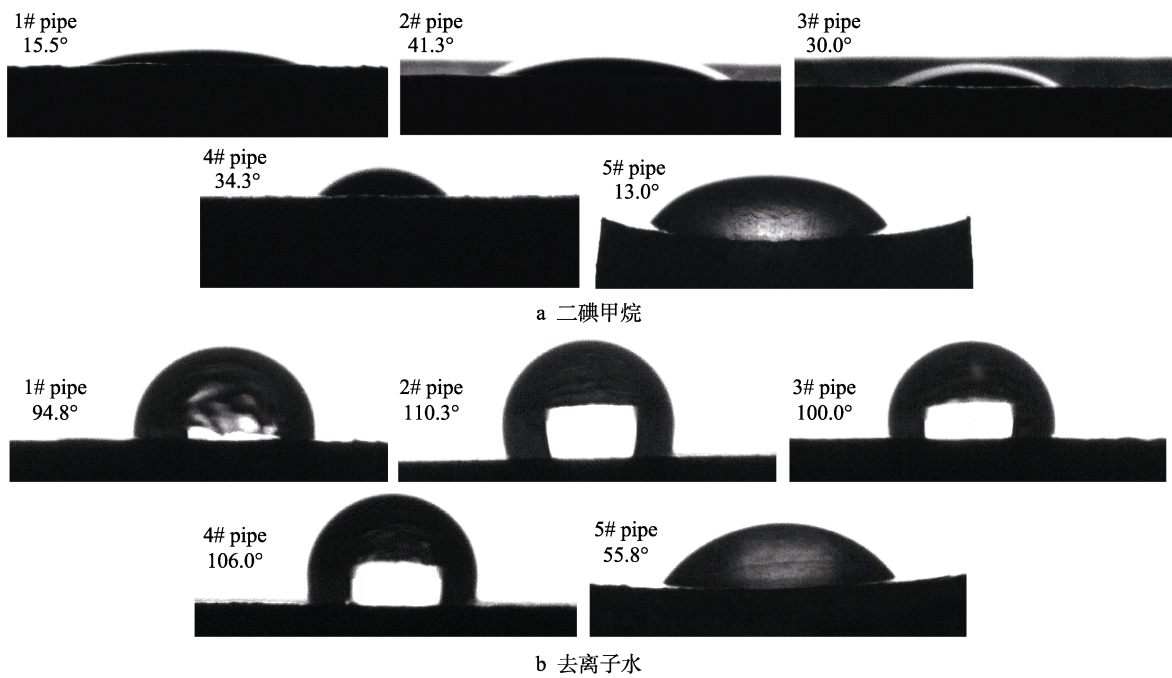


图 8 不同管材与 2 种液体的接触角
Fig.8 Contact angles between different pipes and two liquids: a) diiodomethane; b) deionized water

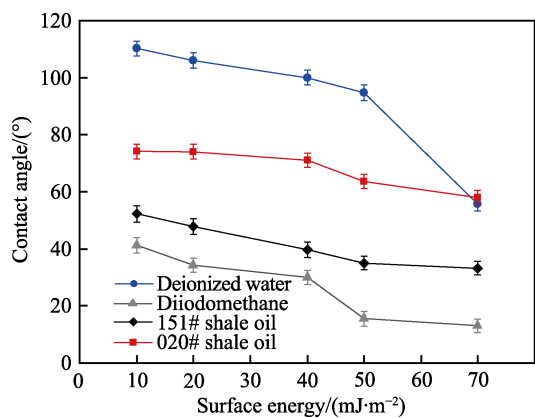


图 9 表面能对接触角影响
Fig.9 Effect of surface energy on contact angle

三乙醇胺以及水在 25 ℃ 下的表面张力 (见图 10 和表 2), 将其值代入式 (7) 中, 分别计算了 4 种液体与 3 种管材的内聚功、黏附功, 结果见表 3, 接触角随内聚功、黏附功变化情况如图 11、12 所示。由图可知, 4 种液体的内聚功从小到大为乙二醇、三乙醇胺、甘油、去离子水, 因此将其分离产生新表面的困难程度从大到小为去离子水、甘油、三乙醇胺、乙二醇。根据 Young-Dupré 方程可知^[29-30], 当接触角越小, 液体在固体表面上的表面自由能越小, 液体在固体表

面上的黏附能力也越强, 黏附功越大。因此, 接触角越小, 黏附功越大, 润湿性也越好。对于同一种液体, 3 种管材的黏附功从小到大为钢管、内涂层钢管、柔性复合管。因此, 柔性复合管的润湿性最好, 其次是内涂层钢管, 最后是普通钢管。

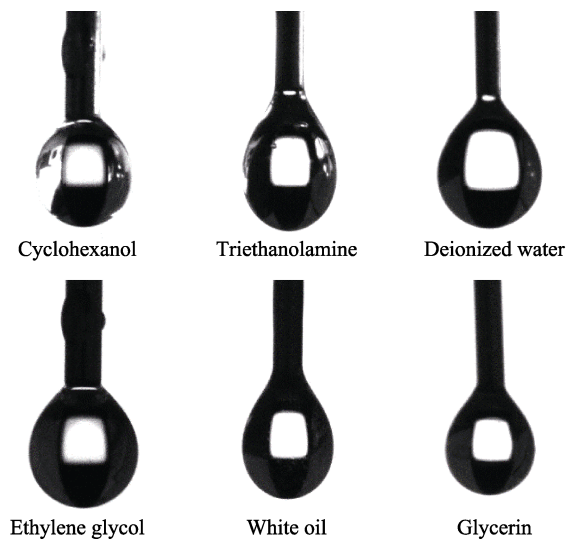


图 10 液体表面张力
Fig.10 Surface tension of liquid

表 2 液体表面张力
Tab.2 Surface tension of liquid

mN/m					
Cyclohexanol	Triethanolamine	Deionized water	Ethylene glycol	White oil	Glycerin
33.4	54.9	72.8	44.7	50.8	64.3

表 3 内聚功和黏附功
Tab.3 Cohesive work and adhesion work

Liquid	Tube material	Work of cohesion $W_c/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	Work of adhesion $W_a/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$
Ethylene glycol	Steel pipe	89.4	49.00
	Coated steel pipe		53.04
	Flexible pipe		78.18
Glycerin	Steel pipe	128.6	55.35
	Coated steel pipe		63.74
	Flexible pipe		86.82
Deionized water	Steel pipe	145.6	47.60
	Coated steel pipe		66.77
	Flexible pipe		90.72
Triethanolamine	Steel pipe	109.8	49.40
	Coated steel pipe		56.10
	Flexible pipe		76.35

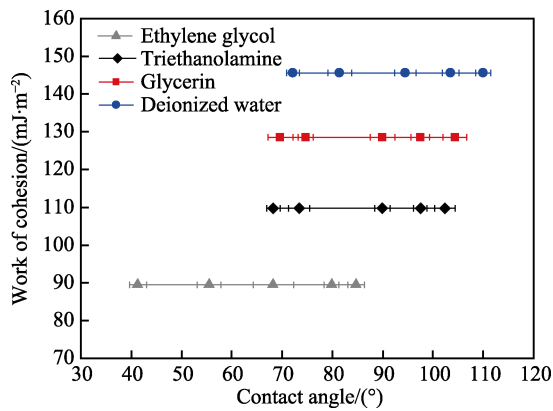


图 11 内聚功对接触角影响
Fig.11 Effect of cohesive power on contact angle

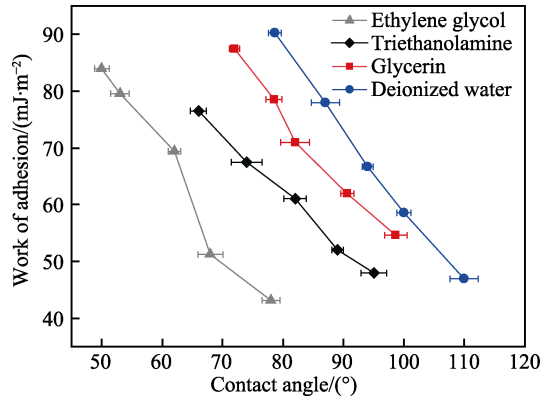


图 12 黏附功对接触角影响
Fig.12 Effect of adhesion work on contact angle

3 结论

1) 普通钢管与采出水、151#和 020#页岩油的接触角分别为 52.5°、91.5°、90.5°，表现为亲水疏油性；普通钢管锈蚀后与 3 种液体的接触角分别为 124.5°、63.8°、42.7°，表现为疏水亲油性。在 20~70 ℃内，3

种管材与油相的接触角及黏油量均随温度的升高而减小，其中涂层钢管与 2 种页岩油的接触角随温度升高分别减小 60.3°、64.0°，被 2 种页岩油黏附的厚度随温度升高分别减小 1.45、1.16 mm。两参数随温度升高而减小的数值均为最大，表明涂层钢管的润湿性与黏油性受温度影响最敏感。

2) 预润滑使 3 种管材与油相（151#与 020#页岩油）的接触角增大，与水相的接触角减小，同时预润滑也使得 3 种管材的黏油量均减少。预润滑使涂层钢管与 2 种页岩油的接触角和黏油量减小值均最大，表明预润滑对页岩油在涂层钢管内壁上的润湿性影响最明显。

3) 通过基液（极性液体去离子水、非极性液体二碘甲烷）测试普通钢管、涂层钢管和柔性管的固体表面能，结果分别为 36.21、50.93、70.23 mJ/m²。对比 3 种管材表面能与接触角的关系可见，固体表面能越大，固-液界面的接触角越小，即管材更容易被液相润湿。

4) 黏附功会随着接触角的增大而减小，对于同一种液体而言，3 种管材的黏附功由小到大为普通钢管、内涂层钢管、柔性复合管。因此，柔性复合管的润湿性最好，其次是内涂层钢管，最后是普通钢管。

5) 从 3 种管材的润湿性与黏油性看，内涂层钢管在高温下或水预润滑后，与 151#和 020#页岩油的接触角及黏油量均明显减小，减阻效果最显著，比普通钢管和柔性复合管更适合页岩油采出液混输减阻。

参考文献：

[1] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675-1686.
ZOU C N, ZHU R K, DONG D Z, et al. Scientific and

- Technological Progress, Development Strategy and Policy Suggestion Regarding Shale Oil and Gas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1675-1686.
- [2] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. *石油学报*, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU C N, PAN S Q, JING Z H, et al. Shale Oil and Gas Revolution and Its Impact[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 45-71.
JIANG Z X, ZHANG J G, KONG X X, et al. Research Progress and Development Direction of Continental Shale Oil and Gas Deposition and Reservoirs in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 45-71.
- [4] 王宇岑, 于晓洋, 李文博. 油砂油/页岩油地面集输技术及其对比分析[J]. *辽宁化工*, 2016, 45(10): 1318-1321.
WANG Y C, YU X Y, LI W B. Comparative Analysis of Sand Oil/Shale Oil Gathering and Transportation Technologies[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, 45(10): 1318-1321.
- [5] GHANNAM M T, ESMAIL N. Flow Enhancement of Medium-Viscosity Crude Oil[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2006, 24(8): 985-999.
- [6] 朱沫. 掺稀对稠油降粘效果的研究[J]. *广东化工*, 2021, 48(19): 60-61.
ZHU M. Research on the Effect of Heavy Oil Viscosity Reducation by Blending Diluting Oil[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(19): 60-61.
- [7] [7] LI J J, CHEN X D, TANG X D, et al. Upgrading Heavy and Extra-Heavy Crude Oil for Transportation by Use an Iron Oil-Soluble Catalyst[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2017, 35(12): 1203-1208.
- [8] 中石化石油化工科学研究院有限公司技术支持与服务 中心. 先进炼油化工技术 适合高矿化度油藏超稠油乳 化降黏技术[J]. *石油炼制与化工*, 2022, 53(12): 125.
Technical Support and Service Center of Sinopec Research Institute of Petroleum Processing Co., Ltd. Advanced Refining and Chemical Technology Is Suitable for Emulsification and Viscosity Reduction Technology of Super Heavy Oil in High Salinity Reservoir[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2022, 53(12): 125.
- [9] 王梓丞, 沈晓燕, 陶小平, 等. 新疆油田稀油乳状液高频脉冲低温电脱水可行性试验[J]. *流体机械*, 2020, 48(7): 7-11.
WANG Z C, SHEN X Y, TAO X P, et al. Feasibility Test of High-Frequency and Low-Temperature Electric Dehydration of Thin Oil Emulsion in Xinjiang Oilfield[J]. *Fluid Machinery*, 2020, 48(7): 7-11.
- [10] 渠慧敏, 吴琼, 张广中, 等. 原油乳化及乳液稳定性的影响因素和破乳技术研究进展[J]. *精细石油化工进展*, 2021, 22(6): 6-10.
QU H M, WU Q, ZHANG G Z, et al. Progress of Effects on Crude Oil Emulsification and Emulsion Stability and Demulsification Technology[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2021, 22(6): 6-10.
- [11] KUNG C H, SOW P K, ZAHIRI B, et al. Assessment and Interpretation of Surface Wettability Based on Sessile Droplet Contact Angle Measurement: Challenges and Opportunities[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(18): 1900839.
- [12] 冯晓娟, 石彦龙, 杨武. 材料表面的润湿性[J]. *化学通报*, 2014, 77(5): 418-424.
FENG X J, SHI Y L, YANG W. Wettability of Material Surface[J]. *Chemistry*, 2014, 77(5): 418-424.
- [13] 蒋华义, 刘梅, 齐红媛, 等. 三种钢基疏水表面微观形貌的分形特征及其对润湿性的影响[J]. *高等学校化学学报*, 2020, 41(6): 1313-1319.
JIANG H Y, LIU M, QI H Y, et al. Fractal Characteristics of the Microstructures of Three Hydrophobic Surfaces with Steel Substrate and Their Effects on Wettability[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2020, 41(6): 1313-1319.
- [14] 李炅, 张秀平, 贾磊, 等. 润滑油对 R32 在水平光管内流动沸腾换热特性及压降的影响[J]. *流体机械*, 2016, 44(3): 65-69.
LI J, ZHANG X P, JIA L, et al. Impact of Lubricating Oil on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R32 Boiling in Horizontal Tube[J]. *Fluid Machinery*, 2016, 44(3): 65-69.
- [15] 吉肖, 贾志海, 蔡小舒. 规则微观结构粗糙表面浸润性研究[J]. *材料导报*, 2013, 27(14): 142-146.
JI X, JIA Z H, CAI X S. Study on the Wetting Behavior of Rough Surfaces with Regular Microstructures[J]. *Materials Review*, 2013, 27(14): 142-146.
- [16] ASPENES G, DIEKER L E, AMAN Z M, et al. Adhesion Force between Cyclopentane Hydrates and Solid Surface Materials[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 343(2): 529-536.
- [17] DA SILVA R C R, MOHAMED R S, BANNWART A C. Wettability Alteration of Internal Surfaces of Pipelines for Use in the Transportation of Heavy Oil via Core-Flow[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 51(1/2): 17-25.
- [18] 蒋华义, 张亦翔, 梁爱国, 等. 材料表面润湿性的影响因素及预测模型[J]. *表面技术*, 2018, 47(1): 60-65.
JIANG H Y, ZHANG Y X, LIANG A G, et al. Influencing Factors and Prediction Model of Material Surface Wettability[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 60-65.
- [19] 敬加强, 齐红媛, 梁爱国, 等. 管道表面润湿性对层流流动阻力的影响[J]. *化工进展*, 2017, 36(9): 3203-3209.
JING J Q, QI H Y, LIANG A G, et al. Experimental Research on the Effect of Pipe Surface Wettability on Flow Resistance in Laminar Flow[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(9): 3203-3209.

(下转第 128 页)

- Flow and Solidification Microstructure of Nickel-Base Superalloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 178-188.
- [27] REN Z H, ZHANG D Z, FU G, et al. High-Fidelity Modelling of Selective Laser Melting Copper Alloy: Laser Reflection Behavior and Thermal-Fluid Dynamics[J]. Materials & Design, 2021, 207: 109857.
- [28] LI S Y, FU G, LI H L, et al. Effect of Layer Thickness on the Melt Pool Behavior and Pore Defects Evolution of Selective Laser Melting CuCrZr Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 967: 171778.
- [29] XIE J, KAR A, ROTHENFLUE J A, et al. Temperature-Dependent Absorptivity and Cutting Capability of CO₂, Nd: YAG and Chemical Oxygen-Iodine Lasers[J]. Journal of Laser Applications, 1997, 9(2): 77-85.
- [30] 李泓历, 傅广, 任治好, 等. 多光束激光选区熔化拼接区域熔池动力学行为数值模拟[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 406-418.
- LI H L, FU G, REN Z H, et al. Numerical Simulation of Molten Pool Dynamics in Multi-Beam Laser Selective Fusion Splicing Region[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 406-418.
- [31] REN Z H, FU G, ZHANG D Z, et al. Thermal Flow Characteristics and the Evolution of Laser Absorption in Laser Powder Bed Fusion of Cu-Cr-Zr Alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 216: 106957.
-
- (上接第 117 页)
- [20] 许道振, 张劲军, 王彬, 等. 预润湿对管道润湿性的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 147-151.
- XU D Z, ZHANG J J, WANG B, et al. Effect of Pre-Wetting on Pipeline Wettability[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(6): 147-151.
- [21] 刘延军, 张玉贞. 不同类型沥青与集料润湿性能及其黏附功[J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(3): 1-8.
- LIU Y J, ZHANG Y Z. Wettability and Adhesion Work between Different Kinds of Asphalt and Mixture[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(3): 1-8.
- [22] VAN OSS C J. Interfacial Forces in Aqueous Media[M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [23] GIRIFALCO L A, GOOD R J. A Theory for the Estimation of Surface and Interfacial Energies. I. Derivation and Application to Interfacial Tension[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1957, 61(7): 904-909.
- [24] VAN OSS C J. Use of the Combined Lifshitz-Van Der Waals and Lewis Acid-Base Approach in Determining the Apolar and Polar Contributions to Surface and Interfacial Tensions and Free Energies[J]. Journal of Adhesion Science Technology, 2002, 16(6): 669-677.
- [25] ZAHIRI B, SOW P K, KUNG C H, et al. Understanding the Wettability of Rough Surfaces Using Simultaneous Optical and Electrochemical Analysis of Sessile Droplets[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 501: 34-44.
- [26] 陈晓磊. 固体聚合物表面接触角的测量及表面能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- CHEN X L. Surface Free Energy and Contact Angle Measurement of Solid Polymer[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [27] NIKOLOV A, WASAN D. Current Opinion in Superspreading Mechanisms[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 222: 517-529.
- [28] BIELAWSKA M, JAŃCZUK B, ZDZIENNICKA A. Correlation between Adhesion of Aqueous Solutions of Nonionic and Anionic Surfactant Mixture with Short-Chain Alcohols to Polymer Surface and Their Adsorption at Interfaces. I. Adhesion Tension and Adsorption[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 74: 200-206.
- [29] DEVASAHAYAM S, YARLAGADDA P. Measurement Studies on Superhydrophobic Materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 988: 134-142.
- [30] VAN OSS C J. Interface Science and Technology[M]. Amsterdam: Elsevier, 2008: 13-30.