



Research Progress on Influencing Factors of Erosion Corrosion in Oil Pipelines

Hongbo Zhu

Karamay Vocational and Technical College, Branch of Mechanical Engineering, Karamay, China

Email address:

zhuhongbo@kzjssxy.edu.cn

To cite this article:

Hongbo Zhu. (2024). Research Progress on Influencing Factors of Erosion Corrosion in Oil Pipelines. *Science Discovery*, 12(4), 83-88.

<https://doi.org/10.11648/j.sd.20241204.12>

Received: 21 June 2024; **Accepted:** 18 July 2024; **Published:** 23 July 2024

Abstract: Original sentence: "Erosion corrosion is a significant factor contributing to the thinning and failure of oil pipelines. This paper addresses the issue of erosion corrosion of oil pipelines in oil fields under the action of multiphase flow, the main factors affecting the erosion corrosion are introduced, including the hydrodynamic factors, solid particle properties, fluid medium properties and temperature, It summarizes and analyzes the mechanisms through which these different factors affect the erosion corrosion of oil pipelines. The paper points out that increased fluid velocity in oil pipelines, sudden changes in flow patterns, and turbulent kinetic energy can accelerate erosion corrosion to some extent, With the increase of flow rate, erosion corrosion mechanism will change from electrochemical corrosion dominant to erosion accelerated corrosion, There is a maximum value for erosion corrosion based on the solid particle impact angle. The harder and sharper the solid particles are, the stronger their impact on the pipeline, especially the impact of low Angle impact is more significant; however, the diameter and quantity of particles can affect the development of erosion corrosion due to 'particle size effect' and 'shielding effect.' Additionally, lower pH values and higher temperatures of the fluid medium will increase pipeline erosion corrosion. Finally, future research directions for studying erosion corrosion in oilfield pipelines under multiphase flow conditions are discussed in light of existing research."

Keywords: Oil Pipeline, Erosion Corrosion, Influencing Factors, Fluid Mechanics, Multiphase Flow

输油管道冲刷腐蚀影响因素研究进展

朱红波

克拉玛依职业技术学院机械分院, 克拉玛依, 中国

邮箱

zhuhongbo@kzjssxy.edu.cn

摘要: 冲刷腐蚀是造成输油管道减薄失效的重要因素, 针对多相流作用下油田输油管道的冲刷腐蚀问题, 介绍了影响冲刷腐蚀的主要因素, 包括流体力学因素、固体颗粒属性以及流体介质属性和温度的影响, 总结分析了不同因素对输油管道冲刷腐蚀的影响机制。指出输油管道中流体速度增大、流场中流型突然变化和湍流动能会在一定程度上会加速冲刷腐蚀, 随着流速的增加会导致冲刷腐蚀机制由电化学腐蚀主导向冲刷加速腐蚀转变, 而固体颗粒冲击角度则存在一个冲刷腐蚀的最大值; 固体粒子硬度越高、形状越尖锐, 对管道冲击作用越强, 特别是低角度冲击时影响更为显著, 但粒子的直径和数量会因“粒度效应”和“屏蔽效应”在一定范围内影响冲刷腐蚀产生和发展; 流体介质溶液PH值越低、温度越高均会增大管道冲刷腐蚀。最后, 结合现有研究对多相流作用下油田输油管道冲刷腐蚀研究的发展方向进行了展望。

关键词: 输油管道, 冲刷腐蚀, 影响因素, 流体力学

1. 引言

管道是进行原油和石油产品集输的重要设备,随着井下采出液含水量、矿化度升高,部分区块高含 CO_2 、 H_2S 等腐蚀性气体,并伴有砂粒等固体颗粒,造成输油管道内部出现严重的冲刷腐蚀[1, 2],导致管壁减薄甚至刺漏和穿孔,对油田正常生产和安全运行造成极大影响。冲刷腐蚀是带有腐蚀性的流体介质与金属表面与之间发生相对运动而引起的材料损坏现象,是材料受冲刷磨损和腐蚀损伤交互作用的结果[3, 4]。输油管道冲刷腐蚀因其在冲刷磨损的同时伴随化学或电化学腐蚀而使材料损伤机理和流失规律变得十分复杂。因此,深入研究输油管道多相流冲刷腐蚀影响因素,明确冲刷腐蚀过程中机械冲刷和电化学腐蚀之间的交互作用,对预防管道冲刷腐蚀、保障油田生产安全具有重要意义。本文结合近年来国内外学者在冲刷腐蚀方面的研究成果,对输油管道多相流冲刷腐蚀影响因素进行综述,总结分析了流体力学、固体颗粒属性以及介质环境因素对输油管道冲刷腐蚀的影响机制,可为冲刷腐蚀理论研究和输油管道冲刷腐蚀控制及预防提供借鉴和参考。

2. 流体力学因素

2.1. 流速对冲刷腐蚀的影响

输油管道在进行油品输送过程中,含有固相颗粒的多相流介质往往会在压力作用下以一定速度流动,介质在金属管道表面的流动会对腐蚀机理造成影响,特别是流动介质携带固体颗粒对管道内壁面的微切削冲刷作用,不仅会对管道内壁面造成机械冲刷而产生冲蚀磨损,同时也会加速腐蚀介质的传质过程,并且促进金属表面钝化膜的稳定性下降和脱落,但材料的钝化特性增强则会削弱流速对冲刷腐蚀的影响。通常,增大介质流速不仅会促进冲刷腐蚀,同时也会导致冲刷腐蚀机制由电化学腐蚀主导向冲刷加速腐蚀转变。目前,比较统一的观点是流速对冲刷腐蚀的影响存在临界值,当介质流速低于某一临界值时,固体颗粒冲击频率较低,金属可以通过再钝化修复表面膜,几乎观察不到流动引起的腐蚀加剧,冲刷腐蚀机制主要受电化学腐蚀控制[5];当介质流速超过临界流速时,材料表面钝化膜由于无法及时修复导致冲刷腐蚀速率随流速增加而迅速增大[6],冲刷腐蚀机制受电化学腐蚀和冲刷磨损控制。在不同的工况条件下,材料冲刷腐蚀的临界流速值也会有所不同。黄辉等以集输管道常用材料16Mn钢为研究对象,研究典型酸性天然气在不同流速、 CO_2 分压和 H_2S 含量时的冲刷腐蚀速率,确定临界流速为10m/s,当介质流速超过此速度以后,试样表面腐蚀坑大小和深度都明显增大[7]。樊学华等采用试验与CFD数值模拟手段研究了X70钢冲刷腐蚀速率随流速的变化情况,结果表明,在介质流速超过10m/s以后,随着流速的增加试样表面冲刷磨损会显著加剧,但当流速超过35m/s时,冲刷磨损速率增幅减弱,但冲刷磨损仍为主控因素[8]。王海红等采用旋转圆柱电极试验装置研究了流速和腐蚀时间对N80套管钢冲刷腐蚀的影响,发现当介质流速在1~2m/s时,冲刷腐蚀速率缓慢增加,当介质流速大于2m/s时,冲刷腐蚀速率大幅增大,

并且两段均近似为线性关系,该结果与陈虎等关于流速对N80钢冲刷腐蚀行为的影响基本一致[9, 10]。近年来,也有学者发现流体介质在金属表面的流动并不一定总是加快金属的腐蚀速率,在一些特殊情况下,也会出现金属冲刷腐蚀速率随介质流速增大而降低的现象[11]。吴成红等认为介质流速增大可带走管壁附着或沉积的腐蚀产物,可以避免垢下腐蚀和缝隙腐蚀的发生,同时增大流速可以使缓蚀剂在管道中均匀分布,从而抑制冲蚀腐蚀[12]。由于流速对冲蚀腐蚀速率的影响受到管道材质、流场流型、介质属性等多种因素综合作用,其影响机理十分复杂,大量研究表明腐蚀与磨损的交互作用不仅仅是单一的相互促进或抑制作用,而是在不同工况条件下两者间可能发生的正、负交互作用的相互影响、过渡和转换[13]。

2.2. 流场对冲刷腐蚀的影响

冲刷腐蚀过程中介质流场的形态和速度分布有很大关系,特别是在管道突然变径或改变走向的场合,如突然膨胀管、弯头或三通部位,由于流体湍动、相间冲击作用及相对运动,两相流和多相流相界面几何形状与流动结构复杂多样,形成层流、泡状流和段塞流等[14],其中,段塞流条件下流体处于高速紊乱状态,对金属表面产生较强的冲刷与剪切,管道内壁特定位置将处于周期性的油水两相交替润湿条件,其润湿特性取决于流型特征和材料表面等因素,此时管道的腐蚀规律和机理变得更加复杂。管道内部流场突变会产生旋涡,即便是在较低速度情况下,也会产生湍流,有扰动的流体由于受到阻碍而出现分离和冲击管壁的情况,对管道内壁产生较大的机械冲击和剪切应力,促进腐蚀性环境的形成及腐蚀性离子的传质过程,进而对加速管道壁面腐蚀。随着油田采出液含水率升高,或者针对稠油采用的掺水集输工艺,在长距离、长时间输送过程中发生沉降而形成油水分层流,导致管道底部长时间与水接触引发腐蚀。王兴国等通过试验和数值仿真的方法研究了不同雷诺数和不同缺陷下管道内流场变化和冲刷腐蚀之间相互关系,对比分析管道内缺陷临界点附近流场变化发现靠近临界缺陷的管壁会出现涡流,并随雷诺数的增加而增大[15]。沈雅欣等采用CFD软件模拟了竖直弯管的液固两相流冲刷腐蚀,通过流场分析可以看出,当流体进入弯头后流动方向发生改变,速度场的抛物线型分布规律遭到破坏,出现速度界面分层和二次流产生,加大对管道的冲蚀腐蚀[16]。胡宗武等采用管流式实验装置通过失重法和表面分析手段研究了水平弯管在单向流冲刷下不同部位的冲刷腐蚀特征,结果表明,弯管不同部位具有不同的流动特性,不同部位表面受流动介质的冲刷和剪切作用也不同,造成弯管不同部位冲刷腐蚀速率存在差异,尤其在弯管出口处由于二次流影响,弯管出口外侧部分的冲刷腐蚀严重[17]。王彦骅等采用数值模拟手段对 π 型管冲刷腐蚀进行模拟,研究 π 型管内流场分布和流体速度等因素对冲刷腐蚀的影响,但所采用数学模型均为CFD软件自带的冲蚀磨损模型,不能全面考察冲刷腐蚀过程中冲刷磨损和电化学腐蚀以及两者相互作用在不同工况条件下与管道冲蚀腐蚀速率之间的内在关系[18]。目前对于复杂流型下多种腐蚀机制并存的问题认识还不够全面,流场变化对冲蚀腐蚀的影响规律仍需进一步研究。

2.3. 冲击角度对冲刷腐蚀的影响

流体对管道内壁的冲刷作用一般分为水平和垂直两个分量[19]，在水平方向上，液固两相流对管壁主要产生剪切作用，一方面可以加快金属表面电荷传输和传质效应，促进腐蚀产物膜的形成；另一方面随着介质流速增大剪切力随之增大，促使腐蚀产物从材料表面剥离，进而使冲蚀腐蚀速率增大。在垂直方向上的冲刷作用主要产生正应力，一方面，正应力对管道壁面产生冲击，促进反应物在材料表面上的附着接触并发生反应，抑制电荷转移过程；另一方面，材料表面因受到固体颗粒的连续冲击作用会产生塑性变形及疲劳裂纹，使材料呈片状脱落，表面粗糙度增大，甚至产生冲击坑形成点蚀，进而加速腐蚀。在输油管道中，固体粒子在一定速度的液体介质携带作用下会以不同方向或角度冲击管道内壁，特别是在弯管、三通、变径等部位出现流场变化、湍流动能变化的情况下，冲击角度的变化会导致冲刷磨损与电化学腐蚀机制的不断变化。当液固两相流以较低角度冲刷管壁时，水平冲刷作用占主导地位，固体颗粒对金属表面的切削作用时导致材料腐蚀和流失的主要因素；当液固两相流以较大角度冲击管壁时，垂直冲刷作用占主导地位，固体颗粒对金属表面的冲击作用是导致材料腐蚀的主要因素[20]。随着冲击角的增加，冲刷腐蚀会由微切削机制向疲劳断裂机制变化，腐蚀过程会随之变化，因此，存在某一角度使得切应力和冲击作用共同产生的损伤最大，此时材料的腐蚀损伤最严重[21]。Tang等通过试验研究了冲刷腐蚀速率随冲刷角度的变化，结果表明，冲刷角度在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间时，冲刷腐蚀速率会随着冲刷角度的增大而不断增大，并在 45° 时达到最大值；当冲刷角度由 45° 增加至 90° 时，冲刷腐蚀出现先减小后增大的变化[22]。邢建东等通过对1Cr18Ni9Ti不锈钢和T8高碳钢进行冲刷腐蚀试验，发现在冲击角度为 45° 时两种材料的冲刷腐蚀磨损率均出现极大值[23]。Abedini等通过研究冲刷腐蚀的组成发现，铝青铜合金的冲刷腐蚀速率会随冲击角的增大而先增大后减小，并在 40° 时达到最大值[24]。孟文波等采用高温高压冲蚀-腐蚀耦合试验装置研究了井下管柱钢材的冲刷腐蚀，研究发现冲击角度对抗冲蚀能力较强的13Cr钢影响较小，而不同冲击角度下N80钢冲蚀-腐蚀试验结果表明，当冲击角度为 45° 时冲刷腐蚀最大、 90° 次之、 0° 最小[25]。由于管道材质特性和输送介质及工况条件不同，流体冲刷角度对于材料腐蚀速率的影响较为复杂，冲刷腐蚀速率最大值对应的冲击角度也并不完全相同，现有试验研究所定义的冲击角度大部分为名义上的冲击角度，但在实际试验中想要准确控制冲击角度还存在一定难度，受流场影响粒子冲击试样的角度很可能在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间变化，即便是射流试验也会因绕流现象引起角度变化，因此，如何准确表征冲击角度对冲刷腐蚀过程的影响还需要进一步开展研究。

3. 固体粒子性质对冲刷腐蚀的影响

3.1. 固体粒子的硬度与形状

一般条件下，随着粒子硬度提高，材料表面冲刷腐蚀不断增大，但当固体粒子硬度比管道材料硬度高很多时，单纯提高粒子硬度对冲刷腐蚀的影响则不明显。研究人员常采用固相颗粒硬度与材料硬度的比值衡量固体粒子硬

度对冲刷腐蚀的影响，即随着比值增大冲蚀磨损速率增加，比值超过临界值后冲蚀磨损趋于平稳[26]。尖锐、多角粒子由于更容易在材料表面产生切削作用而比圆形粒子更能加速冲刷腐蚀[27]，同时，固体粒子的形状将会影响其接触管道壁面的冲击角度，造成低角度冲击时硬度对冲刷腐蚀影响更为显著。主要原因是低角度冲击时易于发生表面犁削，粒子硬度越高产生的切削作用越强，而且较软的粒子在磨损过程中容易被磨钝，降低其切削作用。粒子的硬度和形状对冲刷腐蚀的作用常相互影响，在一些情况下硬度较低但有尖角的固体颗粒甚至会造成比硬度较高的圆形颗粒更为严重的冲刷腐蚀，因此，在有些冲刷腐蚀数学模型中常常将固体颗粒的形状因子列入其中。

3.2. 固体粒子的尺寸与含量

固体颗粒的尺寸和含量会影响材料冲刷腐蚀机制，在相同流速下，固体颗粒尺寸越大其动能越大，对管道壁面的冲击损伤会增大冲刷腐蚀速率，但当固体颗粒粒径超过某一临界尺寸后，其冲刷腐蚀速率等影响趋于平稳甚至不再增加。研究人员从不同角度对冲刷腐蚀的“粒度效应”进行验证和说明，Talaghat等指出当粒径大于1mm时，固体颗粒通常会在流体中发生沉降而降低冲刷腐蚀速率[28]；姜志超等采用失重法和电化学方法研究了X80钢在不同砂粒粒径下的冲刷腐蚀行为，通过失重分析和动电位极化曲线拟合结果说明了随着粒径增大，材料失重速率增大，腐蚀电位上升，当砂粒粒径超过临界粒径（ $120\sim 212\mu\text{m}$ ）时，冲刷腐蚀速率出现下降趋势[29]。随着固体颗粒含量增加，单位时间内冲击管道壁面的粒子数量增多，冲刷腐蚀速率增大，但不会随着颗粒含量增加而一直增大，同样存在一个临界值[30]，主要原因是固体粒子含量过高会导致粒子之间交互作用加剧，冲击动能衰减，过多的粒子可能积存在材料表面而产生“屏蔽效应”，导致冲刷腐蚀速率减小[31]。徐哲等通过研究发现液固两相流中含沙量在3%时P110钢冲刷腐蚀速率达到最大值，超过3%时则会出现“屏蔽效应”而减小[32]。周昊等采用旋转圆柱电极流动腐蚀试验装置研究了在含砂液固两相流中N80钢的冲刷腐蚀影响因素，结果表明，砂粒质量分数从1%增加到3%时，N80钢流动腐蚀速率逐渐增大，但砂粒质量分数从3%增加到4%以后，由于过多的砂粒质量分数形成“屏蔽作用”，冲刷腐蚀速率有所降低[33]。

4. 流体介质属性和温度对冲刷腐蚀的影响

4.1. 流体介质属性

油田采出液中的 H_2S 、 CO_2 和采出水等介质成分对输油管道会产生不同程度的腐蚀作用，因此在多相流冲刷腐蚀研究或试验中往往将流体介质属性的腐蚀性因素简化为某些成分的含量，如 Cl^- 、 S^{2-} 、 CO_2 浓度以及溶液的PH值等参数来表示。流体的pH值会影响电化学腐蚀过程，在中性条件以及碱性条件下，腐蚀过程主要是由氧去极化反应控制，而在酸性条件中，腐蚀过程主要由氢去极化效应控制[34]。因此，在酸性环境中冲刷腐蚀速率较高，碱性环境中较低，中性环境中最低。李涌泉等通过对N80钢进行冲刷腐蚀试验发现，当溶液pH值为2和3时，N80钢以均匀腐蚀为主，随着溶液pH值的升高，冲刷腐蚀速率降低[35]。周昊等研究了N80钢在不同pH值条件下的含砂、含

NaCl液固两相流流体中的冲刷腐蚀行为, 结果表明随着pH值的增大, N80钢的极化电阻变大, 容抗弧半径增大, 腐蚀电流密度呈下降趋势, 腐蚀速率变小[36]。采出液中的 H_2S 、 CO_2 易溶于水, 进而增加集输管道凝析水中 H^+ 离子浓度, 降低溶液PH值, 促进电化学腐蚀过程, 在一定流速作用下加快冲刷腐蚀速率[37]。李家锋通过室内模拟试验研究了采油井油管冲刷腐蚀影响因素, 发现随着 CO_2 分压不断增加, 试样的腐蚀速率逐渐增大[38]。谢涛等以实际油田的地层水样为腐蚀介质, 在高温高压条件下开展不同材质的油套管钢冲刷腐蚀模拟实验, 结果表明N80、L80、1Cr、3Cr、13Cr等5种材质油套管钢的腐蚀速率随 CO_2 分压的升高而增大, 其中N80、L80、1Cr腐蚀速率变化显著, 而耐腐蚀性较好的13Cr钢的腐蚀速率较低, 对 CO_2 分压没有表现出明显的规律[39]。黄辉等通过对16Mn钢冲刷腐蚀影响研究发现, 随着 CO_2 分压和 H_2S 含量的增加, 试样表面的冲刷腐蚀都会增大[7]。原油中的含水率增大不仅会增加 CO_2 和 H_2S 的溶解量, 同时也会导致介质流动状态发生变化。低含水率主要形成油包水型乳状液, 管壁因受到原油包裹而减少与水直接接触, 从而降低了腐蚀速率; 随着原油含水率升高, 流体介质会从油包水型乳状液向水包油型转变, 增大 CO_2 溶解度和 H_2CO_3 形成, 促进腐蚀膜的溶解, 增大冲刷腐蚀速率[40]。

4.2. 流体介质温度

温度对冲刷腐蚀的影响主要体现在影响氧扩散系数、气体和各种化学成分的溶解度以及腐蚀产物膜特性等方面。流体温度升高不仅会使黏度降低, 流体的流动阻力减小, 对管道表面的冲击能增大, 也会加快去极化剂的传质过程, 使氧扩散速率变大, 金属反应活性增强, 电荷转移速率变大而加剧电极表面损伤[41], 同时, 温度也可以通过影响金属表面腐蚀产物膜的组成和结构, 进而影响材料的耐冲刷腐蚀性能。对于不同材质的集输管道, 在不同工况条件下温度对其腐蚀产物膜形成机制也会产生不同影响。Tian等采用电化学方法研究温度对X65钢冲刷腐蚀影响规律, 发现随着温度的升高自腐蚀电位上升且负移, 阳极反应速率明显增大[42]。方信贤等采用失重法和电化学法研究了液固两相流中介质温度对Ni-P镀层及316L钢冲刷腐蚀的影响, 发现在20~80 °C温度范围内, 随介质温度升高Ni-P镀层和316L钢的自腐蚀电流密度均增大, 表明腐蚀速率随介质温度升高而增大[43]。在不考虑腐蚀动力学情况下, 随着温度的升高, 大多数金属和合金会因塑性下降导致冲刷磨损率下降; 随着温度不断升高, 材料会因短时高温强度下降引起抗冲刷磨损能力下降, 磨损率上升。因此, Levy提出, 金属的延展性会随着温度的升高而增加, 当颗粒撞击管壁时, 其更多的动能会被塑性变形吸收[44]。以上研究对集输管道多相流冲刷腐蚀具有一定指导意义, 但对流体介质属性与温度等环境因素交互作用以及温度对介质属性的影响研究还不够深入。在实际生产中, 由于流体介质成分复杂, 流体介质属性容易受温度、流速以及流场变化的影响, 其对管道的冲刷腐蚀特性和腐蚀动力学机制的产生和发展影响十分复杂, 还需要深入分析和研究。

5. 总结与展望

多相流作用下输油管道的冲刷腐蚀是多学科交叉的重要研究方向, 众多学者通过试验或数值仿真方法从不同角度对管道以及相关金属材料的冲刷腐蚀开展研究, 如管流式冲刷腐蚀试验、射流式冲刷腐蚀试验、旋转电极试验等, 并通过失重法、电化学法和形貌分析、腐蚀产物分析等方法研究了冲刷腐蚀的影响因素, 定性或定量分析了材料性质、流体力学、固体颗粒、介质属性和流体温度等因素对材料冲刷腐蚀的影响程度, 也提出了一些预防或降低冲刷腐蚀的措施。但由于原油集输工况条件的复杂多变, 冲刷腐蚀的机理往往更加复杂, 现有研究成果对多因素、多物理场条件下冲刷与腐蚀交互作用的研究还不够深入。因此, 还需要从以下三个方面开展研究和探讨:

- (1) 加强冲刷腐蚀机理研究, 在已有研究成果基础上, 基于多种试验手段研究多相流冲刷腐蚀机理, 将冲刷腐蚀中多相流动力学因素与电化学腐蚀动力学因素联合研究其耦合机理, 不断完善冲刷腐蚀数学模型, 提高冲刷腐蚀数值计算的可靠性和实用性;
- (2) 研究材料在冲刷腐蚀过程中冲刷磨损与电化学腐蚀之间的交互作用, 对纯冲刷、纯腐蚀、冲刷促进腐蚀、腐蚀促进冲刷的正、负交互作用进行量化, 基于不同工况条件明确机械冲刷与腐蚀磨损及其协同作用对材料造成的损害, 确定影响冲刷腐蚀的主导因素, 以便有针对性开展预防和监测;
- (3) 加强输油管道冲刷腐蚀试验装置和测试方法研究, 开发基于真实工况条件的试验装置, 基于多种控制手段模拟多相流冲刷腐蚀的真实的过程, 综合运用试验研究和数值仿真研究方法, 开展多物理场耦合条件和多因素交互作用下冲刷腐蚀研究, 将数值仿真、室内试验和外场测试结果综合对比, 不断提高分析结果的可靠性。

基金项目

本文为新疆维吾尔自治区自然科学基金地州科学基金项目《钻采设备过流部件冲蚀磨损机理与损伤行为研究》(2021D01F44)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] Aguirre J, Walczak M, Rohw E M. The mechanism of erosion-corrosion of API X65 steel under turbulent slurry flow: effect of nominal flow velocity and oxygen content [J]. Wear, 2019, 426/427part B): 1379-1391.
- [2] 原徐杰. 油气输送管道内冲刷腐蚀的研究进展 [J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(20): 1091-1094.
- [3] 徐洪敏, 杨燕, 陈虎, 等. 砂粒浓度对X80管线钢冲刷腐蚀行为的影响 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(07): 74-77.
- [4] 刘莉桦, 才政. 油气管道两相流体冲刷腐蚀研究现状及展望 [J]. 化工管理, 2021, (23): 139-140.

- [5] Rihan R O, Nesic S. Erosion-corrosion of mild steel in hot caustic. Part I: NaOH solution [J]. Corros. Sci., 2006, 48(9): 2633-2659.
- [6] Wang Z B, Zheng Y G, Yi J Z. The role of surface film on the critical flow velocity for erosion-corrosion of pure titanium [J]. Tribology International, 2019, 133(9): 67-72.
- [7] 黄辉, 陈立秋, 刘智勇. 典型酸性天然气对16Mn钢的冲刷腐蚀影响 [J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(12): 44-50+67.
- [8] 樊学华, 柳伟, 祝亚茹, 等. 高温高压条件下流速对X70钢CO₂冲刷腐蚀行为的影响 [J]. 表面技术, 2020, 49(12): 296-304.
- [9] 王海红, 王平, 闫龚杰, 等. N80套管钢在液固两相流中的冲刷腐蚀行为 [J]. 石油工程建设, 2021, 47(01): 10-14.
- [10] 陈虎, 周昊, 王树立, 等. 含砂NaCl水溶液中流速对N80钢冲刷腐蚀行为的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(12): 936-940.
- [11] 王凯, 南翠红, 卢金玲, 等. 流体动力学过程在流动腐蚀行为中的作用机制 [J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 8-18.
- [12] 吴成红, 甘复兴. 金属在两相流动水体中的冲刷腐蚀 [J]. 材料保护, 2000, (04): 33-35+61.
- [13] 杜琮昊, 白秀琴. 海洋环境下典型金属材料腐蚀与磨损研究进展 [J]. 润滑与密封, 2021, 46(02): 121-133.
- [14] 王伟志, 扈俊颖, 钟显康. 油气生产与输送过程中冲刷腐蚀的研究进展 [J]. 材料保护, 2021, 54(09): 123-132.
- [15] 王兴国, 张路鑫, 黄志诚, 等. 管道冲刷腐蚀缺陷对超声测量流体速度的影响 [J]. 计量学报, 2021, 42(12): 1611-1619.
- [16] 沈雅欣, 赵会军, 彭浩平, 等. 90°竖直弯管的液固两相流冲刷腐蚀模拟 [J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(01): 50-57.
- [17] 胡宗武, 刘建国, 邢蕊, 等. 单相流条件下90°水平弯管冲刷腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(02): 115-122.
- [18] 王彦骅, 吴玉国, 张绍川, 等. π 型管的冲刷腐蚀数值模拟 [J]. 表面技术, 2020, 49(12): 259-266.
- [19] 王彦骅, 吴玉国, 张绍川, 等. 流体力学因素对液固两相流冲刷腐蚀的影响 [J]. 石油化工设备, 2006, (06): 20-23.
- [20] 梁颖, 袁宗明, 陈学敏, 等. 基于CFD的液固两相流冲刷腐蚀预测研究 [J]. 石油化工应用, 2014, 33(02): 103-106.
- [21] 尹承军. B10合金在模拟海水中的冲刷腐蚀研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [22] Tang X, Xu L Y, Cheng Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry. II: Synergism of erosion and corrosion [J]. Corros. Sci., 2008, 50(5): 1469-1474.
- [23] 邢建东, 高义民, 张强赏. 不锈钢与高碳钢的冲刷腐蚀磨损试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004, (05): 469-473.
- [24] Abedini M, Ghasemi H M. Synergistic erosion-corrosion behavior of Al-brass alloy at various impingement angles [J]. Wear, 2014, 319(1/2): 49-55.
- [25] 孟文波, 张佳旋, 张崇, 等. 井下管柱钢材冲蚀-CO₂腐蚀耦合试验 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(03): 104-110.
- [26] 王雪, 夏晞冉, 秦永光, 等. 油气田设备多相流冲刷磨损主控因素研究进展 [J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(05): 1-6.
- [27] 陈艳, 黄威, 董彩常. 海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究现状 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(04): 48-53.
- [28] Talaghat M R, Esmaeilzadeh F, Mowla D. Sand production control by chemical consolidation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 67(1/2): 34-40.
- [29] 姜志超, 杨燕, 彭浩平, 等. X80钢在不同砂粒粒径下的多相流中的冲刷腐蚀行为 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(11): 76-79.
- [30] Meng H, HU X, NEVILLE A. A systematic erosion-corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design [J]. Wear, 2007, 263(1-6): 355-362.
- [31] 王凯. 油井管材料液固两相流体冲刷腐蚀研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2013: 40-57.
- [32] 徐哲. 液固两相流条件下P110钢冲刷腐蚀研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2011: 14-20, 45-46.
- [33] 周昊, 吉庆丰, 刘雯, 等. 油气田套管用钢两相流流动腐蚀 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(06): 602-606.
- [34] 裴芮, 王勤英, 唐淼, 等. 激光熔覆层冲刷腐蚀研究现状 [J]. 表面技术, 2019, 48(11): 179-187.
- [35] 李涌泉, 田进. pH值对N80钢固液两相冲刷腐蚀的影响 [J]. 表面技术, 2013, 42(05): 29-31.
- [36] 周昊, 陈虎, 刘雯, 等. 油套管钢两相流冲刷腐蚀行为及协同效应研究 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(06): 60-68.
- [37] 廖柯熹, 覃敏, 何国玺, 等. 油气集输管线冲刷腐蚀规律研究进展 [J]. 材料保护, 2020, 53(07): 126-136.
- [38] 李家锋. CO₂采油井油管腐蚀影响因素及防治措施研究 [J]. 能源化工, 2021, 42(01): 47-50.
- [39] 谢涛, 林海, 许杰, 等. 不同材质油套管钢的CO₂腐蚀行为 [J]. 表面技术, 2017, 46(01): 11-217.
- [40] 白羽, 李自力, 程远鹏. 集输管线钢在CO₂/油/水多相流环境中的腐蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(03): 204-207+213.
- [41] 何鹤, 张娜, 许宝善, 等. 石油化工管道冲刷腐蚀失效分析与预测 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(05): 18-20.
- [42] Tian B R, Cheng Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil sand slurry I: Effects of hydrodynamic condition [J]. Corros. Sci., 2008, 50(3): 773-779.
- [43] 方信贤, 巴志新, 甄睿, 等. 腐蚀介质温度对316L/Ni-P镀层腐蚀及电化学反应影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(06): 180-185.
- [44] Levy E. Advanced Materials-From Strength to Strength [J]. Advanced Materials, 2010, 14(15): 1019-1021.

作者简介

朱红波（1982.4-），男，汉族，克拉玛依职业技术学院机械工程分院副教授。2012年毕业于石河子大学，获得工学硕士学位，目前主要从事机械制造及自动化、过程装备控制技术专业教学及科学研究工作，是克拉玛依市首批科技创新人才、克拉玛依市科技库专家，近年来参与多项省级、市级科研项目，公开发表论文20余篇。