

# 多相流管道腐蚀研究进展

付鑫鑫<sup>1</sup>, 王文龙<sup>1</sup>, 赵伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>滨州学院化工与安全学院, 山东 滨州

<sup>2</sup>莒南中油一达燃气有限公司, 山东 临沂

收稿日期: 2023年5月12日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月29日

## 摘要

由于多相流动的复杂性, 工业多相流管道系统经常出现局部腐蚀问题, 进而造成严重的经济损失和环境污染。本文通过调研多相流管道腐蚀的相关研究, 总结和分析了多相流管道中的流动加速腐蚀、泡状流中气泡冲刷腐蚀、气液固多相流冲蚀等多种腐蚀形式的研究进展, 指出了当前研究存在的问题, 提出了未来研究的发展方向。总结成果可为深入认识和把握多相流管道腐蚀、安全高效运行管道系统提供借鉴。

## 关键词

加速腐蚀, 冲刷腐蚀, 冲蚀损伤

# Research Progress of Corrosion in Multiphase Pipeline

Xinxin Fu<sup>1</sup>, Wenlong Wang<sup>1</sup>, Wei Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Chemical Engineering and Safety, Binzhou University, Binzhou Shandong

<sup>2</sup>Junan Zhongyou Yida Gas Co., Ltd., Linyi Shandong

Received: May 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Due to the complexity of multiphase flow, local corrosion often occurs in industrial multiphase flow pipeline systems, which leads to serious economic losses and environmental pollution. This paper summarizes and analyzes the research progress of various corrosion forms such as flow accelerated corrosion in multiphase flow pipelines, erosion caused by bubble in bubble flow, erosion in gas-liquid-solid multiphase flow and so on. Meanwhile, the existing problems in current research on corrosion of multiphase pipelines were pointed out, and the development direction in future was also clarified. In general, the research results could provide reference for the further

文章引用: 付鑫鑫, 王文龙, 赵伟. 多相流管道腐蚀研究进展[J]. 材料科学, 2023, 13(6): 536-541.

DOI: 10.12677/ms.2023.136057

understanding and grasping of the corrosion of multiphase pipelines, as well as the safe and efficient operation of pipeline system.

## Keywords

Accelerated Corrosion, Flow Erosion, Erosion Damage

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

多相流管道广泛存在于能源、化工、供热以及核工业等工业过程中。例如油气田中的集输管道、化工热气输送管道、城市供热管道等。由于多相流流型和流态复杂多变，致使其管道内壁面所处的环境较为恶劣，经常出现局部腐蚀问题，进而造成较大的经济损失，因此管道设计工作者在进行管道设计时特别希望可以准确计算多相流管道的腐蚀速率，这样既能够保证管道服役期间的安全运行，又可以为管道建设节省费用，防止因管道壁厚设计过大而造成浪费。鉴于此，近几十年来国内外学者普遍关注多相流管道的腐蚀问题，通过研究分析了多相流管道的腐蚀机理，同时也在腐蚀位置和腐蚀速率等方面取得了一系列启发性成果，本文对国内外部分学者的研究成果进行梳理和总结。

根据腐蚀产生的机理不同，多相流管道中的腐蚀形式主要有：流体流动加速腐蚀、泡状流中气泡对管壁的冲刷腐蚀、多相流中固体颗粒对管壁的冲蚀、湿气管线顶部腐蚀、腐蚀性介质对管壁的加速腐蚀等。

## 2. 国内外研究现状

### 2.1. 流体流动加速腐蚀

流动加速腐蚀过程是发生在紊流冲刷和腐蚀同时作用下的磨损行为，是流体扰动、腐蚀、磨损三种因素共同作用下产生的腐蚀。腐蚀的本质是电化学腐蚀，在此基础上考虑流体的运动，即流场的不稳定性加速了腐蚀破坏的进程。流动加速腐蚀的破坏并非流体扰动、腐蚀、磨损三种因素破坏的简单叠加，而是三种因素共同作用下产生的综合效应。由于流动加速腐蚀的复杂性，目前对于流动加速腐蚀的认识还不够明确，尚需进一步探索研究。

流动介质是影响流体流动加速腐蚀的主要因素之一，因此众多学者针对流动介质各因素对加速腐蚀的影响开展了一系列的研究。姜晓霞等人[1]建立了冲蚀腐蚀的数理模型和机制图，综合考虑粒子冲击速度、极化电位、溶液 PH 值等因素，对冲蚀破坏进行了详细的分析和总结。严卓奇[2]针对核电站二回路蒸汽管道腐蚀问题，在详细分析流动加速腐蚀机理和特征的基础上，探讨了流速、流型、管道表面粗糙度、管道几何形状、双流体中气体百分比、温度、PH 值、电位、溶解氧、PH 值碱化剂、材料成分、材料表面处理等多个因素对流动加速腐蚀的影响，提出了缓解二回路蒸汽管道流动加速腐蚀的建议。刘忠等人[3]在合理假设条件下，建立了碳钢在单相流中流动加速腐蚀的物理模型并计算得到了直管中流动加速腐蚀的趋势，计算结果也得到了实验验证。研究表明温度、PH 值、流速等参数对流动加速腐蚀速率的影响很大。茅俊杰[4]详细分析了温度、腐蚀介质化学特性、腐蚀成分的扩散系数等因素对流动加速腐蚀的影响。他认为流动加速腐蚀的本质原因是流体介质与壁面发生电化学腐蚀而造成材料的破坏。马光耀、

李虹锐等人[5][6]对比了加氧前后多相流管道中的腐蚀情况得出结论,提高水的 PH 值以及给水进行加氧处理可有效缓解管道腐蚀。刘元亮等人[7]利用 Comsol Multiphysics 软件进行多物理场的耦合,通过数值模拟分析了 CO<sub>2</sub> 分压和温度对连续管腐蚀速率的影响,同时发现 PH 值较小时,连续管的腐蚀速率较大。

在很多工业过程中,人们发现处于同样流动环境中的管道各位置处的腐蚀速率并不相同,这说明流场也会影响流体的流动加速腐蚀,因此各种结构形式的管道的腐蚀情况备受关注。Lotz 和 Postlethwaite [8]对管道突然收缩和突然扩大试验段的流型变化及冲刷腐蚀进行了研究,同时讨论了腐蚀速率和腐蚀产物保留率的变化与流动结构的关系。Ma 和 Ferng 等人[9]基于管道壁厚的测量数据发现流动加速腐蚀现象很大程度上取决于管道的布局和局部流动条件。他们提出了一个三维的两相流模型并模拟计算表明液滴撞击是蒸汽流中发生流动加速腐蚀的主要原因。El-Gammal、张凌翔、陈兵等人[10][11][12]研究了 90 度弯管中流动加速腐蚀的分布情况。通过实验和数值模拟发现弯管中的传质系数和径向流速增大,流动加速腐蚀加剧,但是他们对于弯管内弧表面和外弧表面上磨损量大小的研究结论并不相同。彭翊等人[13]采用计算流体力学方法研究了孔径比和入口流速对孔板管道下游流动加速腐蚀敏感部位分布的影响。孙海生以及 Kim 等人[14][15]研究了焊缝凸起对流动加速腐蚀的影响,研究发现焊缝区域流体湍流强度大,腐蚀速率快。Kim 等人还得出孔口和弯头相结合对管道腐蚀更严重的结论。肖卓楠等人[16]利用 Fluent 模拟 T 型三通管发现,在辅助出水口处由于速度、湍流动能及壁面剪切力均出现最高值,因而流动加速腐蚀最严重。Madasamy 和 Mukunthan 等人[17]研究了中性 PH 下管道弯曲形式对流动加速腐蚀的影响,结果表明:弯曲半径和弯曲角度等管道几何形状会对流动加速腐蚀的位置产生影响,短弯曲半径和低弯曲角度的管道腐蚀更为严重。

## 2.2. 泡状流中气泡冲刷腐蚀

泡状流中气泡冲刷腐蚀是磨损腐蚀的一种特殊形态,简称空蚀或汽蚀,其腐蚀机理已经基本明确,即泡状流流动条件的变化引起其中气泡的破裂,进而产生高压冲击波,冲击金属壁面,同时伴有瞬时高温的产生,破坏金属保护膜,引起塑性变形甚至损伤金属表面。

大多数学者致力于气泡冲刷腐蚀机理的研究,进而分析其主要影响因素。Davidson 等人[18]在两相流概念的基础上提出了著名的气泡模型,虽然模型相对比较简单,但是他们巧妙地将两相流理论应用到含气泡流体的研究中,为后续流体中气泡的研究打下了基础。Astarita 和 Apuzzo [19]通过实验研究了非牛顿流体中气泡的流动速度,研究发现气泡体积存在一个临界值,在临界值附近,当气泡体积有微小增加时,气泡流动速度会出现大幅度增长。Knapp 等人[20]通过大量的试验研究和观测结果分析,认为气泡急速产生、扩张和溃灭,在液体中形成高速微射流,冲击金属材料壁面,导致金属表面膜破坏和金属的塑性变形,甚至当冲击强度超过材料的破坏强度时,金属表面会产生损伤。除此之外,金属表面晶体结构被扭曲,出现化学不稳定性,使邻近晶粒具有不同电势,也会加速电化学腐蚀。Ball 和 Howell 等人[21]应用自由拉格朗日 CFD 程序模拟了高压冲击下水中空气气泡的溃灭过程,通过跟踪整个过程中空气/水的界面发现气泡破裂时会形成高速射流并产生强烈冲击波,由于气体的加热是非等熵的并且以冲击加热为主,因此预测最终的气体温度可达 12,000 K。这样的高温随后也通过试验得到了验证。Adechy 和 Issa [22]应用 CFD 技术模拟了管道和 T 型管中的气液环状流。环状流中心为以气相为主的气液两相混合流,其中液滴用拉格朗日法进行跟踪,将环状流外层液膜建模为薄边界层。通过模拟预测的液膜厚度和相分离结果得到了实验的验证,同时说明了液滴在壁面上的沉积作用。陈皓生等人[23]通过数值模拟和实验研究相结合的方法对固体表面的腐蚀点坑进行了研究,研究表明固体表面不断形成的凹坑所引起的压力波动是形成“凹坑链”的主要原因,早期形成的凹坑加速了后续凹坑的形成。基于数值分析,将气泡侵蚀坑的发展分为四个阶段,并且描述了凹坑在压力扰动作用下是如何向横向和纵向发展的,进一步证明了凹坑

的产生与气泡冲击压力的变化有关。Fortes-Patell 和 Challier 等人[24]提出了基于气泡溃灭、射流压力波、邻近固体壁面响应的能量平衡原理对冲刷腐蚀进行评估,数值模拟了气泡溃灭的过程,建立了材料屈服应力与气泡溃灭压力之间的关系并得到了其与流速之间的非线性关系。Sreendar 等人[25]对冲刷腐蚀及空化腐蚀的研究现状进行总结,并提出了由气泡溃灭导致材料损失的一般理论:气泡靠近壁面的压力变化导致了气泡溃灭,气泡溃灭所产生的巨大压力波动在壁面附近产生了高速射流,高速射流作用在壁面上从而形成了针孔状蚀坑。

目前气泡冲刷腐蚀的机理已经基本成熟并且被大多数研究者所认可,因此近些年对于气泡冲刷腐蚀的研究多集中于多种腐蚀共同作用下的腐蚀现象,单独对于气泡冲刷腐蚀的研究较少。

### 2.3. 气液固多相流冲蚀

气液固多相流冲蚀指流体中的固体颗粒冲击金属表面,并将材料从金属表面移除,造成其质量及厚度损失的现象。多相流冲蚀研究不仅涉及流体力学、传质传热学,还与材料学、摩擦学、力学等学科相关,影响多相流冲蚀的因素有流体特性、颗粒特性、材料表面特性等。因此很多学者致力于流体和固体颗粒参数对冲蚀的影响研究。

Bozzini 和 Ricotti 等人[26]采用 VOF 和 DPM 模型数值模拟了四相流(两种互不相容的液体、气体、固体颗粒)对弯管内壁的冲蚀现象,同时结合实验评估了流体流速、颗粒含量、气体体积分数等关键参数对冲刷腐蚀的影响情况。Vieira 和 Kesana 等人[27]针对以气体为主、低含液量且携砂的多相流冲蚀生产设备问题,设计实验研究不同气液相表观流速下颗粒的冲蚀速率。研究发现当液相表观流速小于临界表观流速时,随着持液率的增加,颗粒冲蚀速率减小。实验主要在向上的垂直管道上进行,但在水平方向上也进行了一些测量。结果表明,与水平方向相比,管道垂直方向的冲蚀速率要高出一个数量级。此外,实验还确定了各流型条件下的最大侵蚀位置,发现其不取决于管道倾斜度。Kesana 和 Throneberry 等人[28]通过实验研究了气液两相流型为环状流和段塞流时颗粒尺寸和液体黏度对颗粒冲蚀的影响,研究发现在较大气相表观流速下的环状流中,很小直径的固体颗粒也可以产生较大的冲蚀腐蚀速率。Parsi 和 Vieira 等人[29]利用非介入式超声装置测量了垂直管中以气体为主的含砂搅拌流的颗粒冲蚀速率,进一步分析了表观气液相速度、颗粒尺寸、液体黏度、管道结构等参数对冲蚀速率的影响。值得注意的是垂直-水平弯管中冲蚀速率明显高于水平-水平弯管中的冲蚀速率。

对于多相流冲蚀的研究,除了关注其影响因素外,很多学者也不断尝试建立腐蚀预测模型,以期为管道设计和运行提供理论计算的依据。Bitter [30] [31]提出了变形冲蚀理论,将总冲蚀量看作是切削磨损和变形磨损之和。Salama [32]充分考虑多相流中颗粒直径与混合物密度的影响,以冲蚀临界速度代替混合流体的临界流速。Oka 等人[33] [34]在前人模型的基础上建立了新的冲蚀模型,该模型引入了颗粒直径、颗粒形状、颗粒材料特性、靶材硬度等参数,腐蚀预测的精确度较前人有所提高。Chen 等人[35]提出了一种将机理分析和数值模拟方法相结合的综合程序来估计气/液/砂颗粒多相流系统弯管中的冲蚀速率。通过假设和引入参数将多相流冲蚀问题转化为单相流中的问题,进而计算了各种多相流流型下固体颗粒对弯管的冲蚀速率,且与文献中的实验数据具有较好的一致性,因而成为估算多相流冲蚀的有效工具。Lu 和 Agrawal [36]提出了一种基于计算流体动力学(CFD)的 Eulerian-Granular 方法来模拟多相流系统中的冲蚀特性。与传统的 Eulerian-Lagrangian 方法相比, Eulerian-Granular 方法能够捕捉多相流系统中的流动情况和相分布特征以及颗粒/颗粒相互作用。由于所做的假设较少,因此 Eulerian-Granular 方法对于冲蚀的预测更加可靠,该方法在多相流系统的冲蚀分析中具有一定的实用价值。

有些模型虽然有所局限,但是在一些特定情况下预测结果不错,因此国内外学者提出的一些经验和半经验模型得到应用。API RP 14E 规范[37]中规定了冲蚀发生的最小流体流速,用此流速来控制冲蚀的

发生。同时规范还认为冲蚀速率与流体密度成正比, 显然与冲蚀发生的机理不符。当前比较常用的冲蚀模型还有: Salama 经验模型[32]、Mclaury and Shirazi 经验模型[38]、Bourgoyne 经验模型[39]、DNV 经验模型[40], 这些模型都是在特定条件下获得的, 使用起来具有一定的局限性。

### 3. 结论

通过总结和分析国内外对于多相流管道中的流动加速腐蚀、泡状流中气泡冲刷腐蚀、气液固多相流冲蚀等腐蚀方式的研究进展, 可知: 多相流管道的腐蚀过程非常复杂, 仅是多相流的流型就有多种, 其他影响因素更是纷繁复杂, 腐蚀形式及腐蚀机理也是多种多样。目前大多数的研究仅仅是基于实验条件或模拟条件下的数据拟合得到规律, 由于考虑的因素较少, 因此得出的规律和模型适用范围非常窄。未来多相流管道的腐蚀研究应该考虑更多的影响因素, 总结更加广泛适用的腐蚀规律, 建立预测精度更高的数值模型。

### 基金项目

山东省大学生创新创业训练计划项目(编号: S202110449178); 滨州学院实验技术项目(编号: BZXYSYXM201614)。

### 参考文献

- [1] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙. 金属的腐蚀磨蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 93-109.
- [2] 严卓奇. 流量加速腐蚀对核电站二回路材料影响及对策的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [3] 刘忠, 刘春波, 郑玉贵. 碳钢在单相流中流动加速腐蚀的数值模拟[J]. 核动力工程, 2009, 20(5): 50-52.
- [4] 茅俊杰. 气液两相流管道冲刷腐蚀的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [5] 马光耀, 陈菁. 余热锅炉受热面管道内壁的氧化膜腐蚀[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(6): 1015-1019.
- [6] 李虹锐, 甘玮, 崔国光, 等. 全保护加氧处理技术在超超临界机组中的实用分析[J]. 湖北电力, 2021, 45(3): 103-105.
- [7] 刘元亮, 刘少胡, 马卫国. 高温高压气井连续管在 CO<sub>2</sub> 环境中的电化学腐蚀数值模拟[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5): 85-92.
- [8] Lotz, U. and Postlethwaite, J. (1990) Erosion-Corrosion in Disturbed Two Phase Liquid/Particle Flow. *Corrosion Science*, **30**, 95-106. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90239-2](https://doi.org/10.1016/0010-938X(90)90239-2)
- [9] Ma, K.T., Ferng, Y.M. and Ma, Y.P. (1998) Numerically Investigating the Influence of Local Flow Behaviors on Flow-Accelerated Corrosion Using Two-Fluid Equations. *Nuclear Technology*, **123**, 90-102. <https://doi.org/10.13182/NT98-A2882>
- [10] El-Gammal, M., Mazhar, H., Cotton, J.S., et al. (2010) The Hydrodynamic Effects of Single-Phase Flow on Flow Accelerated Corrosion in a 90-Degree Elbow. *Nuclear Engineering & Design*, **240**, 1589-1598. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.005>
- [11] 张凌翔, 周克毅, 徐奇, 等. 90°弯管流动加速腐蚀的实验和数值模拟[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5173-5181.
- [12] 陈兵, 房启超, 任科洋. 基于试验的 CO<sub>2</sub> 输送弯管电化学腐蚀模拟[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(1): 56-61.
- [13] 彭翊, 韩睿璇, 陈耀东. 孔板管道下游流动加速腐蚀速率数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(1): 77-82.
- [14] 孙海生, 郝开开, 常春梅. 管道内壁凸起诱发的流体加速腐蚀模拟计算[J]. 石油化工设备, 2014, 43(4): 36-39.
- [15] Kim, D.J., Kim, S.W., Lee, J.Y., et al. (2021) Flow-Accelerated Corrosion Assessment for SA106 and SA335 Pipes with Elbows and Welds. *Nuclear Engineering and Technology*, **53**, 3003-3011. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.03.026>
- [16] 肖卓楠. 温度对碳钢管道流动加速腐蚀失效影响的数值模拟[J]. 材料保护, 2020, 53(3): 35-40.
- [17] Madasamy, P., Mukunthan, M., Chandramohan, P., et al. (2021) Influence of Bend Geometry on Flow Accelerated Corrosion under Neutral pH Conditions. *Engineering Failure Analysis*, **122**, 105-127. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105127>

- [18] Davidson, J.F. and Harrison, D. (1963) *Fluidized Particles*. Cambridge University Press, New York.
- [19] Astarita, G. and Apuzzo, G. (1965) Motion of Gas Bubbles in Non-Newtonian Liquids. *AIChE Journal*, **11**, 815-820. <https://doi.org/10.1002/aic.690110514>
- [20] Knapp, R.T., Daily, J.W. and Hammit, F.G. (1970) *Cavitation*. McGraw-Hill, New York.
- [21] Ball, G.J., Howell, B.P., Leighton, T.G., *et al.* (2000) Shock-Induced Collapse of a Cylindrical Air Cavity in Water: A Free-Lagrange Simulation. *Shock Waves*, **10**, 265-276. <https://doi.org/10.1007/s001930000060>
- [22] Adechy, D. and Issa, R.I. (2004) Modelling of Annular Flow through Pipes and T-Junctions. *Computers & Fluids*, **33**, 289-313. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(03\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(03)00056-2)
- [23] Chen, H.S., Li, Y.J., Chen, D.R. and Wang, J.D. (2007) Experimental and Numerical Investigations on Development of Cavitation Erosion Pits on Solid Surface. *Tribology Letters*, **26**, 153-159. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9188-3>
- [24] Fortes-Patella, R., Challier, G., Reboud, J.L., *et al.* (2013) Energy Balance in Cavitation Erosion: From Bubble Collapse to Indentation of Material Surface. *Journal of Fluids Engineering*, **135**, Article ID: 011303. <https://doi.org/10.1115/1.4023076>
- [25] Sreedhar, B.K., Albert, S.K. and Pandit, A.B. (2017) Cavitation Damage: Theory and Measurements—A Review. *Wear*, **372-373**, 177-196. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>
- [26] Bozzini, B., Ricotti, M.E., Boniardi, M., *et al.* (2003) Evaluation of Erosion-Corrosion in Multiphase Flow via CFD and Experimental Analysis. *Wear*, **255**, 237-245. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00181-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00181-9)
- [27] Vieira, R.E., Kesana, N.R., McLaury, B.S., *et al.* (2012) Sand Erosion in Multiphase Flow for Low-Liquid Loading and Annular Conditions. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Houston, 9-15 November 2012, 2445-2454. <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-86425>
- [28] Kesana, N.R., Throneberry, J.M., McLaury, B.S., *et al.* (2014) Effect of Particle Size and Liquid Viscosity on Erosion in Annular and Slug Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, **136**, Article ID: 012901. <https://doi.org/10.1115/1.4024857>
- [29] Parsi, M., Vieira, R.E., Kesana, N., *et al.* (2015) Ultrasonic Measurements of Sand Particle Erosion in Gas Dominant Multiphase Churn Flow in Vertical Pipes. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, **328-329**, 401-413. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.03.013>
- [30] Bitter, J.G.A. (1963) A Study of Erosion Phenomena: Part I. *Wear*, **6**, 5-21. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6)
- [31] Bitter, J.G.A. (1963) A Study of Erosion Phenomena: Part II. *Wear*, **6**, 169-190. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)
- [32] Salama, M.M. (2000) An Alternative to API 14E Erosional Velocity Limits for Sand-Laden Fluids. *Journal of Energy Resources Technology*, **122**, 71-77. <https://doi.org/10.1115/1.483167>
- [33] Oka, Y.I., Okamura, K. and Yoshida, T. (2005) Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact: Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation. *Wear*, **259**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>
- [34] Oka, Y.I. and Yoshida, T. (2005) Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact: Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage. *Wear*, **259**, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>
- [35] Chen, X., McLaury, B.S. and Shirazi, S.A. (2006) A Comprehensive Procedure to Estimate Erosion in Elbows for Gas/Liquid/Sand Multiphase Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, **128**, 70-78. <https://doi.org/10.1115/1.2131885>
- [36] Lu, Y. and Agrawal, M. (2014) A Computational-Fluid-Dynamics-Based Eulerian-Granular Approach for Characterization of Sand Erosion in Multiphase-Flow Systems. *SPE Journal*, **19**, 586-597. <https://doi.org/10.2118/159921-PA>
- [37] (1981) API R P. 14E. Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems. American Petroleum Institute Recommended Practice RP, 22.
- [38] McLaury, B.S. and Shirazi, S.A. (2000) An Alternate Method to API RP 14E for Predicting Solids Erosion in Multiphase Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, **122**, 115-122. <https://doi.org/10.1115/1.1288209>
- [39] Bourgoyne Jr., A.T. (1989) Experimental Study of Erosion in Diverter Systems Due to Sand Production. *SPE/IADC Drilling Conference*, New Orleans, February 1989, SPE-18716-MS. <https://doi.org/10.2118/18716-MS>
- [40] Det Norske Veritas (2007) Recommended Practice RP O501 Erosive Wear in Piping Systems. Technical Report, DNV RP O501-Revision 4.2, i-iii, 1-39.