

海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究现状

陈艳¹, 黄威^{1,2}, 董彩常²

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

2. 钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 分析了海水管路冲刷腐蚀主要影响因素, 总结了国内外学者在海水管路冲刷腐蚀数值模拟方面的研究成果, 并在此基础上对海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究方向作出了展望。随着计算流体力学的发展, 有效地结合试验数据与数值模拟对海水管路冲刷腐蚀现象进行研究, 可以更好地预测海水管路冲刷腐蚀发生的部位及腐蚀速度。

关键词: 海水管路; 冲刷腐蚀; 数值模拟

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.04.008

中图分类号: TJ07; TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)04-0048-06

Research Status of Numerical Simulation of Erosion Corrosion in Seawater Pipeline

CHEN Yan¹, HUANG Wei^{1,2}, DONG Cai-chang²

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Qingdao Marine Corrosion Research Institute, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: This paper analyzed the main influencing factors of erosion corrosion in seawater pipeline, and summarized the results of studies on numerical simulation of erosion corrosion of seawater pipeline from scholars at home and abroad, and prospected the direction of research on numerical simulation of erosion corrosion, by referring to the seawater pipeline erosion corrosion research data about the ship, electric power and other industrial fields in recent years. With the development of computational fluid dynamics, the experimental data and numerical simulation were effectively combined to study the erosion corrosion in seawater pipeline, which can better predict the corrosion site and the corrosion rate of seawater pipeline.

KEY WORDS: seawater pipeline; erosion corrosion; numerical simulation

近年来,随着海洋资源的大力开发,“海洋强国”战略逐步实施^[1],海水的利用越来越受到人们的重视。随之而来的是一系列的腐蚀问题,如船舶、电厂、石油化工等领域海水管路在运行过程中受到海水严重的腐蚀^[2],大大降低了相关设备的工作寿命,甚至导致其无法正常工作^[3]。2015年12月23日,湖滨北路金桥路地下排气阀

井的部分海水管路由于长时间与海水接触,钢管材质的海水管路遭到腐蚀穿孔,在海水巨大的压力下管路破裂,地面冒水,给人们的正常生活造成了比较严重的影响。

海水管路冲刷腐蚀大多发生在三通、法兰接头以及管道弯头处^[4],由于流体形态的急剧变化使得这些部位比较容易遭到严重的冲刷腐蚀,而目前对

收稿日期: 2016-05-09; 修订日期: 2016-06-28

Received: 2016-05-09; Revised: 2016-06-28

作者简介: 陈艳(1976—),女,博士,主要从事结构可靠度及风险分析。

Biography: CHEN Yan(1976—), Female, Ph.D., Research focus: structural reliability and risk analysis.

于解决海水管路冲刷腐蚀的技术措施较少。因此,开展海水管路冲刷腐蚀数值模拟的研究,进而提出相关的技术解决措施,对于保证海水管路的安全正常使用具有比较重要的意义^[5-6]。

1 影响海水管路冲刷腐蚀的主要因素

1.1 流体流速、流态的影响

流体的流速对海水管路的冲刷腐蚀起着重要作用,流体的流速大小可以决定海水管路的冲刷腐蚀程度:低流速时,流体对管路的冲刷腐蚀程度较低;高流速时,流体对管路的冲刷腐蚀程度较大^[7-10]。反过来,由于海水管路冲刷腐蚀情况的改变,导致海水管路内部形状发生改变,进而影响流体的流速和流态,冲刷腐蚀较严重的地方会形成凹陷等局部特征,此处的流体流速、流态会发生变化^[11-12]。扬帆针对不同流速下的铜镍合金保护膜进行了研究,结果显示:低流速(2 m/s 以下)情况下,铜镍合金表面的保护膜比较完整;高流速下,铜镍合金表面的保护膜被破坏^[13]。特别是在海上使用的设备,流速大小对设备中管路的冲刷腐蚀影响更加明显^[14]。美国冲刷腐蚀研究中心(Erosion/Corrosion Research Center)针对不同情况下油气的开采进行了研究,点蚀形成时会有一个最低的临界速度,强烈的冲刷腐蚀产生时会会有一个最高的临界速度,流体流速在两个临界流速之间时设备才能更好地工作^[15]。

1.2 流体攻角的影响

颗粒速度方向与试样表面形成的夹角就是攻角,而不同材料的冲刷腐蚀程度会在不同的攻角处出现极大值^[16]。Heitz 通过对列管式换热器的研究表明,当管道直径是弯管半径的 1/2 ~ 1/4 时管道受到的冲刷腐蚀率最小,流速的方向与设备壁面的夹角最好小于 10°。1983 年, Benchaita 通过对颗粒撞击材料的实验研究发现,材料会产生变形并形成冲蚀坑,颗粒的入射角度和速度对材料的变形及冲蚀坑大小影响巨大^[17]。罔良等人针对工业纯铁在不同 pH 值砂浆中冲刷腐蚀速率随冲击角变化的情况的研究结果表明:工业纯铁冲刷腐蚀质量损失率最大时的冲击角为 40°,这与实验结果相吻合^[18]。

1.3 颗粒性质的影响

颗粒的硬度对于海水管路的冲刷腐蚀影响巨大,颗粒的硬度越大,海水管路受到的冲刷腐蚀就越严重^[19]。多角粒子的切削作用比圆形粒子的切削作用大,因此,多角颗粒比圆形颗粒对管路的冲刷腐蚀影响更加严重^[20]。John. Postlethwaite 的研究表明,当管道发生冲刷腐蚀后,管流中不含悬浮颗粒时金属的冲刷腐蚀率为 3 ~ 15 mm/a;当管流中含有悬浮颗粒时,管流中的冲刷腐蚀率提高 300 mm/a 左右^[21]。Tanable 亦表明,管流中的冲刷腐蚀率随着含砂粒径和含砂量的增大而增大^[22]。Postlethwaite 及 Nesic 的研究表明,颗粒的表面粗糙度对冲刷腐蚀也有重要的影响。Clark 对相同粒径和浓度的石英砂及玻璃珠进行研究,结果表明:球形颗粒和非球形颗粒在对试样的冲刷腐蚀程度上有明显差异,石英砂对试样造成的冲刷腐蚀率是玻璃珠的 2 倍多。Hector Mcl·Clark 针对实际情况,研究了颗粒尺寸、颗粒密度等对冲刷腐蚀速率的影响^[23]。Zheng 的研究表明,流体中的含沙量低于临界值时,试样的冲刷腐蚀率随含沙量的增加而增大,流体中的含沙量高于临界值时,试样的冲刷腐蚀率达到稳定后不再随含沙量的变化而变化^[24]。

1.4 外部环境因素的影响

外部环境因素主要包括海水的 pH 值、溶解氧、含盐量、温度和管路的材料性质等。pH 值不同,海水对金属管路的腐蚀率不同。海水 pH 较小时,金属的腐蚀以氢离子去极化为主;海水 pH 较大时,金属的腐蚀以氧去极化为主。

海水中含有大量的溶解氧和氯盐,会破坏海水管路中金属的氧化膜,加速海水管路的腐蚀。海水中的溶解氧随海水温度升高而降低^[25],海水温度的变化关系到溶解氧含量的多少,进而影响金属表面氧化膜的形成和金属的钝化能力,从而使海水管路的腐蚀率发生变化。溶解氧的存在加速了金属的腐蚀,除去水中的溶解氧,金属的腐蚀率会大大降低。海水中的含盐量越多,海水导电率越大。海水的氯盐会增加海水的导电率,从而加速了海水管路的腐蚀进度。

海水管路的抗冲刷腐蚀能力与金属的材料有极大的关系^[26-27],海水管路一般为金属性材料,

含有多种金属,而这些金属的电极电位又各不相同,具有不同电极电位的两种(或两种以上)金属接触时容易发生电化学腐蚀^[28—30]。

2 海水管路冲刷腐蚀数值模拟现状及意义

2.1 国外的研究情况

国外对海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究比较早。星野明彦、松村昌信、冈良则、Y.M.Chabg、C.H.Pitt、及 B.W.Madsen 研究了各项流体参数对试样冲刷腐蚀的影响,同时进一步研究了冲刷和腐蚀交互作用对试样的影响^[31]。Mastsumura 进一步研究了流体动态情况下冲刷和腐蚀的协同效应,流动冲刷腐蚀总的质量损失为: $W=W_E+W_C+W_{EC}+W_{CE}$,在含有固体颗粒的流动体系中,冲刷腐蚀的协同效应对试样的影响最大^[31]。Stack M M 和 Abdelrahman S M 通过有限元思想结合计算流体力学方法,在水环境中针对不同颗粒浓度对 Fe 的冲刷腐蚀影响,进行了模拟研究。研究表明:随着颗粒物浓度的增加,试样表面的冲刷腐蚀速度逐渐增大,并且试样表面逐渐由以腐蚀为主向以冲刷为主转换。在质量流速度较高的情况下,试样受到的冲刷腐蚀较严重^[32]。Stack M M 和 Abdulrahman G H. 针对原油生产过程中低碳钢管路的腐蚀性能进行研究,随着低碳钢管路在油和水的环境中暴露,管路的冲刷腐蚀要比水溶液中的冲刷腐蚀严重。不同冲击角下的冲击速度和应用潜能会决定冲刷腐蚀图的变化,冲刷腐蚀图显示出了油水环境中冲刷腐蚀间的重要转换^[33]。Telfer C G, Stack M M 和 Jana B D 通过研究水环境中 Fe, Al, Ni, Cu 等多种金属因颗粒浓度和粒径的改变而表现出不同的冲刷腐蚀现象^[34]。针对水平管路的冲刷腐蚀作用, Ehme 用两相流模型建立数学模型,得出以下结果:当流体处于层流状态时,管壁受到的冲刷腐蚀较轻,当流体处于湍流状态时,管壁受到的冲刷腐蚀较严重^[35]。Zeisel 和 Durst 及 Nesic 和 Postlethwaite 用计算流体力学的方法来研究流体的冲刷腐蚀现象,采用数值计算方法,利用计算机建立与之相应的数学模型,模拟电极表面近壁处的流体力学行为,运用固液两相流模型进行数值模拟,利用 $k-\epsilon$ 模型计算流体在突然收缩和突然扩张条件下的流

场对试样的冲刷腐蚀量^[35]。

国外的学者们针对单个因素(颗粒性质、流体参数和环境因素),运用计算流体力学的方法,可以很好地对实际问题进行模型简化,进行数值模拟研究。目前针对具体问题,还不能整体考量这些影响因素,从而无法对冲刷腐蚀结果进行准确的判断和预测,这是下一步应该解决的问题。

2.2 国内的研究情况

国内对海水管路冲刷腐蚀的研究还不全面,对管道内的冲刷腐蚀研究建立的数学模型,大多局限于两相流。郭烈锦、李广军等针对水平管、垂直管、螺旋管的流体特性的状况,分别建立了相应的数学模型,对其进行数值模拟,并给出层流和湍流相互转化的特征与条件^[36—37]。赵会有针对不同钢材在浆体中冲刷腐蚀的影响因素(pH 值、流速)作了深入研究,通过分析研究不同 pH 值、流速下钢材的冲刷腐蚀程度,得出 pH 值、流速和钢材的冲刷腐蚀程度之间的三维关系^[35]。北京化工大学通过数值模拟与实验相结合的方法,根据流体的不同状态建立相应的数学模型,通过实验验证数值模拟的正确性^[35]。林玉珍通过碳钢在 3.5%NaCl 溶液中层流状态下的实验研究,运用数值模拟的方法对碳钢表面的冲刷腐蚀状况进行了研究,结果表明,由于电化学因素与流体力学因素的协同作用导致了碳钢在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀程度加大^[38]。雍兴跃用 $k-\epsilon$ 湍流模型并结合实验数据对在一定流速下的 3.5%NaCl 溶液中碳钢的冲刷腐蚀进行了数值模拟研究,研究表明,电化学因素与流体力学因素的协同作用对碳钢的冲刷腐蚀起到决定性作用,计算出碳钢的冲刷腐蚀程度与实验结果相符^[39]。权晓波结合流体力学参数,运用湍流模型、 $N-S$ 动量方程,对不同状态下的突扩管进行了数值计算,其结果与实验所得数据吻合^[40]。胡志伟用数值计算方法对 Tayler 实验弯管内的三维流场进行了研究,其结果与实验数据相符:针对弯管而言,在弯管前段,管道内的流速是对称分布的,在弯管处,流体截面处最大流速位置在弯管内侧;二次流速度的大小及分布与试验结果吻合^[41]。

学者们通过多次实验与模拟研究分析,更加深刻了解了各个因素对海水管路的冲刷腐蚀影响,但冲刷腐蚀模型比较粗陋,数值模拟不能模拟主要因素同时作用下海水管路的腐蚀情况。

2.3 数值模拟的意义

随着计算机相关计算软件的广泛使用,计算流体力学可广泛用于各种流体的绕流分析,在航天、桥梁及土木工程领域已有很大的发展。运用计算流体力学对风洞试验进行数值模拟,设置 Fluent 参数,得出计算结果,与风洞试验数据吻合^[42],同时计算流体力学正逐步被用来对冲刷腐蚀问题进行数值模拟。对于液固两相流算例,用 Fluent 软件中的离散模型对弯管、三通等处的流体进行数值模拟,模拟出该处的流场,得到速度云图和腐蚀情况^[43]。对于海水管路的冲刷腐蚀问题,利用 Fluent 等计算流体力学软件,通过输入流体力学参数建立相应的数学模型,进而对实际问题进行数值模拟。掌握实际情况下的冲刷腐蚀情况,进而可以对海水管路冲刷腐蚀较严重的区域作出预测。综上所述,运用 CFD 等计算流体力学,以数值模拟软件为工具对管道流场进行计算,得出管道腐蚀程度最大位置,与实际情况相比较,从而对管道的冲刷腐蚀起到预测作用,有利于对管道防腐防工作的开展^[44]。

3 结语

大多数数值模拟研究都侧重于研究单方面因素(如流速、攻角、颗粒性质、温度或 pH 值等)对海水管路冲刷腐蚀的影响,实际情况下,海水管路的冲刷腐蚀是多方面因素导致的。目前所进行的试验研究或数值模拟还不能考虑所有因素。就目前情况来说,对海水管路冲刷腐蚀的研究主要包括以下三种情况:试验模拟研究、数值模拟研究及两者相结合的研究,而将数值模拟和试验相结合的方法能更准确、快捷地预测出腐蚀部位及腐蚀程度。因此,后续的冲刷腐蚀数值模拟研究方向还需要充分考虑多方面因素的共同影响,并充分结合试验数据对模拟结果进行验证,从而使模拟结果与实际情况更加接近。

针对文中所述情况,对于海水管路冲刷腐蚀数值模拟的研究可以从下面两个方面入手。

1) CFD 建模。用试验所得数据建立系统的数据库,通过 CFD 软件建模对实际情况进行数值模拟,其结果与数据库对照,可以通过改变模型参数使数值模拟更加符合试验情况。

2) 完善模型。现在的数值模拟所用模型比较

粗陋,对实际问题进行简化、建立模型时只能考虑主要因素,不能综合考虑冲刷腐蚀因素对海水管路的影响。

参考文献:

- [1] 刘景伟,郭海燕,赵婧.等直径串列双圆柱体绕流的数值模拟[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013(12):92—97.
LIU Jing-wei, GUO Hai-yan, ZHAO Jing. Numerical Simulation of Flow Around Two Tandem Cylinders Diameter Etc[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2013(12): 92—97.
- [2] 王曰义.海水冷却系统的腐蚀及其控制[M].北京:化学工业出版社,2006:1—3.
WANG Yue-yi. Corrosion of Seawater Cooling System and Its Control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 1—3.
- [3] 沈捷攀,林晨.船舶海水管系的防腐蚀探讨[J].安徽建筑,2010(1):51.
SHEN Jie-pan, LIN Chen. Discussion on Corrosion Protection of Marine Seawater Piping System[J]. Anhui Architecture, 2010(1): 51.
- [4] 吴真光,梁明君,刘波.某艇海水管路的腐蚀与防护[J].中国修船,2000(4):9—11.
WU Zhen-guang, LIANG Ming-jun, LIU Bo. Corrosion and Protection of a Submarine Pipeline[J]. China Repair, 2000(4): 9—11.
- [5] 赵峰.稀有金属材料与工程[J].稀有金属材料与工程,2005,34(S1):346.
ZHAO Feng. Rare Metal Material and Engineering[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2005, 34(S1): 346.
- [6] SCHUH C, DUNAND D C. Non Isothermal Transformation Mischplasticity: Modeling and Experiments on Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2001, 49(2): 199—210.
- [7] 曾孟秋.常顶空冷器失效原因探讨[J].石油化工腐蚀与防护,2003(1):30—32.
ZENG Meng-qiu. Failure Cause of Constant Head Space Cooler[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2003 (1): 30—32.
- [8] NEVILLE A, REZA F, CHIOVELLI S, et al. Erosion-corrosion Behaviour of WC-based MMCs in Liquid-Solid Slurries[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 181—195.
- [9] 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.
- [10] NIU L, CHENG Y F. Synergistic Effects of Fluid Flow and Sand Particles on Erosion-corrosion of Aluminum in Ethylene Glycol-water Solutions[J]. Wear, 2008, 265(3/4): 367—374.
- [11] 代真,段志祥,沈士明.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(6):20—23.
DAI Zhen, DUAN Zhi-xiang, SHEN Shi-ming. Effect of

- Fluid Mechanics on Erosion Corrosion of Liquid Solid Two Phase Flow[J]. Petrochemical Equipment, 2006(6): 20—23.
- [12] JANA B D, STACK M M. Modelling Impact Angle Effects on Erosion-corrosion of Pure Metals: Construction of Materials Performance Maps[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 243—255.
- [13] 杨帆, 郑玉贵, 姚治铭, 等. 铜镍合金 BFe30-1-1 在流动人工海水中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(4): 207—213.
YANG F, ZHENG Y G, YAO Z M, et al. Study on Erosion-corrosion Behavior of Cu-Ni Alloy BFe30-1-1 in Flowing Artificial seawater[J]. J Chin Soc Corros Prot, 1999, 19(4): 207—213.
- [14] LUO Ya-nan, LI Qi-zheng, SONG Shi-zhe. Corrosion Behavior of ZHMn55-3-1 Copper Alloy in Stagnant and Flowing Seawater with Entrained Sediment[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2014, 61(2): 96—103.
- [15] MOHAMED S, MOHAMMED A, KHALID M S, et al. Experimental Investigation of Erosion-corrosion Phenomena in a Steel Fitting Due to Plain and Slurry Seawater Flow[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2014, 91: 22—29.
- [16] BENEDETTO B, MARCO E R, MARCO B, et al. Evaluation of Erosion-corrosion in Multiphase Flow Via CFD and Experimental Analysis[J]. Wear, 2003, 255(1): 237—245.
- [17] TANG Ping, YANG Jian, ZHENG Jin-yang, et al. Erosion-corrosion Failure of REAC Pipes under Multiphase Flow[J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2009, 3(4): 389—395.
- [18] 张安峰, 王豫跃, 邢建东. 不锈钢与碳钢在液固两相流中冲刷腐蚀特性的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003(2): 36—39.
ZHANG An-feng, WANG Yu-yue, XING Jian-dong. Study on Erosion Corrosion Behavior of Stainless Steel and Carbon Steel In Liquid Solid Two Phase Flow[J]. Weapons Materials Science and Engineering, 2003(2): 36—39.
- [19] 郑玉贵, 姚治铭, 柯伟. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12 (1): 36—40.
ZHENG Yu-gui, YAO Zhi-ming, KE Wei. Influence Mechanism of Fluid Mechanics on Erosion Corrosion[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12 (1): 36—40.
- [20] HUSSAIN E, HUSAIN A. Erosion-corrosion of Duplex Stainless Steel under Kuwait Marine Condition[J]. Desalination, 2005, 183(64): 227—234.
- [21] DONALD J B, TREVOR B, GEORGE A, et al. Numerical Prediction of Wall Mass Transfer Rates in Turbulent Flow Through a 90° Two-dimensional Bend[J]. Can J Chem Eng, 2009, 76(4): 728—737.
- [22] XU J, ZHUO C Z, HAN D Z, et al. Erosion-corrosion Behavior of Na-no-particle-reinforced Ni Matrix Composite Alloying Layer by Du-plex Surface Treatment in Aqueous Slurry Environment[J]. Corros Sci, 2009, 51(5): 1055—1068.
- [23] HECTOR M C. Specimen Diameter, Impact Velocity, Erosion Rate and Particle Density in a Slurry Pot Erosion Tester[J]. Wear, 1993, 162—164(93): 669—678.
- [24] ZHENG Y G, YU H, JIANG S L, et al. Effect of the Sea Mud on Erosion-corrosion Behaviors of Carbon Steel and Low Alloy Steel in 2.4% NaCl Solution[J]. Wear, 2008, 264(11/12): 1051—1058.
- [25] NIU L, CHENG Y F. Electrochemical Characterization of Metastable Pitting of 3003 Aluminum Alloy in Ethylene Glycol-water Solution[J]. J Mater Sci, 2007, 42(20): 8613—8617.
- [26] FLORES J F, NEVILLE A, KAPUR N, et al. An Experimental Study of the Erosion-corrosion Behavior of Plasma Transferred Arc MMCs[J]. Wear, 2009, 267(1-4): 213—222.
- [27] ZHANG D W, ZHANG X P. Laser Cladding of Stainless Steel With Ni-Cr₃C₂ and Ni-WC for Improving Erosive-corrosive Wear Performance[J]. Surf Coat Technol, 2005, 190(2/3): 212—217.
- [28] 曾荣辉, 彭玉辉, 张威. 船舶海水管路防腐蚀研究[J]. 中国舰船研究, 2009(3): 74—76.
ZENG Rong-hui, PENG Yu-hui, ZHANG Wei. Study on Corrosion Protection of Marine Seawater Pipeline[J]. China Ship Research, 2009(3): 74—76.
- [29] NEVILLE A, REYES M, HODGKISS T. Mechanisms of Wear on a Co-base Alloy in Liquid-Solid Slurries[J]. Wear, 2000, 238(2): 138—150.
- [30] REYES M, NEVILLE A. Degradation Mechanisms of Co-based Alloy and WC Metal-matrix Composites for Drilling Tools Offshore[J]. Wear, 2003, 255(7-12): 1143—1156.
- [31] 郑玉贵, 姚治明, 柯伟. 冲刷腐蚀的研究近况[J]. 材料科学与工程, 1992, 10(3): 21—26.
ZHENG Yu-gui, YAO Zhi-ming, KE Wei. Recent Research on Erosion Corrosion[J]. Materials Science and Engineering, 1992, 10(3): 21—26.
- [32] STACK M M, ABDELRAHMAN S M. A CFD Model of Particle Concentration Effects on Erosion-corrosion of Fe in Aqueous Conditions[J]. Wear, 2011, 273(1): 38—42.
- [33] STACK M M, ABDULRAHMAN G H. Mapping Erosion-corrosion of Carbon Steel in Oil-water Solutions: Effects of Velocity and Applied Potential[J]. Wear, 2012, 274/275: 40—413.
- [34] TELFER C G, STACK M M, JANA B D. Particle Concentration and Size Effects on the Erosion-corrosion of Pure Metals in Aqueous Slurries[J]. Tribol Int, 2012, 53: 35—44.
- [35] 徐鸣泉. 管道冲蚀破坏的多相流数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
XU Ming-quan. Numerical Simulation of Multiphase Flow in Pipeline Erosion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [36] H ZEISEL, F DURST. Computations of Erosion-corro-

- sion Processes in Separated Two-phase Flows[J]. Caire Journal of Applied Electrochemistry, 2008.
- [37] BATTIS B T, STENCEL J M, ABNER R T, et al. Corrosion[M]. NACE, Paper NO. 243.
- [38] 林玉珍, 刘景军, 雍兴跃, 等. 数值计算法在流体腐蚀研究中的应用—(I)层流条件下金属的腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999(1): 1—7.
LIN Yu-zhen, LIU Jing-jun, YONG Xing-yue, et al. Application of Numerical Calculation Method in The Study of Fluid Corrosion-(I) Corrosion of Metals Under Laminar Flow Conditions[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1999(1): 1—7.
- [39] 雍兴跃, 刘景军, 林玉珍, 等. 数值计算法在流体腐蚀研究中的应用—(II)湍流条件下金属的腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999(1): 8—14.
YONG Xing-yue, LIU Jing-jun, LIN Yu-zhen, et al. Application of Numerical Calculation Method in The Study of Fluid Corrosion-(II) Metal Corrosion Under Turbulent Flow[J]. Journal of Corrosion And Protection in China, 1999(1): 8—14.
- [40] 权晓波, 李维, 曾卓雄, 等. 幂律流体突扩管道湍流流动的研究[J]. 西安交通大学学报, 2001(11): 1118—1121.
QUAN Xiao-bo, LI Wei, ZENG Zhuo-xiong, et al. Study on The Turbulent Flow in The Sudden Expansion of Power Law Fluid[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2001(11): 1118—1121.
- [41] 胡志伟, 李勤凌, 苗永森. 三维强弯管内湍流场的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 1998(1): 51—54.
HU Zhi-wei, LI Jin-ling, MIAO Yong-miao. Numerical Analysis of Turbulent Flow in A Three Dimensional Strong Bend Pipe[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 1998(1): 51—54.
- [42] 孙智一, 吴晓蓉. 计算流体力学数值模拟方法的探讨及应用[J]. 水利科技与经济, 2008(2): 126—128.
SUN Zhi-yi, WU Xiao-rong. Discussion and Application of Numerical Simulation Method of Computational Fluid Dynamics[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008(2): 126—128.
- [43] 胡跃华. 典型管件冲刷腐蚀的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
HU Yue-hua. Numerical Simulation of Erosion Corrosion of Typical Pipe Fittings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [44] 权崇仁, 孙存楼, 王世忠. 基于 CFD 技术的流动海水对管路侵蚀机理分析[J]. 舰船科学技术, 2010(1): 54—58.
QUAN Chong-ren, SUN Cun-lou, WANG Shi-zhong. Analysis of Pipeline Erosion Mechanism of Flowing Seawater Based on CFD Technology[J]. Ship Science and Technology, 2010(1): 54—58.