

# 两相流冲蚀不锈钢材料的实验研究

姚 军<sup>1</sup>, 曹培根<sup>1,2</sup>, 周 芳<sup>1</sup>, 赵彦琳<sup>3\*</sup>, 李 宁<sup>1</sup>

(1. 厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102; 2. 福建省福清核电有限公司, 福建 福清 350318; 3. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249)

**摘要:** 应用两相流对不锈钢材料(304, 316)进行冲蚀研究, 观察其对材料的磨损腐蚀过程, 并对不同条件下材料质量损失和表面形貌进行分析. 发现在高速单相流冲蚀下不锈钢材料损伤微弱; 但加入微量石英砂后两相流冲蚀对不锈钢材料表面破坏迅速, 质量明显减少; 通过金相显微镜观察发现材料表面有明显的马蹄坑, 冲蚀时间越长, 表面形貌破坏越严重.

**关键词:** 两相流; 颗粒; 冲蚀; 不锈钢

**中图分类号:** TH 133; TP 183

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2015)05-0746-05

核电以其清洁、经济、安全等比较显著的优越性, 被视为未来能源产业发展的主流方向之一, 是目前能源体系中技术程度高, 但发生事故后却具有极大危害性的能源方式, 提高核电运行系统材料的安全性是核电长期可持续发展的重要保障. 核电站水路管道在长期高温高压流体的冲刷作用下会慢慢腐蚀变薄; 在反应堆运行时, 由于燃料棒、堆内构件等部件受高温高压腐蚀冲刷、磨蚀-腐蚀、FAC(flow accelerated corrosion)效应<sup>[1-2]</sup>等的影响, 会产生许多细小的颗粒物, 若这些颗粒物随着冷却剂进入一回路, 将会对该回路管路产生物理磨损、化学腐蚀、磨蚀-腐蚀、FAC效应等, 大大降低回路管路的性能, 导致管道壁厚减薄甚至破裂, 带来严重的安全隐患<sup>[3]</sup>. 因此研究多相环境下材料冲蚀后的损伤机理对提高核电系统运行安全性具有重要意义.

本文研究的冲蚀磨损是指液体或固体以松散的小颗粒按一定的速度或角度对材料表面进行冲击所造成的一种材料损耗现象或过程. 它广泛存在于核电、机械、冶金、能源、建材、航空、航天等许多工业部门, 已成为材料破坏或设备失效的重要原因之一<sup>[4-6]</sup>. 颗粒对管道部件的侵蚀破坏是大规模颗粒撞击管壁后的整体累积效应, 因此侵蚀结果与颗粒属性息息相

关. 能够对管壁造成损伤的颗粒尺寸一般在 50~500  $\mu\text{m}$  之间, 其中坚硬、尖锐的颗粒会造成更严重的侵蚀破坏. 此外, 管道对砂子的存在极为敏感, 管道内极少的砂子也能够对管道造成严重的损害<sup>[7]</sup>. 由于国内对于冲蚀问题的研究较少, 实验方法尤为缺乏. 本文应用实验方法对核电站常用不锈钢材料进行研究, 分析在两相流冲蚀下材料减少及表面特征变化, 寻找改进方法, 以减少冲蚀对材料的破坏影响.

## 1 实验过程及结果

### 1.1 实验介绍

本实验所用的材料为 304, 316 不锈钢, 由于实际生产中管道长时间暴露并受冲蚀, 因此对材料受流体冲蚀能力的研究显得格外重要. 实验装置中水泵(功率 1.5 kW)将水箱中的水注入管道中, 经喷嘴(直径 13 mm)射流冲击实验样品, 冲击水流速度约为 18.5 m/s. 实验中分别采用普通水(自来水)和混有质量分数为 0.1% 颗粒的混合流体, 射流冲击样品角度为 30° 和 45°. 实验后采用表面显微观察与样品称量对样品进行测量. 显微观察仪器采用 500× 显微镜(AxioObserverA1m), 称量仪器采用精确度为 0.1 mg 的电子

收稿日期: 2015-03-27 录用日期: 2015-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(51376153, 51406235)

\*通信作者: ylzhaoc@cup.edu.cn

引文格式: 姚军, 曹培根, 周芳, 等. 两相流冲蚀不锈钢材料的实验研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2015, 54(5): 746-750.

Citation: Yao Jun, Cao Peigen, Zhou Fang, et al. Experimental investigation of the erosion-corrosion of stainless steel by two-phase flow jets[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2015, 54(5): 746-750. (in Chinese)



天平. 称量前先用酒精清洗样品, 然后放在超声波清洗装置中清洗 3 min, 在室温下干燥后称量, 经 3 次测量取平均值.

本次实验使用不同条件研究流体冲刷样品程度, 如颗粒材质、喷射角度. 在进行实验之前, 首先对实验过程中可能的影响因素进行比较分析, 如水温、冲蚀方式、环境影响等, 努力将实验误差减小到最低. 实验过程中, 水泵长时间运转可使水温升高, 水温由 27 °C 上升为 46 °C, 之后温度保持稳定. 在水温升高过程中, 经过多次实验比较, 发现温度变化对材料冲蚀结果影响很小, 可以忽略不计. 相同样品在相同时间段内一次连续冲蚀与多次间断式冲蚀相比较, 发现 2 种方式所获得的实验结果基本一致, 即冲蚀方式的影响可以忽略不计. 此外, 冲蚀后样品放在室温条件下, 24 和 48 h 后称量, 没有发生质量变化, 表面也没有可见颜色变化, 因此实验室环境对冲蚀后样品的影响可以忽略不计.

### 1.2 流质对实验的影响

本次实验中, 流体冲蚀实验采用 3 种不同流质进行, 单相流纯净水、两相流分别含海沙和石英砂.

1) 纯净水. 用纯净水对 304 不锈钢进行冲蚀, 射流冲击样品角度为 30°, 工作 3 h 后, 清洗烘干称量, 发现样品质量损失较小, 其损失质量与测量天平的误差在同

一数量级(0.1 mg). 因此可认为纯净水对 304 不锈钢冲蚀结果影响微弱(和含海沙、石英砂的两相流比较).

2) 含海沙. 海沙的主要成分是 SiO<sub>2</sub>, 海沙含盐主要成分为 KCl、MgCl<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaCl<sub>2</sub> 与 NaCl 等. 实验前在普通水中加入海沙(直径 0.15 mm), 质量分数为 0.1%, 水流喷射角度为 30°, 经 14 h 冲蚀后结果见图 1. 由图 1 可知, 在含海沙水冲蚀下 304 不锈钢和 316 不锈钢质量随时间增加明显减小. 其中由图 1(a) 可知, 当海沙颗粒直径为 0.15 mm 时, 2 种材料的质量损失存在一定差别, 例如 316 不锈钢在经过 14 h 冲蚀后质量损失较 304 钢多出 0.022 6 g. 2 种材料的成分主要差别是 Mo、Cr 元素的含量, 304 不锈钢无 Mo 元素, 而 316 不锈钢含有质量分数为 2%~3% 的 Mo 元素; 在 Cr 的含量上, 304 不锈钢较 316 不锈钢平均要高出 1%. 而 Cr 元素对流体冲蚀的作用最敏感, 例如: 大亚湾工作人员对隔离阀导流环进行化学成分分析时发现, Cr 的质量分数从 0.027% 增大到 0.180%, 单相流冲蚀相对速率会降低约 3/4<sup>[8]</sup>, 即随着流体中 Cr 元素的增加, 材料的冲蚀程度会大大降低. 这与本实验中 304 不锈钢表现出比 316 不锈钢稍强的抗冲蚀能力结果相符. 图 1(b) 是在相同实验条件下, 选用直径 0.18 mm 的海沙作对比实验, 冲击角度同样为 30°, 15 h 后 2 种材料均随着时间的增长因冲蚀作用质量减少量增加, 316 不锈钢相对于 304 不锈钢质量损失多

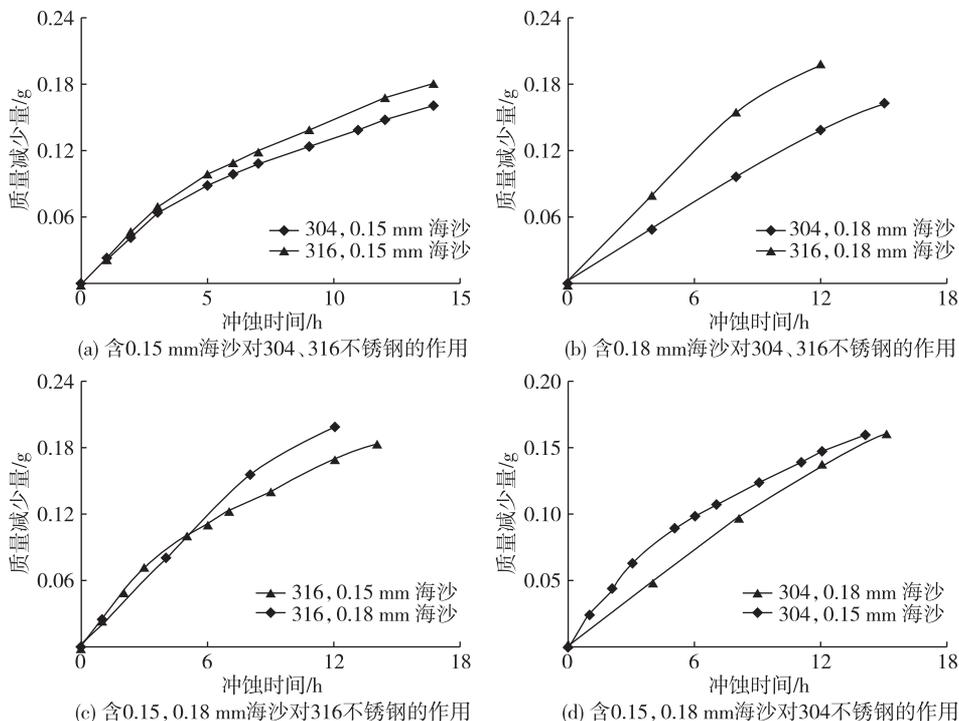


图 1 实验样品质量减少量与含海沙两相流冲蚀时间关系

Fig. 1 Specimen mass loss vs. impinging time length by two-phase flow with sea sand effect

出0.059 3 g,较之前在 0.15 mm 颗粒作用下的冲蚀结果明显增加,可见在较大的颗粒作用下,316 不锈钢材料的冲蚀效果更为明显.从图 1(c)中发现,316 不锈钢在较小颗粒(0.15 mm)作用下 5 h 左右材料冲蚀趋势发生缓和的变化,而在较大颗粒(0.18 mm)作用下 7 h 后材料冲蚀趋势才发生缓和.图 1(d)所示,对于 304 不锈钢,当海沙直径为 0.15 mm 时,在 4 h 后出现冲蚀趋势变缓的变化,但在较大颗粒(0.18 mm)作用下该趋势在实验时段内(15 h)尚未出现缓和.因此,对于 2 种不锈钢材料,颗粒粒径大小均是影响材料冲蚀的关键因素,304 不锈钢材料在该实验中对颗粒粒径大小反应更明显.

3) 含石英砂.使用直径为 0.18 和 0.25 mm 石英砂分别进行测试,冲蚀角度为 30°,对比两者的不同.两者在同为质量分数 0.1%的情况下随时间减少的质量见图 2.由图 2(a)可知,在直径 0.18 mm 石英砂冲蚀作用下,2 种样品冲蚀比较相近,而使用直径 0.25 mm 石英砂时(图 2(b)),316 不锈钢质量减少明显增多,可见,石英砂直径不同,其冲蚀作用下 2 种不锈钢材料减少的质量也不同.此外,直径 0.25 mm 的石英砂对 2 种样品冲蚀较直径 0.18 mm 石英砂结果平稳(图 2(c)和(d)),大颗粒表现出较好的稳定性.

在图 1,2 中均表现出在不同直径颗粒冲蚀下小颗粒初期对样品有较强的冲蚀能力,但随着时间逐渐

变长后累计的冲蚀质量被大颗粒逐渐超越,316 不锈钢在石英砂下实验,大颗粒冲蚀质量超过小颗粒使用时间较长,在 7 h 左右;而海沙实验曲线出现类似交点在 5 h(见图 3).综上可知,在不同材料冲蚀下,大颗粒与小颗粒之间表现出相同的结论:大颗粒在初期对样品的质量减少量较小颗粒少,之后逐渐超越;小颗粒对样品质量的作用效果没有大颗粒稳定.而通过对实验后颗粒分析发现颗粒的棱角对样品的质量减少有影响,小颗粒经过多次碰撞之后,棱角很快被磨平,对材料的影响逐渐减少.

### 1.3 不同冲击角度对实验的影响

石英砂两相流作用下,样品的质量减少较为稳定,下面研究在不用冲击角度下使用石英砂两相流样品质量的变化情况.选取冲击角度分别为 30°,45°,结合经验公式<sup>[8]</sup>进行分析.在同一工况下,当两相流在 30°冲击 316 不锈钢时,比在 45°时所造成的质量损失更大.同时,由塑性材料质量损失与冲击角度关系可知,在约 15°之后,随着冲击角度的增大,其质量损失反而减小.这与实验所得到的结论相吻合.而在 45°角情况下,样品质量变化较小.304 不锈钢对角度的敏感性要大些.

根据经验公式  $E = KV_1^2 f(\beta_1)$  可以计算质量损失<sup>[9-10]</sup>,其中  $E$  与撞击前颗粒的速度  $V_1$  和冲撞角度  $\beta_1$

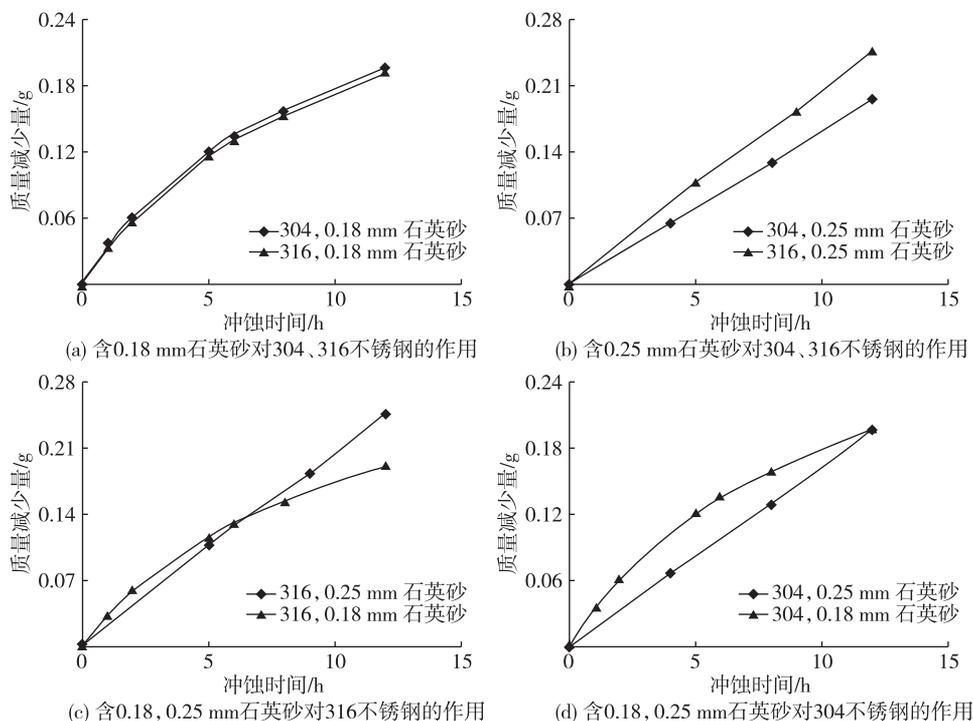


图 2 实验样品质量减少量与含石英砂两相流冲蚀时间关系

Fig. 2 Specimen mass loss vs. impinging time-length by two-phase flow with quartz sand effect

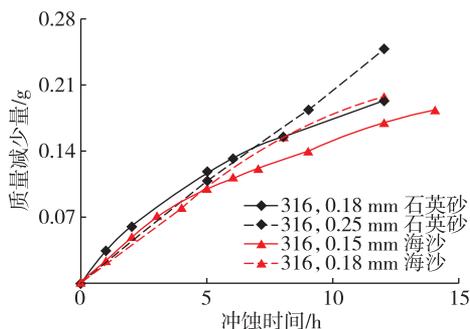
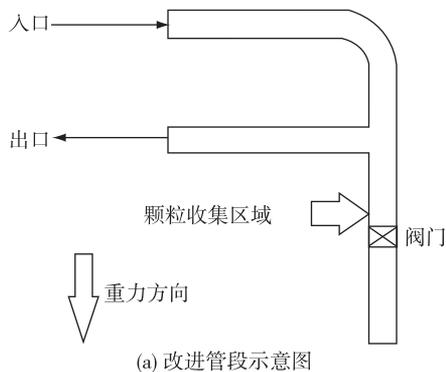


图 3 实验样品质量减少量与冲蚀时间关系  
Fig. 3 Specimen mass loss vs. impinging time length

相关,  $K$  和  $n$  的取值与材料不同有关,  $f(\beta_1)$  是冲撞角对质量损失的影响. 根据材料的塑性、脆性不同,  $n$  有不同的取值, 对于塑性材料来说  $n$  一般取  $2.3 \sim 2.7$ , 脆性材料在  $2 \sim 4$ .  $n$  的取值同样受到材料的硬度影响<sup>[11]</sup>, 但不锈钢材料在冲蚀作用下硬度不是主要因素. 大亚湾工作人员对碳钢材料冲蚀样品检测发现表面膜中的 Cr 含量与基体中的 Cr 含量一致, 采用显微硬度计测量导流环试样的硬度, 无论是减薄区还是未减薄区域的硬度值均在  $150 \sim 167$  HV 之间, 这说明硬度不是影响材料损害(导流环缺损)的主要因素<sup>[8]</sup>. 从微观角度来说, 不同材质管道的颗粒碰撞损伤机理也不同, 脆性材料的损伤源于冲击破坏, 塑性材料的损伤则源于剪切破坏<sup>[11-12]</sup>, 而很多材料同时表现出脆性和塑性特性. 因此, 管壁材料的密度、硬度和展性等均与其耐侵蚀程度有关<sup>[7]</sup>.

## 2 改进方案

一旦运行管道中出现颗粒类杂质, 管壁就会受到严重侵蚀, 被侵蚀的材料进入管道溶液中加剧了管道



侵蚀的速率, 形成恶性循环. 改进方案(见图 4)后, 发现被测样品的质量损失有明显降低. 该方案是在管道转弯处设置一段向下的管道, 颗粒随着流体流经该管段时, 在重力及两相流牵引力作用下会在设计收集区域沉积, 而水流则通过出口管道继续运行. 该方案不仅可实现在运行过程中对颗粒有效收集, 还可以在此管道上安装阀门, 在不影响管道正常运行的情况下, 定期取出管道中的沉积杂质. 在管路中有同样颗粒的情况下, 改造后管路中的颗粒明显减少, 对样品的冲蚀在设备运行  $7 \sim 8$  h 后逐渐变弱. 所以, 在管道合适的位置设置沉淀器, 可以使管道中的颗粒在沉淀装置处聚集, 大大降低颗粒对管道造成的危害.

对两相流冲击后的样品进行表面观察, 发现经过长时间冲蚀后的金属表面出现马蹄坑特征的腐蚀形态<sup>[10]</sup>, 而扇贝状腐蚀形貌常出现在发生严重管壁减薄的大直径管道内表面. 实验后的 316 不锈钢经过金相显微镜观察可以得到与长时间冲蚀后的管道金属表面相类似的腐蚀形态. 实验结果与实际电站的腐蚀情况相同, 实验加速过程与核电站实际问题类似, 可以由实验结果预测核电站实际运行结果. 304 不锈钢冲蚀前表面平整, 晶界分明, 但经过 10 min 冲蚀后, 晶界出现混乱, 模糊不清; 冲蚀 1 h 后, 完全看不到晶界, 并且可以观察到明显的凹凸, 3 h 后, 凹凸更加明显.

## 3 结 论

本文通过实验研究 304, 316 不锈钢在两相流冲蚀下的材料特性. 对实验后样品进行质量称量, 金相显微镜和电子显微镜观察后得到以下结论:

- 1) 在单相流(普通水)连续冲击作用下, 2 种实验样品均表现出很好的抗冲蚀性能, 质量减少可以忽略; 在含颗粒的两相流冲击作用下样品质量损失明显

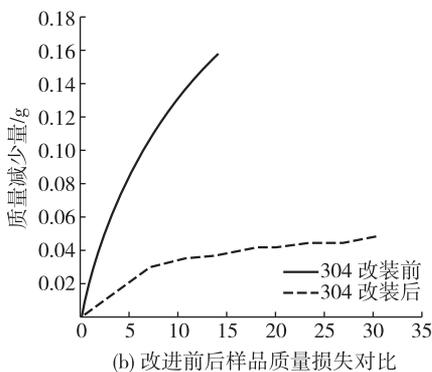


图 4 改进方案  
Fig. 4 Improved methods

增加,316 不锈钢因为 Cr 含量低,损失质量大于 304 不锈钢;在较大的颗粒作用下,316 不锈钢材料的冲蚀效果更为明显。

2) 对于 2 种 304,316 不锈钢材料,颗粒粒径大小均是影响材料冲蚀的关键因素,304 不锈钢材料在该实验中对颗粒粒径大小反应更明显。

3) 大颗粒在初期对样品的质量减少量较小颗粒少,之后逐渐超越;小颗粒对样品质量的作用效果没有大颗粒稳定;而通过对实验后颗粒分析发现颗粒棱角对样品的质量减少有影响,小颗粒经过多次碰撞之后,棱角很快被磨平,对材料的影响逐渐减少。

4) 改进实验设计,在实验系统中增加除颗粒线路,样品质量损失率大大降低,抗磨损-腐蚀效果显著。

在本工作的基础上将进行更深入的工作,如研究在冲蚀过程中颗粒粒径、形状的变化规律,分析颗粒粒径、形状变化与样品损失的关系,研究海沙中的氯离子含量对样品表面损失的影响,以获得磨损-腐蚀的关联性。

### 参考文献:

- [1] Chexal B,Horowitz J,Doolev B,et al. EPRI TR-106611-R1 flow-accelerated corrosion in power plants [R]. [s. l.]: United States Electric Power Research Institute,1998.
- [2] 束国刚,薛飞,遆文新,等. 核电厂管道的流体加速腐蚀及其老化管理[J]. 腐蚀与防护,2006,27(2):72-76.
- [3] 汝小龙,周涛,郭森森,等. 核电站一回路中颗粒物对管路延寿影响的研究[J]. 中国电机技术,2012(8):0062.

- [4] Allen C,Ball A. Review of the performance of engineering materials under prevalent tribological and wear situations in South Africa industries[J]. *Tribo Inter*,1996(29):105-116.
- [5] 姚军,陈丽华,樊建人,等. 一种气固两相流中弯管抗磨方法的数值试验研究[J]. *中国电机工程学报*. 2002,22(5):134-138.
- [6] Yao J,Zhang B Z,Fan J R. An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-solid flows[J]. *Wear*,2000,240:215-223.
- [7] 张日,刘海笑. 流动保障中管道的颗粒侵蚀分析[J]. *海洋工程*,2012,30(4):10-21
- [8] 车银辉,关建军,吕群贤,等. 大亚湾及岭澳核电站旁路给水隔离阀导流环缺损原因分析[J]. *核动力工程*,2012,33(2):132-135.
- [9] Adler W F. Assessment of the state of knowledge pertaining to solid particle erosion,DAAG29-77-C-0039[R]. U. S. :Army Research Office,1979.
- [10] Humphrey J A C. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*,1990,11(3):170-195
- [11] Minami K,Kurban A P,Khalil C N,et al. Ensuring flow and production in deepwater environments [C]// *Proceedings of the 31st Annual Offshore Technology Conference*. Houston:[s. n.],1999:OTC11035.
- [12] Davalath J,Hurtado M,Keig R. Flow assurance management for Bijupira and Salema field development [C]// *Proceedings of the 34th Annual Offshore Technology Conference*. Houston:[s. n.],2002:OTC14052.

## Experimental Investigation of the Erosion-corrosion of Stainless Steel by Two-phase Flow Jets

YAO Jun<sup>1</sup>,CAO Pei-gen<sup>2</sup>,ZHOU Fang<sup>1</sup>,ZHAO Yan-lin<sup>3\*</sup>,LI Ning<sup>1</sup>

(1. College of Energy,Xiamen University,Xiamen 361102,China;2. Fuqing Nuclear Power Co. Ltd.,Fuqing 350318,China;  
3. College of Mechanical and Transportation Engineering,China University of Petroleum-Beijing,Beijing 102249,China)

**Abstract:** In this work,two types of stainless steel,304 and 316,were investigated by two-phase flow impinging jets for purpose of understanding the development of erosion-corrosion. The cumulative mass loss was measured and material morphologies prior to and after the experimental erosion tests were observed by scanning electron microscopy (SEM). It was found that the stainless steel was damaged slightly by single-phase flows even at high speed but was destroyed much quickly as the mass loss increased greatly by adding small amounts of quartz sand as part of two-phase flows. Horseshoe pits can be observed conspicuously through a high-power optical microscope and the damage of the stainless steel increases with time.

**Key words:** Two-phase flow;particle;erosion;stainless steel