中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1825 ~ 1835
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

不同含沙射流冲击角度下冲击式水轮机基材的损伤特性与机理

郭鹏程[1,2], 孙帅辉[1,2], 王钊宁[3], 龚升[3], 罗兴锜[1,2*]

1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 西安 710048
2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048
3. 东方电气集团东方电机有限公司, 德阳 618000
* E-mail: luoxq@xaut.edu.cn

收稿日期: 2025-12-22; 接受日期: 2026-03-23; 网络版发表日期: 2026-07-15
国家自然科学基金项目(批准号: 52576043, U2443226)和陕西省教育厅青年创新团队项目(编号: 24JP118)资助

摘要 本文开展了不同含沙射流冲击角度下冲击式水轮机基材X3CrNiMo13-4不锈钢的冲蚀磨损试验, 采用失重法、深度法以及微观形貌分析法分析了其在不同射流冲击角度下的损伤特性和机理. 基材失重量以及平均磨损率均随冲击角度的增大先增大后减小, 并在45°时达到峰值. 在30°冲击下磨损宏观形貌表现为窄槽状深坑, 窄槽边缘随冲击角度增大向两侧扩展. 在45°冲击下, 磨损区域向横向扩展, 磨损面积最大, 体积损失最大, 导致平均磨损率在45°达到峰值. 当射流冲击角度为60°时, 冲蚀坑边缘存在由射流滞止效应造成的凸点, 并随冲击角度增大, 凸点从磨损边缘向射流中心迁移. 在90°等高角度冲击下, 颗粒运动受到流动滞止的影响以不同的角度冲击材料表面并形成射流中心区、近射流中心区、远射流中心区和平面区4个区域, 分别对应凹坑、唇片、垄沟和划痕4种磨损形貌. 在45°等低角度冲击下, 材料表面产生区域Ⅰ和区域Ⅱ两部分, 区域Ⅰ颗粒的冲击角度较大, 形成大量挤压唇片和材料去除; 区域Ⅱ中颗粒沿流线低角度犁削表面, 产生沿冲刷方向的垄沟. 研究成果可为冲击式水轮机的抗磨损设计与防护提供基础.

关键词 冲击式水轮机基材, 高速含沙射流, 冲击角度, 冲击磨损

1 引言

我国水电开发的主力已转向西部超高水头段. 冲击式水轮机是超高水头段水电开发中的首选机型. 我国西部超高水头段水电富集区多为高泥沙河流, 按800~1000 m水头计算, 挟沙水流中颗粒的冲击速度为125~140 m/s, 即使较低的泥沙含量也能产生巨大的磨蚀风险, 导致机组效率下降、振动加剧[1~4]. 然而, 目前针对冲击式水轮机泥沙磨损的研究多侧重于定性描述泥沙磨损侵蚀部位, 未能量化其部件破坏程度[5,6]. 厘清高速含沙射流对水轮机材料的冲击损伤机理是定量预测冲击磨损的关键.

高速含沙射流冲击磨损过程受到流动参数、颗粒特性参数和材料特性的影响[7~11]. 流动参数中射流冲

引用格式: 郭鹏程, 孙帅辉, 王钊宁, 等. 不同含沙射流冲击角度下冲击式水轮机基材的损伤特性与机理. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1825–1835
Guo P C, Sun S H, Wang Z N, et al. Damage characteristics and mechanisms of Pelton turbine's substrate material under sediment-laden jet impact at various angles (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1825–1835, doi: 10.1360/SST-2025-0434

© 2026 《中国科学》杂志社

击角度对其磨损机理及特性具有重要影响[12~14].

早期, 学者采用气固冲蚀试验研究了颗粒冲击金属材料损伤的机理. Finnie[15]指出气固冲蚀下延性材料主要受尖锐颗粒切削作用, 在低冲击角下, 磨粒撞击表面后随即离开, 后续颗粒会移除前次冲击形成的切屑, 在高冲击角下, 冲击颗粒会在表面切削过程中停滞, 导致颗粒周围及前端材料堆积, 其理论对低冲击角的最大冲蚀量预测较为准确, 但在高冲击角下预测误差较大. Bitter[16,17]提出了变形磨损理论, 指出在高冲击角度下材料经反复塑性变形达到损伤极限后剥落, 解释了在高冲击角度下颗粒对材料的损伤作用. Levy[18,19]提出了材料损伤的薄片机制, 颗粒冲击表面先挤出金属薄片, 然后薄片在后续冲击下剥落, 导致稳态侵蚀速率高于初始侵蚀速率. McLaury和Shirazi[20], Mansouri等人[21], Arabnejad等人[22,23]和Oka[24,25]在Finnie和Bitter的理论基础上结合多种材料参数分别建立了预测公式, 在中低冲击角度下, 材料的磨损失重更大. Verma等人[26]对中碳钢、双相钢和马氏体钢试件进行了不同角度下(15°~90°)的气固冲蚀实验, 指出中碳钢和双相钢的冲蚀速率随角度增大而降低, 马氏体钢则相反.

在气固冲蚀中, 颗粒随低密度气体高速运动, 主要依靠颗粒自身动能冲击材料对材料造成切削或者塑性应变, 而在含沙条件下的冲击式水轮机中, 沙粒在水的携带作用下对水轮机材料造成损伤. 由于水相对空气具有极大的黏度和密度, 沙粒冲击材料表面的速度和角度都受到水流的影响, 一方面各个沙粒冲击材料表面的速度和角度不再均一, 其随流场变化; 另一方面, 沙粒冲击的角度和射流的冲击角度不同. 射流冲击角度通过影响材料表面的流场影响沙粒的冲击角度. 熊家志等人[27]针对Q345钢试件进行了低速射流冲击实验, 研究发现Q345钢的峰值冲蚀率出现在30°附近, 主要是由于切削作用形成大量细长沟槽, 质量损失最大; 在垂直冲击时以坑洞为主, 在喷嘴外边缘区域因颗粒聚集和高速碰撞损伤最严重, 但整体磨损量低于30°. Nguyen等人[28,29]基于低速射流冲击SUS304钢试验指出, 在低角度下磨损主要由微切削和犁削主导, 形成窄而浅的沟槽; 随着角度增大至40°, 磨损率达到峰值, 且塑性变形加重; 当角度进一步增大至90°时, 磨损率下降, 但磨损机制转变为以压痕诱导的塑性变形为主, 形成圆形深坑. Islam和Farhat[30]对输油管道进行冲击实验表明, 30°冲击角下, 切削效应较强, 磨损量显著高于90°; 在高角度下, 颗粒嵌入材料表面反而起到保护作用.

综上, 气固射流冲蚀机理的研究已经较为成熟, 水沙射流冲蚀的研究集中于低射流速下, 射流速度均不超过40 m/s[27~29,31,32], 而在超高水头冲击式水轮机中, 水沙射流的最大速度可以达到140 m/s, 其相对速度可达80 m/s, 针对高速含沙射流在不同冲击角度下冲击损伤的研究还较少, 其冲击损伤机理和特性还不清晰. 因此, 本文通过开展水轮机常用基材的变角度高速冲蚀磨损试验, 采用失重量、磨损深度及微观形貌分析方法, 揭示了不同水沙射流冲击角度工况下颗粒对材料的损伤机理, 为冲击式水轮机的抗磨损设计与防护提供基础.

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

本文采用高速射流冲蚀试验平台对冲击式水轮机常用基材X3CrNiMo13-4不锈钢开展高速含沙射流冲蚀磨损试验. 如图1和2所示, 试验系统由搅拌装置、冷却装置、动力传输装置、冲蚀试验水箱及控制监测装置组成. 冲蚀射流试验开始工作前, 通过量筒配置给定泥沙颗粒直径和浓度的含沙水, 倒入水箱中, 打开混水箱上方的搅拌电机进行搅拌. 均匀搅拌后的含沙水流被柱塞泵吸入增压, 达到高速喷射所需的压力. 系统通过电磁流量计测试含沙流体的流量, 其精度为0.5%. 系统流量通过变频器调节柱塞泵的转速进行调节. 喷嘴的平均射流速度通过流量进行调节. 试件安装在图3所示的角度调节装置上. 该装置可以调节含沙射流冲击试件的角度, 在高速水流冲击下, 固定状态稳定. 适合0°~90°任意角度射流冲击, 该夹具对角度控制精度为±0.2°. 在进行变冲击角度试验时, 通过调整角度调节装置的高度, 保证射流中心与试件中心在同一直线上. 高速含沙水流射流冲击平板后, 经过回流管道流回混水箱中, 完成整个射流冲蚀试验的循环. 每一组试验结束后排空水箱内流体, 并重新加入石英沙获得均匀含沙水流. 为确保磨损效果明显, 每个试验工况的冲蚀时间设定为10 min, 实验前后需要对试件进行超声波清洗、干燥等操作, 并采用精度为0.1 mg的电子天平称重.

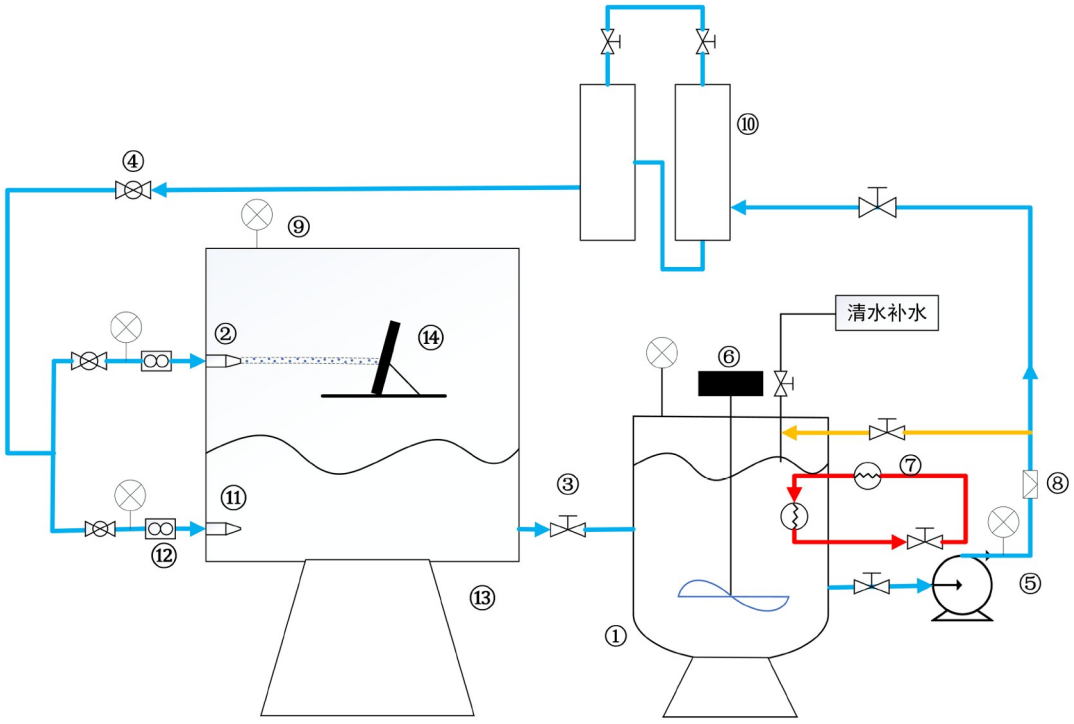


图 1　(网络版彩图)高速射流冲蚀试验系统原理示意图. 1, 混水箱; 2, 冲击射流喷嘴; 3, 调节阀; 4, 球阀; 5, 柱塞泵; 6, 搅拌电机; 7, 冷却装置; 8, 温度传感器; 9, 压力表; 10, 稳压罐; 11, 防泥沙沉积喷嘴; 12, 流量计; 13, 冲蚀实验水箱; 14, 可调节夹具

Figure 1　(Color online) Schematic diagram of high-speed jet erosion test system. 1, Water mixing tank; 2, jet nozzle; 3, control valve; 4, ball valve; 5, plunger pump; 6, agitator; 7, cooling device; 8, temperature sensor; 9, pressure gauge; 10, pressure stabilizing tank; 11, anti-sediment nozzle; 12, flowmeter; 13, erosion test water tank; 14, adjustable fixture

2.2　试验材料与试验工况

试件材料为X3CrNiMo13-4，面积尺寸为40 mm×40 mm，厚度为4 mm. 抛光打磨试样表面，表面粗糙度为0.8. 材料的屈服强度为520 MPa，硬度为223 HB. 试验采用机制石英沙颗粒对试件表面进行冲击，石英沙颗粒中值粒径为161 μm，其中粒径分布如

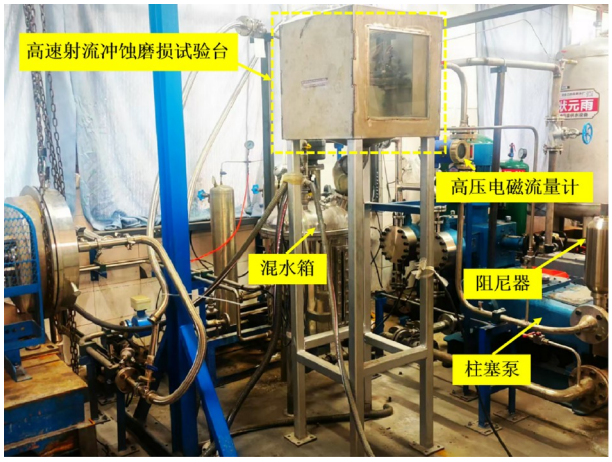


图 2　(网络版彩图)高速射流冲蚀试验系统

Figure 2　(Color online) High-speed jet erosion test system.

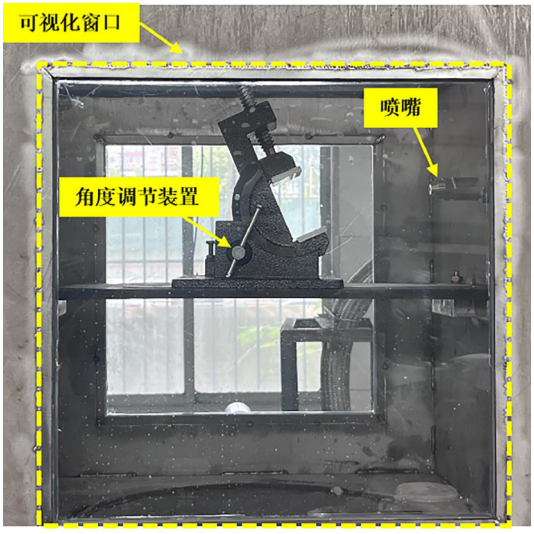


图 3　(网络版彩图)冲击试验箱

Figure 3　(Color online) Impact test chamber.

图4所示. 石英沙颗粒为尖角型, 微观形貌如图5所示. 试验条件和工况如表1所示.

2.3 磨损分析方法

管内流量通过变频器调节泵的转速进行控制, 流量值由电磁流量计直接读取, 并结合喷嘴出口直径、管路管径及连续性方程计算得出入口流速. 实验完成后, 平均磨损率利用式(1)计算.

$$E=\frac{m_0-m_1}{AT}, \tag{1}$$

式中, E为冲蚀速率(kg m^{-2} s^{-1}); m_0为试样冲蚀前的质量(kg); m_1为试样冲蚀后的质量(kg); A为试验时不锈钢试件表面积(m^2); T为冲蚀时间(h).

采用基恩士公司生产的三维轮廓测量仪VR-6000系列以及捷克公司生产的号为ZEISS SIGMA 300的扫描电子显微镜对冲蚀后试件进行磨损深度测量及微观形貌拍摄. 三维轮廓测量仪通过扫描光学系统将内置有高亮度LED的投光部发出的光转换为结构化照明光. 当磨损后材料表面存在高低差时, 照明光照向测量对象上将使条纹投影图像变形, 并根据变形量测量对象的高度差. 该测量仪分辨率为0.1 μm, 能够将细微形状、起伏可视化, 可对整个面进行高精度三维测量. 扫描电子显微镜可通过不同放大倍数来观测试件表面的微观形貌, 分析试件在不同射流角度下表面的微观形貌特征.

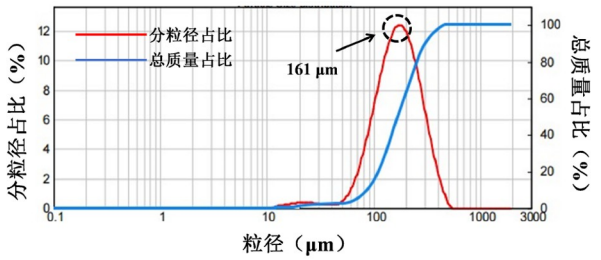


图 4 (网络版彩图)石英沙中值粒径及粒径分布

Figure 4 (Color online) Median particle size and particle size distribution.

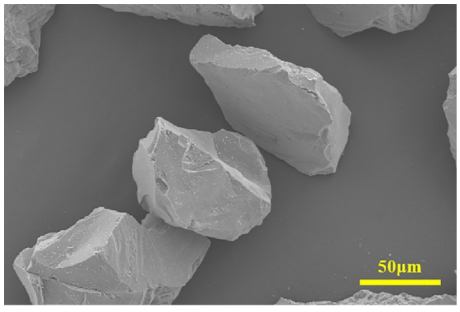


图 5 (网络版彩图)石英沙扫描电镜下微观形貌

Figure 5 (Color online) Microscopic morphology of quartz sand under SEM.

表 1 试验条件与工况

Table 1 Parameters of experimental conditions

参数	数值
颗粒属性	SiO_2
颗粒浓度 (kg/m^3)	2.5
颗粒中值粒径 (μm)	161
冲蚀角度 (°)	30、45、60、75、90
喷嘴至试件距离 (mm)	12.7
冲击速度 (m/s)	80
冲蚀时间 (min)	10
喷嘴出口直径 (mm)	4

3 结果分析

3.1 失重及磨损率分析

图6为X3CrNiMo13-4不锈钢在不同冲击角度下冲击后的宏观形貌. 图6(a)给出90°清水冲击下的试件的形貌, 试件材料镜面消失, 但失重量仅为0.3 mg, 而在含沙水流下其失重量为100~130 mg, 因此清水冲击的影响可以忽略不计. 如图6(b)所示, 含沙水流冲击材料表面后发生扩散, 发亮的磨损区域表明了水流的扩散区域. 随角度增大, 水流扩散区域增大. 当冲击角度为75°时, 水流向反向扩散, 但反向的扩散区域较小. 当冲击角度为90°时, 水流向四周对称扩散.

利用式(1)对X3CrNiMo13-4不锈钢在不同冲击角度下平均磨损率进行计算, 如图7所示. 随射流冲击角度的增加, 平均磨损率先增大后减小. 当冲击角度为90°时, 材料的平均磨损率较小, 在45°冲击角度时平均磨损率最大.

3.2 磨损深度分析

采用三维形貌仪对试件的磨损深度进行测试, 可以获得不同射流冲击角度下的三维磨损形貌, 如图8所示, 在30°冲击角下, 流体扩散小, 沿流动方向流体

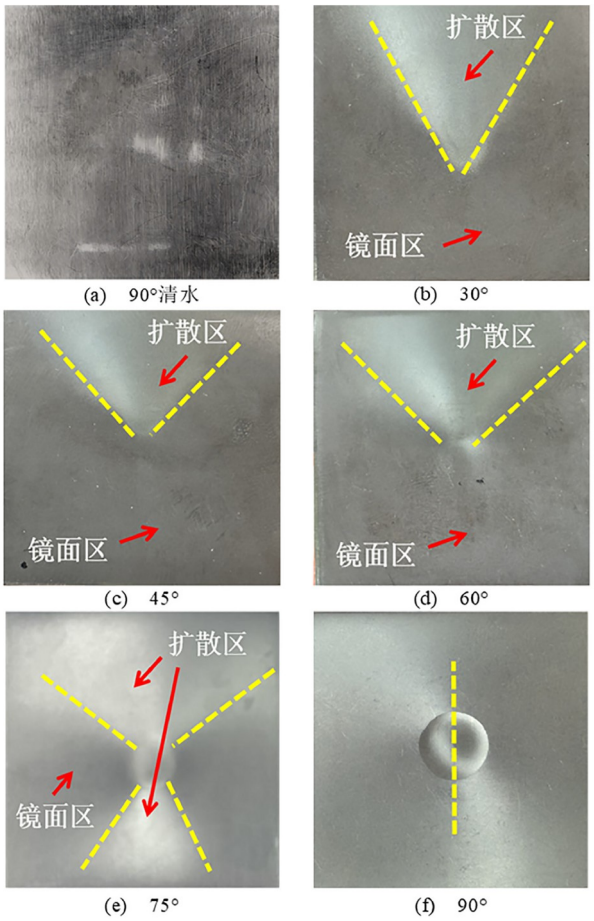


图 6　(网络版彩图)X3CrNiMo13-4在不同角度下冲击后的宏观形貌. (a) 90°清水; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°; (f) 90°

Figure 6　(Color online) Macroscopic morphologies of X3CrNiMo13-4 after impact wear at different impact angles. (a) 90° clear water; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°; (f) 90°.

速度大, 颗粒的冲击速度大, 冲蚀痕迹为窄槽形状. 结合磨损数据. 在45°时, 流体向两侧扩散, 磨损形貌由窄槽向两侧扩展, 冲蚀面积大于冲击角度30°的面积. 当射流冲击角度为60°时, 可以看到在冲蚀坑边缘存在一凸点, 这是由于射流冲击材料表面后, 流体滞止, 流速降低, 压力升高, 此时射流中的颗粒在压力梯度下减速, 冲击损伤降低, 形成凸点. 随着冲击角度的增大, 该凸点逐渐向冲蚀坑的中心移动, 同时冲蚀凹坑逐渐变为圆形. 在冲击角度为90°时, 凸点区域位于冲蚀坑的中心.

为进一步分析磨损深度, 如图6(f)所示, 在试件中心位置的流动方向提取沿线的冲蚀深度, 如图9所示. 各角度下, 最大冲蚀深度接近, 由于冲蚀时间较短, 最大冲击深度未能出现较大差距. 0 mm位置为射流中心位置, 负值位置为射流下游. 当冲击角度为30°时, 纵向磨损深度和范围最大, 并且最深磨损位置位于射流下游. 当冲击角度为45°时, 纵向磨损区域收缩, 但从图8可知其横向磨损区域变大, 整体磨损失重最大. 在60°时开始出现由滞止效应引起的驼峰状凸点区域. 随着冲击角度的增大, 凸点区域的磨损深度逐渐变小, 凸点的高度越来越大, 且此区域逐渐向试件中心偏移. 在90°时转移, 凸点位于试件中心, 此时该区域磨损深度最小, 驼峰的高度最大.

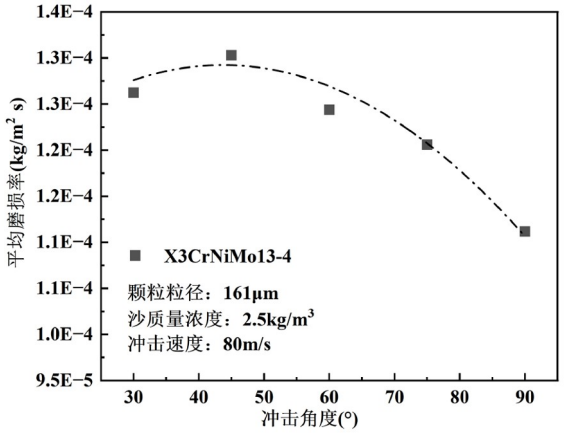


图 7　X3CrNiMo13-4平均磨损率随冲击角度变化

Figure 7　Variation of the average wear rate of X3CrNiMo13-4 with impact angle.

为了分析磨损面积随角度的变化, 采用三维轮廓仪测量了不同角度下磨损深度大于0.04 mm时的面积, 如图10所示. 随角度增大, 磨损面积先增大后减小. 当冲击角度从30°增大至45°时, 射流在材料表面的横向扩散显著增强, 磨损区域由窄槽向两侧扩展, 磨损面积明显增大. 相比之下, 60°及以上冲击角度下, 由于射流滞止效应增强, 材料表面出现凸点区域, 磨损区域趋于集中, 磨损面积反而减小.

3.3　微观磨损形貌分析

3.3.1　90°冲击角下基材的磨损机理分析

在高角度射流作用下, 由于射流在材料表面存在滞止现象, 流体和颗粒的运动十分复杂, 并在材料表面造成不同的损伤特征. 本文重点针对90°冲击角度下磨损机理进行分析. 在90°冲击后, 基于试件表面材料去除情况, 将冲蚀磨损区域划分为4个区域: 区域I射流

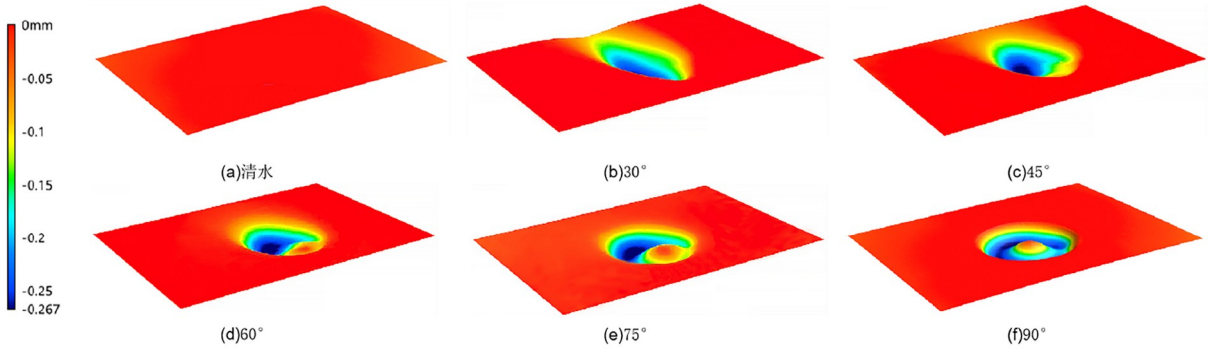


图 8 (网络版彩图)不同冲击角度及清水工况下X3CrNiMo13-4的三维磨损形貌

Figure 8 (Color online) Three-dimensional wear morphology of X3CrNiMo13-4 stainless steel under different impact angles and clear water conditions.

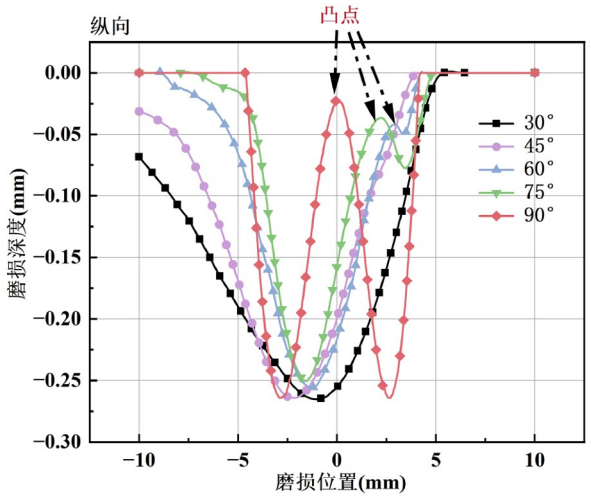


图 9 (网络版彩图)X3CrNiMo13-4不同冲击角度下磨损轮廓曲线

Figure 9 (Color online) Angle-dependent wear topography profiles for X3CrNiMo13-4.

中心区域, 区域II近射流中心区域, 区域III远射流中心区域, 区域IV平面区. 如图11(a)和(b)所示.

通过扫描电镜对4个区域进行扫描分析, 发现4个区域磨损机制各不相同. 图12(a)和(b)为扫描电镜100×下磨损区域边界图片, 区域I与区域II是由于磨损形貌的不同存在边界. 可以看到区域I中有许多深坑. 区域III与区域IV则由于凹坑边缘产生边界. 区域III中存在大量犁削产生的犁沟.

图13和14分别为4个磨损区域通过扫描电镜分别放大500倍和2000倍的微观磨损示意图. 从图中可以看出, 区域I位于凸点区域, 水流流动滞止形成高压, 而颗粒以近90°撞击不锈钢表面, 形成塑性变形和凹坑, 虽然磨损表面粗糙度大, 但材料去除量小导致其磨损深度较小; 因区域I内的流体滞止, 含沙水流以较高的速度和较大的角度冲击区域II和区域III. 其中区域II颗粒的冲击角度更大, 其表面存在严重的塑性变形和挤压特征, 产生较短的犁沟和唇片结构, 如图14(b)所示, 唇片结构容易在后续冲击中剥落, 而造成磨损深度逐步增大; 区域III颗粒随射流流动以低角度高速度犁削表面, 产生大量长条犁沟, 磨损量较大. 在该区域下, 由于磨损量大, 累积冲击产生明显的凹坑, 凹坑导致表面

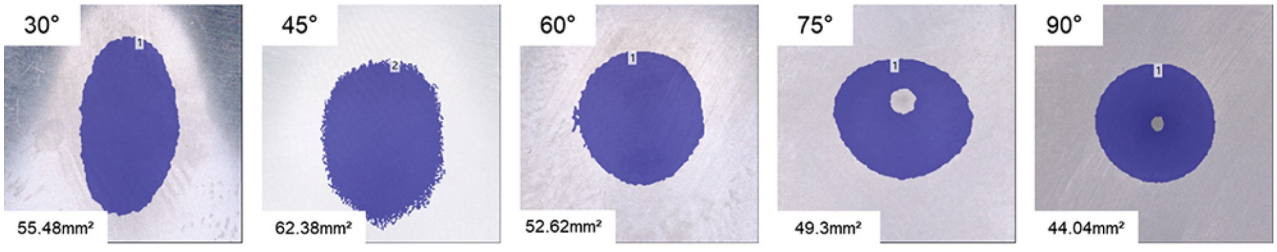


图 10 (网络版彩图)不同冲击角度下X3CrNiMo13-4的磨损面积变化

Figure 10 (Color online) Variation of the wear area of X3CrNiMo13-4 with different impact angles.

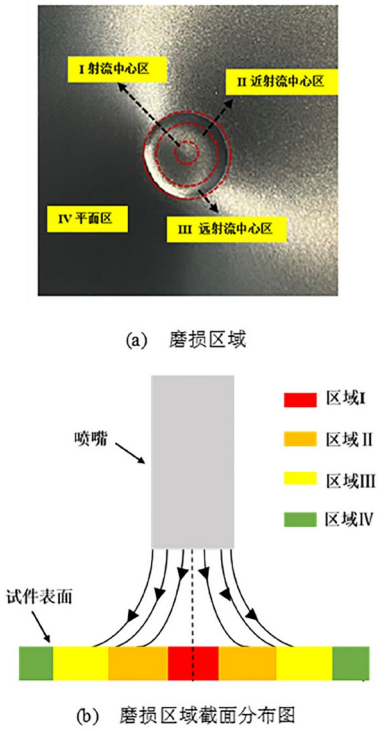


图 11　(网络版彩图)90°射流磨损区域划分

Figure 11　(Color online) Division of 90° jet wear area.

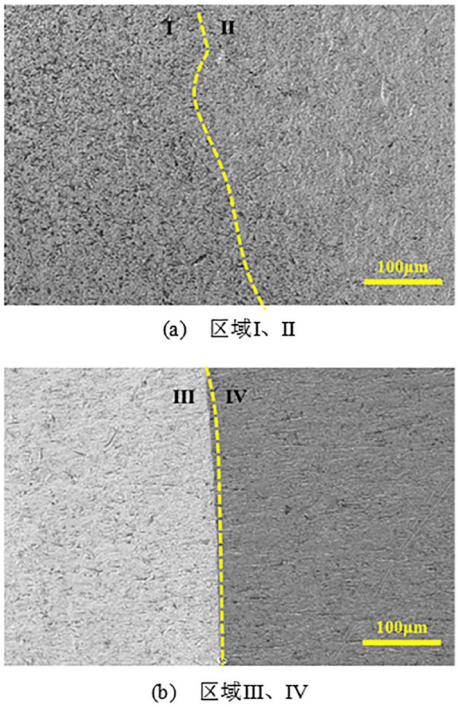


图 12　(网络版彩图)90°射流4个磨损区域的微观形貌

Figure 12　(Color online) Microstructure characteristics of the four wear regions under 90° jet impact.

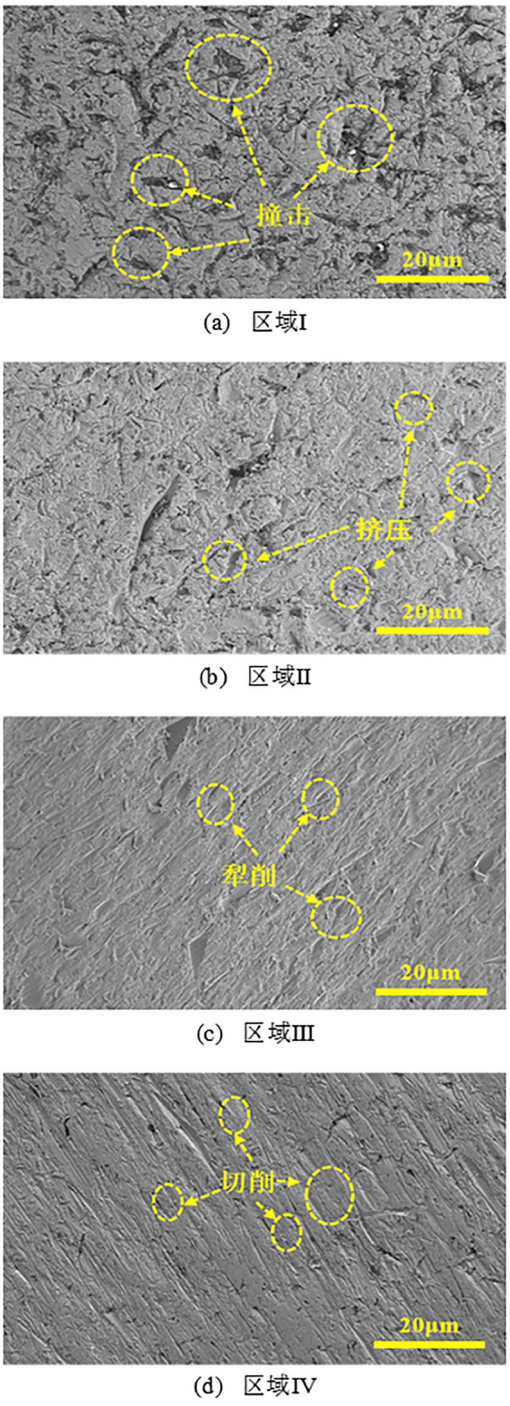
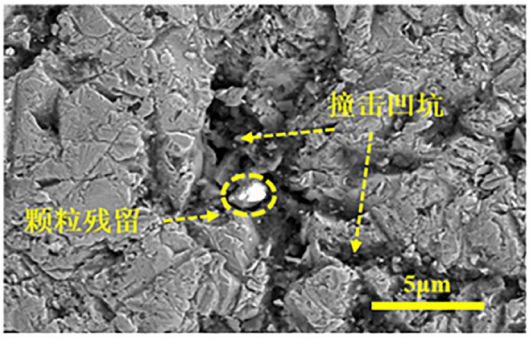


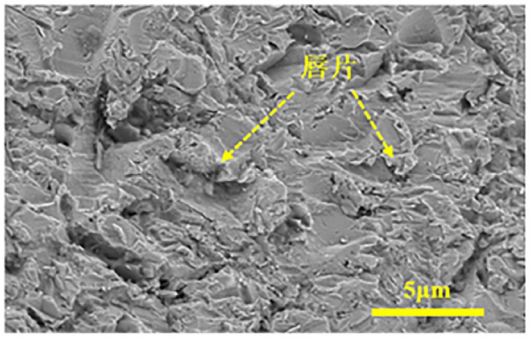
图 13　(网络版彩图)四个磨损区域扫描电镜微观形貌(500×)

Figure 13　(Color online) Microscopic morphology of 4 wear areas under SEM.

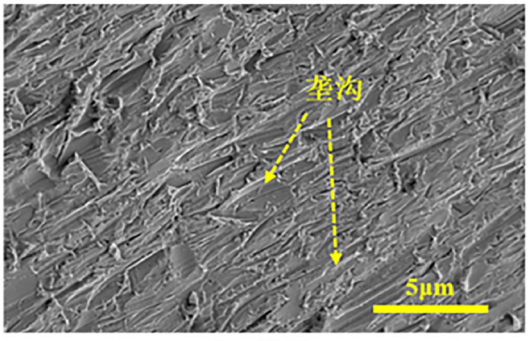
附近的流动方向向上而进一步强化区域III的磨损，同时降低区域IV的磨损．区域IV为平面区，冲击初期受



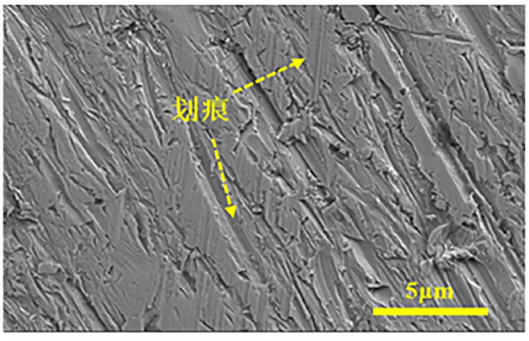
(a) 区域I



(b) 区域II



(c) 区域III



(d) 区域IV

图 14 (网络版彩图)四个磨损区域扫描电镜微观形貌(2000×)

Figure 14 (Color online) Microscopic morphology of 4 wear areas under SEM.

到射流携带颗粒进行小角度切削产生较长的划痕, 在凹坑形成后, 但由于颗粒的运动方向发生改变, 区域IV的磨损量降低.

在区域I中, 由于液相流体基本处于滞止状态, 颗粒在高角度冲击材料后, 发生破碎并嵌入材料表面, 并不易被输送到其他区域. 图13(a)和14(a)中均存在较亮的颗粒. 进一步采用能谱分析对其进行分析, 如图15所示, 可以看到撞击凹坑中除去材料本身元素, 出现了大量硅元素和氧元素, 表明凹坑中为石英颗粒SiO_2. 从图13(a)可以对颗粒的直径进行计算, 其粒径大小远远小于试验工况所用颗粒, 表明在颗粒冲击材料表面时, 颗粒发生了破碎.

3.3.2 45°冲击角下基材的磨损机理分析

在低角度射流时, 流体的滞止现象不明显, 流体和颗粒的运动相对高角度射流冲击简单. 图16给出45°射流冲击后材料表面的磨损形貌.

从图16(b)可以看到其磨损形貌在两个区域内存在明显差异. 对应射流的上下游, 如图16(a)所示, 可以将其磨损区域划分为区域I和区域II.

图17为45°下扫描电镜1000倍区域I、II微观形貌图, 从图中可以看出, 区域I中, 颗粒以相对较高的角度高速撞击挤压材料, 冲击轨道短, 并产生较大唇片; 在区域II中, 颗粒的冲击角度相对较小, 主要以低角度的切削和犁削为主, 表面出现沿流动方向的长条垄沟并

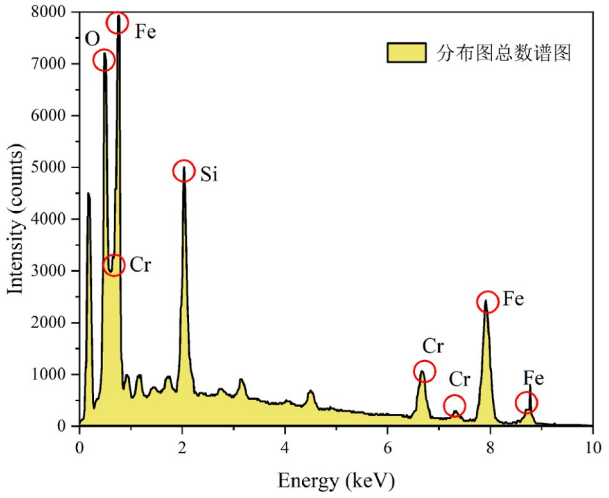


图 15 (网络版彩图)区域I凹坑内能谱元素分析

Figure 15 (Color online) EDS elemental analysis within the pits in Region I.

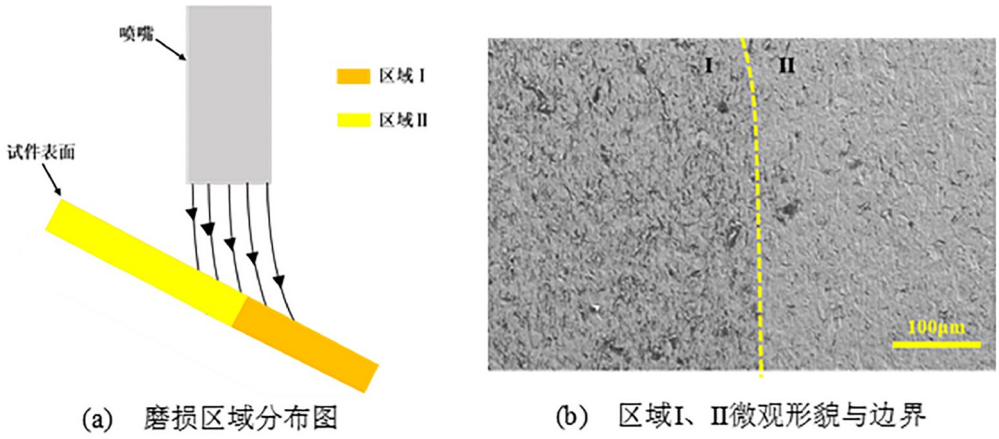


图 16　(网络版彩图)45°冲击角下磨损区域划分示意图
Figure 16　(Color online) Schematic diagram of wear area division under 45° impact angle.

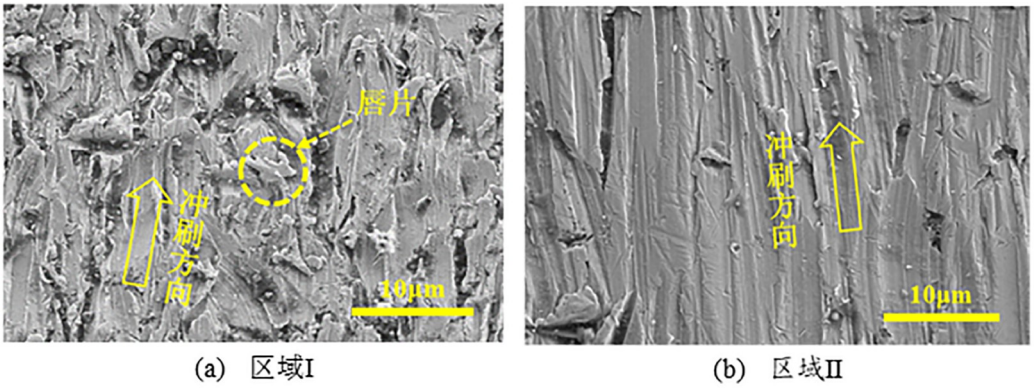


图 17　(网络版彩图)45°冲击下区域I、II在扫描电镜下的微观形貌
Figure 17　(Color online) Micro-morphology of regions I and II under 45° impact angle.

在末端产生成唇片. 切削产生的唇片将在后续的冲击中被去除, 导致在该角度下磨损量大, 并在持续冲击作用下产生凹坑.

4　结论

本文利用高速射流冲蚀试验平台, 开展水轮机基材的冲蚀磨损试验, 并通过平均磨损率、磨损深度及磨损微观形貌, 分析了高速含沙射流不同冲击角度下水轮机基材的损伤特性和机理. 主要结论如下.

随射流冲击角度增大, 水流下游扩散区域增大, 当角度大于60°时, 水流向上游反向扩散. X3CrNiMo13-4不锈钢的平均磨损率随冲击角度(30°~90°)增大先增大后减小, 磨损面积随角度增大先增大后降低, 在45°时, 磨损区域向横向扩展最大, 面积最大, 磨损失重最大.

在低冲击角下, 冲蚀形貌为窄槽形状, 最大磨损深度位于冲击点的下游. 随冲击角度增大, 窄槽边缘向两侧扩展. 当射流冲击角度为60°时, 冲蚀坑边缘存在由于射流滞止效应造成的凸点. 凸点位置随冲击角度增大从磨损边缘向射流中心迁移, 在90°时, 凸点移动至冲蚀坑的中心.

在90°等高角度冲击下, 材料表面可分为4个磨损区域: 射流中心区域I被高角度颗粒撞击, 产生凹坑并伴随颗粒的嵌入; 近射流中心区域II产生较短的犁沟和挤压唇片; 远射流中心区域III则在较低的颗粒冲击速度下产生犁削垄沟并不断强化产生宏观的凹坑; 区域IV产生轻微切削划痕.

在45°等低角度冲击下, 材料表面产生两个磨损

区域, 区域I的冲击角度较大, 形成大量挤压唇片和材料去除; 区域II中颗粒沿流线低角度犁削表面, 造成沿冲刷方向的垄沟, 并在持续作用下产生较深的凹坑.

致谢 高速射流冲蚀试验在李淼、王思迪、张成基、武鹏波等7人的通力协助下得以顺利实施, 在此深表谢意.

参考文献

1 Xihuanet. Li Qiang Attends the Groundbreaking Ceremony of the Hydropower Project on the Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River and Announces the Official Commencement of the Project (in Chinese). [2025-07-19]. https://www.news.cn/20250719/88ebff56443d466998-c36182e2ca2dfa/c.html [新华网. 李强出席雅鲁藏布江下游水电工程开工仪式并宣布工程开工. [2025-07-19]. https://www.news.cn/20250719/88ebff56443d466998c36182e2ca2dfa/c.html]

2 Li Y H, Zhu Y L, Xiao Y X, et al. Analysis on sediment erosion characteristics of Pelton runner buckets in flood season (in Chinese). J Hydroelectr Eng, 2024, 43: 15–22 [李彦浩, 朱逸林, 肖业祥, 等. 冲击式水轮机转轮水斗汛期泥沙磨损特性分析. 水力发电学报, 2024, 43: 15–22]

3 Xiao Y X, Guo B, Zhang J, et al. Numerical study on sediment-laden three-phase flow and erosion characteristics of Pelton turbine (in Chinese). Hydropower Pumped Storage, 2021, 7: 4–10 [肖业祥, 郭豹, 张瑾, 等. 冲击式水轮机含沙三相流与磨损特性数值研究. 水电与抽水蓄能, 2021, 7: 4–10]

4 Rai A K, Kumar A, Staubli T, et al. Interpretation and application of the hydro-abrasive erosion model from IEC 62364 (2013) for Pelton turbines. Renew Energ, 2020, 160: 396–408

5 Fan W R, Sun L G, Guo P C, et al. Research progress on internal flow and sediment erosion characteristics of Pelton turbines (in Chinese). J Hydrodyn Ser A, 2023, 38: 774–793 [范文睿, 孙龙刚, 郭鹏程, 等. 冲击式水轮机内部流动与泥沙磨损特性研究进展. 水动力学研究与进展A辑, 2023, 38: 774–793]

6 Luo X Q, Ge Z G, Zhu G J, et al. Technical progress and development trend of Pelton turbines (in Chinese). J Hydroelect Eng, 2023, 42: 116–134 [罗兴锜, 戈振国, 朱国俊, 等. 冲击式水轮机技术进展与发展趋势. 水力发电学报, 2023, 42: 116–134]]

7 Reynolds O. XLII. On the action of a blast of sand in cutting hard material. London Edinburgh Dublin Philos Mag J Sci, 1873, 46: 337–343

8 Rai A K, Kumar A, Staubli T. Effect of concentration and size of sediments on hydro-abrasive erosion of Pelton turbine. Renew Energ, 2020, 145: 893–902

9 Rai A K, Kumar A, Staubli T. Analytical modelling and mechanism of hydro-abrasive erosion in Pelton buckets. Wear, 2019, 436-437: 203003

10 Zhang J, Darihaki F, Shirazi S A. A comprehensive CFD-based erosion prediction for sharp bend geometry with examination of grid effect. Wear, 2019, 430-431: 191–201

11 Ji L Y. Study on collision rebound law and erosion characteristics of large-particle solid-liquid two-phase flow (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017 [季浪宇. 大颗粒固液两相流碰撞反弹规律及磨损特性研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江理工大学, 2017]

12 Wang Q Y, Bai S L, Liu Z D. Surface characterization and erosion-corrosion behavior of Q235 steel in dynamic flow. Tribol Lett, 2014, 53: 271–279

13 Burstein G T, Sasaki K. Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of 304L stainless steel. Wear, 2000, 240: 80–94

14 Andrews N, Giourntas L, Galloway A M, et al. Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of Stellite 6 and SS316. Wear, 2014, 320: 143–151

15 Finnie I. Some observations on the erosion of ductile metals. Wear, 1972, 19: 81–90

16 Bitter J G A. A study of erosion phenomena part I. Wear, 1963, 6: 5–21

17 Bitter J G A. A study of erosion phenomena part II. Wear, 1963, 6: 169–190

18 Levy A V. Erosion and erosion-corrosion of metals. Corrosion, 2006, 51: 872–883

19 Levy A V. The platelet mechanism of erosion of ductile metals. Wear, 1986, 108: 1–21

20 McLaury B S, Shirazi S A. An alternate method to API RP 14E for predicting solids erosion in multiphase flow. J Energy Resour Technol, 2000, 122: 115–122

21 Mansouri A, Arabnejad H, Shirazi S A, et al. A combined CFD/experimental methodology for erosion prediction. Wear, 2015, 332-333: 1090–1097

22 Arabnejad H, Mansouri A, Shirazi S A, et al. Development of mechanistic erosion equation for solid particles. Wear, 2015, 332-333: 1044–1050

23 Arabnejad H, Mansouri A, Shirazi S A, et al. Abrasion erosion modeling in particulate flow. Wear, 2017, 376-377: 1194–1199
24 Oka Y I, Matsumura M, Funaki H. Measurements of plastic strain below an indentation and piling-up between two adjacent indentations. Wear, 1995, 186-187: 50–55
25 Oka Y I, Ohnogi H, Hosokawa T, et al. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. Wear, 1997, 203-204: 573–579
26 Verma P, Tyagi R, Mohan S. Effect of microstructure, impact velocity and angle on erosive wear of medium carbon, dual phase and fully martensitic steels. Wear, 2023, 518-519: 204645
27 Xiong J Z, Yao J, Wang Z J, et al. Experimental study on two-phase flow erosion of Q345 steel (in Chinese). J Beijing Univ Aeronaut Astronaut, 2023, 49: 891–899 [熊家志, 姚军, 王志杰, 等. Q345钢两相流冲蚀实验研究. 北京航空航天大学学报, 2023, 49: 891–899]
28 Nguyen V B, Nguyen Q B, Zhang Y W, et al. Effect of particle size on erosion characteristics. Wear, 2016, 348–349: 126–137
29 Nguyen V B, Nguyen Q B, Liu Z G, et al. A combined numerical-experimental study on the effect of surface evolution on the water-sand multiphase flow characteristics and the material erosion behavior. Wear, 2014, 319: 96–109
30 Islam M A, Farhat Z N. Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate. Wear, 2014, 311: 180–190
31 Wang G, Gao Q, Kou L, et al. Study on liquid-solid jet erosion characteristics of 316L stainless steel. J Mech Sci Technol, 2023, 37: 1871–1882
32 Messa G V, Wang Y, Negri M, et al. An improved CFD/experimental combined methodology for the calibration of empirical erosion models. Wear, 2021, 476: 203734

Damage characteristics and mechanisms of Pelton turbine's substrate material under sediment-laden jet impact at various angles

GUO PengCheng[1,2], SUN ShuaiHui[1,2], WANG ZhaoNing[3], GONG Sheng[3] & LUO XingQi[1,2]

[1] *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*
[2] *School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*
[3] *Dongfang Electric Corporation Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China*

Erosion-wear experiments were carried out on the impulse-turbine substrate stainless steel X3CrNiMo13-4 under sand-laden jet impingement at different impact angles. The damage characteristics and underlying mechanisms were investigated using gravimetric mass-loss measurements, depth profiling, and micro-morphology analyses. Both the cumulative mass loss and the average wear rate exhibited a non-monotonic dependence on impingement angle, increasing initially and then decreasing, with a maximum at 45°. The peak at 45° is attributed not only to intensified erosion but also to a pronounced in-plane expansion of the damaged footprint, which enlarges the effective interaction area and increases the cumulative material removal per unit time, thereby resulting in the maximum average mass loss. At 30°, the wear scar presented as a narrow groove-like deep crater, and the groove boundaries expanded laterally as the impingement angle increased. At an impingement angle of 60°, protrusions appeared at the crater rim due to the jet stagnation effect; with further increases in angle, these protrusions migrated from the crater edge toward the jet center. Under high-angle impingement (e.g., 90°), particle motion was strongly influenced by flow stagnation, leading to impacts at spatially varying local angles and forming four characteristic zones—jet center, near-center, far-center, and peripheral flat zones—corresponding respectively to pitting, lip formation, ridge-groove features, and scratching. Under low-angle impingement (e.g., 45°), two regions were identified: an upstream Region I, where particles impinged at relatively higher local angles and generated abundant extruded lips accompanied by pronounced material removal, and a downstream Region II, where particles ploughed the surface at low angles along streamlines, producing ridge–groove features aligned with the scouring direction. These findings provide a mechanistic basis for anti-erosion design and protective strategies for impulse-turbine components operating under sand-laden flow conditions.

substrate material of Pelton turbines, high-velocity sediment-laden jet, impact angle, impact wear

doi: 10.1360/SST-2025-0434