

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

核电站放射性污染金属部件激光复合去污技术研究

魏少翀, 刘省勇, 陆海峰, 张文利, 李新贤, 聂继组, 陈国星

引用本文:

魏少翀, 刘省勇, 陆海峰, 等. 核电站放射性污染金属部件激光复合去污技术研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(5): 240056.

Wei S C, Liu S Y, Lu H F, et al. Research on laser composite decontamination technology of radioactive contaminated metal parts in nuclear power plant[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(5): 240056.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240056>

收稿日期: 2024-03-07; 修改日期: 2024-04-11; 录用日期: 2024-04-12

相关论文

Development of a hybrid photoacoustic and optical monitoring system for the study of laser ablation processes upon the removal of encrustation from stonework

Athanasia Papanikolaou, George J. Tserevelakis, Kristalia Melessanaki, Costas Fotakis, Giannis Zacharakis, Paraskevi Pouli
Opto-Electronic Advances 2020, 3(2): 190037 doi: [10.29026/oea.2020.190037](https://doi.org/10.29026/oea.2020.190037)

激光清洗在石化领域的应用前景浅析

段成红, 陈晓奎, 罗翔鹏

光电工程 2020, 47(11): 200030 doi: [10.12086/oe.2020.200030](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200030)

激光功率对不锈钢表面清洗效果影响的研究

陈国星, 陆海峰, 赵滢, 张惠炜, 魏少翀, 季骅, 吴树辉, 史一岭

光电工程 2017, 44(12): 1217 doi: [10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.010)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240056

核电站放射性污染金属部件 激光复合去污技术研究

魏少翀^{1,3}, 刘省勇², 陆海峰^{1,3*}, 张文利², 李新贤⁴,
聂继组², 陈国星^{1,3}

¹苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004;

²大亚湾核电运营管理有限公司, 广东 深圳 518124;

³国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心, 江苏 苏州 215004;

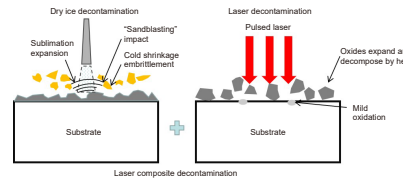
⁴阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500

摘要: 探究放射性污染金属部件的清洁解控或重新利用新技术, 可用于减少核电站废金属产生量。本研究针对锈蚀的 4140 钢, 提出激光复合去污技术, 并与单一的干冰去污和激光去污进行对比试验。通过对基体试样的微观形貌、成分分布、金相组织、三维形貌进行测试, 分析其表面粗糙度、显微硬度的变化趋势, 以确定激光复合去污效果, 最后在核电站中实现工程验证。测试和验证结果表明, 激光复合去污技术可将 4140 钢表面的锈蚀层完全去除, 获得最佳的去污效果, 且不影响基体材料的成分、组织及力学性能。沾污电机叶轮去污后表面沾污水平均 $< 0.4 \text{ Bq/cm}^2$, 表面接触剂量率均 $< 40 \text{ nSv/h}$, 达到核电站固体废物清洁解控标准。因此, 激光复合去污技术可为核电站放射性污染金属部件的去污提供新方法, 实现废物最小化。

关键词: 激光复合去污; 表面形貌; 粗糙度; 损伤; 清洁解控

中图分类号: TL944

文献标志码: A



魏少翀, 刘省勇, 陆海峰, 等. 核电站放射性污染金属部件激光复合去污技术研究 [J]. 光电工程, 2024, 51(5): 240056

Wei S C, Liu S Y, Lu H F, et al. Research on laser composite decontamination technology of radioactive contaminated metal parts in nuclear power plant[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(5): 240056

Research on laser composite decontamination technology of radioactive contaminated metal parts in nuclear power plant

Wei Shaochong^{1,3}, Liu Shengyong², Lu Haifeng^{1,3*}, Zhang Wenli², Li Xinxian⁴, Nie Jizu²,
Chen Guoxing^{1,3}

¹Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215004, China;

²Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China;

³National Engineering Research Center for Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou, Jiangsu 215004, China;

⁴Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500, China

Abstract: In order to reduce the amount of waste metal produced by nuclear power plants, a new technology for clean control or reuse of radioactively contaminated metal components is being studied. In this study, laser composite decontamination technology was proposed for corroded 4140 steel, and compared with dry ice

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-04-11; 录用日期: 2024-04-12

*通信作者: 陆海峰, haifenglu1992@163.com。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

decontamination and laser decontamination alone. By testing the microstructure, composition distribution, metallographic structure, and three-dimensional morphology of the matrix sample, the variation trend of surface roughness and microhardness was analyzed to determine the composite decontamination effect. Finally, the engineering verification was realized in the nuclear power plant. The test and verification results show that the laser composite decontamination technology can completely remove the rust layer on the surface of 4140 steel and obtain the best decontamination effect. Furthermore, it does not affect the composition, microstructure, and mechanical properties of the matrix material. The average amount of sewage on the surface of the contaminated motor impeller after decontamination is less than 0.4 Bq/cm^2 , and the surface contact dose rate is less than 40 nSv/h , which meets the clearance level of solid waste in nuclear power plants. Thus, laser composite decontamination technology can provide a new method for decontamination of radioactively contaminated metal components in nuclear power plants and minimize waste.

Keywords: laser composite decontamination; surface morphology; roughness; damage; clean decontrol

1 引言

国内核电站在几十年的运行过程中会产生大量的放射性固体废物, 包括废金属、废塑料、废过滤器及废树脂等。目前, 放射性固体废物种类繁多, 且沾污严重, 其中部分存在活化现象, 这就导致后续处理处置存在较大的困难。此外, 数量逐年增加的固体废物已经给核电站带来不小的储存及处置压力。废物最小化是我国核电厂放射性固体废物管理的主要内容。我国核安全导则 HAD401/08-2016 提出了废物最小化目标: 应通过采取切实可行的设计和管理措施, 并与国际最佳实践相比对, 使得核设施放射性固体废物年产生量可合理达到尽量低。根据国际最佳实践, 单台百万千瓦压水堆核电机组废物包年产生量目标值均为 $\leq 50 \text{ m}^3$ 。目前, 国内某些核电站为了保障核电厂的安全运行, 将单机组每年放射性固体废物的产生量目标定为 $\leq 30 \text{ m}^3$ ^[1-3]。

针对废塑料、废过滤器等固体废物, 核电站采用固化、压缩整备、焚烧等减容比大的方法, 可大幅度减少固废废物的储存量; 针对工器具等废金属, 核电站先进行去污处理, 降低其表面剂量率, 以使其达到解控水平或重新利用, 实现减少放射性废物产生量的目的^[4-7]。目前, 核电站采用的去污技术以化学去污、泡沫去污、超声波浸没、高压水冲洗等方法为主。这些去污方法在实际应用过程中, 部分存在去污效率低, 产生大量二次废液, 且容易受限于废金属部件尺寸等缺点^[8-11]。针对去污新技术的开发及应用, 近年来国内外专家对于激光去污和干冰去污技术的研究较多。激光去污技术凭借其无接触、无二次废物、去污效率高特点, 近几年开始应用于核电站中的管道、搁架等设备的放射性去污^[12-17]; 干冰去污技术经实验室实

验及现场示范应用, 发现其对表面油污/油漆类松散污染物的去污效果极佳, 也逐渐成为核电站放射性去污方法的选择之一^[18-20]。

放射性污染金属部件的材料和污染物种类繁多, 结构尺寸复杂, 单一的激光去污和干冰去污难以满足去污需求。因此, 本文以使放射性污染金属部件达到清洁解控或重新利用, 减少核电站废金属产生量为目的, 采用激光复合去污技术进行去污实验。对比分析其与单一干冰和激光去污的效果, 最终在核电站进行工程化应用, 以实际去污数据验证激光复合去污技术的可行性及有效性。

2 试验方法

2.1 设备与材料

本文采用的去污设备为苏州热工研究院有限公司自制的清洁解控工作站, 主要包括激光去污设备、干冰清洗机、移动三轴系统、激光测距仪、整体负压送风组、高清摄像头、可旋转多方位操作屏、实时模拟监控系统等部件, 工作站整体外观见图 1。其中, 激光去污设备为 SNPI-L200 放射性激光去污机, 干冰清洗机为 SNPI-DI-J 放射性干冰去污设备, 设备具体参数见表 1、表 2。

本次去污试验采用的材料为调质态 4140 钢, 经线切割制成 $750 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的块状样品。模拟核电站环境情况, 将其放置在高温、潮湿的环境下, 使其表面覆盖一层厚厚的锈蚀层, 如图 2 所示。

2.2 试验方案

为探究激光复合去污技术的去污效果, 本文针对锈蚀的试样表面, 采用激光去污、干冰去污和激光复合去污技术进行对比去污试验。激光去污参数选择:



图 1 清洁解控工作站

Fig. 1 Cleaning decontrol workstation

表 1 干冰清洗机参数

Table 1 Parameters of the dry ice decontamination equipment

参数	数值
干冰流量/(kg/h)	0~50
气体压力/(10^5 Pa)	2~10
干冰料斗容量/kg	25
干冰尺寸/mm	$\Phi 3 \times 3-6$, 圆柱形

激光功率 200 W, 脉冲宽度 500 ns, 重复频率 500 kHz, 移动速度 600 mm/min. 激光光斑区域为矩形, 波形选择为正交曲线形, 如图 3 所示. 干冰去污参数选择: 干冰流量 35 kg/h, 气体压力 6×10^5 Pa, 喷射间距 80 mm, 移动速度 1200 mm/min. 其中, 激光复合去污的操作流程是: 先对试样污染表面进行干冰去污, 再在同样的区域进行激光去污. 所有去污次数均为往复 2 次.

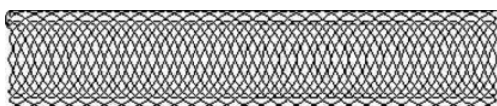


图 3 激光波形

Fig. 3 Laser waveform

去污试验结束后, 通过扫描电镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 分析试样表面及截面在去污前后的微观形貌和成分分布; 利用金相显微镜对基体材料的截面微观组织进行观察; 采用 BRUKER 白光干涉仪对去污前后的试样进行三维形貌分析, 并绘制表面轮廓曲线, 测量其表面粗糙度; 采用 Qness 显微维氏硬度计测定去污后试样截面硬度, 合理选取检测点, 观察硬度变化趋势, 施加载荷 300 g、保载时间 15 s.

3 试验结果与分析

3.1 宏观形貌

图 4 为激光去污、干冰去污及激光复合去污后试样的表面形貌. 由图可知, 干冰去污后, 区域表面黄



图 2 锈蚀试样

Fig. 2 Corroded sample

表 2 激光去污设备参数

Table 2 Parameters of the laser decontamination equipment

参数	数值
激光器类型	脉冲
输出中心波长/nm	1064
单脉冲能量/mJ	1.8
脉冲宽度/ns	10~500
功率调节范围/W	0~200
重复频率/kHz	1~4000

色的锈蚀被去除, 但存留部分黑棕色的污染物层; 激光去污后, 表面较为干净, 黄色和黑棕色的锈蚀物基本被完全去除, 但表面覆盖一层颜色较为暗淡的氧化层; 激光复合去污后, 表面锈蚀物和内部氧化层被去除, 部分表面露出金属光泽.

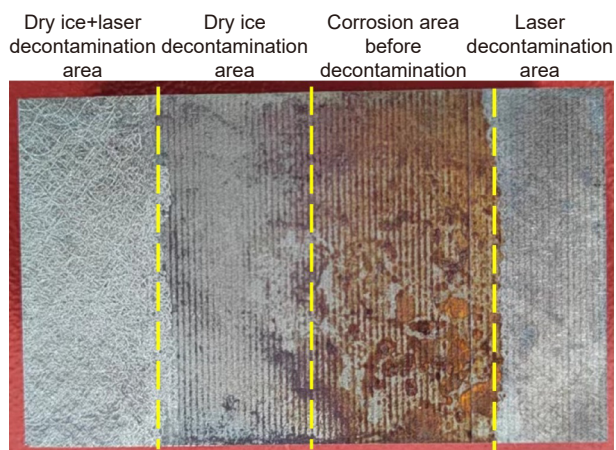


图 4 试样去污后宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of the sample after decontamination

3.2 表面形貌及成分分布

图 5 为多种去污方法去污前后试样的表面微观形貌. 由图 5(a) 可知, 基体表面覆盖一层凹凸不平、疏松多孔的不规则块状氧化物. 部分氧化物在扫描电镜中呈现亮色, 表明其不导电特性, 因此基体表面氧化物为以 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等为主的混合氧化物. 图 5(b)

中干冰去污后基体试样表面大块的亮色氧化物被去除, 但根据表面局部疏松多孔、层叠覆盖的现象, 说明表面内层的氧化物未被去除。基体表面经过激光去污后, 表面氧化物基本被去除, 表面粗糙度大幅度降低。表面出现激光波纹去污时产生的“痕迹”, 且因为激光去污过程中基体和氧化物会吸收脉冲激光的能量升温, 导致在去除氧化物的同时, 剩余的氧化物发生二次氧化, 形成小块状形态。露出的基体也会发生氧化, 从而导致表面会形成一层致密的氧化层, 如图 5(c) 所示。根据图 5(d) 中的形貌图, 可以发现经过干冰-激光去污后, 表面亮色氧化物被去除的同时, 干冰去污后遗留的内层疏松氧化物也基本被激光完全去除, 露出大部分基体, 但表面存在一些点状物, 表面整体效果良好。

图 6 为多种去污方法去污前后试样的表面成分分布。图 6(a) 中基体表面的锈蚀氧化物主要以 Fe 和 O 为主, O 含量达到 32.5 wt%。经过干冰去污后, 表面

亮色的氧化物被去除, 但仍残留部分内层氧化物。根据图 6(b) 的成分检测结果, 发现基体表面氧化物分布不均, 疏松区域的 O 含量为 27.7 wt%, 平坦区域的 O 含量为 3.9 wt%。如图 6(c) 所示, 激光去污产生的“痕迹”中存在轻微氧化现象, O 含量为 2.7 wt%; 小块状氧化物中 O 含量为 17.2 wt%, 表明其氧化程度较去污“痕迹”处深。图 6(d) 中, 经过干冰和激光去污后, 表面氧化物基本被去除, 平坦区域中成分主要以 Fe 为主, 表明此处为去污后露出的基体; 点状物中 O 含量仅为 1.7 wt%, 说明此区域仍然以基体为主, 激光去污过程中产生的氧化现象较为轻微。

3.3 截面金相组织及成分分布

图 7 为多种去污方法去污前后试样截面的金相组织。由图 7(a) 可知, 基体表层覆盖一层厚度约 45 μm 的锈蚀氧化层, 凹凸不平, 形貌疏松, 基体截面的金相组织为回火索氏体。氧化物以基体间存在部分亮色层, 且为线切割等机加工产生的硬化层。经过干冰去

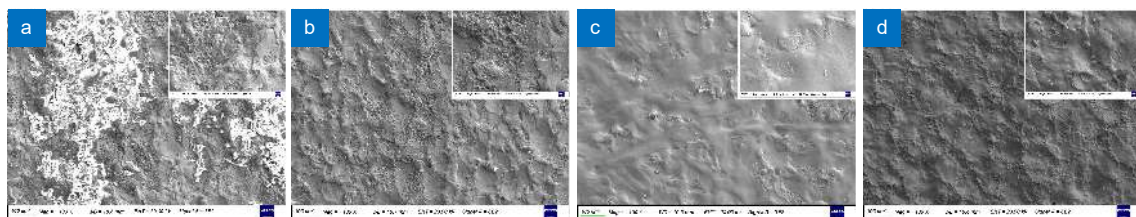


图 5 试样去污前后表面微观形貌。(a) 基体; (b) 干冰去污; (c) 激光去污; (d) 激光复合去污
Fig. 5 Surface micro-morphology of the sample before and after decontamination. (a) Substrate; (b) Dry ice decontamination; (c) Laser decontamination; (d) Laser composite decontamination

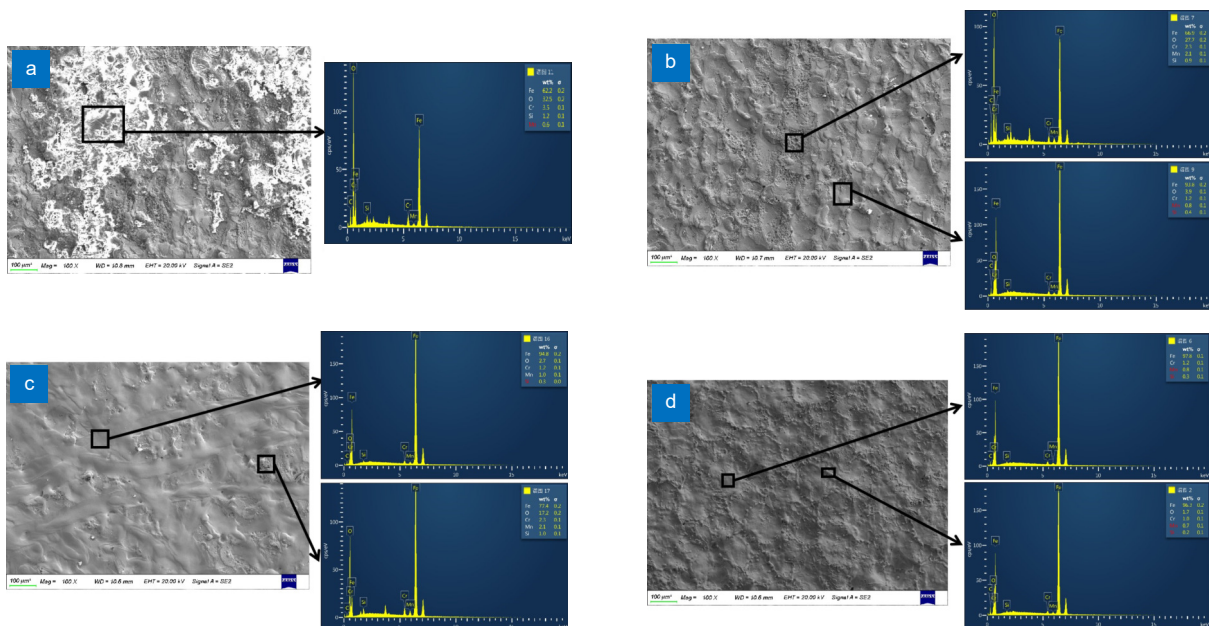


图 6 试样去污前后表面成分分布。(a) 基体; (b) 干冰去污; (c) 激光去污; (d) 激光复合去污
Fig. 6 Surface composition distribution of the sample before and after decontamination. (a) Substrate; (b) Dry ice decontamination; (c) Laser decontamination; (d) Laser composite decontamination

污后, 表层氧化物被去除, 但仍残留部分不均匀分布的内层氧化物, 其与基体间结合紧密, 导致表面较为粗糙。此外, 因为干冰去污为低温工艺, 未使基体发生相变, 金相组织仍然为回火索氏体。由图 7(c) 可知, 激光去污可使基体表面疏松的块状氧化物及与基体结合紧密的氧化物基本被去除, 表面粗糙度降低, 但表面仍然存在一些体积较小的块状氧化物。而且, 因为激光去污采用的是脉冲激光, 在基体表面单次作用时间较短, 只会使表面氧化物及表层发生热效应, 因此基体内部吸收热量有限, 难以发生相变。激光复合去污如图 7(d) 所示, 干冰去污将表面疏松氧化物去除后, 会继续在其表面进行激光去污后, 可使内层氧化物进一步吸热、振动及分解去除, 从而露出干净的基体, 表面粗糙度进一步降低。此外, 氧化物去除后, 机加工产生的硬化层也在基体表层显现。对比表面形貌及成分检测结果, 可以侧面判断激光复合去污后基体表面的点状物主要来源于原有的机

加工。

图 8 为多种去污方法去污前后试样截面的成分分布。由图 8(a) 可知, 基体试样截面表层区域深色部分为氧化物, O 含量为 30.35 wt%, 浅色区域为基体材料, 成分主要为 Fe、Cr 和 Mn; 干冰去污后, 表层深色区域厚度减少, 但仍存在较浅一层, 疏松覆盖在基体表面, 成分分布与基体相近; 激光去污后, 深色区域几乎被去除, 存在少量零星氧化物分布在基体表层, 基体成分与图 8(a,b) 中一致。经过激光复合去污后, 在试样表层未能发现深色氧化物, 表明去污效果良好; 表层存在明显分界层, 根据成分检测结果, 发现此区域和下方基体成分相同, 即说明此区域是基体机加工导致的, 未受到激光影响和发生氧化等现象。

3.4 三维形貌及表面粗糙度

图 9 为多种去污方法去污前后试样表面的三维形貌及轮廓曲线。由图 9 可知, 经过干冰去污后, 基体

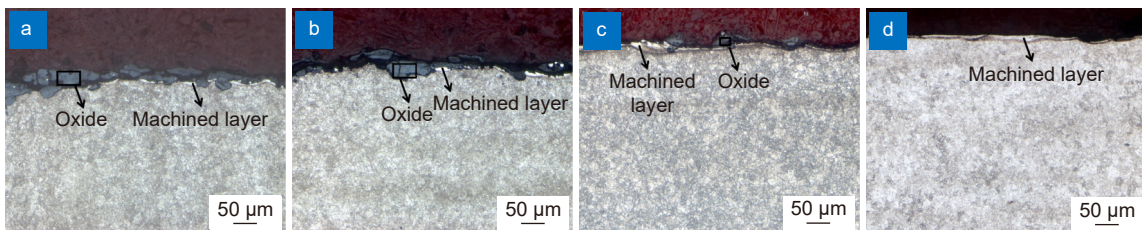


图 7 试样去污前后截面金相组织。(a) 基体; (b) 干冰去污; (c) 激光去污; (d) 激光复合去污

Fig. 7 Cross-section metallographic structure of the sample before and after decontamination. (a) Substrate; (b) Dry ice decontamination; (c) Laser decontamination; (d) Laser composite decontamination

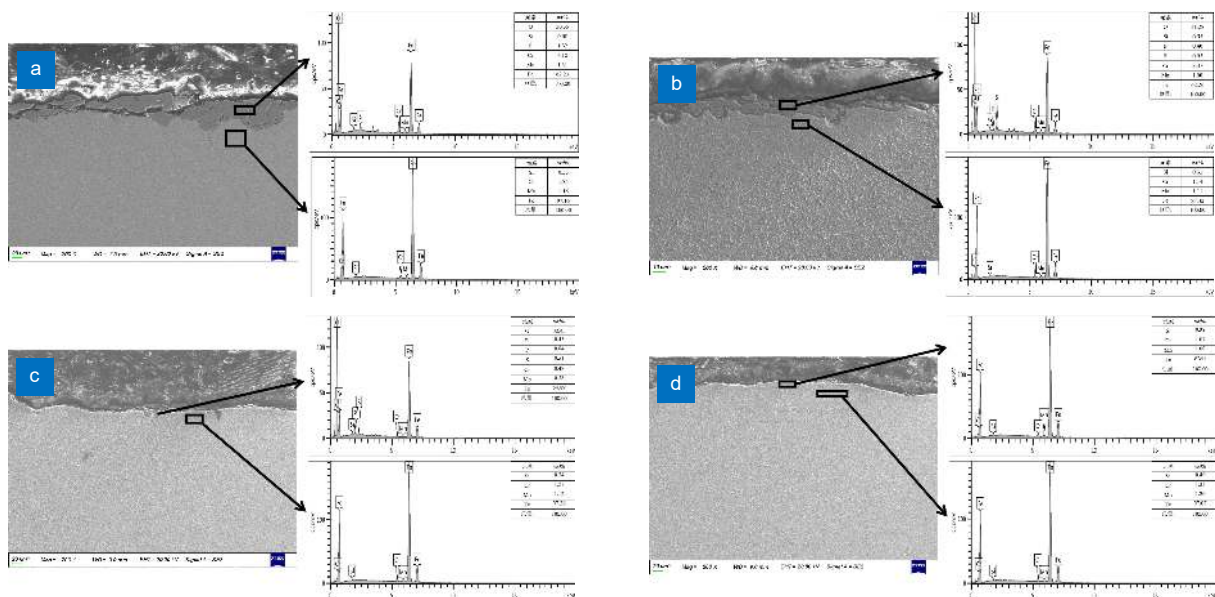


图 8 试样去污前后截面成分分布。(a) 基体; (b) 干冰去污; (c) 激光去污; (d) 激光复合去污

Fig. 8 Cross-section composition distribution of the sample before and after decontamination. (a) Substrate; (b) Dry ice decontamination; (c) Laser decontamination; (d) Laser composite decontamination

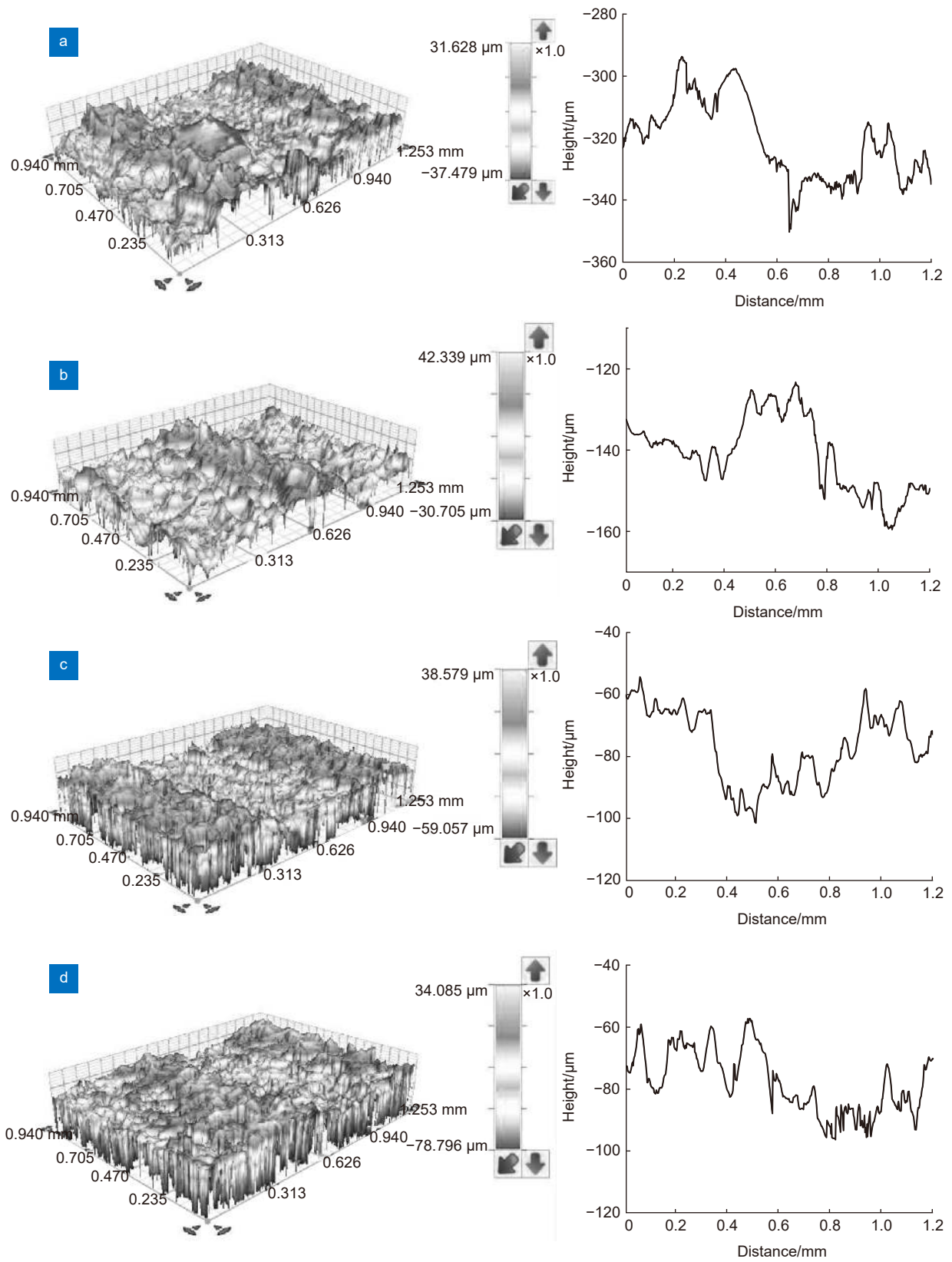


图 9 试样去污前后表面三维形貌及轮廓曲线。(a) 基底; (b) 干冰去污; (c) 激光去污; (d) 激光复合去污

Fig. 9 3D surface morphology and contour curve of the sample before and after decontamination. (a) Substrate; (b) Dry ice decontamination; (c) Laser decontamination; (d) Laser composite decontamination

表面凹凸不平的氧化物大部分被去除,但在中间区域仍然存在一些凸起物,影响其表面粗糙度;基体经过激光去污后,基体表面污染物基本被去除,激光“痕迹”较为明显,且存在一定的深度,与两边边缘处形成台阶状高度差;基体经过激光复合去污后,表面还存在一些凸起,但轮廓线波动较基体、干冰去污及激光去污表面小。图 10 为多种去污方法去污前后试样表面粗糙度值。根据白光干涉仪测试结果,去污技术可使锈蚀的试样表面粗糙度降低。其中,干冰去污后,试样表面粗糙度由基体的 $11.06\ \mu\text{m}$ 降低到 $7.22\ \mu\text{m}$,降幅达 34.7%;激光去污后,表面粗糙度较干冰去污后,为 $5.7\ \mu\text{m}$,降幅达 48.5%;经过激光复合去污后,基体表面粗糙度降低至 $4.49\ \mu\text{m}$,降幅达 59.4%。从三维形貌、表面轮廓曲线及粗糙度值可以看出,激光复合去污并未使基体表面实现完全平整,结合上文检测数据,发现这是由于基体本身机加工导致,复合去污技术已基本将基体表层锈蚀氧化物去除,露出金属基体表面。

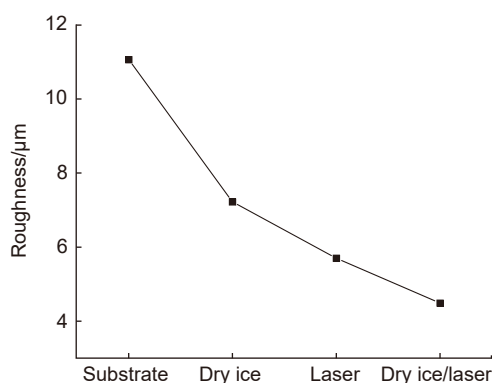


图 10 试样去污前后表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness of the sample before and after decontamination

3.5 显微硬度

为研究多种去污方法对基体材料力学性能的影响效果,对其截面硬度进行测量分析。以表层为参考,在近表层 $0.3\ \text{mm}$ 深度处水平方向选择 3 个测试点,然后以中间点为起始点,由表及里以 $0.5\ \text{mm}$ 为间距选取 5 个测量点,分析硬度变化趋势,取样点设置见图 11。

图 12 为试样近表层的硬度测试结果。由图可知,基体的硬度在 $275\sim 285\ \text{HV}_{0.3}$,干冰去污、激光去污及激光复合去污在去除基体表面氧化物的同时,对基

体截面近表层区域内的硬度值影响较小,去污后硬度值在 $270\sim 285\ \text{HV}_{0.3}$,且各测试点的硬度值变化较小,说明各类去污技术对基体表层力学性能影响甚微。

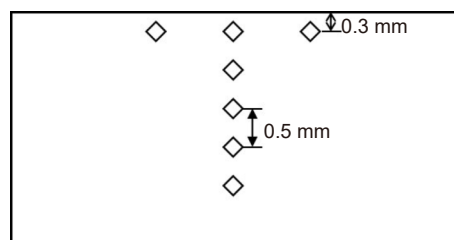


图 11 硬度测量点设置图

Fig. 11 Hardness measurement point setting diagram

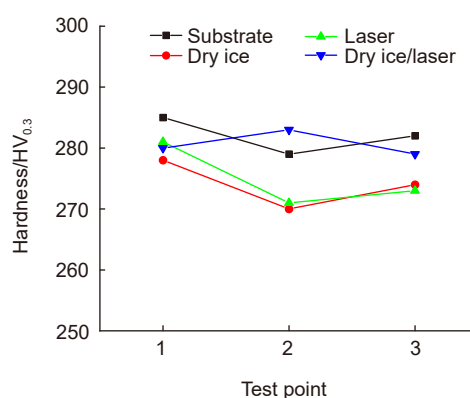


图 12 试样近表层显微硬度

Fig. 12 Microhardness of the near surface layer of sample

图 13 为试样截面深度方向上的硬度分布图。可以看出,基体整体硬度值较为均匀,在 $270\sim 280\ \text{HV}_{0.3}$ 之间变化;干冰去污、激光去污及激光复合去污后,随着深度的增加,硬度值变化趋势较小,保持在 $270\sim 285\ \text{HV}_{0.3}$ 的范围,与基体值相近,进一步表明各类去污技术对基体材料内部无损伤影响。

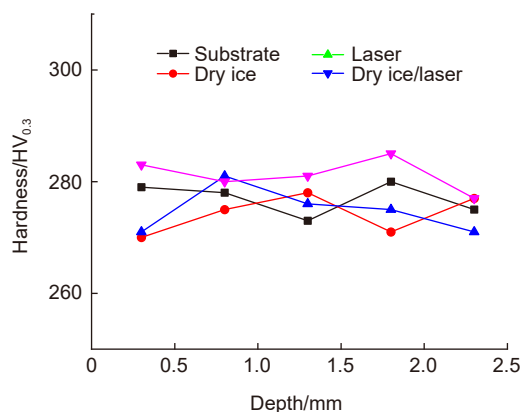


图 13 试样深度方向硬度分布

Fig. 13 Hardness distribution in the depth direction of the sample

4 去污机理分析

干冰去污是利用压缩空气将 -78°C 低温干冰颗粒高速喷出, 冲击待去污物体表面的过程。在冲击过程中, $6\sim 8\text{ kgf}$ 的空气压力使一定硬度的干冰颗粒产生较大的动能和冲击力, 对物体表面产生“喷砂”的效果, 去除松散氧化物; 同时, 低温的干冰颗粒喷射到常温环境时, 会吸收大量热量升华, 使物体表面氧化物骤冷收缩、脆化, 由于氧化物和基体间存在热膨胀系数等性能差异, 较大的温度差导致应力产生, 氧化物与基体间结合减弱, 发生剥落。此外, 干冰颗粒发生升华时, 气体体积会发生膨胀, 使氧化物受到膨胀冲击而剥落。但是, 在针对锈蚀的4140钢进行干冰去污时, 4140钢表面氧化物是多种氧化物的混合, 包括 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等, 部分氧化物比较疏松, 但内层氧化物与基体结合紧密。“喷砂”、冷缩脆化及升华膨胀等作用力对疏松的氧化物效果极佳, 但是对于结合紧密的内层氧化物去污效果一般, 未能将其去除。干冰去污的原理见图14。

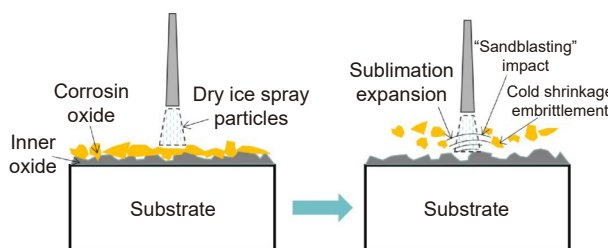


图14 干冰去污原理图

Fig. 14 Schematic diagram of dry ice decontamination

激光去污是利用高频高能激光脉冲照射工件表面, 表面污染层可以瞬间吸收聚焦的激光能量, 使表面的污染物发生瞬间蒸发或剥离, 高速有效地清除表面污染物。针对锈蚀的4140钢进行激光去污时, 表面疏松锈蚀氧化物和内层氧化物都受到脉冲激光的照射, 受热膨胀形成等离子冲击波, 相当于给氧化物提供了向外的清洗力, 当其超过氧化物内部粒子间吸附力及与基体间结合力时, 氧化物发生振动、分解和剥离。在实际激光去污中, 清洗力与激光功率密度有关, 激光功率密度越大, 基体吸收能量越多, 表面升温及受热膨胀速度越快, 导致清洗力也随之增大。本次激光去污时, 基体表层氧化物种类较多, 各自内部粒子间吸附力及与基体间结合力数值不同, 且表层锈蚀氧化物和内层氧化物在基体表面堆叠覆盖, 各部分

氧化物吸收的激光能量不同, 因此承受清洗力有所不同, 导致部分氧化物发生剥离, 部分氧化物因吸附力及结合力较强未发生剥离。此外, 局部氧化物剥离后露出基体表面, 发生二次氧化。激光去污的原理见图15。

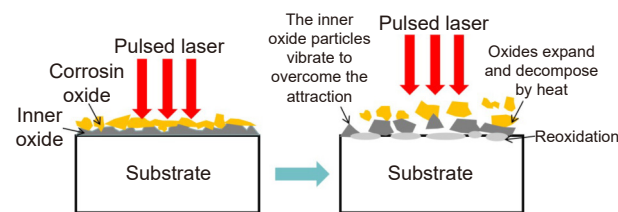


图15 激光去污原理图

Fig. 15 Schematic diagram of laser decontamination

针对锈蚀的4140钢进行激光复合去污时, 干冰去污先将其表面疏松的氧化物去除, 表面遗留一层内层结合紧密的氧化物。继续进行激光去污时, 因为基体表面堆叠覆盖的结构已经消失, 表面较为平整, 因此各部分氧化物吸收的激光能量较为充分平均, 内部升温程度较单独激光去污时要高, 因此产生的清洗力超过氧化物层内部粒子间吸附力及与基体间结合力, 使氧化物基本被去除, 露出基体表面。当然, 在激光去污过程中, 先露出的基体也会发生轻微氧化现象, 造成去污“痕迹”的产生, 但对基体表面形貌影响不大。激光复合去污的原理见图16。

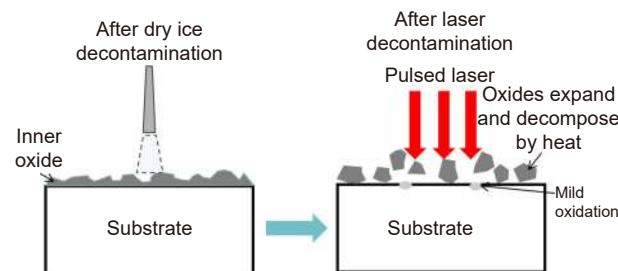


图16 激光复合去污原理图

Fig. 16 Schematic diagram of laser composite decontamination

因为本次去污对象为锈蚀物层, 表层氧化物成分较为复杂, 单一的干冰和激光去污难以将其完全去除。激光复合去污技术融合了干冰去污和激光去污的优势, 并基于单一去污技术的去污效果, 合理安排两者的去污顺序, 针对表层疏松氧化物层和内层结合紧密氧化物层进行针对性去污, 通过干冰的“冲击+热胀冷缩”和激光的“热+剥离”效应, 完全去除基体表面锈蚀物层。

5 放射性去污应用

基于激光复合去污技术的试验效果, 在某核电站检修车间, 采用激光复合去污技术对沾污的电机叶轮进行去污工作。去污前, 将电机叶轮采用红塑料布包裹, 放在搭建好的负压空气棚 (SAS) 内, 并连接好核空气净化小车。去污开始后, 先采用干冰去污机对电机叶轮整体进行往复 2 次干冰去污; 然后采用激光去污设备整体再进行往复 2 次激光去污, 局部热点区域增加去污次数。去污前后, 通过 MPR200 辐射测量仪和 6150 AD5 剂量率仪 (配备 AD17 探头) 测量电机叶轮表面剂量率及沾污水平。而且在去污过程中, SAS 进口处和核空气净化小车的尾气出风口位置布置放射性粉尘、气溶胶监测装置, 装置型号为 ABPM203M。

本次去污作业以沾污水平的去污因子和去污效率来表征激光复合去污效果。去污因子指的是去污前污染物表面放射性沾污水平与去污后放射性沾污水平之比; 去污效率指的是经过去污后去除的沾污水平占原来总沾污水平的比例。去污因子越高, 去污效率越接近 100%, 说明去污效果越好。而去污效果的最终评判标准是以满足清洁解控指标为准。核电站针对固体废物的清洁解控指标: 表面沾污水平 $<0.4 \text{ Bq/cm}^2$, 表面接触剂量率 $<40 \text{ nSv/h}$ 。

表 3 为电机叶轮经激光复合去污前后的污染水平及表面剂量率的测量结果。由表可知, 电机叶轮经过干冰去污后, 表面沾污水平和剂量率大幅度降低, 但未能达到清洁解控标准。继续进行激光去污后, 去污因子最高达到 28.9, 去污效率达 96.5%, 使电机叶轮上表面各部位沾污水平均 $<0.4 \text{ Bq/cm}^2$, 表面接触剂量率均 $<40 \text{ nSv/h}$, 达到核电站固体废物清洁解控标准。图 17 为清洁解控后电机叶轮实物图。



图 17 清洁解控电机叶轮

Fig. 17 Clean decontrol motor impeller

6 结论

本研究采用干冰去污、激光去污及激光复合去污技术, 对锈蚀的 4140 钢进行去污试验。通过对去污效果和试样性能的检测分析, 得到如下结论:

1) 激光复合去污可以将 4140 钢表面的锈蚀层和氧化物完全去除, 露出基体的金属表面, 只存在少数点状物, O 含量由基体的 32.5 wt% 降低到 1.7 wt%, 去污效果优于单一的干冰去污和激光去污技术;

2) 激光复合去污后, 锈蚀基体的表面粗糙度达到 $4.49 \mu\text{m}$, 较基体 ($11.06 \mu\text{m}$) 降低 59.4%; 基体截面金相组织未发生改变, 仍为回火索氏体; 截面成分分布及硬度值与去污前基体标准值相近。表明激光复合去污未对基体产生损伤影响;

3) 采用试验确定的激光复合去污技术参数对核电站沾污电机叶轮进行去污作业后, 电机叶轮各部分的沾污水平均 $<0.4 \text{ Bq/cm}^2$, 表面接触剂量率均 $<40 \text{ nSv/h}$, 达到核电站固体废物清洁解控标准。

本研究确定的激光复合去污技术可为核电站内放射性沾污部件的去污提供新方法, 减少核电站固体废物的储存量, 实现废物最小化。后续, 可在复合去污

表 3 去污前后污染水平及表面剂量率测量结果

Table 3 Measurement results of pollution level and surface dose rate before and after decontamination

电机叶轮	去污前		干冰去污后		激光去污后		去污因子	去污效率
	沾污水平 (Bq/cm^2)	表面剂量率 (nSv/h)	沾污水平 (Bq/cm^2)	表面剂量率 (nSv/h)	沾污水平 (Bq/cm^2)	表面剂量率 (nSv/h)		
根部	6.30	4790	0.92	1510	0.32	29.9	19.7	94.9%
叶片	5.78	3760	0.8	1270	0.20	10.0	28.9	96.5%
轴心	5.13	3420	0.83	1390	0.26	31.7	19.7	94.9%

的自动化、工艺标准化及去污评价方面开展深入研究, 不断扩大其应用范围。

参考文献

- [1] Chen C. Study on the management and disposal of the solid reprocessing radioactive waste[J]. *China Nucl Power*, 2020, **13**(1): 104–108.
陈诚. 后处理放射性固体废物管理及处置有关问题研究[J]. *中国核电*, 2020, **13**(1): 104–108.
- [2] Zhang W H, Zhang Y M, Guo H F, et al. Practice and discussion on management of radioactive solid waste in nuclear power plant[J]. *Nucl Saf*, 2022, **21**(1): 19–25.
张蔚华, 张一民, 郭海峰, 等. 运行核电厂放射性固体废物管理实践与探讨[J]. *核安全*, 2022, **21**(1): 19–25.
- [3] Zhang G, Xiong X, Ren L L, et al. Reflections and suggestions on radioactive waste management in nuclear power plants[J]. *Nucl Saf*, 2022, **21**(1): 104–111.
张根, 熊晓, 任丽丽, 等. 核电厂放射性废物管理策略研究[J]. *核安全*, 2022, **21**(1): 104–111.
- [4] Pi Y X. Corrosion and protection of the equipment and piping of the incineration for radioactive solid wastes[J]. *China Nucl Power*, 2016, **9**(3): 279–285.
皮煜鑫. 放射性固体废物焚烧设备及工艺管路腐蚀与防护[J]. *中国核电*, 2016, **9**(3): 279–285.
- [5] Jiang L, Wang Z, Luo J S. Practice of radioactive solid waste minimization in a nuclear power plant[J]. *Radiat Prot Bull*, 2020, **40**(2): 35–39.
蒋磊, 王昭, 罗劲松. 某核电厂放射性固体废物处理最小化实践[J]. *辐射防护通讯*, 2020, **40**(2): 35–39.
- [6] Yao Z M, Zhu J R, Feng J C, et al. Practice and exploration of radioactive solid waste minimization in Yangjiang Nuclear Power Plant[J]. *Radiat Prot*, 2021, **41**(2): 151–156.
姚志猛, 朱剑锐, 冯金才, 等. 阳江核电厂放射性固体废物最小化实践和探索[J]. *辐射防护*, 2021, **41**(2): 151–156.
- [7] Gonçalves M F S, Petraconi Filho G, Couto A A, et al. Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste[J]. *J Environ Manage*, 2022, **311**: 114895.
- [8] Wei X, Xu L C, Qiu Y S, et al. Study on chemical and ultrasound Co-removal of uranium radioactive contamination[J]. *At Energy Sci Technol*, 2023, **57**(S): 18–25.
魏鑫, 徐乐昌, 仇月双, 等. 化学与超声协同去除铀放射性污染研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, **57**(S): 18–25.
- [9] Liao N B, Mao L, Li B. New technology for pretreatment of radioactive chemical decontamination waste liquid in nuclear power plants[J]. *China Resour Compr Util*, 2019, **37**(6): 134–136.
廖能斌, 毛莉, 李斌. 核电厂放射性化学去污废液预处理新技术[J]. *中国资源综合利用*, 2019, **37**(6): 134–136.
- [10] Li Y X, Jia J Z. Decontamination practice of radioactive contaminated hydraulic torsion wrenches in NPP[J]. *Radiat Prot*, 2020, **40**(3): 223–230.
李玉鑫, 贾建召. 核电站放射性污染液压扭力扳手的去污实践[J]. *辐射防护*, 2020, **40**(3): 223–230.
- [11] Wang H Z, Zhang K, Wei S C, et al. Research on cleaning technology of radioactive waste in oil and gas drilling[J]. *Petro Chem Equip*, 2021, **24**(10): 20–23, 19.
王焕志, 张凯, 魏世超, 等. 废弃放射性油气管道清洗技术的研究[J]. *石油和化工设备*, 2021, **24**(10): 20–23, 19.
- [12] Zhao W, Cao J J, Wang S, et al. Study on laser decontamination technology for metal scraps with radioactively contaminated surfaces[J]. *Nucl Power Eng*, 2021, **42**(5): 250–255.
赵苑, 曹俊杰, 王帅, 等. 放射性表面污染金属废物激光去污工艺研究[J]. *核动力工程*, 2021, **42**(5): 250–255.
- [13] Chen G X, Lu H F, Zhao Y, et al. Effect of power on laser cleaning result of stainless steel surface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(12): 1217–1224.
陈国星, 陆海峰, 赵滢, 等. 激光功率对不锈钢表面清洗效果影响的研究[J]. *光电工程*, 2017, **44**(12): 1217–1224.
- [14] Li X G, Huang T T, Chong A W, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 340–344.
- [15] Duan C H, Chen X K, Luo X P. Application prospect of laser cleaning in petrochemical field[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(11): 200030.
段成红, 陈晓奎, 罗翔鹏. 激光清洗在石化领域的应用前景浅析[J]. *光电工程*, 2020, **47**(11): 200030.
- [16] Papanikolaou A, Tserevelakis G J, Melessanaki K, et al. Development of a hybrid photoacoustic and optical monitoring system for the study of laser ablation processes upon the removal of encrustation from stonework[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(2): 190037.
- [17] Ren M X, Guan P W, Xu P, et al. Research on cleaning technology of electrical insulators by MOPA pulsed fiber laser[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(5): 648–652.
任茂鑫, 关珮雯, 徐鹏, 等. MOPA脉冲光纤激光清洗电力绝缘子的工艺探索[J]. *激光技术*, 2022, **46**(5): 648–652.
- [18] Wang J Q. Study on decontamination technology of contaminated using dry ice on the surface of nuclear facilities (sampling cabinets)[D]. Hengyang: University of South China, 2020. <https://doi.org/10.27234/d.cnki.gnhuu.2020.000996>.
王见强. 核设施(取样柜)表面污染干冰去污技术研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
<https://doi.org/10.27234/d.cnki.gnhuu.2020.000996>.
- [19] Li Y, Tan Z Y, Zhang D, et al. Experimental study on decontamination of surface radioactivity by dry-ice blasting[J]. *Radiat Prot*, 2018, **38**(2): 142–147.
李烨, 谭昭怡, 张东, 等. 干冰喷射去除表面放射性污染技术研究[J]. *辐射防护*, 2018, **38**(2): 142–147.
- [20] He Y F, Wang C, Ding S B. Application of dry ice blasting technology in avionics products[J]. *Avion Technol*, 2023, **54**(4): 62–67.
何云飞, 王晨, 丁诗炳. 干冰清洁技术在航电产品中的应用[J]. *航空电子技术*, 2023, **54**(4): 62–67.

作者简介



魏少翀 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事激光加工设备及工艺的研究。

E-mail: weishaochong@cgnpc.com.cn



【通信作者】陆海峰 (1992-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事激光、干冰等去污工艺及性能研究。

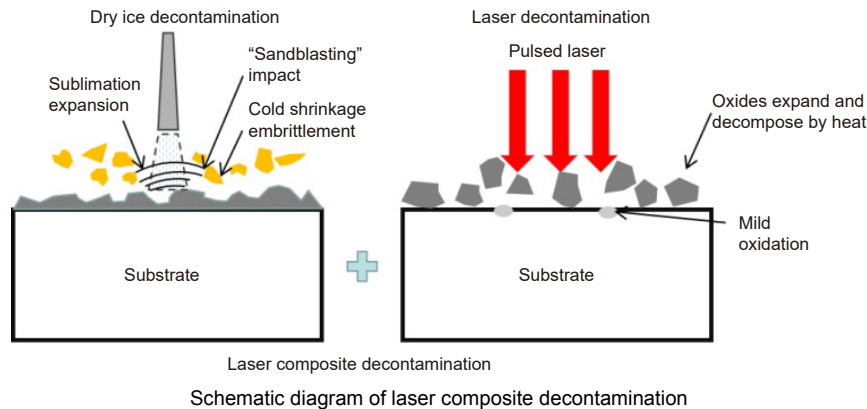
E-mail: haifenglu1992@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on laser composite decontamination technology of radioactive contaminated metal parts in nuclear power plant

Wei Shaochong^{1,3}, Liu Shengyong², Lu Haifeng^{1,3*}, Zhang Wenli², Li Xinxian⁴,
Nie Jizu², Chen Guoxing^{1,3}



Overview: In order to reduce the pressure on nuclear power plants to store and dispose of radioactive solid waste, waste minimization has become the mainstream development concept. As a new decontamination technology in the field of nuclear energy, laser decontamination and dry ice decontamination solve the problems that some traditional decontamination methods are difficult to deal with. However, based on the diversity of radioactive solid waste types and pollutants in nuclear power plants, a single decontamination scheme is difficult to meet the demand. In this work, laser composite decontamination was carried out on the surface of corroded 4140 steel, and the decontamination effect of a single laser and dry ice was compared to explore its decontamination mechanism. By testing the microstructure, composition distribution, metallographic structure, and three-dimensional morphology of the matrix sample, the variation trend of surface roughness and microhardness was analyzed to determine the composite decontamination effect. Finally, the engineering verification was realized in the nuclear power plant. The main results show that: 1) Laser composite decontamination can completely remove the rust layer and oxide on the surface of 4140 steel and expose the metal surface of the matrix. Only a few point objects exist. The oxygen content is reduced from 32.5 wt% of the matrix to 1.7 wt%, and the decontamination effect is better than that of single dry ice decontamination and laser decontamination technology; 2) After laser composite decontamination, the surface roughness of the corroded substrate reached 4.49 μm , which was 59.4% lower than that of the substrate (11.06 μm). The metallographic structure of the matrix cross-section did not change, and it was still tempered sorbite. The composition distribution and hardness value of the cross-section are similar to the standard value of the matrix before decontamination. It shows that the laser composite decontamination has no damaging effect on the substrate; 3) The laser composite decontamination technology parameters determined by the test were used to decontaminate the contaminated motor impeller of the nuclear power plant. After decontamination, the average contaminated sewage of each part of the motor impeller was less than 0.4 Bq/cm², and the surface contact dose rate was less than 40 nSv/h, which reached the solid waste cleaning and control standard of the nuclear power plant. Laser composite decontamination technology can become a new technology to minimize waste in nuclear power plants and will be widely used in the future.

Wei S C, Liu S Y, Lu H F, et al. Research on laser composite decontamination technology of radioactive contaminated metal parts in nuclear power plant[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(5): 240056; DOI: 10.12086/oe.2024.240056

¹Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215004, China; ²Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China; ³National Engineering Research Center for Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou, Jiangsu 215004, China; ⁴Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500, China

* E-mail: haifenglu1992@163.com