文章编号:1001-5078(2025)01-0052-08

· 激光应用技术 ·

核电厂金属放射性表面激光去污数值模拟研究

刘忠凯,李 磊,阎丽静 (深圳中广核工程设计有限公司,广东 深圳 518000)

摘 要:本文对核电厂常用的不锈钢金属放射性表面的激光去污效果了数值模拟分析,研究结 果显示,放射性部件去污是通过去除材料表面致密氧化层实现的。通过模拟金属材料双层结 构和激光去污高斯热源,建立了激光去污有限元模型。分析结果表明,连续激光由于热累积效 应明显,不适用于放射性表面去污。为评估去污有效性和适用性提出去污阈值和损伤阈值指 标,在考虑去污效果的同时需保证基材不发生熔融。根据脉冲激光去污数值模拟研究,激光功 率和扫描速度对烧蚀深度和基材温度影响基本呈线性关系,但在热累积效应增强过程中温度 变化速率会上升,不同搭接率对去污表面形貌影响较大。

关键词:激光技术;放射性去污;数值模拟;激光参数;表面形貌

中图分类号:TN249;TL944 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.008

Numerical simulation study on laser decontamination of radioactive metal surface in nuclear power plants

LIU Zhong-kai, LI Lei, YAN Li-jing

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In this paper, the effect of laser decontamination of the oxidized layer on the surface of stainless-steel metals commonly used in nuclear power plants is analyzed by numerical simulation, and the results show that decontamination of radioactive components is achieved by removing the dense oxidized layer on the surface of the material. A finite element model of laser decontamination is established by simulating the double-layer structure of the metal material and the Gaussian heat source of laser decontamination. The analytical results show that the continuous laser is not applicable to radioactive surface decontamination due to the obvious thermal accumulation effect. In order to evaluate the effectiveness and applicability of decontamination, the decontamination threshold and damage threshold indicators are proposed, and it is necessary to ensure that the substrate does not melt while considering the decontamination effect. According to the simulation study of pulsed laser decontamination, the effects of laser power and scanning speed on the ablation depth and substrate temperature are basically have a linear relationship on the ablation depth and temperature of the substrate, but the rate of temperature change increases during the enhancement of thermal cumulative effect, and the different lap rates have a greater impact on the decontamination surface morphology.

Keywords: laser technology; radioactive decontamination; numerical simulation; laser parameters; surface morphology

1 引 言

随着核电厂运行时间的增加将产生大量有放射

性污染的金属部件,放射性部件检修需通过各类去 污方法使其表面放射剂量降到标准范围内,以降低

收稿日期:2024-05-12;修订日期:2024-06-23

作者简介:刘忠凯(1989-),男,硕士,工程师,主要从事核电厂新型放射性去污方法研究工作。E-mail:498194723@ qq. com

检修人员受到的放射性伤害。随着去污领域新型技术的不断引入,高效率、大去污因子(DF)的新型去 污技术正逐渐成为传统去污技术的替代或补充方 案,激光去污技术具有二次废物少、去污效率高、去 污因子大和程控性强等特点,正在逐步应用在核电 厂放射性金属表面污染的去除领域。

激光去污主要通过激光烧蚀快速去除表面材质 的方式实现放射性剂量的降低,目前激光对金属表面 去污机理的研究主要以实验为主。Reinecke 等使用 150 W 功率的手动激光清洗器对核电厂常用的金属 表面(如不锈钢)进行实验,在不同表面上实现了90~ 100 % 的清洗率^[1]。Costa, Priscila 等使用 1064 nm 的 Nd:YAG 纳秒激光,在4 种聚合物和6 种金属上进行 照射,强度范围从1~10 J/cm²,提出指数衰减模型来 表示清除过程,根据效率和产量,5 J/cm² 被证明是最 有效的照射条件^[2]。Qian Wang 等人综述了放射性 去污的激光表面处理机理及激光工艺参数对去污厚 度、去污因子和去污效率的影响,目前对激光去污微 观机理和对表面性能研究较少,特别是激光与放射性 相互作用需进一步研究^[3]。L. Carvalho 等人通过对 氧化的304不锈钢样品进行激光烧蚀,通过光电质谱 的方法评估氧化物去除效果,结果表明去污效率高达 97 %^[4]。Hu Yang 等人采用合金 690 作为试验基体, 通过模拟核电厂一回路水化学条件,制备出非放射性 试样,并用 SEM 和 XRD 对试样进行表面形貌、元素 组成和相组成分析,研究激光净化前后的变化,结果 表明在相同设备条件下,无重叠点过程的净化效率比 重叠点过程高10倍^[5]。招观荣通过纳秒脉冲激光清 洗 0235 碳钢表面放射性污染漆层实验,研究不同激 光参数对清洗效果的影响,给出烧蚀效应和热应力效 应下较优的工艺参数^[6]。王优等通过设计正交试验, 探究了纳秒光纤激光清洗过程中工艺参数对 316L 不 锈钢表面粗糙度及去污厚度的影响,实验结果给出了 316L 不锈钢激光去污最佳工艺参数^[7]。赵菀等人搭 建了激光去污实验装置,以核电厂控制棒水池贮存架 底板为对象开展一系列去污工艺试验,试验结果表 明,去污深度达到10 µm 后,表面污染水平可达清洁 解控水平^[8]。

目前核电厂金属放射性表面的激光去污研究主要以实验研究为主,由于实验所需的放射性样片管理严格、成本较高,通过数值模拟分析方法对激光去

污过程规律研究具有重要意义。本文通过对核电厂 常用不锈钢金属放射性表面氧化层进行激光去污进 行数值模拟研究,分析了不同激光参数对去污效果 的影响,旨在为核电厂一回路不锈钢金属放射性污 染的激光去污提供理论指导和工艺参数参考。

2 核电厂放射性氧化层结构

随着核电站运行时间的累积,与一回路高温高 压冷却水接触的金属材料表面会形成放射性污染, 常见的放射性污染分为松散污染和固化性污染,松 散污染使用人工擦拭、常压水清洗等方式可以高效 的去除,该类型污染不在本文讨论范围内;固化性污 染主要以材料表面形成的致密氧化层形式存在,氧 化层主要成分为不溶腐蚀性产物(CRUD),使用常 规去污手段难以达到去除效果。对于压水堆 (PWR)核电站不锈钢材料由于抗辐照性能良好而 选被大量选用,常见的不锈钢材料主要为 304L 和 316L,氧化层的 CRUD 主要以富 Cr³⁺氧化物 Cr₂O₃ 或 FeCr₂O₄ 形式存在^[9]。放射性核素如⁶⁰Co,⁵⁸Co, ⁵⁴Mn等会通过扩散沉积的方式渗入到氧化层中,活 化的氧化层会形成具有放射性的污染层^[10-11]。

通常情况下,放射性污染的深度在 1~10 μ m 表层中存在不小于 98 % 放射性,在 10~40 μ m 表 层中存在小于 2% 放射性,在 40~50 μ m 表层中存 在小于 0.1% 放射性,去污系数达到 5~50 DF 可实 现大部分污染物的去除,在 1~10 μ m 材料表层中 放射性活度随着氧化层深度的增加会逐渐递减,高 浓度放射性介质主要集中在 1~5 μ m 深度范围内, 去除深度达到 5~10 μ m 范围内即可实现大部分放 射性物质去除,以满足检修过程中人员防护 要求^[12-13]。

综上,核电厂放射性污染金属材料的去污主 要通过去除材料表面一定深度表面氧化层的方式 实现,如图1所示,可通过建立金属材料表面的双 层模型对去污机理进行研究分析。为保证材料的 复用性能,去除表面污染层的同时需保证不会破 坏材料基材本身尺寸和物性,本文提出损伤阈值 和去污阈值去污评价指标。损伤阈值为烧蚀深度 ≤ 10 μm,即未对基材形成烧蚀效应,同时基材温 度未达到其熔融温度;去污阈值为烧蚀深度达到 5~10 μm,可以有效的去除表面氧化层中大部分 的射性核素。



Fig. 1 Laser decontamination theory

3 激光烧蚀去污原理及理论模型

3.1 激光烧蚀去污原理

激光烧蚀去污是将高能激光束聚焦到污染金属 表面,在高能能量的作用下材料表面温度瞬时达到 材料汽化温度形成激光烧蚀,氧化层由固相直接转 化为气相,沉积在表面氧化层中的放射性核素随着 材料的汽化蒸发到空气中,在空气中冷却形成固体 颗粒剥离材料表面,实现对表面放射性物质的去除。 3.2 热源及传热模型

研究表明激光热源模型中,热源一般都停留在 表面,采用高斯面热源分布更切合实际应用。本文 采用高斯分布的表面热源以能量密度形式加载到材 料表面^[14-15]:

$$I(x,y,z,t) = \alpha \frac{P}{\pi r^2} \times \exp\left[-2 \frac{(x-vt)^2 + y^2}{r^2}\right]$$
$$\exp\left[-2 \frac{(t-\tau)^2}{\tau^2}\right] \delta(z) \qquad (1)$$

式中,I(x,y,z,t)表示激光热源功率密度; α 表示材 料吸收系数;v表示激光扫描速度;r表示激光光斑 半径; τ 为脉宽;P为激光功率。 $\delta(z)$ 项为激光对材 料的冲击函数。

激光去污过程中的热量传递遵循基于傅里叶定律 和能量守恒的热传导方程,在不计内部热源的条件下 其在直角坐标系下的瞬态三维热传导控制方程为:

$$\kappa\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$
(2)

式中,κ为材料的热传导系数;T为材料的瞬时温度; t为热传导时间;ρ、c为材料的密度和比热容。

3.3 边界条件

高能激光照射到材料表面会产生烧蚀效应,烧 蚀会导致材料汽化,从而会产生热流损失,激光照射 区域表面热源边界条件^[16]:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = I - q_{\text{evap}} \tag{3}$$

其中, I 为激光光照强度; qevap 为材料汽化产生的热

流损失; qevap 通过热对流方式散失:

$$q_{\rm evap} = h_{\rm evap} (T_v - T) \tag{4}$$

式中, *T*_e 为材料汽化温度; *h*_{evap} 为汽化过程中对流 换热系数,由于激光烧蚀的汽化过程都是瞬间完成 的,在材料温度 *T* 达到 *T*_e 后会快速汽化蒸发,换热 系数迅速增加,以保证激光烧蚀过程中材料温度不 会超过其汽化温度。

待去污工件与空气接触表面采用对流换热边界 条件:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0)$$
⁽⁵⁾

其中, *n* 为表面法线方向; *T*₀ 为环境初始温度,取 20 ℃。 工件与工作台接触表面采用绝热边界条件:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \tag{6}$$

模型中的初始温度为环境温度,即:

$$T(x, y, z, 0) = T_0$$
 (7)

4 数值结果与分析

4.1 有限元模型建立

通过有限元模型模拟激光热源加载到材料表面 进行数值分析,分析模型假设如下:

1)待去污工件的氧化层和基材材料均为连续 且各向同性;

 2)在激光烧蚀去污过程中不考虑等离子体对 入射激光的屏蔽效应;

3)氧化层和基材层之间为完全热传导,不考虑 热量从氧化层表面传至基材的弛豫时间。

建立三维双层模型,如图2所示,第一层为氧化 层,第二层为材料基体,z方向为激光入射方向,垂直于 工件表面(z轴方向),x方向为工件长度方向,y方向为 工件宽度方向,模型(0,0,0)点为氧化层与基材接触面 的中心点。基体采用1 mm×0.5 mm×0.5 mm尺寸 的的 304L 不锈钢材料,氧化层采用10 μm 厚度的富 Cr³⁺氧化物材料。激光入射光源采用表面热源形式 加载到氧化层表面,并沿工件长度方向(x轴方向)移 动模拟激光去污过程中的激光光源移动。

4.2 网格无关性验证

为消除网格质量和数量对模拟分析结果带来的 误差,需要进行网格无关性验证。本文采用4种不同 的网格尺寸对数值分析结果进行对比,加载参数选取 典型脉冲激光,激光功率40W,扫描速度600 mm/s, 频率20kHz,结果如表1所示。



图 2 有限元双层模型示意图

Fig. 2 Finite element double-layer model

表1 网格无关性验证

m 1 1	C • 1	· 1 1 .	1.1
lah l	-rid	independent	row validation
rap. r	Onu	macpenaem	iow vanuation

Number of grids	Max temperature of substrate∕℃	Max ablation depth∕mm
9511	1217	6. 73
17829	1232	6. 94
26877	1274	7.01
33526	1275	7.01

随着网格数量的增加,基材的温度最大差值为 58 ℃,偏差为4.8 %,烧蚀深度最大差值为0.28 mm, 偏差为4.2 %,偏差均小于模拟分析允许偏差5 %, 综合考虑仿真精度和计算时间,选用第3个网格模 型,网格总数量26877,节点数10115。

4.3 加载和模拟

激光热源通过面热源的形式加载到材料表面, 热源采用高斯分布模型,通过与脉冲函数结合模拟 高频激光脉冲加载场景。





模型计算前需指定激光加载和材料热物性参数,模型设置参数见表2^[16-17]。

激光烧蚀过程中表面材料会产生汽化损失,损失的热量为公式(4)中 q_{evap},材料的损失速率 V_{loss}与材料的汽化潜热和密度有关。激光加载边界上使用基于二次拉格朗日坐标的网格变形模拟材料去除,加载

处界面的法向网格变形速率 V_m 等于材料损失速率 V_{loss},从而获得激光烧蚀后的界面,使用公式表示为:

$$V_{\rm loss} = V_{\rm m} = \frac{q_{\rm evap}}{q_v \cdot \rho} \tag{8}$$

 q_{v} 表示汽化潜热, ρ 为材料密度。

表2 数值分析参数表

Parameter	Value and units	Definition
P *	10 W	Laser Power
r	0.03 mm	Laser spot radius
v^*	600 mm/s	Scanning speed
T_v	4000 J℃	Vaporization temperature of oxide layer
T_{f}	1425 J℃	Melting temperature of substrate
q_v	9374 J⁄g	Latent heat of vaporization
f	20 kHz	Frequency
s	0.3	Duty cycle
ρ	5. 22 g/cm ³	Density of oxide layer

*为可调变量。

4.4 模拟结果分析

4.4.1 连续激光去污适用性分析

根据能量输出方式的不同,激光可以分为连续 激光和脉冲激光,连续激光在一定时间内连续输出 能量,能量可以平稳输出,主要适用于激光加工、激 光切割等领域。脉冲激光是按照一定频率在短时间 内高能量输出,对工件的热影响较小,适用于精密加 工和表面处理领域。对于激光去污,需要在不损伤 基材的情况下尽可能的去除表面氧化层,连续激光 相较脉冲激光具有输出稳定、效率高的特点,但其热 累计效应较强,需对其在激光去污领域应用的适用 性进行分析。

选取典型参数 P = 5,10,15,20 W,v = 600 mm/s, 其余参数按表 1 选取,在(0,y,z) 剖面的温度场和烧 蚀深度影响如图 4 所示。由图可知,连续激光去污 过程中随着激光功率的增加其烧蚀深度呈线性增 加,在激光功率达到 5 W 时烧蚀深度较小,无法达 到去污效果,当激光功率达到 10 W 和 15 W 时烧蚀 深度已经大于 5 μ m,此时可以达到一定的去污效 果,在激光功率达到 20 W 时烧蚀深度达到 11.09 μ m,已经超过氧化层厚度,此时基材已达到 损伤阈值发生烧蚀损伤。连续激光的功率在 10 W 和 15 W 可以控制在去污阈值(5~10 μ m)范围内, 此时基材没有发生直接烧蚀效应,但由于热传导和 热累积效应可能发生熔融,发生熔融后会改变基材 的材料性能。激光功率 10 W 和15 W时,氧化层和 基材温度变化如图5,其中基材温度取(0,0,0)点温 度变化,氧化层温度取与基材温度取(0,0,0)点温 度变化,氧化层温度取与基材温度点 z 方向对应的 表面点温度。氧化层在高能激光加载的瞬时汽化, 其温度只与材料的汽化温度和汽化潜热有关,功率 变化并不会导致氧化层最高温度变化,功率在 10 W 和 15 W 时其氧化层温度曲线基本重合。由于热导惯 性,基材层温度升高相对氧化层会有所延时,其温度数 值与热流密度有关,不同激光功率的基材层温度变化 差异较大。在图5 中基材的最高温度都超过其熔融温 度(1425 ℃),即功率达到 10 W 和 15 W 时基材均会产 生熔融,超过损伤阈值,从而破坏基材特性。



综上,连续激光虽然具有输出稳定的特性,但由 于连续激光在去污过程中容易形成热累积效应,在 对氧化层进行高温烧蚀的过程中对基材热影响较 大,在能够满足去污阈值的情况下难以保证不超过 材料的损伤阈值,所以连续激光并不适用于放射性 去污场景。

4.4.2 激光功率对激光去污影响

激光功率是激光去污过程中的重要参数,使用脉 冲激光时由于激光热源是离散加载,产生的热累积效 应较小,可以使用更高的功率获取更大的激光烧蚀深 度,同时对基材的热影响较小。图6为激光功率分别 为30 W、40 W 和 50 W,扫描速度为 600 mm/s,激光 重复频率为 20 kHz 时,在(0,y,z)剖面的最大烧蚀深 度和温度场。





图 7 表示不同功率下基材(0,0,0)点随时间的 温度变化,结合图 6,在 20 kHz 频率下,激光功率在 30 W 和40 W 都可以达到去污阈值的同时不会使得 基材达到熔融温度,在激光功率达到 50 W 时基材 发生熔融,超过损伤阈值。可见使用脉冲激光可以 在满足损伤阈值情况下达到去污阈值,更适用于激 光去污工况。由图 7 可以观测在激光功率提升的同 时,温度最高点附近的温度波动会加大,这主要时由 于热传导和热累积效应的增加导致的^[18]。

图 8 为不同激光功率条件下基材(0,0,0)点的 最高温度和(0,y,z) 剖面的最大烧蚀深度的变化趋势。在使用脉冲激光烧蚀过程中基材温度和烧蚀深 度随着激光功率增加基本呈线性增加趋势,但基材 温度随着激光功率的增加其数值会加速上升,这主要是由于随着激光功率增加,其烧蚀深度增加,热传导对基材的影响增强,温度上升速度加快。



图7 不问微九功半下茲符 值及的变化 Fig. 7 Temperature change of substrate in different laser energy





4.4.3 扫描速度对激光去污影响

扫描速度是影响激光去污另一个重要因素,扫 描速度大热累积效应减弱,去污效率提升,但烧蚀深 度减小。在p = 50 W 时,不同激光扫描速度对基材 (0,0,0)点的最高温度和(0,y,z)剖面的的最大烧 蚀深度影响见图9。烧蚀深度和基材温度随着速度 增加呈线性降低趋势,在扫描速度较低区间由于热 累积效应较强,烧蚀深度和基材温度变化速率加大。 对比图6(c),在p = 50 W,v = 800 mm/s 时,基材的 最高温度低于其熔融温度,可见通过改变扫描速度, 在激光功率较大时也可以在达到去污阈值的同时不 对基材造成损伤。

激光扫描速度的变化还会影响光斑搭接率,搭 接率与激光频率、扫描速度和激光光斑半径有关,光 斑搭接率公式如下^[19]:

$$\eta = 1 - \frac{v}{2 \cdot r \cdot f} \times 100 \% \tag{9}$$

式中,η为激光搭接率;r为激光光斑半径;f为激光频率;v为激光扫描速度。



不同搭接率对最终去污质量影响较大,搭接率高,表面形貌光滑,去除率高,但去污效率降低,热累积效应增加。搭接率低,表面形貌粗糙,去除率低,但 去污效率升高,热累积效应降低。在激光频率为 20 kHz,激光功率为50 W,扫描速度分别为600 mm/s 和1000 mm/s时,其去污后表面形貌见图10,10(a) 图中的的搭接率为50 %,可以得到光滑的表面形貌 和较高去除率,10(b)图中的搭接率为17 %,表面 有明显的残留,增加了工件的表面粗糙度,残留部分 的放射性物质也无法去除,影响最终去污效果。



5 结 论

本文对核电厂放射性金属表面的激光去污进行 了建模和数值分析,核电厂金属表面的去污与除锈、 除漆和一般清洗不同,由于核电厂金属部件在高温 高压和辐射环境下长期工作,其表面会形成富 Cr³⁺ 的致密氧化层,氧化层的热物性参数较高,在激光去 污过程中基材容易受到影响,本文提出了在激光去 污过程中通过去污阈值和损伤阈值对去污效果进行 评价。通过对去污原理的研究,建立了核电厂金属 放射性去污的双层有限元模型,激光通过高斯面热 源形式加载到材料表面模拟去污过程。根据激光加 载形式的不同分为连续激光和脉冲激光,通过对连 续激光不同功率下的去污阈值和损伤阈值的评估, 连续激光由于热累积效应明显,在达到去污阈值时 容易对基材造成熔融损伤,不适用于放射性去污 场景。对于脉冲激光形式,首先分析了激光功率 对于烧蚀深度和基材温度的影响,结果表明,随着 激光功率的升高,烧蚀深度和基材温度也随之升高, 在高功率区间效果增强,在扫描速度 600 mm/s,重复 频率为 20 kHz 情况下 30 W 和 40 W 功率都可以 满足去污评定指标。激光的扫描速度也是影响去 污效果重要因素,扫描速度升高烧蚀深度和基材 温度都随之降低,同时搭接率会影响表面形貌,从 而影响最终去污效果,在50%搭接率情况下可以 获得较好表面形貌。

参考文献:

- [1] Reinecke Anne-Maria, Acker Margret, Taut Steffen, et al. Laser beam decontamination of metallic surfaces with a pulsed(150 W)Nd : YAG laser[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(11);4159-4166.
- [2] Costa Priscila, Vicente Roberto, Genezini Frederico, et al. Laser decontamination of surface impregnated with radioactive material [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331(11):4553-4561.
- [3] Qian Wang, Feisen Wang, Chuang Cai, et al. Laser decontamination for radioactive contaminated metal surface: A review[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55 (1):12-24.
- [4] L Carvalho, W Pacquentin, M Tabarant, et al. Metal decontamination by high repetition rate nanosecond fiber laser:application to oxidized and Eu-contaminated stainless steel[J]. Applied Surface Science. 2020,526:146654.

- [5] Hu Yang, Liu Changsheng, Li Kangte, et al. An efficient laser decontamination process based on non-radioactive specimens of nuclear power materials [J]. Materials, 2023,16(24):7643.
- [6] Zhao Guanrong. Technical research on nanosecond pulsed laser cleaning of contaminated paint layer on carbon steel surface [D]. Hengyang: Nanhua University, 2023. (in Chinese)

招观荣.纳秒脉冲激光清洗碳钢表面污染漆层的技术研究[D]. 衡阳:南华大学,2023.

- [7] Wang You, Guo Wei, Zhou Xingwen, et al. Experimental study on surface morphology of 316L stainless steel by laser cleaning and optimization of processing[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(11):1-7. (in Chinese) 王优,郭伟,周兴汶,等.激光清洗 316L 不锈钢表面形 貌变化试验研究及工艺参数优化[J]. 机械设计, 2023, 40(11):1-7.
- [8] Zhao Wan, Cao Junjie, Wang Shuai, et al. Study on laser decontamination technology for metal scraps with radioactively contaminated surfaces[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(5):250-255. (in Chinese) 赵菀, 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.
- [9] EPRI. Decontamination Handbook[M]. Palo Alto, CA: July 1999:TR-112352.
- [10] Leontyev A. Laser decontamination and cleaning of metal surfaces:modelling and experimental studies [D]. Paris: Université Paris Sud-Paris XI,2011.
- [11] Bodansky D. Nuclear energy: principles, practices, and prospects[J]. Physics Today, 1997, 50(5):64-66.
- [12] Luo Shanggeng. Radioactive waste treatment and disposal
 [M]. Beijing: China Environment Publishing House,
 2007:78-81.(in Chinese)
 罗上庚.放射性废物处理与处置[M].北京:中国环境
 科学出版社,2007:78-81.
- [13] G. Park, Chang-Lak Kim. Chemical decontamination design for NPP decommissioning and considerations on its methodology[J]. Journal of the Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 2015, 13(3):187-199.
- [14] Wan Lei, Wang Yuguang, Zuo Xiaoyan, et al. Numerical simulation and experimental study on laser cleaning of 5083 aluminum alloy surface paint layer[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6):803 813. (in Chinese) 万磊, 王裕光, 左小艳, 等. 激光清洗 5083 铝合金表面 漆层的数值模拟与试验研究[J]. 激光与红外, 2022,

52(6):803-813.

- [15] Zhao Zikang, Yang Wenguang, Song Chunxiao, et al. Numerical simulation of laser cleaned oxide layer on Q345 steel surface[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(1):31-39. (in Chinese)
 赵子康,杨文光,宋春霄,等. 激光清洗 Q345 钢表面氧 化层的数值模拟[J]. 激光与红外, 2024, 54(1):31-39.
- [16] Xu Jilin, Zou Ping, Wang wenjie, et al. Numerical modeling and analysis of laser polishing based on ablation principle[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2020, 42(12):1760 1766. (in Chinese) 徐辑林, 邹平, 王文杰, 等. 基于烧蚀原理的激光抛光的数值建模与分析[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2020, 41(12):1760 1760.
- [17] Hong-Lin LEE, Tadashi SASAMOTO, Toshiyuki SATA. Effects of porosity on vacuum-vaporization of chromium oxide and thermodynamic treatments [J]. Yogyo-Kyokai-Shi, 1974,82(11):603-610.
- [18] Liu Caifei, Feng Guoying, Deng Guoliang, et al. Temperature field analysis and experment study about paint irradiated by moving laser based on FEM[J]. Laser Technology, 2016, 46(2):274-279. (in Chinese)
 刘彩飞, 冯国英, 邓国亮, 等. 有限元法移动激光除漆的温度场分析与实验研究[J]. 激光技术, 2016, 46 (2):274-279.
- [19] Jasim H A, Demir A G, Previtali B, et al. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93:60 - 66.