

在线悬浮电解去污电化学性能和去污效果

张 怡, 郑佐西, 朱欣研, 马梅花

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要:在悬浮电解去污前期实验研究中,建立了24 L实验室在线悬浮电解去污装置,并且确定了悬浮电解去污配方。利用前期的实验结果,对碳钢、不锈钢模拟样品进行电化学去污实验,确定了最优的悬浮电解液配方和去污工艺。同时通过电化学工作站对其去污过程中的电化学性能进行研究,确定了电化学性能和去污效果的关系。在优化的电解液配方即0.6 mol/L H_2SO_4 、0.8 mol/L Na_2SO_4 、100 g/L 石墨颗粒、60 g/L SiC颗粒,循环流速26 mL/s、电解电压8 V、传输距离5 m等工艺参数和电流密度250 A/cm²条件下,对碳钢和不锈钢模拟样片进行1 h去污,去污因子为257和191。

关键词:在线悬浮电解;电化学性能;去污因子

中图分类号:TL944 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2018)04-0243-07

doi:10.7538/hhx.2018.40.04.0243

Electrochemical Performance and Decontamination Effect of Online Suspension Electrolysis Decontamination

ZHANG Yi, ZHENG Zuo-xi, ZHU Xin-yan, MA Mei-hua

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(93), Beijing 102413, China

Abstract: Based on the preliminary experiment, 24 L laboratory online suspension electrolysis decontamination device was established, and the electrolytic decontamination formulation was determined. The experiments were carried with the simulated carbon steel and stainless steel samples, to determine the optimized suspension electrolysis decontamination formulation and process parameters. At the same time, through the electrochemical workstation, the electrochemical performance of online suspension electrolysis decontamination device, the relationship of the electrochemical properties and decontamination factors were studied. Under the optimal parameters and conditions, including the 0.6 mol/L H_2SO_4 , 0.8 mol/L Na_2SO_4 , 100 g/L suspension particle, 60 g/L abrasive particle, the 26 mL/s circulating flow, the 8 V electric voltage and the 5 m transmission distance, for the simulated carbon steel and stainless steel samples, after 1 h decontamination, their decontamination factor can reach 257 and 191.

Key words: online suspension electrolysis; electrochemical performance; decontamination factor

悬浮电解法是指利用悬浮电极的电解法^[1-3],悬浮电极主要利用流动的悬浮体,通过馈电线或极板将电荷传给悬浮的固体颗粒,电化学反应在这些固体颗粒上进行。在线悬浮电解去污技术,就是通过含有这些悬浮固体颗粒的电解液具有的流动性,可以将其从电解槽中引到需去污的管道或设备的内部,只需保证整个循环的密封性,而不需要将其进行拆除,从而实现了在线悬浮电解去污。这种技术可对核设施退役中产生的大量结构复杂严重污染的设备、零部件等,如放射性管道、热交换器等污染设备和管道,进行快速深度去污,以降低退役去污的费用。

该技术具有以下优点^[4-6]:(1)用较低浓度的电解质去污配方溶液可以有效去污;(2)悬浮电解和研磨相结合,可以提高去污效率;(3)对于表面形状复杂的污染物,可以均匀地去污;(4)带电介质和电解液可以再循环使用,减少二次废物量。前期对悬浮电解去污的原理^[7]、24 L 悬浮电解去污装置的建立、电解液配方组分的筛选、以及关键工艺参数筛选进行了研究,本实验的目的在于通过 24 L 在线悬浮电解去污装置的电解液配方以及工艺参数和电流密度的关系研究,得到优化的电解液配方和工艺参数,以提高去污效率,为进一步研究提供基础。

1 实验部分

1.1 实验材料和仪器

H₂SO₄(分析纯)、Na₂SO₄(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;石墨粉(ϕ 150 μ m),青岛富润达石墨有限公司;SiC 粉(ϕ 500 μ m),姜堰市波光精磨厂。

30 cm×40 cm×30 cm 有机玻璃电解槽,自加工;CS1120 大功率电化学工作站,订制电压、电流,武汉科斯特仪器有限公司;蠕动泵,北京君方科仪科技有限公司;SD-1-JB200-D 强力电动搅拌机,北京亿百川科技发展有限公司;低本底 α 、 β 测量仪,北京核仪器厂。

1.2 实验方法

使用 H₂SO₄-Na₂SO₄ 体系悬浮电解去污配方^[8-10],即 0.6 mol/L H₂SO₄、0.6 mol/L Na₂SO₄、150 g/L 石墨颗粒、60 g/L SiC 颗粒的基本电解液配方,通过 24 L 实验室在线悬浮电解去污装置(20 cm×30 cm×2 mm 不锈钢板式电极),在循环流速 26 mL/s、电解电压 8 V、传输距离 5 m 基

本工艺条件下对碳钢/不锈钢模拟污染样片进行电解去污实验,每组实验有 3 个平行样片,去污时间为 1 h。CS1120 大功率电化学工作站测量去污过程中电解液中的电流强度及电压强度。

模拟污染样片的制备:将 30 mm×30 mm×2 mm 的碳钢(A3)/不锈钢(304)模拟样片表面去油,利用中国原子能科学研究院的中放废液作为污染溶液,滴加到模拟样片上,在一定温度下烘干制成模拟污染样片。碳钢模拟污染样片的初始污染水平为 β 计数率大于 2 000 min⁻¹,不锈钢模拟污染样片的初始污染水平为 β 计数率大于 1 000 min⁻¹。将待去污的碳钢/不锈钢模拟污染样片放置在样片托架上,在一定电解电压和循环速率等工艺条件下进行电解去污,去污实验完成后取出模拟污染样片,用蒸馏水冲洗模拟污染样片表面,烘干之后用低本底 α 、 β 测量仪测量其表面污染水平。

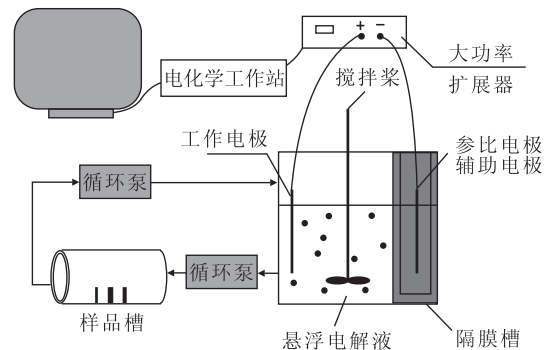


图1 实验室在线悬浮电解去污装置示意图

Fig. 1 Laboratory online suspended electrolytic decontamination device

在基本电解液配方的基础上,每组实验仅改变一个电解液配方成分,进行在线悬浮电解去污实验,研究其对电流密度和去污因子的影响及电流密度和去污因子的关系。确定优化的电解液配方后,进行工艺条件的影响实验。确定各因素对电流密度和去污因子的影响,以及电流密度和去污因子的关系。去污因子 DF 及悬浮电解的电流密度 I_d 的计算公式如下:

$$DF = C_0/C_1$$

$$I_d = I/S$$

式中: C_0 、 C_1 , 物体去污前、后的放射性浓度, min⁻¹; I , 电流强度, A; S , 与电流方向垂直的隔膜面积, m²。

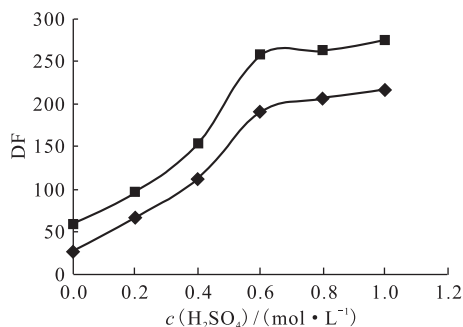
2 结果与讨论

2.1 电解液配方的优化

2.1.1 H₂SO₄ 浓度的影响 在基本电解液配方和工艺参数基础上,改变 H₂SO₄ 浓度,分别添加 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mol/L H₂SO₄,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度(碳钢样片与不锈钢样片的电流密度-电压曲线图相同,仅给出一图示例,以下实验均相同)和去污因子分别示于图 2、3。图 2、3 结果表明,添加 H₂SO₄ 可以增加电解液的电流密度,在相同的电解电压下,随着电流密度升高,去污因子提高。由图 2 可以看出,电流密度随 H₂SO₄ 浓度的升高有明显的升高,并且在 H₂SO₄ 浓度低于 0.6 mol/L 时,电流密度随着 H₂SO₄ 浓度的增加明显增大;H₂SO₄ 浓度高于 0.6 mol/L 后,电流密度增加较为缓慢。这是因为,在稀溶液中,离子浓度随电解液浓度的增加较为显著,离子浓度高,电流密度高;在高于 0.6 mol/L 的电解液中,自由离子彼此碰撞结合的几率大,降低了自由离子的实际浓度。由图 2、3 还可以看出,在相同的电解电压下,H₂SO₄ 浓度越大,电流密度越大,去污因子越高,这与电量衡算结果相符。碳钢、不锈钢样片的去污因子变化趋势基本相同。但是因为电流密度大,电极反应产生的气体产物增加,从而降低了去污效果,所以 H₂SO₄ 浓度在 0.6 mol/L 以上,去污效果增加的幅度减缓,所以选择 H₂SO₄ 浓度为 0.6 mol/L。

2.1.2 Na₂SO₄ 浓度的影响 其他条件不变,改变 Na₂SO₄ 浓度,分别添加 0.2、0.4、0.6、0.8、

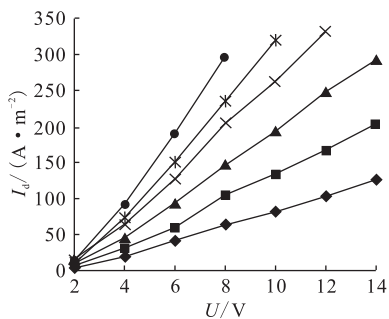
1.0 mol/L Na₂SO₄,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 4、5。图 4、5 实验结果表明,添加 Na₂SO₄ 可以增加悬浮液的导电系数。由图 4 可以看出,随着 Na₂SO₄ 浓度增加,电流密度增大,但增加幅度不大。并且随着电解电压升高,不同 Na₂SO₄ 浓度的电流密度增大显著。由图 5 可以看出,随着 Na₂SO₄ 浓度的升高,去污因子增大,碳钢样片的去污因子增加幅度较大,不锈钢样片的去污因子变化比较平缓。并且在 Na₂SO₄ 浓度较大时,石墨颗粒略有漂浮,最终选择 Na₂SO₄ 浓度为 0.8 mol/L。



0.6 mol/L Na₂SO₄, 150 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
◆——不锈钢, ■——碳钢

图 3 H₂SO₄ 浓度对样片去污的影响

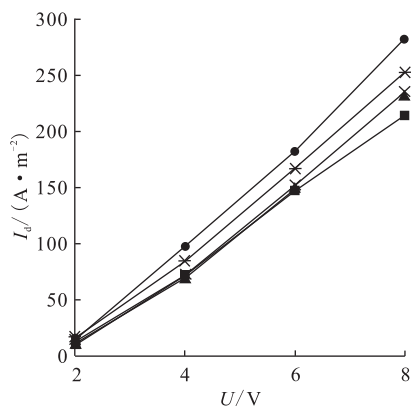
Fig. 3 Influence of sulfuric acid concentration on DF



0.6 mol/L Na₂SO₄, 150 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
 $c(\text{H}_2\text{SO}_4)$, mol/L: ◆——0.0, ■——0.2, ▲——0.4, ×——0.6, *——0.8, ●——1.0

图 2 H₂SO₄ 浓度对电流密度-电压曲线的影响

Fig. 2 Influence of sulfuric acid concentration on I_d -U



0.6 mol/L H₂SO₄, 150 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
 $c(\text{Na}_2\text{SO}_4)$, mol/L: ■——0.2, ▲——0.4, ×——0.6, *——0.8, ●——1.0

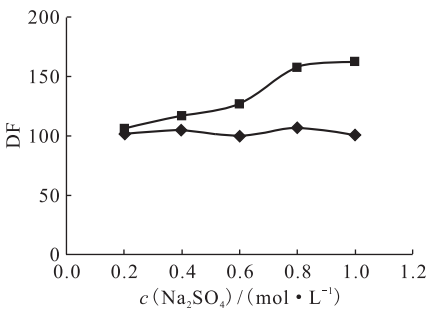
图 4 Na₂SO₄ 浓度对电流密度-电压曲线的影响

Fig. 4 Influence of sodium sulfate concentration on I_d -U

2.1.3 石墨用量的影响 其他条件不变,改变石墨颗粒浓度,分别添加 50、100、150、200、250 g/L

石墨颗粒,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 6、7。图 6、7 实验结果表明,添加石墨可以增加悬浮液的导电系数,在一定范围内,可以促进电解效率。由图 6 可以得到,在不同电解电压下,电流密度随石墨颗粒浓度的增加而提高,但石墨颗粒质量浓度超过 100 g/L 时,电流密度反而降低。并且在电解电压较低时变化不明显,电解电压较高时变化显著。由图 7 可以看出,不同石墨颗粒浓度下碳钢和不锈钢的去污因子变化有所不同,碳钢样片的去污因子随着石墨颗粒浓度的增加逐渐升高,在石墨颗粒质量浓度为 100 g/L 时出现一个极大值,之后下降并逐渐趋于平缓;不锈钢样片的去污因子整体变化不大,但在石墨颗粒质量浓度为 100 g/L 时,出现一个最高峰。因为石墨颗粒

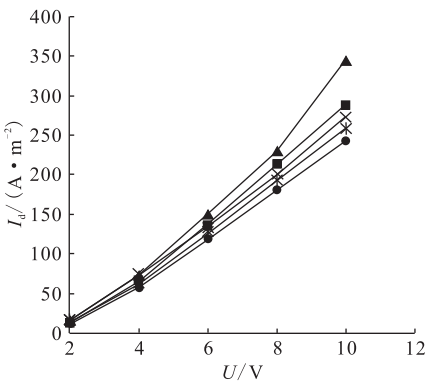
浓度过高时悬浮液过于稠密,电解时石墨易漂浮,需要较高的搅拌速度,使得悬浮液形成大漩涡,造成电场不均匀,影响了电流密度,不利于电解,最终选择石墨颗粒质量浓度为 100 g/L。



0.6 mol/L H_2SO_4 , 150 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
◆——不锈钢, ■——碳钢

图 5 Na_2SO_4 浓度对样片去污效果的影响

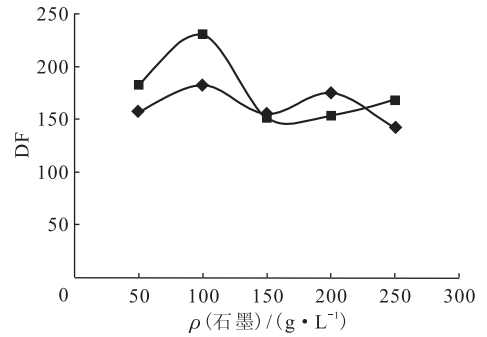
Fig. 5 Influence of sodium sulfate concentration on DF



0.6 mol/L H_2SO_4 , 0.8 mol/L Na_2SO_4 , 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
 $\rho(\text{石墨}), \text{g/L}$: ■——50, ▲——100, ×——150, *——200, ●——250

图 6 石墨颗粒浓度对电流密度-电压曲线的影响

Fig. 6 Influence of graphite concentration on I_d-U

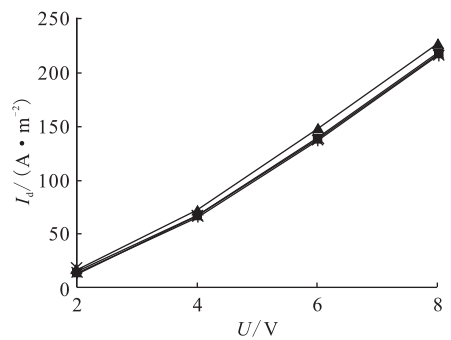


0.6 mol/L H_2SO_4 , 0.8 mol/L Na_2SO_4 , 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
◆——不锈钢, ■——碳钢

图 7 石墨颗粒浓度对样片去污效果的影响

Fig. 7 Influence of graphite concentration on DF

2.1.4 SiC 用量的影响 其他条件不变,改变 SiC 颗粒浓度,分别添加 20、40、60、80、100 g/L SiC 颗粒,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 8、9。图 8、9 的实验结果表明,添加 SiC 颗粒对悬浮液的电流密度没有影响。由图 8 可以看出, SiC 颗粒浓度增加,电流密度变化不明显。SiC 颗粒在电解液中主要作为磨料,在去污过程中可以起到研磨抛光的作用,在样片电解去污的同时起到机械去污的效果,从而提高样片的去污因子。由图 9 可以看

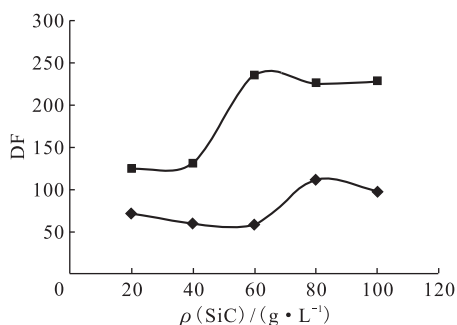


0.6 mol/L H_2SO_4 , 0.8 mol/L Na_2SO_4 , 100 g/L 石墨颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
 $\rho(\text{SiC}), \text{g/L}$: ◆——20, ■——40, ▲——60, ×——80, *——100

图 8 SiC 浓度对电流密度-电压曲线的影响

Fig. 8 Influence of SiC concentration on I_d-U

出,不同 SiC 颗粒浓度下碳钢和不锈钢的去污因子变化也有所不同,碳钢样片去污因子随着 SiC 颗粒浓度的增加出现高峰,即 SiC 颗粒质量浓度为 60 g/L 时出现一个高峰,之后逐渐趋于平缓;不锈钢的去污因子变化则比较平滑,在 SiC 颗粒浓度为 80 g/L 时出现高峰,之后呈逐渐降低趋势。总的来说,添加 SiC 颗粒促进了碳钢、不锈钢样片去污效果,主要考虑碳钢样片去污效果,最终选择 SiC 颗粒的质量浓度为 60 g/L。



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 循环流速 26 mL/s, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
◆—不锈钢, ■—碳钢

图 9 SiC 浓度对样片去污效果的影响
Fig. 9 Influence of SiC concentration on DF

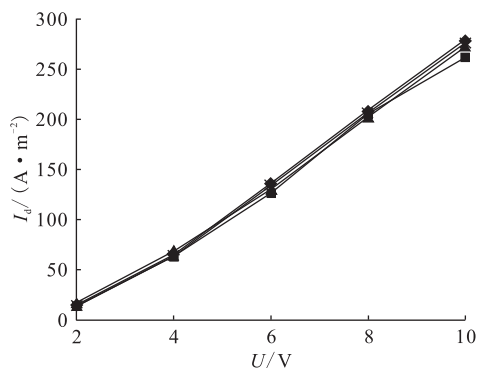
由以上实验可以得到,在电流密度为 200~250 A/m² 之间时,碳钢、不锈钢样片去污效果好。最优的电解液配方即优化的电解液配方为 0.6 mol/L H₂SO₄、0.8 mol/L Na₂SO₄、100 g/L 石墨颗粒、60 g/L SiC 颗粒。

2.2 不同工艺参数的影响

2.2.1 电解液循环流速的影响

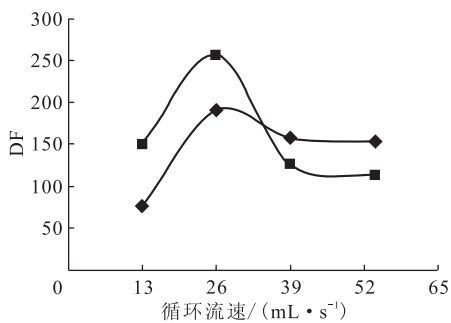
使用上文优化的电解液配方,改变循环流速,分别为 13、26、39、54 mL/s 时,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 10、11。实验发现,循环流速通过石墨颗粒载带到样品槽中的电荷与样片表面接触的时间,以及 SiC 颗粒对样片表面的研磨作用同时影响去污效果。由图 10 可以看出,电解液循环流速的改变对电流密度的影响不大。由图 11 可以看出,电解液的循环流速对去污因子的影响较大,循环流速增大,去污因子增大,循环流速到达 26 mL/s 后,去污因子开始下降,逐渐达到平衡,并且碳钢样片的下降趋势要比不锈钢样片的下降趋势强。循环流速过大时去污因子反而降低,主要是因为循环流速过

快石墨颗粒没有充足的时间与样片表面接触完成电化学反应。考虑实验结果和装置的稳定性,确定循环流速为 26 mL/s。



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
循环流速, mL/s: ◆—13, ■—26, ▲—39, ×—54

图 10 循环流速对电流密度-电压曲线的影响
Fig. 10 Influence of circulation flow rate on I_d-U



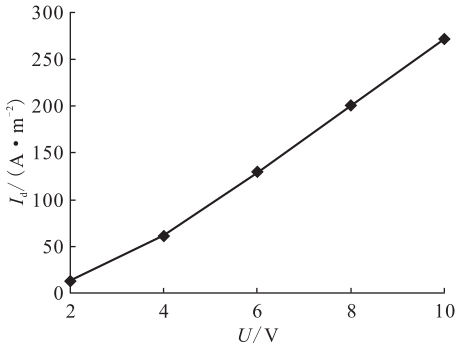
0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 传输距离 5 m
◆—不锈钢, ■—碳钢

图 11 循环流速对样片去污效果的影响
Fig. 11 Influence of circulation flow rate on DF

2.2.2 电解电压的影响

使用优化的电解液配方,改变电解电压分别为 2、4、6、8、10 V 时,进行电解去污,碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 12、13。从图 12 可看出,随着电解电压的增大,电流密度增大,可以看出电流密度起始时缓慢上升,在电解电压 4 V 以上时呈直线上升趋势,未出现极化平台,这和悬浮电解的原理相符合。但是电压过高之后,两极产生的气体也增多,所以电解过程中要适当控制电压。由图 13 得到,碳钢、不锈钢去污因子在电压较低时随电压的增大上升的幅度较大,在电压达到 4 V 以后,虽然去污因子总体随电压的升高而增

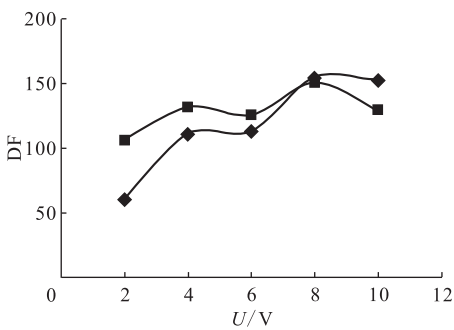
大,但增加幅度较缓,在8 V出现一个高峰后,有缓慢下降的趋势。总体来看,电解电压越高电流密度越大,去污效果越好,但电压过高时阳极区石墨漂浮严重,影响电解效率,使得两种样片的去污因子均下降。同时考虑到电压的增大会使电极产生的气体增多,所以选择电流密度为200~250 A/cm²时,电解电压取8 V。



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 传输距离 5 m

图 12 电流密度随电解电压的变化曲线

Fig. 12 Current density with electrolytic voltage curve



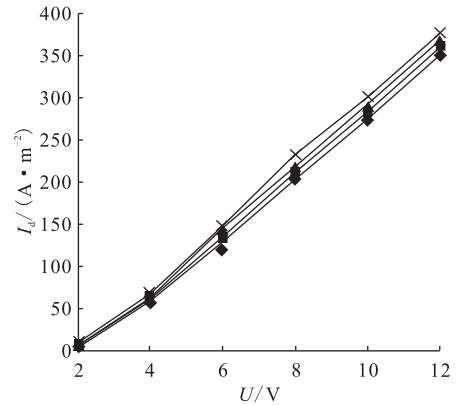
0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 循环流速 26 mL/s, 传输距离 5 m
◆——不锈钢, ■——碳钢

图 13 电解电压对样片去污效果的影响

Fig. 13 Influence of electrolytic voltage on DF

2.2.3 电解液传输距离的影响 使用优化的电解液配方, 改变电解液传输距离(主要为连接管和去污管道的总长度)分别为 5、7、9、11 m 时, 进行电解去污。测量不同条件下的电流密度和对碳钢/不锈钢模拟污染样片的去污因子, 结果示于图 14、15。从图 14 可以看出, 电流密度随电解液的传输距离增加而降低, 但是变化幅度不明显, 主要是由于传输距离增加, 在传输过程中溶液中的荷电离子损失, 从而使电流密度降低。从图 15 可

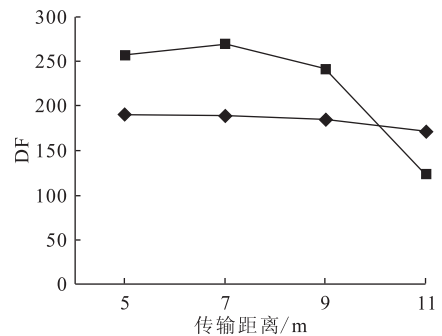
以看出, 随着电解液的传输距离减少, 不锈钢、碳钢模拟污染样片的去污因子不断上升, 碳钢样片的上升幅度较大, 不锈钢样片变化趋势基本平缓。说明在实际应用中, 应根据传输距离, 适当添加电解液, 以保证电解液在传输过程中有足够的荷电离子。



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 循环流速 26 mL/s, 传输距离, m: ◆——11, ■——9, ▲——7, ×——5

图 14 传输距离对电流密度-电压曲线的影响

Fig. 14 Influence of transmission distance on I_d-U



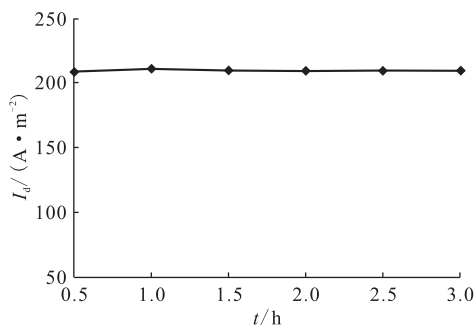
0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 循环流速 26 mL/s
◆——不锈钢, ■——碳钢

图 15 传输距离对样片去污效果的影响

Fig. 15 Influence of transmission distance on DF

2.2.4 去污时间的影响 使用优化的电解液配方和工艺参数, 改变去污时间, 分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 h 时, 进行电解去污, 碳钢/不锈钢模拟污染样片的电流密度和去污因子分别示于图 16、17。从图 16 可以看出, 电流密度随去污时间增加, 保持平稳, 说明整个电解液体系稳定。从图 17 可以看出, 随着去污时间的增加, 不锈钢、碳钢模拟污染样片的去污因子不断增加,

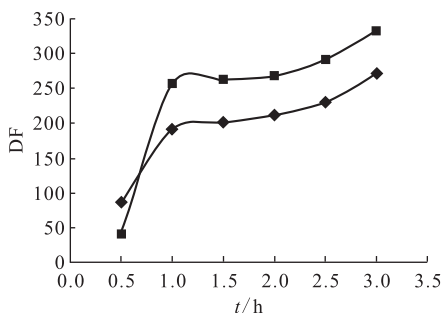
去污 1 h 之后去污因子继续增加,但增加幅度不明显。碳钢、不锈钢模拟污染样片在电解去污 1 h 时去污因子可以分别达到 257、191。



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 循环流速 26 mL/s, 传输距离 5 m

图 16 电流密度随时间变化图

Fig. 16 Curve of current density with time



0.6 mol/L H₂SO₄, 0.8 mol/L Na₂SO₄, 100 g/L 石墨颗粒, 60 g/L SiC 颗粒, 电解电压 8 V, 循环流速 26 mL/s, 传输距离 5 m

◆——不锈钢, ■——碳钢

图 17 去污时间对样片去污效果的影响

Fig. 17 Influence of decontamination time on DF

3 结论

(1) 通过 24 L 实验室在线悬浮电解去污装置对其电化学性能和去污效果的规律进行了研究。根据实验得出的去污效果与电流密度的关系,组合出优化的电解液配方为 0.6 mol/L H₂SO₄、0.8 mol/L Na₂SO₄、100 g/L 石墨颗粒、60 g/L SiC 颗粒,优化的工艺参数为循环流速 26 mL/s、电解电压 8 V。去污因子与传输距离反相关,与去污时间正相关,具体由工程应用的现场

条件决定。

(2) 通过 24 L 实验室在线悬浮电解去污装置对其电化学性能和去污效果的规律研究, H₂SO₄、Na₂SO₄ 和石墨颗粒浓度对相同电解电压情况下的电流密度有着一定的影响,总体来看,电流密度越大,去污效果越好。任一条件下选择的最优点电流密度均在 200~250 A/cm²。

(3) 24 L 实验室在线悬浮电解去污装置在优化的电解液配方和工艺参数条件下,去污效果较优,碳钢、不锈钢模拟污染样片去污 1 h 的去污因子分别为 257 和 191。

参考文献:

- [1] 廖沼克嘉,新井修,菱沼行男,等. 開発した複雑形状汚染物の徹底除染技術とその応用:サスベソジョソ流動電解研磨除染技術[J]. 原子力 eye, 2000, 46(1):82-85.
- [2] 迟久志. 悬浮电解工艺简介[J]. 有色金属(冶炼部分), 1979(2):57-61.
- [3] 石樽显吉. 核设施去污技术[M]. 左民,李学群等译. 北京:原子能出版社,1996:284-286.
- [4] 罗上庚,张振涛,张华. 核设施与辐射设施的退役[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010:117-145.
- [5] 王东文,窦天军,赵玉杰. 不锈钢管的电解去污实验[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(3):266-270.
- [6] 刘文仓,张渊,任宪文,等. 金属管道内壁的电解去污试验[J]. 辐射防护, 1993, 13(3):226-230.
- [7] 钱正华,郑佐西,朱欣研,等. 悬浮电解去污配方的去污能力及电化学性能测试[J]. 核化学与放射化学, 2013, 35(2):125-128.
- [8] Allen R P, Arrowsmith H W, Charlot L A, et al. Electropolishing as a decontamination process: program and applications, PNL-SA-6858[R]. Richland, Wa: Battelle Northwest Laboratories, 1978.
- [9] Paramguru R K, Kammel R. Bed performance in the direct electrowinning of lead from suspension galena anodes[J]. Metallurg Transact B, 1988, 19B: 67.
- [10] Paramguru R K, Kuzeci E, Kammel R. Direct electrowinning of lead from suspension galena concentrate anode in different electrolytes[J]. Metallurg Transact B, 1988, 19B: 59.