

垫式柔性电解去污吸液材料及参数选择

董毅漫¹, 李斌¹, 梁红亮², 柳争艳², 曲云欢^{1,*}

1. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082;
2. 中国辐射防护研究院, 山西太原 030024

摘要:开展了吸液材料的吸排液综合性能、导电性能、耐热性能及操作性能等材料性能试验,并对垫式柔性电解去污的电解参数进行了研究,通过电流密度和极间距,研究两者变化对电解参数的影响。结果表明:吸水纤维类是最适于垫式柔性电解去污的吸液材料;电流密度和极间距的变化,对金属腐蚀速率、电解液利用率、连续电解维持时间、电解起始电压等均有不同程度的影响。与吸液材料相匹配的电解参数建议为:电流密度不大于 0.3 A/cm^2 ,极间距不大于 4 mm 。

关键词:柔性;电解;去污;吸液材料;参数

中图分类号:X591 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2013)06-0351-08

doi:10.7538/hhx.2013.35.06.0351

Selection for Pad Flexible Electrolytic Decontamination Absorbing Material and Parameter

DONG Yi-man¹, LI Bin¹, LIANG Hong-liang², LIU Zheng-yan², QU Yun-huan^{1,*}

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;
2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030024, China

Abstract: The absorbent material tests including adsorb-discharge comprehensive performance, electrical conductivity, heat resistance, operation performances, and the pad flexible electrolytic decontamination parameter selection were studied. The changes in the current density and spacing effect on electrochemical parameters were studied. The results show that absorbent fiber of absorbing materials is the most suitable for pad flexible electrochemical decontamination; the changes of current density and electrode spacing have different influence on the corrosion rate, the utilization rate of electrolyte, continuous electrolysis time, and initiation voltage. The electrolytic parameters matching with absorbing material are that current density is not more than 0.3 A/cm^2 , and electrode spacing is not more than 4 mm .

Key words: flexible; electrolytic; decontamination; absorbing material; parameter

收稿日期:2013-07-29;修订日期:2013-10-28

作者简介:第一、第二作者为共同第一作者

董毅漫(1974—),女,硕士,副研究员,主要从事环境三废方向研究;

李斌(1972—),男,博士,高级工程师,主要从事核安全法规标准研究

* 通信联系人:曲云欢,女,高级工程师,E-mail: qyhcongcong@163.com

核设施在长期运行中不可避免会受到不同程度的放射性污染,为保护人员健康和环境安全,必须高度重视放射性污染治理。去除放射性污染的方法主要分为物理去污、化学去污、电化学去污和物理化学联合去污。其中,电解去污技术主要用于不锈钢、碳钢等放射性污染金属部件的去污,被誉为金属表面去污最有效的方法之一^[1-3]。早在 20 世纪 50 年代,国外就已开始有这方面的研究报道^[4-6]。20 世纪 80 年代末以来,我国对电解去污技术也做过一些研究^[2,7-9]。柔性电解去污技术^[10]是电解去污技术向简单化、小巧化、普适化发展的代表。在核设施去污方面应用范围很广,具有去污装置小巧、结构简单、适应性强的特点,可适应复杂形状的去污对象,克服一般电解去污中一个去污装置只能用于一种去污对象的局限性,实现一机多用。电极材料具有多样性,易于与其它技术结合,二次废液产生量少,技术经济性好

等特点。其中,垫式柔性电解去污是柔性电解去污技术的典型装置。然而,目前垫式柔性电解去污技术吸液材料的开发和研究并没有得到重视,人们对吸液材料的认识仅限于把吸液材料作为一种普通的介质或载体,很少有吸液材料的选型和性能研究的公开文献报道。本工作拟利用自主设计的垫式柔性电解去污装置,选取三大类 13 种吸液材料开展吸液材料的吸排液综合性能、导电性能、耐热性能及操作性能等材料性能试验,并对筛选出的吸液材料的操作参数进行研究,为进一步研究电解液吸附材料性能对垫式柔性电解去污影响及核设施退役去污技术选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在本试验中,从现有吸水材料中筛选出来的吸液材料列入表 1。筛选原则如下:(1) 吸附机理

表 1 垫式柔性电解去污吸液材料选择

Table 1 Selection of absorbing material in pad flexible electrolytic decontamination

类别 (Category)	No.	名称 (Name)	材质 (Texture)	备注 (Remarks)
高吸水性树脂 (Super-absorbent polymer)	1	博亚 A(Boya A)	聚丙烯酸盐(Polyacrylate)	$d=0.210\sim 0.590$ mm
	2	博亚 B(Boya B)	聚丙烯酸盐(Polyacrylate)	$d<0.125$ mm
	3	博亚 C(Boya C)	聚丙烯酸盐(Polyacrylate)	粒度介于博亚 A 与博亚 B 之间 (Particle size between Boya A and B)
	4	抗盐(Salt-resist,SAP)	丙烯酰胺共聚钠盐(Acrylamide copolymerization sodium salt)	粒度与白砂糖相仿,吸水时间需半个小时,吸水后溶胀成有一定抗压能力的凝胶 (Particle size is similar to white granulated sugar, suction time need half an hour, after absorbing water soluble gel up into a certain compressive capacity)
吸水海绵 (Sponge)	5	开孔海绵 (Trepanning sponge)	普通开孔海绵 (General trepanning sponge)	
	6	大孔 PVA 海绵(Macropore PVA sponge)	PVA	
	7	中孔 PVA 海绵 (Mesopore PVA sponge)	PVA 胶绵(PVA collodion)	0.2 cm 厚,闭孔 (0.2 cm thick, obturator)
	8	小孔 PVA 海绵(Micropore PVA sponge)	PVA	闭孔(Obturator)
吸水纤维类 (Absorbent fiber)	9	脱脂纱布 (Absorbent gauze)	棉质(Cotton)	
	10	无纺布(Nonwovens)	粘胶(Viscose)	
	11	木纤维(Wood fiber)	木质(Woodiness)	
	12	聚酯纤维 (Polyester fiber)	聚酯纤维,尼龙纤维 (Polyester fiber, nylon fiber)	短绒超细纤维(Lint microfiber)
	13	活性纤维(Activity fiber)		长绒超细纤维(Plush microfiber)

的差异性;(2)物理性能的差异性,如粒度、孔径、纤维长度等;(3)化学组成的差异性;(4)生产工艺的差异性;(5)产品在市场的易得性。

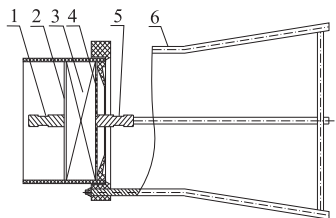
1.2 试剂与仪器

主要试剂:硝酸、硝酸钠均为分析纯。硝酸体系电解液配方,50 g/L 硝酸+100 g/L 硝酸钠。

STP50A 型电解电源,广东顺德金顺怡电器制造有限公司;JZ5002 型电子天平,感量为 0.001 g,上海天平仪器厂;DU-65A 型电热恒温油浴箱,金坛市金城国胜实验仪器厂。

1.3 试验装置

垫式柔性电解去污试验装置示于图 1。该装置主要由支架、有机玻璃柱、不锈钢阳极板与阴极孔板组成。电解时,将吸饱电解液的吸液材料放置在阴阳两极板之间,通过阴阳两极的接线柱与电源相连。



1,5——接线柱(Binding post), 2——阳极板(Positive plates),
3——吸附材料(Adsorbing materials), 4——阴极孔板
(Cathode aperture plates), 6——支架(Holder)

图 1 垫式柔性电解去污试验装置图

Fig. 1 Pad flexible electrolytic decontamination test unit

1.4 试验方法

将一定体积的吸液材料,吸附电解液饱和后放在电解试验装置里,过滤掉过量的电解液,置于阴阳两极板之间并通以电流,进行恒电流电解试验,直至无法维持恒定电流并且电流急速降为零,电解中断。记录材料吸附的电解液质量、电解时间、阳极板质量损失、电压及变化规律等,计算电解液利用率及金属腐蚀速率。其中,电解液利用率为吸液材料吸附的单位质量电解液所能维持的电解时间,由下式表示: $\eta = t/m$ 。式中: η , 电解液利用率, s/g; t , 电解维持时间, s; m , 吸液材料吸附电解液的质量, g。金属腐蚀速率为单位时间的腐蚀程度平均值,单位是 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。用吸液倍率来表征吸液性能,由下式表示: $A = (m_1 - m_0)/m_0$ 。式中: A , 吸液倍率, g/g; m_0 , 吸液材料的质量, g; m_1 , 吸液饱和后吸液材料的质量, g。

在吸液材料选择试验中,采用的电解技术参数是:电解液配方为 50 g/L 硝酸+100 g/L 硝酸钠;电流密度为 0.3 A/cm²;极间距为 5 mm。在电解参数选择试验中,根据筛选出的吸液材料对电解参数选择进行研究。

2 结果与讨论

2.1 吸液材料选择试验

2.1.1 吸、排液综合性能比较 电解与吸液材料对电解液的吸附性能和解吸性能有关,材料对电解液的吸附与解析之间的平衡对电解维持时间影响很大,因此需要考察不同材料的吸附能力与解析能力的平衡。各吸液材料电解液利用率的变化示于图 2。由图 2 可知,纤维类的电解液利用率最高,海绵类居中,树脂类最低。说明纤维类对电解液的吸附与解析平衡关系最符合电解的需要,海绵次之,树脂最差。这主要是由于树脂类对电解液吸附能力过强,解析能力过差,导致可利用的电解液过少,即电解液利用率较低。开孔海绵则主要是由于解析能力过强,同样破坏了吸附与解析之间的平衡,导致电解液利用率低下。

2.1.2 导电性能比较 吸液材料的导电性能是柔性电解去污考虑的重要指标之一,电阻是表征导电性能的重要参数,根据法拉第定律,电流一定时,电压与电阻成正比,因此采用测量电解电压来表征电阻。各吸液材料的电解起始电压值示于图 3。由图 3 可知,各吸液材料的电解起始电压各不相同,树脂类最高,海绵类居中,纤维类最低。电解起始电压的高低可直接反映出材料吸液后电阻的高低,因此树脂类的电阻最高,海绵类居中,纤维类最低。这说明树脂类吸附电解液后,可自由迁移的电解液量少,即可利用的电解液少,而纤维类最多。吸液材料电解时间的变化对电压的影响示于图 4。由图 4 可知,各类材料的电解电压随电解时间的变化趋势相同,在电解初期的电解电压均高,然后有不断降低的过程。这是因为金属开始发生电解反应的初期需要一个较高的电压来活化金属,电解开始后,电解温度快速上升,电解液在材料中的迁移速度加快,电解电压略有降低。当电解进行到一定程度,电解液不断损失使材料内部的电解液量降低,材料的电阻值开始逐渐升高,电压也随之升高,当电解液的量和迁移不足以维持电解需要时,电压达到最高,电解终止。可见三类吸液材料导电性能的优劣顺序为纤维类>海绵类>

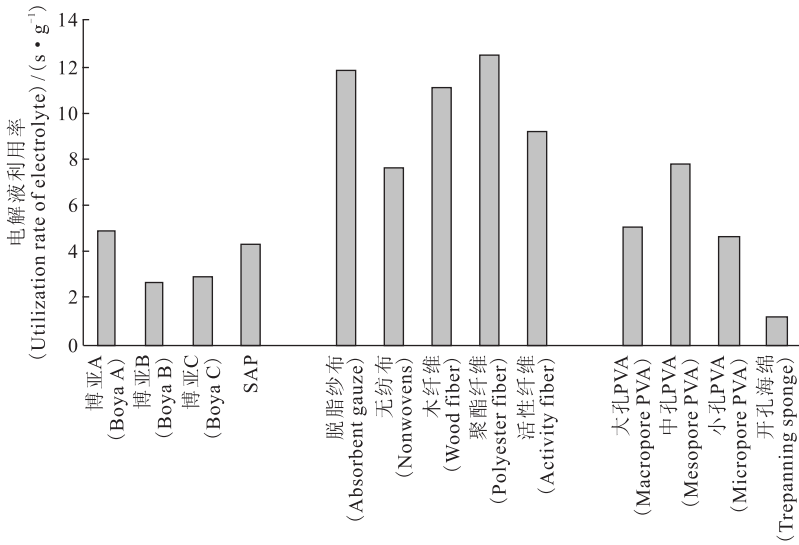


图 2 不同吸液材料的电解液利用率

Fig. 2 Effect of absorbent material on the utilization rate of electrolyte

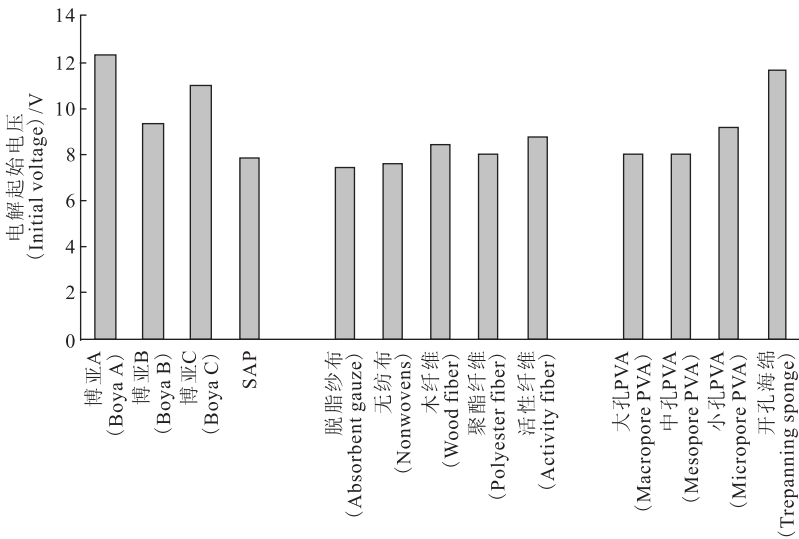


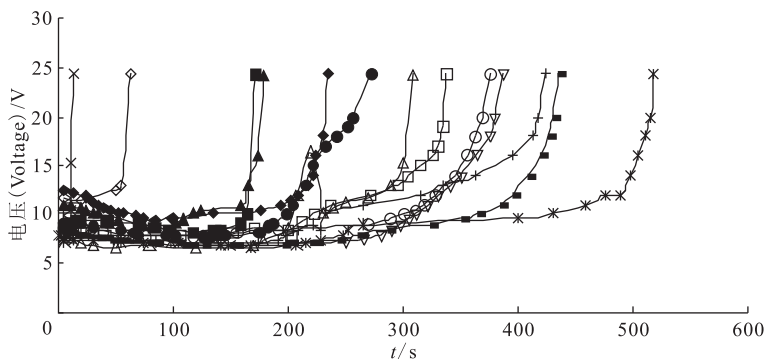
图 3 吸液材料对起始电压影响

Fig. 3 Effect of absorbent material on the initial voltage

树脂类。而在纤维类中,脱脂纱布最优,聚酯纤维和无纺布居中,木纤维和活性纤维次之。

2.1.3 耐热性能比较 在垫式柔性电解去污中,吸附材料虽然吸附了大量电解液,但与槽式电解去污相比,垫式柔性电解去污所用的电解液量远远低于槽式电解去污用的电解液。因此在电解过程中,去污金属表面由于发生电解反应而温度很高,而吸附材料散热速度比流动液体散热速度慢,因此可能会出现局部高温,使吸液材料受热,而导致材料性能发生变化影响吸液材料的重复使用。为此,进行了从室温到 100 °C 之间各吸附材料的

耐热性能变化试验,其结果列入表 2。由表 2 可知,温度达到 80 °C 后,中孔海绵、小孔海绵、聚酯纤维和活性纤维 4 种材料开始发生变性(变色、萎缩、分解等);温度达到 90 °C 后,SAP 树脂开始发生变性;温度达到 100 °C 后,博亚 C 树脂和无纺布也开始变性,此时只有博亚 A 和博亚 B 树脂及木纤维 3 种材料未变性。变性后相应的吸液性能也有所下降,而未变性的材料吸液性能略有上升。由此可见,电解液温度对吸附材料的吸液性能和重复使用性能有较大影响。单从耐热性能来看,木纤维、博亚 A 和博亚 B 树脂 3 种材料最优。



◆——博亚 A(Boya A), ■——博亚 B(Boya B), ▲——博亚 C(Boya C), ×——SAP, *——脱脂纱布(Absorbent ganze), +——无纺布(Nonwovens), ▽——木纤维(Wood fiber), ■——聚酯纤维(Polyester fiber), o——活性纤维(Activity fiber), ◇——开孔海绵(Trepanning sponge), □——大孔 PVA(Macropore PVA), △——中孔 PVA(Mesopore PVA), ●——小孔 PVA(Micropore PVA)
 电流密度(Current density), 0.3 A/cm²; 极间距(Electrode spacing), 5 mm

图 4 电解时间变化对电解电压影响

Fig. 4 Effect of time on voltage

表 2 温度对吸附材料电解液吸附能力的影响

Table 2 Effect of temperature on electrolyte absorbability

类别(Category)	No.	名称(Name)	吸液倍率(Absorbency)/(g · g ⁻¹)					
			室温(Room temperature)	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
高吸水性树脂 (Super-absorbent polymer)	1	博亚 A(Boya A)	11	11	12	11	10	14
	2	博亚 B(Boya B)	17	12	9	10	12	15
	3	博亚 C(Boya C)	13	10	9	10	10	23 ¹⁾
	4	SAP	28	29	23	21	5 ¹⁾	1 ¹⁾
吸水海绵(Sponge)	5	中孔 PVA(Mesopore PVA)	10	10	10	6 ¹⁾	6 ¹⁾	
	6	小孔 PVA(Micropore PVA)	7	8	8	5 ¹⁾	5 ¹⁾	
吸水纤维类 (Absorbent fiber)	7	无纺布(Nonwovens)	14	14	14	14	14	1 ¹⁾
	8	木纤维(Wood fiber)	8	8	9	9	9	10
	9	聚酯纤维(Polyester fiber)	5	5	5	5 ²⁾	6 ²⁾	4 ²⁾
	10	活性纤维(Activity fiber)	7	6	6	6 ²⁾	6 ²⁾	3 ¹⁾

注(Notes): 1) 材料发生变性(The material performance changes)

2) 材料发生变色(The material develops discolored)

2.1.4 操作难易性能比较 从填充操作来看, 纤维类和海绵类材料可以直接填充, 而树脂类材料则需要用包敷包装后才能填充; 从吸液膨胀程度来看, 纤维类和海绵类材料低于树脂类材料。

2.2 电解参数选择试验

上述吸液材料筛选试验, 是参照槽式电解去污试验所确定的电解液配方(50 g/L 硝酸 + 100 g/L 硝酸钠)、电流密度(0.3 A/cm²)和极间距(5 mm)操作参数条件下进行的。对于一种吸附

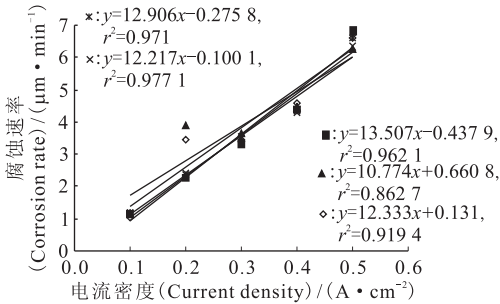
材料而言, 除了自身的吸液和排液性能之外, 外在因素如电流密度、极间距等, 也会影响其电解去污性能。因此, 用上述实验推荐的纤维类吸附材料作为实验材料, 进行了电流密度和极间距变化的影响实验。

2.2.1 电流密度对电解性能的影响

(1) 对腐蚀速率的影响

电流密度对金属腐蚀速率的影响示于图 5。从图 5 可知, 随着电流的不断增大, 金属腐蚀速率

不断上升,大体上呈线性变化规律,这说明在实际去污操作中,可根据对腐蚀速率的需求,线性地进行电流密度的调节。



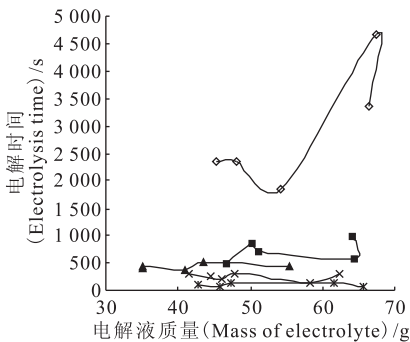
◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
*——活性纤维(Activity fiber)

图 5 电流密度对金属腐蚀速率的影响

Fig. 5 Effect of current density on corrosion rate

(2) 对电解维持时间的影响

电流密度对电解维持时间的影响示于图 6。从图 6 可知,随着电流密度的增加,电解维持时间明显缩短。这是由于电解反应速度随电流密度呈线性变化,而在吸液材料确定(即排液速率确定)的情况下,在低电流密度区,即电解液的供应量能够满足需求情况下,电流密度是主要控制因素;而在高电流密度区,即电解液的供应量可能出现不能满足需求的情况,此时电解液的供应量成为主要控制因素。因此,应选择电解液的供应量能够满足需求情况下的电流密度才有利于电解去污进程,即选择电流密度不大于 0.3 A/cm²。



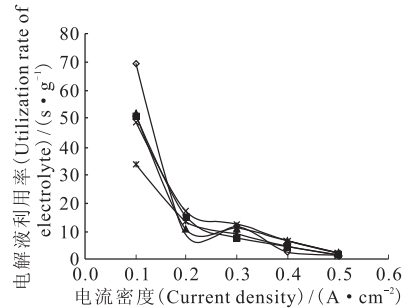
电流密度(Current density), A/cm²: ◇——0.1,
■——0.2, ▲——0.3, ×——0.4, *——0.5

图 6 电流密度对电解维持时间的影响

Fig. 6 Effect of current density on continuous electrolysis time

(3) 对电解液利用率的影响

电流密度对电解液利用率的影响示于图 7。从图 7 可以看出,随着电流密度的增加,电解液利用率不断下降,在低电流密度区的影响幅度明显大于高电流密度区,且随着电流密度的增加,各种材料之间的变化差异随之缩小。这是由于在低电流密度区,即电解液的供应量能够满足需求情况下,不同的吸液材料,可以显示出不同的利用率;而在高电流密度区,即所有吸液材料的电解液供应量均出现不能满足需求的情况,此时电解液的供应量成为主要控制因素,而无法准确显示出利用率的差异。从这一角度出发,进一步说明选择电流密度不大于 0.3 A/cm² 为宜。



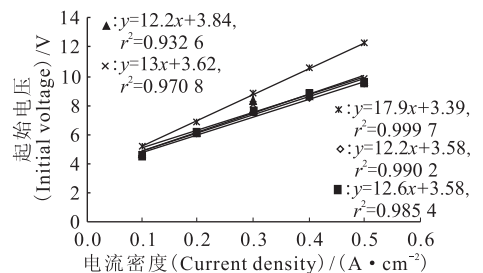
◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
*——活性纤维(Activity fiber)

图 7 电流密度对电解液利用率的影响

Fig. 7 Effect of current density on the utilization rate of electrolyte

(4) 对电解起始电压的影响

电流密度对电解起始电压的影响示于图 8。从图 8 可知,随着电流密度的增加,电解起始电压不断



◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
*——活性纤维(Activity fiber)

图 8 电流密度对电解起始电压的影响

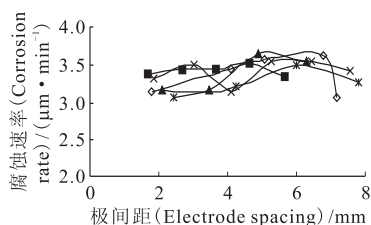
Fig. 8 Effect of current density on the initial voltage

升高,基本呈线性变化规律,其中活性纤维变化幅度高于其他吸附材料。可见在金属电解去污腐蚀速率可以接受的情况下,应尽可能选择较小电流密度。

2.2.2 极间距对电解性能的影响

(1) 对金属腐蚀速率的影响

极间距对金属腐蚀速率的影响示于图9。从图9可以看出,极间距在1~8 mm时对金属腐蚀速率的影响很小,各种材料之间的差异也较小。这说明在本试验所确定的柔性电解去污装置所能变化的极间距范围内,极间距的变化,对金属腐蚀速率影响较小。



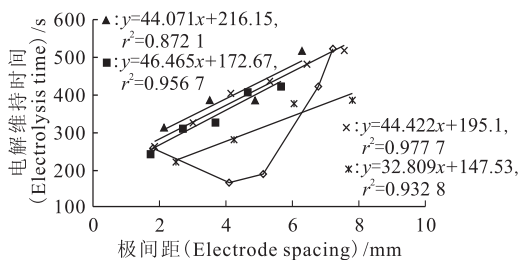
◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
※——活性纤维(Activity fiber)

图9 极间距对金属腐蚀速率的影响

Fig. 9 Effect of electrode spacing on corrosion rate

(2) 对电解维持时间的影响

极间距对电解维持时间的影响示于图10。从图10可以看出,随着极间距的增大,各种材料的电解时间也随之增加,除脱脂纱布之外的其他材料基本上呈线性变化规律。这是因为极间距的增大是由吸附材料的填充厚度增加来实现的,而吸附材料的厚度增加意味着电解液的吸液量和排液量均随之增加,从而导致电解维持时间的延长。



◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
※——活性纤维(Activity fiber)

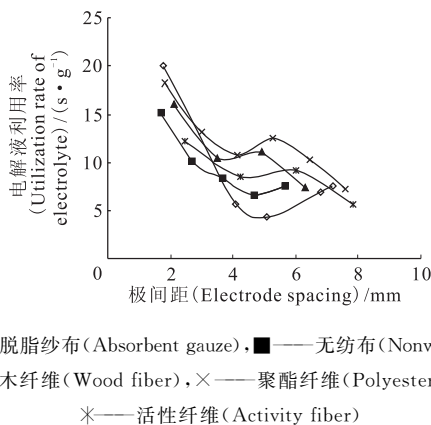
图10 极间距对电解维持时间的影响

Fig. 10 Effect of electrode spacing on continuous electrolysis time

对于基本上呈线性变化规律的吸液材料而言,实际使用中,可以根据对电解时间的需求,相应的调整极间距,即调整吸液量和排液量来实现目的。而对于呈现较大波动变化规律的脱脂纱布来说,随着材料厚度增加,吸液后材料的透气性能比吸液前大大降低,导致电解过程中产生的大量气体无法顺利排出,以至于不能像其它透气性能好的材料一样维持较长的电解时间。因此,脱脂纱布不能通过调整极间距来实现电解时间的控制。

(3) 对电解液利用率的影响

极间距对电解液利用率的影响示于图11。从图11可知,随着极间距的增加,电解液利用率呈非线性下降变化趋势,电解液利用率在极间距2~4 mm下降的很快,当极间距达到4 mm以后,随着极间距的增加,电解液利用率不再下降,变化趋于平缓。这是因为在极间距小的情况下,材料的厚度也很小,材料所吸收的电解液能够充分利用,电解中产生的气体能够顺利排出,不会对电解进程造成影响,所以电解液利用率很高。随着极间距的增加,材料的厚度增加,材料内部不能利用的电解液量增加很快,电解中产生的气体也由于材料厚度的增加排出阻力增大,对电解进行造成一定影响,导致电解液利用率快速下降。当极间距达到4 mm后,材料内部不能利用的电解液量增加变缓,电解中产生的气体排出阻力随材料的厚度增加也变缓,因此电解液利用率不再下降。由此可见,极间距应控制在不大于4 mm为宜。



◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
※——活性纤维(Activity fiber)

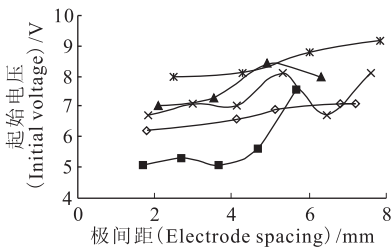
图11 极间距对电解液利用率的影响

Fig. 11 Effect of electrode spacing on the utilization rate of electrolyte

(4) 对电解起始电压的影响

极间距对电解起始电压的影响示于图12。

从图 12 可知,随着极间距的增加,电解起始电压呈非线性缓慢增长趋势。在 2~4 mm,随着极间距的增加,电解起始电压变化不大,当极间距大于 4 mm 后,电解起始电压有所增加。这可能是因为极间距小时,材料厚度很小,材料吸附电解液后材料之间的吸、排液或电解液在材料之间的迁移性能对电阻影响不大,而当极间距大于 4 mm 之后,材料之间的吸、排液或电解液在材料之间的迁移性能下降,对电阻影响较大,造成电解起始电压有所上升。可见,从对电解起始电压的影响来看,极间距选择不大于 4 mm 为宜。



◇——脱脂纱布(Absorbent gauze), ■——无纺布(Nonwovens),
▲——木纤维(Wood fiber), ×——聚酯纤维(Polyester fiber),
*——活性纤维(Activity fiber)

图 12 极间距对电解起始电压的影响

Fig. 12 Effect of electrode spacing on initial voltage

3 结 论

(1) 从性能比较中可知,吸水纤维类吸液材料是最适于垫式柔性电解去污的吸液材料。

(2) 电流密度的变化对金属腐蚀速率、电解液利用率、连续电解维持时间、电解起始电压等均有影响,会不同程度影响垫式柔性电解去污的最终效果以及去污过程的可控性。根据以往电解去污操作的经验,综合考虑后认为电流密度控制在不大于 0.3 A/cm^2 为宜。

(3) 极间距的变化对金属腐蚀速率影响很小,而对连续电解维持时间、电解液利用率和电

解起始电压造成不同程度的影响。综合考虑去污的需求,即维持较低起始电压和较高电解液利用率的角度来看,极间距选择不大于 4 mm 为宜。

参考文献:

- [1] 陆春海,孙颖. 化学去污技术的发展及其在核设施退役中应用[J]. 环境技术, 2002, 20(1): 25-32.
- [2] 陆春海,郎定木,刘雪梅,等. 电化学去污对基体材料不锈钢抗腐蚀性能的影响[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(6): 481-484.
- [3] International Atomic Energy Agency. Methods for the Minimization of Radioactive Waste From Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities-Technical Reports Series No. 401[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
- [4] Huff J B. Effectiveness of Various Solutions for Decontaminating Stainless Steel, Lead and Glass; IDO-14379[R]. Washington, D. C.: U. S. Atomic Energy Commission, 1956.
- [5] Allen R P, Arrowsmith H W, Charlot L A, et al. Electropolishing as a Decontamination Process; Progress and Applications; PNL-SA-6858[R]. California: California University, 1978.
- [6] Turner A D, Junkison A R, Pottinger J S, et al. Development of Remove Electrochemical Decontamination for Hot Cell Applications; EUR 14192[R]. Brussels: Commission of the European Communities, 1993.
- [7] 刘文仓,任宪文,张渊. 放射性核素污染的不锈钢表面电解去污技术研究[C]//核工业第一次放射性去污技术经验交流会文集. 北京:原子能出版社, 1990:65-72.
- [8] 刘文仓,任宪文,张渊. 金属管道内壁的电解去污试验[J]. 辐射防护, 1993, 13(3): 226-231.
- [9] 尹臣,张东,谭昭怡,等. 掺杂聚苯胺导电膜的制备及对核设施表面铀的去污[J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(6): 164-167, 171.
- [10] 董毅漫,曲云欢,刘婷. 柔性电解去污技术概述[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(11): 117-121.