



碳纤维蒸发帘强化蒸发池低放射性废水自然蒸发

曾志伟¹, 王攀^{2,3}, 战景明¹, 薛向明¹, 段宇建¹, 付建宇¹

(1. 中国辐射防护研究院, 山西太原 030006; 2. 中核安徽计量检测有限公司, 安徽阜阳 236500;

3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

[摘要] 为缓解铀矿冶企业低放射性废水水量增加带来的处理压力, 围绕碳排放量较低天然蒸发池技术提出蒸发帘强化自然蒸发技术。选用耐酸碱腐蚀、比表面积大、透气性能好、毛细效应明显的碳纤维编织布制作蒸发帘, 开展浸水-速干性能试验、小型化室内蒸发模拟试验及现场测试试验。结果表明: 碳纤维编织布具有良好的吸水性且有利于水分子的蒸发, W1021 平纹型编织布适宜制作蒸发帘; 碳纤维蒸发帘可强化自然蒸发, 提高温度和风速均可增强蒸发帘强化自然蒸发的效果。在对实际低放射性废水进行蒸发时, 碳纤维蒸发帘的日蒸发水量为 5.4 mm/d, 自然蒸发的日蒸发水量为 2.1 mm/d, 碳纤维蒸发帘可将自然蒸发水量提升 157.14%。蒸发帘强化自然蒸发技术效果良好, 可有效缓解铀矿冶企业低放射性废水的处理压力, 为需要提升自然蒸发水量的企业提供指导。

[关键词] 碳纤维; 蒸发帘; 蒸发池; 低放射性废水; 自然蒸发

[中图分类号] X703.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1005-829X(2022)10-0160-06

Carbon fiber evaporative curtain enhanced natural evaporation of low-level radioactive wastewater in evaporation pool

ZENG Zhiwei¹, WANG Pan^{2,3}, ZHAN Jingming¹, XUE Xiangming¹, DUAN Yujian¹, FU Jianyu¹

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 2. China Nuclear Anhui Metrology and

Testing Co., Ltd., Fuyang 236500, China; 3. Beijing Research Institute of Chemical

Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: In order to alleviate the treatment pressure caused by the increase of the volume of low-level radioactive wastewater in metallurgy enterprises of uranium mining, the evaporation curtain enhanced natural evaporation technology were proposed around the natural evaporation pool technology for the lower carbon emission. Carbon fiber woven fabric with resisting acid and alkali corrosion, large specific surface area, good permeability and obvious capillary effect, was selected to make evaporation curtain. The water immersion-drying performance test, miniaturized indoor evaporation simulation test, and field test were carried out. The test results showed that carbon fiber woven fabric had good water absorption and was conducive to the evaporation of water molecules. W1021 plain woven fabric was suitable for making evaporation curtain. Carbon fiber evaporative curtain could enhance the natural evaporation. Increasing temperature and wind speed could enhance the effect of evaporative curtain on natural evaporation. When the actual evaporation of low-level radioactive wastewater was carried out, the daily evaporation water of carbon fiber evaporation curtain was 5.4 mm/d, and the daily evaporation water of natural evaporation was 2.1 mm/d. Carbon fiber evaporation curtain could increase the natural evaporation water by 157.14%. The evaporative curtain enhanced natural evaporation technology had a good effect, which could effectively relieve the treatment pressure of low-level radioactive wastewater in metallurgy enterprises of uranium mining, and provided guidance for enterprises that need to increase the amount of natural evaporation.

Key words: carbon fiber; evaporation curtain; evaporation pool; low radioactive wastewater; natural evaporation

截至 2020 年, 中国核电装机容量逐年递增到 5.1×10^7 kW, 核电装机总容量位居世界第三^[1]。但

在核电稳步发展取得丰硕成果的同时, 作为核电“粮仓”的铀矿冶, 其放射性“三废”的产生量也在迅

猛增加,特别是低放射性废水的体量增加最快。目前,国内外铀矿冶企业普遍采用天然蒸发池技术处理铀矿山产生的低放射性废水^[2]。天然蒸发池技术利用废水自然蒸发的物理规律实现废水处理,具有处理成本低、工艺简单、碳排放量低^[3]的优点,其技术核心是把蒸发池废水中含量最多的非放射性液态水以水蒸气的形式逸散到大气环境中,难挥发的放射性核素如铀、钍、镭等残留在蒸发池中并结晶形成底泥。

内蒙古某地浸铀矿企业采用蒸发池技术处理低放射性废水,该放射性废水总 α 为763 Bq/L,总 β 为394 Bq/L,主要离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 的质量浓度分别为56.3、1.31、46.7 g/L;随着企业增产以满足核电供应需要,现有蒸发池废水处理量已经无法适应企业生产需求,亦无多余土地扩建新的蒸发池。

使用比表面积大、毛细效应明显和可吸收红外辐射的蒸发帘作为蒸发载体,可强化蒸发池低放射性废水的自然蒸发。蒸发帘蒸发模型见图1。蒸发池中的废水被潜水泵抽取喷淋在蒸发帘上;由于毛细效应,蒸发帘内部及表面充盈着废水,达到了扩大废水表面积的作用;被废水浸透的蒸发帘在太阳辐射和风力的作用下进行自然蒸发,水分子从蒸发帘表面逸散至空气中。

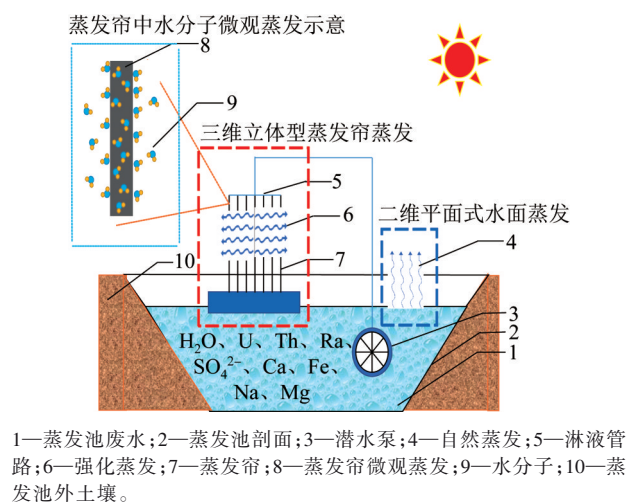


图1 蒸发帘强化蒸发池废水自然蒸发模型

Fig. 1 Natural evaporation model of wastewater in evaporation pool enhanced by evaporation curtain

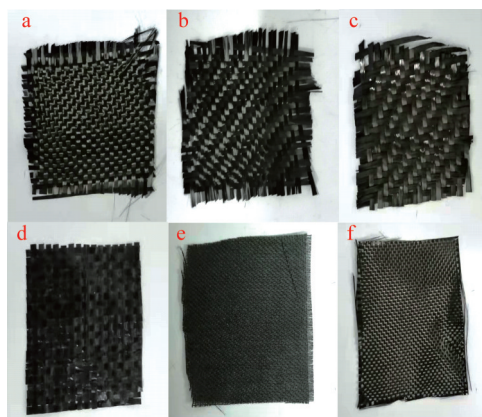
本研究在不影响现有铀矿冶企业地浸采铀环保安全性,且受制于无法增加蒸发池面积的情况下,提出蒸发帘强化自然蒸发技术,利用蒸发帘浸水-速

干性能试验探究可行性、小型室内蒸发模拟试验验证、现场实际测试蒸发效果3方面开展了蒸发帘强化蒸发池低放射性废水自然蒸发的研究。

1 实验部分

1.1 蒸发帘浸水-速干性能试验

本研究选取具有耐酸碱腐蚀、比表面积大、透气性能好、毛细效应明显、可吸收红外辐射等优点的碳纤维编织布作为制作蒸发帘的备选材料^[4-9]。碳纤维编织布的型号有W7021平纹型、W7011斜纹型、W3021平纹型、W3011斜纹型、W1021平纹型、W1011斜纹型,形貌见图2。



a—W7021平纹型;b—W7011斜纹型;c—W3021平纹型;d—W3011斜纹型;e—W1021平纹型;f—W1011斜纹型。

图2 碳纤维编织布形貌

Fig. 2 Morphology of carbon fiber woven fabric

为掌握碳纤维编织布的浸水-速干情况,选出浸水-速干性能最好的碳纤维编织布材料制作蒸发帘,依据《纺织品 吸湿速干性的评定 第1部分:单项组合试验法》(GB/T 21655.1—2008)和《纺织品 吸湿速干性的评定 第2部分:动态水分传递法》(GB/T 21655.2—2009)设计碳纤维编织布材料的浸水-速干性能试验。

剪取尺寸为10 cm×10 cm的碳纤维编织布试样并浸泡在盛有1 000 mL去离子水的烧杯中,将烧杯放置在45℃的电热恒温水浴振荡器中振荡60 min,清洗样品表面的污渍、浮灰、碎屑等;将清洗完毕的样品放入电热恒温干燥箱中,60℃烘干3 h;将干燥后的样品放于含水率测定仪(艾科瑞德,QL-720A)上,称量样品未蘸水时的初始质量,重复称量3次取平均值,记作 m_0 ;随后将样品放于烧杯中吸水10 min,再次称重,材料饱和和浸湿质量记作 m_1 。设置含水率测定仪加热蒸发温

度分别为20、40、60℃^[10],每1 min记录1次材料质量,记作 $m_j(j=1,2,3\cdots 10\text{ min})$;10 min后切断含水率测定仪电源,取出实验样品。

为方便衡量试验材料的浸水程度,定义浸水率 ω ,即单位质量试验材料吸收水的质量,计算方法见式(1)。

$$\omega = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω ——试验材料的浸水率,%;

m_1, m_0 ——试验材料吸水饱和和未吸水时的质量,kg。

为方便衡量试验材料的失水速干能力,定义蒸发率 σ ,即试验材料浸水达到饱和后在单位面积、单位时间内含水量的损失情况,计算方法见式(2)。

$$\sigma = \frac{(m_j - m_{j-1})}{A \cdot t} \quad (2)$$

式中: σ ——试验材料的蒸发率,kg/(m²·h);

m_j, m_{j-1} ——试验材料在 $j, j-1$ 时刻的质量,kg;

A ——试验材料的表面积,m²;

t ——蒸发时间,h。

1.2 小型室内蒸发模拟试验

利用恒温恒湿舱提供恒温恒湿实验环境,在实验室搭建小型室内蒸发模拟装置。W1021平纹型碳纤维编织布尺寸为1 m×18 m,蒸发帘间隔10 cm;蒸发帘走向与风向平行,以便最大化利用风力资源^[11-12];使用工业风机模拟自然风,采用硫酸钠配制水样代替蒸发池废水^[13]。实验装置见图3。



图3 小型化室内蒸发模拟实验装置

Fig. 3 Miniaturized indoor evaporation simulation experimental device

在模拟蒸发水槽中盛放足够用量的蒸发配制水,记录蒸发水槽在恒温恒湿舱内的自然蒸发量并作为本底蒸发量。使用变流量潜水泵将蒸发配制水

抽到布液管中,布液管再将水均匀持续喷淋在蒸发帘上5 min,然后蒸发10 min;往复间歇供水蒸发,实验时间为8 h。测试不同环境温度和风速条件下碳纤维蒸发帘强化自然蒸发的情况。

1.3 现场测试试验

为定量测量碳纤维蒸发帘的蒸发效果,在内蒙古地浸铀矿企业进行现场测试试验。该企业建有4个面积约6 000 m²的蒸发池,年平均风速>3 m/s,年平均温度为3.8℃,是非常合适的测试地点。在蒸发池边搭建2个规格一致的1.5 m×1.5 m×0.4 m的试验池,测试场地见图4。



图4 现场测试试验

Fig. 4 Field test experiment

在2个试验池中加入同等深度的蒸发池废水,将采用碳纤维蒸发帘强化自然蒸发技术的装置放入其中1个蒸发水池,编号为1#(图4左);另1个试验池作为对照组测量当地的自然本底蒸发量,编号为2#(图4右)。现场测试连续进行10 d,日测试时长为8 h。

2 结果与讨论

2.1 蒸发帘浸水-速干性能试验结果

强化水分子的自然蒸发,首先要考虑蒸发帘材料的浸水-速干性能:(1)材料本身是否能够充盈废水;(2)材料在饱和含有废水后的失水速干情况。只有同时满足上述2项指标,蒸发帘才能实现强化自然蒸发的效果。首先对6种碳纤维材料制作的蒸发试样进行标况(25℃)下的浸泡吸水试验,试验时长10 min,计算各碳纤维材料的浸水率 ω 。然后在不同温度下对蒸发试样进行失水速干能力测试,得到蒸发率 σ 随时间的变化曲线,结果见图5。

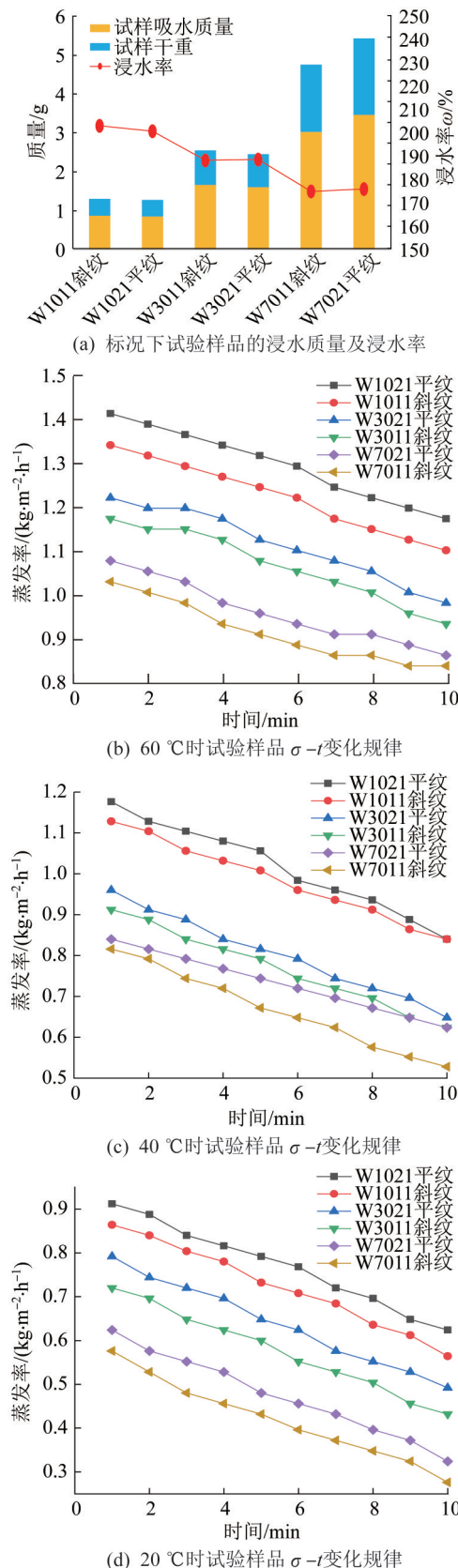


图5 试验样品浸水率和蒸发率的变化

Fig. 5 Immersion rate and evaporation rate of test samples

由图 5(a)可知,6 种不同型号碳纤维编织布制作的试样中,浸水率 ω 从高至低依次为 W1011 斜纹型、W1021 平纹型、W3011 斜纹型、W3021 平纹型、W7011 斜纹型、W7021 平纹型。试样吸水质量大于试样干重,表明试样具有不错的吸水性能。随着试样干重增加,试样吸水质量也随之增加,试样吸收容纳的水越多。对比斜纹型和平纹型试样的干重和吸水质量,编织方式对试样的吸水性能影响不大。

由图 5(b)~(d)可知,不同型号碳纤维编织布制作的试样的蒸发率均随时间的延长逐渐减小,蒸发率在 1 min 时较大,10 min 时最小。W1021 平纹型编织布的失水速干能力明显大于其他试样。随着蒸发温度的降低,蒸发率随时间的变化曲线逐渐向下偏移,表明试样的蒸发率随温度降低而减小,蒸发效果下降。蒸发率从高至低依次为 W1021 平纹型、W1011 斜纹型、W3021 平纹型、W3011 斜纹型、W7021 平纹型、W7011 斜纹型。这是由于蒸发温度降低时,试样中水分子从环境中吸收的热能减少,动能大于分子间作用力的水分子数量减少,可从蒸发试样表面逸出至空气环境中的水分子数量减少。值得注意的是,同样厚度、不同编织方式的碳纤维蒸发试样,采用平纹编织方式要比斜纹编织方式的蒸发率大一些,这是由于碳纤维束采用平纹编织时空隙度要大于斜纹编织,试样的空隙度大对应着透气性好,利于传热以及水分子从空隙蒸发至空气中。

综上,温度会影响碳纤维蒸发帘的蒸发率,并且宜选取浸水率和蒸发率都比较大的 W1021 平纹型编织布制作蒸发帘。

2.2 小型化室内蒸发模拟试验结果

利用小试试验探究一定面积蒸发帘强化自然蒸发的实际效果,并掌握在蒸发帘面积不变时,温度、风速对蒸发帘实际蒸发效果的影响,结果见图 6。

从图 6 可以看出,碳纤维蒸发帘的蒸发水量要高于本底蒸发量。对于一定面积的碳纤维蒸发帘,相同温度条件下,蒸发水量随风速的增大而增加,原因是随着风速的增加,从蒸发帘表面蒸发出的水分子更容易被风力吹到远离蒸发帘的空气环境中,从而减少了液化返回蒸发帘的水分子数量。对于面积恒定的蒸发帘,在相同风速条件下,碳纤维蒸发帘的蒸发水量随着温度的升高而增加,原因是存在于碳纤维蒸发帘内的水分子可从较高室温环境中获得更

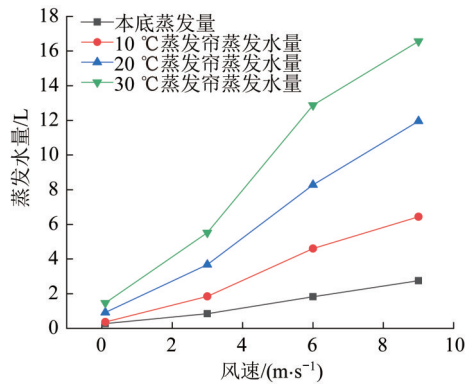


图6 风速和温度对碳纤维蒸发帘增效蒸发影响

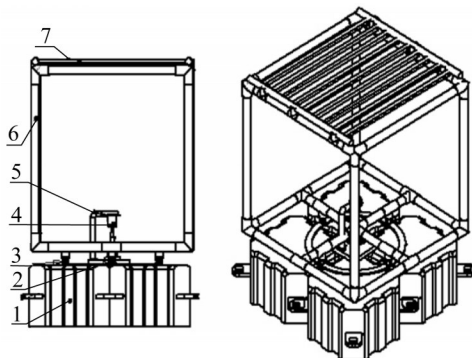
Fig. 6 Effect of wind speed and temperature on carbon fiber evaporation curtain

多热量,微观上表现为动能大的水分子更多,宏观上表现为蒸发水量增加^[14]。

综上,小型实验室模拟蒸发试验验证了蒸发帘具有强化自然蒸发的效果。环境温度相同时,随着风速的增加,蒸发水量增加;风速相同时,蒸发水量会随着环境温度的升高而增加。

2.3 现场测试试验结果

本研究设计了1套搭载三维立体型蒸发帘的现场试验装置。该装置主要由浮筒装置、辅助旋转电机系统、框架结构组成。在浮筒平台边缘水面位置固定1台潜水泵抽取池中废水,沿框架结构布置塑料软管将废水引流至喷淋装置,在喷淋装置下方垂挂W1021平纹型碳纤维蒸发帘。装置基本参数:尺寸为1 m×1 m×1.5 m,浮筒平台满载浮力为3 430 N,装置净重48 kg,额定功率45 W。装置结构见图7。该蒸发帘固定于浮筒平台而漂浮在蒸发池中,不会占用蒸发池外土地面积,有效地节约了土地资源。



1—浮筒装置;2—旋转电机;3—旋转轮;4—风向仪;5—风向仪架;6—框架;7—喷淋装置。

图7 蒸发帘强化自然蒸发装置示意

Fig. 7 schematic diagram of evaporation curtain enhanced natural evaporation device

利用该实验装置进行的现场试验结果见表1。

表1 现场测试数据

Table 1 Field test data

天数/d	平均气温/℃	风速/(m·s ⁻¹)		水体表面温度/℃		日蒸发水量/(mm·d ⁻¹)	
		最高值	最低值	最高值	最低值	1#	2#
1	9.2	4.43	2.78	8.4	7.3	6	2
2	8.5	3.95	3.02	8.2	7.2	6	2
3	8.9	4.59	2.99	8.3	7.5	6	2
4	9.1	3.96	3.52	9.3	7.2	6	2
5	8.9	3.11	2.05	8.8	6.9	5	2
6	9.3	2.03	1.87	9.5	8.2	4	2
7	8.7	3.87	3.54	8.8	6.6	6	2
8	9.0	4.38	4.04	9.1	7.9	7	3
9	9.3	2.45	1.76	9.2	8.4	4	1
10	8.8	2.33	1.86	9.0	8.5	4	2

现场测试结果表明,使用碳纤维蒸发帘的1#试验池水位下降明显,而2#试验池水位基本无变化。由表1可知,在连续10 d的测试中,1#试验池的平均日蒸发水量为5.4 mm/d,2#试验池为2.1 mm/d。由此,对于同环境下的池内蒸发,采用碳纤维蒸发帘蒸发方式的蒸发水量是普通自然蒸发水量的2.57倍,碳纤维蒸发帘能够将原本的自然蒸发水量提升157.14%。

工程实际应用中的蒸发装置如图8所示。



图8 应用中的强化蒸发装置

Fig. 8 Enhanced evaporation device in application

3 结论

本研究依据内蒙古地浸铀矿企业废水治理为工程背景,采用蒸发帘形式扩大蒸发池废水的蒸发水量。主要获得以下结论:

(1)碳纤维编织布具有不错的吸水性能和蒸发性能,W1021平纹型编织布更适宜制作蒸发帘。

(2)碳纤维蒸发帘的蒸发水量高于本底蒸发量,碳纤维蒸发帘可强化自然蒸发。提高温度和风速可增大碳纤维蒸发帘蒸发水量。

(3)现场试验验证了采用碳纤维蒸发帘能够将低放射性废水的自然蒸发水量提升157.14%。

(4)蒸发帘强化自然蒸发具备良好的效果,可有效缓解铀矿冶企业低放射性废水的处理压力,为需要提升自然蒸发水量的企业提供指导。

参考文献

- [1] 王宇,朱沈超,陈芳斌,等.中国核电与可再生能源发电协调发展初探[J].可再生能源,2021,39(8):1069-1077.
WANG Yu, ZHU Shenchao, CHEN Fangbin, et al. A preliminary study on the coordinated development of nuclear and renewable energy power generation in China[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8): 1069-1077.
- [2] 张华.天然蒸发池技术处理低水平放射性废液的发展概况[J].同位素,2016,29(1):58-64.
ZHANG Hua. Research and development of solar evaporation on low level radioactive liquid waste[J]. Journal of Isotopes, 2016, 29(1): 58-64.
- [3] 刘彬.中国实现碳达峰和碳中和目标的基础、挑战和政策路径[J].价格月刊,2021(11):87-94.
LIU Bin. The basis, challenge and policy path for China to achieve the goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Prices Monthly, 2021(11): 87-94.
- [4] PAN Meng, CUI Chang, TANG Weiwu, et al. Carbon cloth as an important electrode support for the high selective electrosorption of uranium from acidic uranium mine wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 281: 119843.
- [5] 林刚.碳纤维产业“聚”变发展:2020全球碳纤维复合材料市场报告[J].纺织科学研究,2021,32(5):27-49.
LIN Gang. “Poly” development of carbon fiber industry: 2020 global carbon fiber composite market report[J]. Textile Science Research, 2021, 32(5): 27-49.
- [6] 黄波,江鸿,贺周同,等.熔盐堆石墨控制棒套管碳纤维布增强工艺及性能研究[J].核技术,2021,44(4):85-92.
HUANG Bo, JIANG Hong, HE Zhoutong, et al. Study on the reinforcement process and performance of carbon fiber fabric for graphite control rod guide tube of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(4): 85-92.
- [7] WANG Zhen, XIE Hui, LUO Quantian, et al. Optimization for formability of plain woven carbon fiber fabrics[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 197: 106318.
- [8] REN Liucheng, REN Yanjuan, ZHANG Yafei, et al. Graphite films/carbon fiber fabric/polyurethane composites with ultrahigh in-plane thermal conductivity and enhanced mechanical properties[J]. Nanotechnology, 2020, 31(47): 475710.
- [9] 杜娟娟,李元.生态碳纤维在水污染治理中的吸附及挂膜性能研究[J].水资源开发与管理,2019,17(8):48-51.
DU Juanjuan, LI Yuan. Adsorption of ecological carbon fiber in water pollution control and study on its film-forming performance[J]. Water Resources Development and Management, 2019, 17(8): 48-51.
- [10] 尹冠生,赵振宇,徐兵.太阳辐射作用下拱桥温度场研究[J].应用力学学报,2014,31(6):939-944.
YIN Guansheng, ZHAO Zhenyu, XU Bing. Study on the thermal field of arch bridge by solar radiation action[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(6): 939-944.
- [11] 蔺发军,王红光,林乐科,等.风向对蒸发波导环境特性影响的研究[J].电波科学学报,2007,22(3):410-413.
LIN Fajun, WANG Hongguang, LIN Leke, et al. Influence of wind direction on characteristics of evaporation duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 410-413.
- [12] 李喜龙,王海珍,蔚龙凤,等.地浸矿山风能增效蒸发装置的研究与应用[J].铀矿冶,2019,38(2):128-132.
LI Xilong, WANG Haizhen, WEI Longfeng, et al. Research and application of wind energy for synergistic evaporator at in situ leaching mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(2): 128-132.
- [13] 蔚凤珍,方向红.真空蒸发浓缩装置在核放射废水处理中的应用试验[J].工业水处理,2009,29(9):62-65.
WEI Fengzhen, FANG Xianghong. Experimental research on the vacuum evaporating device and its application to the treatment of radioactive wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(9): 62-65.
- [14] 郭春文.蒸发扩散布朗运动的宏观微观讨论[J].物理通报,2020(S2):118-119.
GUO Chunwen. Macroscopic and microscopic discussion on Brownian motion of evaporation diffusion[J]. Physics Bulletin, 2020(S2): 118-119.

[作者简介] 曾志伟(1996—),硕士。电话:13522163848, E-mail: 1248071792@qq.com。通讯作者:王攀,高级工程师。E-mail: wpsxyq@163.com。

[收稿日期] 2022-08-17(修改稿)