

剪切技术强化膜分离过程的研究进展

王 鹏^{1,2}, 韩严和^{1*}, 李雪峰¹, 陈家庆¹, 张晓飞³

(1. 北京石油化工学院环境工程系, 北京 102617; 2. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124;
3. 中国石油安全环保技术研究院, 北京 102206)

摘要: 为了降低浓差极化和膜污染, 剪切强化膜分离技术成为当前膜技术方面的研究热点。剪切强化膜分离技术主要包括旋转管式剪切膜分离技术、旋转盘式剪切膜分离技术和振动剪切膜分离技术。旋转管式和旋转盘式剪切膜分离技术都是通过旋转使膜表面产生剪切力来减少膜表面的污染物。振动剪切膜分离是通过扭转弹簧将偏心块产生的振动传递到过滤膜盘, 振动产生的剪切力使污染物不易沉积。旋转管式和旋转盘式剪切膜分离技术因设备旋转耗能较大, 从而限制了其实际应用的广泛性。振动剪切膜分离技术能耗较低, 且可以浓缩浓度较高的液体, 但其核心技术被垄断而限制了推广。因此, 振动剪切膜分离技术的研究和设备的开发将是未来研究的重点。

关键词: 剪切技术; 旋转管式膜; 旋转盘式膜; 振动剪切膜

中图分类号: TQ028.8; X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)11-0041-05

Development of membrane separation process enhanced by shearing force

WANG Peng^{1,2}, HAN Yan-he^{1*}, LI Xue-feng¹, CHEN Jia-qing¹, ZHANG Xiao-fei³

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;
2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to reduce the polarization and membrane fouling, shear-enhanced process has been focused on. The shear-enhanced process contains rotary tubular shear membrane, rotary disk shear membrane and vibratory shear-enhanced process. Rotary tubular shear membrane and rotary disk shear membrane reduces the fouling by the shearing force of the rotation of the membrane. Vibratory shear-enhanced process makes the fouling not easy to deposit by the shearing force generated from the vibration of eccentric block. Rotary tubular and rotary disk shear membranes are limited because of the energy consumption. Vibratory shear-enhanced process has more application due to the low energy consumption and getting high concentration of the liquid. But, its promotion is difficult because of the monopoly of its core technology. Therefore, the study of vibratory shear-enhanced process and the development of equipment will become the emphases in the future.

Key words: shearing technology; rotary tubular shear membrane; rotary disk shear membrane; vibratory shear-enhanced process

膜分离是一种有效的分离技术,能够在常温下进行操作,分离过程中保持原有物质的物理化学性质不变,可以进行分子级的物质分离,工艺简单,能耗低。因此,膜分离技术已经在污染治理方面得到实际的应用。然而,膜分离过程中存在着浓差极化和膜污染等问题阻碍了膜分离技术的发展。为了解决浓差极化和膜污染等问题,国内外研究者从进料液预处理、膜材料改性、添加阻垢剂等方面进行了有效探索。进料液预处理主要是在膜分离前增加精滤过程等^[1],但该方法使得膜分离流程变得更加复杂化,增加了成本。膜材料改性主要是改变膜的亲水性来提高膜通量^[2],但是因为改性后的膜价格过高很难得到推广。添加阻垢剂主要是通过向进料液中投加化学药剂来阻碍膜污染^[3],尽管效果比较明

显,但容易导致二次污染。近年来研究者发现,可以通过改进膜工艺的操作过程来解决浓差极化和膜污染。其中,剪切技术取得了良好的效果。目前,强化膜分离的剪切技术主要包括旋转管式剪切、旋转盘式剪切和振动剪切等技术。本文中将从旋转管式剪切膜分离技术、旋转盘式剪切膜分离技术、振动剪切膜分离技术3方面进行探讨。

1 旋转管式剪切膜分离技术

旋转管式剪切膜过滤器的构造如图1所示。旋转管式剪切膜过滤器主要由同心的固定外圆筒和旋转内圆筒组成,在分离过程中内圆筒旋转而外圆筒静止,料液在环管隙空间内流动。过滤液通过膜孔进入膜管内腔,并从滤液出口处流出,环隙内的浓缩

收稿日期:2014-05-13;修回日期:2014-09-02

基金项目:北京市属高校青年拔尖人才培养计划(CIT&TCD201304098);北京市属高等学校人才强教深化计划(PHR201107213);北京市优秀人才培养资助项目(2012D005005000002);北京市教委科技计划面上项目(20140003);大学生、研究生URT项目资助(2014J00050、14033921005)

作者简介:王鹏(1988-),男,硕士生;韩严和(1976-),男,副教授,主要从事污水深度处理,通讯联系人,010-81292291, hanyanhe@bipt.edu.cn。

液从浓缩液出口处流出。旋转管式剪切膜分离技术是通过高速旋转产生的剪切力使膜表面的污染物不易沉积,从而达到提高膜通量的目的。早在 1923 年, Taylor 首次忽略了 N-S 方程中的非线性项,通过贝塞尔-傅里叶变换求解了库特流中的扰动方程,提出了两同心圆筒间二次流的稳定性问题,并通过实验验证了其理论与实际现象的吻合性。同时得出,在临界转速时,液体主流方向是沿轴线流动,但同时还存在沿轴向排列的一串相邻相反的涡旋流动,涡流直径等于 2 个筒体环隙的宽度,将这种涡流称之为泰勒涡,如图 2 所示。这种泰勒涡对膜面产生强大的剪切力,从而削弱膜表面的污染物沉积,强化了膜过滤功能。

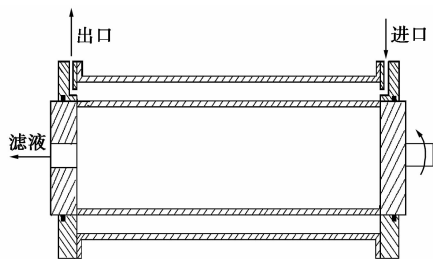


图 1 旋转管式剪切膜器

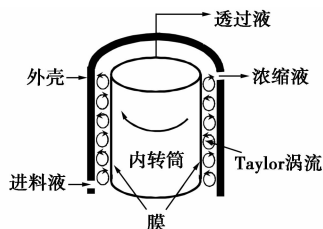


图 2 旋转管式膜内部流场示意图

Taylor 得出,当泰勒数 Ta 大于临界泰勒数 Ta_c ,且环隙宽度与内筒半径之比远小于 1 时,将会产生 Taylor 涡,其 Taylor 数 Ta 可通过式(1)进行计算:

$$Ta = \omega R^{0.5} d^{1.5} / \nu \quad (1)$$

式中, Ta 为泰勒数; ω 为内筒旋转角速度; R 为内筒半径; d 为环隙宽度; ν 为流体运动黏度。

从式(1)可以看出,泰勒数与内筒角速度、内筒半径、环隙宽度和流体运动黏度有关。Taylor 通过测量施加在内筒的扭矩,推导出剪切率 γ 的计算公式:

$$\gamma = 0.23Ta^{0.5} \omega R/d = 0.23\omega^{1.5} R^{1.25} d^{-0.25} \nu^{-0.5} \quad (2)$$

从式(2)可以得出,旋转角速度、内筒半径越大,膜表面的剪切率也越高,其阻碍膜污染的效果也越好。

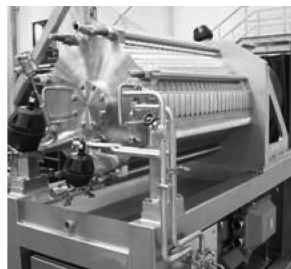
Kim 等^[4]将旋转管式剪切膜分离技术应用于纯

氧生产中,获得了良好的效果,该技术可以应用到特殊环境的大气污染控制中。张晓娜等^[5]采用往复式旋转管式膜分离技术处理脱脂奶水溶液,结果表明,采用往复式旋转管式膜分离技术比死端过滤和单向旋转过滤能更好地阻碍膜污染,保持膜通量。Jiang 等^[6]通过一系列的研究和实验也发现,通过增加旋转速度可以显著降低膜表面的污染,并发现在膜生物反应器中增加旋转管式膜的旋转速度减少膜污染比增加曝气更节约能源。

上述国内外研究表明,旋转管式剪切膜分离技术能有效减小浓差极化和膜污染,提高膜通量。然而,这种旋转管式剪切膜分离技术会随着流动阻力增大,驱动膜管旋转需要额外增加传动设备,且旋转速度越高,耗能越大,从而导致膜分离成本的增加,难以应用于大规模水量的处理。因此,开发新型的旋转管式膜设备,增加有效膜面积,减少旋转消耗的能量,才能使旋转管式膜分离技术得到更广泛的应用。

2 旋转盘式剪切膜分离技术

在旋转管式剪切膜分离技术基础上,研究者用旋转圆盘代替旋转圆管,取得更好的膜分离效果。旋转盘式剪切膜分离技术逐步完善,目前主要有 2 种形式:一种是单轴旋转盘式剪切膜分离组件,如图 3(a)所示;另一种是多轴旋转盘式剪切膜分离组件,如图 3(b)所示。



(a) 单轴



(b) 多轴

图 3 旋转盘式剪切膜

图 4 为旋转盘式剪切膜分离设备的内部结构图,其主要由内部固定剪切板、旋转圆盘、膜及网孔结构组成。料液从进料口进入旋转盘式剪切膜分离设备,在膜表面做近似同心的线性运动,过滤液透过膜,然后穿过网孔结构,进入膜盘内部从中间过滤液管道排出,浓缩液则从顶端的浓缩液出口排出。旋转盘式剪切膜分离设备主要是通过圆盘旋转,使膜表面产生强大的剪切力,使料液中污染物不容易在膜表面沉积,从而有效地防止膜污染。

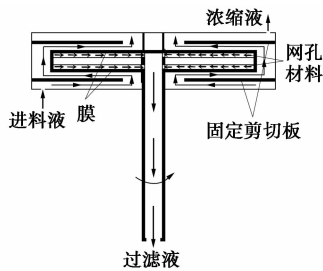


图4 旋转盘式膜内部流场示意图

Bouzerar 等^[7]给出了旋转盘式剪切膜分离设备中液体在层流和湍流2种状态的剪切率计算公式。

液体在层流流动的情况下的剪切率 γ_1 公式为:

$$\gamma_1 = 0.77(k\omega)^{1.5}rv^{-0.5} \quad (3)$$

式中, ω 为圆盘旋转角速度; r 为流体位置距圆盘圆心的距离; ν 为黏度系数; k 为角速度系数,当膜表面较平滑时, k 取0.42。

液体在湍流流动的情况下的剪切率 γ_1 公式为:

$$\gamma_1 = 0.0296(k\omega)^{1.8}r^{1.6}\nu^{-0.8} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)可以看出,无论是层流还是湍流,膜表面的剪切速率都与圆盘转动的角速度 ω 成正比,角速度越大,其膜表面剪切率也越大;越靠近圆盘边缘,膜表面的剪切率越大。

目前,旋转盘式剪切膜分离技术在许多领域得到了实际的应用。Bhattacharjee 等^[8]用旋转圆盘分离技术对造纸厂产生的黑液进行处理,发现旋转圆盘式膜分离技术要优于搅拌式膜分离技术,更有效降低了浓差极化。Brugnoni 等^[9]通过研究发现,旋转圆盘剪切膜分离技术提供的剪切力可以加快酵母菌的分离,并且被成功运用在果汁酿造行业中酵母菌的分离。Hwang 等^[10]通过对微藻的浓缩过滤实验得出增加圆盘转速能够增加膜的表面剪切力,有效提高微藻的分离效果。Dutta 等^[11]将旋转盘式膜分离和常规错流过滤技术进行对比实验,结果表明,同样的条件下旋转速度只需达到50 r/min就能够较好地阻碍膜污染,并且膜通量是常规错流过滤的2倍。

上述国内外研究表明,旋转盘式剪切膜分离技术能够有效提高膜通量,也能够减小浓差极化和膜污染。但随着处理量的加大,膜盘的数量增加,旋转盘式剪切膜分离技术中心转轴带动膜盘旋转需要承受的力也越大,因此,中心转轴需要很高的机械强度,使旋转盘式剪切膜分离技术的应用受到了一定的限制。尽管有研究者^[12]提出,通过实验得出通过低速的大面积膜盘代替高速的小面积膜盘可以产生

相同甚至更好的处理效果,从而减少膜盘数量,减轻中心转轴的压力,但该研究也仅适用于进料液流量较少的情况,难以得到更为广泛的推广。因此,研究者们应对旋转盘式膜分离设备的结构进行优化,减少转轴旋转承受的压力。

3 振动剪切膜分离技术

针对于旋转管式剪切膜分离技术带动膜管旋转需要能耗较大,旋转盘式剪切膜分离技术对转轴材料的要求较高的缺点,Brad 在1985年首先发明了振动剪切膜分离过程,即Vibratory Shear-Enhanced Processing,以下简称VSEP。

3.1 振动剪切膜分离技术简介

VSEP的核心主要是由膜过滤系统(如图5^[13]所示)和振动驱动系统(如图6所示)组成。膜组件主要由下支撑不锈钢盘碟、上支不锈钢盘碟、膜等组成。工作时,料液通过下支撑不锈钢盘碟的小孔进入膜组件,沿膜表面遵循近似同心线性流动,浓缩液通过浓缩液出口孔流出,滤液通过上支撑不锈钢盘碟出口收集加以回用。振动驱动系统主要是在电机驱动轴上安装一个偏心块,电机转动时带动偏心块一起旋转,偏心块旋转产生的惯性力通过扭力杆传递到过滤圆盘,使膜盘产生振动,从而在膜表面产生强烈的剪切力,可以有效地防止料液中的固体颗粒和菌胶团等絮体在膜表面附着,使系统达到较高的能量效率。VSEP与传统的错流过滤系统相比更有优势,它的振动剪切作用能够阻碍膜污染,保持膜通量稳定。

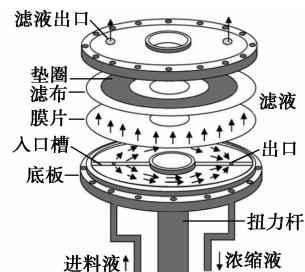


图5 VSEP系统内部结构图

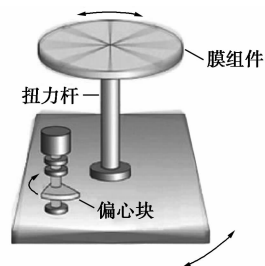


图6 VSEP的原理图

VSEP 内部过滤介质表面流动情况如图 7 所示。在 VSEP 中,振动剪切的应力波以一种类似正弦波的形式从振动的膜表面扩散开,使得膜表面的边界层破坏,同时加快了物质由膜表面向液相主体的传递速度,从而使沉积物从膜的表面弹起与本体溶液混合,并随本体溶液流动而不易沉降黏附在膜的表面,从而减小膜污染。VSEP 产生的剪切力是错流过滤的 3~10 倍,并且在分离效果上也明显优于传统的错流过滤。

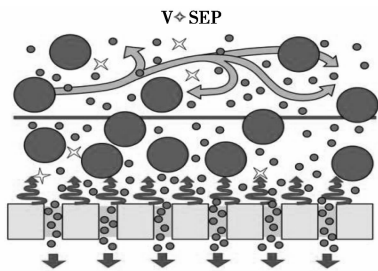


图 7 VSEP 过滤介质表面流动情况

图 8 为 VSEP 的实际效果图, VSEP 占地面积小,仅为 1.85 m²,但过滤面积可达 185 m²,让膜工作面积达到占地面积的 10~100 倍。VSEP 系统还易于扩展模块,添加新的模块都比较简单,不需要其他复杂的设备,这是其他膜分离设备所不具备的特点。VSEP 具有很高的效率,而且能耗低于旋转式剪切膜分离技术^[14]。VSEP 在进行工业应用之前,通过小样本测试的试验模拟,可以估算出实际工业应用运行中的一些性能参数,并可预算实际运行的资金成本以及是否达到处理的预期值。



图 8 VSEP 工业应用设备装置图

3.2 振动剪切膜分离技术的理论原理

最初, Rosenblat 给出了在振动情况下两圆盘间牛顿流体的流动规律。后来, Sharma 和 Gupta 将它推广到非牛顿流体,并且可以通过半径 r 和振动频率 F 求出横向速度,其计算公式如下:

$$V = r\Omega e^{2\pi F t} \quad (5)$$

式中, Ω 为角速度; h 为两圆盘间流道的距离; F 为振动频率。

Akoum 等^[15]通过对上述复变函数的一系列推导,得出了一种估计剪切速率的方法,指出在给定半径内平均剪切率 γ 可用下式进行计算:

$$\gamma(r, t) = (rd/R_2)d(\pi F)^{1.5}\nu^{-0.5}(\cos\omega_1 t - \sin\omega_2 t) \quad (6)$$

Akoum 等人并且得出在 $G(t) = 2^{0.5}$, 同时时间平均的绝对值是 $2/\pi$, $r = R_2$ 时膜表面剪切率为最大值 γ_{wmax} , 其计算公式如下:

$$\gamma_{wmax} = R_2\Omega Re^{1/2}/h = (2\pi F)^{1/2}R_2\Omega\nu^{-1/2} = 2^{1/2}d(\pi F)^{3/2}\nu^{-1/2} \quad (7)$$

式中, d 为半径; r 为下膜的位移; R_2 为膜盘外径; F 为振动频率, $F = \omega_1/\pi$; ν 为流体运动黏度。

随后,他们还指出了膜表面的平均剪切率 γ_m , 公式如下:

$$\gamma_m = [2^{3/2}(R_2^3 - R_1^3)]/[3\pi R_2(R_2^2 - R_1^2)] \cdot \gamma_{max1} \quad (8)$$

式中, R_2 为膜盘外径; R_1 为膜盘内径。

通过式(7)、式(8)可以看出,振动电机的频率越高,膜表面的剪切率就越高,阻碍膜污染和浓差极化的效果越好,从而使膜通量更好地保持稳定。

3.3 振动剪切膜分离技术的应用

在国外, VSEP 系统已经被应用到许多领域,并且取得了良好的效果。在污水处理方面, Ahmed 等^[16]用 VSEP 去除饮用水中的砷,证实增强振幅提高剪切力能更多地去去除饮用水中的砷,取得了很好的效果。Kertesz 等^[17]分别研究了使用超滤(UF)、纳滤(NF)和反渗透(RO)膜的 VSEP 减少乳制品废水化学需氧量(COD),发现 VSEP 能够增大膜通量,减小膜污染。在水回用处理方面, Subramani 等^[18]将 VSEP 作为处理高硅含量的苦咸水反渗透的辅助设备,提高了苦咸水脱盐量,提高了产水率。Vaneckhaute 等^[19]将 VSEP 应用于某沼气厂厌氧消化池废水的处理中,不仅可以将过滤液进行回用,而且将富含营养元素浓缩液当作肥料进行使用。在垃圾渗滤液处理方面, Zouboulis 等^[20]利用 VSEP 处理垃圾填埋场渗滤液,得出去除率要比错流过滤和旋转圆盘剪切过滤高得多。Chan 等^[21]用 VSEP RO 技术处理垃圾渗滤液中的 COD 和氨氮,证实 COD 和氨氮去除率很高,而且不用调节 pH,不需要额外加药剂,减少二次污染,比其他的物理化学处理有优势。在生物科学方面, Nurra 等^[22]将 VSEP 应用于微藻脱水,实验得出 VSEP 的膜通量是传统错流过滤膜通量的 2 倍,从而证实了 VSEP 阻碍膜污染的优越性能。上述国外研究表明, VSEP 技术在许多领域得到了研究和应用,并证实了 VSEP 技术能够阻碍膜污染和保持膜通量,也有良好的处理效果。

但是该技术的核心主要被美国的 New Logic 公司所垄断, 研究者们只有研究出新的振动剪切膜分离技术的产品才能使该技术得到更广泛的应用。

相对国外而言, 国内 VSEP 技术开始使用比较晚, 但在一些应用和科研中也取得了不错的效果, 主要应用于污水处理方面。张彦彬等^[23]的研究也已经证实振动剪切流对传统过滤有较好的强化作用, 且实验得出增加振动频率能够增大膜通量。王瑶等^[24]也通过实验对比了在相同操作条件下膜振动剪切分离及无振动膜分离的膜通量随时间的变化情况, 证明振动情况下膜通量比无振动时的膜通量大。张伟军^[25]研究了振动膜处理乳化液, 通过实验表明, 利用振动膜过滤乳化液 COD 和油的去除率可分别达到 93.5% 和 99% 以上, SS 可以完全截留, 而且过程中膜通量稳定, 有效防止膜污染; 随后, Zhang 等^[26]将 VSEP 和厌氧-好氧生物膜结合进行乳化液废水处理, 提出了一种高效的乳化液废水处理办法。上述国内研究表明, VSEP 系统在分离过程中, 不仅处理效果良好, 而且能够更好地解决浓差极化和膜污染的问题, 能够提高膜通量, 从而提高膜分离效果。

综上所述, 振动剪切膜分离技术能够有效提高膜通量, 阻碍膜污染。振动剪切膜分离技术在能耗上要小于旋转管式剪切膜分离技术和旋转盘式剪切膜分离技术, 已经在许多领域的应用中取得了良好的效果。然而, 振动剪切强化膜分离技术的核心技术主要被美国的 New Logic 公司所垄断, 很少有研究者对其作用机理、内部流场结构进行详细的分析描述, 而且缺乏自主开发, 阻碍了 VSEP 的推广应用。因此, 研究者们应加强对振动剪切膜分离技术的理论研究并进行自主开发, 才能使该技术得到更广泛的推广。

4 结语

旋转管式剪切膜分离技术、旋转盘式剪切膜分离技术和振动剪切膜分离技术对于阻碍浓差极化和膜污染都有明显的效果。但是, 旋转管式剪切膜分离技术在实际运行过程中必需要达到较高的旋转角速度, 才能产生足够的剪切力来阻碍污染物在膜表面沉积, 整个内管高速旋转的能耗相对较高; 旋转盘式剪切膜分离技术的能耗要少于旋转管式剪切膜分离技术, 为了更好地阻碍膜污染, 仍需要达到一定的转速, 整个膜盘的旋转都是依靠中心转轴带动和支撑, 因此旋转盘式剪切膜分离技术对中心转轴的机

械强度要求较高。相对而言, 振动剪切膜分离技术在能耗上要小于旋转管式剪切膜分离技术和旋转盘式剪切膜分离技术, 而且对中心轴的机械强度要求也要比旋转盘式剪切膜分离技术低, 在阻碍浓差极化和膜污染方面效果也最好。因此, 振动剪切膜分离技术未来在环境保护、污染治理方面将会得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] Pravin M, Tapas N, Abha S, *et al.* FAHP ranking and selection of pretreatment module for membrane separation processes in textile cluster Original Research Article [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 558 - 566.
- [2] 隋燕, 高从塔, 王志宁, 等. 原子转移自由基聚合制备高分子超滤膜技术进展[J]. *现代化工*, 2011, 31(2): 13 - 17, 19.
- [3] 唐福生, 姜威, 张麟, 等. 新型动态法评价反渗透阻垢剂的阻垢性能研究[J]. *给水排水*, 2013, 39(s1): 288 - 291.
- [4] Kim, Magnone J P, Edoardo P, *et al.* Oxygen production of tubular module with $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Ti}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_{3-\delta}$ coated $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Ti}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 403/404: 188 - 195.
- [5] 张晓娜, 梁志辉, 曾燕艳, 等. 往复旋转管式陶瓷膜超滤脱脂奶水溶液的研究[J]. *化工进展*, 2013, 32(12): 3021 - 3025.
- [6] Jiang Tao, Zhang Hanmin, Gao Dawen, *et al.* Fouling characteristics of a novel rotating tubular membrane bioreactor[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2012, 62: 39 - 46.
- [7] Bouzerar R, Ding L H, Jaffrin M Y. Dynamic microfiltration of yeast suspensions using rotating disks equipped with vanes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2002, 197: 269 - 282.
- [8] Bhattacharjee C, Bhattacharya P K. Ultrafiltration of black liquor using rotating disk membrane module[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 49(3): 281 - 290.
- [9] Brugnoli L I, Cubitto M A, Lozano J E. Role of shear stress on biofilm formation of *Candida krusei* in a rotating disk system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(3): 266 - 271.
- [10] Huang Kuo-Jen, Lin Syuan-Jyun. Filtration flux-shear stress-cake mass relationships in microalgae rotating-disk dynamic microfiltration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 244: 429 - 437.
- [11] Dutta S, Sarkar P, Bhattacharjee C, *et al.* Performance comparison of rotating disk ultrafiltration membrane module, a high shear device with cross-flow module [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 49(3): 197 - 209.
- [12] Bendick J, Reed B, Morrow P, *et al.* Using a high shear rotary membrane system to treat shipboard wastewaters: Experimental disc diameter, rotation and flux relationships [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 462: 178 - 184.
- [13] Shi W, Benjamin M M. Membrane interactions with NOM and an adsorbent in a vibratory shear enhanced filtration process (VSEP) system[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 312(1/2): 23 - 33.

中含有大量聚氯乙烯等含氯物质,氯元素含量通常高达 1.1% ~ 2.1%,这不仅使医疗垃圾焚烧产物中氯含量增高,还使部分焚烧产物中二噁英(PCDD/Fs)生成量高达 63.3 $\mu\text{g}/\text{t}$,提高了数倍甚至数十倍^[1]。产物中二噁英 50% ~ 90% 富集于飞灰中^[3],致使部分飞灰中二噁英毒性当量超过 10 ng/g 。

②重金属含量高且移动性强。医用塑料多以重金属作为稳定剂和着色剂,部分医疗垃圾焚烧飞灰中的重金属 Zn、Pb 含量高达 10 761、1 147 mg/kg ^[4],明显高于其在生活垃圾焚烧飞灰中的含量^[5],且移动性强。

③碳组分(活性炭和未燃残碳)含量高,是二噁英等有机污染物的富集源。我国部分医疗垃圾焚烧飞灰的热灼减率高达 30% 以上^[4]。目前国内外常用活性炭喷射与布袋除尘技术来去除烟气中的二噁英。医疗垃圾焚烧厂的大气污染排放物浓度标准(GB 18484—2001)比生活垃圾焚烧厂更加严格,为降低排放尾气中二噁英、重金属等污染物,在布袋除尘器前喷入了大量活性炭,这些吸附二噁英、重金属的活性炭大部分转移到布袋飞灰中。此外,从焚烧炉带出的少量未燃残碳也进入布袋飞灰中,以上两方面导致医疗垃圾焚烧飞灰中碳组分含量较高^[6]。表 1^[4]对 2 种医疗垃圾焚烧飞灰(FA1、FA2)进行了分析,与生活垃圾焚烧飞灰(FA3 ~ FA6)相比,从表 1 中可以看出,医疗垃圾焚烧飞灰中氯和碳组分明显高于生活垃圾焚烧飞灰。

表 1 医疗垃圾飞灰的化学成分与热灼减率 %

成分	FA1	FA2	FA3 ^[7]	FA4 ^[8]	FA6 ^[9]	FA7 ^[10]
SiO ₂	20.60	18.85	22.01	30.38	30.40	19.40
CaO	15.30	18.68	30.71	19.25	29.70	19.70
Na ₂ O	11.00	10.30	4.57	5.50	5.80	8.90
Al ₂ O ₃	6.54	6.26	7.27	10.20	13.10	10.10
Fe ₂ O ₃	6.73	5.10	3.62	4.91	3.10	1.80
MgO	3.43	2.84	2.41	2.23	3.80	2.80
K ₂ O	2.97	4.78	4.51	5.51	5.20	8.10
SO ₃	12.10	12.76	6.53	7.09	8.00	—
Cl	12.31	14.60	—	—	6.00	—
LOI	31.20	34.60	7.38	1.68	28.51	16.00

2 医疗垃圾焚烧飞灰处理技术

2.1 水泥固化技术处理医疗垃圾焚烧飞灰及其局限性

飞灰的水泥固化主要是将飞灰和水泥混合,经水化反应形成坚硬的水泥固体,从而达到阻止飞灰中危害成分浸出的目的。水泥固化虽具有工艺设备简单、操作方便的优点,但需要消耗大量的水泥,导致水泥/飞灰比增加。生活垃圾焚烧飞灰经水泥固化后,体积、质量分别增加 40%、30%^[11]。通常,国内外要求生活垃圾焚烧飞灰的水泥固化体中水泥掺量应占 13% ~ 40%^[11-12]。

(上接第 45 页)

[14] Luo J, Cao W, Ding L H, *et al.* Treatment of dairy effluent by shear-enhanced membrane filtration; The role of foulants [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 96: 194 - 203.

[15] Akoum O, Jaffrin M Y, Ding L H, *et al.* An hydrodynamic investigation of microfiltration and ultrafiltration in a vibrating membrane module [J]. Journal of Membrane Science, 2002, 197(1): 37 - 52.

[16] Ahmed S, Rasul M G, Hasib M A, *et al.* Performance of nanofiltration membrane in a vibrating module (VSEP-NF) for arsenic removal [J]. Desalination, 2010, 252(1/2/3): 127 - 134.

[17] Kertesz, Laszlo Z, Forgacs E, *et al.* Dairy wastewater purification by vibratory shear enhanced processing [C]. Desalination and water treatment. Slovakia, 2011: 195 - 201.

[18] Subramani, Arun D, James P, *et al.* Vibratory shear enhanced process (VSEP) for treating brackish water reverse osmosis concentrate with high silica content [J]. Desalination, 2012, 291(1/2): 15 - 22.

[19] Vaneeckhaute C, Meers E, Michels E, *et al.* Fate of macronutrients in water treatment of digestate using vibrating reversed osmosis [J]. Water Air Soil Pollut, 2012, 223(4): 1593 - 1603.

[20] Zouboulis A I, Petala M D. Performance of VSEP vibratory membrane filtration system during the treatment of landfill leachates [J]. Desalination, 2008, 222(2): 165 - 175.

[21] Chan G Y S, Chang Jie, Kurniawan T A, *et al.* Removal of non-biodegradable compounds from stabilized leachate using VSEPRO membrane filtration [J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3): 310 - 317.

[22] Nurra C, Clavero E, Salvadó J, *et al.* Vibrating membrane filtration as improved technology for microalgae dewatering [J]. Bioresource Technology, 2014, 157: 247 - 253.

[23] 张彦斌. 振动剪切流过滤过程及其强化性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[24] 王瑶, 杨德武, 王瑜, 等. 膜振动过滤通量的实验研究 [J]. 过滤与分离, 2009, 19(1): 14 - 17.

[25] 张伟军, 张明. 震动膜处理乳化液废水研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 222 - 225.

[26] Zhang Weijun, Xiao Ping, Wang Dongsheng. Central treatment of different emulsion wastewaters by an integrated process of physico-chemically enhanced ultrafiltration and anaerobic-aerobic biofilm reactor [J]. Bioresource Technology, 2014, 159: 150 - 156. ■