

# 耐污染长寿命膜材料及低能耗蒸发技术的工艺优化

冯永辉

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南 715501

DOI:10.32629/ems.v8i3.18733

**[摘要]** 针对世界范围内的淡水资源和能源短缺问题,开发高效稳定以及绿色安全的水净化技术具有重要意义。本文分析了近年来有关耐污染长寿命膜材料及低能耗蒸发技术的相关研究进展和改进策略,并期望能对今后更加高效清洁的水净化技术和海水淡化技术提供坚实的理论基础和研究方向指导。

**[关键词]** 耐污染膜材料;长寿命;低能耗蒸发;工艺优化

## 1 引言

淡水供应不足已成为 21 世纪人类面临的一个重大全球性挑战,随着不断增长的人口、工业化以及气候变化影响的加剧,在很多地区可用水资源正变得越来越少。海水和咸水的总量虽大但高浓度的盐度使其不能被直接利用,因此需经过脱盐处理才能转化为可利用的淡水。传统的海水淡化技术如多级闪蒸、多效蒸发以及反渗透膜过滤等均已规模应用中得到广泛的使用,但还存在明显局限性。例如,热力法淡化耗能大,高度依赖石油煤炭等不可再生资源,而与此同时,长久以来反渗透技术本身存在的膜污染问题、频繁的清洗费用以及膜组件高昂的更换费用等问题,制约着其应用与发展。

因此,在这一背景下,研制耐污染、具有长周期运行能力的高性能膜材料,并与能耗低的水蒸发工艺相结合是当前水处理领域最先进的前沿方向之一。但是由于膜材结垢会导致通量降低、操作压力升高、能耗增加以及寿命缩短等一系列问题成为制约其广泛应用的主要瓶颈。因此,研究如何让膜材料具有自清洁功能及良好的耐久性突破现有技术瓶颈的重要方向。另外,蒸发是水处理过程中最重要的环节,其能耗占整个流程成本的很大一部分,发展高效的蒸发工艺并使用太阳能等清洁能源作为动力源的新型蒸发技术是重要发展方向,对实现水处理的低碳化及不断向前发展具有重要战略意义。

## 2 耐污染长寿命膜材料的类型与特性

### 2.1 MAX 相陶瓷纤维膜材料

MAX 相是具有独特性质的纳米尺度层状陶瓷,兼具陶瓷

(高强度、耐高温和耐腐蚀)和金属的优点(高导电性和导热性),使其在极端条件下水处理中有着广泛的应用潜力。目前研究者可以调控 A 位元素溶解度来成功制备了具有宽光谱吸收以及高效光热转换的一维钛铝锡碳纳米纤维膜,并在不同化学环境中(强酸、强碱及高含盐废水)具有良好的稳定性。如其可在强酸性溶液中稳定运行数周时间而不发生明显衰减,其疏油的亲水表层具有多孔结构可促进水分的快速扩散,同时可通过形成易挥发性中间水簇而降低水分蒸发热,从而在抗污染的同时实现高效汽化。

### 2.2 仿生矿化膜材料

受自然界的生物矿化过程启发而合成具有优异机械性能以及良好耐污染性能的人工矿化膜。人工矿化膜通常由有机分子和无机组分有规则地组装并结合而成。例如以单宁酸为有机模板,在异质界面工程调控下,可以诱导磷酸盐与金属离子分别在两相中发生矿化作用,形成一个有机-无机杂化的功能层。该矿化层与基底膜结合紧密,大幅提高膜整体刚性和强度。同时,其精心设计的外化学特性和微结构使其对污染物具有极小的吸附量,在多次循环后表现出接近于 100% 的通量恢复率,这表示具有长久的抗污染能力,这一仿生法提供了制备坚固耐用又有抗污染性能薄膜的一个简单有效的途径。

### 2.3 MXene 基复合膜材料

具有优良的金属导电性以及亲水性和优异的光热转化效率使得二维材料 MXene 如碳化钛受到了极大的关注,并以此为载体制备了一系列性能良好的复合薄膜,在水处理领域表现突出。将 MXene 纳米片与 Ag<sub>2</sub>S 这类半导体相结合后,可

以生成具有肖特基异质结构的杂化物,不仅具有 MXene 的高效光热转化性能,还兼具对有毒化学品进行催化的功能;将其负载在多孔海绵状醋酸纤维素衬底上,则成为具有大量纳米级孔隙并能快速蒸散水的复合薄膜。另外该膜在光线下还具有产生活性氧物质的功能,对水中的部分染料型有机物有非常强的降解能力,进而也赋予了膜自身的自清洁特性,避免了由于有机物污染造成的孔径堵塞现象,实现了设备长期稳定运行。

#### 2.4 一体化光热催化膜材料

传统光热蒸发器通常使用物理混合法或是层次化法将光热剂以及光催化剂进行放置,在界面上容易造成传热阻塞和低效的现象。因此,为了克服上述不足,提出了一种一体化光热催化膜的研究,旨在将两种不同功能结合于同一载体物上实现协同增益的效果。例如有学者制备了含有氮元素的蜂窝状碳纳米片构成的复合型光热催化材料,在全光谱太阳光照射下产生超氧自由基,催化降解有机污染物。由其制成的双层蒸发器既可以实现快速蒸发又可同步去除水中的甲基蓝、苯酚等污染物,在实际中对含焦油污水也具有较好的处理效果,表现出较高的总有机碳去除率。一体化的设计降低了装置的构建难度,提升了太阳能利用率,所以它是实现膜材料多元发展、抗污染、提高寿命的水处理膜的重要手段。

### 3 膜材料抗污染设计与制备工艺

#### 3.1 层层自组装表面改性技术

层层自组装是指利用具有特殊相互作用的离子或分子之间的吸引而形成的高精度多层的功能薄膜技术,它可精确地控制膜表面上的化学组成、亲水性、电荷密度及微观形貌。例如,将带正电荷的聚乙烯亚胺与带负电荷的氧化石墨烯在过滤膜上进行定向的梯度自组装,就可以得到具有稳定表面性质以及内部分布稳定的复合膜。这些膜可以按需控制其表面电荷和亲水性,以排斥具有相同电荷或者不亲水的污染物。另外,还可以利用聚乙烯亚胺氢键的质子化和脱质子化的反应特性,制备了一种 pH 感应型智能膜,其层间距及有效孔径在外界 pH 值变化的情况下可以发生可逆转变,在应对不同种类污染物上具有适应性,同时由于结构变化避免了对污染物的强吸附作用从而实现高效的防污染效果。

#### 3.2 异相界面工程调控技术

异相界面工程的目标是专注于对成膜过程中的两相界面上的物化行为进行控制从而形成具有特殊性能的层级结构,这不同于简单的在表面涂覆一层然后再加工处理的功能层设计,而是将功能层的设计融合到相分离成膜过程中,在铸膜液与非溶剂冷却液之间的两相界面上,利用功能物质的选择性迁移和反应就地形成一层薄而具有功能性的硬化的或交联层。例如,调控单宁酸及其金属离子之间的界面配位及矿化反应可在界面上直接形成致密的有机、无机复合层,这种功能层可显著提升其与基材间的粘结强度、耐久性和抗剥离性能,同时又简化了生产工艺,利于放大。

#### 3.3 协同功能化设计工艺

协同功能化是指采用混合法和构筑法,使得膜材料具有多种可以互补的功能性以共同解决复杂的污染问题的过程。其中关键环节为不同功能性组分的精准组合以及界面一体化融合。如 MXene 复合膜中引入 S-Ag 形成异质结,所以要控制好 MXene 的纳米片上硫化银的分布,并使其均匀沉积下来才能使得光子所产生的光电子能够有效分离出来。这种制备方法可以赋予光热蒸发及光催化降解有机物的功能以及增加膜材料的透湿率及光催化性能。一方面,由于产生光热而造成局部升温加速了水汽化并促进了界面间化学反应。另一方面,光催化降解不断清除附着在膜面上的有机污染物以维持膜面清洁畅通的水路通道,两方面作用协同发挥同时维持了膜材对含有有机污染物质的水体稳定高效的处理能力。

#### 3.4 仿生结构构建工艺

模仿自然界中具有优异抗污染能力的表层微结构是有效改善膜材料抗污染性的途径之一。例如受鱼鳃分级有序排列启发设计出具有多尺度孔道和特殊表面润湿性的蒸发膜。该类制备工艺通常采用模塑成型、定向淬冷或者静电纺丝实现。这些方法可以精确地制造从纳米到微米尺度的分级多孔结构来实现水分的有效渗透和快速传输以及污染物难以粘并滞留在其复杂表面上;同时,借助于上述制备方法在膜面上或内部构建 Janus 结构(一侧亲水而另一侧疏水),或是沿膜厚方向形成亲水梯度变化,有利于导出水的转移和防止盐类结晶在蒸发界面处的积累,从而解决高含盐污水处理过程中的结垢问题,大大延长了膜寿命。

### 4 低能耗蒸发技术的工艺优化

#### 4.1 太阳能驱动界面蒸发技术

太阳能驱动的界面蒸发技术是指将太阳能吸收以及蒸发过程限制在液相表面的一个薄层中,以减少体积传热损失,并获得高的光热转换效率以及快的水分蒸发速率。该技术主要从热调控、水传输和盐分离三个方向进行工艺优化设计,采用多层次设计将保温层、传质层及光热层结合在一起,从而实现集热效率向气液界面集中。采用亲水多孔材料作为传质层或利用毛细管网结构作为传质层,确保蒸发表面的持续供水,为了防止盐分在蒸发表面结垢堵塞,采用边角优先结晶的方法或者形成了一个疏水化蒸发区,在该方法下可以诱导盐在某些不蒸发的区域结晶析出,从而实现了在浓盐度环境下的长时间稳定运行。

#### 4.2 三维管自支撑纵向流蒸发技术

在机械蒸汽再压缩等工业蒸发系统中,换热器性能发挥着重要作用。“三维管自支撑纵向流蒸发技术”就是对现有管壳式换热器进行革命性的改造。该技术采用新型的具有自支撑特性的三维变形的高效率换热管,代替了传统的折流板结构。这些换热管可自我平衡,并且无需其他任何支架配件,因此在装置内形成结构更为简单,阻力也随之降低。因其特殊表面的几何形状而能增加流体的湍流度并破坏温度边界层,从而显著提高传热效率。经过对流程的改造后,蒸发过程中热交换差距较小,也就意味着,在同样产出量的情况下,提供给蒸汽压缩机的热量增加幅度下降,则间接降低了系统电能消耗。同时,增强后的湍流也具有自清洁的功能,可以将管壁上结成的污垢量控制住,并增加清掏周期,从而达到减少维护费用的目的。

#### 4.3 光电热协同蒸发技术

由于对光照条件较为敏感,在阴雨天及夜晚和低日照条件下会出现太阳能表面蒸发效果大大下降甚至停止的情况。而应用光电热协同蒸发技术可对此进行改善,能够引入附加的小规模电能作为补充能源,以达到不断产水的目的。通常的做法就是把光热和电热两种材料结合成多级蒸发器,例如在光热层下设置一个焦耳加热层,在光照充足的情况下主要是依靠太阳能进行蒸发,而在光照不足的情况下则用小电压打开焦耳加热装置。这种协同工作模式使得蒸发装置能够根据环境的变化自动适应其能量供给策略,在维持出水连续性的

的基础上由于主驱动为太阳能而保持很低的综合能耗。

#### 4.4 余热回收与系统集成优化

对蒸发器进行优化仅仅是减少总体能耗的一部分,将整个蒸发浓缩系统过程及能量流结合在一起达到最大程度节省能源才是关键所在。如机械蒸汽再压缩技术就是典型的多级节能方案,它主要是利用压缩机将蒸发产生的气体再次加压升温后,再把它送回到加热室中作为它的热源,这样基本上就把这种气体的所有潜热都加以利用了,仅仅只用很少量的压缩功就可以实现这一目标。因此结合三维高效换热管这样的新型设备就能形成更好的系统,在食品、化工等行业进行浓缩优化方面,用电力高效二效蒸发系统来替代一效蒸发模式,它不仅实现从油煤等化石能源到电的大转换,还结合多效设计提升余热利用效率。这种对整个系统流程的工艺改造及优化往往可以带来显著的节能量,从而降低生产成本并减少碳排放强度。

### 5 结论

综上所述,为解决世界范围内的水和能源危机,应用性能高且耐用的膜材料,并结合节能型蒸发方式是必不可少的方式之一。研究表明,新型 MAX 相陶瓷、仿生矿化物及 MXene 复合材料的应用可以明显改善膜材料的化学稳定性和机械强度,与此同时提高其耐污染的能力;另一方面是基于层叠式的自组织过程及在非均匀表面上的分级设计,可以作为调控膜表面性能与功能的一种手段;而针对蒸发方面,采用了包括太阳辐射辅助下界面蒸发、三维管状自主支撑蒸发等等方法,为达到传热的目的,并保证耗能最少。

#### [参考文献]

- [1]李显龙.干燥地区高盐废水低能耗零液体排放降膜蒸发处理技术研究[D].东华大学,2025.
- [2]刘砚军.节能技术应用——新型制浆装备及蒸煮液蒸发装备[J].中华纸业,2024,45(01):30-34.
- [3]桑梓航.快速温变系统建模仿真与低能耗控制策略研究[D].重庆邮电大学,2022.
- [4]尤文,基于多效和低温蒸发工艺的低能耗蒸馏装置研究.吉林省,长春工业大学,2012-03-15.

作者简介:冯永辉,1974.1,男,汉族,陕西潼关人,本科,助理工程师,研究方向:发电。