

• 水业导航 •

城市饮水净化超滤水厂设计若干新思路

哈尔滨工业大学市政环境工程学院 李圭白 瞿芳术

DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0001

1 城市饮水超滤水厂在我国的发展

将超滤用于城市饮水净化是净水工艺的一大进步。超滤能大大提高饮水的生物安全性;是最有效的固液分离技术,能获得浊度远低于 0.1 NTU 的用水;与其他水处理技术组合,能获得高质量的饮水;是利用 21 世纪材料科学的最新发展来改造和提高城市饮水净化技术的重要成果。超滤水厂近年来在我国形成了加速增长的态势。到 2013 年底,规模 > 100 m³/d 的水厂数目远超过 300 座,总体规模远超过 200 万 m³/d,其中规模在 1 万 m³/d 以上的超滤水厂已超过 30 座。

2 什么膜适用于城市饮水净化

膜的品种和规格很多,但用于城市水厂的膜应满足饮水净化的要求。对城市饮水而言最主要的是饮水的安全性,即生物安全性和化学安全性,其中生物安全性是首要的。

水中致病微生物有病毒、细菌、原生动物等。用于城市饮水净化的膜应能去除水中致病微生物,以提高饮水的生物安全性。水中致病微生物中病毒最小,其尺寸在 0.02~0.45 μm 之间。可用于城市水厂去除病毒的有超滤膜和纳滤膜。用于城市水厂的纳滤膜需进口,且能耗较大。所以超滤膜是目前用于城市水厂的主流产品。

对超滤膜孔径和病毒去除率的要求。一般认为,超滤膜孔径大于纳滤膜的 1 nm,小于 0.1 μm。所以,有的超滤膜孔径可能大于 0.02 μm,不能完全截留病毒。只有孔径不大于 0.02 μm 的超滤膜,才能将水中包括病毒在内的致病微生物有效去除,大大提高饮水的生物安全性,适于城市水厂采用。

2009 年美国颁布的对水中病原微生物的指标要求见表 1,其中病毒的去除率要求达到 99.99%。我国《生活饮用水卫生标准》虽然尚未对水中病毒去除率提出要求,但国内外已有一些厂家能生产孔径不大于 0.02 μm 的超滤膜,其病毒去除率可达到 99.99%。所以要求用于城市水厂的超滤膜对病毒的去率达到 99.99%在技术上是可行的,并且膜价格并不比孔径更大、对病毒去除率达不到上述要求的超滤膜贵。

根据城市饮水对生物安全性的要求,提出上述对超滤膜孔径和病毒去除率的要求,是饮水区别于其他用水的一项重要特点,它将对用于城市饮水净化膜材料的发展起重要引领作用。

3 低通量运行是超滤水厂发展的方向

膜通量和膜污染无疑是超滤应用中最重要问题。膜通量就是单位膜面积上过滤水的流量,常以 L/(m²·h) 表示。

表 1 美国饮用水对病原微生物的指标要求

指标	去除要求
隐孢子虫	99%
大肠杆菌、粪大肠杆菌	不得检出
贾第鞭毛虫	99.9%
异养平皿计数(HPC)	<500 CFU/mL
军团菌属	无限制,但 EPA 认为,在隐孢子虫和病毒达标的情况下,军团菌也能得到控制
总菌落	一个月内样品呈阳性的数量不多于 5%
浊度	<1 NTU,至少 95% 的样品不高于 0.3 NTU(对常规或直接过滤技术)
病毒(肠病毒)	99.99%

膜污染就是在膜滤过程中膜阻力增加的现象。膜污染常区分为可逆膜污染和不可逆膜污染。通过物理方法(气洗、水洗)可恢复的称为可逆膜污染;物理方法不能恢复,只能通过化学清洗方法恢复的称为不可逆膜污染。

膜通量与膜价格有关。膜价格高,设备投资很大,为降低设备投资,常采用高的膜通量。膜技术发展初期,膜价格很贵,所以采用高的膜通量,例如:数百 L/(m²·h)。

膜污染与膜通量有关。一般膜通量愈高,能耗愈高,膜污染也愈迅速,需采用频繁的物理和化学方法来清除污染,恢复膜通量,这不仅使膜运行费用增大,还使操作复杂,也影响膜的寿命;此外还存在清洗废液对环境的污染,在其处理处置方面需加大投资。所以,高的膜通量只宜在小型设备中使用。

任何工程都要求技术上是可行的,经济上是合理的。膜通量关系到工程的建设费,也关系到工程的运行费。膜通量越高,建设费越小,但运行费(电费、物理清洗费、化学清洗费等)便越高,反之亦然。使在资金偿还期内建设和运行费之和为最低的膜通量,就是最经济的膜通量,可称为经济膜通量(与管道中经济流速的概念相似)。

随着膜材料科技的发展,膜价格随之降低,相应地设备投资也随之降低,现已降至可接受的水平,从而开始在城市水厂规模化使用。如仍采用高的膜通量,运行费就会显得过高。为了降低运行费,就要降低膜通量,以减小膜污染及能耗。所以随着膜价格降低,降低膜通量将是一个大趋势。

城市大型水厂处理水量大,常达数万至数十万 m³/d,特别要求能安全稳定地工作。水厂一旦因故停止供水,对城市生活影响极大,是绝对不允许的,所以对大型水厂工作的

稳定性要求极高。

对膜的可逆污染的物理清洗(气洗、水洗)与传统砂滤池类似,易于操作和进行。对膜的不可逆污染的化学清洗一般有两种,一种是维护性化学清洗,即定期以 200~500 mg/L 的次氯酸钠溶液对膜浸泡数小时,以部分清除膜的不可逆污染,这种化学清洗虽稍复杂,但实践表明仍可被接受。当对膜的维护性清洗进行多次仍不能防止膜污染过多积累时,就要对膜进行恢复性化学清洗。恢复性化学清洗涉及多种化学药剂,操作复杂,特别是常使设备较长时间停运,对水厂的稳定运行影响较大。

在大型水厂中采用高通量,必须对膜进行频繁的物理清洗和化学清洗,对水厂稳定运行是不利的,也是不可取的。所以,对大型水厂,宜采用低通量运行策略,以减轻膜污染,减少物理和化学清洗频率,有利于保证水厂的稳定运行。

对于城市大型水厂,我们关注的重点是膜的不可逆污染,因为它关系到对膜的化学清洗,会影响到水厂的稳定运行。

Feild R W 发现,通量降至某低值时,膜的污染可降至零,称为临界通量。现已提出各种临界通量的概念。笔者感兴趣的是不可逆污染,并提出超滤膜不可逆污染为零的零污染通量的概念。采用能使膜的不可逆污染极轻或基本为零的通量(即接近零污染通量),可以基本上不进行或极少进行对膜的恢复性化学清洗,将使超滤水厂满足稳定运行的要求,并且操作大为简化,十分有利于超滤在城市水厂的推广和应用。

山东东营南郊水厂常规工艺升级改造,在滤后增设超滤单元(10 万 m^3/d),设计膜通量 30 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,现工作通量略高于设计值。膜组的气水冲洗周期根据不同季节来调整,一般冬春两季采用 5 h,夏秋季节采用 8 h 一次。南郊水厂投产后,每年进行 2~3 次维护性化学清洗;并于投产后 3 年零 8 个月进行第一次恢复性化学清洗,于 4 年零 7 个月进行第二次恢复性化学清洗,表明膜的不可逆膜污染是相当轻微的。

综上所述,超滤通量选择的重要影响因素有:膜工程的建设费用、膜工程的运行费用、膜工程运行的稳定性。目前在工程投标中存在只重视建设费,忽视运行费和稳定运行的倾向,结果膜工程投产后造成运行费过高,不能稳定运行等不良后果。国外膜一般价格较高,常采用提高通量的方法来降低建设费以中标,结果有运行效果不佳甚至失败的案例。对于大型城市水厂,运行的稳定性至关重要,宜采用接近零污染通量的工艺参数。在我国现有体制下,城市水厂特别要求降低运行费用,也宜采用较低的膜通量。

我国 90% 以上的现有水厂仍采用传统水处理工艺,面临升级改造。用超滤技术对传统工艺进行升级改造,将是超滤应用的一个重要方向。用超滤取代砂滤池,并能利用原工艺的过滤水头(2~3 m)而不设加压设备,将使改造方案更加经济可行,这就要求采用低水头低通量的膜滤技术。

当用柱式超滤膜(外压式或内压式)时,常采用较高的膜

通量。其优点是由于可为柱式膜提供较大的工作水头(0.1 MPa 左右),从而使物理清洗(气洗、水洗)周期较长,频率较低,可在物理清洗中节能节水。但它的缺点是用于膜滤的能耗较高(远大于物理清洗中的节能效果);其次,由于采用了较高的通量,膜的不可逆污染会加重,从而使化学清洗周期缩短,频率增加,继而增加运行费用,运行的稳定性降低,所以柱式膜采用较高通量并非最佳选择。

柱式膜采用较大的膜通量,可能是源于对压力滤池和重力滤池过滤特征的传统观念。一般重力滤池的工作水头为 2~3 m,而压力滤池的工作水头为 5~10 m,所以压力滤池采用较高滤速也能使滤池工作周期处于常范围。但压力滤池只存在滤层堵塞现象(相当于可逆膜污染),气水反冲洗即可恢复其过滤能力;相反地,超滤则不仅有可逆膜污染,还有不可逆膜污染,仅靠气洗和水反冲洗无法完全恢复膜的过滤能力,而需要定期进行化学清洗,极大地影响超滤的稳定运行,这是两者的根本差别。所以,以传统观念看待柱式膜和浸没式膜的差别,将会造成设计缺陷,影响超滤的推广和应用。

4 降低超滤工程建设费用的若干新思路

有些人认为,超滤是一项好的净水技术,但膜价格太贵。其实,这是一种误解!据统计,超滤净水工艺建设费单价为 250~300 元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,与常规工艺或臭氧—活性炭深度处理工艺相当。

我国大型水厂(>5 万 m^3/d)应用超滤净水技术迄今只有 5~6 年。随着膜产业的发展,膜性能不断提高,膜价格不断降低,膜工程建设费还会不断降低。降低膜工程建设费,对超滤在城市水厂中的推广应用显然十分重要。

据分析,目前工程中超滤膜组件的费用一般只占工程总费用的一小部分(约为 30%)。例如,膜价格即使降低 20%,整个膜工程的建设费只不过降低 6%,贡献是很少的。所以有必要探讨设计中降低除膜组件以外的其他费用的途径。

膜工程中除膜以外的其他费用有配套管件和阀门、机电设备、计量检测仪表和装置、电控系统和设备、膜池膜架和厂房等。以下可能是降低其他费用的有效途径:增大膜堆单元的容量,减少膜堆单元的数量;简化超滤工艺;超滤工程设备化;超滤工程模块化设计;超滤工程无厂房化等等。

4.1 增大膜堆单元容量、减少膜堆单元数量

每个膜堆单元,都需要全部配套设备和装置,例如一般需设置 6 个阀门(进水、出水、排水、水洗、气洗、药洗)甚至更多、水量计量和控制装置、水位水压计量装置、真空系统及装置、水质检测系统及装置、断丝检测装置、配电自控系统及装置等等。水厂膜组单元愈多,配套的设备和装置也愈多,建设费也会愈高。

一般一支柱式膜的膜面积最大不超过 40~60 m^2 ,对大型水厂需要的柱式膜常达数百甚至数千支;数十支膜柱组成一个膜堆单元,膜堆单元数可达数十个,其配套的设备和装

置数量也会相当多。例如,国内某大型 30 万 m^3/d 膜水厂,使用柱式膜,仅阀门就有五百多个,平均每万 m^3/d 有阀门近 20 个。

浸没式外压膜的膜堆单元容量可以设置得比较大。现国内一个浸没式膜堆单元的膜面积可达 15 000 m^2 ,膜堆单元的处理水量可达 1 万 m^3/d ,只需设置 6 个阀门,与柱式膜比较减少了数倍。

增大膜堆单元的容量,减少膜堆单元及其配套设备和装置的数量,不仅可以降低建设费用,并且也提高了运行的安全性。

从降低膜工程的建设费用和提高运行的安全性两方面综合考虑,中、小型水厂比较适宜采用柱式膜,大型水厂比较适宜采用浸没式膜。

4.2 简化超滤工艺

为了控制不可逆膜污染,超滤膜的零不可逆污染通量会越来越多的在生产中使用。如能采用零污染通量或接近零污染通量运行,则在膜使用寿命期间可只进行维护性化学清洗,而不进行恢复性化学清洗,从而使工艺设计得到一定程度地简化,并使清洗废液无害化处理也得以大幅降低。

据研究在采用低通量运行策略条件下,对超滤膜同时进行气洗和水反洗并非一定是必要的,如能只采用一种(如水反洗)方式,则也可简化工艺。

将超滤与前处理有机结合,形成一体化(如将超滤膜置于澄清池清水区),则若干工艺操作可同时进行(如将膜反洗与澄清池排泥结合进行),使整个工艺系统得到简化。

目前采用普通的中空纤维膜的问题之一是断丝,为此需设置检测断丝的系统和设备。现已可制作出加筋结构的中空纤维膜,从而使断丝率大大降低,这样就有可能简化检测断丝的系统和设备。

4.3 膜工程设备化

我国城市饮水净化工程以及城市污水处理工程多年来一直大量使用钢筋混凝土建造池体等工艺构筑物,被归于土木工程学科之一。这是由于建国后很长一段时间,我国钢铁产量比较低,价格较贵,为节省钢材,采用了钢筋混凝土结构。现在,我国钢铁产量世界第一,价格不贵。钢筋混凝土构筑物则需现场施工,耗费人力大,工作条件差,施工时间长,且易受气候、环境等因素的影响,特别是近几年我国人力费用上涨数倍,使得钢筋混凝土构筑物建设成本大幅上升,现已接近或超过钢结构,所以现在已到了以钢结构替代钢筋混凝土的转变期。

膜工程采用钢结构,可实现膜工程设备化,走上工厂制作,现场安装的现代化建设道路。工厂制作可以利用工厂的现代化装备,不但速度快,质量高,且可全年生产,不受气候、环境等因素的限制。现场安装,可实现机械化,施工时间短,耗费人力少,成本低,且能保证质量。

现已有小型超滤水厂集装箱化的实例,将全部设备在工厂装于一个集装箱内,运至现场落地就位,即可投产。

北京水司 2014 年建成一座 4 万 m^3/d 超滤水厂,将超滤膜与澄清池有机结合成一体构筑物,采用钢结构池体,实现了工厂制作现场安装,现场安装只用了 80 天即行投产,是万 m^3/d 以上规模膜水厂现代化建设的一个范例。

4.4 膜工程模块化设计

新建膜工程的处理水量一般是逐年增加的,而常规设计都是一次建成,建设费用都是一次性投资。

膜装置是由若干膜堆单元并列组装而成。每个膜堆单元的工作具有相对独立性,所以膜工程的膜堆单元数可以随着处理水量的增加逐步增加,即在膜工程中可采用模块化设计的方法,每个模块由若干膜堆单元构成,随着处理水量的增加,相应地建设新的模块,从而减少初期建设费用的投资。

膜工程的设备化更有利于模块化设计。过去,以钢筋混凝土净水构筑物为主的水厂,因其需现场施工,工程施工场地大,辅助建筑多,施工周期长,难以实行分期施工分期投产,故常采用一次性建成的方案。而以钢结构为主的膜工程,采用工厂制作现场安装的方法施工,则便于实行分期施工分期投产,为模块化设计和建设创造了条件。

超滤与前处理能有机地实现一体化,则使模块化设计和建设更具生命力,更便于推广应用。

4.5 超滤水厂无厂房化

我国现有超滤水厂绝大多数都建于室内,车间厂房净高,体积大,建设费用较大。如能实现无厂房化,则可大大降低膜工程建设费用。国内外石化企业、化工企业等,不论处于热带或寒带,大都建于室外,所以在该工业领域,无厂房化已经是一个成熟经验,值得借鉴。

我国除东北、西北等高寒地区外,采用常规处理工艺的水厂的絮凝反应池、沉淀构筑物、滤池等一般皆建于室外,只是滤池的控制系统和机电设备置于室内。这个无厂房化的经验也是值得推广到膜工程中去的。

5 结语

我国大、中型超滤水厂开始建设至今不到十年,但呈加速发展态势,超滤水厂的设计仍是一个新课题。我国超滤水厂基本上是以借鉴国外的设计和运行管理经验为主。国外的超滤水厂,过去因为膜价格高,所以大多是在高通量的条件下提出的设计和运行经验。随着膜价格的降低,低通量运行将是今后发展的方向;而低通量运行存在有别于高通量运行的特点,这是值得探索的。将超滤用于城市饮水净化,应能结合我国的国情,发展出具有我国特色的超滤工艺设计,这是需要创新性思维的。

超滤水厂的设计,需要在实践中不断总结经验,提出问题。以上只是针对我国超滤水厂设计建设中的部分问题提出了一些新思路,仅作抛砖引玉,供大家讨论和参考。