

# 脉冲反洗技术及其对膜污染的控制

严子春, 龙腾锐

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 介绍了脉冲反洗技术及其原理,探讨了影响脉冲反洗效能的因素,并提出了一些提高脉冲反洗效能的建议。

**关键词:** 脉冲反洗; 膜污染; 控制; 清洗

**中图分类号:** TU991.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000 - 4602(2003)13 - 0033 - 03

在膜的应用中,多采用常规的水力清洗(正洗、反洗)和化学清洗来以改善和恢复膜通量,但频繁的清洗将耗费大量的水和化学药剂,同时占用大量的时间,影响正常操作。脉冲反洗(或称高频反洗)是一种有效控制膜污染的技术,能够及时对膜进行在线清洗<sup>[1]</sup>。

## 1 技术原理

### 1.1 理论基础

反洗即通过周期性采用气体或液体作为反洗介质,对膜管施加与过滤方向相反的压力作用,从而迫使膜表面膜孔内的污染物颗粒脱离滤膜,并且起到破坏膜面凝胶层和浓差极化层作用,以使渗透通量明显提高。无机膜的高机械强度使得反洗技术已经成为一种有效控制膜污染的方法。常规反洗所需时间一般为几秒到几分钟,一般 20~30 min 反洗一次。与常规反洗相比脉冲反洗提高了反洗频率,缩短了反洗时间,反洗时间 < 1 s,几秒钟反洗一次<sup>[2]</sup>,脉冲反洗时不需要关闭进水,因此不影响装置的正常运行。这种边工作边反洗的方式能很好地防止膜孔道堵塞,使膜渗透通量保持在较高的状态下。这种操作方式突破了等到膜渗透通量明显下降后才停止工作并进行清洗的模式。

Galaj 等建立了一个理想化的模型,说明了脉冲反洗的原理及其重要性<sup>[3]</sup>。该数学模型描述了膜表面截留粒子和用反洗清除的过程,其中假定料液为均相流体,是含均一粒子的悬浮液,粒子是被逼进膜表面孔的入口而又可用反洗排出,这就要求反洗施加于粒子的力要等于或大于促使粒子进入孔的力。

推导得出当反洗再生膜时渗透液侧与进料侧的压力差  $P$  与体系的膜压力差  $P_T$  的关系为:

$$\frac{P}{P_T} = \frac{n+1}{n(1-\epsilon)+1} \quad (1)$$

其中  $\epsilon$  —— 孔封闭分数

$n$  —— 粒子层数

当膜孔全部发生封闭时  $\epsilon = 1$ , 则:

$$P = (n+1) P_T \quad (2)$$

可见,要求除去所有粒子的反洗压力随孔封闭分数的增加而增加,这个增加速率开始较小,当孔封闭分数趋近于 1 时则增加速率变得很大,反洗要求的操作压力差将非常之大。R. Sondhi 等经理论推导得出反洗所需时间  $t_c$  表达式如下<sup>[4]</sup>:

$$t_c = \frac{9\mu R_m H_m (1-\epsilon)^2}{P^2} \quad (3)$$

式中  $\mu$  —— 渗透液的粘度

—— 膜的孔隙率

$R_m$  —— 膜阻力

$H_m$  —— 膜的厚度

式(3)说明,反洗压力越大则反洗所用时间越短;反洗时间还与反洗所用渗透液的粘度、膜阻力、膜的厚度、膜的孔隙率等因素有关。

从上述模型可得出具有实际意义的结论:反洗不宜等到渗透通量显著下降后才开始,否则反洗过程需要施加较高的反洗压力;过滤操作过程中最好采用频繁、短促、高压的脉冲反洗,即高压短脉冲的清洗效果要优于低压长脉冲。

### 1.2 系统组成和工作原理

脉冲反洗系统主要由脉冲反洗装置和自动控制系统组成。脉冲反洗以渗透液作为反洗液以防造成新的堵塞。空压机和气囊就可以形成简单的脉冲反洗装置,气囊把渗透液与空气隔开,空压机通过控制阀连接到气囊,产生和供给进行有效脉冲反洗所需的空气压力。Bekaert 公司的脉冲反洗装置用压缩空气周期性地撑开脉冲反洗水箱中的气囊,被排开的渗透液对膜形成短促而有力的反洗(见图 1)。该系统反洗频率范围为(10 s ~ 2 min)/次,每次反洗 0.5 s。许多脉冲反洗装置主要由空压机和承压水箱组成,承压水箱连接到膜组件,空压机对装有渗透液的水箱加压到一定值,在自动计时操作装置控制下产生反洗脉冲<sup>[2]</sup>。图 2 所示为另一种脉冲反洗装置,氮气周期性地驱动活塞使渗透液对膜形成脉冲反洗<sup>[4]</sup>。脉冲反洗频率通过自动控制系统设置和调节,因此自动控制系统也是脉冲反洗系统的重要组成部分,一般用自动计时操作装置,大型和较复杂的系统也可以采用微机控制。

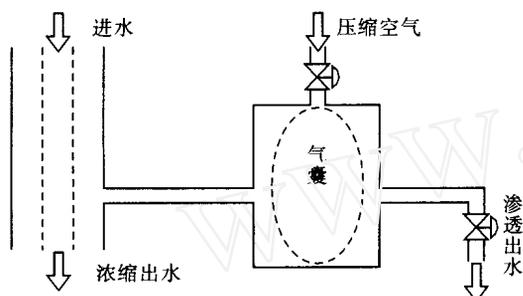


图 1 Bekaert 公司的脉冲反洗系统

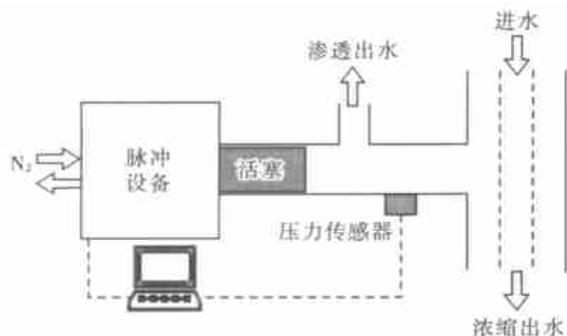


图 2 气体驱动活塞脉冲反洗系统

## 2 反洗效能

### 2.1 操作参数对脉冲反洗效能的影响

采用反洗能明显提高膜净化装置的膜渗透通量,脉冲反洗对渗透通量的恢复更为显著(见图 3)<sup>[5]</sup>。

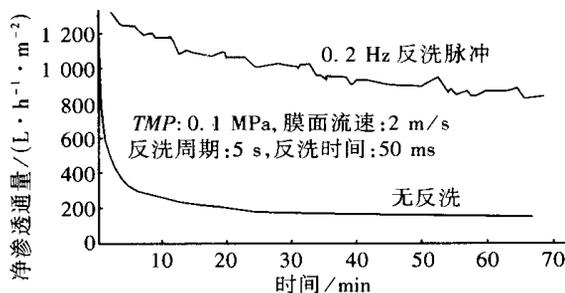


图 3 微滤过程中脉冲反洗对渗透通量的影响

脉冲反洗的操作参数(脉冲反洗时间、脉冲反洗间隔时间、脉冲反洗压力)对膜渗透通量的恢复有重要影响<sup>[6,7]</sup>。高效率的脉冲反洗可以获得较稳定的渗透通量、较长的过滤周期。微滤过程中(常规反洗)反洗压力在 0.01 ~ 0.1 MPa 之间,反洗时间为 1 ~ 5 s,反洗频率为 1 ~ 10 次/s,反洗操作所用时间将占到总操作时间的 10% ~ 20%,扣除反洗使用的渗透液,净通量增加很少,仅有 10% ~ 30%<sup>[5]</sup>。脉冲反洗相对常规反洗而言,缩短了反洗时间,提高了反洗频率,清洗的效率较高,但如果反洗脉冲微弱、频率低,则可能对膜清洗不充分;若反洗脉冲太强、频率过高,则可能造成渗透液损失较大,使净渗透通量很低。适当增大脉冲反洗压力可提高清洗效率、缩短脉冲反洗时间、有效恢复膜渗透通量,但要兼顾清洗效率和膜的承压能力,如果压力过高,可能对膜造成不可逆压缩、损伤、甚至破裂<sup>[8]</sup>。脉冲反洗时间太短,可能对膜清洗不充分,相反则可能净渗透通量很低甚至为负<sup>[4]</sup>。

### 2.2 膜特性、污染物性质对反洗效能的影响

膜材料、膜孔径等物化特性对渗透通量有很大的影响<sup>[9,10]</sup>。如果膜的亲水性差,水中粘着性物质可能很容易在膜表面形成凝胶层而导致严重污染,给清洗工作带来困难。P. Ramesh Babu 等用再生纤维素和三醋酸纤维素超滤膜过滤牛血清蛋白溶液,发现后者更容易被污染,主要是因为三醋酸纤维素超滤膜比再生纤维素超滤膜亲水性较差<sup>[11]</sup>。对膜表面进行改性以减少膜与污染物的相互作用力,就容易通过清洗除去污染物<sup>[12]</sup>。Rishi Sondhi 通过对 0.05、0.2、0.8 μm 的陶瓷管式膜的脉冲反洗研究,发现膜孔径越大则脉冲反洗越有效,稳定运行的通量比无脉冲反洗的平均渗透通量提高了 2 ~ 5 倍<sup>[2]</sup>。

污染物的粘着性、亲水性也是影响脉冲反洗效能的重要因素<sup>[13]</sup>,如果污染物粘着性强,粘附到膜

表面后结合比较牢固则形成不可逆污染,很难用水力清洗法除去;如果是非粘着性的粒子,反洗对渗透通量恢复效果明显;试验证实,脉冲反洗对控制料液中相对非粘着性的悬浮物粒子的污染非常有效,并且其效果随非粘着性的悬浮物粒子浓度增大而降低。H. Ma 等用孔径为  $0.3\ \mu\text{m}$  的亲水性聚丙烯微滤膜过滤粘土悬浮液时,通过脉冲反洗使渗透通量提高了 5 倍,并且脉冲反洗和膜表面改性两种方法联合使用,能同时缓解粘着性和非粘着性物质造成的污染<sup>[14]</sup>。

### 3 结语

脉冲反洗技术具有清洗效率高、清洗过程不影响生产、易实现自动化等特点。但即使采用脉冲反洗操作,膜装置运行较长时间后渗透通量仍然会下降很多,这时需停止运行并进行化学清洗以除去膜表面和孔内粘附较为牢固的物质。

料液浓度变化可影响脉冲反洗的效能,脉冲反洗的控制系统可采用神经网络或其他技术以使其具有自适应功能,根据浓度变化自动调整脉冲反洗参数,避免低浓度时反洗过于频繁而造成渗透液和能耗过多,高浓度时反洗频率不够而形成浓差极化或凝胶层。

采用脉冲反洗技术时选用亲水性的膜或对膜表面进行改性则清洗效果会更加显著,可有效缓解膜污染并维持较高的渗透通量。

### 参考文献:

- [1] Ma H, Nielsen D R, Bowman C N, *et al.* Membrane surface modification and backpulsing for wastewater treatment[J]. *Separation Sci Technol*, 2001, 36: 1553 - 1569.
- [2] Rishi Sondhi, Ramesh Bhawe. Role of backpulsing in minimization in crossflow filtration with ceramic membrane[J]. *J Membr Sci*, 2001, 186: 41 - 52.
- [3] 黄仲涛, 曾昭槐, 钟邦克, 等. 无机膜技术及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 1999.
- [4] Sondhi R, Lin Y S, Alvarez F. Crossflow filtration of chromium hydroxide suspension by ceramic membranes: fouling and its minimization by backpulsing[J]. *J Membr Sci*, 2000, 174: 111 - 122.
- [5] H éan M, Elmaleh S. Microfiltration through an inorganic tubular membrane with high frequency retrofiltration[J]. *J Membr Sci*, 2001, 188: 181 - 188.
- [6] Chellam S, Jacangelo J G, Bonacquisti T P. Modeling and experimental verification of pilot - scale hollow filter, direct flow microfiltration with periodic backwashing[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32: 75 - 81.
- [7] Heran M, Elmaleh S. Prediction of cross - flow microfiltration through an inorganic tubular membrane with high - frequency retrofiltration[J]. *Chem Eng Sci*, 2001, 56: 3075 - 3082.
- [8] 时钧, 袁权, 高从. 膜技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [9] Laitinen Niina, Michaud David, Piquet C, *et al.* Effect of filtration conditions and backflushing on ceramic membrane ultrafiltration of board industry wastewaters[J]. *Sep Purif Technol*, 2001, 24: 319 - 328.
- [10] 徐南平, 时钧. 颗粒粒径和膜孔径对陶瓷膜微滤微米级颗粒悬浮液的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2000, 14(3): 25 - 27.
- [11] Babu P R, Gaikar V G. Membrane characteristics as determinant in fouling of UF membranes[J]. *Sep Purif Technol*, 2001, 24: 23 - 34.
- [12] Wakeman R J, Williams C J. Additional techniques to improve microfiltration[J]. *Sep Purif Technol*, 2002, 26: 3 - 18.
- [13] Yiantsios S G, Karabelas A J. An experimental study of humid acid and powdered activated carbon deposition on UF membranes and their removal by backwashing[J]. *Desalination*, 2001, 140: 195 - 209.
- [14] Ma H, Hakim L F, Bowman C N, *et al.* Factors affecting membrane fouling reduction by surface modification and backpulsing[J]. *J Membr Sci*, 2001, 189: 255 - 270.

电话: (023) 65126997

E-mail: zichuny@sohu.com

收稿日期: 2003 - 05 - 29