

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.010

# 开式原生污水源热泵系统取水运行特性分析

钱剑峰<sup>1</sup>, 张吉礼<sup>2</sup>, 马良栋<sup>2</sup>, 徐莹<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨商业大学 能源与建筑工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 高效的污水取水技术是原生污水源热泵系统可靠运行的前提。针对现有相关技术的不足, 提出了开式集成污水取水技术。通过定义网眼阻塞系数、污物密度、截面系数等重要参数, 建立了表征其取水特性的数学模型, 并提出了临界运行工况的参数条件, 考察了各临界运行参数及不同旋转周期下网眼阻塞系数等的变化规律。

**关键词:** 污水源热泵系统; 开式取水; 数学模型; 运行特性

**中图分类号:** TU831.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2014)02-0062-06

## Operational Analysis of Open Untreated Sewage Source Heat Pump System

Qian Jianfeng<sup>1</sup>, Zhang Jili<sup>2</sup>, Ma Liangdong<sup>2</sup>, Xu Yin<sup>1</sup>

(1. School of Energy & Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The effective sewage intake technology is prerequisite for the untreated sewage source heat pump system to run steadily. In terms of the insufficiency of current sewage intake technologies, an open sewage intake integration technology is proposed. The mathematical model and the distinguish basis of critical state are established for the sewage intake characteristic by defining some important operating parameters, such as the blocking coefficient, the contamination density and the section coefficient. Furthermore, the change rule of each critical operation parameter is observed along with the various initial parameters. The result can provide the theoretical basis to design the open intake integration technology.

**Key words:** sewage source heat pump system; open intake; mathematical model; operational characteristics

能源供需矛盾日益突出, 建筑能耗巨大, 占社会总能耗的 30% 以上, 其中暖通空调的能耗就占据建筑用能的 65% 以上, 因此大力开发利用可再生能源成为建筑用能可持续发展的有效出路之一<sup>[1-3]</sup>。城市原生污水这一新型可再生能源, 因其分布广泛、水量巨大<sup>[4-5]</sup>, 当用作热泵系统的低位热源时, 节能与环保优势显著, 从而备受各国青睐, 成为近年争相研究与应用的热点<sup>[6-10]</sup>。但由于其成分复杂性, 若原生污水热利用过程直接进换热器, 则污水中所含大

尺度杂物将在短时间内将其堵塞, 导致系统不能安全运行<sup>[11-12]</sup>。因此, 能够防堵塞的高效污水取水技术成为热泵系统研究与应用的关键之一。

日本及北欧国家的污水源热泵系统常采取机械刮剥、人工刷洗等方法来解决污水取水过程中换热设备的防堵塞问题<sup>[5-7]</sup>, 存在工作量大、运行工况不稳定的弊端。中国近年开发了反冲洗污水取水装置, 实现了稳定、连续取水, 并在多个工程中得到了成功的应用, 然而该装置仍存在着取水设备承压高、

收稿日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51208160); 中国博士后科学基金(20100471447); 哈尔滨市科技创新人才专项资金(2013RFQXJ129)

作者简介: 钱剑峰(1979-), 男, 博士(后), 副教授, 主要从事可再生能源与建筑节能研究, (E-mail)qianjianfeng2002@163.com。

取排水内泄露严重、滤面过滤负荷大等不足<sup>[13-14]</sup>。因此,研究性能更加优越的污水取水技术成为亟待解决的难点,故本文基于一种新提出的开式集成污水取水技术建立了开式原生污水源热泵系统,并将对系统取水的数学模型及运行特性作深入分析。

## 1 开式原生污水源热泵系统

开式原生污水源热泵系统如图1所示,其中开式集成污水取水机(图2)是该系统的关键设备之一<sup>[15]</sup>,其工作原理如下:

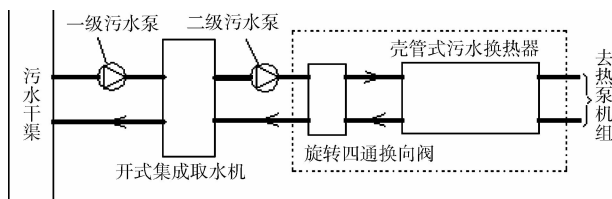
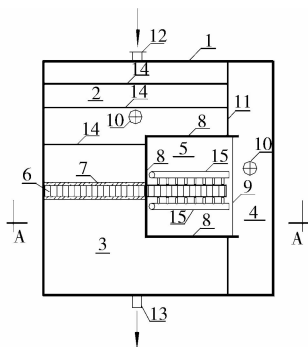


图1 开式原生污水源热泵系统原理图



注:1. 箱体;2. 杂质分离腔;3. 蓄水腔;4. 排污腔;5. 清洗腔;6. 旋转孔板;7. 孔板隔板;8. 清洗腔侧隔板;9. 清洗腔底板;10. 排污管;11. 溢流板;12. 污水进水管;13. 污水出水管;14. 撞击板;15. 清洗管

图2 开式集成污水取水机示意图

1)箱体内部的孔板隔板和溢流板把箱体分成杂质分离腔、蓄水腔、排污腔和清洗腔等4个区域。

2)杂质分离腔设置高低相间撞击板,通过降低原生污水的流速,使密度大的大尺度污染物在惯性作用下沉淀于底部,由排污管定期排出;而密度小的悬浮性污染物则溢流到排污腔连续排出,这样滤面所需过滤负荷大为降低。

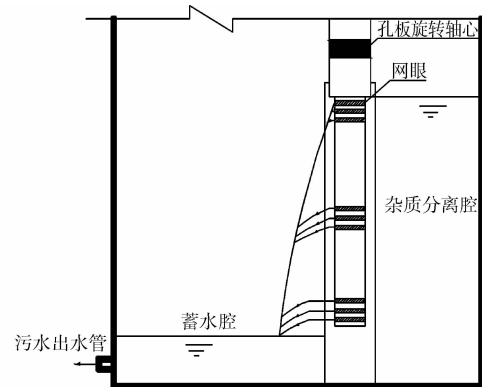
3)利用清洗腔的自然作用压头使污水流过孔板的网眼蓄存于蓄水腔,故取水设备在开式常压下工作,设备无动密封与泄漏等问题存在。

4)旋转孔板分为下侧的过滤区和上侧的再生区。孔板上有规律地布置着网眼,运行过程网眼部分时间位于过滤区行使过滤功能向污水换热器供应合适的污水;而部分时间位于再生区经污水换热器

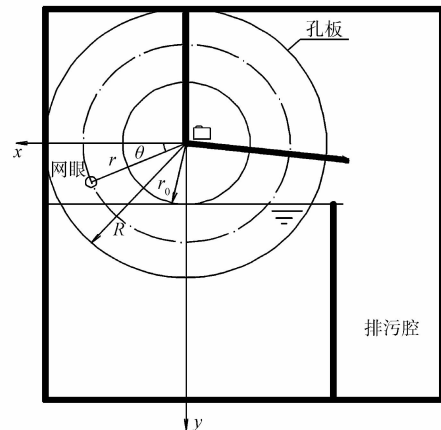
换热后的污水回水反洗得到再生。反洗水采用双面喷嘴清洗技术,保证了滤面的清洗效果。

## 2 开式取水数学模型

开式污水取水机运行物理模型如图3所示。



(a) 取水运行示意图



(b) 坐标及相应几何参数

图3 开式取水机运行物理模型

建立数学模型时,作如下假设:1)污水中各种尺度污染物是均匀、连续分布的;2)旋转孔板在低转速下运行,污水出流满足自由出流条件;3)每个网眼的瞬时堵塞系数与该时刻网眼中污染物的积存量成正比;4)假设旋转孔板上网眼分布规律如下:各网眼围绕旋转轴心按同心圆环排列,过滤区网眼位置可由其所处的环序数  $i$  和环上相对网眼序数  $j$  唯一表示,即网眼位置为  $(i, j)$ , 其中  $i = [1, m]$ ,  $i = 1$  表示最外侧圆环;  $m$  (不超过  $\frac{R-r_0}{l_{u,r}}$  值的最大正整数) 为同心圆环数。同理,  $j = [1, n_i]$ ,  $j = 1$  的定义如下, 设  $\tau = 0$  时刻, 各环均有一网眼其中心位于污水的水平面, 令该网眼即对应  $j = 1$ , 而  $n_i$  (不超过  $\frac{\pi - 2\theta_i}{l_{u,c}}$  ( $R - \frac{2i-1}{4\pi} l_{u,r}$ ) 值的最大正整数,  $\theta_i$  是位置  $(i, j=1)$  的网眼的中心与旋转轴心连线与水平面的夹角) 为第  $i$  环在过滤区网眼数, 其中  $R$  是孔板半径,  $m; r_0$

是污水溢流面上沿距旋转孔板中心的距离, m;  $l_{u,r}$ 、 $l_{u,c}$  分别是相邻网眼在径向与环向间距, m。

由以上假设, 可知

$$\varphi = \frac{W}{W_M} \quad (1)$$

$$W = C \int_0^\tau u \cdot (1 - \varphi) d\tau \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为网眼堵塞系数;  $W$  为网眼污物密度, 即网眼积存污物量的面积密度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $W_M$  为网眼完全阻塞时的污物密度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $u$  为网眼出水流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $C$  为网眼截留浓度, 即网眼截留较大尺度污染物的浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau$  为网眼进入过滤区的时间, s。

对于位置  $(i, j=1)$  处的网眼, 不同时刻  $\tau$  流向蓄水腔的污水流速为

$$u = \mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu \sqrt{2g \left[ R_i \sin\left(\frac{\pi - 2\theta_i}{T_i'} \tau + \theta_i\right) - r_0 \right]} \quad (3)$$

其中有关参数分别为:

$$\mu = 0.60(1 + 0.64s^2)^{[15]},$$

$$s = \frac{\pi d_u^2}{4l_{u,r} \cdot l_{u,c}}, 0 \leq \tau \leq T_i' = T \frac{\pi - 2\theta_i}{2\pi},$$

$$R_i = R - \left(i - \frac{1}{2}\right) l_{u,r},$$

$$\theta_i = \arctan \frac{r_0}{\sqrt{R^2 - r_0^2} - \left(i - \frac{1}{2}\right) l_{u,r}}.$$

式中:  $\mu$  为流量系数;  $\Delta p$  为过滤面两侧压差, Pa;  $\rho$  为污水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $R_i$  为第  $i$  环的半径, m;  $s$  为滤面截面系数;  $d_u$  为网眼的直径, m。

联立式(1)~(3), 可知  $(i, j=1)$  处网眼的堵塞系数瞬时值为

$$\varphi_{i,j=1} = \frac{C}{W_M} \cdot \int_0^\tau \mu \sqrt{2g \left[ R_i \sin\left(\frac{\pi - 2\theta_i}{T_i'} \tau + \theta_i\right) - r_0 \right]} \cdot (1 - \varphi_{i,j=1}) d\tau \quad (4)$$

由式(4)对时间  $\tau$  求导数, 可得

$$\frac{d\varphi_{i,j=1}}{d\tau} = \frac{C\mu \sqrt{2gR_i}}{W_M} (1 - \varphi_{i,j=1}) \cdot \sqrt{\sin\left(\frac{\pi - 2\theta_i}{T_i'} \tau + \theta_i\right) - \frac{r_0}{R_i}} \quad (5)$$

公式(5)是一个描述  $\varphi_{i,j=1}$  的微分方程, 结合初始条件  $\varphi_{i,j=1}(\tau=0) = 0$ , 分离变量, 积分可得

$$\varphi_{i,j=1} = 1 - \exp\left[-\frac{C\mu \sqrt{2gR_i}}{W_M} \tau\right]$$

$$\int_0^\tau \sqrt{\sin\left(\frac{\pi - 2\theta_i}{T_i'} \tau + \theta_i\right) - \frac{r_0}{R_i}} d\tau \quad (6)$$

式中:  $T'$  为过滤周期, 即孔板在过滤区的旋转周期, s。

若用孔板旋转周期  $T$  表示, 则  $\frac{\pi - 2\theta_i}{T_i'} = \frac{2\pi}{T}$ , 从而

$$\varphi_{i,j=1} = 1 - \exp\left[-\frac{C\mu \sqrt{2gR_i}}{W_M} \tau\right]$$

$$\int_0^\tau \sqrt{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau + \theta_i\right) - \frac{r_0}{R_i}} d\tau \quad (7)$$

式中:  $T$  为孔板旋转周期, s。

上式描述了各网眼在过滤区阻塞系数的逐时变化。当离开过滤区时, 各网眼阻塞系数均达到各自最大值, 即

$$\varphi_{i,j=1} \Big|_{\tau=T_i'} = 1 - \exp\left[-\frac{C\mu \sqrt{2gR_i}}{W_M} \cdot \int_0^{T_i'} \sqrt{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau + \theta_i\right) - \frac{r_0}{R_i}} d\tau\right] \quad (8)$$

相邻网眼间距与整个孔板的圆周相比可以忽略, 因而, 上述分析结果也可近似应用于网眼的其它分布规律的情形(如三角形、正方形等分布)。当一部分网眼离开过滤区时, 同时有一部分网眼再生后进入, 此过程循环往复、连续不断, 因此就整个过滤区域而言, 可认为孔板运行过程, 进水流量近似不变。但以空间坐标而言, 各位置相应网眼的阻塞系数是不一致的, 离过滤区出口越近, 阻塞系数越大。

由于各网眼处于过滤区时, 过滤时间  $\tau$  与旋转角度  $\theta$  一一对应关系, 设同一环上相邻网眼间的角度差  $\Delta\theta$  与间隔的过滤时间  $\Delta\tau$  两者有:  $\Delta\theta = \frac{2\pi}{T} \Delta\tau$ 。

第  $i$  个环第  $j$  个网眼的阻塞系数与第  $i$  个环第 1 个网眼的阻塞系数第  $(j-1) \Delta\tau$  时刻的阻塞系数相等, 用符号表示为

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j=1}[(j-1)\Delta\tau] = \varphi_{i,j=1}\left(\frac{j-1}{n_i-1}T'\right) \quad (9)$$

在开式污水取水系统中, 各网眼自由出流, 故  $\Delta p = g(y - r_0) = g(rs \sin \theta - r_0)$ 。进而, 由几何关系可知, 各网眼出口污水流速为

$$u_{i,j} = \mu \sqrt{2gR_i} \int_0^{\frac{j-1}{n_i-1}T'} \sqrt{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau + \theta_i\right) - \frac{r_0}{R_i}} d\tau \quad (10)$$

滤面过水流量与孔板过滤负荷分别为

$$V = 3600A_u \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [u(i,j)(1 - \varphi_{i,j})] \quad (11)$$

$$M = CV = 3600A_u C \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [u(i,j)(1 - \varphi_{i,j})] \quad (12)$$

式中:  $V$  为滤面过水流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $M$  为孔板过滤负荷, 即单位时间孔板需过滤污物质量,  $\text{kg}/\text{h}$ 。

过滤区在位置  $(i, j) = (1, n_1)$  处的网眼最早出现堵塞的可能性。由极限知识, 只有当  $\tau \rightarrow \infty$  时, 才有  $\varphi_1 \Big|_{\tau=T_1'} = 1$  的精确值。实际运行中当  $\varphi_1 \Big|_{\tau=T_1'} \geq 0.995$  时, 可认为该网眼已完全堵塞, 此时过滤临界周期  $T'_c$ , 也即  $T'_c = T'_1$ ; 从而, 孔板临界旋转周期  $T_c = \frac{2\pi}{\pi - 2\arcsin \frac{r_0}{R}} T'_1$ 。设计时需使得  $T' \leq T'_c$  或

者  $T \leq T_c$ , 以保证运行期间, 全部网眼均未失效。 $T'_1$  由下式通过试算或编程方法求解。

$$\varphi_1 \Big|_{\tau=T'_1} = 1 - \exp \left[ - \frac{C\mu \sqrt{2gR_1}}{W_M} \int_0^{T'_1} \sqrt{\sin \left( \frac{2\pi}{T} \tau + \theta_1 \right) - \frac{r_0}{R_1}} d\tau \right] = 0.995 \quad (13)$$

从而满足

$$\frac{C\mu \sqrt{2gR_1}}{W_M} \int_0^{T'_1} \sqrt{\sin \left( \frac{2\pi}{T} \tau + \theta_1 \right) - \frac{r_0}{R_1}} d\tau = 5.30 \quad (14)$$

综上, 可求出特定  $W_M, C, R, r_0, s, T$  下相对应的  $\varphi, V$  和  $M$  等运行参数。若设计周期  $T' = T'_c$  或者  $T = T_c$ , 则此时开式污水取水机的各运行参数称为临界运行参数。

### 3 开式取水运行特性

图4~7显示了各临界运行参数随不同孔板半径  $R$ 、截面系数  $s$ 、网眼截留浓度  $C$  的变化关系, 其中滤面完全阻塞时的滤面污物密度, 根据哈尔滨某工

程实例的测试数据本文均取为  $W_M = 1.2 \text{ kg/m}^2$ 。

图4显示了在  $s = 0.349$  (对应  $d_u = 0.005 \text{ m}$ 、 $l_{u,r}/d_u = l_{u,c}/d_u = 1.5$ ) 及  $C = 0.3 \text{ kg/m}^3$  下, 临界运行参数随孔板半径  $R$  的变化。由图4(a)、(b)可知, 同一  $r_0/R$  下, 临界孔板旋转周期  $T_c$  与临界过滤周期  $T'_c$  均随着  $R$  的增大而减少, 而同一  $R$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而增大。由图4(c)、(d)可知, 同一  $r_0/R$  下, 滤面过水流量  $V_c$  与孔板过滤负荷  $M_c$  均随着  $R$  的增大而增大, 而同一  $R$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而减小。图5显示了在  $d_u = 0.005 \text{ m}$ ,  $R = 0.5 \text{ m}$ ,  $C = 0.3 \text{ kg/m}^3$  下, 临界运行参数随截面系数  $s$  的变化。由图5(a)、(b)可知, 同一  $r_0/R$  下, 临界孔板旋转周期  $T_c$  与临界过滤周期  $T'_c$  均随着  $s$  的增大而减少, 而同一  $s$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而增大。由图5(c)、(d)可知, 同一  $r_0/R$  下, 滤面过水流量  $V_c$  与孔板过滤负荷  $M_c$  均随着  $s$  的增大而增大, 而同一  $s$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而减小。

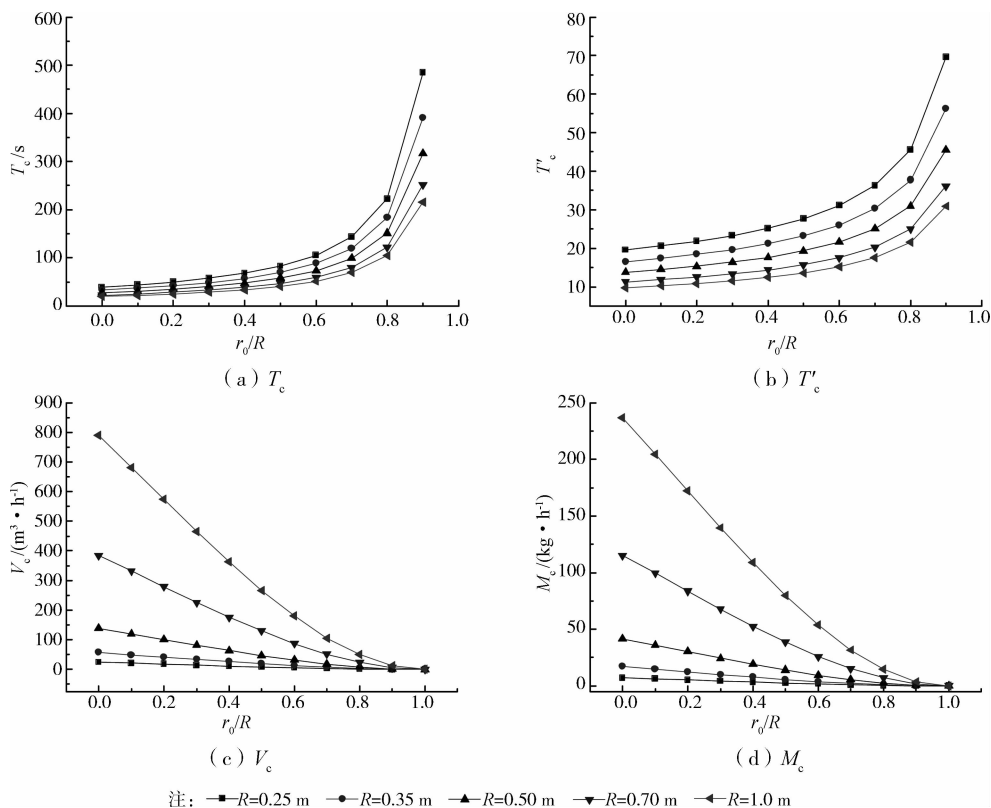


图4 临界运行参数随孔板半径  $R$  的变化 ( $d_u = 0.005 \text{ m}$ 、 $l_{u,r}/d_u = l_{u,c}/d_u = 1.5$ 、 $s = 0.349$ 、 $C = 0.3 \text{ kg/m}^3$ )

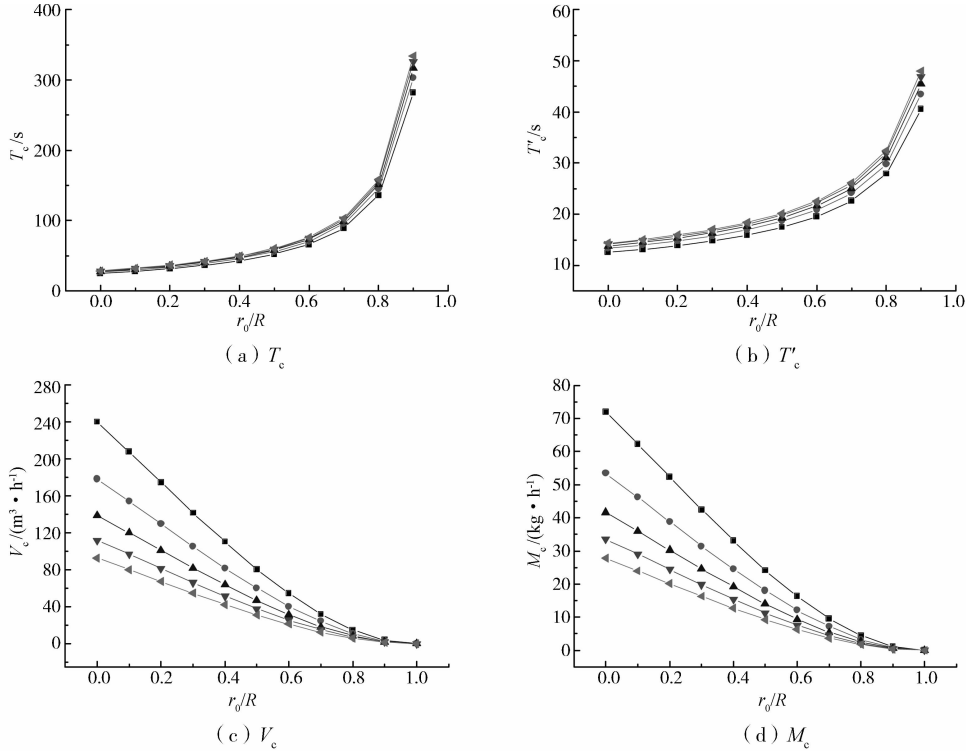
图6显示了在  $s = 0.349$  (对应  $d_u = 0.005 \text{ m}$ 、 $l_{u,r}/d_u = l_{u,c}/d_u = 1.5$ ) 及  $R = 0.5 \text{ m}$  下, 临界运行参数随网眼截留浓度  $C$  的变化。由图6(a)、(b)可知, 同一  $r_0/R$  下, 临界孔板旋转周期  $T_c$  与临界过滤周

期  $T'_c$  均随着  $C$  的增大而减少, 而同一  $C$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而增大。由图6(c)可知, 滤面过水流量  $V_c$  与  $C$  无关, 而随着  $r_0/R$  (或  $r_0$ ) 的增大而减小; 而由图6(d)可知, 同一  $r_0/R$  下,

孔板过滤负荷  $M_c$  均随着  $C$  的增大而增大,而同一  $C$  下,  $M_c$  则均随着  $r_0/R$ (或  $r_0$ ) 的增大而减小。

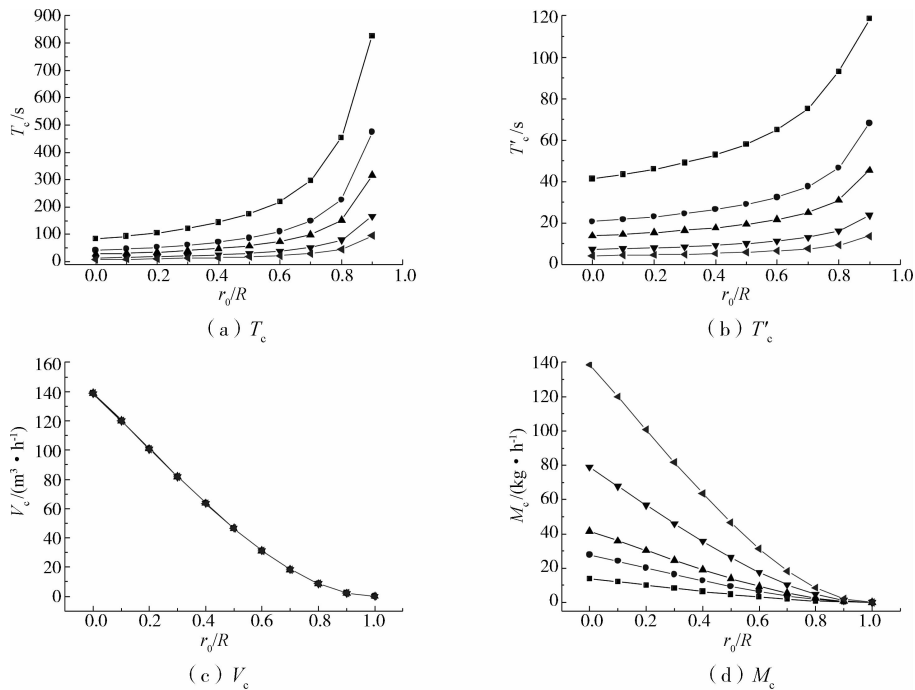
下,同一  $r_0/R$  下,滤面过水流量  $V_c$  与孔板过滤负荷  $M_c$  均随着孔板旋转周期  $T$  的增大而减小,而同一  $T$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随着  $r_0/R$ (或  $r_0$ ) 的增大而减小。

图 7 显示了在  $s=0.349$ (对应  $d_u=0.005\text{ m}$ 、 $l_{u,r}/d_u=l_{u,c}/d_u=1.5$ ),  $R=0.5\text{ m}$ 、 $C=0.3\text{ kg/m}^3$



注:  $\blacksquare-l_{u,c}/d_u=l_{u,r}/d_u=1.2\ s=0.545$   $\bullet-l_{u,c}/d_u=l_{u,r}/d_u=1.35\ s=0.431$   $\blacktriangle-l_{u,c}/d_u=l_{u,r}/d_u=1.5\ s=0.349$   $\blacktriangledown-l_{u,c}/d_u=l_{u,r}/d_u=1.65\ s=0.288$   $\blacktriangleleft-l_{u,c}/d_u=l_{u,r}/d_u=1.8\ s=0.229$

图 5 临界运行参数随截面系数  $s$  的变化 ( $d_u=0.005\text{ m}$ 、 $R=0.5\text{ m}$ 、 $C=0.3\text{ kg/m}^3$ )



注:  $\blacksquare-C=0.1\text{ kg/m}^3$   $\bullet-C=0.2\text{ kg/m}^3$   $\blacktriangle-C=0.3\text{ kg/m}^3$   $\blacktriangledown-C=0.5\text{ kg/m}^3$   $\blacktriangleleft-C=1.0\text{ kg/m}^3$

图 6 临界运行参数随网眼截留浓度  $C$  的变化 ( $d_u=0.005\text{ m}$ 、 $l_{u,r}/d_u=l_{u,c}/d_u=1.5$ 、 $s=0.349$ 、 $R=0.5\text{ m}$ )

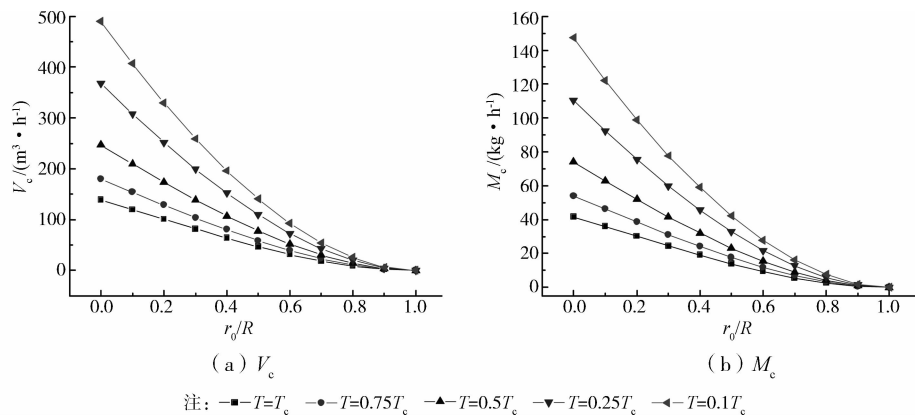


图7 临界运行参数随孔板旋转周期  $T$  的变化 ( $d_u=0.005\text{ m}$ ,  $l_{u,r}/d_u=l_{u,c}/d_u=1.5$ ,  $s=0.349$ ,  $R=0.5\text{ m}$ ,  $C=0.3\text{ kg/m}^3$ )

## 4 结论

分析了开式原生污水源热泵系统的取水运行特性。通过定义网眼阻塞系数、滤面污物密度等运行参数,得出了相应的数学模型,并通过建立临界运行的参数判别依据,考察了各临界运行参数的变化关系,得出如下结论:

1) 过滤区孔板外侧的网眼阻塞系数较内侧要大;出口段网眼阻塞系数较入口段大;且网眼阻塞系数随孔板旋转周期的减小而减小。

2)  $s$  及  $C$  一定时,同一  $r_0/R$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  均随  $R$  增大而减少,而同一  $R$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随  $r_0/R$  增大而增大。同一  $r_0/R$  下,  $V_c$  与  $M_c$  均随  $R$  增大而增大,而同一  $R$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随着  $r_0/R$  增大而减小。

3)  $d_u$ 、 $R$ 、 $C$  一定时,同一  $r_0/R$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  均随  $s$  增大而减少,而同一  $s$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随  $r_0/R$  的增大而增大。同一  $r_0/R$  下,  $V_c$  与  $M_c$  均随  $s$  的增大而增大,而同一  $s$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随  $r_0/R$  的增大而减小。

4)  $s$  及  $R$  一定时,同一  $r_0/R$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  均随  $C$  增大而减少,而同一  $C$  下,  $T_c$  与  $T'_c$  则均随  $r_0/R$  增大而增大。 $V_c$  与  $C$  无关,而随  $r_0/R$  增大而减小;同一  $r_0/R$  下,  $M_c$  均随  $C$  增大而增大,而同一  $C$  下,  $M_c$  则均随  $r_0/R$  增大而减小。

5)  $s$ 、 $R$ 、 $C$  一定时,同一  $r_0/R$  下,  $V_c$  与  $M_c$  均着  $T$  增大而减小,而同一  $T$  下,  $V_c$  与  $M_c$  则均随  $r_0/R$  增大而减小。

### 参考文献:

[1] 曹怀术,廖华,魏一鸣. 2010年中国能源流分析[J]. 中国能源,2012,34(4):29-31.  
Cao H S, Liu H, Wei Y M. 2010 China energy flow

analysis [J]. China Energy, 2012, 34(4): 29-31.

[2] 张斌. 2020年我国能源电力消费及碳排放强度情景分析[J]. 中国能源, 2009, 31(3): 28-32.

Zhang B. Analysis on 2020 China's energy consumption and carbon emissions intensity of electricity scenario [J]. China Energy, 2009, 31(3): 28-32.

[3] 龙惟定. 试论我国暖通空调业的可持续发展[J]. 暖通空调, 2003, 29(3): 23-25.

Long W D. Sustainable development of China's HVAC industry [J]. HVAC, 2003, 29(3): 23-25.

[4] Qian J F, Sun D X. Form and operating mode of non-clean water source heat pump systems with freezing latent heat collection [C]//Proceedings of the Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings, Guilin, 2009: 1604-1609.

[5] Yoshii T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8): 696-706.

[6] Baek N, Shin U. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source [J]. Solar Energy, 2005, 78(3): 427-440.

[7] Stijemstrom B. Feeding large heating pumps from sewage water treatment plants [C]//Proceedings of the International Conference on Applications and Efficiency of Heat Pump Systems, Atlanta, 1991: 183-192.

[8] Qian J F, Sun D X, Zhuang Z Y. Optimization and analysis of the urban sewage source heat pump system by finite time thermodynamics theory [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Beijing, 2007: 923-926.

[9] Lindstrom H O. Experiences with a 3.3 MW heat pump using sewage water as heat source [J]. Journal of Heat Recovery Systems, 1985, 5(1): 33-38.

(下转第114页)

- [6] Chen C, Zhao B, Weschler C J. Indoor exposure to "outdoor PM<sub>10</sub>": Assessing its influence on the relationship between PM<sub>10</sub> and short-term mortality in US cities [J]. *Epidemiology*, 2012, 23(6): 870-878.
- [7] Madureira J, Paciência I, Fernandes E D O. Levels and indoor-outdoor relationships of size-specific particulate matter in Naturally Ventilated Portuguese Schools [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues*, 2012, 75(22/23): 1423-1436.
- [8] Jenkins P L, Phillips T J, Mulberg E J, et al. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26A(12): 2141-2148.
- [9] 张振江, 赵若杰, 曹文文, 等. 天津市可吸入颗粒物及元素室内外相关性[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 357-364.
- Zhang Z J, Zhao R J, Cao W W, et al. Residential indoor-outdoor relationships of PM<sub>10</sub> and elements in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 357-364.
- [10] Wen Y G, Lian Z W, Ye X J, et al. Relationship between outdoor and indoor PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> in apartment and office buildings [J]. *Journal of Donghua University: English Edition*, 2008, 25(3): 334-339.
- [11] Kang Y M, Zhong K, Lee S C. Relative levels of indoor and outdoor particle number concentrations in a residential building in Xi'an [J]. *China Particology*, 2006, 4(6): 342-345.
- [12] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2005, 35(2): 169-176.
- Hu M, Zhang J, Wu Z J. Chemical Composition of rainfall and its effect on the removal of atmospheric particulate matter in Beijing [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2005, 35(2): 169-176.
- [13] Samara C, Tsitouridou R. Fine and coarse ionic aerosol components in relation to wet and dry deposition [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 120(1/2): 71-88.
- [14] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- Hu M, Liu S, Wu Z J, et al. Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distributions in the summer of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- [15] 朱宪春, 乐群. 上海市 PM<sub>10</sub> 的时间分布特征及其与气象条件的关系[C]//第八届长三角气象科技发展论坛论文集, 2011: 719-723.
- [16] 文远高. 室内外空气污染物相关性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

(编辑 胡英奎)

(上接第 67 页)

- [10] Wu P, Fu X Z. Feasibility analysis and tentative plan on sewage source heat pump system in Chongqing [C]// *Proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration, Beijing*, 2007: 1424-1432.
- [11] 钱剑峰, 吴学慧. 污水源热泵软垢厚度对流动换热的影响[J]. *流体机械*, 2007, 25(1): 73-78.
- Qian J F, Wu X H. Effect of fluxion and heat transfer due to the thickness of soft dirt in shell sewage heat exchanger [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 25(1): 73-78.
- [12] 张吉礼, 钱剑峰, 孔祥兵, 等. 铜管换热器内污水颗粒状污垢生长特性的试验分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(5): 60-64.
- Zhang J L, Qian J F, Kong X B, et al. Experimental study of granular fouling growth characteristics of sewage in copper pipe heat exchanger [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2010, 32(5): 60-64.
- [13] 孙德兴. 污水源热泵空调项目推广与应用[J]. *中国科技奖励*, 2008(2): 44.
- Sun D X. Promotion and application on sewage source heat pump project [J]. *Chinese Science and Technology Award*, 2008(2): 44.
- [14] 张吉礼, 马良栋. 污水源热泵空调系统污水侧取水、除污和换热技术研究进展[J]. *暖通空调*, 2009, 39(7): 41-47.
- Zhang J L, Ma L D. Study progress in intaking water, defouling and heat transfer in sewage water source heat pump air conditioning systems [J]. *HVAC*, 2009, 39(7): 41-47.
- [15] 蔡增基. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(编辑 王秀玲)