污水源热泵干渠取水降温后的可恢复特性

吴荣华[1], 徐 莹[2], 孙德兴[2], 任南琪[2]

(1. 哈尔滨工业大学 余热利用与热泵技术研究中心, 哈尔滨 150090, E-mail: shwu122@sina.com;
2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090;)

摘 要: 在调查并比较了热泵取水降温前后的渠温状态之后,基于渠温模型与调查结果预测了大、小温降的可恢复程度. 由此定义并推导了可恢复性的准则关联参数 φ与判定准则 β, 以及最小渠程与最大温降的关联式. 结果表明:干渠条件特征值 β由干渠、污水及土壤的结构与热物性参数描述,是所有问题的关键. 不论大、小温降的渠温,均与原渠温一样向土壤地温接近,在一定的渠程范围内具有可恢复性. 可恢复性由判定准则 β,温降 Δt_d及渠程 z_t决定,与土壤地温无关. 可恢复性准则式可用于指导工程上的渠水降温及对污水取热后的水处理工作的影响,在应用方面具有很大的意义.

关键词: 污水源热泵; 渠温; 地温; 可恢复性
中图分类号: TU831.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 0367-6234(2008)06-0901-04

Restorability characteristic of intake water temperature drop in trunk canal of sewage heat pump

WU Rong-hua[1], XU Ying[2], SUN De-xing[2], REN Nan-qi[2]

(1. Utilization of Waste Heat and Heat Pump Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, Email: shwu122@sina.com; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the research of canal temperature state before and after lowering the intake water temperature, the restorability degree of lowering temperature has been forecasted. The criterion associated number of restorability φ and the determination criterion β were defined, and the relevancy formulas of the minimum canal route and the maximum temperature drop were deduced. The results show that the value β attributing to the canal temperature model is described by the structure of trunk canal, urban sewage and soil, which is the key point of all the problems. The canal temperature with large or small lowering is approximate to the soil temperature, and can the restored in some range the value. The restorability is determined by β, route and temperature drop Δt and is irrelative with the soil temperature. Also the study case shows that criterions can be used to deal with the problems of intake water temperature drop and the influence of water treatment after taking heat from sewage in projects.

Key words: sewage heat pump; canal temperature; soil temperature; restorability

利用城市污水作热源为建筑物供暖空调具有重要的节能与环保意义[1-3]. 其中未处理的原生污水 (干渠污水)[4]分布面广、水温高,容易开发利用,经济价值高[5]. 而原生污水在渠中与土壤发生热量传递,形成了污水与土壤的“耦合源”,需要深入认识源的耦合特性[6]. 污水与周边土壤的导热类似土壤热泵的水平埋管[7-8],在假定与简化条件下,可得到渠程温变模型. 渠温是以等深地温为渐进线的一条曲线,末端水温最终将与土壤地温接近,可认为土壤对水温有稳定调节作用.

收稿日期: 2006-12-07.
基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20060390808).
作者简介: 吴荣华 (1976—),男,博士后;
孙德兴 (1942—),男,教授,博士生导师;
任南琪 (1959—),男,特聘教授,博士生导师.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当水温变化时,例如热泵取水降温,土壤地温会对其进行调节或恢复.

1 渠温模型及其特征值

通过引入土壤地温,采用虚拟镜像热源法[9-10],对污水干渠与土壤的传热求解,得到干渠沿程(渠程)的温变模型为

$$\theta_w = \frac{\gamma \cdot \beta \cdot z + \theta_w^0}{\beta \cdot z + 1}, \tag{1}$$

$$\beta = \frac{2\pi\lambda}{GC\ln\left(4\dfrac{L_p - L_d}{d}\right)}, \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{\theta_w'}{L_w}\left(L_p - L_d - \frac{d}{2}\right). \tag{3}$$

式中: θ_w^0 为污水干渠起始温度, ℃; θ_w 为干渠沿程温度, ℃; θ_w' 为地下足够远处温度, ℃; G为污水流量, kg/s; C为污水比热, kJ/kg·℃; λ为土壤修正导热系数, W/m ℃(可取土壤导热系数的2倍); L_p为干渠距地表面的平均值, m; L_d为冻土深度, m; d为干渠直径, m; z为干渠至起始点的沿程长度, km. 其中,确定干渠直径时,若为方渠,则取 $d = 0.5(b + c)$作为近似值, b为干渠宽, m, c为干渠高, m. β、γ是由污水、干渠、土壤的参数关联起来的,决定着污水干渠沿程温度变化的幅度.

1) $\beta = \dfrac{2\pi\lambda}{GC\ln\dfrac{4L_p}{d}}$ 是污水干渠在土壤中作为线热源形成的一个参数值,由污水干渠的埋深、管径与流量条件确定. 将其称之为"干渠条件特征值", m^{-1}.

2) $\gamma = \dfrac{\theta_w'}{L_w}\left(L_p - \dfrac{d}{2}\right)$ 为土壤的温度场在干渠埋深处的温度,在不同地区的不同月份可将其视为常数,既可简化计算,也提高准确度,与土壤的真实温度场无关. 将其称之为"干渠地温特征值", ℃.

地温特征值 γ可认为是常数,或在一定范围内变化. 而条件特征值 c则因干渠沿程 z范围内的管径、流量发生变化而变化,式(2)不能作为计算公式. 为此,作进一步的分析以确定 β.

式(1)可变为

$$\frac{\theta_w - \gamma}{\theta_w^0 - \gamma} = \frac{1}{\beta \cdot z + 1}. \tag{4}$$

若假定污水干渠沿程 z范围内有 n个不同管径或流量的渠段,则有:

$$\frac{\theta_w^i - \gamma}{\theta_w^{i-1} - \gamma} = \frac{1}{\beta_i \cdot z_i + 1}. \tag{5}$$

式中, $i = 1 \sim n$. 将 n个式子相乘得:

$$\frac{\theta_w^n - \gamma}{\theta_w^0 - \gamma} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n}(\beta_i \cdot z_i + 1)}. \tag{6}$$

于是可得到条件特征值 β的表达式:

$$\beta \cdot z = \prod_{i=1}^{n}(\beta_i \cdot z_i + 1) - 1. \tag{7}$$

因此, β是一个与污水及干渠参数有关的定常数.

2 取热前后的渠温状态

污水被热泵系统取水降温后,干渠水温在取水点发生突降,设计在最冷天取水温降 3～4 ℃,假定利用干渠水量 100%,则干渠水温同等下降 3～4 ℃,此时后续干渠水温的沿程变化规律发生变化. 为此,对哈尔滨市某干渠作了取点调查. 测试结果见表 1.

表 1 某污水干渠沿程温度及 β值

污水干渠沿程温度与条件特征值							
x/km	0.5	1	1.5	2	2.5	3.5	4.5
θ_w/℃	11.4	11	10.6	10.3	10	9.4	9
β/km^{-}	0.27	0.25	0.26	0.26	0.27	0.31	0.33

该干渠流量及直径沿程发生变化,因此, β值沿程对应变化. 根据实测的温度可得到各测点对应的 β值(该值是平均值,由测点之前的流量与管径综合确定,可视为一个定值(见表 1)).

若在 x = 1 km处取水作为热泵冷热源,温降 3 ℃或 6 ℃,则在 x = 1 km以后各点相应下降. 以 x = 1 km处作为起始点,按表 1中实测的条件特征值为计算依据,其结果如图 1所示.

从图 1中不难看出,污水干渠 5 km范围内温降 3 ℃左右,沿污水流向温度梯度越来越小. 三条曲线表明,在干渠足够长时,干渠温度可能趋近于某一温度值(为干渠埋深处对应的土壤地温值),或者所有的曲线以 $\theta_w = \gamma$为渐近线.

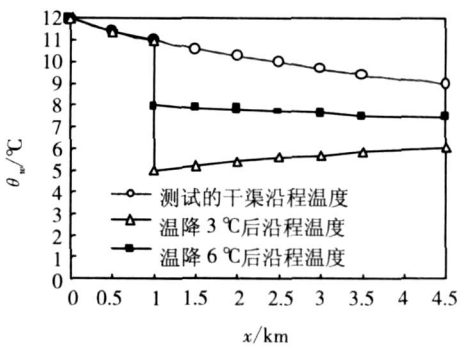

图 1 热泵取热前后的渠温状态

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　降温后可恢复性预测

图 1是实际测得的数据,已反应了一定的恢复特性,但是否可恢复,需要用已测得的参数作长距离渠温预测.

若 $\gamma = 7$ ℃,以 $x = 1$ km处为起始点,当 θ_w^0 分别等于 11 ℃、8 ℃(利用 3 ℃温降)和 5 ℃(利用 6 ℃温降)时干渠沿程温度变化如图 2所示(以图 1中的条件特征值为基础).

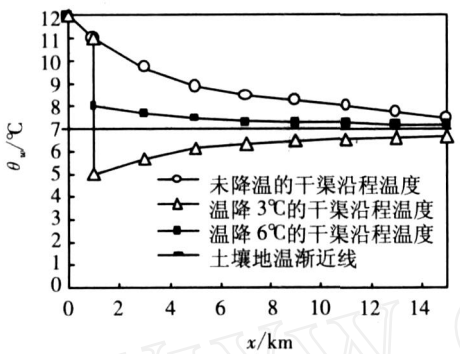

图 2　降温后长距离渠温预测状态

由图 2可知,热泵提取污水的热量以后,在 6℃温降范围内,干渠沿程不超过 10 km就与原来沿程温度基本一致,差值不到 1℃.

由此可以推断,只要取水点以后的干渠长度超过 10 km,降温将趋于恢复,干渠具有可恢复性. 热泵所提取的污水中的热量实际是污水要散发出去的,不影响后续的水温. 一般情况下,污水处理厂处于城市郊区,和取水点相距较远,热泵提取污水中的能源对生化处理的影响可以不计.

4　可恢复性及影响因素

可恢复性是指从取水点到末端某点(例如最末端的污水厂) z距离范围类,热泵取水降温后,末端某点的渠温与原温接近,例如相差不到 1 ℃,而非相等,则认为 z段干渠对热泵取水降温具有可恢复性. 可以假定认为前后的温差 $\Delta\theta$接近或等于 $\Delta\theta_0$ 时已经恢复,即:

$$\Delta\theta = \theta_w - \theta'_w, \Delta\theta \leq \Delta\theta_0. \tag{8}$$

式中: θ'_w 为热泵取水降温后的干渠水温, ℃; Δt 为取水点干渠温降, ℃(当热泵取水量 100%时,等于热泵利用温降); $\Delta\theta$为热泵取水降温前后干渠末端某点的温差, ℃,可称之为端点温差; $\Delta\theta_0$ 为判定可恢复性基准温差, ℃.

定义已明确了干渠渠程 z是可恢复性的一个主要参数,或关键因素. 而图 1、图 2从实际出发,反映了渠程 z的有限性. 另外,条件特征值 β与地温特征值 γ也是可恢复性的重要指标.

当取水点渠温由 θ_w 降为 θ'_w 时,降温 Δt, 则由式 (1)得到:

$$\theta_w - \theta'_w = \frac{\Delta t}{\beta \cdot z + 1}. \tag{9}$$

而由式 (4)又得到:

$$\frac{\theta'_w - \gamma}{\theta_w - r} = 1 - \frac{\Delta t}{\theta_w^0 - r}. \tag{10}$$

式 (10)表征的是温差相对值,仅 与 Δt有关,式 (9) 表征的是温降前后的渠程温差值,与 Δt、β、z 关联. 显然,$\Delta\theta$仅与 Δt、β、z有关,而与 γ无关. γ与地区、季节、土壤深度等均有很大的关系,其值不易确定,而描述是否可恢复的 $\Delta\theta$表达式却不含 γ 参数,这为所有公式的实用性、可靠性与精确性提供了保证.

干渠 z范围内的流量、管径是变化的,并给出式 (7),但是在大渠程范围内很难获得实际数据,为此按最不利情况下的 β作为依据. 由式 (7)有:

$$\frac{\Delta t}{\beta_1 \cdot z_1 + 1} \geq \frac{\Delta t}{\prod_{i=1}^{n}(\beta_i \cdot z_i + 1)}. \tag{11}$$

即有:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta t}{\beta \cdot z + 1} \leq \frac{\Delta t}{\beta_1 \cdot z_1 + 1}. \tag{12}$$

当 $\frac{\Delta t}{\beta_1 \cdot z_1 + 1} \leq \Delta\theta_0$ 时, $\Delta\theta \leq \Delta\theta_0$. 因此以 β_1 代替 β是最不利的情况,而 β_1 是取水点干渠对应的条件特征值,干渠流量与管径均在掌握之内.

5　判定准则与最大温降

为了更容易、更明确地判断在某点取水降温时,末端某点是否可恢复,建立判定准式.

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1}{\beta \cdot z + 1}. \tag{13}$$

令:

$$\varphi = \frac{GC\ln\left(4\frac{L_p - L_d}{d}\right)}{2\pi}. \tag{14}$$

则根据式 (2)有:

$$\beta \cdot z = \frac{\lambda \cdot z}{\varphi}. \tag{15}$$

式中: φ是一个完全由干渠条件决定的参数值,称之为准则关联参数, ℃/W. $\beta \cdot z$是一个无因次数,可直接以此作为判定准则. 当 $\Delta\theta \leq 1$ ℃时,可以认为水温恢复了,以此为依据可确定 $\beta \cdot z$范围. 当 $0 \leq \Delta\theta \leq 1$ ℃, $2 \leq \Delta t \leq 8$ ℃(污水的可取热降温范围)时, $0 \leq \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \leq 0.5$,则 $\beta \cdot z \geq 1$,认为肯定具有可恢复性,而 $\beta \cdot z = 1$为临界可恢复性准则

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

数, $\beta \cdot z < 1$认为不一定有可恢复性.

若令:

$$\frac{\Delta\theta_0}{\Delta t} = \frac{1}{\beta \cdot z + 1}. \tag{16}$$

则由端点基准温差形成的关联曲线图如图 3所示,曲线之下区域为可恢复区域.

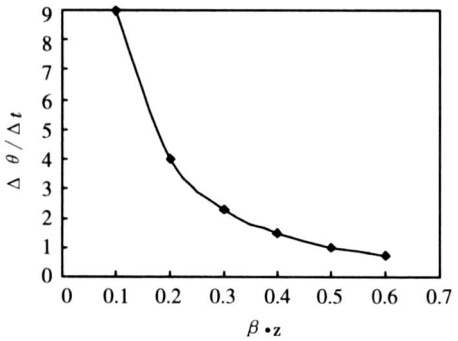

图 3 基准温差与准则式对应曲线图

反之,在端点的基准温差给定条件下,最小的渠程距离 z_l 与最大温降 Δt_M 一一对应,即:

$$\Delta t_M = \Delta\theta_0 (\beta \cdot z_l + 1), \tag{17}$$

$$z_l = \frac{1}{\beta}\left(\frac{\Delta t_M}{\Delta\theta_0} - 1\right). \tag{18}$$

6 可恢复问题设计示例

以寒冷地区某污水热泵项目为例[11-12],条件如下:

1)干渠污水流量 300 m^3/h,水温 13℃,干渠直径 1 m,渠深 4 m(地表与干渠中心距离);

2)取水点距离污水处理厂 20 km,修正后的土壤导热系数 4 W/m℃,冻土深度 2 m;

3)污水处理厂允许热泵取热后入水水温降低 1 ℃.

按上述条件,根据所得到的一系列关联式作如下指导设计:

1)可得到准则关联参数 Φ = 110 ℃/W;

2)可恢复判定准则数 $\beta \cdot z$ = 1, 为临界准则数,具有可恢复性;

3)关于最大的温降 Δt_M 值,可得到 Δt_M = 2 ℃.

4)当污水处理厂允许热泵取热后入水水温降低 2 ℃时,最大温降可为 4 ℃.

5)若末端点与取水点的流量不等,则温降按流量折算.

7 结 论

1)原生污水热泵的开发具有重要意义,土壤地温对干渠污水的降温具有调节或恢复作用.

2)污水干渠的渠温模型由两个常数特征值表征,其中干渠条件特征值由干渠、污水及土壤的结构与热物性参数来描述.

3)热泵取水降温,不论是小温降还是大温降,沿程渠温将与原渠温一样,向某一稳定温度趋近. 当干渠满足一定的渠程距离时,原渠温、小温降及大温降渠温三者接近并近似等于土壤地温.

4)干渠降温后的可恢复性由干渠条件特征值 β、温降 Δt、渠程距离 z 决定,与土壤地温无关.

5)干渠的可恢复性问题可由一个无因此准则式来表征,当大于等于临界准则数时,肯定可恢复,小于临界数时,不一定可恢复.

6)示例表明,所有的公式均适宜于工程化应用,可指导有效合理的渠水温降.

参考文献:

[1] 吴荣华,孙德兴. 城市污水冷热源应用技术发展状况研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(6): 22-28.

[2] 吴荣华,孙德兴. 城市原生污水与其它冷热源的比较研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(1): 49-52.

[3] 吴荣华,孙德兴. 城市污水源热泵系统节能与环保评价法[J]. 中国给水排水, 2005, 21(12): 103-106.

[4] 张承虎,吴荣华. 关于城市污水热能资源化相关概念和分类探讨[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 87-92.

[5] 吴荣华. 城市原生污水源热泵系统研究与工程应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005.

[6] 吴荣华,孙德兴. 寒区污水冷热源对污水生化处理的影响研究[C]//中国暖通空调学术年会论文集,合肥, 2006.

[7] 孙纯武,张素云. 水平埋管换热器地热源热泵实验研究及传热模型[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(6): 49-55.

[8] 高桂芝,王桂娟. 土壤源热泵埋地换热器的简便计算[J]. 节能, 2005, (6): 22-25.

[9] 朱谷军. 工程传热传质学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.

[10] 孙德兴. 导热与对流的数理解析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

[11] 吴荣华, 孙德兴. 哈尔滨望江宾馆利用城市污水中的能源[J]. 中国给水排水, 2003, 19(12): 92-93.

[12] 吴荣华, 孙德兴. 城市原生污水冷热源水参数特性与应用方法评价[J]. 可再生能源, 2005, 21(4): 39-43.

(编辑 张红)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net