

Design of Sewage Heat Exchanger

Haiyan Wu^{1*}, Qiang Zhang²

¹Environmental Monitoring Center, Dandong Liaoning

²Academy of Environmental Sciences, Dandong Liaoning

Email: *cindy-guan@163.com, 1246373863@qq.com

Received: Apr. 2nd, 2017; accepted: Apr. 27th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

In this paper, the idea of adopting sewage regeneration and low-grade sewage energy recycling as main means to resource sewage is put forward under the analysis of water usage status in China. It is a key technology to use sewage heat pump system to recycle sewage energy. Heat exchangers of system are the design focus. In this paper, the idea of adopting shell and tube sewage heat exchanger to recycle energy is put forward, a design program for heat exchanger is developed to cope with various seasons and various external parameters and optimize the structure in the meantime. Design results are given in the case of summer sewage working conditions.

Keywords

Sewage Heat Exchanger, Design, Structure Optimization, Energy Recycling

污水源换热器的设计

吴海燕^{1*}, 张强²

¹辽宁省丹东市环境监测中心, 辽宁 丹东

²辽宁省丹东市环境科学院, 辽宁 丹东

Email: *cindy-guan@163.com, 1246373863@qq.com

收稿日期: 2017年4月2日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

本文在分析了我国水资源利用的情况下, 提出了污水的再生利用和回收污水中的低品位能源是解决污水资源化的主要手段。利用污水源热泵系统采暖供冷是回收污水中能量的关键技术, 尤其是系统中的污水换热器是设计重点。本文提出采用管壳式污水换热器进行能量回收, 并开发了设计程序, 可对不同季节,

*通讯作者。

不同外界参数的换热器进行设计, 并进行结构优化。最后以夏季污水工况为例, 给出了设计结果。

关键词

污水源换热器, 设计, 结构优化, 能量回收

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

面对人口快速增长、环境污染等越来越多的问题, 利用可再生能源已迫在眉睫。采用污水源热泵技术, 利用城市污水作为低品位冷热源, 为建筑物供热、制冷是实现污水能量综合利用的一个有效途径。

众所周知, 水资源是人类生活和经济发展的基础资源之一, 故而水资源的短缺将会直接导致人民群众生活质量的降低, 并且造成经济的不稳定和产值的损失。据权威部门统计, 当前我国每年缺水总量约为 1200 亿立方米, 每年因此而造成的工农业经济损失高达 2000 亿元以上, 这严重影响了人民群众的的生活, 阻碍了工农业生产和城市的发展[1]。水资源短缺已经成为制约经济发展和人民群众生活质量提高的不可忽视的因素。

据调查, 我国几乎所有的江河湖泊水体都受到污染, 75%的湖泊出现了不同程度的富营养化; 90%的城市水域受到的污染情况非常严重, 50%以上的城镇水源已不符合饮用水标准, 并且 40%的水源已经不能被饮用, 对于南方城市而言, 总缺水量的 60%~70%是因为水体污染; 通过调查全国 118 个大中城市的地下水, 其中 115 个城市地下水受到了污染, 属于重度污染的占到了 40% [2]。由于水污染, 水体的使用功能降低了, 水资源短缺情况加剧了, 未来全国水资源短缺的形势依然十分严峻。如何有效解决水资源短缺问题以及更好地保护生态环境, 已是世界各国当前急待解决的问题。就当前来说, 解决水资源的严重缺乏有以下途径: 节约用水、保护水资源免于污染和在天然水资源之外开辟其他的新的水源。开辟新的水源的途径有很多, 如: 不同流域调水、雨水收集利用、淡化海水、用人工办法降雨、极地拖冰和污水的回收利用等。在这所有途径中, 污水的再生利用不但能有效缓解水资源的短缺, 而且可以减轻污水排放对生态环境的破坏, 具有非常可观的社会、环境和经济效益, 现在已被世界各国广泛应用, 以应对水资源危机。

城市污水的合理利用意义有很多, 具体有以下几方面: (1) 城市污水的回收再利用, 可以在一定程度上缓解我国水资源短缺的现状; (2) 从污水中可以提取适合国民生产生活的清洁能源, 所以在某种意义上可将污水看作一种新能源, 从而适当缓解我国能源缺乏、分布不均匀的问题, 进而可以适当优化我国的能源结构; (3) 可以开发利用污水中蕴藏的低品位能源, 为我国国民生产生活提供一定数量的清洁能源, 从而替代部分燃油, 燃煤, 可以在一定程度上缓解我国的环境问题。因此, 在我国大力倡导污水再生利用具有十分重要的现实意义。

2. 国内外污水再生利用现状

总体而言, 国外发达国家污水利用情况要比国内好, 它们在上个世纪中期就已经开展了污水利用方面的研究与应用。美国作为世界上最早开展污水回收利用的国家之一, 在 1950 年就建立了相关模型, 用于研究污水的深度处理, 分别应用于钢铁厂、电厂、核电站、生活用水、地下水回灌领域。根据相关数

据, 在美国, 用于农业灌溉的再生利用城市污水占总量的 62%, 用于工业的占总量的 30%, 用于城市设施和地下水回灌的占总量的 8% [3]。1962 年, 日本就开始了污水回收利用技术的研究与应用, 并且到 1990 年建成了 1369 座“中水”工程, 濑户内海地区淡水用量的 2/3 来自再生利用的污水, 此举使该地区水资源严重缺乏的矛盾得到了有效缓解[4]。众所周知, 新加坡非常缺乏水资源, 因此它对污水的回收利用十分重视。2000 年, 新加坡在裕廊岛工业园区投产了一套城市污水深度处理装置, 它的产水规模为 30,000 m^3/d , 其处理后的水主要用于化工给水和消防系统。以色列缺水也广为人知, 所以它特别重视节约用水以及污水回收利用, 该国全部的生活污水以及 72% 的城市污水已经被回收利用, 处理规模最大可以达到 20 万 m^3/d 。42% 的再生水作为农业用水, 30% 的再生水用于地下水回灌, 其余的用于工业及市政[5]。欧盟国家成立了一个可提供污水回收利用处理服务的国际协会, 旨在进一步缓解水资源缺乏矛盾, 更好地回收利用污水。该协会成立之后, 一直致力于保护环境和保障水资源的充足, 在全世界范围内获得了很大的反响。

就目前来说, 我国的城市污水再生利用已取得了一定程度的进展, 但从总体来看进展比较缓慢, 仅仅处于刚刚起步阶段。从中国水网统计数据可知, 到 2010 年底, 在全国范围内, 城市污水处理后得到的再生水平均利用率极低, 仅为 8.5%, 提升空间相当巨大。污水回收利用的途径在我国不同时期也是不同的, 在上个世纪 60 年代, 处理后的城市污水主要用作农业用水, 而在 70 年代中期, 一些城市相继开展了城市污水深度处理的研究。北京、青岛、太原等众多缺水城市从 1980 年就开始了城市污水再生利用的实验和应用, 如今已经有相当数量的城市步入了城市污水再生利用的推广应用阶段[6]。从总体上来说, 全国各地在污水回收利用上都取得了一些成就, 但北方地区的成绩要比南方的更加显著, 或许是因为北方更为缺水。

在上海, 城市污水回收利用已经有很多年历史了, 利用的方式也有很多, 一部分用作市政绿化浇灌用水, 其余的主要作为污泥脱水、绿化、景观、设备冲洗、道路冲洗用水等, 这些用量超过污水处理厂内总用水量的 50%。利用方式不同, 对再生水水质要求也不同, 对用于污泥干化系统、消防系统、污泥焚烧飞灰脱硫制浆、小区景观绿化等方面, 再生水水质就需要高一些, 除了以上污水再生利用途径外, 有研究学者提出了将经处理后的污水回用以防治地面沉降的新途径, 其基本思想是: 将处理后的污水回灌地下补充地下水, 减少地下水的损失量, 从而控制地面沉降。据相关部门统计[7], 上海全市的城镇污水处理厂再生水利用量大约为 56.9 万 m^3/d , 其中厂内用量大约为 1.1 万 m^3/d , 而厂外补充水的用量就很高了, 大约为 55.8 万 m^3/d , 经计算大约有 11% 的回用比例。

3. 污水换热器的设计

污水利用具有巨大的社会、环境、经济效益, 是当前各国重点研究方向之一。污水源热泵系统作为利用污水的一个很好的工具, 受到社会广泛关注。随着不断发展, 利用污水源热泵系统采暖供冷在工程上已经成规模的投入使用, 毫无疑问, 作为系统主要设备之一的污水换热器, 自然是系统研究的重点。

由于污水具有一些特殊的性质: 易结垢、粘度大、腐蚀性、堵塞风险高等, 决定了污水源换热器必须满足一些基本要求, 具体如下:

- 1) 必须采用平直光滑的流道。
- 2) 必须采用稍大的污水流通截面。
- 3) 必须具有一定的承压能力。
- 4) 污水换热器上有易于安装、开启以及清理的各种结构, 安全和效率必须放在第一位。
- 5) 在污水换热器中, 必须使换热形式更接近纯逆流状态, 这就要求各个流程之间不能“窜水”与“短路”。

6) 污水换热器应具有一定的防腐蚀能力, 不能有过长的焊缝。

管壳式污水源换热器符合上述污水换热器的六点要求, 本文选择管壳式换热器提取污水中的能量。进行污水换热器软件开发, 以适应不同温度, 不同流量等外界参数的变化, 换热器的结构优化等要求。设计流程见图 1。

以夏季回收冷量为例, 设计了一款污水换热器。夏季工况见表 1。

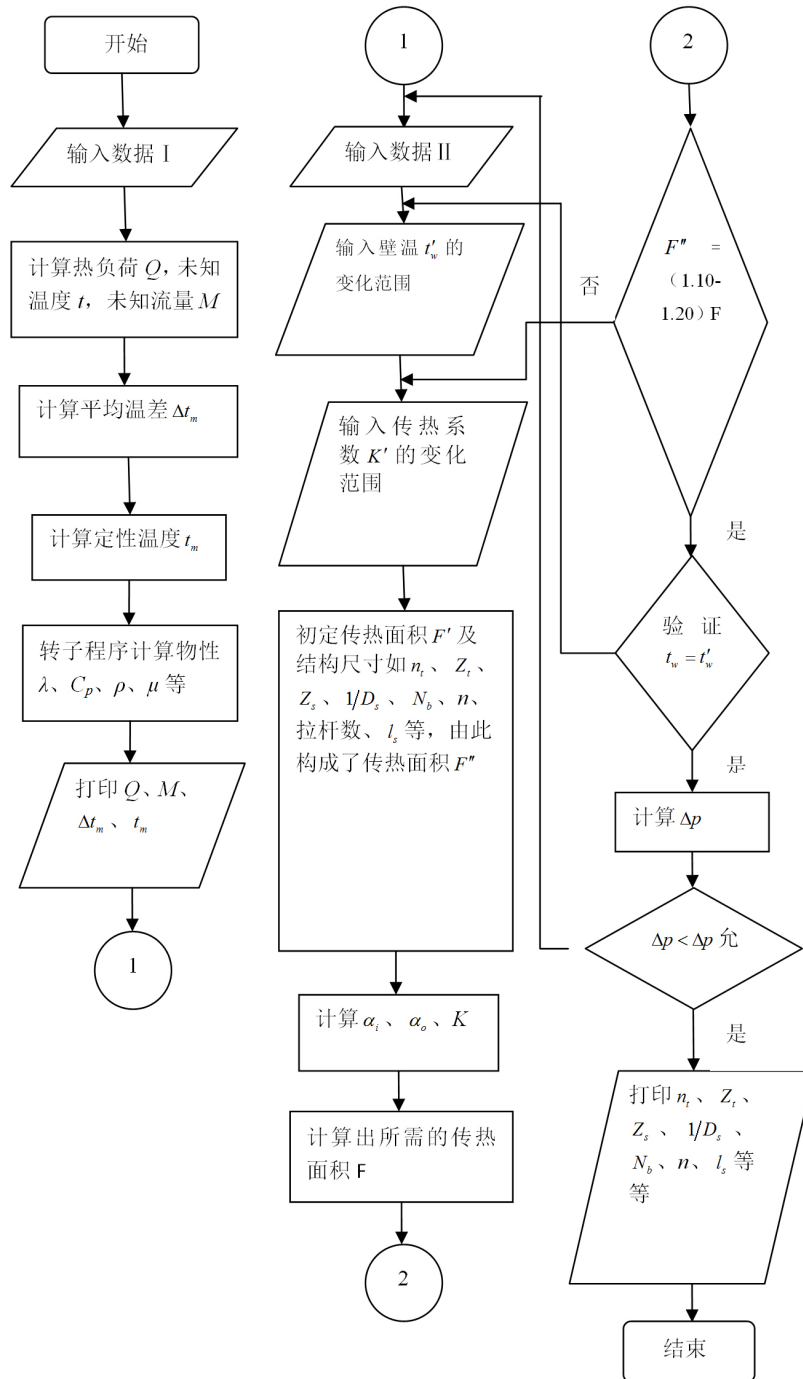


Figure 1. Design procedure of sewage shell-tube heat exchanger
图 1. 污水管壳式换热器的设计程序原理图

Table 1. Initial parameter of summer
表 1. 夏季工况初始参数

| | 进口温度/ °C | 出口温度/ °C |
|-----|-------------|--------------|
| 循环水 | $t'_1 = 33$ | $t''_1 = 23$ |
| 污水 | $t'_2 = 20$ | $t''_2 = 28$ |

由于污水的结垢性强, 故选择污水走管程, 循环水走壳程。

1. 循环水流量: $M_1 = 5 \text{ kg/s}$;

2. 热损失系数: $\eta_L = 0.98$;

3. 传热量: $Q = M_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) \eta_L = 204.6 \text{ kW}$;

4. 污水量: $M_2 = Q / [c_{p2} (t''_2 - t'_2)] = 6.0 \text{ kg/s}$;

5. 有效平均温差: $\Delta t_m = \psi \Delta t_{1m.c} = 3.9^\circ\text{C}$;

6. 初选传热系数: $K' = 1000 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$;

7. 估算传热面积: $F' = Q / (K' \Delta t_m) = 52.46 \text{ m}^2$;

8. 管子材料及规格: 选用碳钢无缝钢管 $\phi 25 \times 2.5$;

9. 管程内污水的流速: $w_2 = 1 \text{ m/s}$;

10. 管程所需流通截面: $A_t = M_2 / (\rho_2 w_2) = 6.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;

11. 每程管数: $n = 4A_t / (\pi d_i^2) = 19.1$, 取 20;

12. 每根管长: $l = F' / (nZ_i \pi d_o) = 8.35$, 取标准长, 取 7.5 m;

13. 管子排列方式: 选等边三角形;

14. 管中心距: $s = 32 \text{ mm}$;

15. 分程隔板槽处管中心距: $l_E = 44 \text{ mm}$;

16. 管束中心至最外层管中心距离: 0.116 m;

17. 管束外缘直径: $D_L = 0.116 \times 2 + 2 \times 0.0125 = 0.257 \text{ m}$;

18. 壳体内径: $D_s = D_L + 2b_3$; $b_3 = 0.25d = 6.25 \text{ mm}$, 因 $b_3 \leq 8 \text{ mm}$, 取 $b_3 = 8 \text{ mm}$; 则 $D_s = 0.273 \text{ m}$, 按照 GB151-1999 规定, 取标准直径 0.3m;

19. 管程雷诺数: $R_{e2} = \frac{w_2 \rho_2 d_i}{\mu_2} = 21608$;

20. 管程换热系数: $\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{d_i} \times 0.023 R_{e2}^{0.8} P_{r2}^{0.4} = 4306$;

21. 折流板缺口高度: $h = 0.25 D_s = 0.075 \text{ m}$;

22. 折流板间距: $(0.2 \sim 1) D_s = 0.06 \sim 0.3$, 取 $l_s = 0.25 \text{ m}$;

23. 折流板数目: $N_b = 7500 / 250 - 1 = 29$;

24. 折流板缺口面积: $A_{wg} = \frac{D_s^2}{4} \left[\frac{1}{2} \theta - \left(1 - \frac{2h}{D_s} \right) \sin \frac{\theta}{2} \right] = 0.013819 \text{ m}^2$;

25. 错流区内管数占总管数的百分数:

$$F_c = \frac{1}{\pi} \left\{ \pi + 2 \left(\frac{D_s - 2h}{D_L} \right) \sin \left[\arccos \left(\frac{D_s - 2h}{D_L} \right) - 2 \arccos \left(\frac{D_s - 2h}{D_L} \right) \right] \right\} = 0.70$$

26. 缺口处管子所占的面积: $A_{wt} = \frac{\pi d_o^2}{8} n_t (1 - F_c) = 0.00295 \text{ m}^2$;

27. 流体在缺口处的流通面积: $A_b = A_{wg} - A_{wt} = 0.011 \text{ m}^2$;
28. 流体在两折流板间错流通截面积: $A_c = l_s \left[D_s - D_L + \frac{D_L - d_0}{s} (s - d_0) \right] = 0.023 \text{ m}^2$;
29. 壳程流通截面积: $A_s = \sqrt{A_b \cdot A_c} = 0.0159 \text{ m}^2$;
30. 壳程接管的直径: 按 $\frac{\pi}{4} D_1^2 = 0.0159$ 计算, 并由钢管标准选择相近的规格, 得 $\phi 159 \times 5$;
31. 壳程雷诺数: $Re_1 = \frac{M_1 d_0}{\mu_1 A_c} = 6455$;
32. 壳侧换热系数: $\alpha_1 = j_0 G_s c_{p1} P_{r1}^{-2/3} (\mu_1 / \mu_{w1})^{0.14} = 2967 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
33. 传热系数: $K = 1 / \left[\frac{1}{\alpha_1} + r_{s,1} + r_{s,2} \frac{d_0}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_0}{d_i} \right] = 978 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
34. 沿程阻力: $\Delta p_i = 4 f_i \frac{L}{d_i} \frac{\rho_2 w_2^2}{2} (\mu_2 / \mu_{w2})^{-0.14} = 19621 P_a$;
35. 回弯阻力: $\Delta p_r = 4 \frac{\rho_2 w_2^2}{2} Z_t = 7978 P_a$;
36. 进出口连接管阻力: $\Delta p_N = 1.5 \frac{\rho_2 w_2^2}{2} = 748 P_a$;
37. 两台管程总阻力: $\Delta p_t = \Delta p_i + \Delta p_r + \Delta p_N = 28347 P_a$, 合理;
38. 壳程总阻力: $\Delta p'_s = [(N_b - 1) \Delta p_{bk} R_b + N_b \Delta p_{wk}] r_1 + 2 \Delta p_{bk} R_b \left(1 + \frac{N_{cw}}{N_c} \right) R_s = 3835 P_a$;
39. 两台壳程总阻力: $\Delta p_s = 2 \times \Delta p'_s = 7670 P_a$, 合理。
- 最终的污水换热器设计结果见表 2, 换热器的内部管子布置见图 2。

4. 结论

论文在分析了我国水资源利用的情况下, 提出了污水的再生利用可以有效缓解水资源的短缺, 同时减轻污水排放对生态环境的破坏;

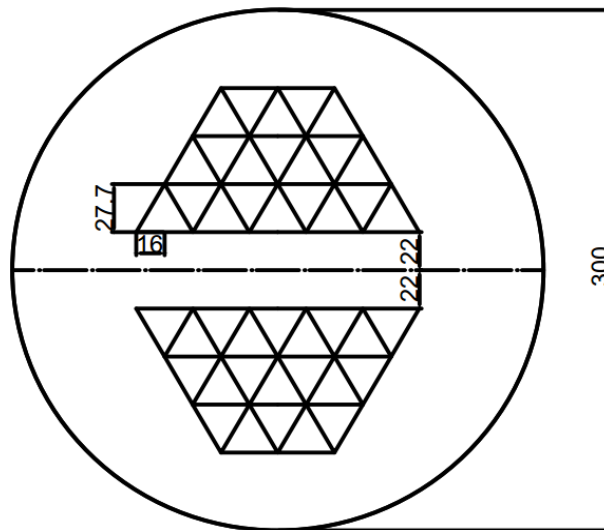


Figure 2. Arrangement diagram of tubes (mm)

图 2. 管子布置图(单位: mm)

Table 2. Design result of sewage heat exchanger in summer
表 2. 夏季污水—水换热器的设计结果

| 型式 | (1-2)型, 2台串联 |
|--------|---------------------|
| 每程管数 | 20, 每根管长 7.5 m |
| 管距 | 32 mm, 等边三角形排列 |
| 管子 | 内径 20 mm, 外径 25 mm |
| 每台换热面积 | 23.6 m ² |
| 两台换热面积 | 47.2 m ² |
| 壳体内径 | 300 mm |
| 长径比 | 25 |

城市污水的回收再利用中, 如何利用污水中蕴藏的低品位能源是关键技术;

利用污水源热泵系统采暖供冷在工程上已经成规模的投入使用, 作为系统主要设备之一的污水换热器是系统研究的重点。本文提出采用管壳式污水换热器进行能量回收, 并开发了设计软件;

通过此设计软件, 可以对冬季污水中的能量回收进行设计, 并可以比较不同污水的温差和不同循环水流量下的换热器结构, 进行污水换热器的结构优化设计;

以夏季污水工况为例, 利用所开发的设计软件进行了设计, 并给出了设计结果。在 8℃的温差下, 二台管壳式换热器面积为 47.2 m², 可以利用的冷量为 204.6 kW, 传热系数达到 978 W/(m²·℃)。

参考文献 (References)

- [1] 杨肇蕃, 孙文章. 城市和工业节约用水计划指标体系[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 冯彦刚. 城市污水资源化的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2001: 1-2.
- [3] 张文超, 张建新, 白宇, 甘一萍. 国内外污水再生利用发展分析[J]. 工业水市场, 2010, 33(8): 32-34.
- [4] MOgoshil (2001) Water Reuse in Japan. *Water Science and Technology*, **43**, 17-23.
- [5] 肖锦. 城市污水处理及回用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 环境科学与工程出版中心, 2002.
- [6] 籍国东, 蒋兆春, 等. 我国污水资源化的现状分析与对策探讨[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 85-95.
- [7] 洗巍. 上海市非传统水资源利用研究[J]. 给水排水, 2009, 35(1): 14-17.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: wpt@hanspub.org