

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.043

# 淋激式污水换热器换热管布置方向的选择

纪鹏磊, 林真国, 蒋晏平, 于祥雷

(重庆大学 城市建设与环境工程学院; 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**淋激式污水源换热器以其较高的换热系数, 方便运行维护及消耗较少能量等优点, 近些年来, 广泛应用于污水源热泵空调系统中。文中针对淋激式换热器换热管的布置方向选择进行了研究, 通过运用数学工具和 CFD 模拟等手段, 对 2 种不同布置方式的换热管的换热系数、液膜覆盖率、有效面积率等进行了研究。得出了在污水源热泵工程项目中, 当机房面积比较狭小但高度空间充足的情况下, 采用纵向布置换热管的淋激式换热器可以取得较好的效果。

**关键词:**淋激式换热器; 布置方向; 换热系数; 液膜覆盖率; 有效面积率

**中图分类号:** TU834.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0195-03

## Selection of Direction Types of Tubes in Spray Type Sewage Heat Exchanger

Ji Penglei, Lin Zhenguo, Jiang Yanping, Yu Xianglei

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering;

Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In recent years, sewage source spray heat exchanger was widely used in sewage source heat pump systems with its higher heat transfer coefficient, easier operation and maintenance and less energy, etc. In this paper, we studied the direction arrangement of heat exchange tubes of spray heat exchanger. And the heat transfer coefficient, film coverage, effective area ratio has been studied through mathematical tools and CFD simulations and other means. The results showed that in the sewage-source heat pump project, when the engine room area is relatively small but highly space is sufficient, the vertical arrangement of spray heat exchanger tubes can obtain a good effect.

**Key words:** spray heat exchanger; direction arrangement; heat transfer coefficient; film coverage; effective area ratio

因为污水含有较多杂质, 水质较差, 容易在热泵机组内部产生沉淀, 损伤机组并降低系统能效系数<sup>[1-2]</sup>, 所以在此类回收污水能量的工程中, 借助污水换热器组成的间接式系统成为首选。那么正确的设计污水换热器的形式, 在污水源热泵的应用中非常重要。淋激式换热器的形式开放, 不易结垢, 而且便于安装和维修, 通过喷淋装置使污水在换热管外形成膜态, 具有较高的换热系数的同时节省了输送能耗, 因为具有上述优点, 淋激式换热器被广泛的应用到当前的污水源热泵工程中。

在淋激式换热器中, 换热管多为横向蛇形安装, 换热管这样布置具有传热系数比较高, 有效减小边界层效应的优点。但对于横向换热管, 喷淋速度过大, 则流体无法全部覆盖换热管外壁, 造成部分换热面积的浪费<sup>[3]</sup>。流速过小又会造成流体在换热管外形成柱状流动, 而非膜态流动, 降低了换热系数, 也同样浪费了部分换热面积。如果淋激式换热器中纵向设置换热管, 虽然换热系数较横向布置略低, 但通过合适的导流装置可以较容易的在换热管外形成膜态流动<sup>[4]</sup>,

并且纵向布置, 更加节省空间, 便于在较高的狭小空间中使用。文中通过数学方法对淋激式污水换热器换热管安装形式的对其性能的影响进行了数值计算和 CFD 模拟研究。

### 1 横向纵向换热管模型的建立和比较原则

#### 1.1 横向纵向换热管模型的建立

为了便于比较淋激式换热器中横向, 纵向管的换热特性。现对 2 种换热模型的初始条件设置如下:

1) 横向和纵向的换热管均采用铜质的光管作为换热管, 各自形式见图 1 和图 2。

2) 2 种换热器的长度相同, 均为 1.8 m。

3) 2 种换热管的管内流体均为清水, 且流速, 入口水温均相同。二者管外流体为相同温度相同流速的二级污水。

#### 1.2 横向纵向换热管模型的比较原则

2 种换热管换热模型中各种等量条件的建立, 使二者在相同时间内使用相同能耗输送相同流量的污水。因此 2 种方向的换热管的比较原则是比较 2 种形式的换热管在相同

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106190); 重庆市建委科技资助项目(城科字 2011 第 2-38 号)

作者简介: 纪鹏磊(1986-), 男, 硕士生, 主要从事污水源热泵及建筑节能研究, (E-mail): jipenglei\_1986@163.com。

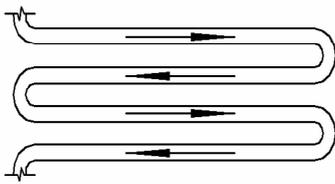


图 1 淋激式换热器中横向换热管示意图

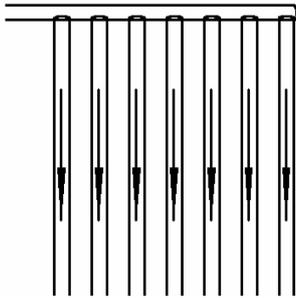


图 2 淋激式换热器中纵向换热管示意图

时间内向污水中释放的换热量  $Q^{[5]}$  的大小

$$Q = S \times h \times p_1 \times p_2 \times \Delta t, \quad (1)$$

式中:  $S$  为换热管换热面积,  $m^2$ ;  $h$  为换热管表面换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $p_1$  为换热管液膜覆盖率;  $p_2$  为换热管的有效换热面积系数;  $\Delta t$  为换热管内外壁的温差,  $^\circ C$ 。

## 2 换热管换热量的数值计算

### 2.1 横向纵向换热管的换热系数的数值计算

因为管内清水为闭式系统的管内掠流, 因此 2 种换热管的管内换热系数基本相同, 因此比较管外的膜态换热系数就是比较 2 种换热管换热性能。

1) 横向换热管换热系数的数值计算

淋激式换热器中, 将液体喷淋在横向布置的换热管上的优点<sup>[6]</sup>是这样形成的液膜比较薄, 换热系数较大, 同时也降低了液位高度对换热的影响。水平换热管膜态换热系数可由雪耳皮恩<sup>[7]</sup>总结的准则方程式算出

$$Nu_f = 0.104 Re_f^{0.06} Pr_f^{0.80} \left( \frac{d_o}{d_{aq}} \right)^{-0.4}, \quad (2)$$

式(2)中的定型尺寸取液膜换热的当量直径:

$$d_{aq} = 5.4 \left( \frac{\mu_f G}{1200 U \rho_f^2 \times 9.81} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

$$Re = \frac{G}{900 U \mu_f}, \quad (4)$$

式中:  $G$  为喷淋液量,  $kg/h$ ;  $U$  为喷淋液接触湿周,  $m$ ;  $d_o$  为换热管的半径,  $m$ 。

另外式中普朗特数  $Pr$ , 雷诺数  $Re$ , 粘度  $\mu$  等准则的定性温度取喷淋液的平均温度即污水的进出口平均温度, 因污水各项物性参数随温度变化并不明显<sup>[8]</sup>, 因此可用污水进口水温的各项物性参数代替。经过计算此种情况下, 管外膜态换热系数为  $1\,945.1\, W/(m^2 \cdot K)$ 。

2) 纵向换热管换热系数的数值计算

相比于横向换热管, 在使用适当的导流装置的情况下(见图 3), 纵向换热管更易于管的外表面形成膜态(见图 4), 纵向换热管的表面换热系数由下列公式计算而得。

$$h = 1.88 \left( \frac{\lambda_f^3 \rho_f^2 g}{\mu_f} \right)^{1/3} \left( \frac{4\Gamma}{\mu_f} \right)^{-1/3} \quad (5)$$

式中:  $\Gamma$  为沿冷却壁面, 单位宽度每小时下降的冷凝液量,  $kg/h \cdot m$ ;  $g$  为重力加速度 约为  $9.8\, m/s^2$ ;  $\lambda_f$  为导热系数,  $kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ 。

物性参数的定性温度取污水进口水温。当换热管纵向布置的时候管外膜态换热系数为  $1\,233.9\, W/(m^2 \cdot k)$ 。

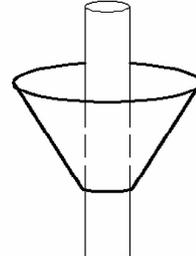


图 3 纵向换热管中的导流装置

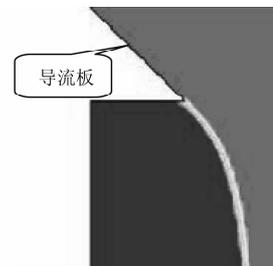


图 4 在导流装置的辅助下流体的流态模拟图

### 2.2 横向纵向换热管的液膜覆盖率的模拟结果

淋激式换热器中, 管外液膜的覆盖情况对换热管的换热效率影响很大, 如果液膜覆盖完全且均匀, 那么每根换热管在较小的流量下便能够得到较大的换热系数, 而若流体在管外出现偏流或者膜厚不均匀的情况, 那么传热系数将现在降低<sup>[9]</sup>。因此对于管外液膜覆盖情况的研究至关重要。但因为液膜覆盖情况和液膜厚度很难用实验法得到准确、清晰、直观的结论。笔者采用 CFD 模拟出换热管外流体的液膜的覆盖情况和均匀程度。CFD 模拟的边界条件和尺寸如换热模型建立。纵向换热管外的液膜覆盖情况如图 5 所示, 横向换热管外的液膜覆盖情况和均匀程度如图 6 和图 7 所示。

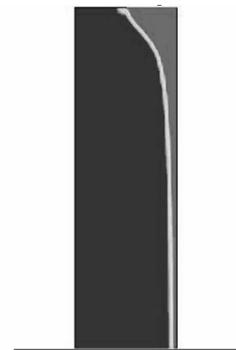


图 5 纵向换热管的流态模拟图

由上图可以清晰地发现, 在合适的导流装置的辅助下, 纵向换热管外较容易形成均匀的完整的液膜, 其液膜覆盖率基本可以认为是 100%; 而横向换热管管外部分区域出现无液膜的状态(图中换热管下部和弯管部分)。综合考虑各种

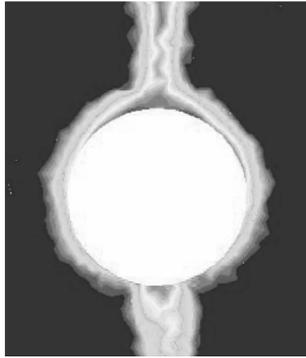


图 6 横向换热管的横向切面流态模拟图

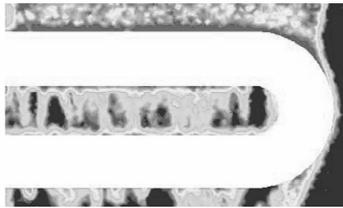


图 7 横向换热管流态模拟图

因素,其液膜覆盖率情况为 80%~85%,而且随着流速的增大,换热管外的液膜覆盖率将更加明显的下降,甚至形成柱状流<sup>[10]</sup>(如图 8 所示)。严重影响管外换热系数。

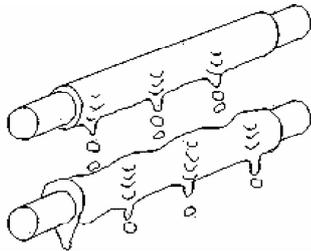


图 8 横向布置换热管柱状膜示意图

### 2.3 两方向换热管有效面积系数的比较

淋激式换热器中,横向布置的换热管换热面积的浪费主要集中在弯管部分(图 9 中粗线所示),在这个区域,由于部分换热管弯曲度过大,污水无法完整的覆盖在弯管表面<sup>[11]</sup>,而且换热面积浪费的程度随弯管的曲率半径变化明显。随着横向管长的减小,弯管所占的面积逐渐增加。相对于横向长度 1 m 的换热管,其有效面积率约为 93%。

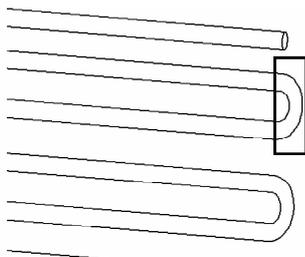


图 9 横向布置换热管弯管部分示意图

对于纵向布置换热管的喷淋式换热器,因为其全部竖管段均为换热面积,不存在弯管和其他浪费换热面积的情况,因此纵向换热管的有效换热面积率近似为 100%。

### 2.4 综合分析

综合 3.1、3.2、3.3 等部分对于淋激式换热器中横向和纵向换热管各项参数的比较可以得出,在污水源淋激式换热器中,横向布置换热管的管外换热系数约为  $1\ 447.2\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,而纵向布置换热管的管外换热系数约为  $1\ 233.9\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,横向布置的换热管拥有更高的管外换热系数,应该优先考虑使用到污水源热泵淋激式换热器系统中。

由图 5、6 和图 7 可以看见,淋激式换热器中,纵向换热管因其较规整的结构,保证了换热管外膜态的稳定和均匀,同时每一根构成一个换热单元消除了与其他换热管之间的影响。因此可以保持在一个比较稳定的数值上。而横向布置的换热管管外液膜覆盖情况和液膜厚度都非常不均匀,这样将严重影响管外换热系数,同时由于换热管间污水的飞溅,下层流速加大等原因,横向布置的换热管的管外换热系数会出现下降的趋势,最终稳定在稍小的数值<sup>[12]</sup>。

## 3 结论

1)综合考虑多种因素,在污水源淋激式换热器中,横向布置的换热管管外换热系数为  $1\ 447.2\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,而纵向布置换热管的管外换热系数约为  $1\ 233.9\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。因此横向布置换热管的淋激式换热器的换热性能更为优良。

2)污水源热器中,污垢的生成将会对换热系数产生较大的影响。相比于纵向布置的换热管,横向换热管系统中存在一些死角和不便清洗的位置(如弯管部分),因此污垢对于纵向布置换热管的淋激式换热器的影响更小<sup>[13]</sup>。

3)淋激式换热器中,横向换热管由于管外液膜覆盖不均匀及换热管间的影响,其管外换热系数将有所下降,具体下降数值有待进一步研究。

4)相比于纵向布置换热管,横向布置换热管的淋激式换热器中使用了更多的弯头,因此介质在横向布置换热管的淋激式换热器中流过需要消耗更多的能量。

5)由于横向布置换热管的管外换热系数和纵向布置换热管的管外换热系数相差的并不大,同时考虑结论 2)、3)和结论 4)的内容,当污水源热泵系统机房面积较小,但高度空间充足的时候,使用纵向布置换热管的淋激式换热器也可以取得很好的换热效果。

### 参考文献:

- [1] 吴荣华, 张承虎, 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, (6):31-37.  
Wu R H, Zhang C H, Sun D X. Application of city sewage cooling and heating source technology development research [J]. HVAC, 2005, (6):31-37.
- [2] 刘志斌. 污水源热泵系统防阻塞装置工作特性的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] Torio H, Schmidt D. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with energy analysis[J]. Energy and Buildings, 2010, 42:1601-1609.
- [4] Berntsson T. Heat sources-technology, economy and environment [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, (25):428-438.
- [5] 龙惟定. 建筑节能与建筑能效管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] 代彦军, 李增耀, 张鹤飞. 叉流高效降膜蒸发器传热传质规律研究[J]. 太阳能学报, 2000, 21(4):451-456.



图 13 网状模型攀爬植物

辐射强度进行比较。图 14 为一天中管型景天科植物前、后的太阳辐射强度变化比较,图 15 为一天中网型攀爬植物前、后的太阳辐射强度变化比较。用植物遮挡后与遮挡前的太阳辐射强度的比值表示植物遮阳的效果,称为遮阳系数。遮阳系数越小,遮阳效果就越好。根据测量数据,管型景天科植物在一天中的平均遮阳系数为 0.1,说明这种植物遮挡了 90% 的太阳辐射;网型攀爬植物在一天中的平均遮阳系数为 0.2,说明这种植物遮挡了 20% 的太阳辐射。两种植物遮阳效果都显著。

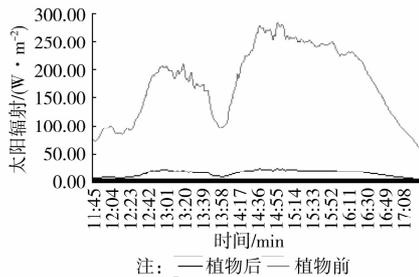


图 14 管型景天科植物前、后的太阳辐射强度

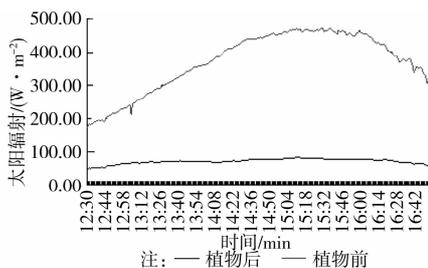


图 15 网型攀爬植物前、后的太阳辐射强度

## 5 结 语

在对现有建筑遮阳现状的调研和分析之后,选择绿色植物种植遮阳作为研究与设计的对象。目前对绿色植物遮挡阳光、节能减排、美化环境、净化空气的作用已经广泛认同,但在建筑上缺少将绿化植物与窗户遮阳相结合的工程实例。设计尝试应用绿色植物对窗户遮阳,实现节能减排的目的。本项遮阳研究结合建筑立面设计,美观大方,绿意盎然。同时,该遮阳装置灵活可变,兼顾采光及生活需求,安全方便。在考虑植物灌溉时,采取结合空调水的方式,实现节约用水。

考虑到该方案的应用前景,绿化植物具有良好的遮阳效果,能有效减少空调电能耗费,并且能起到美化旧建筑立面的作用。另一方面,该设计结构简单,便于对旧建筑进行安装,同时具有可调节性,可依据用户需要遮挡或移动,在遮阳的同时保证良好的采光的通风。相对与减少的电费支出,该设计成本低廉经济划算。由于利用空调冷凝水灌溉,既节约了用水,又解决了空调冷凝水无组织排水对于建筑立面的损害。因此,我们认为该设计对旧建筑节能改造具有很大的应用前景。在新建建筑设计中更能广泛采用。

## 参考文献:

- [1] 涂逢祥,王庆一. 建筑节能-中国节能战略上的必然选择(中)[J]. 节能与环保,2004(9):2-5.  
Tu F X, Wang Q Y. Architectural energy saving—the inevitable choice of Chinese energy saving strategy [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2004(9):2-5.
- [2] 崔泽锋. 建筑遮阳方式研究. 哈尔滨:哈尔滨工业大学[D]. 2008.
- [3] 王金鹏. 建筑遮阳节能技术研究[D]. 天津:河北工业大学,2007:23.
- [4] 李若南,张纵. 景天科植物在城市立体绿化中的应用探析[J]. 广东农业科学,2010(8):88-90.  
Li R N, Zhang Z. Discussion on application of crassulaceae plants in urban stereoscopic greening [J]. Guangdong Agricultural Science, 2010(8):88-90.
- [5] 赵亮,杨云峰. 攀援植物支持物的生态设计[J]. 中国园林,2011,37(6):77-80.  
Zhao L, Yang Y F. On ecological design of the external support for climbing plants [J]. Chinese Landscape Architecture, 2011, 37(6):77-80.

(编辑 侯 湘)

(上接第 197 页)

- Dai Y J, Li Z Y, Zhang H F. Study on flow performance of falling film evaporator of heat and mass transfer of fork [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2000,21(4):451-456.
- [7] 潘继红,田茂诚. 管壳式换热器的分析和计算[M]. 北京:科学出版社,1996:52-60.
  - [8] 黄翔,刘月琴. 间接式污水源热泵系统换热器的设计[J]. 暖通空调,2011,41(12):111-113.  
Huang X, Liu Y Q. Design of indirect sewage source heat pump system heat exchanger [J]. HVAC, 2011,54 (12):111-113.
  - [9] Conlisk A T. Analytical solutions for falling film absorption of ternary mixtures, Part 1: Theory [J]. Chemical Engineering Science, 1996,51(7):1157-1168.
  - [10] 闫桂兰. 污水源热泵系统的设计研究及污水换热器性能的改进[D]. 北京:北京工业大学,2007:6-13.
  - [11] Dobson R T, Pakkies S A. Development of a heat pipe (two-phase closed thermosyphon) heat recovery heat exchanger for a spray drier [J]. Journal of Energy in Southern Africa, 2002, 13 (4): 130-138.
  - [12] 藤田恭伸,筒井正幸. 水平管下落液膜热传递[J]. 日本机械协会论文集,1994,60(578):10.
  - [13] 吴学慧. 城市污水换热器污垢对流动和换热的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

(编辑 陈移峰)