

U型翅片管换热器传热单元数计算式

吴小舟, 赵加宁

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为了得到U型翅片管换热器传热单元数计算式,以U型翅片管换热器为研究对象,通过建立翅片管换热模型,推导出了逆流和顺流2种流体流动趋势的传热单元数计算式(NTU计算式).分别采用推导出的传热单元数计算式(ε -NTU法)和前人推导出的平均温差关系式(LMTD法)计算U型翅片管传热系数,并进行对比分析.结果表明,当进水温度为45~60℃,热水流量为30~110 kg/h时,由 ε -NTU法和LMTD法计算出来的翅片管传热系数相差很小.所推导出来的U型翅片管换热器传热单元数计算式是合理的.

关键词: U型翅片管换热器;翅片管传热系数; ε -NTU法;LMTD法

中图分类号: TU833 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)04-0071-04

Approximate formulas of number of transfer unit of U shaped fin-tube heat exchangers

WU Xiao-zhou, ZHAO Jia-ning

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To obtain the formulas of number of transfer unit (NTU) of U shaped fin-tube heat exchangers, a U shaped fin-tube heat exchanger is taken as research object. Approximate NTU formulas of number of transfer unit are derived by establishing heat transfer model of U shaped fin-tube when the trend of two flows in fin-tube heat exchanger is counter and parallel, respectively. Subsequently, the heat transfer coefficients of fin-tube are compared and analyzed by effectiveness-number of transfer unit method (ε -NTU method) and logarithm mean temperature difference method (LMTD method) when inlet water temperature is from 45 °C to 60 °C and water flow rate is from 30 kg/h to 110 kg/h. The results show that, the difference of the heat transfer coefficients respectively calculated by ε -NTU method and LMTD method is so small that these NTU formulas are valid.

Key words: U shaped fin-tube heat exchanger; heat transfer coefficients; ε -NTU method; LMTD method

U型翅片管作为一种具有扩展受热面的换热设备,在自然对流散热器及强制对流散热器中有着广泛的应用^[1-4].热水在U型管内流动,为管内不混合流,冷空气在管外翅片间流动,可认为被翅片分隔而不混合^[5],因此U型翅片管的流动形式属于交叉流中2种流体均不混合且交叉次数为2次的情况.目前,国内外关于翅片管换热器翅片管传热系数的计算方法主要有效能-传热单元数法(ε -NTU法)和平均温差法(LMTD法)^[5].文献[6-8]对U型翅片管换热器传热系数计算的 ε -NTU法或 ε -NTU关系式

进行了相关研究,但这些关系式都是效能关于传热单元数及热容比的隐式非线性方程式,无法直接获得换热器设计计算所需要的传热单元数,同时也缺少对两侧流体热容比值大小进行分类讨论.而U型翅片管传热系数计算若采用平均温差法(LMTD法),则需要通过查图计算温差修正系数,造成人为误差,同时过程比较繁琐^[9].因此本文通过建立U型翅片管换热模型,推导出了2种流体流动趋势为逆流和顺流时的传热单元数计算式,为U型翅片管换热器的设计、选型及优化提供依据.

1 ε -NTU关系式的推导

1.1 推导假设

1)在流动过程中流体在垂直于流动方向上发

收稿日期: 2010-12-17.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAJ01A00).

作者简介: 吴小舟(1984—),男,博士研究生;

赵加宁(1956—),女,教授,博士生导师.

通讯作者: 吴小舟, fonen519@ yahoo. com. cn.

生横向混合,可认为该流体在垂直于流动方向上的温度是均匀的^[10],由此可认为翅片管进出口热水温度及空气温度在垂直于流动方向上是均匀的。

2) 翅片管传热系数 K 沿着流程不发生改变,为一常数^[5],同时翅片管中热水温度及空气温度变化不大,其定压比热变化很小,也可视为一常数。

1.2 U型翅片管换热器2种流体流动趋势

影响翅片管换热器换热效果的因素不仅包括2种流体流动曲折次数,还包括2种流体流动方向的总趋势是逆流还是顺流^[9],如图1所示, $t_{w,in}$ 为进水口热水平均温度, $t_{w,out}$ 为出水口热水平均温度, $t_{a,in}$ 为进风口空气平均温度, $t_{a,out}$ 为出风口空气平均温度。

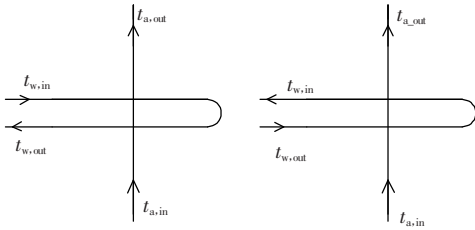


图1 逆流趋势及顺流趋势换热器示意图

1.3 传热单元数计算式的推导

1.3.1 逆流趋势换热器传热单元数计算式的推导

逆流趋势换热器的传热模型如图2(a)所示, $t_{w,1}$ 为U型管曲折点热水温度, $t_{a,1}$ 为U型管之间空气平均温度。假设进水口到U型管曲折点为上段,U型管曲折点到出水口为下段。 $d\Phi_1$ 为上段翅片管换热单元体, $d\Phi_2$ 为下段翅片管换热单元体。

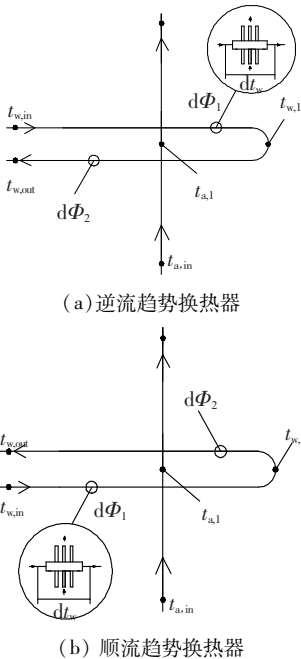


图2 逆流趋势换热器和顺流趋势换热器换热模型

1) 曲折点热水温度及管间空气平均温度求解。

对于上段,整段管内水侧换热量为

$$\Phi_1 = -G_w c_{p,w} (t_{w,1} - t_{w,in}) \quad (1)$$

整段管外空气侧换热量为

$$\Phi_1 = -G_a c_{p,a} (t_{a,1} - t_{a,out}) \quad (2)$$

整段热水-空气之间热换热量为

$$\Phi_1 = 0.5KA \left(\frac{t_{w,in} + t_{w,1}}{2} - \frac{t_{a,out} + t_{a,1}}{2} \right) \quad (3)$$

因此根据热量平衡原理,式(1)、(2)、(3)均相等,即

$$-G_w c_{p,w} (t_{w,1} - t_{w,in}) = -G_a c_{p,a} (t_{a,1} - t_{a,out}) = 0.5KA \left(\frac{t_{w,in} + t_{w,1}}{2} - \frac{t_{a,out} + t_{a,1}}{2} \right) \quad (4)$$

式中: G_w 为热水流量,kg/h; $c_{p,w}$ 为热水定压比热,kJ/(kg·°C); G_a 为空气流量,kg/h; $c_{p,a}$ 为空气定压比热,kJ/(kg·°C)。

同理对于下段有

$$-G_w c_{p,w} (t_{w,out} - t_{w,1}) = -G_a c_{p,a} (t_{a,in} - t_{a,1}) = 0.5KA \left(\frac{t_{w,out} + t_{w,1}}{2} - \frac{t_{a,in} + t_{a,1}}{2} \right) \quad (5)$$

将式(4)、(5)各项相比并整理后可得

$$\frac{t_{w,in} - t_{w,1}}{t_{w,1} - t_{w,out}} = \frac{t_{a,out} - t_{a,1}}{t_{a,1} - t_{a,in}} = \frac{(t_{w,in} + t_{w,1}) - (t_{a,out} + t_{a,1})}{(t_{w,out} + t_{w,1}) - (t_{a,in} + t_{a,1})} \quad (6)$$

因此,曲折点热水温度 $t_{w,1} = 0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out}$,管间空气平均温度 $t_{a,1} = 0.5t_{a,in} + 0.5t_{a,out}$ 。

2) 翅片管分段换热平衡。对于上段翅片管,单元体热水侧换热量为

$$d\Phi_1 = -G_w c_{p,w} dt_w \quad (7)$$

单元体热水与空气之间的热交换量为

$$d\Phi_1 = K \left(t_w - \frac{t_{a,out} + t_{a,1}}{2} \right) dA_x = K (t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})_x dA_x \quad (8)$$

根据单元体换热平衡,热水侧换热量等于热水与空气之间的热交换量,即式(7)等于式(8),将等式整理后可得

$$-\frac{K}{G_w c_{p,w}} dA_x = \frac{d(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})}{(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})} \quad (9)$$

假设沿着管子流程方向为 x 方向,每段翅片管长为 l ,则入口处 $x = 0, A_{x=0} = 0, t_w = t_{w,in}, x = l, A_{x=l} = 0.5A, t_w = 0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out}$,将式(9)按上段翅片管流程进行积分 $\int_0^{0.5A} -\frac{K}{G_w c_{p,w}} dA_x =$

$$\int_{t_{w,in}}^{0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out}} \frac{d(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})}{(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})},$$

可得

$$-\frac{KA}{2G_w c_{p,w}} = \ln \frac{(0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out} - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})}{(t_{w,in} - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})} \quad (10)$$

同理对于下段翅片管,单元体热水侧换热量为

$$d\Phi_2 = -G_w c_{p,w} dt_w \quad (11)$$

单元体热水与空气之间的热交换量为

$$d\Phi_2 = K \left(t_w - \frac{t_{a,1} + t_{a,in}}{2} \right) dA_x = K(t_w - 0.25t_{a,out} - 0.75t_{a,in})_x dA_x \quad (12)$$

根据单元体换热平衡,式(11)等于式(12),将等式整理后可得

$$-\frac{K}{G_w c_{p,w}} dA_x = \frac{d(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})}{(t_w - 0.75t_{a,out} - 0.25t_{a,in})} \quad (13)$$

因为 $x = l$ 时, $A_{x=l} = 0.5A$, $t_w = 0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out}$, $x = 2l$ 时, $A_{x=2l} = A$, $t_w = t_{w,out}$, 将式(13)

按下段翅片管流程进行积分 $\int_{0.5A}^A -\frac{K}{G_w c_{p,w}} dA_x =$

$$\int_{0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out}}^{t_{w,out}} \frac{d(t_w - 0.75t_{a,in} - 0.25t_{a,out})}{(t_w - 0.75t_{a,in} - 0.25t_{a,out})}, \text{可得}$$

$$-\frac{KA}{2G_w c_{p,w}} = \ln \frac{(t_{w,out} - 0.75t_{a,in} - 0.25t_{a,out})}{(0.5t_{w,in} + 0.5t_{w,out} - 0.75t_{a,in} - 0.25t_{a,out})} \quad (14)$$

3) 效能 ε 和传热单元数 N_{TU} 的关系式. 将式(10)、(14)相加并整理后可得

$$-\frac{KA}{G_w c_{p,w}} = \ln \left(1 - \frac{1}{2 \frac{t_{w,in} - t_{a,in}}{t_{w,in} - t_{w,out}} - 1 - 0.5 \frac{t_{a,out} - t_{a,in}}{t_{w,in} - t_{w,out}}} \right) + \ln \left(1 - \frac{1}{2 \frac{t_{w,in} - t_{a,in}}{t_{w,in} - t_{w,out}} - 1.5 \frac{t_{a,out} - t_{a,in}}{t_{w,in} - t_{w,out}}} \right) \quad (15)$$

根据 N_{TU} 的定义,当 $G_w c_{p,w} < G_a c_{p,a}$ 时,有

$$N_{TU} = \frac{KA}{G_w c_{p,w}} \quad (16)$$

则热容量比为

$$c^* = \frac{G_w c_{p,w}}{G_a c_{p,a}} \quad (17)$$

$$\text{且 } \varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{G_w c_{p,w} (t_{w,in} - t_{w,out})}{G_w c_{p,w} (t_{w,in} - t_{a,in})} = \frac{t_{w,in} - t_{w,out}}{t_{w,in} - t_{a,in}} \quad (18)$$

将式(16)~(18)代入式(12)中,整理后可得出效能 ε 和传热单元数 N_{TU} 的关系为

$$N_{TU} = \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - \frac{1}{2c^*}} \right)^{-1} + \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - \frac{3}{2c^*}} \right)^{-1} \quad (19)$$

同理当 $G_w c_{p,w} > G_a c_{p,a}$ 时,有

$$N_{TU} = \frac{KA}{G_a c_{p,a}} \quad (20)$$

则热容量比为

$$c^* = \frac{G_a c_{p,a}}{G_w c_{p,w}} \quad (21)$$

$$\text{且 } \varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{G_a c_{p,a} (t_{a,out} - t_{a,in})}{G_a c_{p,a} (t_{w,in} - t_{a,in})} = \frac{t_{a,out} - t_{a,in}}{t_{w,in} - t_{a,in}} \quad (22)$$

将式(20)~(22)代入式(12)中,整理后可得出效能 ε 和传热单元数 N_{TU} 的关系式为

$$N_{TU} = \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon c^*} - 1 - \frac{1}{2c^*}} \right)^{-1} + \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon c^*} - \frac{3}{2c^*}} \right)^{-1} \quad (23)$$

1.3.2 顺流趋势换热器传热单元数计算式的推导

顺流趋势换热器的传热模型如图2(b)所示. 根据逆流趋势换热器效能 ε 和传热单元数 N_{TU} 的关系式推导过程,同理可得顺流趋势换热器效能 ε 和传热单元数 N_{TU} 的关系式.

当 $G_w c_{p,w} < G_a c_{p,a}$ 时,

$$N_{TU} = \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - \frac{1}{2c^*}} \right)^{-1} + \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - \frac{3}{2c^*}} \right)^{-1} \quad (24)$$

当 $G_w c_{p,w} > G_a c_{p,a}$ 时,

$$N_{TU} = \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon c^*} - \frac{1}{2c^*}} \right)^{-1} + \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon c^*} - 1 - \frac{3}{2c^*}} \right)^{-1} \quad (25)$$

2 U型翅片管换热器传热系数的计算结果与分析

翅片管换热器 $\varepsilon - NTU$ 关系式主要用来计算翅片管传热系数,U型翅片管换热器属于二次交叉流动形式,传热系数也可通过LMTD法计算获得,具体计算过程如文献[9]所示. 本文以文献[11]中U型逆流趋势换热器不同进水温度及热水流量时的进出口热水温度及空气温度为例,分别采用本文推导出的 $\varepsilon - NTU$ 法和LMTD法计算U型翅片管传热系数,并进行对比分析,计算结果如图3~6所示.

由图3~6可知,当进水温度为45~60℃,热水流量为30~110 kg/h时,由 $\varepsilon - NTU$ 法和LMTD法计算出来的翅片管传热系数相差很小,两者最大相对误差不超过1%,因此本文推导的U型翅片管换热器 NTU 计算式准确合理. 但LMTD法需要通过查图计算温差修正系数,过程比较繁琐,而

ϵ -NTU 法相对 LMTD 法计算过程简单容易.

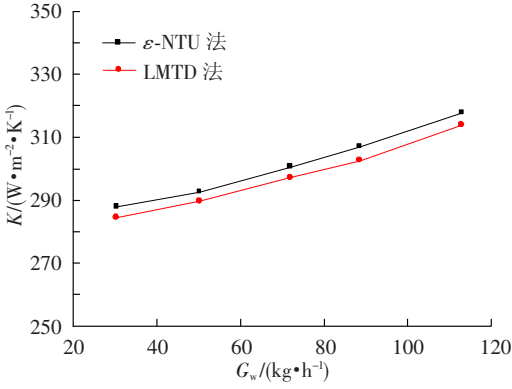


图 3 进水温度为 45 °C 时传热系数随热水流量的变化

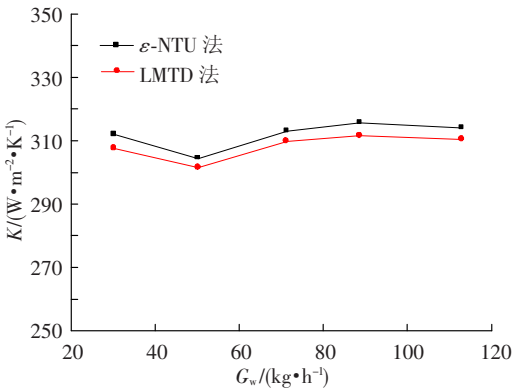


图 4 进水温度为 50 °C 时传热系数随热水流量的变化

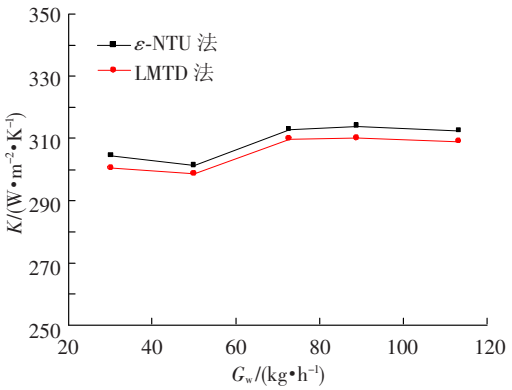


图 5 进水温度为 55 °C 时传热系数随热水流量的变化

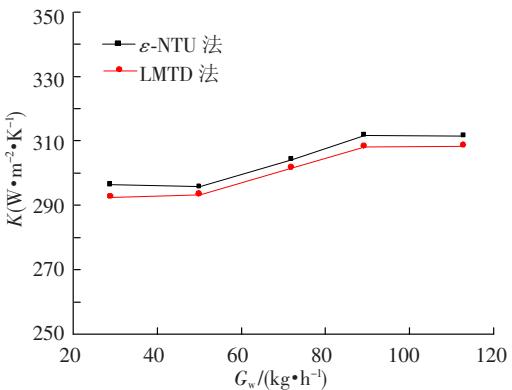


图 6 进水温度为 60 °C 时传热系数随热水流量的变化

3 结 论

1) 为了方便换热器设计及校核计算,通过建立 U 型翅片管换热模型,推导出了 2 种流体流动趋势为逆流及顺流时的传热单元数计算式.

2) 采用此 ϵ -NTU 关系式计算翅片管传热系数相对 LMTD 法计算过程简单容易. 当进水温度为 45 ~ 60 °C,热水流量为 30 ~ 110 kg/h 时,由 ϵ -NTU 法和 LMTD 法计算出来的翅片管传热系数相差很小,两者最大相对误差不超过 1%,说明 U 型翅片管换热器 ϵ -NTU 关系式准确合理.

参考文献:

[1] WU Xiaozhou, ZHAO Jianing. Experimental study of effect of air duct structure on heat dissipation of heating-only fan coil[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2009, 36(5): 102 - 105.

[2] WU Xiaozhou, ZHAO Jianing. Experiment study on heat dissipation performance of heating-only fan coil [C]// 6th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Nanjing: School of Energy and Environment, Southeast University, 2009: 724 - 731.

[3] 王莉莉, 于晓明. 铜管铝肋片散热器理论计算的研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 57 - 61.

[4] 肖曰嵘, 宋为民. 铜管对流散热器的探讨[J]. 暖通空调, 2007, 37(1): 60 - 62.

[5] 章熙民, 任泽霏. 传热学[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[6] BACLIC B S. A simplified formula for cross-flow heat exchanger effectiveness[J]. Trans Am Soc Mech Engrs, Journal of Heat Transfer, 1978, 100: 746 - 747.

[7] BACLIC B S, GVOZDENAC D D. Exact explicit equations for some two-and three-pass cross-flow heat exchangers effectiveness, heat exchangers thermal hydraulic fundamentals and design [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1981.

[8] BACLIC B S, GVOZDENAC D D. ϵ -NTU- ω relationships for inverted order flow arrangements of two-pass crossflow heat exchangers [C]// The 102nd ASME Winter Annual Meeting, Regenerative and Recuperative Heat Exchangers. Washington: HTD-21, Eds, 1981.

[9] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理及计算[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1992.

[10] SMITH D M. Mean temperature difference in cross flow [J]. Engineering, 1934, 138: 479 - 481.

[11] 吴小舟, 赵加宁, 魏建民. 供暖型风机盘管散热量计算方法的探讨[J]. 暖通空调, 2010, 40(7): 63 - 66.

(编辑 魏希柱)