

基于螺旋线方程的螺旋板换热器板长计算方法

高尧林

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 提出了一种基于螺旋线方程的螺旋板换热器板长解析计算方法, 使用该算法不但可以实现螺旋板换热器板长以及其它螺旋尺寸的精确计算, 而且可以方便地实现任意螺旋角条件下, 由螺旋角到板长和由板长到螺旋角的正逆双向计算, 具有普遍应用意义.

[关键词] 螺旋板换热器, 换热器设计, 螺旋板板长计算, 螺旋曲线

[中图分类号]TK11⁺², [文献标识码]B, [文章编号]1672- 1292- (2003)01- 0070- 04

螺旋板换热器是一种由螺旋传热板片构成的高效间壁式热交换器. 螺旋板换热器传热系数大, 传热效率高, 不易堵塞和结垢, 结构紧凑、价格便宜和加工方便, 在冶金、机械、化工、石油、医药、酿造、印染、氮肥等行业以及公共采暖设施中得到广泛的应用.

由两块螺旋板和中心隔板所构成的螺旋体, 是螺旋板换热器的换热元件. 螺旋板由厚度为 δ 的板材卷制而成, 分别焊接在中心隔板的两端, 冷、热流体在螺旋板的两侧流动, 通过螺旋板进行换热(如图1所示).

长期以来, 无论是手册^[1], 还是教科书^[2,3], 在螺旋板换热器的设计计算中, 大都采用分段的半圆圆弧来取代螺旋曲线, 进行关键参数螺旋板板长和其它螺旋尺寸的计算. 由于采用的是分段半圆圆弧, 所得到的螺旋板沿板长方向的曲率半径是阶跃变化的, 与实际卷板曲率半径均匀变化的事实有所偏离. 本文在螺旋线方程的基础上导出了螺旋板曲线的描述方程和相应的螺旋板板长计算公式, 可用于螺旋板换热器的螺旋计算.

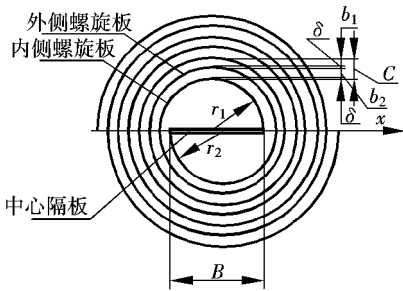


图1 不等通道螺旋体示意图

1 计算所涉及的通道参数

为叙述方便, 人为地将起点位于中心隔板右端的螺旋板命名为内侧螺旋板, 将起点位于中心隔板左端的螺旋板命名为外侧螺旋板, 下标1、2分别代表内、外侧螺旋板. 那么参见图1, 计算所涉及的通道参数主要有:

内侧通道宽度 b_1 ; 外侧通道宽度 b_2 ; 螺旋板厚度 δ (一般情况下, 两螺旋板壁厚都采用相同厚度); 节距(螺旋距) C , 也即同一块螺旋板相邻两圈之间的间距, 而且存在关系;

$$C = b_1 + b_2 + 2\delta \tag{1}$$

螺旋板的圈数 n , 指从螺旋起点开始每 360° 为一圈, 无因次量; 中心隔板宽度 B .

2 螺旋板板长计算公式的导出

2.1 螺旋板曲线方程的极坐标形式

如图 2, 以 O 点为极点, 以 OA 的连线为极轴建立起一个极坐标系, 设 B 点是螺旋板曲线上的任意一点, (ρ, θ) 是它的极坐标值, 其中螺旋角(极角) θ 的单位是弧度, 那么可以得到以下结论:

(1) 矢径 ρ 与螺旋角 θ 之间存在线性关系, ρ 随 θ 增大而增大, 而且 θ 每增大 2π , ρ 增大一个节距 C ;

(2) 起始螺旋角 θ_1 所对应的矢径 ρ 具有初值, 而且不等于零;

(3) 内侧螺旋板的起始螺旋角 θ_{11} 为零, 外侧螺旋板的起始螺旋角 θ_{21} 为 π ;

(4) 内侧螺旋板曲线与外侧螺旋板曲线是一组平行曲线(或等距曲线), 两曲线之间的距离处处相等;

(5) 参见图 3, 可知两螺旋板起点之间的距离为定值, 等于中心隔板的宽度减去螺旋板厚度 δ 之差(假设两螺旋板的厚度相同);

由以上的结论, 就可以得到螺旋板曲线方程的通用形式为:

$$\rho(\theta) = P\theta + Q$$

系数 P 、 Q 为常量, 对于内侧螺旋板

$$\begin{cases} \rho_1(\theta_1) = P\theta_1 + Q_1 (\theta_1 \geq 0) \\ P = \frac{C}{2\pi} \\ Q_1 = \frac{B + b_1}{2} - \frac{C}{4} \end{cases} \quad (2)$$

对于外侧螺旋板

$$\begin{cases} \rho_2(\theta_2) = P\theta_2 + Q_2 (\theta_2 \geq \pi) \\ P = \frac{C}{2\pi} \\ Q_2 = \frac{B + b_2}{2} - \frac{3}{4}C \end{cases} \quad (3)$$

2.2 螺旋板曲线的参数方程形式

在直角坐标系下, 螺旋板曲线的参数方程形式为

$$\begin{cases} x = P\theta \cos \theta + Q \cos \theta \\ y = P\theta \sin \theta + Q \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

2.3 螺旋板长度 L 的计算公式

可以得到 x 、 y 对 θ 的导函数为

$$\begin{cases} x'(\theta) = P \cos \theta - P\theta \sin \theta - Q \sin \theta \\ y'(\theta) = P \sin \theta + P\theta \cos \theta + Q \cos \theta \end{cases}$$

代入曲线弧长计算公式进行积分就可以得到对于内、外侧螺旋板都适用的板长 L 计算公式

$$\begin{aligned} L &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{x'^2(\theta) + y'^2(\theta)} d\theta \\ &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{P^2 + (P\theta + Q)^2} d\theta \end{aligned}$$

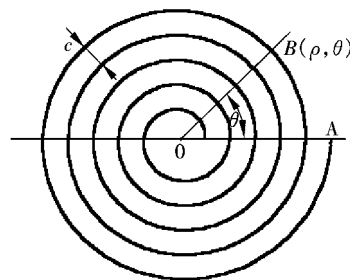


图2 极坐标下的螺旋曲线

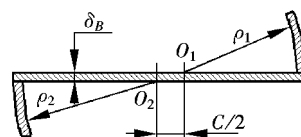


图3 中心隔板与螺旋板的位置关系

$$= \frac{\rho_2 \cdot \sqrt{P^2 + \rho_2^2} - \rho_1 \cdot \sqrt{P^2 + \rho_1^2}}{2P} + \frac{P}{2} \ln \frac{\rho_2 + \sqrt{P^2 + \rho_2^2}}{\rho_1 + \sqrt{P^2 + \rho_1^2}} \quad (6)$$

对于内侧螺旋板,

$$\rho_1 = \rho_{11} = \rho_1(\theta_{11}) = P\theta_{11} + Q_1 = Q_1 \quad (\text{内侧螺旋线起点处的极径值})$$

$$\rho_2 = \rho_{12} = \rho_1(\theta_{12}) = P\theta_{12} + Q_1 \quad (\text{内侧螺旋线终点处的极径值})$$

对于外侧螺旋板

$$\rho_1 = \rho_{21} = \rho_2(\theta_{21}) = P\theta_{21} + Q_2 = P\pi + Q_2 \quad (\text{外侧螺旋线起点处的极径值})$$

$$\rho_2 = \rho_{22} = \rho_2(\theta_{22}) = P\theta_{22} + Q_2 \quad (\text{外侧螺旋线终点处的极径值})$$

3 螺旋板板长计算公式

3.1 内侧螺旋板板长 L_1

对于内侧螺旋板, 因为 $\theta_{11} = 0$, 其板长计算公式为:

$$L_1 = \frac{\rho_2 \cdot \sqrt{P^2 + \rho_2^2} - Q_1 \cdot \sqrt{P^2 + Q_1^2}}{2P} + \frac{P}{2} \ln \frac{\rho_2 + \sqrt{P^2 + \rho_2^2}}{Q_1 + \sqrt{P^2 + Q_1^2}} \quad (7)$$

3.2 外侧螺旋板板长 L_2

对于外侧螺旋板, 因为 $\theta_{21} = \pi$, 其板长计算公式为:

$$L_2 = \frac{\rho_{22} \cdot \sqrt{P^2 + \rho_{22}^2} - (P\pi + Q_2) \cdot \sqrt{P^2 + (P\pi + Q_2)^2}}{2P} + \frac{P}{2} \ln \frac{\rho_{22} + \sqrt{P^2 + \rho_{22}^2}}{P\pi + Q_2 + \sqrt{P^2 + (P\pi + Q_2)^2}} \quad (8)$$

3.3 板长逆向计算公式

已知中心隔板宽度 B 、内外侧通道宽度 b_1 、 b_2 、螺旋板厚度 δ , 就可以采用叠代法由板长 L 计算出相应的螺旋终止角 θ_2 。

3.4 螺旋通道长度

因为内、外螺旋通道宽度中点所构成的曲线也是等距螺旋线, 采用类似的方法, 导出内、外螺旋通道中点曲线的方程为:

$$\begin{aligned} \rho_{1T}(\theta_1) &= P\theta_1 + Q_{1T} \\ \begin{cases} P = \frac{C}{2\pi} \\ Q_{1T} = \frac{B - \delta}{2} - \frac{C}{4} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

外螺旋通道中点曲线的方程为:

$$\begin{aligned} \rho_{2T}(\theta_2) &= P\theta_2 + Q_{2T} \\ \begin{cases} P = \frac{C}{2\pi} \\ Q_{2T} = \frac{B - \delta}{2} - \frac{3}{4}C \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

那么就可以依据内、外螺旋板的螺旋终止角, 套用公式(7)和(8)求出内、外螺旋通道的长度 L_{1T} 、 L_{2T} 。

4 与半圆弧计算方法^[2]的比较

根据文献[2]给出的半圆弧法计算方法, 内侧螺旋板的长度 L_1 为:

$$L_1 = n\pi(r_1 + r_2 + b_1 + 2\delta) + n(n-1)\pi C \quad (11)$$

外侧螺旋板的长度 L_2 为:

$$L_2 = n\pi(r_1 + r_2 + b_2 + 2\delta) + n(n-1)\pi C \tag{12}$$

式中, r_1 、 r_2 , 为卷制螺旋板的半卷辊的半径.

表 1 给出, $b_1 = 0.005\text{ m}$ 、 $b_2 = 0.01\text{ m}$ 、 $\delta = 0.004\text{ m}$ 、 $B = 0.194\text{ m}$ (也即 $C = 0.023\text{ m}$ 、 $r_1 = 0.0975\text{ m}$ 、 $r_2 = 0.1\text{ m}$) 情况下的计算结果.

表 1 两种计算方法计算结果比较(单位 m)

螺旋圈数	内侧螺旋板板长		外侧螺旋板板长	
	螺旋线算法	半圆弧算法	螺旋线算法	半圆弧算法
19	37.27974	37.27657	37.57816	37.57502
20	40.68687	40.68362	41.00100	40.99778

5 讨论:

(1) 本文提出的螺旋板板长计算公式, 由于在公式的导出过程中, 没有采用任何形式的假设和简化, 因此, 采用该公式所得到的是所计算螺旋板板长的精确结果.

(2) 计算实例表明, 按螺旋线方程所计算出的板长与采用分段半圆弧方法所求得的板长非常接近; 按螺旋线方程所计算出的板长略大于采用分段半圆弧方法所求得的板长, 两者之差与螺距 C 的大小有关.

(3) 本文提出的螺旋板板长计算公式实现了螺旋板板长变化规律的解析描述, 有利于计算机辅助设计技术的进一步使用.

(4) 使用本文提出的计算公式, 不仅可以由螺旋终止角(或螺旋圈数)计算螺旋板的板长, 还可以完成由螺旋板板长计算螺旋终止角(或螺旋圈数)的逆向运算.

(5) 采用分段半圆弧的处理方法是针对螺旋数为 2 的情况下得出的, 不能用于螺旋数大于 2 的场合, 而本文所导出的螺旋描述方程和螺旋线长度计算公式可以用于这些场合.

(6) 本文所导出的螺旋线方程和螺旋线长度计算公式也适用于其它螺旋体, 例如螺旋弹簧的计算.

[参考文献]

[1] 毛希 . 化工设备设计全书. 换热器设计分册[M]. 上海: 上海科技技术出版社, 1988, 278~ 279.
[2] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 1996, 117~ 119.
[3] 朱聘冠. 热交换器原理与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987, 201~ 202.

A New Plate Length Calculation Method Based on Spiral Curve Equation
for Spiral Plate Heat Exchanger

Gao Yaolin

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: This paper introduces a new method for plate length calculation of spiral plate heat exchangers, which is based on spiral curve equation. With this new method adopted, not only precise plate length calculation but also two-way calculation between spiral angles and plate lengths in the case of any spiral angle can be easily performed, which is worthy to be widely applied.

Key words: spiral plate heat exchanger, heat-exchanger design, spiral plate length's calculation, spiral curve

[责任编辑: 刘健]