

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-701-06

# 不同管型翅式换热器传热和流动特性 三维数值模拟

王彬 胡新生 李勋章

(海军航空大学青岛校区 青岛 266041)

**【摘要】** 借助CFD软件对4种不同类型(圆管、椭圆管、前圆后椭圆管、前椭圆后圆管)的管翅式换热器进行三维数值模拟, 得出了不同进风速度和翅片间距下翅片空气侧的温度场分布、压力场分布和速度场分布图, 并计算得出了平均换热系数和压降。研究表明在不同进风速度和翅片间距下, 前圆后椭圆管翅式换热器的压降均低于圆管翅式换热器, 同时换热系数等于甚至高于圆管翅式换热器, 整体的流动和换热特性相对圆管翅式换热器都有改善, 其综合性能优于椭圆管翅式换热器和圆管翅式换热器。

**【关键词】** 管翅式换热器; 管型; 数值模拟; 传热和流动特性  
中图分类号 TU96+2 文献标识码 A

## Three Dimensional Numerical Simulation of Heat Transfer and Flow Characteristics of Different Fin-and-tube Heat Exchangers

Wang Bin Hu Xinsheng Li Xunzhang

(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao, 266041)

**【Abstract】** With the help of CFD software, the three-dimensional numerical simulation of four different types of fin-and-tube heat exchangers (circular tube, elliptical tube, front circular and rear elliptical tube, front elliptical and rear circular tube) is carried out. Under different inlet air velocity and fin spacing, the temperature field distribution, pressure field distribution and velocity field distribution on the air side of the fin are obtained, and the average heat transfer coefficient and pressure drop are calculated. The research shows that under different inlet air speeds and fin spacing, the pressure drop of the front round and rear elliptical fin-and-tube heat exchanger is lower than that of the round fin-and-tube heat exchanger, and the heat transfer coefficient is equal to or even higher than that of the round fin-and-tube heat exchanger. The overall flow and heat transfer characteristics of the front circular and rear elliptical fin-and-tube heat exchanger are improved compared with the round fin-and-tube heat exchanger, and its comprehensive performance is better than that of the elliptical fin-and-tube heat exchanger and the round fin-and-tube heat exchanger.

**【Keywords】** fin-and-tube heat exchanger; tube type; numerical simulation; heat transfer and fluid flow characteristics

## 0 引言

管翅式换热器具有结构紧凑、换热高效、经济等优点, 具有非常广泛地应用<sup>[1,2]</sup>, 其强化传热也一直是研究者普遍关注的课题。强化传热最常用的

方法有增大换热面积、改变翅片结构形式或者采用不同的管型<sup>[3-5]</sup>, 国内外诸多学者对管型已经开展了研究。

周俊杰等人<sup>[6]</sup>研究了平片圆管表面、开缝片圆

管和开缝片椭圆管表面的流动和换热特性,发现椭圆管开缝片的压降低于圆管开缝表面; Sun 等人<sup>[7]</sup>研究了椭圆管翅式换热器的管纵向及横向间距对换热器换热性能的影响; Matos 等人<sup>[8]</sup>对不同参数的铜管和椭圆管进行了数值模拟,研究表明在最佳情况下椭圆管翅式换热器比圆管的换热效率高 19%; 杨倬<sup>[9]</sup>对椭圆管进行数值模拟和优化设计,研究表明椭圆管能减小管后的回流区,并对椭圆管道的椭圆率进行了优化配置; Bordalo 等人<sup>[10]</sup>对单排、双排及三排的椭圆管和圆管翅式换热器进行了研究,研究表明椭圆管对空气流动的压降降低效果显著,并且随着管间距的增加,降低压降的效果也越明显,但是,椭圆管在降低压降的同时,也降低了换热系数; 刘妮等<sup>[11]</sup>对椭圆管百叶窗翅片换热器进行了数值模拟,研究表明空气低速流动时,椭圆管翅式换热器的换热特性低于圆管翅式换热器,高速流动时,椭圆管翅式换热器的换热特性优于圆管翅式换热器。

针对椭圆管翅片换热器降低压力的同时也降低了换热系数的问题,结合椭圆管和圆管的特点,本文提出了椭圆管和圆管组合的新型翅片管式换热器,并借助 CFD 软件对 4 种不同类型(圆形管翅片换热器、椭圆管翅式换热器、前圆管后椭圆、前椭圆后圆管)的翅片管式换热器进行三维数值模拟,对压力场、温度场、速度场等进行了分析,重点研究四种管型翅片换热器换热和流动特性。

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型

椭圆管翅式换热器由铝制的翅片和椭圆型的铜管组成,前圆后椭圆管翅式换热器表示沿着空气入口方向,前排为圆管,后排为椭圆管,为保证四种类型的换热器具有相同的换热面积,设定椭圆的周长与圆管的周长相等,四种类型的翅片换热器具体结构参数如表 1 所示。

根据翅片结构的对称性和周期性,以前椭圆后圆管翅式换热器为例,它的计算区域及边界条件定义分别如图 1 所示。翅片的前后面为对称边界,为保证数值模拟准确性,铜管高于翅片上下表面 1/2 翅片间距长度,空气域选翅片的上表面以上 1/2 翅片间距和翅片下表面以下 1/2 翅片间距。另外,为保证来流的均匀性,将空气域向进口方向延长 3 倍

铜管外径; 为保证出口无回流,将空气域向空气出口方向延长 5 倍铜管外径<sup>[12,13]</sup>。

表 1 四种类型换热器结构尺寸

Table 1 Structural dimensions of four types of heat exchangers

管型	直径或长 短轴 /mm	纵距 /mm	横距 /mm	翅片间 距/mm	管厚 /mm
圆形管	10	15	30	1.5	0.2
椭圆管	长轴 5.8 短轴 3.58	15	30	1.5	0.2
前圆后 椭圆	直径 10 长轴 5.8 短轴 3.58	15	30	1.5	0.2
前椭圆 后圆	直径 10 长轴 5.8 短轴 3.58	15	30	1.5	0.2

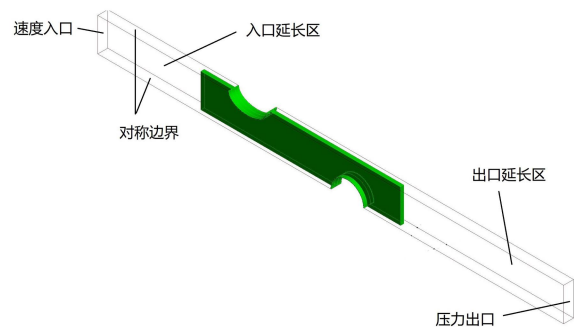


图 1 管翅式换热器计算域示意图

Fig.1 Schematic diagram of calculation domain of fin-and-tube heat exchanger

### 1.2 研究方法

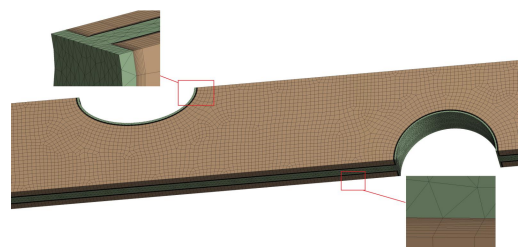


图 2 计算域网格

Fig.2 Computational domain grid

通过 CFD 软件建立换热器结构单元三维模型,在 DM 模块中划分网格,计算域网格如图 2

所示, 空气域主要采用六面体网格, 对边界层进行网格加密, 近壁面的流体主要在粘性底层区域, 根据  $y^+$  求得第一层网格高度为 0.005, 划分 12 层, 膨胀率选择 1.2。由于翅片比较薄, 固体域主要采用四面体结构网格。

在 FLUENT 中设置时, 忽略翅片的端部传热和辐射传热, 空气流动认为是不可压缩、稳态、湍流流动, 湍流模型采用 SST  $K-\omega$  模型, 并设置低粘度流动纠正。数值模拟时, 空气进口为速度入口, 温度恒定为 308K; 出口为压力出口, 出口相对压力 0Pa, 铜管和翅片设置为固体壁面条件。在选取的换热器周期性结构中, 由铜管的长度比较短, 因此, 铜管的温度可以认为是恒温的, 设置为 282K, 并且由于铜管和翅片间传热速度非常快, 那么, 翅片认为也是恒温的, 也设置为 282K。求解器中, 能量和动量方程的离散化采用二阶迎风格式, 其他保持默认, 用 Simple 算法求解控制方程的离散方程组。

### 1.3 网格无关性验证

本文对四种类型换热器分别进行了网格无关性的验证, 以前圆后椭圆管翅片换热器为例, 选择了 54 万、77 万、95 万、115 万、130 万、145 万 6 种类型的网格进行计算, 不同网格下换热系数和压降的计算结果如图 3 所示。在空气 4m/s 时, 网格 115 万和 145 万相比, 换热系数相差仅为 0.48%, 压降相差仅为 0.67%, 继续增加网格对精度影响不大, 为了节省计算时间, 最终选择 115 万网格。

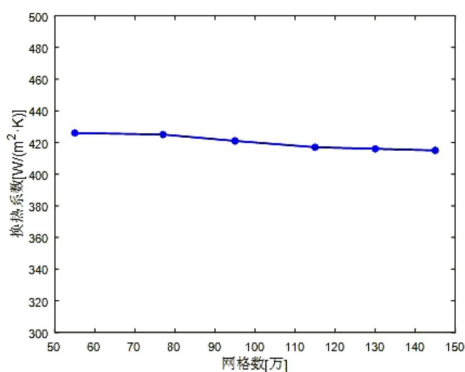


图 3 换热系数随网格数量的变化

Fig.3 Variation of heat transfer coefficient with the number of grids

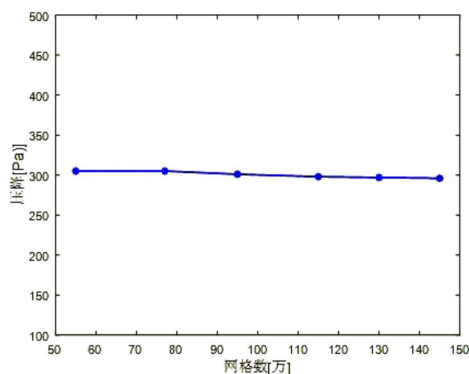


图 4 压降随网格数量的变化

Fig.4 Variation of pressure drop with the number of grids

### 1.4 数据处理

为研究换热特性, 需计算换热系数, 而为计算换热系数, 首先计算换热量, 换热量表达式为:

$$Q = m_a C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

其中,  $Q$  为换热量,  $m_a$  为空气流量,  $C_p$  为定压比热容,  $T_{out}$  和  $T_{in}$  分别表示计算域入口截面和出口截面的空气平均温度。

$$\Delta T = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} - T_{wall} \quad (2)$$

其中,  $\Delta T$  为传热温差,  $T_{wall}$  为管壁温度。

$$h = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (3)$$

其中,  $h$  为换热系数,  $A$  为换热面积。

## 2 结果分析

### 2.1 不同进风速度

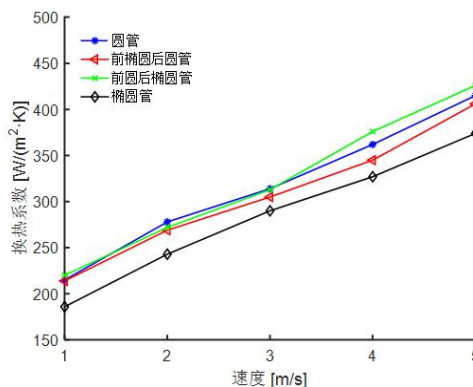


图 5 传热特性

Fig.5 Heat transfer characteristics

图 5 为四种管型翅式换热器, 在 2mm 翅片间

距，双排管，不同进风速度下空气侧传热特性的变化图。由图 5 可以看出，在进口风速较低时，圆管型、前圆后椭圆管型和前椭圆后圆管型三种换热系数基本相等，椭圆管型换热系数最小；在进风速度较高时，前圆后椭圆管型的换热系数最高。图 6 为四种管型翅片换热器在不同进风速度空气侧流动特性的变化图，从图中可以看出，四种管型换热器的压降：双椭圆管 < 前圆后椭圆管型 < 前椭圆后圆管型 < 圆管型。因此，前圆后椭圆管型压降低于圆管型，其换热系数不低于圆管型，相对圆管型，其流动特性和换热特性都有改善。

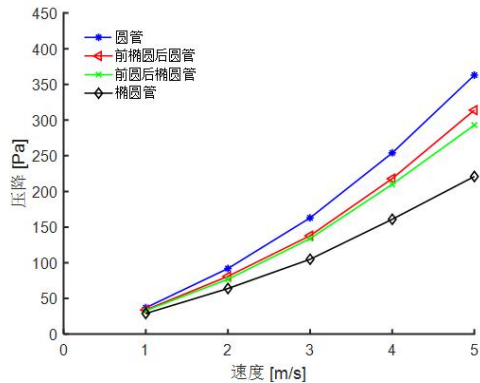


图 6 流动特性

Fig.6 Flow characteristic

图 7 为距离翅片上表面 0.4mm 处截面进口风速 4m/s 的空气速度分布图，空气从左向右流动，在换热管的背风侧有一个明显的尾流区，该区空气几乎不与其他区域的空气发生流动，四种换热器中，尾流区大小排序从小到大依次是：椭圆型、前圆后椭圆管型、前椭圆后圆管型、圆管型，尾流区越小换热越充分。另外，从图 7 可以看出，换热管侧部存在高速区，该区域的空气扰动强烈，扰动越强，换热越充分。圆管的高速区最大、尾流区也最大，椭圆的高速区和尾流区均最小，圆管型换热器高速区远大于椭圆管型和前椭圆后圆型，高速区对换热系数影响大于尾流区，因此，圆管型换热器换热系数大于椭圆管型和前椭圆后圆型。从图 7 中可以看出，圆管型的高速区大于前圆后椭圆型，但是前圆后椭圆型尾流区小于双圆管型，由于后排管和空气换热温差相对前排小，空气流速较高时，尾流区比高速区对换热系数影响大，前圆后椭圆型换热系数大于圆管型。

高速区的空气强烈扰动，扰动越强，压损越大，

阻力特性越差。圆管型的高速区最大，椭圆管型高速区最小，因此，圆管型阻力特性最好，椭圆型阻力特性最差。前椭圆后圆型和前圆后椭圆两种换热器中，圆管比椭圆管对阻力特性影响大，而前椭圆后圆型换热器在圆管侧部的高速区大，分析原因是当空气流过前排换热管侧面区域时，空气速度会得到提高，当圆管处于后排时，空气流过圆管的空气速度会更高，形成的高速区更大，压降更大，阻力特性更差。从图 6 中可看出，前椭圆后圆管型的压降要高于前圆后椭圆型。因此，阻力特性从好到差分别是双椭圆管型、前圆后椭圆型、前椭圆后圆型、双圆型。

通过以上分析，前圆后椭圆管翅式换热器压降低于圆管翅式换热器，同时其换热系数等于甚至高于圆管翅式换热器，其流动特性和换热特性都优于圆管翅式换热器；椭圆换热器压降低于圆管换热器，而其换热系数低于圆管翅式换热器，因此，前圆后椭圆换热器管翅式换热器综合性能优于椭圆管翅式换热器。

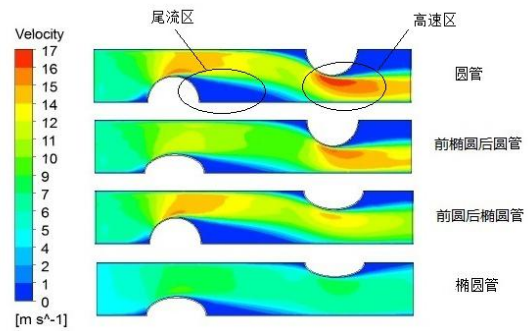


图 7 速度场分布

Fig.7 Distribution of velocity field

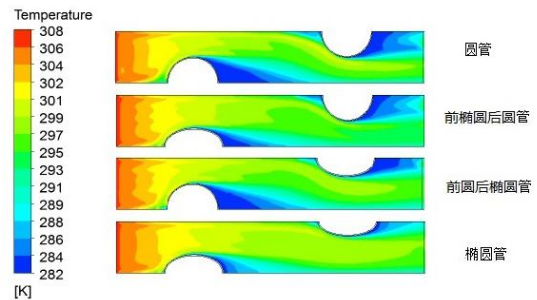


图 8 温度场分布

Fig.8 Distribution of temperature field

### 2.2 翅片间距

保持进口风速为 4m/s，对翅片间距为 1.2mm、

1.4mm、1.6mm、1.8mm 和 2.0mm 的四种管型翅片换热器进行数值计算, 分析翅片间距对四种管型换热器流动和传热特性的影响。

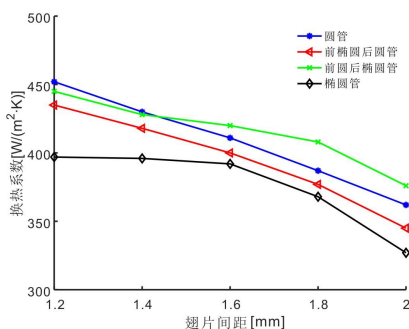


图 9 翅片间距下对各管型换热器换热特性的影响

Fig.9 Effect of fin spacing on heat transfer characteristics of each fin-and-tube heat exchanger

图 9 为不同翅片间距对各管型换热器换热特性的影响。当空气流速一定时, 随着翅片间距的增大, 四种管型换热器的换热系数逐渐减小, 并且对换热系数的影响逐渐增强。翅片间距对前圆后椭圆管型影响最小, 降幅约为 16.3%。另外, 当翅片间距较小时, 前椭圆后圆管和前圆后椭圆管两种换热器的换热系数略低于圆管换热器, 基本相等, 椭圆管换热器换热系数最小; 当翅片间距较大时, 前圆后椭圆管翅式换热器的换热系数最高。

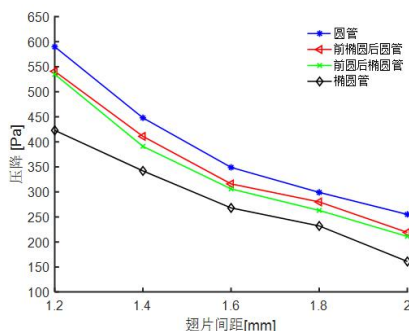


图 10 翅片间距下对各管型换热器流动特性的影响

Fig.10 Effect of fin spacing on flow characteristics of each fin-and-tube heat exchanger

图 10 为不同翅片间距下对各管型换热器流动特性的影响。当空气流速一定时, 四种管型换热器的压降均随着翅片间距的增大而减小, 压降的大小近似。在所有翅片间距下, 压降大小从大到小排序是: 圆管型、前椭圆后圆型、前圆后椭圆管型、双椭圆管型。

通过以上分析, 在不同翅片间距下和不同进风速度下四种管型的换热和流动特性一致, 在四种管型中, 前圆后椭圆的换热器优于椭圆管型和圆管型换热器。

下面重点对前圆后椭圆管换热器进行研究。图 11 为不同翅片间距下前圆后椭圆管翅式换热器速度场分布, 从图中可以看出, 随着翅片间距减小, 换热管侧面的高速区在逐渐增大, 该区域的扰动增强, 换热更充分。因此, 从图 12 中可以看出, 翅片间距越小, 换热更充分, 温度梯度变化更大, 空气出口温度越低。

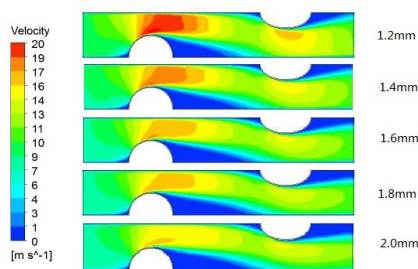


图 11 不同翅片间距下前圆后椭圆管翅式换热器速度场分布

Fig.11 Velocity field distribution of front circular and rear elliptical fin-and-tube heat exchanger under different fin spacing

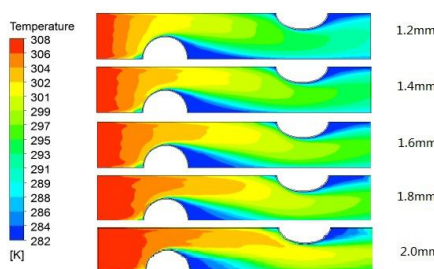


图 12 不同翅片间距下前圆后椭圆管翅式换热器温度场分布

Fig.12 Temperature field distribution of front circular and rear elliptical fin-and-tube heat exchanger under different fin spacing

图 13 为不同翅片间距下前圆后椭圆管翅式换热器压力场分布, 从图中可以看出, 不同间距下, 压力分布变化趋势相同, 压力值随着翅片间距的增大而逐渐减小, 并且间距越小, 在换热管侧面, 压

力变化梯度越大,因此,翅片间距越小,压降越大。

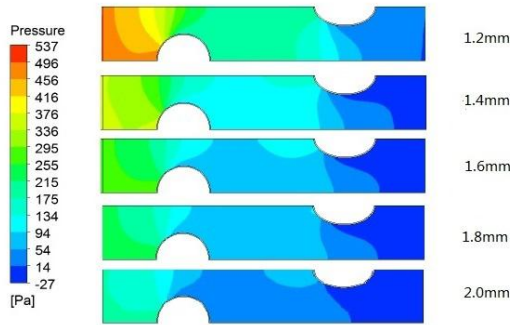


图 13 不同翅片间距下前圆后椭圆管翅式换热器压力场分布

Fig.13 Pressure field distribution of front circular and rear elliptical fin-and-tube heat exchanger under different fin spacing

### 3 结论

(1) 进风速度较低和翅片间距较小时,前圆后椭圆换热器和圆管换热器换热系数近似相等;进风速度较高时,前圆后椭圆换热器高于圆管换热器。

(2) 在不同的进风速度和翅片间距下,前圆后椭圆管翅式换热器压降均比圆管翅式换热器低,均比双椭圆管翅式换热器高。

(3) 在不同的进风速度和翅片间距下,前圆后椭圆管翅式换热器相对圆管换热器,整体流动特性和换热特性都有改善,其综合性能优于椭圆管翅式换热器和圆管翅式换热器。

(4) 减小翅片间距,前圆后椭圆管翅式换热器换热更充分,出口温度越低,但压降变差大,阻力特性变差。

### 参考文献:

[1] 郑俊.翅片管式换热器的数值模拟研究[D].长沙:湖南大学,2020.  
 [2] 刘逸,陈培强,陈鑫,等.组合式翅片管换热器传热与阻力性能影响因素研究[J].节能技术,2021,39(6):498-504.  
 [3] 钟天明,丁力行,邓丹,等.翅片管式换热器的传热研究进展[J].制冷,2019,38(2):71-84.

[4] Tahseen T A, Ishak M, Rahman M M. An overview on thermal and fluid flow characteristics in a plain plate finned and un-finned tube banks heat exchanger[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015,43: 363-380.  
 [5] Okbaz A, Pnarba A, Olcay A B, et al. An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018,121(jun.): 153-169.  
 [6] 周俊杰,陶文.椭圆管开缝翅片换热表面特性的三维数值分析[J].机械工程学报,2005,(7):90-93.  
 [7] SUN L, ZHANG C L. Evaluation of elliptical finned-tube heat exchanger performance using CFD and response surface methodology[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014,(75):45.  
 [8] MATOS R S, LAURSEN T A, VARGAS J V C, et al. Three dimensional optimization of staggered finned circular and elliptic tubes in forced convection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004,(43): 477-487.  
 [9] 杨倬.管翅式换热器内空气侧流动数值模拟\优化设计与实验研究[D].杭州:浙江大学,2020.  
 [10] Bordalo, Nascimento Saboya. Pressure drop coefficients for elliptic and circular sections in one, two and three-row arrangements of plate fin and tube heat exchangers[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 1999,21(4):600-610.  
 [11] 刘妮,崔强,赖晓玲.椭圆管翅式换热器空气侧传热和流动特性的数值模拟[J].热能动力工程,2020,35(6):136-142.  
 [12] 程星星.翅片管式换热器数值模拟及结构参数的多目标优化设计[D].南昌:东华理工大学,2021.  
 [13] Peng Y, Zhang S J, Shen F, et al. Numerical studies on heat transfer and pressure drop characteristics of flat finned tube bundles with various fin materials[J]. Iop Conference, 2017,93:012067.