螺旋通道内流体流动与传热特性研究进展

林清宇^{1,2*}, 刘鹏辉^{1,2}, 冯振飞^{1,2}, 朱礼^{1,2}

1. 广西大学广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 南宁 530004;

2. 广西大学化学化工学院, 南宁 530004

* 联系人, E-mail: linqy121@gxu.edu.cn

2016-10-12 收稿, 2017-03-13 修回, 2017-03-14 接受, 2017-05-12 网络版发表

广西自然科学基金(2014GXNSFBA118051)、广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室主任基金(2016Z013, 2015Z012)和广西大学科研基金(XJZ130359)资助

摘要 螺旋通道是提高流体传热及传质效率的重要结构, 以其节省空间及易于加工的特点被广泛应用. 而通道内流体的流动和传热特性作为评价螺旋通道的重要性质, 对其实际应用具有重要的指导意义, 成为近年来的研究热点. 而研究重点主要集中在螺旋通道的结构参数和流动工质两个方面, 本文对螺旋通道内流体流动与传热特性研究进行综述, 总结了螺旋通道结构及流动工质对其性能的影响规律; 具体分析螺旋通道直径、管径、螺距、截面形状等结构参数以及流动工质种类、浓度等物性参数对其传热系数和流动阻力的影响; 对比了层流及湍流状态下实验和数值模拟结论; 为螺旋通道结构优化及工质选取提供了参考, 并且展望了螺旋通道内流体流动及传热特性研究的发展趋势.

关键词 螺旋通道, 结构, 工质, 流动特性, 传热特性

螺旋通道以其结构紧凑、易于加工及传热效率高等优点被广泛应用于发电、制冷、化学反应、热量回收、食品加工及物料混合等领域. 与普通直管不同, 螺旋通道能够产生垂直于轴向流动方向的二次流, 可以增强流体的扰动, 进而减薄边界层厚度. Goering 等人^[1]已经证实螺旋通道中产生的二次流动占平均流体流动的16%~20%, 而二次流动产生的原因正是螺旋管道曲率产生的离心力对流体的作用. 如图1所示, 螺旋通道的几何及设计参数包括了螺旋半径 R 、管径 D 及螺距 P . 吴双应等人^[2]、Ko等人^[3,4]、Cioncolini 等人^[5]及Chen等人^[6]探究了上述几何参数以及螺旋通道曲率、扭率等对其流动和传热特性的影响, 并从阻力系数、努塞尔数、熵产等方面对其性能进行了评价, 为螺旋通道的结构优化提供了一定参考.

而近年来, 纳米流体以其自身的热物理性质、潜

图1 螺旋通道的几何和设计参数

Figure 1 Geometry and design parameters of helically coiled tube

在的优点及广泛的应用吸引了越来越多的学者对其进行研究. 纳米流体是在基液中添加纳米级颗粒物

引用格式: 林清宇, 刘鹏辉, 冯振飞, 等. 螺旋通道内流体流动与传热特性研究进展. 科学通报, 2017, 62: 2931–2940

Lin Q Y, Liu P H, Feng Z F, et al. A review on fluid flow and heat transfer in helical channel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2931–2940, doi: 10.1360/N972016-01134

和分散剂而制成的,其中纳米颗粒包括了金属单质(例如, Cu, Ag等)、金属氧化物(例如, Al_2O_3 , TiO_2 等)及碳的同素异形体(例如, 金刚石、单层及多层碳纳米管等). 布朗运动作为纳米流体的一个显著特性,能够显著提升其传热效果. Sundar等人^[7]及Li等人^[8]通过研究指出,纳米颗粒的加入对于基液传热系数提升相当明显,但纳米流体与基液相比也具有更高的流动阻力. 所以,在探究不同流动工质传热特性的同时,也应该对其流动特性进行分析,这样才能更加合理地指导换热工质的选取及使用.

改变螺旋通道结构及流动工质的最终目的都是为了提高其传热性能,并且尽量减少流动阻力. 虽然现今已有很多关于螺旋通道内流体流动及传热特性方面的综述,但是综合两者进行总结的并不多,并且对于分析其结构及工质,特别是几何参数及纳米流体对其流动及传热特性影响的综述还很少.

本文将从螺旋通道结构及流动工质两个方面出发,特别是其几何参数和纳米流体工质,对近几年来螺旋通道内流体流动及传热特性的实验和数值模拟研究进行综述,希望对以后的研究者有一定帮助.

1 螺旋通道结构

相比于直通道,螺旋通道自身结构的曲率和扭率使得流经介质的流动状态变得相对复杂,离心力和向心力的作用使得流体在流动过程中偏向壁面而形成迪恩涡,流动场和速度场均发生改变. 相应地,其流动状态的判定标准也有所不同,直通道中,当雷诺数 Re 小于2300时称作层流,2300~4000时为过渡区,超过4000则为湍流^[9];而在螺旋通道中,层流、湍流临界雷诺数随着螺旋通道结构参数的改变而变化,具体计算公式为

$$Re_c = 2 \times 10^4 \cdot \delta^{0.32}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{D}{2R}, \quad (2)$$

当 $\delta^{-1} \neq 860$, 雷诺数 Re 小于 Re_c 时,流体的流动状态为层流,大于 Re_c 则为湍流^[10], 本文就将以此对螺旋通道内流体的流动和传热特性进行概括分析.

1.1 层流状态下的流动特性

(i) 实验研究. 螺旋通道自身的几何参数会在一定程度上影响流体的流动特性,近年来,越来越多的学者通过实验对其进行了探究. Ghobadi等人^[11]就

研究了小尺寸螺旋管的压降,发现低雷诺数下,曲率越大,压降越大. 说明在流体流动的过程中,扰动的增强提高了压降. 张丽等人^[12]通过实验,研究了矩形截面螺旋通道内流体的流动特性,结果发现,由于离心力和扭转力的作用,其轴向速度最大值偏向外壁,流动截面上会产生两个二次涡;随着矩形截面高宽比的增大,轴向速度又偏向上半截面,而两个二次涡分别移向两侧;随着矩形截面高宽比的减小,二次流动增强,阻力系数也增大.

这就表明,曲率在螺旋管道的结构优化中十分重要,增加曲率可以提高其流动阻力;而矩形螺旋通道上、下壁面处的扰动已经相当剧烈,截面中心处较弱,由此,可以通过内置涡发生器或者扰流元件的方法来提高整体的扰动效果.

马源等人^[13]发现,随着螺旋通道螺旋角的上升,横截面的二次流高速区外移,使得外侧速度增加. Liu等人^[14,15]通过可视化实验,对水平放置矩形截面螺旋通道内弹状流的流动特性进行了实验研究. 结果表明:其流动特性会随着螺旋角位置的改变而变化. 重力和离心力的相对大小决定着内、外壁面液膜的厚度,在螺旋上升过程中,液膜下降速度逐渐减小,在螺旋下降段,液膜速度明显增加,气弹往螺旋通道上侧运动的过程中,流速逐渐减小;液塞速度随着液体表面流速的增加而增大;壁面两侧液膜降落速度相同,并随着气体流速的增加而增大;液体流速增加时,液膜厚度也随之增大.

由上述研究可知,螺旋角度上升而引起的螺旋通道内流体高速区外移,靠近壁面附近的流体流动状态发生改变,流体流动阻力也会随着高速区外移的程度而发生变化,这就为螺旋通道流动特性优化提供依据;而可视化的研究需要结合螺旋通道局部及整体流动和传热的变化进行分析,以此来评价不同流型与流动和传热特性的关系,才能更加具体地为结构优化提供参考.

(ii) 模拟研究. 除了张丽等人^[12]对矩形截面螺旋通道流动特性进行数值模拟,并得到和实验测量值相近的结果外, Mohammed等人^[16]模拟了不同螺距对其压降的影响,发现改变螺距对压降并无明显改变;而随着螺旋半径的减小和螺旋管内径的增加,压降增大. 吴双应等人^[17]研究了无量纲螺距和曲率对环形螺旋通道流动特性的影响. 结果发现,其流动阻力随着曲率的增加而增加,但受无量纲螺距的影

响很小. 由此可知, 螺旋通道曲率是影响其流动特性的重要因素, 可以通过改变曲率对其流动特性进行优化.

随后, Nobari等人^[18]探究了理查森数 Ri 对螺旋通道混合对流的影响. 结果发现, 在浮力的作用下, 通道内会产生一对不对称涡, 使得流动变得更加复杂, 从而达到强化传热的效果.

上述研究均从具体的螺旋通道结构参数出发, 分析它们在层流状态下对其流动特性的影响, 相对于湍流而言, 层流状态下流体紊乱程度较低, 通过改变螺旋通道曲率可以有效改变其流动特性.

1.2 湍流状态下的流动特性

(i) 实验研究. 相比于层流状态, 湍流状态下的流动紊乱程度较高, 研究主要集中在螺旋通道中的扰流装置上, 通过二次流发生装置来进一步提高流体的扰动.

由张丽等人^[12]的实验结果可知, 矩形截面螺旋通道内靠近壁面处的扰动比中间截面强烈, 一些学者就通过加入涡发生器的方法来增强截面中间流体的扰动效果. 随后, 张丽等人^[19]就对安装三角翼形涡发生器的矩形截面螺旋通道进行了研究. 结果表明: 湍流状态下, 内壁处会出现两个新的二次涡, 涡量最大值为光管的2.0~2.8倍, 有效地增强了扰动. 而螺旋通道中的两相流在离心力的作用下要比直管中的情况更加复杂, 所以, Saffari等人^[20]通过实验探究了螺旋通道气液两相的压降及流阻. 结果表明: 随着雷诺数及空隙率的增加, 流阻减小; 随着曲率的减小, 流阻增大; 随着雷诺数的增加, 注入气泡的直径减小.

(ii) 模拟研究. 通过数值模拟对结构进行优化, 然后选取合适的结构参数对其进行实验研究, 可以节约时间, 提高实验效率. Xia等人^[21]数值模拟了矩形截面螺旋通道内气液两相流的压降, 结果表明, 螺旋通道内气液两相流单位螺旋管道长度的摩擦压降及摩擦阻力的梯度均随着曲率的增加而增大; 而随着扭率的增加, 摩擦阻力及压降也会增大. 陈瑞杰等人^[22]在矩形截面螺旋通道内加入肋片, 使得矩形截面中心处产生附加二次流, 流动阻力系数较光管增加了0.3%~3.3%. 李雅侠等人^[23]研究了不同形状和不同布置方式的翼型涡发生器对半圆形截面螺旋通道的流动特性的影响, 结果表明, 其流动阻力系数与光管流动阻力之比 f/f_0 在1.105~1.188之间. 也有一

些特殊结构螺旋通道的流动特性被学者研究, Li等人^[24]就提出了如图2所示的起皱螺旋通道, 并对其流体流动特性进行了探究, 结果发现, 其流动阻力比光管增加了50%~300%. 这些结构的提出丰富了螺旋通道研究的范围, 为新型螺旋通道的研发提供了参考.

1.3 层流状态下的传热特性

改变螺旋通道的几何参数及内部结构之所以会对其传热性能产生影响, 是因为曲率、扭率、螺距及其倾斜角度等参数数值的变化均会使流体受到的离心力及浮力等发生改变, 从而使其产生的涡及二次流的速度和分布情况发生变化. 这就意味着流体的扰动及对边界层的减薄程度发生了变化, 传热性能也就随之改变.

螺旋通道的努塞尔数是表征其对流传热效果的一个无量纲参数, 与其进、出口温度及壁温有一定关系, 而进、出口温度及壁温又和流体在通道内的扰动有关, 也就是二次流的分布情况, 在之前的研究中已经指明二次流的分布和螺旋半径及螺距有关. 所以, 螺旋通道结构对其传热特性影响的研究主要集中在螺旋管内径、螺旋半径、螺距以及截面形状上.

(i) 实验研究. 由上述分析可知, 螺旋管内径、螺旋半径及螺距的改变会对其传热性能产生影响. Moawad^[25]通过实验探究了如图1所示螺旋通道的 R/D 在7.086~16.142及 P/D 在1.81~3.205范围内的传热特性, 雷诺数和 P/D 一定时, 努塞尔数随着 R/D 的增加而增大; 雷诺数和 R/D 一定时, 努塞尔数随着 P/D 的增加而增大. 随后, Heo等人^[26]通过实验研究了螺旋通道不同几何参数对其传热特性的影响, 结

图2 螺旋起皱的螺旋通道^[24]

Figure 2 Helical tube cooperating with helical corrugation^[24]

果发现,螺旋管内径增大时努塞尔数减小;管道长度对努塞尔数影响不大。

另外,一些特殊的结构参数也被很多学者进行了探究。Park等人^[27]发现自然对流状态下,当螺旋通道的倾斜角为 80° 时,传热系数最大,说明此时螺旋管道内的二次流动最大程度改善了流体对边界层的减薄情况,扰动强度达到最大。Poskas等人^[28]研究了双壁面加热矩形螺旋通道内空气流的传热特性,结果发现,双壁面加热时的努塞尔数比单壁面加热时提高20%;层流状态下螺旋通道的平均传热较普通直管提高了50%。

(ii) 模拟研究。数值模拟的结果也在一定程度上验证了理论分析及实验结论。Mohammed等人^[16]通过数值模拟发现,降低螺旋半径、增加螺旋管道内径及减小螺旋管道环直径均可以增大努塞尔数;改变螺距对传热性能影响不大。也有学者研究了一些其他结构的螺旋通道,并且从熵产的角度进行分析,Kurnia等人^[29]模拟了层流状态下,不同截面形状对螺旋通道传热及熵产的影响,结果发现,螺旋通道具有比直管更高的传热系数,并且产生的熵产更少;正方形的熵产最多,椭圆次之,而圆形最少;冷却时产生的熵产高于加热时的熵产;传热熵产比黏性耗散引起的熵产高出2个数量级。

1.4 湍流状态下的传热特性

(i) 实验研究。为了探究湍流及层流状态下不同结构螺旋通道传热特性的差别,Poskas等人^[28]研究了双壁面加热矩形螺旋通道内空气流的传热特性,结果发现,在层流及湍流状态下,螺旋通道较普通直管而言,平均传热系数分别提高50%和20%;增加螺旋通道曲率对于流体扰动效果的提升不明显。湍流状态下其传热系数之所以可以提高更多,是因为湍流状态时,流体的扰动已经相当剧烈,双壁面加热对于增强流体扰动效果没有层流状态时明显。Simonis等人^[30]实验探究了矩形截面螺旋通道中表面粗糙度对其传热特性的影响,结果表明,湍流状态下,粗糙凸表面螺旋通道的传热性能是光滑凸表面的两倍多,并且达到了凹表面传热的水平;粗糙凹表面和光滑凹表面的传热性能相近,相比于光滑直管,其传热效果提升50%左右;而在所研究的雷诺数范围内,粗糙凹、凸表面螺旋通道的传热效率均高于光管。

(ii) 模拟研究。在湍流状态下螺旋通道传热特

性的模拟研究中,很多学者也证实了增加扰动对其传热特性的提高并无太大作用。陈瑞杰等人^[22]模拟探究了湍流状态下肋片对螺旋通道传热特性的强化作用,结果表明,单一矩形截面螺旋通道换热壁面中心线附近的二次流较弱,换热效果差,安装肋片之后,会在矩形截面中心处产生附加二次流,其换热系数提高到光管的1.03~1.2倍,阻力系数为光管的1.003~1.033倍,强化传热因子则为光管的0.911~1.067倍;并且,低雷诺数时,其传热效果较好。但是,Li等人^[24]发现起皱螺纹传热性能比光管增加50%~80%,并随着螺纹间距的减小而增大,说明起皱的扰动效果要优于肋片,可能是因为起皱部分产生了新的二次流动,并且新产生的二次流动对流体的扰动效果明显优于肋片。

2 流动工质

2.1 纳米流体

由于纳米颗粒的加入,纳米流体的性质和传统单相流体有很大不同,可以近似看作固液两相混合的纳米流体与单相流体相比,具有以下优点:(1) 纳米颗粒在基液中做布朗运动,使得纳米流体具有较高的分散稳定性;(2) 与传统的泥浆沉积不同,纳米颗粒不容易形成阻塞,可以应用到小型甚至微型设备中;(3) 与传统工质相比,通过提高流体扰动来增加等效的传热效果时,纳米流体所需的泵功较少;(4) 可以通过改变纳米流体的体积分数来调整其导热系数以适应不同应用的需求;(5) 较高的比表面积以及固体颗粒和流体之间更多的热量传递^[31]。这些特点使得纳米流体得到了广泛的应用,尤其是在强化传热技术领域,越来越多的研究者开始探究纳米流体对于螺旋通道传热特性的影响。

(i) 纳米流体的传热特性。纳米流体对螺旋通道传热性能的提高不仅与布朗运动、布朗分散及流固界面的摩擦有关,分散性、流固表面的边界层及纳米流体本身的热物理性质也在一定程度上影响着螺旋通道传热特性。相关的实验结果表明,纳米流体的传热性能不仅与纳米颗粒的加入有关,加入纳米颗粒之后工质自身性质的改变也是重要影响因素。纳米流体的热物理性能可以通过两相混合的经典公式进行计算,例如,纳米流体的有效密度^[32]和比热容^[33]的计算公式分别为

$$\rho_{\text{NF}} = (1 - \varphi)\rho_{\text{BF}} + \varphi\rho_{\text{NP}}, \quad (3)$$

$$c_{\text{pNF}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_{\text{BF}} + \varphi(\rho c_p)_{\text{NP}}}{(1 - \varphi)\rho_{\text{BF}} + \varphi\rho_{\text{NP}}}, \quad (4)$$

由式(3)和(4)可知, 纳米颗粒的体积分数在一定程度上决定着纳米流体的一些物理性质, 如表1所示^[34~44], 一些学者就探究了添加纳米颗粒之后的工质对螺旋通道传热特性的影响. 结果发现, 添加纳米颗粒而制得的纳米流体的传热性能要优于基液; 随着纳米颗粒体积分数的增加, 其传热效果明显提高; 层流状态下, 加入纳米颗粒对于工质传热性能的改善要优于湍流状态; 分散有不同纳米颗粒的纳米流体的传热性能之间存在差异. 分析其原因, 可能是纳米颗粒自身的热物理性与基液差别很大, 良好的热物理性质使其传热效果提升明显; 纳米颗粒的小尺

寸效应, 导致其具有更大的比表面积; 纳米颗粒在布朗运动过程中可以传递更多的热量, 改善了传热效果; 添加的纳米颗粒越多, 单位体积内的纳米颗粒数量也就越多, 其传递热量的效率就越高; 层流状态下, 流体扰动相对于湍流状态而言, 比较平缓, 加入的纳米颗粒在流体中的宏观运动也就没有湍流状态下的剧烈, 也就导致了其对传热效果的提升效果没有湍流状态下明显. Sivasankaran等人^[45]数值模拟了层流状态下内置多孔介质的螺旋细通道内纳米流体的传热特性, 结果表明, 增强混合程度可以提高努塞尔数, 但是在高雷诺数下, 作用不大. 并且每种纳米颗粒自身的物理性质不同, 可能就导致了不同纳米流体传热性能的差异. 这些分析的结论中, 还有很多需要研究者对其进行进一步的探究.

(ii) 纳米流体的流动特性. 由于工质自身的物

表1 纳米流体对螺旋通道流动及传热特性的影响

Table 1 Effect of nanofluid on the flow and heat transfer characteristics of helical channel

作者	流动状态	结构参数(mm)	纳米颗粒	基液	体积分数(%)	流动及传热特性分析
Jamshidi等人 ^[34]	层流	$D=12$ $P=21.4, 26.7, 30$ $R=35, 45, 55$	Al_2O_3	水	1, 2	两种体积分数的纳米流体对应的流动阻力系数比基液分别提1.45%, 4.28%; 努塞尔数比基液分别提高39%, 46%
Akhavan-Behabadi等人 ^[35]	层流	$D=15.6$ $P=25\sim 95$ $R=110, 130, 160$	碳纳米管	传热油	0.1, 0.2, 0.4	最大平均传热系数比基液增加80%
Hashemi等人 ^[36]	层流	$D=14.37$ $P=55$ $R=162$	CuO	传热油	0.5, 1.0, 2.0	最大压降值比基液增加20.3%; 最大平均传热系数比基液增加30.4%
Srinivas等人 ^[37]	层流 湍流	$D=9.82$ $P=32.5$ $R=95$	Al_2O_3	水	0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75	比基液最多节能10.65%
Khairul等人 ^[38]	湍流	$D=9$ $P=18$ $R=58$	CuO ZnO Al_2O_3	水	1, 2, 3, 4	CuO 纳米颗粒的平均传热系数比另外两种平均提高7.14%
Aly ^[39]	湍流	$D=14.07$ $P=31.74$ $R=90, 120, 150$	Al_2O_3	水	0.5, 1.0, 2.0	流动阻力系数随着螺旋通道曲率的增加而增大, 在纳米流体体积分数小于2%范围内几乎不变; Re 为20634及176240时, 体积分数2.0%的纳米流体的平均传热系数比基液提高27%和30%
Rakhsha等人 ^[40]	湍流	$D=8$ $P=20\sim 42$ $R=42.5\sim 100$	CuO	水	0.1	不同几何参数及雷诺数下压降提高14%~16%; 传热效果比基液增强16%~17%
Mirfendereski等人 ^[41]	层流	$P=45, 55, 72$ $R=77.5\sim 137.5$	Ag	水	0.03	压降随曲率的增加而增大, 并且不同几何参数下其提升范围为13%~24%; 传热效果比基液提高3.5%~3.8%
Srinivas等人 ^[42]	层流 湍流	$D=9.82$ $P=32.5$ $R=95$	CuO TiO_2 Al_2O_3	水	0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0	3种纳米流体的表面强化传热效果比基液最多分别增强30.37%, 26.8%, 32.7%
Bahreghmand等人 ^[43]	湍流	$D=7, 10, 13$ $P=20$ $R=50, 60, 70$	Al_2O_3	水	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	体积分数分别0.2%, 0.3%的纳米流体的传热系数比基液分别提高14%, 18%
Huminić等人 ^[44]	层流	$D=28$ $P=115$ $R=400$	CuO TiO_2	水	0~2.0	体积分数2.0%的 CuO , TiO_2 纳米流体的热交换效率比基液分别提高91%, 80%

理性质不同,黏度、密度及比热容等参数均有差异,从而对流体的流动特性有所影响.以计算螺旋通道中阻力系数为例,公式如下:

$$f = \frac{2d_h \Delta p}{\rho L u^2}. \quad (5)$$

在几何参数及流速一致的情况下,式(5)中流体的密度 ρ 和沿程压降 Δp 共同决定了阻力系数的大小.而又由式(3)可知,纳米流体的密度是随着基液密度、纳米颗粒密度及纳米颗粒体积分数共同决定的.所以,研究者探究了纳米流体对螺旋通道流动特性的影响. Rakhsha等人^[40]通过实验对湍流状态下螺旋通道内纳米流体流动特性进行了分析,结果表明,相比于以水为工质的螺旋通道,加入纳米流体后其压降增加了14%~16%,显然,阻力系数也随着提高.随后, Khoshvaght-Aliabadi等人^[46]实验探究了螺旋微通道内Cu-水纳米流体流动特性,结果表明,加入纳米颗粒之后,压降略有增加;螺旋管直径较小时,纳米颗粒对其流动特性的影响较大.

也有一些学者通过数值模拟对其进行了研究,其结果在一定程度上与实验结论保持一致. Narrein等人^[47]选取了 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CuO 及 ZnO 4种纳米颗粒,颗粒浓度在1%~4%之间,粒径范围为25~80 nm,使用的基液分别为水、乙二醇及机油,结果发现,纳米流体对螺旋通道内流体的压降有小幅增加.

但是,一些研究者却发现了实验值与模拟值之间存在差异. Rakhsha等人^[40]就发现相比于以水为工质的螺旋通道,加入纳米颗粒后其压降的模拟值增加了6%~7%,而实验值提高了14%~16%.分析原因可能是由于在模拟过程中,假定了纳米流体为均一稳定的流体,而实际上纳米流体为固液混合的两相流体,纳米颗粒在流体中存在小尺寸效应和布朗运动,这就造成了实验和模拟值的偏差.

2.2 其他种类工质的流动及传热特性

(i) 流动特性. 对于一些常规的制冷剂而言,研究的重点主要集中在与普通直管的对比上. Gupta等人^[48]对水平螺旋通道内R-134a冷却剂的流动特性进行了研究,结果表明,压降随着蒸汽平均质量流速的增加而增大,随饱和温度的增加而减小;与直管相比,二次流使得扰动增强,从而提高了压降. Mozafari等人^[49]通过实验研究了制冷剂R-600a在倾斜螺旋通道内的压降,结果表明,水平螺旋通道的压

降最大;与水平直管相比,其压降增加33%~157%.

(ii) 传热特性. 基于纳米流体对螺旋通道传热性能的改善作用,越来越多研究者对螺旋通道内其他工质的传热特性进行了探究. Gupta等人^[48]对水平螺旋通道内R-134a冷却剂的传热特性进行了研究,结果表明,平均传热系数随着蒸汽平均质量流速增加而增大,随饱和温度的增加而减小;与直管相比,二次流使得湍流增强,从而提高了传热系数;低质量流量时,螺旋通道十分适合替换直管. 随后, Mozafari等人^[49]研究了R-600a在倾斜螺旋通道内的传热,螺旋通道中心轴线与水平线夹角为30°和90°时其传热系数分别达到最小值和最大值;螺旋通道相比于直管,其平均传热系数增加24%~165%;螺旋通道水平放置时的综合性能评价因数比垂直时高15%~41%,说明使用螺旋通道可以改善制冷效果,并且竖直位置时,其改善效果最佳.

当然,也不乏关于气体工质的相关研究, Xu等人^[50]研究了临界压降条件下,螺旋通道内 CO_2 对流传热特性,结果表明,湍流状态下,在浮力和离心力的共同作用下,横截面上的流动及传热分布发生改变,较大的轴向速度及传热系数都出现在螺旋通道的底层,在通道内顶部出现温度最大值. Zhang等人^[51]研究了超临界压力下 CO_2 在螺旋通道内垂直向上流动时的混合对流换热性能,结果表明,在离心力和浮力的共同作用下,最低壁温出现在螺旋通道的底部与外部之间;证明了3个传热增强机理(由离心力产生的二次涡、由浮力产生的二次涡和临界温度下的大比热容)和两个传热减弱机理(浮力引起的密度差减小使得二次流减弱及液气转化引起的传热系数减小);在传热减弱区域,努塞尔数的突增是由热导率的减小引起的;气体温度低于临界温度时,增加质量流量可以增强传热效果,而增加热通量则会减弱.

熔盐以其大比热容、低蒸汽压、低腐蚀性及化学稳定性等优点,常常被作为理想的换热工质. Xiao等人^[52]实验探究了螺旋环形通道内熔盐流(包括53%的 KNO_3 、40%的 NaNO_2 及7%的 NaNO_3)的传热特性,结果表明,环形螺旋通道的熔盐流动摩擦系数比螺旋通道和直管的都大;熔盐温度较低且进出口直径较小时其努塞尔数较大.

3 结语与展望

结合现有的实验和数值模拟研究,螺旋通道可

以产生垂直于轴向流动方向的二次流动,一些学者通过改变螺旋通道结构,进一步改善了流体对边界层的减薄程度,提高传热性能;不同种类流动工质自身的热物理性质决定了其传热效率,近年来研究的工质对螺旋通道的换热性能都有很大提升,尤其是纳米颗粒的小尺寸效应,使其在基液中作无规则的布朗运动,增加了导热系数;在改变螺旋通道结构的基础上,分析不同工质对其传热特性的影响,对其结构的优化和工质的选取有很大帮助。

但是,在这个领域仍有很多问题需要研究者对其进行更加深入的探究。结构方面,首先,现有关于螺旋通道流动和传热特性的研究大多数集中在传统尺度,而微尺度螺旋通道以其结构和性能上的优势越来越受研究者的欢迎。所以,可以从微尺度的角度出发,探究微细螺旋通道内单相及两相流体的流动及传热特性,特别是微尺度与传统尺度下流动和传热特性产生差异的机理研究,把传统尺度螺旋通道的强化传热技术,应用到微尺度领域进行研究,建立完整的微细螺旋通道强化传热体系,以便更好地满足工程实际的换热需求;其次,可以从热力学第二定律出发,探究不可逆过程中的熵增问题,以及提升相

同传热效果时所消耗的不可逆功及泵功,以便对不同结构的螺旋通道进行统一的功耗评价,从而筛选出节能高效的换热方案;最后,可以对几何参数优化后的螺旋通道以及螺旋微细通道增加合理的扰流装置,并分析其流动及传热特性,并且探究添加纳米颗粒的工质对其性能的影响。工质方面,首先应该考虑其稳定性,在外界物理条件(如温度、压力、磁场、电场等)的影响下,确保工质可以长时间保持稳定,尤其是纳米流体的稳定性缺乏统一的标准,制备纳米流体的技术不尽相同,很难就不同研究者关于同一纳米流体的稳定性进行比较,这样就造成了纳米流体在螺旋通道中的研究缺乏统一的参考,所以,很有必要建立一个统一的纳米流体工质物理性质评价标准,以此来保证研究者所使用的纳米流体工质具有相互对比的资格;其次,在研究纳米流体对螺旋通道传热性能提高的同时,应该分析其压降及黏度的增加,并且对由于其压降及黏度增加带来的流动阻力、不可逆功损失及泵功进行定量分析,从而保证螺旋通道传热性能的提升不是以更大的流动阻力为前提的,并且建立一个综合评价纳米流体及其他工质对螺旋通道整体性能影响的新标准。

参考文献

- Goering D J, Humphrey J A C, Greif R. The dual influence of curvature and buoyancy in fully developed tube flows. *Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 2187-2199
- Wu S Y, Chen Y, Li Y R, et al. Exergy transfer evaluation on enhanced heat transfer performance through tube with constant heat flux (in Chinese). *J Therm Sci Tech*, 2006, 2: 133-138 [吴双应, 陈燕, 李友荣, 等. 恒热流工况下强化传热管传热能评价. *热科学与技术*, 2006, 2: 133-138]
- Ko T H. Thermodynamic analysis of optimal curvature ratio for fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube with uniform heat flux. *Int J Therm Sci*, 2006, 45: 729-737
- Ko T H, Ting K. Optimal Reynolds number for the fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube. *Energy*, 2006, 31: 2142-2152
- Cioncolini A, Santini L. On the laminar to turbulent flow transition in diabatic helically coiled pipe flow. *Exp Therm Fluid Sci*, 2006, 30: 653-661
- Chen Y, Chen H J, Zhang B Z, et al. Fluid flow and convective heat transfer in a rotating helical square duct. *Int J Therm Sci*, 2006, 45: 1008-1020
- Sundar L S, Singh M K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. *Energy Rev*, 2013, 20: 23-35
- Li Y J, Zhou J E, Tung S, et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Tech*, 2009, 196: 89-101
- Aghabozorg M H, Rashidi A, Mohammadi S. Experimental investigation of heat transfer enhancement of Fe_2O_3 -CNT/water magnetic nanofluids under laminar, transient and turbulent flow inside a horizontal shell and tube heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci*, 2016, 72: 182-189
- Fsadni A M, Whitty J P M, Stables M A. A brief review on frictional pressure drop reduction studies for laminar and turbulent flow in helically coiled tubes. *Appl Therm Eng*, 2016, 109: 334-343
- Ghobadi M, Muzychka Y S. Pressure drop in mini-scale coiled tubing. *Exp Therm Fluid Sci*, 2014, 57: 57-64

- 12 Zhang L, Xing Y W, Wu J H. Flow characteristics in helical duct with rectangular cross section (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2010, 5: 1089–1096 [张丽, 邢彦伟, 吴剑华. 矩形截面螺旋通流体的流动特性. 化工学报, 2010, 5: 1089–1096]
- 13 Ma Y, Cao W J, Lin M. Secondary flow characteristics in helical rectangular channel (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2014, 8: 122–127 [马源, 曹文瑾, 林梅. 矩形截面螺旋通道内二次流流场特性. 西安交通大学学报, 2014, 8: 122–127]
- 14 Liu X F, Xia G D, Yang G. Experimental study on the characteristics of air-water two-phase flow in vertical helical rectangular channel. *Int J Multiphase Flow*, 2015, 73: 227–237
- 15 Liu X F, Xia G D, Yang G. Flow characteristics of slug flow in helical rectangular channel (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2014, 65: 4231–4237 [刘献飞, 夏国栋, 杨光. 矩形截面螺旋通道内弹状流的流动特性. 化工学报, 2014, 65: 4231–4237]
- 16 Mohammed H A, Narrein K. Thermal and hydraulic characteristics of nanofluid flow in a helically coiled tube heat exchanger. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2012, 39: 1375–1383
- 17 Wu S Y, Chen S J, Li Y R, et al. Numerical simulation of thermal-dynamic characteristics through a helical coiled tube with annular cross section for laminar flow (in Chinese). *Nucl Power Eng*, 2009, 30: 86–90 [吴双应, 陈素君, 李友荣, 等. 环形截面螺旋通道内层流换热热力学性能数值模拟. 核动力工程, 2009, 30: 86–90]
- 18 Nobari M R H, Shiniyan B, Mirzaei M. Mixed convection in a vertical helical annular pipe. *Int J Heat Mass Transf*, 2014, 73: 468–482
- 19 Zhang L, Li J Q, Zhang C M, et al. Fluid flow in rectangular helical channels with vortex generator (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2014, 65: 3838–3845 [张丽, 李佳其, 张春梅, 等. 安装涡发生器的矩形截面螺旋通内流体流动. 化工学报, 2014, 65: 3838–3845]
- 20 Saffari H, Moosavi R, Gholami E, et al. The effect of bubble on pressure drop reduction in helical coil. *Exp Therm Fluid Sci*, 2013, 51: 251–256
- 21 Xia G D, Liu X F. An investigation of two-phase flow pressure drop in helical rectangular channel. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2014, 54: 33–41
- 22 Chen R J, Ma Z Y, Wang X D, et al. Heat transfer enhancement of ribs in a helical duct with rectangular cross section (in Chinese). *J Shenyang Univ Chem Tech*, 2014, 28: 248–252 [陈瑞杰, 马中元, 王兴斗, 等. 肋片强化矩形截面螺旋通道换热特性研究. 沈阳化工大学学报, 2014, 28: 248–252]
- 23 Li Y X, Zhang T, Zhang C M, et al. Enhanced heat transfer mechanism of winglet vortex generator in helical channel with semicircular cross section (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2016, 67: 1814–1821 [李雅侠, 张腾, 张春梅, 等. 翼型涡发生器对半圆形螺旋通道的换热强化机理. 化工学报, 2016, 67: 1814–1821]
- 24 Li Y X, Wu J H, Wang H, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics in helical tubes cooperating with spiral corrugation. *Energy Procedia*, 2012, 17: 791–800
- 25 Moawed M. Experimental study of forced convection from helical coiled tubes with different parameters. *Energy Convers Manage*, 2011, 52: 1150–1156
- 26 Heo J H, Chung B J. Influence of helical tube dimensions on open channel natural convection heat transfer. *Int J Heat Mass Transf*, 2012, 55: 2829–2834
- 27 Park J H, Moon J Y, Chung B J. Natural convection of an inclined helical coil in a duct. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2014, 59: 11–16
- 28 Poskas P, Simonis V, Ragaisis V. Heat transfer in helical channels with two-sided heating in gas flow. *Int J Heat Mass Transf*, 2011, 54: 847–853
- 29 Kurnia J C, Sasmito A P, Shamim T, et al. Numerical investigation of heat transfer and entropy generation of laminar flow in helical tubes with various cross sections. *Appl Therm Eng*, 2016, 102: 849–860
- 30 Simonis V, Poskas P, Ragaisis V. Enhancement of heat transfer and hydraulic drag in gas-cooled helical channels with artificial roughness on convex wall. *Nuclear Eng Design*, 2012, 245: 153–160
- 31 Wen D, Lin G, Vafaei S, et al. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, 2009, 7: 141–150
- 32 Xuan Y, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transf*, 2000, 43: 3701–3707
- 33 Pak B C, Cho Y I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxideparticles. *Exp Heat Transf*, 1998, 11: 151–170
- 34 Jamshidi N, Farhadi M, Sedighi K, et al. Optimization of design parameters for nanofluids flowing inside helical coils. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2012, 39: 311–317
- 35 Akhavan-Behabadi M A, Pakdaman M F, Ghazvini M. Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2012, 39: 556–564
- 36 Hashemi S M, Akhavan-Behabadi M A. An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2012, 39: 144–151
- 37 Srinivas T, Vinod A V. Performance of an agitated helical coil heat exchanger using Al_2O_3 /water nanofluid. *Exp Therm Fluid Sci*, 2013, 51: 77–83

- 38 Khairul M A, Saidur R, Rahman M M, et al. Heat transfer and thermodynamic analyses of a helically coiled heat exchanger using different types of nanofluids. *Int J Heat Mass Transf*, 2013, 67: 398–403
- 39 Aly W I A. Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers. *Energy Convers Manage*, 2014, 79: 304–316
- 40 Rakhsha M, Akbaridoust F, Abbassi A, et al. Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature. *Powder Tech*, 2015, 283: 178–189
- 41 Mirfendereski S, Abbassi A, Saffar-Avval M. Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall heat flux. *Adv Powder Tech*, 2015, 26: 1483–1494
- 42 Srinivas T, Vinod A V. Heat transfer intensification in a shell and helical coil heat exchanger using water-based nanofluids. *Chem Eng Proc-Process Int*, 2016, 102: 1–8
- 43 Bahrehmand S, Abbassi A. Heat transfer and performance analysis of nanofluid flow in helically coiled tube heat exchangers. *Chem Eng Res Design*, 2016, 109: 628–637
- 44 Humnic G, Humnic A. Heat transfer and entropy generation analyses of nanofluids in helically coiled tube-in-tube heat exchangers. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2016, 71: 118–125
- 45 Sivasankaran S, Narrein K. Numerical investigation of two-phase laminar pulsating nanofluid flow in helical microchannel filled with a porous medium. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2016, 75: 86–91
- 46 Khoshvaght-Aliabadi M, Pazdar S, Sartipzadeh O. Experimental investigation of water based nanofluid containing copper nanoparticles across helical microtubes. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2016, 70: 84–92
- 47 Narrein K, Mohammed H A. Influence of nanofluids and rotation on helically coiled tube heat exchanger performance. *Thermochim Acta*, 2013, 564: 13–23
- 48 Gupta A, Kumar R. Condensation of R-134a inside a helically coiled tube-in-shell heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci*, 2014, 54: 279–289
- 49 Mozafari M, Akhavan-Behabadi M A, Qobadi-Arfaee H, et al. Condensation and pressure drop characteristics of R600a in a helical tube-in-tube heat exchanger at different inclination angles. *Appl Therm Eng*, 2015, 90: 571–578
- 50 Xu J, Yang C, Zhang W, et al. Turbulent convective heat transfer of CO₂ in a helical tube at near-critical pressure. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 80: 748–758
- 51 Zhang W, Wang S, Li C, et al. Mixed convective heat transfer of CO₂ at supercritical pressures flowing upward through a vertical helically coiled tube. *Appl Therm Eng*, 2015, 88: 61–70
- 52 Xiao P, Guo L, Zhang X. Investigations on heat transfer characteristic of molten salt flow in helical annular duct. *Appl Therm Eng*, 2015, 88: 22–32

Summary for “螺旋通道内流体流动与传热特性研究进展”

A review on fluid flow and heat transfer in helical channel

LIN QingYu^{1,2*}, LIU PengHui^{1,2}, FENG ZhenFei^{1,2} & ZHU Li^{1,2}

¹ Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;

² School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

* Corresponding author, E-mail: linqy121@gxu.edu.cn

As an important structure to improve the efficiency of heat transfer and mass transfer, helical channel has been widely used in the application fields of power generation, refrigeration, chemical reaction, heat recovery, food processing and material mixing because of its compact structure and easy processing.

Different from the straight channel, helical channel can produce the secondary flow perpendicular to the axial flow direction, which can increase the disturbance of the fluid flowing in the channel, and then reduce the thickness of the boundary layer, and enhance the heat transfer characteristics. The flowing state of the liquid in helical channel becomes relatively complicated because of the curvature and torsion of helical channel, the centrifugal force and centripetal force cause the fluid to flow toward the wall and form the Dean vortex, and then flow field and velocity field will be changed.

In addition to the use of helical channel instead of straight channel to improve the heat transfer efficiency of the passive heat transfer technology, the use of efficient heat exchange quality can further improve the performance of heat transfer equipment. For example, the nanofluid is prepared by adding nanoparticles and dispersing agent in the base liquid, because of higher thermal conductivity of nanoparticles and the Brown movement, it is widely used in the heat exchanger.

The flow and heat transfer characteristics of the fluid in the helical channel have become a hot research topic in recent years, and they are of crucial guiding significance for practical applications. At present, the essential reason for the secondary flow is that the centrifugal force produced by the curvature and torsion of the helical channel can affect the fluid, however, with the secondary flow, the flow resistance will increase with the increase of heat transfer. On the other hand, the addition of nanoparticles in the base fluid not only has a significant improvement on the heat transfer coefficient, but also has higher flow resistance compared with the base fluid. The results show that the flow resistance increases with the increase of heat transfer characteristics under the two conditions of heat transfer enhancement. At the same time, how to reduce the increase of flow resistance is the key to optimize the heat transfer characteristics of helical channel.

The research focused on the structural parameters of helical channel and the working fluid, and the research progress of fluid flow and heat transfer in helical channel was reviewed. The influence of different structures and working fluid on the characters of fluid flow and heat transfer in helical channel were summarized. The effect of structure parameters such as coiled curvature radius, coil diameter, coil pitch, cross-section shape and physical property parameters such as their kinds and concentrations on heat transfer and flow resistance were analyzed. The conclusions of experiments and simulations in laminar and turbulent flows were compared. Reference for structure optimization and working fluid selection of helical channel were provided, and the development directions of fluid flow and heat transfer characteristics in helical channel were also proposed.

helical channel, structure, working fluid, flow characteristics, heat transfer characteristics

doi: 10.1360/N972016-01134