文章编号：　1008-8857(2011)01-0050-05

扭带强化管内单相对流换热的研究进展

马晓英

（新疆通用锅炉制造有限公司，新疆　乌鲁木齐　830006）

摘　要：　能源与材料费用的不断增长推进了高效节能换热器的发展。在管壳式换热器中，为强化管内单相对流换热并有效清除污垢，制造工艺简单、拆装维修方便的管内插入物—扭带被广泛应用。介绍了多种扭带的结构和特点，分析了扭带强化管内单相对流换热的机理。从连续扭带、间隔扭带、异型扭带、清洗扭带和复合强化技术五个方面，对扭带强化管内单相对流换热的国内外研究现状进行了详细的分析与综述。

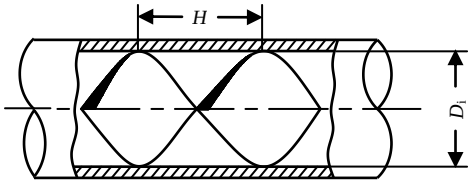
关键词：　管壳式换热器；强化换热；扭带；综述

中图分类号：　TK223　　文献标识码：　A

近年来，能源与材料费用的不断增长推进了高效节能换热器的发展。在各类换热器中，管壳式换热器仍然是应用最为广泛的换热器类型。为了强化管内单相对流换热并有效清除污垢，管内插入物常常是一种简单又经济的选择。扭带是应用最为广泛的管内插入物，其工业应用已有五十多年的历史，这可归因于其制造工艺简单、装拆维修方便且成本较低。虽然扭带具有阻力较大的缺点，但既强化换热又清洗污垢的特点使其仍在诸多换热领域具有优势。出于不同的目的，相关研究人员对传统扭带及新型扭带进行了大量的研究，本文就扭带强化管内单相对流换热的研究进行了回顾与展望。

1　扭带强化管内单相对流换热的机理分析

扭带结构如图 1 所示。扭带的扭转程度通常用扭率 y 表示，扭率定义为 $y=H/D_i$。



H–扭带节距; D_i–圆管内径

图 1　扭带结构示意图

Fig. 1　Schematic of twisted tape

收稿日期：2010-06-15

作者简介：马晓英(1971-)，女(回)，助理工程师，420244597@qq.com

扭带的强化换热机理主要体现在以下几个方面。

（1）旋转流

Smithberg 等[1]早在 20 世纪 70 年代之前已经提出轴向流动和强迫旋流叠加的流动模型，即扭带在管内的旋转流运动机理。管内由于扭带的插入使得流体的流动呈三维螺旋线形状，流体的旋转流动增加了流体的流动路径，加强了流动边界层的扰动，提高了接近管壁处的湍流强度，并促进了边界层流体和主流流体的混合，从而有效强化了单相对流换热过程。

（2）二次流

流体的旋转流动使流体质点受到离心力的作用，流体质点的切向流速在主流区随径向距离增大而增大，但近壁流体受壁面的黏性剪切力的影响，流体质点的切向流速随径向距离增大而降低，这样越靠近壁面的流体质点所受离心力越小，向离开壁面的方向移动，而离壁面稍远的流体质点因承受较大离心力向壁面方向移动，形成剪应力驱动二次流。在Smithberg等[1]观察空气和水湍流工况下旋涡流速度分布的实验研究中，验证了高热流密度或小扭率比下二次流的出现。

（3）离心浮力

由旋转流引起的离心浮力效应最早由Kreith[2]提出，之后Gambill和Bundy[3, 4]的研究开始在实验关联式中考虑其对换热的影响。Thorsen等[5]提出在管内旋流中因离心浮力的影响使换热在流体被加热时增强而被冷却时减弱，并在换热关联式中用$Gr^{0.5}/Re$（Gr为格鲁晓夫数，Re为雷诺数）作为考虑离心浮力影响的无量纲参数。

2　扭带强化管内单相对流换热的研究现状

2.1　连续扭带

连续扭带是管内插入扭带的最传统的布置方式，具有结构简单、安装方便的优势。对连续扭带的大量研究构成了开发新型扭带结构及改进扭带布置方式的基础。Smithberg 等[1]、Thorsen 等[5]在扭带管内旋流流动分析中定义了重要的旋流数 Sw（$Sw=Re/y$，其中 Re 为雷诺数，y 为扭率）以反映离心力对换热的影响，成为了扭带管内换热关联式发展的基础。继而，Lopina 和 Bergles[6]进一步发展了湍流状态下扭带管内的换热与阻力关联式。Manglik 和 Bergles[7]以水和乙二醇为换热工质对扭带进行了实验研究，通过分析认为扭带对管内流道的分割、插入物阻塞效应和二次流效应是引起换热和阻力增加的主要原因，并提出当流速较低、扭率较小及 Gr/Sw^2（表征浮力驱动对流效应和离心力驱动对流效应的比值）远大于 1 时浮力驱动的自然对流占主导地位，而 $Gr/Sw^2<1$ 时旋转流起主要作用。对于传统扭带，Manglik 和 Bergles [7]提出的换热与阻力计算关联式被广泛应用。Mazen 等[8]对传统扭带作了更为深入的研究，对 Bergles 等[7]所提出的阻力计算关联式进行了补充与修正。Sundar 等[9]对水和不同体积密度 Al_2O_3 纳米流体在扭带管中的换热与阻力特性进行了实验研究，结果表明在扭带管中 Al_2O_3 纳米流体的换热与阻力系数均高于水。

2.2　间隔扭带

传统的连续扭带的显著缺点就是管内流体流动阻力增大较多，尤其在湍流工况下。为了显著降低阻力，同时又使换热系数降低较少，提出了扭带在管内分段间隔布置的方式，本文称其为间隔扭带。在间隔扭带中，相邻短扭带之间采用金属细杆点焊连接。若定义相邻扭带元件之

间的净间距为Z，则相对净间距 $z=Z/D_i$(D_i 为圆管内径)。Saha等[10]对层流状态下间隔扭带管内流动与换热特性进行了实验研究，结果表明：当 z ≤7.5时间隔扭带的阻力系数大于连续扭带，当 z=10时其阻力系数小于连续扭带。Saha等[10]认为选择恰当的扭带间距 z，可使间隔扭带强化换热效果优于连续扭带，并根据实验结果提出了一系列间隔扭带的换热与阻力关联式。在换热管长度较短的场合，可只在换热管入口处布置扭带，此时管内流体流动为衰减性旋流，这种布置方式本文也将其归为间隔扭带。Eiamsa-ard等[11]对圆管入口段插入不同长度扭带的对流换热进行了实验研究。

2.3 异型扭带

对传统连续扭带的另一个研究方向是改进扭带结构。为了在强化换热的同时尽量减小管内插入扭带所引起的阻力增加，国内外许多学者提出了许多新型的扭带。为区别于传统的连续扭带，本文统称其为异型扭带。Rahimi 等[12]认为图 2~图 4 所示的异型扭带是低雷诺数下强化换热的高性能插入物；Eiamsa-ard 等[13]则在管内同时插入 2 根连续扭带，根据旋向不同分为同向流和异向流扭带，如图 5、图 6 所示。根据实验结果认为异向流扭带产生的异向旋涡流是一种有前景的强化换热方法。

图 2 穿孔扭带
Fig. 2 Perforated twisted tape

图 3 圆形缺口扭带
Fig. 3 Notched twisted tape

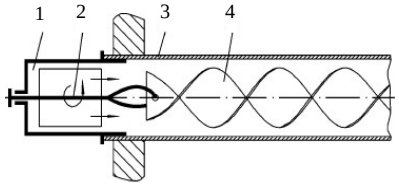
图 4 锯齿型扭带
Fig. 4 Serrated twisted tape

图5 同向流扭带
Fig. 5 Co-flow twisted tapes

图6 异向流扭带
Fig. 6 Counter-flow twisted tapes

2.4 清洗扭带

在静止扭带基础上开发的自转清洗扭带(图 7)具有在线自动清洗污垢和强化传热的双重功效。钱红卫等[14]对有、无自转清洗扭带的换热器的污垢粘附速率和管壁腐蚀速率进行了对比实验，结果表明自转清洗扭带的防垢、除垢、清洗效果较好，且塑料材质的扭带对管壁的额外磨损可以忽略。张琳等[15]比较了静止及旋转扭带换热管的换热与阻力特性。



1–管口轴承; 2–转轴; 3–换热管; 4–扭带

图 7 自转清洗扭带
Fig. 7 Self-rotating cleaning twisted tape

2.5 复合强化

在传统粗糙表面强化管中插入扭带的方法综合了旋流与粗糙管的强化换热机理，一般称其为复合强化换热技术。沈慧等[16]对内螺纹管内插入扭带的换热与阻力特性进行了实验研究，

结果表明当螺纹管的旋角和扭带旋向方向相反且接近直角时综合传热性能最好，此时与光管相比，在相同泵功耗和相同换热面积下换热量可提高83%~140%，在相同换热面积和换热量条件下泵功耗可减少80%~91%，在相同泵功耗和换热量条件下换热面积可减少58%~72%。

3　结语

扭带是应用最为广泛的管内插入物，大量应用于在役换热器改造以及层流、过渡流流体的强化换热领域。对传统连续扭带的结构与布置方式改进，均扩大了扭带的应用领域。清洗除垢功能是管内插入物所特有的功效，因而清洗扭带也是具有潜力的研究方向之一。国内在开发高效异型扭带方面研究较少，应加大相关的开发与研究力度。

参考文献:

[1] SMITHBERG E, LANDIS F. Friction and forced convection heat-transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators[J]. *J Heat Transfer, Trans ASME*, 1964, **86**(1): 39−49.

[2] KREITH F, MARGOLIS D. Heat transfer and friction in swirling turbulent flow[J]. *Applied Scientific Research, Section A*, 1959, **8**(6): 457−473.

[3] GAMBILL W R, BUNDY R D, WANSBROUGH R W. Heat transfer and pressure drop for water in swirl flow through tubes with twisted tapes[J]. *Chem Eng Prog Sym Ser*, 1961, **57**(32): 127−137.

[4] GAMBILL W R, BUNDY R D. High-flux heat transfer characteristics of pure ethylene glycol in axial and swirl flow[J]. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1963, **9**(1): 55−59.

[5] THORSEN R, LANDIS F. Friction and heat transfer characteristics in turbulent swirl flow subjected to large transverse temperature gradients[J]. *J Heat Transfer, Trans ASME*, 1968, **90**(1): 89−97.

[6] LOPINA F R, BERGLES A E. Heat transfer and pressure in tape-generated swirl flow of single-phase water[J]. *J Heat Transfer*, 1969, 91: 434−442.

[7] MANGLIK R M, BERGLES A E. Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part I—Laminar flows[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115: 881−889.

[8] MAZEN M, KHADER Abu. Further understanding of twisted tape effects as tube insert for heat transfer enhancement[J], *Heat Mass Transfer*, 2006, 43: 123−134.

[9] SUNDAR L S, SHARMA K V. Turbulent heat transfer and friction factor of Al_2O_3 nanofluid in circular tube with twisted tape inserts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 1409−1416.

[10] SAHA S K, DUTTA A, DHAL S K. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements[J]. *International Journal of heat and mass transfer*, 2001, 44: 4211−4223.

[11] EIAMSA-ARD S, THIANPONG C, EIAMSA-ARD P, et al. Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36: 365−371.

[12] RAHIM M, SHABANIAN S R, ALSAIRAFI A A. Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2009, 48: 762−770.

[13] EIAMSA-ARD S, THIANPONG C, EIAMSA-ARD P. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34: 53–62.

[14] 钱红卫, 张 琳, 龚 莉, 等. 换热器自转清洗纽带自动阻垢技术的试验研究[J]. **石油机械**, 2005, **33**(7): 4−9.

[15] 张 琳, 钱红卫, 宣益民, 等. 内置扭带换热管三维流动与传热数值模拟[J]. **机械工程学报**, 2005, **41**(7): 66−70.

[16] 沈 慧, 周强泰. 扭带插入螺纹管复合强化传热实验研究[J]. **发电设备**, 1997, **11**(4): 28−31.

Advances in the convective heat transfer enhancement of single-phase flow in tubes with twisted tapes

MA Xiao-ying

(Xinjiang Tongyong Boiler Co., Ltd., Wulumuqi 830006, China)

Abstract: The increasing costs of energy and materials advance the technical progress in high-efficiency heat exchangers. Due to the Conveniences of manufacture and maintainability, twisted tapes have been widely applied to tube-shell heat exchangers as a type of tube insert elemet, to reduce fouling and enhance convective heat transfer in single-phase flow. The structures and characteristics of multiform twisted tapes were introduced in this paper. And the mechanisms of single-phase heat transfer enhancement of twisted tapes were analyzed. Furthermore, a comprehensive review and analysis of relative studies at home and abroad for recent years were performed in terms of continuous twisted tapes, separated layouts twisted tapes, profiled twisted tapes, scale-cleaning twisted tapes and composite enhancement techniques.

Key Words: tube and shell heat exchanger; heat transfer enhancement; twisted tape; review

奥地利连续两年未达减排目标

奥地利环境部长贝尔拉科维奇 2011 年 1 月 12 日承认，2010 年奥地利依然达不到《京都议定书》规定的减排标准。这将是奥地利连续第二年没有达到减排目标。

贝尔拉科维奇表示，2009 年奥地利排放二氧化碳 8 010 万 t，虽然比 2008 年减少 680 万 t，但明显超过规定的 6 880 万 t 的排放量，而 2010 年的减排结果更不容乐观。他承认，目前在奥地利，交通和工业排放居高不下仍是奥地利实现减排目标的最大障碍。虽然这两个部门的二氧化碳排放量都在降低，但仍然没有达到要求

国内最大并网聚光光伏电站落成

一座 200 kW 高倍聚光光伏示范电站于 2011 年 1 月 15 日落成。该电站是目前国内已实际投入并网运行的规模最大的高倍聚光光伏电站。该示范电站的业主青岛哈工太阳能股份有限公司计划于 2011 年 12 月将建成 7 MW 的高倍聚光光伏电站。

聚光光伏(CPV)是目前光电转换效率最高的光伏发电技术，其电池效率为 40%，组件效率为 28%，系统效率为 25%。相比较常见的晶体硅平板太阳能电池 15%的效率，聚光光伏是可能最先将光伏发电成本降到煤电成本水平上的太阳能光伏技术。高倍聚光光伏发电技术在国内才起步，而在欧美聚光光伏已逐步成为主流技术，尤其是 2010 年以来，高倍聚光光伏已获得数个 10 MW 及以上级别的光伏电站项目。 (尹 航)