

管壳式换热器节能技术研究

潘文厚, 杨启明

(西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:根据国内外换热器节能技术研究现状,着重介绍了换热器强化传热技术。从换热器的管程和壳程 2 方面介绍了管壳式换热器强化传热技术的传热机理及其应用范围,进一步分析了各种强化传热技术的优缺点。同时,根据近期的研究成果,提出了部分改进措施和思路。最后总结了研究中需要注意的问题,并指出国内外近期开发研究的发展方向。

关键词:节能;管壳式换热器;强化传热;管程;壳程

中图分类号:TF066.21

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2007)10-0050-04

Research on energy-saving technology for shell-and-tube heat exchanger

PAN Wen-hou, YANG Qi-ming

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The present status of energy-saving technology for heat exchanger at home and abroad is introduced, the strengthened heat transfer technique for heat exchanger is mainly presented. The mechanism of strengthened heat transfer technique of heat exchanger and application conditions through both tube side and shell side are presented, and the merits and shortcomings are analyzed. According to the recent research achievements, some improving measures are put forward. Finally, the question which needs to be paid attention in the research is summarized and the direction of study at home and abroad in a recent period is put forward.

Key words: energy-saving; shell-and-tube heat exchanger; strengthened heat transfer; tube side; shell side

换热器在化工、石油、动力等高能耗产业部门中有着广泛的应用。近几十年来,能源的紧缺有力地促进了换热器节能技术的发展。国内外研究者对换热器节能技术做了大量研究,并取得了丰硕的成果。目前,在各种换热器节能技术中,强化传热技术是应用较广泛的一种技术。强化传热主要有 2 种途径:提高传热系数、增大传热面积。当前,对换热器强化传热技术的研究主要基于这 2 点展开。

管壳式换热器是目前应用最广泛的一类换热器(约占 70%),其理论研究和设计技术比较完善,运行可靠。对管壳式换热器的节能研究集中在对管程和壳程强化传热 2 方面。

1 管程节能技术分析研究

管壳式换热器管程的强化传热技术,主要通过改变传热面的形貌或管内插入物来增加流体湍流度、扩展传热面积,从而实现强化传热,达到节能的目的。

1.1 带内凸肋结构管

这类元件管壁上具有内凸肋结构,当前应用较

广的是螺旋槽管和横纹管,如图 1 和图 2 所示。

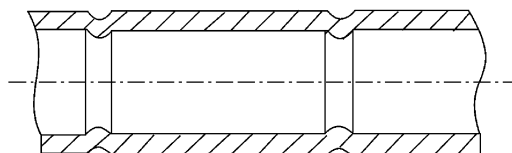


图 1 横纹管

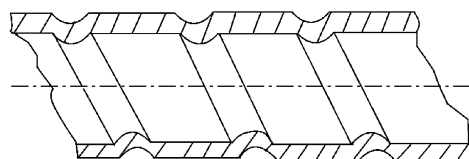


图 2 螺旋槽管

螺旋槽管管壁是由光管挤压而成,管壁上的槽纹能在有相变和无相变的传热中明显提高管内外的传热系数。螺旋槽使冷凝液膜产生附加的表面张力场,使平均冷凝液膜减薄,减少了冷凝传热热阻。横纹管用普通圆管作毛坯,在管外壁滚轧出与轴线垂直的凹槽,同时在管内形成一圈突起的环肋。当管内流体流经横向环肋时,管壁附近形成轴向漩涡,

收稿日期:2007-06-14

基金项目:中地共建“石油天然气装备”教育部重点实验室(西南石油大学)资助(2006ST04)

作者简介:潘文厚(1979-),男,硕士生,panwenhou@163.com,028-83030555;杨启明(1948-),男,大学,教授,博士生导师,从事机械设计研究和过程装备与控制工程教学科研工作,yqm2795@163.com。

增加了边界层的扰动,使边界层分离,有利于热量的传递。当漩涡将要消失时,流体又经过另一个横向环肋。因此不断产生涡流,保持了稳定的强化传热作用,以上就是带内凸肋结构管换热器的传热机理。带内凸肋结构管具有双面强化传热的作用,适用于对流、沸腾和冷凝等工况。研究发现^[1-2]:在相同流速下,横纹管与单头螺旋纹管比较,流体阻力稍大,但传热性能好,二者的应用场合相同。

1.2 内翅片管

内翅片管是通过特殊的焊接工艺和设备加工而成,流体在管内的换热过程为单相强制对流换热,其主要特点是通过在传热管管内扩大传热面积、强化管内传热的途径来提高换热器的传热性能。研究表明,相对光管而言,内翅片管改变了其内部流场及温度场的分布情况,产生了有利于强化换热的涡流,相应增加了其流场的湍动能,提高了换热壁面附近的温度梯度,强化了传热。内翅片管用于强化管内单向流体的传热。

内翅片管的加工以焊接为主,翅片的加工、焊接对于换热有很大的影响。这是因为内翅片与管壁之间存在着接触热阻,二者接触良好时则换热效果好,这在流体高雷诺数时更加明显。同时,因为翅片的存在,使得换热管难以清洗。

1.3 管内插入物

管内插入物是被动强化传热形式的一种。在低雷诺数或高黏度流体传热工况下,管内插件对强化气体、低雷诺数流体或高黏度流体的传热会起到较好的效果。管内插件的形式可大致分为3类:强化旋流,如纽带和半纽带形式;促进湍流,如螺旋线、片条、斜环片等形式;置换型强化器,包括静态混合器、交叉锯齿带、球形体等形式。其传热机理为^[3-5]:①形成旋转流;②破坏边界层;③中心流体与管壁流体产生置换作用;④产生二次流。

1998年,英国开发出1种花环式金属丝翅片插入物,在不增大压降的情况下,增强流体湍流,提高了传热性能。此外,与正常流速相比,这种插入物可使换热管的防垢能力提高8~10倍。

管内插入物种类繁多,结构复杂,适用的条件比较严格,只有根据具体工况选择特定的插入物,才会得到很好的传热效果。以纽带插入物为例,它能有效地促进管中心到管壁的流体混合,因而,在层流及过度流情况下强化传热较为有利。在湍流情况下,流体传热阻力主要集中在近管壁处较薄的传热层流底层中,因此不宜采用纽带来强化传热。

1.4 缩放管

缩放管是由依次交替的多节渐缩段和渐扩段构成,如图3所示。

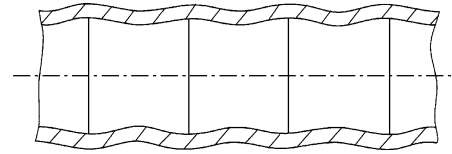


图3 缩放管

其传热机理为:缩放管通过壁面缩放,使流体压力发生周期性变化,产生的剧烈的漩涡冲刷流体边界层,使其减薄,壁面缩放还促进了流动黏性底层之外与传热黏性底层内的流体速度场与温度梯度的协同,增加了传热系数。缩放管可强化管内外单相流体的传热,在同等流阻损失下,流体雷诺数为 $(1 \sim 10) \times 10^5$ 时,传热量比光管增加了70%^[3]。

研究表明,缩放管收缩段的平均换热能力比较大,扩张段的局部换热系数呈下降趋势,其原因是在扩张减速段的流体流动有弱化传热的作用,而在收缩加速段的流体有强化传热的作用,现有缩放管结构中扩张段与收缩段的长度在总肋间距中各占一半,因扩张段所占比例较大,故流体流动对传热的弱化作用明显,使总的传热效率不够理想。为了优化其结构,可以增加收缩段所占比例,相应减少了扩张段的长度,并在缩放连接处采用平直链面连接方式,以减小流体阻力。

1.5 螺旋扁管

螺旋扁管是瑞士 Allares 公司首先提出,由美国 Brown 公司经过改进的一种换热管^[4]。由于管子的独特结构,流体在管内处于螺旋流动,促进湍流程度。此换热器比常规换热器总传热系数高40%,而压力降则几乎相等。此换热器可用于气-气、液-液以及气-液换热过程,具有压降小,传热效率高,不易结垢,易清洗,无折流板,无震动,成本低等优点,在石油化工行业中具有广阔的应用前景。

螺旋扁管换热器可应用于单相、沸腾和冷凝等各种工况,其加工工艺稍显复杂。

1.6 三维内肋管

三维内肋管是通过专用的工具经过一定的方法对普通圆管内壁加工而成的具有局部强化传热元件(图4)。其传热机理有5点^[5]:①扩大了换热面积;②每个肋都是扰动源,因而增加流体流动的紊动度;③流体在肋间的近壁面加速,减薄了热边界层厚度;④流体横向冲刷三维肋,流体与肋的换热系数增大;

⑤ 流体在管内做周期性振动。

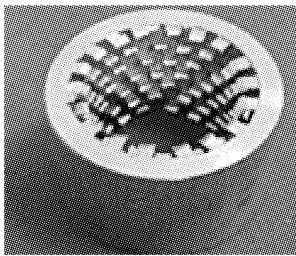


图 4 三维内肋管

重庆建筑工程大学廖光亚教授通过试验证明：对于空气的管内换热，三维内肋管最高可达相同工况下光管换热的 5.8 倍，而对高普朗特数 (Pr) 的流体，其强化换热倍数可达更高值。就管内的凝结换热和沸腾换热而言，其换热倍数也分别是相同工况下光管的 3~5 倍和 2~5 倍^[6]。

三维内肋管加工工艺比较复杂，通过专用机床在光管内壁挤压出许多独立的齿状肋片。三维内肋管和内翅片管一样，存在清洗困难的缺点。

2 壳程节能技术分析研究

强化换热器壳程传热的方法包括改变传热管外表面结构(强化管外传热)和管间支撑结构。

2.1 管外传热强化

传热管外表面的改变主要是在其外表面上加工出沟槽和多孔表面等。

2.1.1 外表面带沟槽传热管

外表面有沟槽的传热管主要包括螺旋槽管和横纹管。二者对强化管外蒸汽冷凝效果明显，主要传热机理为：沟槽使液膜和气膜层产生旋流，破坏了气膜层的稳定；同时，冷凝液在槽内由于重力分力和表面张力作用以及在气液相界面剪切力的作用下使冷凝液迅速流向沟槽，从而减薄了液膜的边界层厚度。

由于这种换热管的沟槽都是挤压而成，其外表面槽底部应力值很大，随着槽深增加，应力集中更严重。这种换热管在工作环境下有可能因应力集中引发断裂失效。为了避免这种情况发生，在设计中，应精确确定其结构尺寸(如槽深)，并进行拉伸、弯曲及疲劳强度试验，以确保设计的可靠性。

2.1.2 表面多孔管

根据加工方法，表面多孔管分为烧结多孔表面管、化学腐蚀加工多孔表面管、机械加工多孔表面管等几种。多孔表面管表面粗糙，形成多孔的隧道，增加了气化核心，易于生成泡核沸腾，有利于沸腾时强烈的对流给热。北京化工大学曾用丙酮作介质，测

定了其在以烧结法制成的表面多孔管上沸腾时的给热系数，约为光滑管的 7~8 倍。

表面多孔管有一定的缺陷：化学腐蚀法制造的多孔表面管其传热性能可得到明显强化，但是多孔层中的金属极易被氧化，从而使微孔堵塞或掩盖，使用寿命较短。而机械加工方法虽然可以大量生产多孔管，但是它无法加工很小的孔隙，因而对其传热性能的提高有限。相对而言，烧结法加工的换热管综合性能好得多。

2.2 管间支撑结构

2.2.1 异形折流板

管壳式换热器采用传统单弓形折流板，壳程流体易产生流动死角，传热面积不能充分利用，易结垢，流体阻力大。研究人员发现，通过改变折流板的结构形式和布置方式，可以改变换热器壳程流体的流动速度和方式，减少壳程易结垢的死角，从而提高传热效率。最常见的异形折流板有双弓形折流板、螺旋折流板等。

双弓形折流板包括 A 型(双弓形折流板)和 B 型(中心折流板)2 种。双弓形折流板沿管束长度方向交错布置，在换热器壳侧将流体分成 2 股平行束，横向流动的长度(即横流经过的列管数)大致为具有同样缺口的单弓形折流板的一半，与具有相同折流板间距和缺口的单弓形折流板相比，双弓形折流板的压降下降 50%~70%，而传热系数仅下降了 20%~40%^[7]。

螺旋折流板是将传统的弓形板换成螺旋状或近似螺旋状的折流板，折流板与换热器壳体横断面有一个倾斜角度，使得流体在壳程沿螺旋通道流动。这样减少了管板与壳体之间易结垢的死角，能防止结垢，换热器的螺旋折流板使流体在壳侧呈连续柱塞状螺旋流动(即 plug 流)，不会出现传统折流板换热器内的流动死区。由于旋流产生的涡流与管束传热界面边界层相互作用，使湍流度大幅度增强，有利于提高壳侧传热系数。

螺旋折流板有一定的缺点，螺旋折流板和定距管的加工较困难，需要专用的加工胎具。通常将折流板分成 4 块，形成螺旋流道。分块螺旋折流板虽然容易制造，但壳程相邻折流板间存在三角死区，流体流向仍为横纵向混合流，降低了传热效果。虽然加工困难，但螺旋折流板的发展方向应该是整体式，这样会使其综合性能提升明显。

2.2.2 杆式支撑结构

杆式支撑结构的开发最初是为了解决折流板

换热器因流体横向冲刷引起的振动破坏问题。折流杆支撑结构由折流栅和支承杆组成,如图5所示。

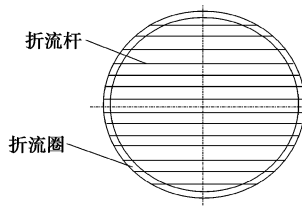


图5 折流栅

折流栅是由在一圆环(折流圈)上焊接一定数量的圆杆(折流杆)构成,折流栅上的折流杆交错穿插于管子之间,折流杆的直径约等于相邻管子之间的间隙,管子被折流杆紧紧夹住。由于折流杆换热器壳程流体为纵向流动,基本不存在流动死区。另外,流体流过折流杆后在其两侧交替产生和脱离旋涡,而且流体流过折流栅时流通截面缩小,之后又扩大,从而产生文丘里效应。由于漩涡和文丘里效应的作用,使流体对管壁形成强烈的冲刷,从而减薄了传热边界层,强化了壳程传热^[7]。折流杆换热器可应用于单相、沸腾和冷凝等各种工况。

折流杆换热器传热系数大、流体阻力小、抗振性能好、设备结构紧凑。折流杆换热器的弱点就在于它制造方面的困难,这种换热器中折流圈很多,而且折流圈上有很多折流杆,制造折流圈和布置折流杆在工艺上都是有困难的。

2.2.3 空心环支撑结构

空心环管壳式换热器是将小直径金属短管(即空心环)以一定间隔布置在换热管束同一截面上,以替代折流栅(图6),从而支撑管束并促进流体扰动。

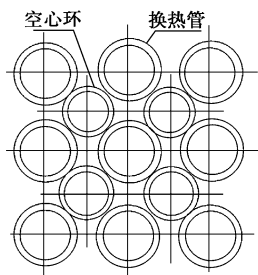


图6 空心环

空心环支撑往往与强化管组合使用,如缩放管、低肋管、花瓣管等,强化流体纵向冲刷时的对流换热。空心环换热器壳侧空隙率大、压降小,可使壳侧流体的大部分输送功作用在强化管的粗糙表面上来,促进近壁流体湍流,降低传热热阻,达到强化传热的目的。

空心环支撑的扰流作用不如折流杆支撑,而且管束固定工艺相对较复杂。

2.2.4 管子自支撑结构

近年来开发出的自支撑管,不仅简化了管束支撑,而且提高了换热器的紧凑度,如刺孔膜片管、螺旋扁管和变截面管等。这类管靠管自身的一部分如刺孔膜片、螺旋线或变径部分的点接触来支撑管子,同时又组成壳程的扰流元件,增大了流体自身的湍流度,破坏了管壁上的流体边界层,从而使壳程传热进一步增强。

3 结语

(1)目前,以采用强化传热元件和改进换热器结构为主的强化传热技术是一种能显著改善换热器热性能的节能技术。

(2)强化传热技术的研究大多属于经验或半经验性的,往往是依据各自的经验与分析,设计出不同的强化换热元件,然后,利用实验研究的方法,给出实验关联式或准则关系式,存在的根本问题是在传热得到强化的同时,流动阻力也随之增加。通常情况下,流动阻力的相对增加量要大于换热的相对增加量。因此,在增加传热系数的同时,应注意控制流体阻力的增加。

(3)根据传热物流条件的不同情况,壳程传热强化的研究必然与强化传热管的优化组合相联系,这是今后换热器强化传热技术发展的方向。同时,新技术、新方法的应用,如流体数值计算法(CFD)、电场强化传热技术、流体添加纳米粒子技术等把换热器强化传热理论研究和新技术开发方面带入了更高层次的探索阶段。

参考文献

- [1] 李军.多种强化传热管的强化传热性能与流阻性能研究[D].广州:华南理工大学,2000.
- [2] 吴慧英,帅志明,周强泰.凝结换热器采用螺旋槽管的强化传热研究[J].化工学报,1997(6):626-629.
- [3] 陈颖,邓先和.强化缩放管内湍流对流换热[J].化工学报,2004,55(9):1528-1531.
- [4] 崔海亭,姚仲鹏,王瑞君.强化型管壳式热交换器的研究现状及发展[J].化工机械,1999,26(3):168-170.
- [5] 李清方.三维内肋管在水套炉上的应用[J].石油规划设计,2004,15(6):38-39.
- [6] Mukherjee Rajiv. Effectively design shell-and-tube heat exchanger[J]. Chemical Engineering Progress, 1998, 94(2): 21-37.
- [7] 江楠,易宏,甄亮,等.管壳式换热器壳程强化传热研究进展[J].化肥工业,1998,25(6):27-32. ■