

导孔型板壳式换热器的研究与展望

刘家瑞¹, 赵巍¹, 黄晓东², 张华¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 东莞埃欧热能技术有限公司, 广东 东莞 523053)

摘要: 本研究以导孔型板壳式换热器为对象, 在综述国内外研究成果的基础上, 详细论述了板壳式换热器的结构及其工作原理、板程与壳程的选择以及传热计算和压降计算的相关理论, 提供了热力计算的具体步骤和相关公式, 指出在设计计算过程中需要注意板片选型、污垢系数取值和误差控制等问题; 介绍了板壳式换热器的性能测试方法、传热准则关系式的求解方法, 总结了板片结构参数对流动与传热的影响, 并分析了壳程入口处存在的物流分配不均匀现象; 最后, 对板壳式换热器的发展前景加以展望, 指出一体化设计、成套化组装和集中智能控制将是板壳式换热器发展的重点方向。

关键词: 板壳式换热器; 板片结构; 传热准则关系式; 物流分配; 研究与展望

中图分类号: TK172 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.001

引言

20世纪70、80年代开始欧美等发达国家就已经开始竞相开发和研制各种形式的板壳式换热器。以法国 Barriquand 公司研制的一种新型换热器为开端, 板壳式换热器开始被世人所知^[1-3]。国内研究起步较晚, 直至20世纪90年代才由中国石化北京设计院与兰州石油机械研究所共同研制开发了大型板壳式换热器^[4]。

板壳式换热器是在板式换热器与管壳式换热器的基础上发展而来的一种新型高效换热设备, 最初形式的板壳式换热器可以称为板管型板壳式换热器, 主要由板管束和壳体两部分组成, 将板条焊接成包含扁平流道的板管, 板管相互连接形成板管束, 这种换热器的端面一般为圆形, 也可设计成四边形和六边形等。和板管型换热器不同, 导孔型板壳式换

热器是现在行业中应用的主要形式^[2]。

本研究对导孔板壳式换热器(以下简称板壳式换热器)的结构特点和工作原理进行详细介绍, 结合相关研究来叙述热力计算过程及其注意事项, 并对板壳式换热器的研究与发展方向做进一步展望。

1 板壳式换热器结构

文献[5~6]介绍的一种导孔型板壳式换热器, 其结构如图1所示, 板壳式换热器的核心部分是板束, 板束由若干结构相同的板片并联后焊接而成, 该换热器所用板片是一种圆形波纹板片, 板片两侧有两个导孔, 相邻板片翻转后将外圆边缘焊接形成芯体, 芯体间由导孔内圆边缘焊接, 焊接位置如图2所示。板束由密封胶条封住板间空隙, 预留壳程入口后用阻流板包裹并焊接, 板束两侧分别用两块薄板压紧, 起到防止介质泄露的作用, 即图1所示的首板和尾板。板束放置在圆柱状筒体内, 在壳程阻流板与筒体间的通道两侧焊接导流块, 既能够起到固定板束的作用, 又能够引导介质的流向^[7]。根据流程不同需要改变流体流动方向时, 通常在板间设置折流板。

文献[7~8]总结了板壳式换热器的流动方式, 图3为板壳式换热器的流动示意图, 波纹板片导孔焊接后形成板程流动通道, 而每两片波纹板片间形成流道, 冷、热流体由板程入口接管流入导孔通道后分布到各个板间流道。壳程通道由板束与筒体间所夹的空间形成, 并通过导流块约束范围, 壳程流体通过入口接管流入通道内后, 绕过板程导孔流入流道内。冷、热流体分别在相邻流道内流动, 互不干涉,

收稿日期: 2015-03-24; 修订日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176124)

作者简介: 刘家瑞(1991-), 男, 江苏连云港人, 上海理工大学硕士研究生。

通过板片进行热量交换。

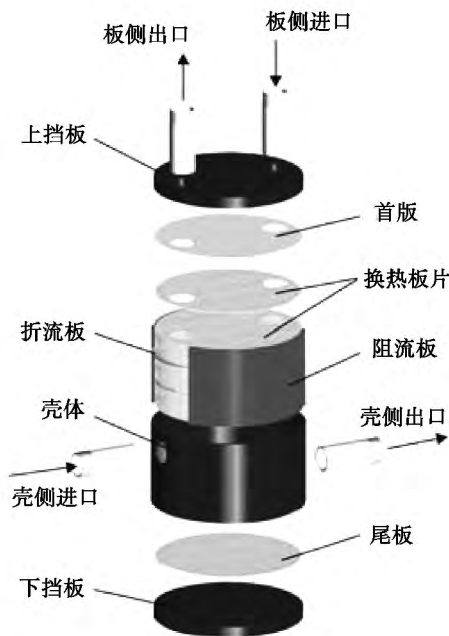


图 1 板壳式换热器分解图

Fig. 1 Exploded view of the plate and shell type heat exchanger

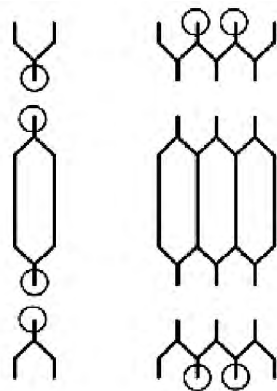


图 2 板片焊接处示意图

Fig. 2 Schematic drawing of locations welded together between plates

文献[9~10]分析指出,由于板片凹凸波纹的存在,板片间相互接触形成触点,触点的存在使流体在流道内发生周期性强烈扰动,流体在网状流道中不断改变流动方向,在较低流速下就能够达到湍流状态,实现对流换热。文献[11]则分析认为,通过增大流体的湍流强度来减薄层流底层厚度,可以提高流体的换热程度,达到强化传热的目的。

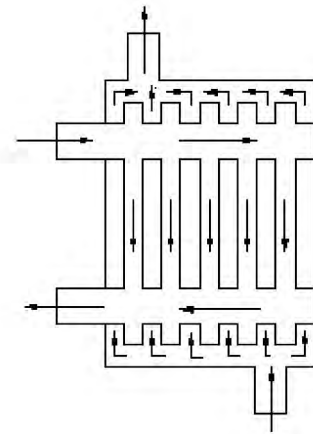


图 3 板壳式换热器流动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the flow inside a plate and shell type heat exchanger

2 板壳式换热器的优点

2.1 与板式换热器的比较

文献[6]将板壳式与板式换热器相比较,在流动与传热方面,板壳式换热器的传热系数比板式换热器高出1倍以上;板壳式换热器的壳程通道不占用板束空间,因而流动方式比较灵活,可实现对流传热和液膜传热;板壳式换热器仅板程设有导孔,壳程不受尺寸限制,可以应用于两侧流量差异较大的场合。在结构方面,板壳式换热器无需密封垫圈,直接通过焊接密封,其安全可靠性能较高,并且在使用温度、压力以及密封性能方面优势明显;文献[12]提出将圆形板片通过外圆环焊接,使板片所受应力分布更为均匀,避免了应力集中;波纹板片相互接触形成板束,比板式换热器具有更强的抵御热冲击和压力冲击的能力。

2.2 与管壳式换热器的比较

将板壳式换热器与管壳式换热器相比较,板壳式换热器具有明显优越性。在流动与传热方面,文献[1]指出波纹板片具有“静搅拌”作用,能使流体在低雷诺数下形成湍流流动,波纹板片的传热效率是光管传热效率的2~3倍,并且污垢热阻仅为管壳式污垢热阻的1/4~1/5,易于维护和清理;由于板壳式换热器可以实现“纯逆流”,因此其端部温差小,可降低到管壳式换热器的1/2,可回收热量多,可以节约运行费用。在压降方面,文献[13]认为同

等换热面积下,板壳式换热器的流通面积可达管壳式换热器的5倍,而压降仅为其1/3~1/2。在结构方面,板壳式换热器具有结构紧凑的特点,占地面积仅为管壳式换热器的45%~60%,可大大节约空间和成本。文献[14]还提出板壳式换热器不存在振动疲劳损坏问题,并且板束与筒体并不直接焊接,板束承受热膨胀的能力得到了提高,而且采用的不锈钢等材料耐腐蚀性更强,使用寿命更长。

2.3 综合比较

文献[15]通过分析比较3种换热器指出,板壳式换热器的板束直接封装在压力筒体中,其安全可靠性能较高,除了压力容器设计等级有所规定外,其使用压力并没有明确的限制。文献[7]则系统地给出了3种换热器的特征比较,如表1所示。

表1 换热器特征比较

Tab. 1 Comparison of the characteristics of the heat exchanger

名称	板壳式	板式	管壳式
最大操作温度/℃	>250	<250	>250
最大操作压力/MPa	>10.0	<2.5	>10.0
应用	液/液	液/液	液/液
	汽/液	汽/液	汽/液
	汽/汽	—	汽/汽
传热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$	200~5 000	3 000~5 000	50~1 500
最小对数平均温差/℃	1	1	>5

板壳式换热器已经在制冷、化工、石油和制药等众多行业中应用^[16],并替代了传统的换热器,取得了良好的使用效果。

文献[1]介绍了 30×10^4 t/a连续重整装置进料换热器,对比得出所用板壳式换热器每年节约燃料费用28万元,节约空冷器设备费用36万元,节约空冷器电费18万元,对比的结果表明,板壳式换热器在经济上远远优于管壳式换热器。

文献[4]介绍了我国首台应用于歧化装置中的板壳式换热器,这种板壳式换热器与管壳式换热器相比换热面积减小50%,传热系数提高206.7%,回收热量提高3.05%,满足了歧化装置的要求,并且节能效果和经济效果显著,估算每年节约燃料1 847.6 t,节省总投资超过亿元。

文献[18~19]将板壳式换热器应用于溴化锂吸收式制冷机来替代管壳式换热器,可以使机组重

量和体积下降30%左右,采用钛板等高温耐腐蚀材料,很好的解决了溴化锂高温耐腐蚀性问题。这种换热器在三效和双效机组中均可应用,还可以作为废弃余热制冷用发生器和降低烟气排放温度的溶液预热器。

4 板壳式换热器的热力计算

4.1 流程组合

流程可以分为单流程和多流程,对于液相介质来说可选择1~5流程,但是对于相变介质来说多数情况下流程为1^[20]。

4.2 板程与壳程

板程与壳程的差异体现在流入通道的不同,这种差异对于单相介质来说几乎没有影响,冷、热流体既可以在板程流动也可以在壳程流动,当然若考虑到承受温度的能力,一般热流体走板程。文献[21]对于涉及相变介质时提出以下几种情况:用作冷凝器时,冷凝介质通常选择壳程,在流速不大的情况下也可以选择板程;用为满液式蒸发器时,壳程必定流入的是蒸发介质;用为干式蒸发器时,制冷剂流入板程,而被冷却介质则在壳程流动;当用液相介质冷却气相介质时,气相介质位于壳程,液相介质位于板程。

4.3 传热计算

传热计算的核心内容是计算传热系数 K ,而关键环节却是确定传热准则方程式,传热准则式的准确与否直接影响传热面积的合理性^[22]。文献[23]通过对板壳式换热器进行实验研究,用板式换热器的热力计算方法进行计算,并拟合出传热准则关系式,证明了板式换热器的热力计算适用于板壳式换热器,湍流流动时基本传热准则方程式仍然适用。

$$Nu = CRe^n Pr^m \quad (1)$$

4.4 压降计算

文献[24]研究发现,压降主要来自于摩擦力,以及导孔压降等,无相变板壳式换热器压降的计算由欧拉数与雷诺数间的关系给出:

$$\Delta P = \rho \omega^2 Eu \quad (2)$$

$$Eu = bRe^d \quad (3)$$

式中: b 、 d —未知参数; ρ —介质密度, kg/m^3 ; ω —流速, m/s 。文献[25]认为,对于凝结换热和蒸发换热等有相变的情况,因为影响因素较多的缘故,各种

压降关系式都不具有普遍性。

在求流速时需要计算单流道截面积,由于板片为圆形,流道的截面不规则,因而引入平均弦长 l :

$$l = \frac{\pi b[(R - h)^2 - 2r^2]}{2(R - h)} \quad (4)$$

式中: b —波纹深度, μm ; R —板片半径, μm ; h —外缘密封部分高度, μm ; r —导孔半径, μm 。

4.5 热力计算过程

热力计算主要是确定流程数和流道数以及传热面积,板壳式换热器的热力计算是一个需要反复迭代的过程,热力计算流程如图 4 表示。

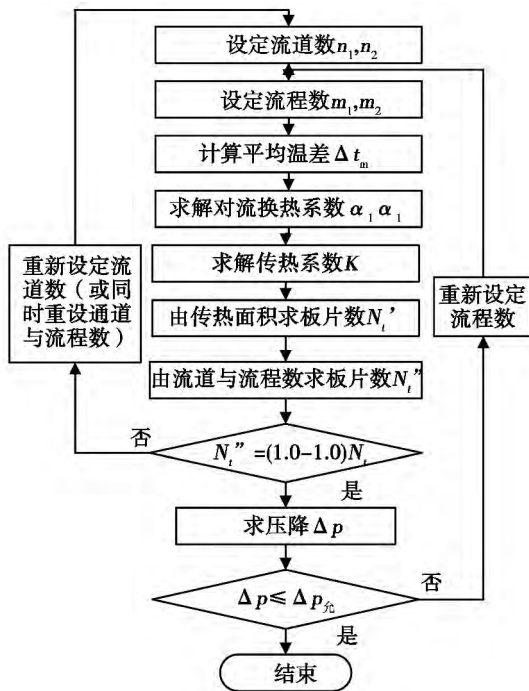


图 4 热力计算流程图

Fig. 4 Flow chart for thermodynamic calculation

图中: $N_t' = \frac{F}{F_p} + 2$, F —所需要的传热面积, $F = \frac{Q}{K\Delta t_m}$ m^2 ; F_p —单片板有效传热面积, $N_t'' = m_1n_1 + m_2n_2 + 1$; $\Delta P_{允}$ —允许的最大压降, Pa 。

4.6 热力计算注意的问题

4.6.1 板片选型

板片的选型关系到热力计算中流速、压降等参数,并直接影响换热的效率和成本。文献 [26] 提出板片型号应根据实际需要选定,板片型号较大时,虽然换热面积较大,压降较小,但是成本较高;板片型号较小时,导致板片的数量增加,压降增大。

4.6.2 误差控制

对于误差,设计计算过程中各种参数相互联系,误差会逐步积累,最终导致结果与实际差距过大,所以准确计算各参数以减小误差,对于设计计算有重要意义。以 APS257 型板壳式换热器水-水换热为例,如图 5 所示,给板片数为 50 的换热器增加一对板片所提高的换热量是为板片数 450 的换热器增加一对板片所换提高的换热量的 20~30 倍。

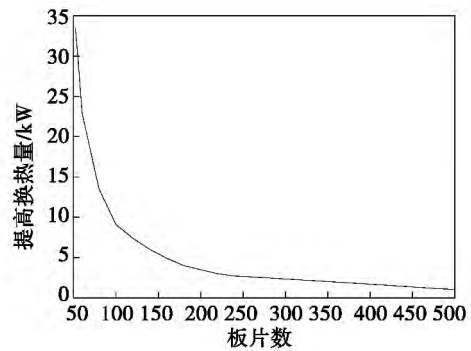


图 5 板片数与提高换热量关系图

Fig. 5 Chart showing the relationship between the number of plates and the heat quantity enhanced

对于压降,合理条件下适当提高计算时的允许压降,并不会使流动受到大的干扰,却能够使换热面积大大降低,降低动力消耗和节约成本。以 APS257 为例,允许压降增大 20 kPa,换热面积减少 20%,且当流量越大、换热量越大时,这种变化就越明显。

对于污垢系数,污垢影响流体的传热、传质以及流动,随着污垢在板片表面的积聚,流道截面积减小,压降增大。污垢系数取值的合理性,会对传热系数有着较大影响。从式 (2) 不难发现,当对流换热系数一定,污垢系数越大, K 值越大,所需换热面积就越大,成本就会越大,当对流换热系数很大时,污垢系数便成为影响 K 的主要参数,污垢系数增大 1 倍,换热面积也需要增大 1 倍,因此合理控制污垢系数的选取便尤为重要 [27]。

5 传热准则关系式的研究

5.1 板壳式换热器的测试方法

通过实验来求取传热准则关系式是最为可靠的研究手段,换热器的测试方法很多,如雷诺数法、威尔逊法和等流速法等。等雷诺数法需要测试时保

证冷热流体的雷诺数相同^[28],但是流速与温度相互制约,需反复调节,难以应用于板壳式换热器;威尔逊图解法要求的已知条件及其它附加条较多^[29],且对实验数据的要求精度也比较高,计算量相对较大,具有较大的局限性;文献[30]提出的等流速法,只需要控制流体的流速而不需要考虑流体温度变化,可满足板壳式换热器的测试条件;文献[31]利用等流速法对板壳式换热器进行了测试,并拟合了相关传热准则方程式,证明了等流速法的适用性。

等流速就是控制冷流体和热流体的流速相同,即 $V_1 = V_2 = V$,由式(2)~式(4)可得:

$$CV^n = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{\delta}{\lambda} - r} \times \left[\frac{1}{\left(\frac{d}{v_1}\right)^n \left(\frac{\lambda_1}{d}\right) Pr_1^{0.3}} + \frac{1}{\left(\frac{d}{v_2}\right)^n \left(\frac{\lambda_2}{d}\right) Pr_2^{0.3}} \right] \quad (5)$$

式中: v_1 、 v_2 —热、冷流体的运动黏度。等式两边同时取对数,并将等式右侧设为 P ,则可得到线性方程式: $\ln P = \ln C + n \ln V$,通过不同流速下采集的数据通过线性回归可以得到 C 与 n 的值。

5.2 传热准则关系式的求解

由于未知板型,传热准则关系式存在3个未知参数 C 、 m 、 n ,无法同时求解,所以,先假设普朗特数指数 m 为经验值0.3,对换热器测试以获取实验数据,先求出系数 C 与雷诺数指数 n ,在 n 确定情况下,拟合对流换热系数与普朗特数的关系式即可得到出不同定性温度下 C 与 m 的值。

文献[31]通过实验研究一种类型的板壳式换热器发现利用板式换热器的经验值拟合得到的传热准则关系式在不同定性温度下并不相同,即不能将板式换热器经验值应用于板壳式换热器,1/1流程组合板壳式换热器冷热流体的传热准则关系式的参数均为定值:系数 $C = 0.1825$ 、雷诺数指数 $n = 0.75$ 、普朗特数指数 $m = 0.34$ 。通过选用不同流程数的板壳式换热器进行实验,得到了传热准则关系式与板侧流程数无关,而与壳侧1、2流程仍然无关,但3、4流程呈现出系数相关的结论,3、4流程系数分别为1流程的0.82倍和0.68倍。

上述研究局限于水-水换热的无相变情况,但实际应用中,换热状况复杂多变,仍需探究:对于不同介质,拟合的传热准则关系式是否仍然符合;对于相变介质,测试方法是否仍然可行,传热准则关系式的形式是否还符合板式换热器的基本形式。

6 板片结构的研究

板片的结构对换热性能有着显著影响,主要结构如图6所示。文献[9]研究发现波纹角度 β 是影响换热的重要参数,随着波纹角度的增大,流体的扰动程度加强,传热效果更好,但是流动阻力也随之增大,并提出波纹夹角以 45° 和 75° 最为合理;文献[32]认为波纹深度 H 是另一个影响因素,随波纹深度的增大,换热效果提高、压降降低,但是结垢变得严重,综合考虑板壳式换热器的波纹深度最合理的范围在 $2 \sim 4$ mm 之间;文献[33]分析了板型尺寸对换热性能的影响,发现波纹间距 P 也是重要的因素之一,随着波纹间距增大,波纹数量减少,板片间触点数下降,导致换热效果下降,但是同时会使流动阻力减小、流体扰动程度更高,通常要同时考虑波纹深度和波纹间距来确定合理的值。

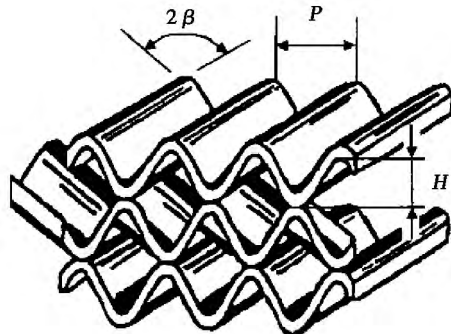


图6 板片结构图

Fig. 6 Drawing showing the structure of plates

上述对于板壳式换热器板片结构的研究主要通过数值模拟,也仅限截取板片的一部分作为研究对象^[9,32,34-35],想要准确模拟出流动与传热,需要对整个复杂的板片建模,对于计算机性能的要求很高,目前难以实现。此外,文献[36]发现板壳式换热器板片为圆形波纹板,流体在流道内的分布并不均匀,特别是在板片两侧边缘曲率较大处和壳程两导孔之间的区域流过的流体较少,提出椭圆形板片替代圆形板片,还有待进一步推进。

7 物流分配的研究

文献[37]通过数值模拟发现壳程存在严重的

物流分配不均匀现象,图 7 反映出 9 流道换热器不同流道间流体流量不同,随着雷诺数的增大,各流道内最大流量与最小流量间差距明显增大,流量差在 2、3 流道和 7、8 流道处最大,而 3、4、5、6 流道流量差较小,这充分说明各流道实际的流量差巨大,换热器壳程的物流分配存在严重的不均匀性。

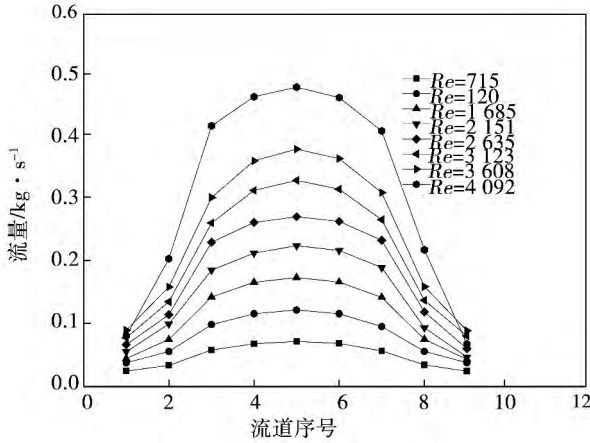


图 7 各流道流量分布图

Fig. 7 Chart showing the flow rates in various channels

进一步分析发现,壳程物流分配不均匀性对总的传热量影响很小^[38],但是却可以导致换热器的压降增大,也使得换热器的整体效能降低,影响换热器的整体性能,使得生产和使用成本增加。

文献[37]提出一种优化方案:在壳程入口筒体处加装一个封头来增大通道空间,在通道内加装一个圆弧状条纹板来强制分流,如图 8、图 9 所示。

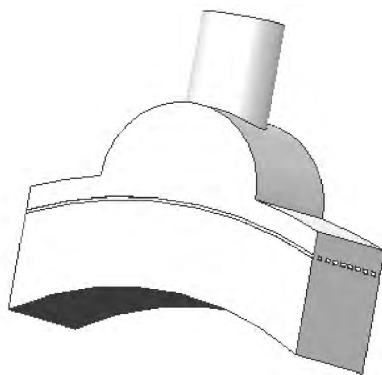


图 8 优化设计示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the optimized design

模拟与分析结果显示,这种设计能够较好地解决换热器的流量分布不均情况,改善换热器入口处

的物流分配不均匀性,在降低压降的同时,提高换热器的整体效能。

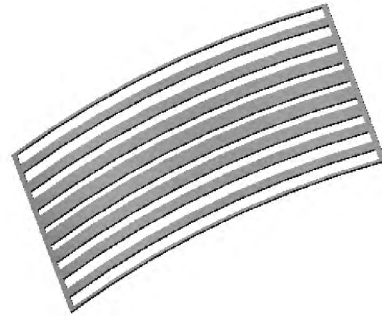


图 9 条纹板示意图

Fig. 9 Schematic diagram of a stripe plate

文献[37]的研究仅仅是一种理想状况,实际影响板壳式换热器物流分配的因素很多,模拟结果缺乏实验验证。对于壳程的优化设计,由于条纹板的条纹宽度受限于板间距,对于含有杂质的流体、易发生堵塞等状况还有待实物研究。此外,板程同样存在物流分配不均匀现象,尚有待研究,文献[39]研究的一种板式换热器分配器否适用于板壳式换热器,也有待验证。

6 发展前景与方向

目前,板壳式换热器应用的范围还相对有限,以制冷行业为例:板壳式换热器可以用作蒸发器和冷凝器、冷凝蒸发器、过热蒸发器和油冷器等,而且几乎适用于所有制冷剂,但目前制冷行业中板壳式换热器占有的比例还相当小,因此发展潜力巨大。此外,板壳式换热器应用还比较单一化,多数情况下,作为单一的热交换设备应用在某一工艺流程中,而未来的重点将是板壳式换热器机组。换热器机组不仅可以不同种类的板壳式换热器并联、串联形成一体,而且可以加装各类控制设备,既可以用于多介质同时实现热交换,又可以轻松实现对换热的控制。一体化设计、成套化组装及集中智能控制将是板壳式换热器发展的重点方向,可以预见板壳式换热器有巨大的发展前景^[40]。

参考文献:

[1] 史秀丽,张宏峰.板壳式换热器发展现状及优越性[J].化学工程师,2006,125(02):30-31.

- SHI Xiu-li ,ZHANG Hong-feng. Status quo of the development of plate and shell heat exchangers and their superiority [J]. Chemical Engineer 2006 ,125(02) : 30 - 31.
- [2] 蔡丽萍,郭国义,陈定岳等. 板壳式换热器的应用和进展[J]. 化工装备技术 2011 32(02) : 28 - 31.
CAI Li-ping ,GUO Guo-yi ,CHEN Ding-yue et al. Applications and development of plate and shell type heat exchangers [J]. Chemical Equipment Technology 2011 32(02) : 28 - 31.
- [3] 冯 翥,徐涵庆,顾 瑾. 一种新型换热器—板壳式换热器[J]. 广州化工,1997 25(3) : 52 - 55.
FENG Biao ,XU Han-qing ,GU Jin. A new heat exchanger—plate and shell type heat exchanger [J]. Guangzhou Chemical Engineering ,1997 25(3) : 52 - 55.
- [4] 汪光胜,周建新. 板壳式换热器在歧化装置中的选用[J]. 石油化工设备 2008 37(5) : 86 - 87.
WANG Guang-sheng ,ZHOU Jian-xin. Selection of plate-shell type heat exchangers for disproportion devices [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment 2008 37(5) : 86 - 87.
- [5] 陈亚平,徐礼华,周强泰. 一种新型板壳式换热器[J]. 石油化工设备 2000 29(6) : 30 - 31.
CHEN Ya-ping ,XU Li-hua ,ZHOU Qiang-tai. A new type plate-shell type heat exchanger [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment 2000 29(6) : 30 - 31.
- [6] 李映斌,王克勇,陈亚平. 波纹板壳式换热器结构探讨[C]// 第二届全国换热器学术论文集北京: 压力容器杂志社,2002: 28 - 31.
LI Ying-bin ,WANG Ke-yong ,CHEN Ya-ping. Exploratory study of a corrugated plate and shell type heat exchanger [C]//Beijing: Proceedings of the Second National Heat Exchanger Academic Seminar, Journal of Pressure Vessels 2002: 28 - 31.
- [7] 李含苹. 全焊接板壳式换热器在传热中的应用[J]. 船舶 2004 (03) : 35 - 38.
LI Han-ping. Applications of all-welded plate and shell type heat exchangers in heat transfer [J]. Shipbuilding 2004(03) : 35 - 38.
- [8] H Uehara ,H Kusuda , M Monde ,et al. Shell-and-plate type heat exchangers for OTEC plants [J]. Sol. Energy Eng. 1984 ,106 (03) : 286 - 290.
- [9] 刘家瑞,赵 巍,黄晓东等. 板壳式换热器传热准则关系式的分析与实验研究[J]. 动力工程学报 2015 35(6) : 469 - 475.
LIU Jia-rui ,ZHAO Wei ,HUANG Xiao-dong ,et al. Analysis and experimental research of the heat transfer criterion formula for plate and shell type heat exchangers [J]. Journal of Power Engineering , 2015 35(6) : 469 - 475.
- [10] 赵力伟. 板壳式换热器波纹板间流体流动与传热数值模拟 [D]. 上海: 华东理工大学 2011.
ZHAO Li-wei. Numerical simulation of the fluid flow and heat transfer between the corrugated plates in a plate and shell type heat exchangers [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology 2011.
- [11] 张迎恺. 大型轧制焊接板壳式换热器[J]. 石油机械 2001 29 (5) : 27 - 28.
ZHANG Ying-kai. Large-scale rolled and welded plate and shell type heat exchangers [J]. Petroleum Machinery 2001 29(5) : 27 - 28.
- [12] 邱小亮. 人字形板片结构参数对板式换热器传热与流阻特性影响研究[D]. 广州: 华南理工大学 2013.
QIU Xiao-liang. Influence of the structural parameters of the her-ringbone plates on the heat transfer and flow resistance characteristics of a plate type heat exchanger [D]. Guangzhou: South China University of Science and Technology 2013.
- [13] 唐文涛,王瑞祥,胡玉镜. 波面板壳式换热器的结构和性能特点[J]. 煤气与热力 2005 25(7) : 39 - 41.
TANG Wen-tao ,WANG Rui-xiang ,HU Yu-jin. Structure and performance features of a corrugated plate and shell type heat exchanger [J]. Coal Gas and Heat 2005 25(7) : 39 - 41.
- [14] 张 建,沈健明,李 亮. 全焊接板壳式热交换器在热水伴热中的应用[J]. 石油化工设备 2007 36(6) : 87 - 89.
ZHANG Jian ,SHEN Jian-ming ,LI Liang. Applications of fully welded plate and shell type heat exchangers in hot water heat tracing [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment , 2007 36(6) : 87 - 89.
- [15] 李红波. 滦南热电厂首站板壳式热交换器设计[J]. 石油化工设备 2012 41(2) : 37 - 39.
LI Hong-bo. Design of a plate-shell type heat exchanger in the first station of Luannan thermal power plant [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment 2012 41(2) : 37 - 39.
- [16] 祁玉红. 三种常用换热器的比较[J]. 青海大学学报 2006 24 (06) : 60 - 62.
QI Yu-hong. Comparison of three types of commonly used heat exchanger [J]. Journal of Qinghai University ,2006 ,24(06) : 60 - 62.
- [17] 孙以苓,盛展武,张志文. 板壳式波面换热器的开发及应用 [J]. 石油化工设备 ,1995 24(01) : 7 - 11.
SUN Yi-ling ,SHENG Zhan-wu ,ZHANG Zhi-wen. Development and applications of corrugated plate and shell type heat exchangers [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment ,1995 , 24(01) : 7 - 11.
- [18] 陈亚平,张怀宝,施明恒,等. 三效溴化锂制冷机研发的新思路—换热器板壳化[J]. 流体机械 2002 30(12) : 58 - 60.
CHEN Ya-ping ,ZHANG Huai-bao ,SHI Ming-heng. New idea for studying and developing tri-purposed lithium bromate refrigerator-plate and shell type heat exchangers [J]. Fluid Machinery 2002 , 30(12) : 58 - 60.
- [19] 吴植仁,吴植融. 螺旋板壳式换热器在制冷机组冷凝器中的应用[J]. 制冷与空调 2008 8(5) : 43 - 46.
WU Zhi-ren ,WU Zhi-rong. Applications of helical plate and shell type heat exchangers in condensers for use in refrigeration units [J]. Refrigeration and Air-conditioning 2008 8(5) : 43 - 46.
- [20] Park J H ,Kim Y S. Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-134a in the oblong shell and plate heat exchanger [J]. KSME International Journal 2004 ,18 (12) : 2284 - 2293.
- [21] LEE H S ,LI S ,HWANG Y H. Experimental investigations on flow boiling heat transfer in plate heat exchanger at low mass flux condition [J] . Applied Thermal Engineering ,2013 ,61 (2) : 408 - 415.
- [22] 史美中,王中铮. 热交换器原理与设计(第四版) [M]. 南京: 东南大学出版社 2012.
SHI Mei-zhong ,WANG Zhong-zheng. Theory and design of heat exchangers (Forth Edition) [M]. Nanjing: Southeast University

- Press 2012.
- [23] Marriott J. Where and how to use plate heat exchangers [J]. Chemical Engineering Journal, 1971, 78(12): 127-133.
- [24] 乔晓刚, 李 鹏, 崔立棋, 等. 三个关键几何参数对人字形波纹钎焊板式换热器换热性能影响的分析[J]. 制冷与空调, 2011, 11(04): 121-128.
QIAO Xiao-gang, LI Peng, CUI Li-qi, et al. Analysis of the effect of three key geometric parameters of a herringbone corrugated brazed plate type heat exchanger on its heat exchange performance [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 11(04): 121-128.
- [25] A Dumus, H Benli, I Kurtbas. Investigation of heat exchanger and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 1451-1457.
- [26] 邹同华, 杜建通, 刘晓东. 板式换热器设计选型及使用中应注意的问题[J]. 制冷与空调, 2000(1): 40-44.
ZOU Tong-hua, DU Jian-tong, LIU Xiao-dong. Matters needing attention in the design, type selection and usage of plate type heat exchangers [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2000(1): 40-44.
- [27] 杨儒周, 宫 兵, 何 璟. 板式换热器设计计算影响因素[J]. 石油化工设备, 2009, 38(08): 12-14.
YANG Ru-zhou, GONG Bing, HE Jing. Factors influencing the design and calculation of plate type heat exchangers [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment, 2009, 38(08): 12-14.
- [28] 欧阳新萍, 陶乐仁, 等. 雷诺数法在板式换热器传热实验中的应用[J]. 热能动力工程, 1998, 13(74): 118-130.
OUYANG Xin-ping, TAO Le-ren, et al. Applications of equal Reynolds number method in heat transfer tests of plate type heat exchangers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1998, 13(74): 118-130.
- [29] 朱志彬, 王华明, 白平南, 等. 一种综合非线性回归法和 Wilson 图解法计算对流换热系数的新方法[J]. 化工机械, 2008, 35(4): 197-201.
ZHU Zhi-bin, WANG Hua-ming, BAI Ping-nan, et al. A new method for calculating convective heat exchange coefficients by using a comprehensive non-linear regression method and Wilson diagram method [J]. Chemical machinery, 2008, 35(4): 197-201.
- [30] 欧阳新萍, 吴国妹, 刘宝兴, 等. 流速法在板式换热器传热实验中的应用[J]. 动力工程, 2001, 21(03): 1260-1262.
OUYANG Xin-ping, WU Guo-mei, LIU Bao-xing, et al. Applications of the equal flow velocity method in heat transfer tests of plate type heat exchangers [J]. Journal of Power Engineering, 2001, 21(03): 1260-1262.
- [31] 刘家瑞, 赵 巍, 黄晓东, 等. 一种板式换热器传热准则关系式的实验分析[J]. 动力工程学报, 2015, 35(11): 893-900.
LIU Jia-rui, ZHAO Wei, HUANG Xiao-dong, et al. Experiment and analysis of the heat transfer criterion correlation formula for plate and shell type heat exchangers [J]. Journal of Power Engineering, 2015, 35(11): 893-900.
- [32] 陈武滨. 板式换热器传热性能研究及结构优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
CHEN Wu-bin. Study of the heat transfer performance of a plate and shell type heat exchanger and its optimization in structure [D]. Guangzhou: South China University of Science and Technology, 2012.
- [33] 刘 艳, 何国庚, 赖学江. 板式换热器板型尺寸对换热性能的影响[J]. 制冷, 2003, 22(02): 65-68.
LIU Yan, HE Guo-geng, LAI Xue-jiang. Influence of the plate profile and dimensions of a plate type heat exchanger on its heat exchange performance [J]. Refrigeration, 2003, 22(02): 65-68.
- [34] 施卿海, 苏文献, 许 斌, 等. 全焊接板壳式换热器入口处温度的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(01): 77-81.
SHI Qing-hai, SU Wen-xian, XU Bin, et al. Numerical simulation of the temperature at the inlet of an all-welded plate and shell type heat exchanger [J]. Journal of Shanghai University of Science and Technology, 2013, 35(01): 77-81.
- [35] 陈武滨, 江 楠. 新型板式换热器壳程流动与换热的数值模拟[J]. 化学工程, 2011, 40(01): 30-34.
CHEN Wu-bin, JIANG Nan. Numerical simulation of the flow and heat exchange at the shell side in a novel plate and shell type heat exchanger [J]. Chemical Engineering, 2011, 40(01): 30-34.
- [36] 刘家瑞, 赵 巍, 张 华, 等. 板式换热器: 中国, 201420735336.8 [P] 2015-4-22.
LIU Jia-rui, ZHAO Wei, ZHANG Hua, et al. Plate and shell type heat exchanger: China, 201420735336.8 [P] 2015-4-22.
- [37] 刘家瑞, 赵 巍, 黄晓东, 等. 一种板式换热器壳程物流分配特性的模拟与优化[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3569-3576.
LIU Jia-rui, ZHAO Wei, HUANG Xiao-dong, et al. Simulation and optimization of the material flow distribution characteristics of the shell side in a plate and shell type heat exchanger [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(10): 3569-3576.
- [38] 邓先和, 王杨君, 黄德斌, 等. 来流不均匀分布对换热器传热的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 1-3.
DENG Xian-he, WANG Yang-jun, HUANG De-bin, et al. Effects of the non-uniform distribution of the incoming flow on the heat transfer in a heat exchanger [J]. Journal of South China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(2): 1-3.
- [39] 仇 嘉, 魏文建, 张绍志, 等. 基于 CFD 数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 130-137.
QIU Jia, WEI Wen-jian, ZHANG Shao-zhi, et al. Research of the performance of a distributor in a plate type heat exchanger based on the CFD numerical simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 130-137.
- [40] 魏兆藩, 王丕宏, 张延丰, 等. 大型板式换热器研制[J]. 石油化工设备, 2000, 3(04): 375-380.
WEI Zhao-fan, WANG Pi-hong, ZHANG Yan-feng, et al. Development of a large-sized plate and shell type heat exchanger [J]. Petroleum and Chemical Engineering Equipment, 2000: 375-380.

(陈 滨 编 辑)

导孔型板壳式换热器的研究进展与展望 = **Research Development on Guide Groove Type Plate and Shell Heat Exchanger** [刊, 汉] LIU Jia-rui, ZHAO Wei, ZHANG Hua (School of Energy and Power Engineering of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), HUANG Xiao-dong (Dongguan Aro Thermal Energy Technology Co. Ltd. Dongguan, Guangdong Province, China, Post Code: 523053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -1-8

As one kind of new-pattern and high-efficiency heat transfer equipment, the plate and shell heat exchanger (PSHE) has the broad application prospects in industry. Taking the guide groove type PSHE as the object, based on the domestic and international research achievements, the paper discusses in detail the structure and the working principle of PSHE, the selection of process composition on plate side and shell side as well as the relevant theories of the heat transfer calculation and pressure drop calculation. The paper also presents the detailed steps and relevant formula on the thermodynamic calculation and points out the problems which shall be noted during the period of the design and calculation for PSHE, such as the plate model selection, the choice of the fouling factor value, the control of errors and so on. In addition, the paper describes the performance test method of PSHE as well as the solving method of the heat transfer criterion equation, summaries the influences of plate structure parameters on flow and heat transfer and analyzes the phenomenon of the flow maldistribution at the inlet of the shell side. Finally, the paper forecasts the development prospects of PSHE and indicates the integrated design, complete-set assembly and central intellectual control will become the key development direction for PSHE. **Key words:** plate and shell heat exchanger (PSHE), plate structure, heat transfer criterion equation, flow distribution

槽式太阳能直接蒸汽发电技术研究现状 = **Research Status of Solar Parabolic Trough Direct Steam Generation Technology** [刊, 汉] WANG Xue-jun, YAN Fei, ZHANG Yin-long, WANG Kun (Chongqing University, Key Laboratory of Education Ministry on Low-grade Energy Utilization Technology and System, Shapingba District, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -9-15

With its advantages of higher efficiency, more friendly environment and lower investment, the solar parabolic trough direct steam generation (DSG) technology has become the most promising concentrating solar power generation technology. But the DSG solar collecting system is restricted by such three factors as non-uniform heat flux on the absorber, gas-liquid two-phase flow and instability of solar radiation. The paper not only describes in detail the re-