

第8篇 传热设备及工业炉

编写人 盛展武 林纪方 黄鸿鼎

沈 复 钱家麟 黄祖祺

杨守诚

审校人 林纪方 郭宜枯 蔡振业

zk455/0205

8.1 概 述

8.1.1 传热设备和工业炉在化学工业中的应用

凡是能实现传热过程的各种设备统称为传热设备。在任何化工生产工艺中，要实现各种化学反应和各种化工过程，都有一定的温度要求，因此需要进行如下各种传热过程：

- ① 反应物料的加热或冷却；
- ② 产品的冷凝或冷却；
- ③ 反应热量的取出或供应；
- ④ 液体的蒸馏、气化或稀溶液的蒸发；
- ⑤ 工业余热（废热）的回收和热能的综合利用。

在任何化工生产中，传热设备总是非常重要和广泛被应用的。例如在日产千吨的合成氨厂中，各种传热设备约占全厂设备总台数的40%左右。在化工生产中，传热设备有时还作为其它设备的一个组成部分而出现，如蒸馏塔下面的再沸器、氨合成炉中的内部换热器等。

化工生产中所用的各种传热设备因其功用不同，也相应地有不同的名称，举例如下：

- ① 冷却器 用水或其它冷却介质冷却液体或气体。冷却器又可分为下面几种：

空冷器 用空气冷却或冷凝工艺介质；

低温冷却器 用低温的致冷剂，如冷盐水，氨、氟里昂等作为冷却介质。

- ② 冷凝器 冷凝蒸气或混合蒸气，这又可分为下列几种：

部分冷凝器 蒸气经过时仅冷凝其中一部分，其余部分则通往另一设备进一步处理；

最终冷凝器 使蒸气全部冷凝为液体，如果全部冷凝为液体后又进一步冷却为过冷的液体，则称为冷凝冷却器。反之，如果通入的蒸气温度高于饱和温度，则在冷凝之前，还经过一段冷却阶段，这就叫冷却冷凝器。

- ③ 加热器 用蒸汽或其他高温载热体来加热工艺介质，以提高其温度。

④ 换热器 在两个不同工艺介质之间进行显热交换，即在冷流体被加热的同时，热流体被冷却。如果在换热器保温条件良好情况下，热量损失是很小的。

⑤ 再沸器 用蒸汽或其它高温介质将蒸馏塔底的物料加热至沸腾，以提供蒸馏时所需的热量。再沸器又可分为不同形式。

热虹吸式再沸器 沸腾介质依靠流体在系统中的重度差而产生自然循环，从而使得传热效果良好，达到再沸器所要求的功效；

强制循环式再沸器 为了改善传热效果，利用泵来迫使液体进行循环。

⑥ 蒸气发生器 用燃料油或气的燃烧加热产生蒸气。如果被加热汽化的是水，也叫蒸汽发生器，即锅炉。如果被加热的是其它液体，或液体混合物则统称为气化器。

⑦ 过热器 将水蒸气或其它蒸气加热到饱和温度以上，就是过热器。

⑧ 废热（或余热）锅炉 凡是利用生产过程中的废热或余热来产生蒸汽的统称为废热锅炉。

现代的化学工业和石油化工往往要求在相当苛刻的操作条件下进行换热过程。换热器的操作压力有超过1000atm的，温度则从-270℃起直到高达1500℃的情况也是常有的。所接

触的化工产品或工艺介质种类繁多,有许多是腐蚀性十分严重的。因此对传热设备的设计结构和材质要求也是非常高的。随着化学工厂的大型化,换热设备也往往十分庞大,单台换热器的传热面积有高达 $6000 \sim 8000 \text{m}^2$ 的。

工业炉从广义上说,也是一种传热设备。通常是指用燃料燃烧的方法将工艺介质加热到相当高的温度,其传热方式主要是靠辐射,而工艺介质在受热过程中往往伴随着有化学反应,如转化、裂解等。因此,工业炉中的传热过程往往比较复杂。

在化工和炼油以及石油化工生产中,工业炉的应用也是很广泛的。如合成氨厂中,以天然气为原料的转化炉,以重油为原料的气化炉,以煤为原料的煤气发生炉,又如炼油厂的管式加热炉,以及生产各种烯烃的裂解炉等均为常见的化工和炼油厂中的工业炉。所以类型也是相当多的,其炉型的结构设计,以及操作时的传热问题也是较为复杂的。随着装置的大型化,和节能技术的迅速发展,工业炉的热负荷和热效率近年来均有很大的提高。

8.1.2 传热设备的主要类型

传热设备根据热量传递方法的不同,可以分为间壁式、直接接触式和蓄热式三大类。

① 间壁式换热器 温度不同的两种流体通过隔离流体的器壁进行热量传递,两流体之间因有器壁分开,故互不接触,这是化工生产经常要求的条件,也是应用最广泛的类型。

② 直接接触式换热器 又称混合式,冷流体和热流体在进入换热器后直接接触传递热量。这种方式对于工艺上允许两种流体可以混合的情况下,是比较方便而有效的,如凉水塔、文氏管、喷射式冷凝器等。

③ 蓄热式换热器 又称蓄热器,是一个充满蓄热体(如格子砖)的蓄热室,热容量很大。温度不同的两种流体先后交替地通过蓄热室,高温流体将热量传给蓄热体,然后蓄热体又将这部分热量传给随后进入的低温流体,从而实现间接的传热过程。这类换热器结构较为简单,可耐高温,常用于高温气体的冷却或废热回收,如回转式蓄热器和切换阀门式蓄热器。

化工生产中应用的传热设备,绝大多数为间壁式换热器。在间壁式换热器中,由于传热过程不同,操作条件差异、流体性质的各种特点以及间壁材料的制造加工性能等因素,决定了换热器的结构类型是多种多样的。

根据间壁的形状,间壁式换热器可以大体上分为管壳式和紧凑型两大类。

在管壳式换热器中,传递热量的间壁为圆管形。通常将一些直径较小的圆管用管板组成一个管束,然后加一个外壳构成管壳式换热器。这一类换热器的特点是易于制造、选用的材料范围广、换热表面清洗比较方便、适应性强、处理能力强、能在高温高压下使用、有较成熟的经验。因此管壳式换热器虽然使用时期较早,但目前在化工生产中仍然是所有换热器中使用最广、效率较高的一种传统的标准设备。

由于管束和壳体结构形式上的不同,管壳式换热器还可以进一步区分为固定管板式、U形管式、浮头式、填料函式、釜式、双套管式、套管式以及沉浸蛇管式等,这些管壳式换热器都有其各自的特点以适应不同的要求。

在紧凑型换热器中,传递热量的间壁基本上为平面状,即用平板冲压成各种波纹状、或卷制成螺旋状的传热单元,焊接或组装而成。

紧凑型换热器的特点是单位体积中的传热面积比较大,换热器的结构十分紧凑,传热效率高,而且每单位传热面积的金属耗用量较低。属于这类换热器的有板式、螺旋板式、板翅

式、伞板式以及板壳式等。这种紧凑式换热器的一个共同性缺点是操作压力不能太高。传热设备的结构分类见表 1-1。

表 1-1 传热设备的结构分类

传 热 设 备 的 分 类	间壁式	管壳式	固定管板式	刚性结构	用于管壳温差较小的情况(一般 $\leq 50^{\circ}\text{C}$),管间不能清洗
				带膨胀节	有一定的温度补偿能力壳程只能承受较低压力
			列管式	浮头式	管内外均能承受高压,可用于高温高压场合
				U形管式	管内外均能承受高压,管内清洗及检修困难
			填料函式	外填料函	管间容易漏泄不宜处理易挥发,易爆易燃及压力较高的介质
				内填料函	密封性能差,只能用于压差较小的场合
			釜式		壳体上部有个蒸发空间用于再沸、蒸煮
			双套管式		结构比较复杂主要用于高温高压场合或固定床反应器中
			套管式		能逆流操作作用于传热面较小的冷却器、冷凝器或预热器
		蛇管式	沉浸式	用于管内流体的冷却、冷凝,或者管外流体的加热	
			喷淋式	只用于管内流体的冷却或冷凝	
	紧凑式	板式		拆洗方便,传热面能调整,主要用于粘性较大的液体间换热	
		螺旋板式		可进行严格的逆流操作,有自洁作用,可用作回收低温热能	
		板翅式		结构十分紧凑、传热效果很好,流体阻力大主要用于制氧	
		伞板式		伞形传热板结构紧凑拆洗方便,通道较小易堵要求流体干净	
		板壳式		板束类似于管束可抽出清洗检修,压力不能太高	
	直接接触式			适用于允许换热流体之间直接接触	
	蓄热式			换热过程分两段交替进行,适用于从高温炉气中回收热量的场合	

8.1.3 传热设备的选型

传热设备的类型很多,各种形式都有它特定的应用范围。在某一种场合下性能很好的换热器,如果换到另一种场合则可能传热效果和性能会有很大的改变。因此,针对具体情况正确地选择换热器的类型,是很重要和很复杂的工作。

传热设备选型时需要考虑的因素是多方面的,主要的是:

- ① 流体的性质;
- ② 流量及热负荷量;
- ③ 操作温度、压力及允许压降的范围;
- ④ 对清洗、维修的要求;
- ⑤ 设备结构材料、尺寸和空间的限制;
- ⑥ 价格。

流体的性质对换热器类型的选择上往往会产生重大影响,如流体的物理性质(比热、导热系数、粘度),化学性质(如腐蚀性、热敏性),结垢情况以及是否有磨蚀性颗粒等因素都对传热设备的选型有影响。例如硝酸的加热器,由于流体的强腐蚀性决定了设备的结构材料,从而很快就限制了可能采用的结构范围。如对于热敏性大的液体,能否精确控制它在加热过

程中的温度和停留时间往往就成为选型的主要前提。流体的清浄程度和易否结垢,有时在选型上往往也起决定性的作用,如对于需要经常清洗换热面的物料就不能选用高效的板翅式或其它不可拆卸的结构。

同样,换热介质的流量、操作温度、压力等参数在选型时也很重要,例如板式换热器虽然高效紧凑,性能很好,但是由于受结构和垫片性能的限制,当压力或温度稍高时,或者流量很大时这种型式就不适用了。

需要注意的是,随着生产技术和认识规律的发展,各种换热器的适用范围也在不断的发展。如对于高温高压的换热过程,以前主要选用结构简单的蛇管或套管换热器。但是这些类型流体处理量小,价格高,不能适应现代大型化装置的需要,因此随着结构材料和制造工艺的发展,正在把列管换热器逐步推广到高温高压的场合下应用,目前国外这种换热器的最高使用压力为 840kg/cm^2 , 温度达 1000°C 。

传热设备的选型在很大程度上取决于生产实践的经验,各种换热器的性能比较见表1-2。

表 1-2 各种换热器的性能

	允许最大 操作压力 kg/cm^2	允许最高 操作温度 $^\circ\text{C}$	单位体积 传热面积 m^2/m^3	传热系数 $\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$	结构是 否可靠	传热面 是否便 于调整	是否具 有热补 偿能力	清洗是 否方便	检修 是否 方便	是否能 用脆性 材料制作
固定管板式	840	1000~1500	40~164	730~1460	○	×	×	△	×	×
U形管式	1000	1000~1500	30~130	730~1460	○	×	○	△	×	△
浮头式	840	1000~1500	35~150	730~1460	△	×	○	○	○	△
板式	28	360	250~1500	6000	△	○	○	○	○	×
螺旋板式	40	1000	100	600~2500	○	×	○	×	×	△
板翅式	50	-269~500	250~4370	30~300 (气,气)	△	×	○	×	×	×
套管	1000	800	20		○	○	△	△	○	○
沉浸式盘管	1000		15		○	×	○	△	○	○
喷淋式	100		16		△	○	○	○	○	○

注: ○—好; △—尚可; ×—不好。

8.1.4 换热器所用的材料

用于换热器的材料要求导热,耐蚀性好,机械强度高,易于制造加工和价格便宜。常用材料的品种很多,选材时应按操作压力、温度范围和介质的物理、化学性能来挑选。

(1) 常用的各种材料

(1.1) 碳钢

碳钢价格低、强度高,对碱性介质比较稳定,但不耐酸的腐蚀,广泛用于无耐蚀要求的换热器中,适宜的使用温度范围为 350°C 。换热器用的碳钢含炭量应低于 0.30% , 否则焊接性能不好。

碳钢根据不同的脱氧程度又可分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢。沸腾钢容易产生偏析、焊接裂纹和低温冷脆,只能制作低压($<13\text{kg/cm}^2$)低温($0\sim300^\circ\text{C}$)用的换热器。镇静钢完全无偏析,可焊性及高温强度好,可用于 450°C 以下的高压换热器,在室温以下使用时也

要注意其低温脆性。半镇静钢则介乎两者之间。

(1.2) 低合金钢

碳钢中加少量 Cr、Mo 等元素，可以增加高温强度及耐蚀性，并可用于高温高压下有氢介质的换热器。

(1.2.1) C-0.5Mo 钢

这种钢材合金元素比较少，焊接性能良好，预热温度为 100~200℃。这种钢材的适用温度范围为 400~480℃，在较高温度下长期使用后，容易石墨化。

(1.2.2) Cr-Mo 钢

加入 Cr 元素能提高钢材的蠕变强度和抗氧化性能。1Cr-0.5Mo 钢可用于 550℃以下的换热器，1.25Cr-0.5Mo 及 2.25Cr-1Mo 钢的适宜温度范围为 500~600℃。5Cr-0.5Mo 钢的使用温度可达 600~650℃。由于这种钢材的焊接热影响区有淬硬性，因而有产生裂纹的危险，焊缝必须预热到 150~350℃。

(1.3) 不锈钢

不锈钢一般指的是以 18Cr-8Ni 为代表的有稳定的奥氏体组织的合金钢，也包括以 13% Cr 为代表的有铁素体组织的合金钢。这类钢材的特点是有均匀的内部组织和结构，电极电位高，表面具有致密的保护膜，从而对各种侵蚀性介质具有优良的化学稳定性。

奥氏体不锈钢在 650℃以上的抗蠕变强度比铁素体好，如添加 Mo、Nb、Ti 等元素后抗蠕变强度还可提高，同时也提高了耐腐蚀性。对于晶间腐蚀要求高的场合可用超低碳不锈钢如 00Cr18Ni9 及 00Cr17Ni13Mo2 等，后者还可防止点蚀。奥氏体不锈钢不仅在高温下有较好的强度及抗氧化能力，而且在低温时又有足够的冲击韧性，因此不仅能用于 450℃以上的高温设备，也用于 -40℃以下的低温设备。其适用温度范围为 -200~650℃。

0Cr13 不锈钢对铁离子、亚硫酸气体、硫化氢、环烷酸均能耐蚀，适用温度范围为 -40~540℃。含 Cr15% 以上的不锈钢对氧化性酸耐蚀性优越，但在低温下韧性小，厚板焊接容易脆裂，必须在 70~100℃下预热，并在 475℃时有脆性，需特别注意。使用的温度范围为 0~+600℃。

(1.4) 低温用钢

温度低于 -20℃时，必须考虑材料在低温时产生脆性破裂的现象。

由于镍对碳钢有细化铁素体晶粒，大大改善低碳钢的缺口韧性的特点，因此含有 2~9% 的 Ni 钢，广泛用作低温设备的材料。3.5% Ni 钢的最低使用温度为 -101℃，9% Ni 钢可使用到 -196℃的液氮温度。国内在不同的低温条件下推荐的钢材有：

16Mn	最低使用温度	-30℃
09Mn2V	最低使用温度	-70℃
06MnNb	最低使用温度	-90℃
06AlCu	最低使用温度	-120℃
20Mn23Al	最低使用温度	-196℃

奥氏体系不锈钢是面心立方晶格，不产生低温脆性。但奥氏体组织不稳定，组织中含有铁素体时，铁素体容易析出而产生低温脆性。

(1.5) 有色金属

用作换热器材料的有色金属有铜、铝及其合金。铜、铝的导热性能都非常好，铜的导热系数为 340kcal/m·℃·h，铝为 188kcal/m·℃·h，比钢大 4~8 倍，耐腐蚀性也较好。主要

缺点是机械强度较低, 价格较贵。有色金属的合金能增加其机械强度, 但往往降低其耐蚀能力。

(1.5.1) 铜及铜合金

铜在金属铵盐及氯离子水溶液, 海水、非氧化性酸的许多溶液中具有耐蚀性。特别有价值的是铜在低温下能够增高强度而不降低其冲击韧性, 从而使这种材料成为制造深冷设备的重要材料。按照纯度的不同, 我国铜材可分为 T_2 、 T_3 、 T_4 三种型号, 其中 T_2 铜管可用于深冷设备, 而 T_3 、 T_4 均可制作盘管, 冷液体蒸发器用的列管等。

含锌 20~55% 之间的铜合金通称黄铜, 机械强度较纯铜高。H62 用于制造热交换器和深冷设备中的筒体, 高低压管板等。铜镍合金广泛用作传热管。含 78% Cu, 20% Zn, 2% Al 的铜合金是一种特殊高强度黄铜, 机械性能很好, 对海水、盐水耐蚀性好。

(1.5.2) 铝及铝合金

铝的表面能形成紧密的氧化保护膜, 因此对很多腐蚀介质都很稳定。由于其晶体结构为面心立方晶格, 在 0~-195℃ 的低温范围内, 冲击韧性仍不下降, 所以也是很好的低温材料。

铝的主要缺点是强度低, 耐磨性差, 在使用时要防止流体特别是固体颗粒的冲刷磨损。含有 2~6% Mg 的铝镁合金, 在机械强度上有很大提高。根据铝的不同纯度, 我国工业纯铝有 L_1 ~ L_5 , 铝镁合金有 LF_2 , LF_3 , LF_5 , LF_{11} , LF_{21} 等几种型号, 其中 LF_3 , LF_5 , LF_{11} 的设计温度不超过 65℃, 其它各种型号的铝及铝合金的温度不超过 150℃。

(1.6) 非金属

为了对付强腐蚀性介质, 在化工生产中采用许多非金属材料来制作换热器, 如石墨、聚四氟乙烯、玻璃、陶瓷等。其中用得较多的是石墨及聚四氟乙烯。

(1.6.1) 石墨

石墨用作换热器材料在于它的化学稳定性好, 导热系数高, 线膨胀系数小, 不易缺垢, 机械加工性能好和耐用。它可以代替不锈钢和有色金属用于盐酸、硫酸、醋酸和磷酸等换热器中。能抵抗温度的急剧变化, 最高温度可达 800℃。

由于石墨本身是渗透性的, 因此必须经过树脂浸渍才能用作换热器的材料。已经用浸渍石墨制成多种换热器, 如管壳式、块式、喷淋式、沉浸式、套管式等。

石墨材料的主要缺点是容易脆裂, 不抗弯不抗拉。

(1.6.2) 聚四氟乙烯

氟塑料的特点是耐腐蚀, 在较高温度下有良好强度, 在任一种溶剂中不溶解也不膨胀。表面光滑, 很少结垢, 使用温度可从 -180~250℃。

由于氟塑料的导热系数低, 因此通常采用小直径薄壁管, 最常用的管子直径为 0.1 英寸厚 0.25mm; 直径 0.25 英寸厚 0.63 mm。这种细丝状薄壁管十分柔软, 可制成各种特殊形状。试验表明 0.1 英寸管子在 38℃ 时最大操作压力为 9.5kg/cm²; 93℃ 时压力为 5kg/cm²; 在较低压力下最高操作温度为 175℃。

这种材料主要用于冷却和冷凝卤化物、无机酸及苛性溶液。

(1.7) 稀有金属

钽、铌、锆等稀有金属价格都很贵, 但是由于它们具有某些特殊性质, 因此近年来已开始采用这些材料制作换热器。这些材料通常以薄板, 薄壁管和复合板的形式提供使用。

钽的资源比较丰富, 在稀有金属中是应用较广泛的一种。钽的抗点蚀能力, 抗腐蚀、疲

劳的能力都很高，比不锈钢耐蚀性好。钛在海水、金属氯化物、氯酸盐、铬酸、湿氯气以及许多有机酸中都有很高耐蚀性。钛的强度限、屈服限高，比重小，强度与重量的比值很高。

钽的耐蚀性与贵金属金和铂相当，在200~300℃范围内除氢氟酸和发烟硫酸外，能耐各种酸和混酸的腐蚀，也能耐 pH 值为10~11的强碱。钽的比重较钛大三倍多，因此价格也更贵得多。钽的耐蚀和耐热性能远超过钛，钽可以任意成形，并可采用钨极气体保护焊进行焊接。

(2) 材料的经济使用温度范围[Chem. proc, Eng, Aug(1968)141]

表 1-3 材料的经济使用温度范围

材料	温度 °C	-200	-100	0	102	200	300	400	500	600	700	800
碳钢												
C-1/2Mo												
1Cr-1/2Mo 5Cr-1/2Mo												
奥氏体不锈钢												
3/4Ni 钢												
蒙耐尔合金												
Inconel												
铜镍合金												
铜												
海军铜												
铝青铜												
铝												
硬铅												
石墨												
可用温度范围												
常用温度范围												
经济温度范围												

8.1.5 换热器设计的一般考虑

(1) 换热器的基本要求

设计换热器时，最基本的要求：

第一，热量能有效地从一种流体传递到另一种流体，即传热效率高，单位传热面上能传递的热量多。在一定的热负荷下，也即每小时要求传递热量一定时，传热效率（通常用传热系数表示）越高，需要的传热面积越小。当然是指在相同的传热温差下作比较。第二，换热器的结构能适应所规定的工艺操作条件，运转安全可靠，严密不漏，清洗、检修方便，流体阻力小。第三是要求价格便宜，维护容易，使用时间长。

在化工生产中所使用的换热设备往往需要频繁的清洗和检修，停车的时间多，造成的经

济上损失有时会比换热器价格更大。因此, 如果换热器能够设计得合理, 可以保证连续运转的时间长, 同时能减少功率消耗, 则换热器本身价格虽然略高一些, 但总的经济核算也可能是有利的。

(2) 终端温差

换热器的终端温差通常是由工艺过程的需要而决定的。当换热器的最终温度可以选择时, 其数值对换热器是否经济合理有很大影响。因为它关系到换热器传热效率, 所以选择时应多方面考虑。适当的换热器终端温差一般可参考下列推荐的范围,

- ① 热端的温差应该在 20°C 以上;
- ② 用水或其它冷却介质冷却时, 冷端温度差可以小一些, 但一般不低于 5°C ;
- ③ 当冷却或冷凝工艺流体时, 冷却剂的进口温度应该比流体中最高结冰组分的冰点要高 5°C 以上, 以免在传热壁面上结冰;
- ④ 空冷器的最小温差不小于 20°C ;
- ⑤ 对含有惰性组分的流体冷凝时, 冷却剂的出口温度至少要比冷凝组分的露点温度低 5°C 。

(3) 流速

提高流速以增加流体的湍流程度, 可以提高传热效率, 同时也可以减轻污垢沉积, 从而延长使用的周期。但流速过大, 也会导致换热器的磨蚀和产生振动, 影响使用寿命; 此外, 功耗也将随流速增大而增加, 在能量消耗上是不利的。

各种流体在直管内的常见流速范围举例如下。

冷却水(淡水)	0.7~3.5 m/s
冷却用海水	0.7~2.5 m/s
低粘度油类	0.8~1.8 m/s
高粘度油类	0.5~1.5 m/s
油蒸气	5~15 m/s
气液混合流体	2.0~6.0 m/s

壳程内的适宜流速:

水及水溶液	0.5~1.5 m/s
低粘度油	0.4~1.0 m/s
高粘度油	0.3~0.8 m/s
油蒸气	3.0~6.0 m/s
气液混合流体	0.5~3.0 m/s

(4) 压力降

换热器压力降的大小关系到换热器面积和操作费用的多少。根据操作压力不同, 可以参考下列压力降的大致范围:

操作压力	压力降 ΔP
$P=0\sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ (绝)	$\Delta P = \frac{P}{10}$
$P=0\sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$ (表)	$\Delta P = \frac{P}{2}$
$P=0.7\sim 10 \text{ kg/cm}^2$ (表)	$\Delta P = 0.35 \text{ kg/cm}^2$

$$P=10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ (表)}$$

$$\Delta P=0.35 \sim 1.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$P=30 \sim 80 \text{ kg/cm}^2 \text{ (表)}$$

$$\Delta P=0.7 \sim 2.5 \text{ kg/cm}^2$$

当然压力降还和流体粘度，流速等有关，上面不过是一般情况的例子。

(5) 传热总系数

传热面两侧的传热膜系数， α_1, α_2 如果差别很大时，则 α 值较小的一侧成为控制传热的主要方面。设计换热器时，应尽量增大较小一侧的传热膜系数。最好，使两侧的膜系数值大体相当，这样比较有利。

增加膜系数的方法不外以下几个方面：

- ① 缩小通路截面积，以增大流速；
- ② 在通路内增设挡板或促进湍流的插入物，以提高湍流程度；
- ③ 在管壁上加翅片，不仅为了提高湍流程度同时也增加了传热面积；
- ④ 用强化传热表面，如各种形状的沟槽表面，或是有多孔性的表面，这对于冷凝、沸腾等有相变化的传热过程而言，可以获得相当大的传热膜系数。

(6) 污垢系数

换热器在使用期间，在壁面生成污垢，这是经常遇到的实际问题。结垢速率和工作介质的物性，操作温度以及流速大小等有关。污垢系数的一般数据在以后各节中将有介绍；降低污垢系数的主要途径不外是：改进水质（冷却侧）；消除通道内可能产生有局部旋涡的死区；增加流速；和避免局部温度过高等。

(7) 结构标准

换热器设计应尽量选用标准设计。型式和结构材料，避免用特殊的机械规格，以减少造价，同时也便于维修和更换部件。

增大换热器的管长和适当地缩小管径，可以降低单位传热面的造价。对于腐蚀性强的工艺介质而言，为了避免部件使用寿命过短，维修过于频繁，在设计时可以适当增加管子和其它部件的厚度。在这种情况下，往往不能采用标准设计，而要加以修改。

8.2 换 热 器

管壳式换热器是典型的换热设备,它在工业中的应用有悠久的历史,是一种传统的标准设备,在很多工业部门中大量使用。尤其是在化学、石油等工业中,地位显著。一般说来,管壳式换热器易于制造,成本较低,可供选用的结构材料范围广,换热表面的清洗比较方便,适应性强,处理能力大,高温、高压场合下都能适用。但从传热效率、结构的紧凑性以及单位传热面积的金属消耗量等方面而论,则无法同各种类型的“板式”换热器相比。为了便于设计制造和选用,许多国家都订有规范和系列标准。

8.2.1 管壳式换热器

(1) 列管式换热器的结构型式

图2-1所示为TEMA标准^①中列出的主要管壳式换热器的说明。表2-1归纳了这些换热器的特点。

图2-2为几种管壳式换热器的零部件及其命名图。

(1.1) 固定管板式 (见图2-2b)

固定管板式换热器的构造比其它型式的简单,价格便宜。它的最大缺点是管外清洗困难。因此,壳程流体必须是清洁而且不易产生污垢的。

由于壳、管程流体的温度不同,壳体和管束之间就有热膨胀差的存在。在设计固定管板式换热器时,必须考虑热膨胀差的问题,并设法缓和由此而产生的热应力,否则将会导致破坏性的严重后果。一般解决办法是采用膨胀节,图2-3所示是几种常用的膨胀节。此外,近年来还出现一些特殊结构的管板,如挠性管板,椭圆管板等,它们可以补偿壳体与管束之间的热膨胀差,适用于高温、高压的工作条件。

管板上应尽量排满管子,使管束与壳内壁之间的空隙尽量小,这不仅能够得到最小的壳体内径,而且可以减少壳程流体的旁流,有利于提高传热效率。

(1.2) U形管换热器 (见图2-2d)

U形管换热器的管束可以抽出,便于清洗管外。U形管具有自由伸缩的特点,可以完全消除热应力。其缺点是U形管的更换和管内清洗比较困难。管束与壳内壁的间隙在可抽出管束式的换热器中为最小。但在相同直径的壳体中能排的管子数较固定管板式少,价格比固定管板式约高10%。

(1.3) 灯笼环填料函式换热器 (见图2.2f)

这是浮动管板式中价格最便宜的型式。但填料处容易发生泄漏,所以只适用于压力为 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下的操作。为了避免填料处泄漏时引起管、壳程流体相混合,在灯笼环上开有泪孔。一旦发生泄漏,漏液将通过泪孔流到地面,不致与另一方流体相混合。灯笼环填料函

^① Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association (美国管式换热器制造者协会标准)的简称。

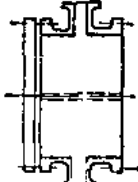
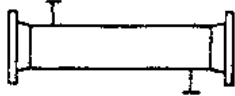
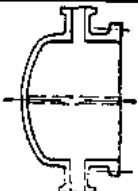
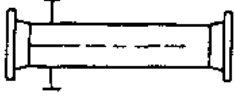
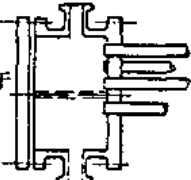
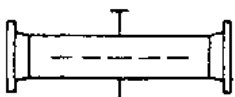
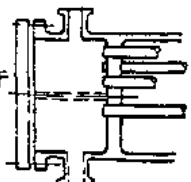
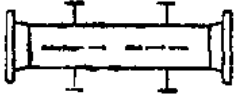
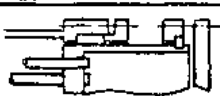
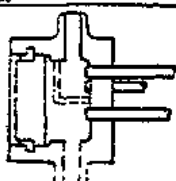
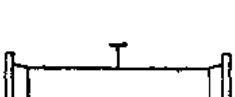
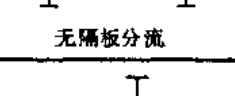
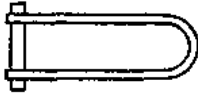
前端固定头盖型式		壳体型式		后端头盖型式	
A		E		L	
	管箱和可拆盖板				
B		F		M	
	封头(整体端盖)				
C		G		N	
	仅用于可拆管束				
C		H		P	
	仅用于固定管板 与管板制成一体的管箱和可拆盖板				
D		I		S	
D	特殊高压封头	J		T	
D	特殊高压封头	K		U	
D	特殊高压封头	K	釜式重沸器	W	

图 2-1 管壳式换热器型式的说明 (摘自TEMA标准第五版, 1958)

结构的换热器, 通常的操作范围低于 210°C , 适用于水、水蒸汽、空气及润滑油等介质。

(1.4) 外部填料浮头式换热器 (见图2.2c)

在浮头式换热器中, 这种外部填料式常用于化学工业中。管程流体的设计温计及压力不受任何限制。但壳程流体有向外泄漏的可能性, 所以壳程设计压力不能大于 $40\text{kg}/\text{cm}^2$, 也不能用于处理易燃、易爆的流体。管束与壳内壁的间隙大于前面介绍的几种型式的换热器。

(1.5) 内浮头式换热器 (见图2.2a)

内浮头式换热器广泛地用于石油炼制工业中。结构较复杂, 价格比固定管板式高20%左右。在拆卸管束时, 必须先卸下壳盖、剖分靠背环及浮头盖, 才能抽出管束。

表 2-1 主要管壳式换热器型式的特点

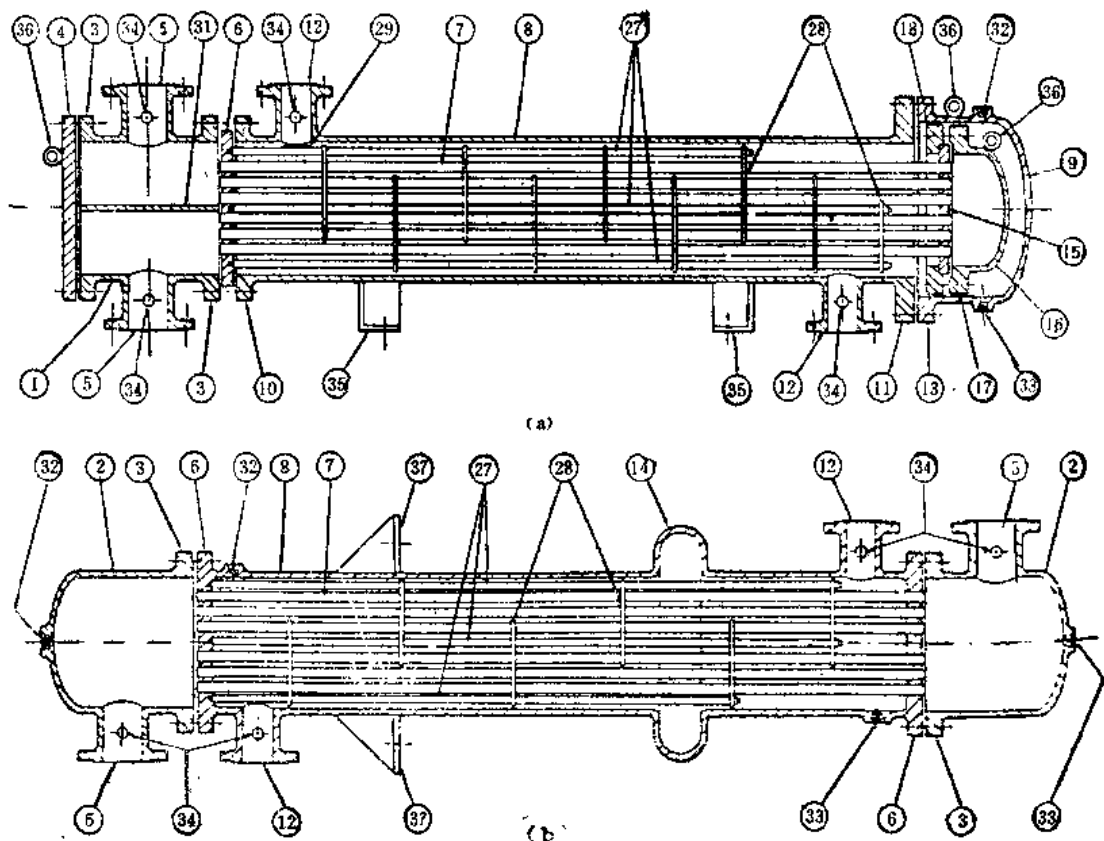
设计特点	固定管板	U形管	灯罩环填料函式浮头	内浮头(部分式托环)	外填料函式浮头	可抽式浮头
TEMA后头盖型式	L或M或N	U	W	S	P	T
相对造价序号, 最低A, 最高E	B①	A①	C	E	D	F
消除热膨胀差的措施	壳体用膨胀节	各管自由膨胀	浮头	浮头	浮头	浮头
管束是否可以移动?	否	是	是	是	是	是
管束能否更换?	否	是	是	是	是	是
个别管子能否更换?	是	只能换外层管子②	是	是	是	是
管子内、外能否化学清洗?	是	是	是	是	是	是
管内能否机械清洗?	是	要用特殊工具	是	是	是	是
管外能否机械清洗?						
三角形排列	否	否③	否③	否③	否③	否③
正方形排列	否	是	是	是	是	是
能否用水力喷射清洗?						
管内	是	要用特殊工具	是	是	是	是
管外	否	是	是	是	是	是
能否采用双管板?	是	是	否	否	是	否
管程数	无限制	任何偶数	一程或两程	无限制④	无限制	无限制④
是否可以不用内垫片?	是	是	是	否	是	否

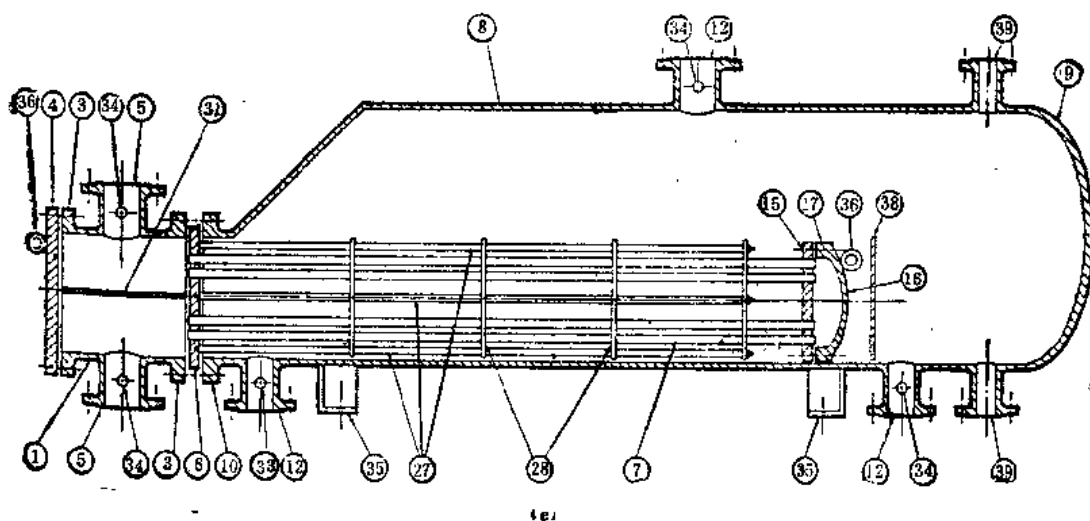
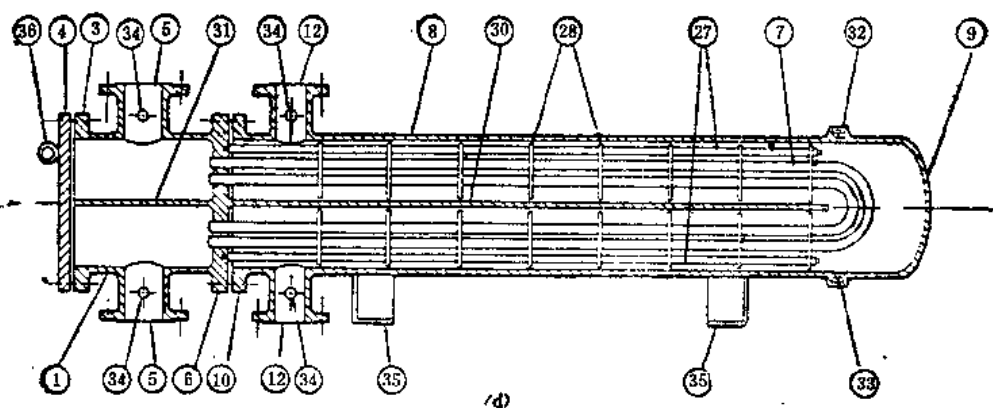
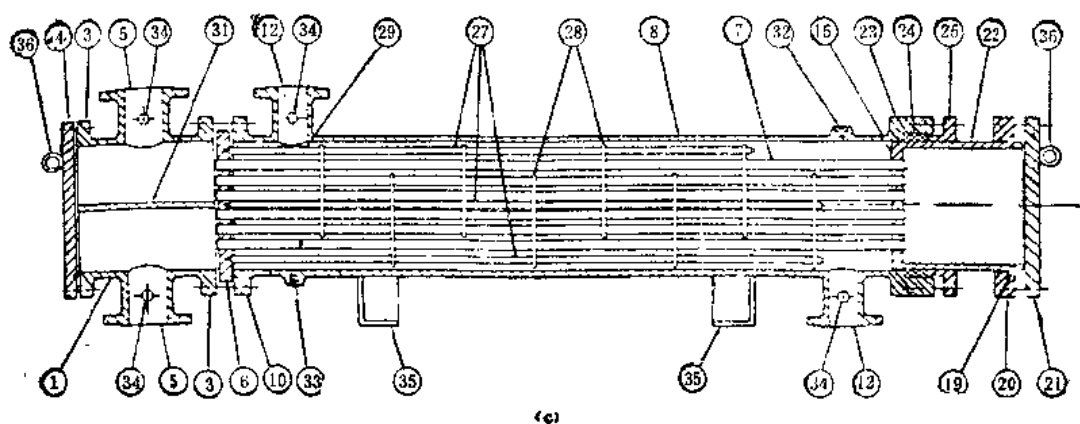
①固定管板与U形管的相对造价差别不大, 用长管时, 其序号将互换。

②若U形管束带有支撑, 使U形管头能分散开, 就能更换内层管子。

③标准的三角形间距不能用机械清洗。若用宽三角形, 间距等于 $2(\text{管径} + \text{清洗道})/\sqrt{3}$ 时, 对于可移动的管束, 可以用机械法清洗, 但这种宽间距不常使用。

④管程数为奇数时, 浮头要用填料连接或用膨胀节。





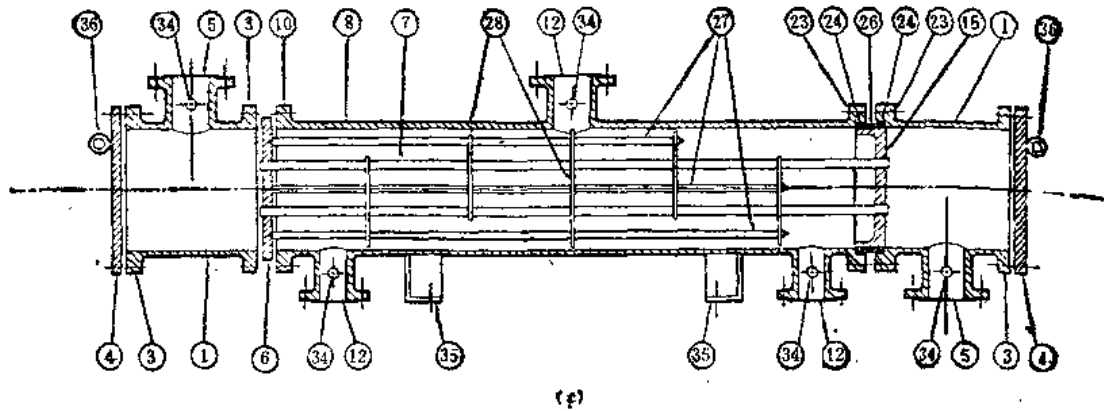


图 2-2 管壳式换热器零部件

(a) 内浮头式换热器 (带有浮头支撑装置), AFS型; (b) 固定管板式换热器, BEM型; (c) 外部填料浮头式换热器, AEP型; (d) U形管换热器, CFU型; (e) 釜式浮头再沸器, AKT型, 属于可抽式浮头换热器; (f) 具有填料式浮动管板及灯笼环的换热器, AJW型 (摘自TEMA标准, 第五版, 1968年) 换热器零部件命名 (图2-2)

- | | |
|---------------------|--------------------|
| (1) 一固定头盖——管箱; | (2) 一固定头盖——封头; |
| (3) 一固定头盖法兰——管箱或封头; | (4) 一管箱盖板; |
| (5) 一固定头盖接管; | (6) 一固定管板; |
| (7) 一管子; | (8) 一壳体; |
| (9) 一壳盖; | (10) 一壳体法兰——固定头盖端; |
| (11) 一壳体法兰——后头盖端; | (12) 一壳体接管; |
| (13) 一壳盖法兰; | (14) 一膨胀节; |
| (15) 一浮动管板; | (16) 一浮头盖; |
| (17) 一浮头法兰; | (18) 一浮头衬托构件; |
| (19) 一剖分剪切环; | (20) 一活套靠背法兰; |
| (21) 一浮头盖——外部的; | (22) 一浮动管板套; |
| (23) 一填料函法兰; | (24) 一填料; |
| (25) 一填料压盖; | (26) 一灯笼环; |
| (27) 一拉杆和定距管; | (28) 一横向折流板或支撑板; |
| (29) 一缓冲挡板; | (30) 一纵向折流板; |
| (31) 一分程隔板; | (32) 一排气接口; |
| (33) 一积液接口; | (34) 一仪表接口; |
| (35) 一鞍式支座; | (36) 一吊环; |
| (37) 一悬挂式支座; | (38) 一堰板; |
| (39) 一液面计接口 | |

(1.6) 可抽式浮头换热器 (见图2.2c)

结构与内浮头式相似, 所不同的是浮头盖直接与浮动管板用螺栓相连接。抽出管束时, 无需拆卸壳盖及浮头盖, 便于检查和维修。但壳内壁与管束的间隙大, 旁流严重, 应加旁流挡板以减少短路。

(1.7) 刺刀管式, 可参阅本书的废热锅炉部分

(2) 管壳式换热器系列的说明

按照我国第一机械工业部和石油、化学工业部的部颁标准、系列, 分为固定管板式与浮头式换热器两部分。现各摘录部分内容作为举例。

许多国家都有换热器的标准和系列。TEMA标准概括地反映了美国管壳式换热器的设计、制造的水平。第六版于1978年出版。此标准除了介绍一般的设计、制造、安装及维修等方面问题外, 还根据石油、化工及一般工业的不同要求, 分别规定了“R”、“B”和“C”等三类管壳式换热器的机械标准, 提供了结构材料, 传热以及其它与设计计算有关的各种图表和数据资料。

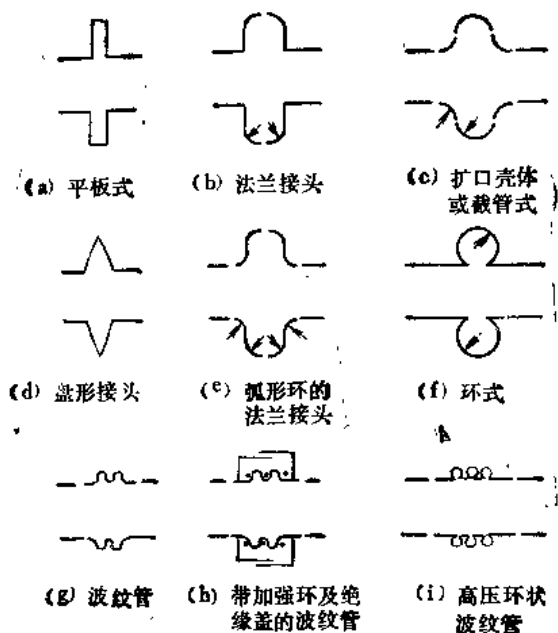


图 2-3 膨胀节

表 2-2 固定管板式换热器基本参数举例

公称直径 D_s mm	管程数 N_p	传热管数量 N_r	传热面积 A, m^2 公称值 计算值				管程通道截面积 m^2		管程流速为0.5m/s时的 流量 $Q, m^3/h$		公称压力 kg/cm^2
			换热管长 L, mm				碳素钢管 $\phi 25 \times 2.5$	不锈钢酸 钢管 $\phi 25 \times 2$	碳素钢管 $\phi 25 \times 2.5$	不锈钢酸钢管 $\phi 25 \times 2$	
			1500	2000	3000	6000					
400	I	109	$\frac{12}{12.0}$	$\frac{16}{16.3}$	$\frac{25}{24.8}$	$\frac{50}{50.5}$	0.0342	0.0378	61.6	68.0	16
	II	102	$\frac{10}{11.2}$	$\frac{15}{15.2}$	$\frac{22}{23.2}$	$\frac{45}{47.2}$	0.0160	0.0177	28.8	31.8	
	IV	86	$\frac{10}{9.46}$	$\frac{12}{12.8}$	$\frac{20}{19.6}$	$\frac{40}{39.8}$	0.00680	0.00740	12.2	13.4	
600	I	269	—	—	$\frac{80}{81.2}$	$\frac{125}{124.5}$	0.0845	0.0932	152	168	10
	II	254	—	—	$\frac{55}{58.0}$	$\frac{120}{118}$	0.0399	0.0440	71.8	79.2	16
	IV	242	—	—	$\frac{55}{55.0}$	$\frac{110}{112}$	0.0190	0.0210	34.2	37.7	25
800	I	501	—	—	$\frac{110}{114}$	$\frac{230}{232}$	0.167	0.174	283	312	6
	II	488	—	—	$\frac{110}{111}$	$\frac{225}{227}$	0.0767	0.0845	138	152	
	IV	456	—	—	$\frac{100}{104}$	$\frac{210}{212}$	0.0358	0.0395	64.5	71.1	10
	VI	444	—	—	$\frac{100}{101}$	$\frac{200}{206}$	0.0232	0.0256	41.8	46.1	

续表

公称 直径 D_s mm	管 程 数 N_p	传 热 管 数 N_T	传热面积 A, m^2				管程通道截面积		管程流速为0.5m/s时		公称压力 kg/cm^2
			公称值 计算值				m^2		的流量 $Q, m^3/h$		
			换热管长 L, mm				碳素钢管	不锈钢耐 酸 钢 管	碳素钢管	不锈钢耐 酸 钢 管	
			1500	2000	3000	6000	$\phi 25 \times 2.5$	$\phi 25 \times 2$	$\phi 25 \times 2.5$	$\phi 25 \times 2$	
1000	I	801	—	—	180 183	370 371	0.252	0.277	453	499	16
	II	770	—	—	175 176	350 356	0.121	0.133	216	240	
	IV	758	—	—	170 173	350 352	0.0595	0.0656	107	118	
	VI	750	—	—	170 171	350 348	* 0.0393	0.0433	70.7	77.9	
											25

注：① 传热面积按下式计算。

$$A = \pi d_o (L - 0.1) N_T$$

式中 A ——计算传热面积, m^2 d_o ——传热管外径, m L ——传热管长, m N_T ——传热管数量

② 通道截面积按各程平均值计算。

③ 介质为20℃的水, 在 $\phi 25 \times 2.5mm$ 的管内, 流速为0.5m/s, 就已达到湍流状态。

④ 折流板间距一般在100mm到600mm之间; 最大不超过换热器壳径, 最小不低于50mm。

表 2-3 浮头式管壳换热器工艺参数举例

型号全名		实际面积 A m^2	管子总数 N_T	管长 L m	流通面积, m^2		折流板总数 N_b	圆缺高 %
系列①	壳面积程② 径积力数				管程 S_i	壳程 S_o		
FA-400-25-40-2 B=150 200 300		24	138	3	0.0122		16 13 10	19.8
16-2 FA-600-130-25-(4) 40 B=150 200 300 430		131③	372 (368)	6	0.0328 (0.0162)		35 27 19 13	19.8
16-2 FA-800-245-25-(4) B=150 200 300 450		245	700 (696)	6	0.0618 (0.0307)		34 27 19 14	21.6