

双相变换热器气液均匀分配特性及 典型结构研究的新进展

吴裕远, 吴铁晖, 陈流芳

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 介绍了低温两相流板翅式双相变换热器的结构和特点, 回顾了板翅式换热器两相流体入口分配结构对其气液分配特性的影响. 指出了传统的“先混合、后分配”方法的缺陷, 基于单相流体易于均匀分配的物理特性, 提出了“先分配、后混合”的新方法和新结构. 应用该新方法和新结构于国产化的乙烯冷箱后, 其冷端传热温差降低到仅为 3 K. 应用该新技术的宝钢等大型制氧装置中的新型高效冷凝蒸发器, 其传热系数达到了 $925.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 比国际上最先进的指标提高了 48.97%, 产品性能优于国内外同类产品.

关键词: 低温两相流; 板翅式; 双相变; 换热器; 气液均匀分配; 乙烯冷箱

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)04-0383-06

New Progress in Researches on Gas-Liquid Uniform Distribution Characteristic and Typical Structure Design of Cryogenic Plate-Fin Heat Exchangers

Wu Yuyuan, Wu Tiehui, Chen Liufang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The special configuration and characteristic of the cryogenic plate-fin heat exchangers with double phase changes are introduced. The researches for investigating the influence of the inlet structure of the heat exchanger for two-phase flow on vapor-liquid maldistribution are reviewed. The disadvantage of the traditional vapor-liquid distribution method is pointed out, in which the mixing of vapor-liquid is earlier than the distribution. Because the single-phase fluid is easier distributed uniformly, the new method and the new structure in which the distribution is earlier than the mixing were proposed. Using the new method and the new structure to manufacture the cold box of large ethylene plant, the heat transfer temperature difference in cold end of the heat exchanger was reduced to 3 K. The large condenser evaporator in oxygen plant in Baoshan Iron-Steel Company was also manufactured by using the new method. Its heat transfer coefficient reached $925.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ which was increased by 48.97% compared with the most advanced level in the world. The performance of the products is superior to the products home and abroad.

Keywords: cryogenic two-phase flow; plate-fin; double phase change; heat exchanger; gas-liquid uniform distribution; ethylene cold box

板翅式换热器从 20 世纪 50 年代开始应用于深冷技术、空气分离及化工流程等装置领域中, 具有结

构紧凑、传热系数高等优点. 低温两相流板翅式双相变换热器(简称低温双相变换热器或低温换热器)是制氧、乙烯等大型装置的核心设备. 其重要性在于: 制氧装置所生产的全部高纯度氧气和高纯度液氮及乙烯冷箱装置所生产的乙烯产品, 均需在换热器内通过上百层组元、数万个蒸发与冷凝通道之间的高效换热才能完成.

1 低温两相流板翅式双相变换热器的特点

研究表明^[1]: 在相同的传热温差下, 液氮温度下的传热所引起的熵增是室温下的 10 多倍. 可见, 在相同的传热温差条件下, 低温传热所引起的不可逆损失要比室温下大得多. 所以, 在低温双相变换热器的设计中, 尤其对传热温差提出了很苛刻的要求.

实验研究表明^[2]: 在低温双相变换热器中, 只要有某一个蒸发通道的液体量分配较少, 就会立即出现液体“蒸干”现象, 传热温差急剧上升, 换热器内的传热将会立即恶化, 冷凝通道内的高温高压气体就不可能被冷凝液化成为液体, 该部分的“蒸发与冷凝”换热组元也将完全失效, 从而导致换热器的总体换热效率大大降低. 因此, 如何把液相流体均匀分配到低温换热器的每一个蒸发通道内, 是低温换热器能否有效工作的前提.

板翅式换热器中进行热量交换的各股流体首先通过换热器的一段较窄的入口总管, 然后进入换热器的封头, 而后再由封头进入导流翅片通道, 最后才能进入换热器内众多的各层通道中, 结构示意图图 1. 因此, 国内外的这类换热器普遍存在严重的气、液两相流体分配不均匀的现象. 一般来说, 气液两相流体特别是其中的液相部分, 如果在各通道之间出现分配不均匀现象, 对小型换热器换热效率的下降所造成的影响相对较小, 但是对大型低温板翅式双相变换热器换热效率的下降所造成的影响将会非常突

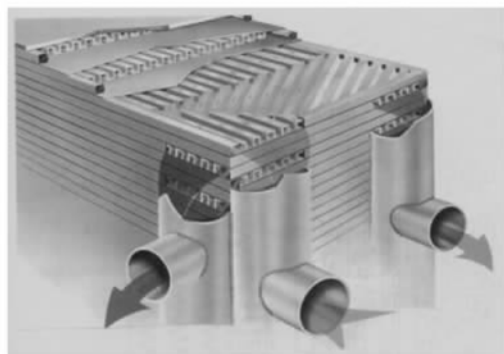


图 1 板翅式换热器结构示意图

出, 一般要下降 20%~40%. 研究表明: 气液混合流体与单相流体相比, 其分配不均匀现象对换热器的影响更为突出, 由于低温流体的气相与液相的体积之比约为 600:1. 实验表明^[3]: 在任何通道中只要液相流体多分配 10%, 那么这额外的 10% 的液体蒸发后体积膨胀, 将严重干扰换热器各通道内的流量和换热量, 并导致换热效率大幅度下降(仅为原设计的 60%). 同时, 换热器的平均换热温差也有可能增大, 这将进一步降低换热器的性能, 增加能源消耗.

在天然气、石油化工等领域中, 天然气、石油气液化和分离装置中常会遇到气液两相流体混合进入换热器的情况. 例如, 乙烯装置中的裂解气冷却器、所有的再沸器和冷凝器, 尿素装置中的尿素蒸发器, 空气分离装置中的冷凝蒸发器等. 研究表明, 气液两相流体与单相流体(单相气体或单相液体)相比, 其流体分配的不均匀现象更为突出, 对换热器性能的影响也就更大, 尤其是对多组分两相混合物, 若出现气液分配不均匀的情况, 使沸腾与冷凝在不同的气液平衡条件下进行, 致使其相变换热系数大不相同, 将导致其流动、换热及传质特性大大偏离设计工况, 甚至产生换热器失效的严重后果.

综上所述表明: 要解决好气液两相流体进入换热器时所产生的流体分配不均匀现象, 必须在气液两相流体的入口处与换热器内的各层通道之间, 设置有效的气液两相流体的分配机构, 才能将气液两相流体均匀地分配到各层通道内. 为此, 国内外学者对板翅式换热器内的均匀分配问题进行了一系列长期的研究^[2-3]. 气液两相流体在板翅式换热器中的分配问题可分为以下 3 类.

(1) 如何保证两相流体在板翅式换热器各单元之间的均匀分配. 由于制造方面的困难, 对于大热负荷的板翅式换热器装置, 需由几个换热单元串联或并联组合而成, 这样就出现了集管内的两相流体如何向各换热器单元的总管均匀分配的问题.

(2) 如何消除两相流体在板翅式换热器内各层通道之间的不均匀分配现象. 造成换热器内各层通道之间的流体不均匀分配现象, 主要是由于两相流体在入口形式上的不同、封头设计的不合理或是各层通道的阻力不同所致. 一般较大的板翅式换热器单元均有上百或更多层冷凝、蒸发通道, 如何使两相流体完全均匀地分配到各层板翅式通道之中, 这是传热领域至今尚未解决的难题.

(3) 如何保证气液两相流体在同一层通道内, 不仅在宽度方向(横向), 而且在长度方向(纵向)都达

到均匀分配和稳定流动。

在这3类问题中,最为突出的是第2类问题。为此,国内外的研究者在改善板翅式换热器内各层通道之间两相流体的不均匀分配状况方面,做了许多尝试和努力,开展了相关的研究工作。

2 两相流体的入口形式对气液均匀分配特性的影响

Robertson 指出^[2]改善板翅式换热器内分配不均匀的方法之一是,将不均匀的气液两相流体来流,不是直接引入换热器内进行相变换热,而是先将其送入气液分离器内,分离成气相流体和液相流体,然后将气液两相流体同时送入换热器的入口封头处混合。将液体喷头放入进口封头中,在入口封头处,液相流体立即被离散成小雾滴状弥散在气相流体中,形成雾状气液两相均匀混合流体,然后送入导流翅片中,分配到各层通道内进行蒸发,如图2所示。图2中所示的喷管经过特殊的工艺加工,非常精致。

西安交通大学低温工程研究所针对30万t乙烯成套设备进行了研究开发,承担了国家机械委“七五”攻关课题“冷箱传热计算方法研究”,该项目涉及22种工质、有相变及无相变板翅式多股流传热计算等内容。同时,中国石油化工总公司在“八五”期间针对“30万t合成氨成套设备高压板翅式换热器的设计”的开发研究工作,下达“8.7 MPa 板翅式换热器研究”开发项目。西安交通大学低温工程研究所承担了“板翅式换热器两相流入口分配结构研究”等课题,确定了有相变及无相变物流分配的实验方法,建立了相关的实验台,提出了孔板式封头、水帘式封头、打孔管式封头3种物流分配封头入口结构。该课题组对这3种物流分配封头入口结构的分配特性进行了实验研究和理论计算^[4]。图3显示了这3种封头入口结构。

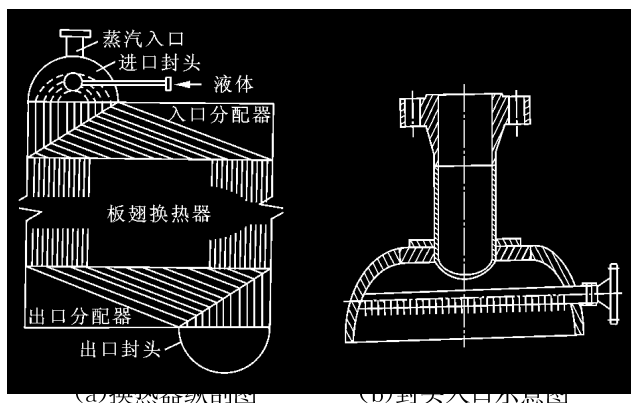


图2 喷管结构示意图

图4和图5分别显示了气液两相流干度为0.18时3种封头的气相流量相对偏差 $D(G)$ 和液相流量相对偏差 $D(L)$ ^[4]。这两种相对偏差定义为

$D(G) = (G' - G_0)/G_0$; $D(L) = (L' - L_0)/L_0$ 。
式中: G_0 、 L_0 分别为16个小区的气相和液相的平均流量; G' 、 L' 分别为各个小区的流量。

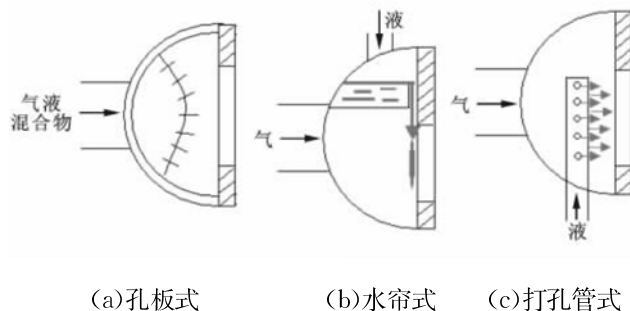


图3 3种封头入口结构^[4]

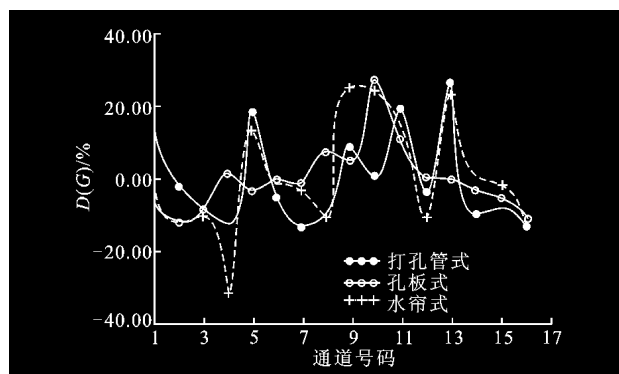


图4 气相流量相对偏差^[4]

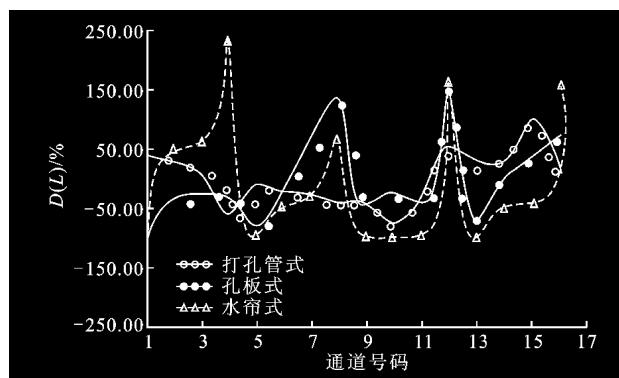


图5 液相流量相对偏差^[4]

由图4、图5可以看出:①水帘式封头入口结构分配特性较差,打孔管式封头入口结构分配特性较好;②这3种封头入口结构液相分配特性明显比气相分配特性差;③即使是打孔管式封头入口结构,其液相流量相对偏差也多处超过60%以上。

所以,气液两相流体在封头入口处混合后进入导流片这种分配方式,不能解决气液两相流体的均匀分配问题。上述技术的主要缺陷在于:当气液两相流体在换热器的入口封头处汇合时,所形成的弥散

性雾状气液两相流体进入导流翅片后,气液两相流体在导流翅片中的流动方向急剧改变,在离心力的作用下,其中密度较大的液相流体被甩向弯道外侧,又重新与气相流体分离,从而重新造成了气液两相流体在各层通道中的不均匀分配问题。

3 气液两相流体分配新机理

根据流体力学的基本原理^[5],液体或气体单相流体在遇到流向发生突变时,尽管单相流体也受到弯道处离心力的作用,但由于单相流体内二次流的存在,当它们经过弯道外侧时发生相对积聚的潜势较小。因此,当气液单相流体单独流经导流机构时,弯道内侧与外侧通道之间的液体流量或气体流量的大小相差很小,所以气液单相流体在通道中很容易实现各自流体的均匀分配,非单相流体(两相或三相以上的多相流体)则不具备这种物理特性。

为了克服上述现有技术的缺陷,作者提出一种低温两相流气液均匀分配板翅式相变换热器^[6]。这种相变换热器利用单相流体容易均匀分配的特点,将来流气液两相流体先行分离成单相气体和单相液体,分配到各自的气相流体导流翅片和液相流体导流翅片内,接着让这些单相流体分别进入各层板翅式换热元件下部所设的竖直翅片气相流体通道和液相流体通道中,然后穿过隔板上所开设的特殊槽孔,通过高速气流的引射作用使气液两相流体在蒸发换热元件中特别设计的前后、左右、上下畅通的横向无翅片大通道内均匀汇合。最后,经充分混合后的气液两相流体被均匀分配到各层上部的板翅式蒸发通道中,自下而上流动,沸腾蒸发,同时吸收相邻冷凝通道内高温气体的热量,在上升过程中气液两相流体进一步均匀混合。简而言之,通过分析国外流行的对气液单相流体采取“先混合、后分配”的落后方法的弊端,提出对气液单相流体采取“先分配、后混合”的新方法和新结构。

4 气液两相流体分配新结构

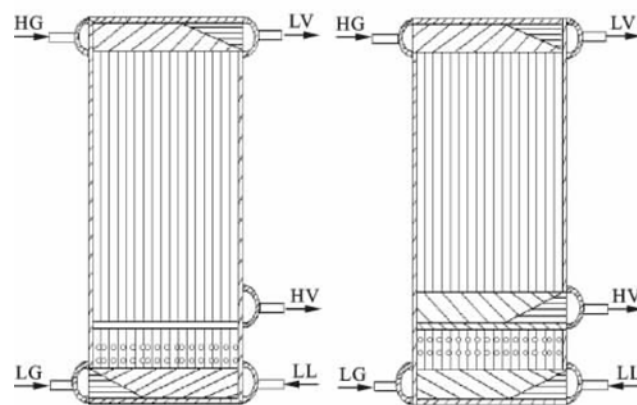
4.1 从下部进液、隔板圆孔注液

此结构用于常规尺寸的相变换热器。在现行的国内外换热器中,气液两相流体均是同时流经同一个导流机构,进入换热器内。这样,气液两相流体中的液相流体就会在拐弯处因离心力的作用而重新被分离,从而使液相流体分配不均匀,严重影响换热器效率的提高。

如图6所示,蒸发元件与冷凝元件均为A型结

构。气液两相流体均分别流经气相导流翅片和液相导流翅片,进入换热器内。这样,单相的液相流体在拐弯处就不会因离心力的作用而重新分离,也就不会发生因液相流体分配不均匀直接影响换热器效率提高的问题。

在图6所示结构中,利用在隔板上开设流通面积较小的圆孔,可有效限制液体的注入量,维持液体在整个时段内所注入流量具有均衡特点,特别适用



(a)蒸发元件(A)

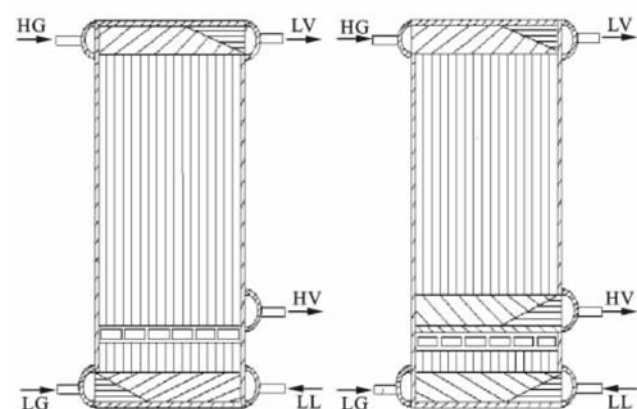
(b)冷凝元件(A)

图6 下部进液、隔板圆孔(方孔)注液结构

于气体容积流量大于液体容积流量,但液体容积流量相对较少,液体与气体的容积流量之比为 $1/3 \sim 1/2$ 的换热器场合。

4.2 从下部进液、隔板矩形槽孔注液

如图7所示,蒸发元件与冷凝元件均为B型结构。该结构适用于气体容积流量大于液体的容积流量,并且液体流量相对较大的换热器场合,液体与气体容积流量之比为 $1/2 \sim 1/1$ 。



(a)蒸发元件(B)

(b)冷凝元件(B)

图7 隔板矩形槽孔注液结构

4.3 封条开孔直接注液

如图8所示,蒸发元件为C、D型结构,冷凝元

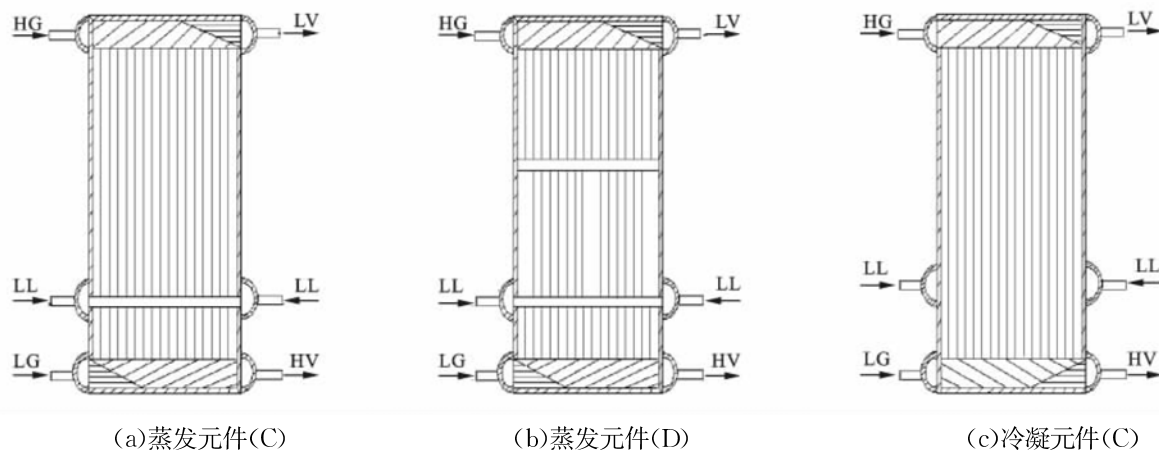


图8 封条开孔直接注液的气液结构

件为C型结构.这种封条单路、多路开孔及纵向、横向多路注液的气液均匀分配新结构,适用于长通道的换热器.当换热器内液体容积流量等于或大于气体容积流量时,此结构解决了确保特长(2~4.8 m)换热元件中心处充分注液的难题.换热器上部蒸发通道和元件中心处始终保持湿润,绝不会发生传热恶化,并使大部分蒸发通道形成环状流流型,从而使换热器装置处于持续高效的最佳传热状态.

4.4 封条开孔并设置横向打孔圆管或打孔翅片注液

如图9所示,蒸发元件为E型结构,冷凝元件为C型结构.这种结构适用于特长、特宽通道的换热器,解决了换热器的液体容积流量等于或大于气体容积流量时,如何保证对特长(3~4 m)、特宽(0.6~1.4 m)换热元件中心处充分注液的难题.

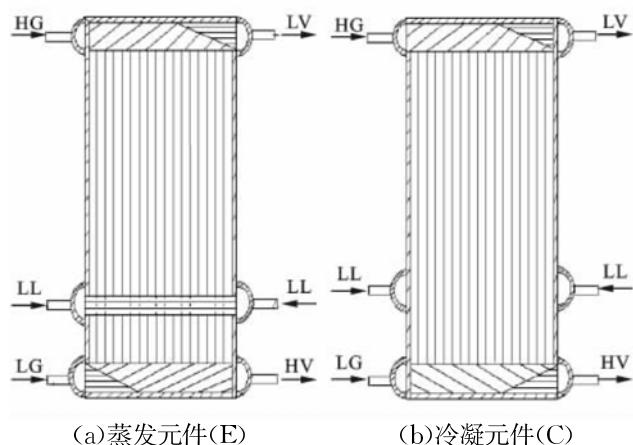


图9 封条开孔并设置横向打孔圆管或打孔翅片注液结构

此结构有效增强了芯体强度,解决了我国30多年来一直未能解决的乙烯冷箱气液均匀分配和芯体高压强度相互匹配的一大难题,同时,大大提高了换热器中冷凝元件换热面积的有效利用率,显著提高了换热器的换热效率.

4.5 上下贯通的、特长低翅片冷凝元件结构

该结构为在上下贯通的、特长低翅片冷凝元件的同侧匹配有两个上下均为低翅片沸腾通道的组合式蒸发元件气液均匀分配新结构.

此种新结构有效减小了传热温差,解决了国内外换热器总传热温差居高不下的世界难题,突破了同类产品的国际最低温差记录,获得的传热温差仅为0.57 K.

4.6 组合式蒸发元件结构

上下贯通、特长低翅片冷凝元件匹配一个上部为单层高翅片沸腾通道、下部为双层低翅片沸腾通道的组合式蒸发元件结构.此结构有利于排出易爆物,可防止易爆物积累.

此种结构解决了有效防止换热器中上万个蒸发通道易爆物的聚集和堵塞的难题,使气液两相流体在上部蒸发通道获得更大空间、更充分的混合,实现气液均匀分配,可进一步提高换热效率,并获得了当今最小的传热温差0.57 K.

4.7 流动式双液氧池、贯通式冷凝通道结构

针对降低液氧池中易爆物浓度的要求,采取了上液池不断向下液池注入新鲜液氧、下液池不断向外排出体积分数为1%液氧循环总量的新结构和新方案,如图10所示,创造了同类装置连续运行时限的国内外记录.

5 气液流体分配新结构的实施效果

(1)根据不同的运行工况和负荷,杭州杭氧股份有限公司采用不同的气液流体分配新结构,使得换热器的冷端传热温差明显降低.金山石化的10个台位换热器的冷端温差大多降到了3 K,见表1.

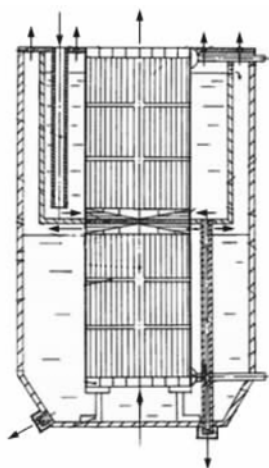


图 10 流动式双液氧池图

表 1 金山石化 10 台位换热器冷热端温差表

台位标号	EA2310	EA2319	EA2320	EA2646	EA2647
热端温差/K	29.0	26.0	17.4	7.7	16.7
冷端温差/K	2.9	2.3	5.7	3.0	3.0

台位标号	EA2648	EA2649	EA2670	EA2671	EA2381
热端温差/K	16.6	21.2	37.5	20.6	19.2
冷端温差/K	1.9	3.7	4.5	2.7	4.0

(2)杭州杭氧股份有限公司将纵横向多路补液及气液两相均匀分配新结构,成功地应用于乙烯冷箱两相流体及各种介质两相流体的均布结构设计中,实现了我国乙烯冷箱国产化。新产品传热性能好,换热效率高,增产潜力大,乙烯产量超过原国外进口装置的 55%。新结构还成功地解决了大型制氧装置冷凝蒸发器中特长、特宽通道内气液两相流体均匀分配的关键问题,大大降低了通道中易燃易爆杂质的积聚及堵塞的可能性,显著提高了新装置的运行安全性能。新产品连续安全的运行时限比原产品提高 3 倍多,总传热系数达到 $925.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,比国际最先进指标提高了 48.97%,比当今更先进的类环状流新主冷的传热系数又大幅度提高了 22.69%,其比体积、比传热面积均比同类产品明显减小。

(3)杭州杭氧股份有限公司采用流动式双液池及特长低翅片冷凝通道上下贯通新结构,成功研制出 $6\,500 \sim 30\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 大型制氧装置新主冷产品,并成功实现对宝钢 $30\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 大型进口制氧装置

原主冷技术改造,显著减小了原主冷的体积,使其可直接安装于上下塔之间,大大简化了配管,降低了成本。新装置具有启动快、运行稳定、易于调节、操作弹性好等特点。系统意外停车后,恢复正常供氧的时间仅为原产品的 1/5。

6 结 论

(1)单相流体经过导流机构容易均匀分配到各层通道,将气相和液相流体分别经过各自的导流机构进入芯体底部,然后气液在芯体底部混合,采用这种“先分配、后混合”的新方法和新结构,容易达到气液均匀分配的目的。

(2)从封条开孔向芯体的中部多路注液,保证了芯体长度方向气液均匀分配。

(3)从芯体的中心部分的宽通道,向芯体的横向注液,保证了芯体横向的气液均匀分配。

(4)对于板翅式双相换热器的气液分配问题,液体的均匀分配是关键。

(5)气液分配优劣可以从换热器的冷端传热温差是否降低来判定。

参考文献:

- [1] 吴裕远,陈流芳.最新低温技术“类环状流微膜蒸发板翅式冷凝蒸发技术”成果介绍[J].中国科学基金,2002,16(6):348-350.
Wu Yuyuan, Chen Liufang. An introduction of the condensing and evaporating technique of microfilm evaporation with quasi-annular flow in plate-fin heat exchanger [J]. Science Foundation in China, 2002, 16 (6):348-350.
- [2] Kitto J B Jr, Robertson J M. Effect of maldistribution of flow on heat transfer equipment performance[J]. Heat Transfer Engineering, 1989, 10(1):18-25.
- [3] Clark J, Thorogood R. Cryogenic fundamentals [M]. New York: Academic Press, 1971:150-151.
- [4] 巫江虹.板翅式换热器分配特性研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1996.
- [5] 费祥麟,胡庆康,景思睿.高等流体力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989.
- [6] 吴裕远,陈流芳.低温两相流气液均匀分配板翅式相变换热器:中国,ZL 02 1 45563.5[P].2006-01-11.

(编辑 杜秀杰)