

·成果简介·

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

吴裕远 陈流芳

(西安交通大学制冷与低温工程研究所,西安 710049)

[关键词] 类环状流,微膜蒸发,板翅式,冷凝蒸发

在国家自然科学基金资助下,本项目开展了低温流体沸腾与冷凝传热强化基础性研究,发明了类环状流微膜蒸发板翅式冷凝蒸发技术,研制成功新型低温冷凝蒸发器,取得了显著的经济效益和社会效益。这一研究成果 2001 年获国家技术发明奖二等奖。本项目由我校与杭州制氧机集团有限公司共同合作完成。

1 项目背景

低温冷凝蒸发器(简称换热器或主冷)是一种间壁式双工质相变换热器。在其中,低温液体吸收热量,沸腾蒸发成气体,高温气体放出热量,冷凝成液体,完成热量交换。

根据热力学第二定律,传热过程中传热温差的存在必将引起系统内的不可逆熵增和有用功的损失。这种损失,与传热温差成正比,与两种流体的绝对温度的乘积成反比。所以,在保持有用功损失相同的条件下,液氮温度(77K)下的传热过程与室温下(300K)的情况相比,后者传热温差必须小十几倍。

但是对于有相变的传热过程,很难减小其传热温差。根据传热学理论,液体沸腾传热需要有一定的过热度,气体冷凝传热也需要有一定的过冷度。因此对于双相变换热器,其最小传热温差也必须大于这两者之和。然而采用传统技术的低温换热器,其传热温差过大(大于 1.3K),致使整个装置的能耗过大。很显然,要降低传热温差,首先是要降低沸腾传热的过热度和冷凝传热的过冷度,其唯一的出路是寻求新的传热机理和新的传热结构。

随着冶金、石油、化工等工业的迅速发展,从节

能降耗的迫切需要出发,国际上的化工及空分等大型装置正在向超大型化方向发展。但传统的列管式主冷、板翅式主冷,其传热机理落后,换热器的传热系数偏小,导致精馏塔的直径过大,超过铁路运输的允许标准,塔设备只能到现场安装。这样不但安装质量难于保证,而且成本高,能耗大^[1,2]。因此,现代装置的大型化迫切要求换热器体积的紧凑化。

由传热学可知,换热器总传热量 Q ,传热系数 h ,传热温差 DT ,单位体积内的传热面积 f 和换热器体积 V 之间,存在如下关系:

$$Q = h \cdot DT \cdot f \cdot V$$

由公式可知,在换热器总传热量 Q 不变的情况下,要显著降低换热器的传热温差 DT 和体积 V ,必须从大幅度提高传热系数 h 和单位体积内的传热面积 f 入手,其唯一的出路也是寻求新的传热机理和新的传热结构。

另外,主冷是制氧装置中最容易发生乙炔爆炸的地方,主冷流动性能的好坏直接影响制氧装置中乙炔的集聚。因此如何进一步提高主冷的传热性能及安全防爆性,一直是制氧领域专家们的主攻目标。

上述难题一直是当今国际上空分、石油、化工等领域的装置在大型化发展中迫切需要解决的关键问题。本项目已成功地解决了上述难题的技术关键。

2 主要研究成果

经过 15 年的努力,取得的主要研究成果如下:

2.1 首创狭缝通道中类环状流微膜蒸发沸腾传热新机理及新结构,显著强化了沸腾传热

传统的泡状沸腾传热机理,通道宽,以液相流动

本文于 2002 年 9 月 12 日收到。

为主,液膜厚,因此,沸腾传热过热度大,传热温差大,传热系数小。本项目突破了传统的泡状沸腾传热机理,首创了以气相流动为主的类环状流微膜蒸发沸腾传热新机理及新结构。

本项目的实验研究表明:狭缝通道中的液体受热沸腾蒸发,在热虹吸驱动力的推动下,通道内的气泡不断产生并聚合。当聚合气泡的直径大于通道间隙时,圆形气泡就会受挤压变形成为扁平气泡,其底部存在一层厚度仅为微米级的液膜(微液膜),这层微液膜随扁平气泡的上升而随之向上流动。两相流体在狭缝通道中,以气相为主,从而形成了狭缝通道中的类环状流微液膜蒸发^[1]。

本项目的研究表明:由于表面张力的影响,液体分子在越过扁平状液膜表面向气泡内的蒸发过程,与越过圆形气泡凹球面液膜表面的蒸发过程相比,前者所需的沸腾过热度小。气泡变形越大,液膜表面的曲率半径越大,扁平度也越大,则所需的过热度越小,沸腾传热温差也相应地更小。

研究表明:气泡底部与加热壁面之间的微液膜的导热热阻,是构成沸腾传热热阻的主要部分。两相流体在狭缝通道中,绝大部分呈现类环状流流型,以气相流动为主,沸腾气泡受挤压变形越大,其底部壁面上的微液膜层就越薄,沸腾传热的导热热阻也就越小,则沸腾传热系数就越大^[1,2]。

研究表明:狭缝间隙高度、宽度和通道长度等主要结构尺寸对气泡的变形和沸腾传热性能的影响重大,狭缝间隙大小对沸腾传热强化起主导性作用。在相同的热流密度下,狭缝间隙越小,则传热温差越小,沸腾传热系数越大。其沸腾传热系数比一般光管内流体的沸腾传热系数高出5—9倍,优于美国公司开发的烧结多孔表面管的传热性能^[3,5]。

因此,本项目首创的狭缝中类环状流微膜蒸发沸腾传热新机理及新结构,既能显著地降低沸腾传热温差,又能大幅度提高沸腾传热系数,同时还可增加单位体积内的传热面积 f ,从而大幅度地减小换热器的体积,是一种理想的沸腾传热新机理及新结构。

2.2 首次发现传热亢进现象,首创狭缝通道多路补液新方法,显著强化了沸腾传热

本项目的研究首次发现:对一定的狭缝间隙和热流密度,当继续增加热流密度时,会出现传热温差不但不增加,反而减小的现象。这一现象被命名为传热亢进现象^[1,3,9]。可视化实验显示,此时柱塞流和环状流流型占据了绝大部分沸腾通道。我们把传

热亢进现象发生时占主导地位的流型称为类环状流流型,以区别于圆管中的环状流流型。

实验结果表明:狭缝通道中出现传热亢进现象之后,当继续增加热流密度时,通道上部由于供液不足,会出现微液膜层干涸,继而出现“蒸干”传热恶化现象,传热温差大幅度上升。狭缝通道间隙越小,出现传热亢进的热流密度就越小。临界热流密度小是狭缝通道沸腾传热的一个弱点^[2,6]。

本项目首创狭缝通道纵横向多路补液新方法,成功地克服了狭缝通道临界热流密度低的弱点,并充分利用和发挥了沸腾传热亢进现象的突出优势。本项目利用高速上升气流具有引射液体的特性,巧妙地采取从通道中部抽吸液氮的方法。结果即使在很大的热流密度下,狭缝上部通道也能始终处于最佳的类环状流区,使换热器的平均换热系数达到最大值,并保持很小的传热温差。测试结果显示:在热流密度高达 $10\ 000\text{w}/\text{m}^2\text{K}$ 时,所测试样的传热温差均小于 1.2K ^[3,7]。

此外,本项目的多路补液新方法还保证了主冷具有良好的流动性能,有效地避免了主冷中乙炔的集聚,从而显著地提高了主冷的安全防爆性能。

2.3 首创非平衡态紊流液膜冷凝传热新机理及新结构,显著强化了冷凝传热

传统的努谢尔特冷凝传热机理建立在平衡态层流液膜冷凝传热机理基础之上,该机理认为冷凝液膜处于层流流动。

本项目的研究表明:氮气冷凝时主流蒸汽与过冷液膜表面之间存在一层过渡气膜层,因而产生了附加的冷凝传热热阻,它与主流蒸汽的流动雷诺数的平方根成正比。由此可见,只要设法增加氮气的流动雷诺数,必将增强氮气对于冷凝通道中过渡气膜层的扰动作用,有利于撕裂冷凝液膜,促使处于层流流动的冷凝液膜迅速向紊流流动转变,从而有效地降低冷凝传热所需的过冷度,大幅度地提高冷凝传热系数^[4]。

测试结果表明:本项目采取降低翅片高度及翅片节距的办法,使氮气的流动雷诺数比原来提高1.5倍以上,冷凝传热系数超过 $3\ 500\text{w}/\text{m}^2\text{K}$,比德国林德公司的设计标准提高2.3倍,并达到沸腾侧传热系数的2倍。这一结果,为采用一个冷凝通道耦合两个蒸发通道的新型冷凝蒸发器的设计提供了理论依据,这种1+2的耦合结构可以获得很小的传热温差^[4,8]。

2.4 研制出新型冷凝蒸发器,新产品技术性能指标国际领先

应用新型低温技术由西安交通大学负责技术和结构设计,杭州制氧机集团有限公司负责工艺设计和制造,共同研制出用于 $150\text{m}^3/\text{h}$ 和 $6\,500\text{m}^3/\text{h}$ 的新型高效冷凝蒸发器32台,配套大小型制氧装置33套。所配套制氧装置安全、高效、稳定运行,最长运行时间已超过5年。

所研制的用于 $150\text{m}^3/\text{h}$ 制氧装置的新型冷凝蒸发器产品,经原机械工业部气体分离与液化设备产品质量监督检测中心检测,其传热系数比德国林德公司的设计标准提高21.6%,比国内老产品提高50%,体积和重量均减少1/3,传热温差仅1.16K,降低制造成本39%,氧产量提高20%。已完全取代工艺复杂、成本高、产生有毒气体、污染环境的老产品^[4]。

所研制的用于杭州钢厂 $6\,500\text{m}^3/\text{h}$ 制氧装置的新型冷凝蒸发器,比林德公司公司的设计标准提高37.9%,传热温差仅为0.57K,为国内外同类装置中最小的温差(林德公司的传热温差为1.2—1.4K),氧产量比老产品提高10%—20%。

2001年7月,由国家奖励办公室组织的专家组对该新产品进行了实地考察。专家组对新产品的技术指标给予了高度评价,对新产品在停车后只需20分钟就能恢复炼钢供氧的优越运行性能尤为赞赏,而老产品至少需3小时。

2.5 新技术取得显著经济社会效益

本项目研制的新产品,制造厂已累计新增直接产值206.7万元,节约制造成本91.5万元,所配套装置新增产值1.035亿元,新增利税3760万元。用户厂因装置氧产量的提高而增加的收入达2592万元/每台·年,年均节电67万元。

本项目已获国家发明专利两项,实用新型专利一项,已取得显著的经济效益。

本发明是我们制氧领域50年多来第一项拥有

自主知识产权、处于国际领先水平的最新低温技术,本发明的新产品操作方便、启动快、运行稳定、安全可靠、无污染、无三害,其性能指标全面优于国内外所有的同类产品,具有高效、节能、安全、紧凑、环保,成本低,操作弹性大、应用面广等显著优点。

3 应用前景展望

本技术还可广泛应用于石油、化工等领域的大型乙烯装置中的丙烯、乙烯热虹吸蒸发器,合成氨装置中液氮洗塔冷凝蒸发器,大型硝氨装置中的硝氨蒸发器,大型尿素装置中的尿素蒸发器,以及天然气液化装置中的冷凝蒸发器等等,应用前景十分广阔。

参 考 文 献

- [1] Chen L F, Wu Y Y, Liu Y Z et al. Zhang The study on performance of heat transfer in a quasi-annular flow condenser-evaporator. *Cryogenics* v39 1999, (3):209—216.
- [2] 吴裕远, 陈流芳, 杜建通等. 液氮在狭缝中热虹吸两相流传热强化实验研究. *西安交通大学学报*, 1994, (9):104—110.
- [3] 陈流芳, 吴裕远, 张玉文等. 板翅式单元液氮中微膜热虹吸液池沸腾的实验研究. *西安交通大学学报*, 1995, (5):34—38.
- [4] 陈流芳, 吴裕远, 刘永忠等. 新型板翅式冷凝蒸发器的传热特性研究. *西安交通大学学报*, 1997, (5):64—69.
- [5] Chen L F, Peng S Y, Pan C H et al. The Experimental Research on Microfilm Thermosiphon Boiling Heat Transfer in a Narrow Channel. *Cryogenics*, v30 ICEC13 Supplement 1990(9):287—291.
- [6] Wu Y Y, Yang D W, Chen L F et al. The Experimental Research on the Artificial Activation of Thermosiphon Microfilm Two Phase Flow in the Liquid Nitrogen. *Cryogenics*, v32 ICEC14 Supplement 1992, (9):312—315.
- [7] Wu Y Y, Peng S Y, Chen L F et al. The Threshold Value of Heat Flux for Thermosiphon Microfilm Heat Transfer with the Testing Sample Partially immersed in the Liquid Nitrogen. *Cryogenics* v32 ICEC14 Supplement, 1992, (9):300—303.
- [8] Wu Y Y, Liu Y Z, Chen L F et al. Heat Transfer Performance Test of a Prototype Plate-Fin Condenser-Boiler for Industrial. *Cryogenics* v32 ICEC14 Supplement, 1992, (9):268—271.
- [9] Wu Y Y, Lu Y, Chen L F et al. Boiling Heat Transfer Enhancement of Two Phase Flow in Lunate Channel. *Cryogenics* v34 ICEC 15 Supplement, 1994, (6):363—356.

AN INTRODUCTION OF THE CONDENSING AND EVAPORATING TECHNIQUE OF MICROFILM EVAPORATION WITH QUASI-ANNULAR FLOW IN PLATE-FIN HEAT EXCHANGER

Wu Yuyuan Chen Liufang

(Xi'an Jiaotong University, xi'an 710049)

Key words microfilm evaporation, quasi-annular flow, plate-fin heat exchanger