

蒸发式冷凝器的应用与研究^{*}

华南理工大学 吴治将[☆] 朱冬生 蒋 翔 涂爱民

摘要 分析了蒸发式冷凝器的应用及研究现状,介绍了国内三种主要蒸发式冷凝器的特点,总结了蒸发式冷凝器使用中存在的问题并提出了解决方法,展望了蒸发式冷凝器的发展方向和应用前景。

关键词 蒸发式冷凝器 应用 传热管

Application and research of evaporative condensers

By Wu Zhijiang[★], Zhu Dongsheng, Jiang Xiang and Tu Aimin

Abstract Analyses the application and research of evaporative condensers, describes the characteristics of three most common evaporative condensers in China. Summarizes problems in their applications and accordingly proposes the solutions. Presents the development prospects and further applications.

Keywords evaporative condenser, application, heat transfer tube

[★] South China University of Technology, Guangzhou, China

0 引言

我国水资源非常紧张,工业用水缺水现象尤为严重,随着国民经济的发展,节约用水成为重要的问题^[1-2]。蒸发式冷凝器主要是利用冷却水蒸发时吸收潜热而使制冷剂蒸气凝结,制冷剂蒸气在管内凝结时放出热量通过油膜、管壁及污垢传给管外的水膜,再通过水的蒸发将热量传递给空气,蒸发时产生的水蒸气被空气带走。蒸发式冷凝器的节能、节水效果不仅在理论上是明显的,在实际应用中也得到很好的证明^[3-10]。蒸发式冷凝器是对冷却塔的一种改进设备,它在国外的研究是一个热门课题,美国和澳大利亚在此领域的研究非常活跃,发达国家对蒸发式冷凝器的应用正日益普及。20世纪80年代中期,我国开始从国外引进蒸发式冷凝器技术,本文主要介绍了国内外蒸发式冷凝器的应用及研究现状,并对蒸发式冷凝器的发展方向和应用前景作出展望。

1 蒸发式冷凝器的研究现状

国外蒸发冷却技术起步较早,所取得的理论和研究成果已经比较成熟。美国多年来对蒸发冷却技术进行了深入细致的研究。

早在20世纪80年代中期,同济大学陈沛霖教授在美国加州劳伦斯伯克利研究所从事蒸发冷却技术的国际合作研究,并将这一技术引入我国。近年来,一些科研单位和企业对蒸发冷却技术进行了理论和实验研究,取得了一定进展。国内生产蒸发式冷凝器的厂家也不少,同国外产品相比较,除了有价格优势外,在产品质量上有竞争力的并不多。产生差距的原因有很多,但主要还是国内蒸发式冷凝器的理论研究还没有完全成熟,在设计上存在很多不合理的方面。

[☆] 吴治将,男,1979年11月生,在读博士研究生
510640 广东省广州市五山华南理工大学化工与能源学院
117室
(0) 13450240950
E-mail: wzj710@163.com
收稿日期:2006-11-01

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号:20050561017)

国内蒸发式冷凝器产品各有特点,本文从结构上将其分为以下三大类:填料蒸发式冷凝器、鼓泡蒸发式冷凝器和异型管蒸发式冷凝器。下面从理论上分析各自的性能和结构特点。

1.1 填料蒸发式冷凝器

填料蒸发式冷凝器如图 1 所示,它将冷凝器和

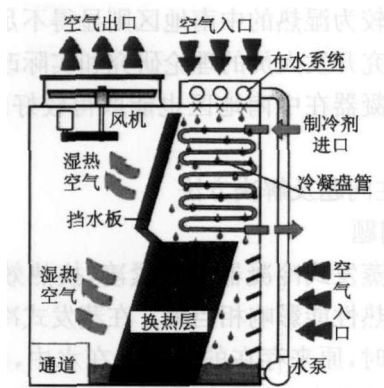


图 1 填料蒸发式冷凝器

冷却塔合二为一,但在冷凝盘管下部仍然保留一段有 PVC 填料的换热层,以降低循环水温。冷凝器内的空气流在填料换热层部分主要采用错流形式,在盘管部分则是水流和空气流平行同向流入,再错流流出。填料蒸发式冷凝器主要特点表现在以下几个方面。

1) 水流与空气流平行

水和空气在冷凝盘管表面以相同的方向朝下流动,飘落的水流由于风压的作用,使水膜在光滑的冷凝盘管上被空气流所包裹,保证水膜完全充分地覆盖管壁,不至于很快剥落,由此消除了由于“干点”而引起的结垢。

2) 盘管表面水流量增加

填料蒸发式冷凝器独特的结构设计,在水泵功率不增加的情况下,其单位面积盘管上的水流速是传统蒸发式冷凝器的 2 倍多,这保证了水流对盘管换热表面的不断冲刷,从而延缓了冷凝盘管的结垢趋势。

3) 蒸发冷却过程主要发生在填料换热层上

填料蒸发式冷凝器采用一次和二次传热面相结合的复合流动技术,其主要换热面——蛇形冷凝盘管是蒸发式冷凝器最为重要的部件。由于在冷凝盘管表面主要是显热换热,而不是通常的潜热换热,进而减少了垢层形成的机会。二次换热技术发生在填料换热层上,填料具有很好的耐腐蚀性,换

热水蒸发效率超过 80%,进而充分移走一次换热过程中的热量,同时可以大大降低冷却水温,通常冷却水温比传统设计的蒸发式冷凝器低 6~8℃,进而提高盘管的单位面积换热量,大大减少结垢的可能性。

1.2 鼓泡蒸发式冷凝器

鼓泡蒸发式冷凝器如图 2 所示。它的主要部件有:高效冷凝盘管、过热蒸气冷凝器、浅水层鼓泡装置。

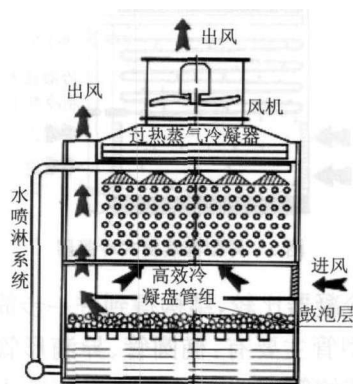


图 2 鼓泡蒸发式冷凝器

1) 高效冷凝盘管

鼓泡蒸发式冷凝器采用金属肋片式换热盘管,金属肋片盘管通过液压胀管,胀管过盈量可高达 0.6 mm,使金属肋片与管壁紧密贴合,其接触热阻几乎为零,提高了换热系数。高强度的金属肋片增加了空气与水之间的换热面积,有利于提高传热效率,冷凝器结构更加紧凑,制冷剂的充灌量更少。另外,在系统冷凝负荷较低或外界环境温度较低时,大多可以采用风冷,解决了冬季的冻结问题。

2) 浅水层鼓泡装置

鼓泡蒸发式冷凝器独特的冷却水技术是一般装置无法比拟的。流经换热盘管的水降落在装置上,风机引入的新风鼓动水层形成大量的气泡,令空气与水的接触面积最大限度增加,强化了二者之间的传热传质过程。经鼓泡后的湿热空气从独立的风道排出,喷淋水的温度被有效降低,从而使蒸发式冷凝器的整体性能得以进一步提高。

3) 过热蒸气冷凝器

在冷凝盘管前设置过热蒸气冷凝器,先以冷凝盘管出口空气对制冷剂蒸气进行冷却,然后制冷剂流入冷凝盘管组进行冷凝。在过热蒸气冷凝器中,

蒸气被冷却到接近饱和后再进入冷凝盘管,一方面可以防止喷淋水在高温段的结垢,另一方面又提高了冷凝盘管部分的利用效率,可使蒸发式冷凝器传热效率提高 10% 左右,达到一定的节能效果。

1.3 异型管蒸发式冷凝器

异型管蒸发式冷凝器如图 3 所示,同填料和鼓

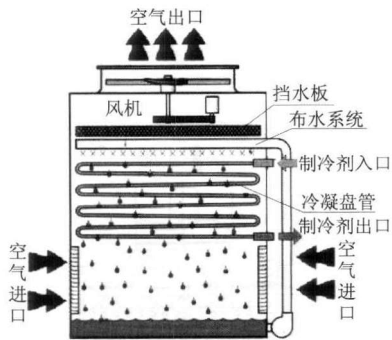


图 3 异型管蒸发式冷凝器

泡蒸发式冷凝器比较,结构得到进一步简化。目前采用的异型管主要有:椭圆管、异滴形管、波纹管、交变曲面波纹管。下面以椭圆管蒸发式冷凝器为代表进行介绍,椭圆管分布为三角形排列。这种椭圆盘管结合了盘管表面积增大和间隔管式盘管外空气、水流动特性增强的优点。由于采用椭圆盘管设计,减小了通过机组的空气压降,在使用小功率的风机情况下,通过盘管组外部的空气流为自由气流。在不影响空气流的情况下,通过盘管组外部的喷射水流的流速提高,这意味着更大的热容量,同时最大限度地利用了盘管的表面积,大大地增强了盘管的传热能力,它能提供盘管体积一定时最大的传热表面积。该椭圆管蒸发式冷凝器的传热容量有了显著的提高。椭圆形的管子在空气流动方向错排,以获得较高的膜冷凝系数,提高了传热容量。另外,所有管子朝着制冷剂流动方向倾斜,以利于冷凝后的液体排出。这种蒸发式冷凝器有安装维护容易、传热效果好、布风均匀、耗电耗水少和使用寿命长等优点。

2 应用现状及存在问题

2.1 应用现状

目前西方发达国家普遍采用蒸发式冷凝器,在国内的应用中,由于西北地区缺水的实际情况,蒸发式冷凝器在西北地区推广和应用较多,宾馆、办公楼、商场等民用建筑和厂房车间及冷库、温室等的冷却空调设备基本都采用了蒸发式冷凝器,啤

酒、食品、饮料、制药、石油、化工等行业也越来越多地采用蒸发式冷凝器。我国其他地区也在陆续推广应用,特别是一些新组建的公司或新建的工程采用蒸发式冷凝器较多,当传统冷凝器工作不正常或需要改换时,采用蒸发式冷凝器也较多,这些改变取得了较好的社会和经济效益,基本都达到预期目标。但在较为湿热的中南地区则显得不足,经一些专家和研究开发人员的理论研究和实际改进,证明蒸发式冷凝器在中南地区也能取得较好的使用效果。

2.2 存在问题及解决方法

1) 结垢问题

由于蒸发式冷凝器结构紧凑,换热效率高,结垢对其传热性能影响相当大。在蒸发式冷凝器中,当水蒸发时,原来存在的杂质还在水中,水中溶解的固体的浓度也会不断提高,如果这些杂质和污物不能有效控制,会引起结垢、腐蚀和泥浆积聚,从而降低传热效率。为了达到蒸发式冷凝器应用的水质要求,使用单位必须根据当地的实际情况采取相应的水处理措施。为了达到最佳的传热效率和最长的使用寿命,应该控制循环水使用周期,通过排污来控制杂质的积聚。较先进的冷凝器都采用了防结垢技术,如电子防垢、除垢装置,这些除垢装置基本能控制水垢的生成。但即使采用了防结垢技术,也必须时刻注意结垢情况,随时采取除垢措施,这样不仅可以提高冷凝器的传热效率,还可以延长蒸发式冷凝器的使用寿命。

2) 腐蚀问题

蒸发式冷凝器外壳由于常年处于潮湿环境下,易腐蚀,需要热浸锌处理,用镀锌钢的周期性钝化来防止白锈,白锈就是积聚在镀锌钢表面上的白色、蜡状和破坏锌层的腐蚀物。由于浸锌不均匀或厚度不够,部分地方腐蚀严重,影响产品寿命。蒸发式冷凝器的换热管也存在同样问题。因此热浸锌时要把握好质量关,保证镀锌厚度,同时注意镀层均匀。

3) 水量的合理分布问题

喷淋水的水量选择和均匀分布对蒸发式冷凝器换热效果有很大的影响。如果喷淋水量不足,则由于管子表面上的水不断蒸发易结垢,而结垢将大大降低蒸发式冷凝器的换热性能;喷淋水量太大,则水膜的厚度增加,大大增加了热量传递

过程的热阻。喷淋水量一般以单位宽度上的冷却水量 m 来表示,当管子正三角形错列布置时, $m = \text{喷淋水量} / (\text{每排管数的 } 2 \text{ 倍} \times \text{管长的 } 2 \text{ 倍})$, m 的取值一般在 $50 \sim 200 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h})$ 之间,在较早的设计手册中, m 的取值一般大于 $100 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h})$,而较新的文献则取 $50 \sim 70 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h})$ 。另外还有用单位冷凝负荷的冷却水量来表示,美国标准是 $64 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{kW})$,国内现在一般取值是 $50 \sim 70 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{kW})$,要使水量匹配合理需作进一步理论研究。在水分配系统中,采用特大型防堵式喷淋嘴取代数量众多的喷水孔,可大大简化水的分配系统,提高效率,并且使用可靠,维护容易,且维护费用降低。

4) 风机问题

以往国产蒸发式冷凝器一般为吹风式结构,风机装在下面,由于挡水板设置不当,或用户操作不当,先开水泵后开风机,造成风机接线盒进水短路,使电动机烧毁。现在采用吸风式较多,接线盒放在箱体外,避免与水接触,一般不存在上述问题,但对风机叶片要求较高,要耐腐蚀。

5) 振动与噪声问题

蒸发式冷凝器管内走高压气体,若管束固定不牢,受高压气体冲击,易发生振动,产生较大的噪声。因此注意管束与箱体连接稳固,还可以考虑在箱体的槽钢基础的固定螺栓上使用减振弹簧来降低噪声。

6) 维护问题

蒸发式冷凝器对维护保养的要求相对较高,需要用户定期维护,如清理水箱内杂物以保证水质要求。

3 蒸发式冷凝器的发展前景

蒸发式冷凝器的发展首先应完善其理论分析和系统化的实验研究,但目前大多局限于应用的分析研究。

3.1 高效传热管的研制

在管型改进方面: 1) 椭圆形盘管^[11]。结合了盘管表面积增大和间隔管式盘管外空气、水流动特性增强的优点,极大地改善了盘管的传热性能。2) 波纹形盘管^[12](见图 4a)。波纹管表面曲率大,流体在内外表面流动时湍流程度高,污垢难以形成堆积,同时波纹管具有较强的轴向伸缩能力,当温度发生变化时,波纹管与垢层之间的伸缩能力不同,

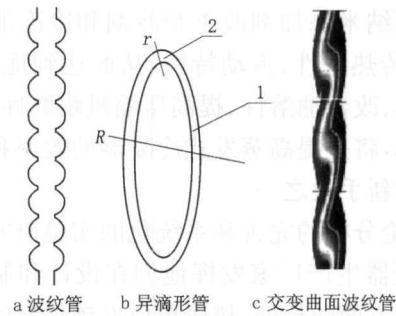


图 4 三种高效传热管管形

二者之间产生较大拉脱力,使垢层破裂、脱落。3) 异滴形管^[13](见图 4b)。其特点是半径为 R 的左右管壁 1 与半径为 r 的上下管壁 2 连接为一体, r 远小于 R ,该异滴形管易加工、具有很强的承压能力,管束排列紧凑性好、管外换热流体流动阻力小。4) 交变曲面波纹管(见图 4c)。它将高效填料混合波纹板的原理和薄层流动方式应用于不连续交变曲面波纹管以传质强化传热。采用强化传热特有的变曲面的波纹管型,组成管间距较小的盘管束结构,探索非饱和蒸发界面与传热表面协同强化机理。交变曲面波纹管表面的特殊结构对喷淋水起流动的导向作用,同时由于受重力及交变曲面波纹管向心力的作用,喷淋水将能最大限度地润湿管的表面,从而最大限度地增加有效传热面积;其次流体受到由涡流离心力产生的二次循环和不同流速度的影响,管表面流体层会变薄,同时流过管子表面时将会形成旋涡,产生了循环和混合,增大了流体湍动程度,这些都可以增大传热系数;在管内,管中心流体比管壁流体有更大的速度并受到更大的离心力,这将导致二次流在管中心向外而在管壁向内,通过减小边界层厚度和增强混合程度,传热系数得以增大,交变曲面波纹管能改善传热效果;另外由于局部速度区和流体分布的合理化,热传导更加均衡。

3.2 材质的研制

以前蒸发式冷凝器的冷凝盘管大多采用热浸锌来防止腐蚀问题,近几年来国内有一些厂家的冷凝盘管采用了不锈钢材质,基本上解决了盘管的腐蚀问题,同时大大延长了使用寿命,减重达 20% 以上。从降低生产成本、减少腐蚀和减轻质量方面考虑,采用不锈钢材质是蒸发式冷凝器冷凝盘管的一个主要发展方向。

3.3 制冷系统内加入纳米材料

利用纳米添加剂改善制冷剂和冷冻油的热力学性质、传热特性、流动特性,从而达到优化参数、强化传热、改善油溶性、提高压缩机耐磨性、减少噪声等效果,将是提高蒸发式冷凝器的效率和可靠性的重要创新手段之一。

3.4 理论分析的完善和系统化的实验研究

冷凝器生产厂家发挥他们在设计和制造蒸发式冷凝器方面的长处,科研单位发挥他们的理论和设计方面的长处,应用企业发挥他们在应用方面的长处,相互合作,相互配合,不仅会把我国冷凝器的理论、设计和制造技术提高到一个新的层次,对蒸发式冷凝器的应用也大有好处。

4 结语

总体来说,我国蒸发式冷凝器的开发和应用相对滞后,应用过程中也存在一些问题。首先是地区的不平衡性,其次是蒸发式冷凝器使用过程中的一些问题,主要是防结垢问题,另外还有防腐蚀、水量的合理分布和风机的合理布置和使用。蒸发式冷凝器的理论和应用研究仍有很大的发展余地,新技术的出现,新产品的开发和应用方式的改进,都为蒸发式冷凝器的发展提出新课题。特别是近几年来电力资源紧张和水资源匮乏将促进有关蒸发式冷凝器的研究和应用,蒸发式冷凝器产品技术的成熟和进一步应用,对我国经济和社会的发展也将起到重要的推动作用。

参考文献:

- [1] 刘涛. 我国水资源面临的形势与可持续利用对策研究[J]. 生态经济, 2004(S1):49-51

(上接第 41 页)

4.3 开启滤毒通风装置后,污染物的浓度大致呈指数下降,但 10 s 后,其浓度下降的趋势迅速趋向平缓。在 130 s 时,污染物通过舱体缝隙排至舱室外的排除效率为 91.6%。

参考文献:

- [1] 徐新喜,刘亚军,王太勇,等. 方舱式机动医疗系统超压集体防护的技术研究[J]. 军事医学科学院院刊, 2005,29(6):547-549
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004
- [3] Leighton Amy Soo. Airlock design and modeling [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan12/04_ColPro_Wksp_Jan05

- [2] 王浩,汪党献,倪红珍,等. 中国工业发展对水资源的需求[J]. 水力学报,2004(4):109-113
- [3] Fisenko S P, Brin A A, Petruchik A I. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(8):165-177
- [4] 蒋翔,朱冬生. 螺旋折流板交变曲面波纹管冷却器的性能与工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2005,36(6):65-68
- [5] 王东屏. 蒸发式冷凝器的设计[J]. 大连铁道学院学报, 1999,20(1):45-49
- [6] Fisenko S P, Petruchik A I, Solodukhin A D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002,45(5):4683-4694
- [7] 朱冬生,庄礼贤. 空调和冷冻设备换热器的技术进展[J]. 流体机械, 1998,26(4):51-55
- [8] 庄友明. 蒸发式冷凝器和水冷式冷凝器的能耗比较及经济性分析[J]. 制冷, 2001,20(1):48-51
- [9] 蒋翔,朱冬生. 蒸发式冷凝器发展和应用[J]. 制冷, 2002,21(4):29-33
- [10] 黄翔,刘鸣. 我国新疆地区蒸发冷却技术应用现状分析[J]. 制冷与空调, 2001,6(1):33-38
- [11] EVAPCO Co Ltd. 高效椭圆管型蒸发式冷凝器:美国. US-4755331[P]. 1986-12-02
- [12] 刘兰群,张建伟,唐建业,等. TRZL 系列蒸发式冷凝器应用浅析[J]. 化工设计, 2005,15(3):47-50
- [13] 刘元璋,王启杰,高维丽,等. 一种蒸发式冷凝器:中国,01216436.4[P]. 2002-01-02
- [14] 朱冬生,蒋翔. 交变曲面波纹盘管蒸发式冷凝器:中国,02227886.9[P]. 2003-06-25

Leighton. pdf

- [4] Tuinman Ilse. The Dutch ColPro Program2 Tuinman [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan11/14_The_Dutch_ColPro_Program2_Tuinman.pdf
- [5] Hindmarsh Chris, Marshall Simon. UK COLPRO structures and materials research [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan11/13_UK_Material_and_Structures_Research_Hindmarsh_Marshall.pdf
- [6] Chen Qingyan, Xu Weiran. A zero-equation turbulence model for indoor air flow simulation [J]. Energy and Buildings, 1998, 28(1):137-144