

管内冷凝强化传热方法研究进展

王子炫¹, 曹 浛¹, 李玉章¹, 徐进良^{1,2*}

(1. 华北电力大学北京市新能源与可再生能源重点实验室, 北京 102206;
2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:管内冷凝现象经常存在于各种冷凝器中,为了强化管内冷凝换热,以节省能源和缩小设备尺寸,大量的管内冷凝强化传热方法被研究和利用。从实现方式的角度出发,将各种强化传热方法分为换热管处理法、插入物法、外部辅助强化法。回顾了各方法的研究进展,同时对各方法的优缺点进行了总结。

关键词:管内冷凝;强化传热;冷凝器应用

中图分类号:TK17

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)12-0043-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2015.12.011

Research progress of in-tube condensation heat transfer augmentation method

WANG Zi-xuan¹, CAO Shuang¹, LI Yu-zhang, XU Jin-liang^{1,2*}

(1. Beijing Key Laboratory of New and Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In-tube condensation often exists in different condensers. In order to strengthen the heat exchange and achieve the purpose of saving energy and reducing the device size, various methods that can enhance the heat transfer coefficient of condensation inside a tube have been widely researched and utilized. The heat transfer augmentation methods are classified into tube dealing method, insertion method and outer stimulator method according to the implementation ways. The research progress is reviewed. The advantages and disadvantages of each method are also concluded.

Key words: in-tube condensation; heat transfer enhancement; condenser application

冷凝器经常存在于制冷机、空调、热泵以及一些热力系统中,管内冷凝现象(本文针对 >3 mm 的大管径)存在于这些冷凝器的换热管内,冷凝器换热管外采用空气或者冷水作为冷流体,管内两相热流体的热量经过管内传热、管壁导热、管外对流换热后被冷流体带走,管内流体渐渐呈现为冷凝状态。

两相流管内冷凝过程中,会经历各种流型阶段,不同阶段的传热方式不同。比如环状流阶段液体均匀分布在四周管壁上,进行膜状冷凝传热,液膜越厚传热热阻越大;分层流阶段液体聚集在管子底部,这时管内传热过程包括管子上半部分气体的膜状凝结换热和下半部分液体的对流换热,其中对流换热是主要的传热热阻;弹状流阶段气体与内壁面的接触面积较小,传热主要靠液体的对流换热。所以增加管内流体扰动、减小冷凝液膜的厚度以及增加气体与内壁面接触面积等方法都可以减小管内冷凝传热热阻。

冷凝器的换热管中可以采取各种方法提高冷凝传热效率,这样有利于节约能源和缩小设备尺寸,具

有十分重要的意义。各种方法强化传热的同时必然伴随着阻力的增加,不同方法强化传热程度不同,压力损失也不同,为了分析各种方法的规律,国内外学者对各种强化冷凝传热的方法进行了研究和讨论,取得了很多成果。根据不同的实现方式,将管内冷凝强化方法分为换热管处理法、插入物法、外部辅助强化法。下面就各种方法的研究进展做扼要介绍,并对各方法的优点和缺点进行简要地总结。

1 换热管处理法

换热管处理法主要处理换热管内壁,使管内壁呈现凹凸结构,这样可以增加换热表面,同时增加凝结液膜的扰动,而且由于表面张力的影响,凹凸结构促进冷凝液膜被带走而抑制液膜的生长,可以达到强化冷凝传热的效果。换热管处理法常见的实现形式有内肋管、表面粗糙处理和槽管等。

1.1 内肋管

换热管处理法最常见的是使用内肋管。内肋管指的是内壁通过加工形成各种形状肋的换热管,最

收稿日期:2015-06-11;修回日期:2015-10-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB710703);国家自然科学基金重点项目(51436004)

作者简介:王子炫(1990-),男,硕士生;徐进良(1966-),男,博士,教授,长江学者,研究方向为多相流质传热、低品位能源利用等,通讯联系人,010-61772613, xjl@ncepu.edu.cn。

常见形式是螺旋内肋管。螺旋内肋管第一次在文献中被描述是在 1982 年,现在已经被生产厂商大量生产,并且广泛应用于空调和制冷领域。内肋管的特点是,和光管相比传热系数增加较多,压力降增加幅度相对较小,Schlager 等^[1]实验测量 R-22 在外径为 12.7 mm 的水平光管和内肋管中的冷凝传热情况,发现内肋管和光管传热系数的比值在 1.5~2.0 之间,压降却只升高了 20%~40%。

内肋的最普遍形状是梯形,内肋管强化冷凝传热程度和梯形肋的形状特征、螺旋角以及数目都有关系,对于不同的工质和管径,可以对这些参数进行优化选择以达到更好的换热效果。相比梯形肋,改变肋的形状可以提高冷凝传热系数。如图 1 所示,Muzzio 等^[2]提出一高一低称作 VA 形的肋形,VA 肋形的内肋管内冷凝传热系数相比普通内肋管提高了 20%,压力降几乎保持不变。Itoh 等^[3]提出末端锯齿状的肋,增加了肋末端的面积,并且提高了表面张力的影响,使得液膜更容易脱落,实验证明,新的内肋管的冷凝传热系数在相同实验条件下相比普通内肋管提高了 40% 左右。

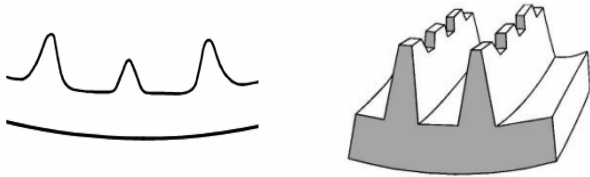
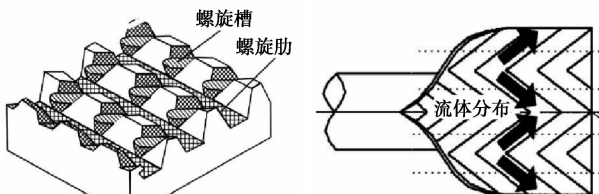


图 1 Muzzio^[2]和 Itoh^[3]提出的新的肋的形状

肋还有其他多种排列形式,相比螺旋内肋管有更好的冷凝传热效果。如图 2(a),交叉内肋管由一系列螺旋肋和一系列螺旋槽交叉构成,Chamra 等^[4]实验证明,管内冷凝传热效果随着螺旋角度和螺旋槽深度的增加而增加,最大旋转角度和螺旋槽深度下的传热系数最大,相比螺旋型内肋管传热系数增加了 51%,但是压力降增加了 71%。如图 2(b)所示,人字形内肋管是一种 20 世纪 90 年代开始出现和研究的新颖内肋管,管子内部肋呈人字形排列,Oliver



(a) 如交叉内肋管

(b) 人字形内肋管

图 2 不同的肋排列形式

等^[5]研究多种工质的管内冷凝情况,实验发现,人字形内肋管的冷凝传热系数比光管平均提高了 70%,和普通螺旋内肋管相比提高 40%,压力降也有些许提高。

普通螺旋内肋管的加工方法比较成熟,和光管相比,管内冷凝传热强化效果比较明显的同时压力损失增加量相对较小,强化传热综合效应(传热系数比除以压降比)比较好,是一种很好的强化管内冷凝传热的方法。通过优化或改变肋的形状和排列方式,可以有效地增加传热效果,但是加工难度会增加,并且有些肋的强度也会随着形状的改变而减小。

1.2 表面粗糙处理

换热管的另一种处理方法称为表面粗糙处理法。实现方式是利用细颗粒、微小突起或浅凹等使得管内壁面出现微小凹凸结构,这样处理后增加了内壁换热面积并增强了液膜扰动,可以实现强化管内冷凝传热的效果。

Luu 等^[6]在换热管内壁上用细小金属颗粒制造粗糙比(颗粒平均高度与管子内直径的比值)为 0.016 和 0.021 的人工粗糙度,然后将 R-113 蒸汽作为工质测量了管内冷凝传热系数,测量结果表明,这 2 种粗糙度的换热管均可强化冷凝换热,相比光管可将冷凝传热系数提高近 1 倍。Guo 等^[7]对内径为 11.43 mm 的换热管进行粗糙处理(如图 3 所示),将处理后的试验管称为 EHT 管,测量 R-22、R-32 等多种工质流经 EHT 管的冷凝传热系数,结果表明,EHT 管的冷凝传热系数是光管的 1.30~1.95 倍。

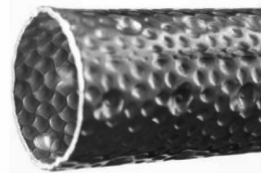
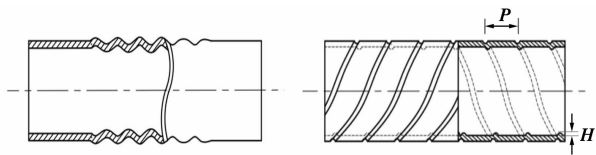


图 3 Guo 粗糙处理的换热管

粗糙处理的换热管和光管相比可以有效强化管内冷凝传热,传热效果增加的程度和内肋管相当,但是压力降和金属消耗量都比内肋管小,具有一定的发展前途。

1.3 槽管

使用槽管是另一种常见的换热管处理方法,槽管管壁一体成型,内外壁面都呈现波状,和光管相比能够同时强化管内传热和管外传热。槽管中比较常见的是波槽管和螺旋槽管(如图 4 所示)。



P 表示螺间距; H 表示槽深

图 4 波槽管和螺旋槽管

隋海明^[8]研究了竖直波槽管和螺旋槽管内水蒸汽冷凝传热情况,不同的实验压力下波槽管和螺旋槽管总体换热系数和光管相比分别增加了 10%~45% 和 3%~22%。Suriyan 等^[9]研究了 R-134a 在内径为 8.7 mm 的螺旋槽管中的冷凝传热强化效果,实验表面螺间距 P 、槽深 H 对于强化传热有显著的影响,槽管的最大传热效率和压降分别比光管提高了 50% 和 70%。

槽管加工简便,加工工艺也比较成熟,槽管和光管相比能够有效强化管内冷凝传热。槽管和内肋管、表面粗糙处理的换热管相比要节省金属,但是同时传热强化效果也会相对较小。

2 插入物法

插入物法在换热管中心位置插入物体,插入物增加了管内流体的扰动,有些插入物可以使流体产生旋转流或者二次流,改变管内流型,增加液体与气体的交换,减小了管内传热热阻。有些插入物可以改变两相流体管内的相分布,增加管壁周围气体,强化管内冷凝传热。插入物常见的有插入纽带、螺旋线圈等。

2.1 插入纽带

插入物最常见的是插入纽带。Royal 等^[10]研究了水蒸汽在换热管内冷凝情况,比较了插有纽带的换热管、内肋管以及普通光管的传热效率和压降,实验表明,插入纽带的管内冷凝传热系数比普通光管高 30%,比内肋管低,但是压力损失却高于内肋管,所以换热管内插入纽带的强化冷凝传热综合效应不如内肋管。

Hejazi 等^[11]研究了工质 R-134a 在插入纽带的管内冷凝情况,研究扭率对于传热强化和压降的影响,实验表明,相对于普通光管传热系数最多增加 40%,压力降最多增加 240%,扭率为实验中间值的纽带具有最好的强化传热综合效应。

换热管中插入纽带的方法和换热管处理法相比是一种暴力强化法,因为两者冷凝传热强化效果相当,但是插入纽带的管内压力损失要大很多,导致泵

功增加,从节约能源的角度看,插入纽带的方法是不推荐使用的。但是纽带加工简单,加工方法成熟,能够在已有设备上使用,有时不失为一种很好的选择。

2.2 插入螺旋线圈

螺旋线圈(图 5 所示)是另一种常见的插入物。插入螺旋线圈能够明显强化管内单相流体传热和沸腾传热,在较早之前就被研究和证实,但是插入螺旋线圈对于管内冷凝传热的强化效果到最近才被广泛研究。

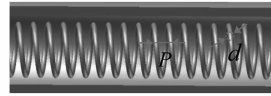


图 5 螺旋线圈三维示意图

Ji 等^[12]研究了多种工质的管内冷凝情况,实验表明,插入螺旋线圈的管内冷凝传热效率比普通光管提高 2.24~4.56 倍,比内肋管提高了 1.58~2.65 倍。Akhavan-Behabadi 等^[13]研究了工质 R-134a 管内冷凝过程的压降,实验证明,插入螺旋线圈的压降随着线圈直径 d 的减小和螺距 P 的增加而增加,相比普通光管压力降增加了 260%~1600%。

换热管内插入螺旋线圈和插入纽带相比,插入螺旋线圈的冷凝传热效果会更好些,但是压力降也会相对增加,强化冷凝传热综合效应两者相当,都不是很高。

2.3 插入相分布调控丝网管

为了增加内壁面和管内气体的接触面积,强化管内冷凝传热,可以改变管内流体的相分布,使管内液体趋向于管子中心,气体趋向分布在管内壁周围。基于这样的思路,最近出现了一种新型的插入物强化冷凝传热的方法,即插入相分布调控丝网。结构如图 6 所示,在换热管中插入一端封头的同心丝网管,将换热管内部分成核心区 and 环隙区。它的作用是进行相分布调控,将液体吸收在管子中心(核心区),让管子与丝网管的环隙区尽量充满气体,进行膜状凝结换热。

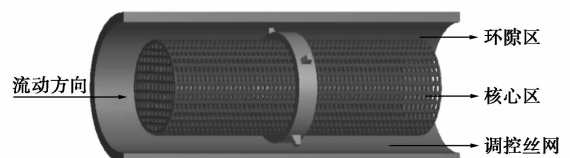


图 6 插入相分布调控管示意图

Chen 等^[14]进行插入相分布调控丝网管中空气-水两相流实验,实验显示,层流、弹状流、泡状流

都会受到调控,水被不同程度地吸收到核心区(如图 7 所示),导致环隙区空气增多,内壁和气体的接触面积增大。文中具体解释了调控的机理,揭示了丝网有 2 个作用,①防止气体进入核心区;②将液体吸入核心区。

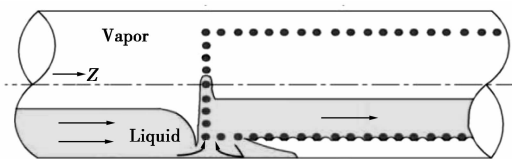


图 7 分层流时液体被吸入调控管核心区的示意图

在此基础上,Xie 等^[15]进行 R-123 气液两相流在插入调控丝网的管内冷凝的实验研究,实验观察液体被丝网吸收,导致了环隙区空泡份额增加,接近内壁面的气体增加,使得插入调控丝网管后传热效果得到强化,实验表明,传热强化因子变化范围是 1.18 ~ 2.12,同时摩擦压降最大增加了十几倍。

虽然插入相分布丝网管法不成熟,强化管内冷凝传热综合效应不高,但是提供了一种强化管内冷凝传热的新思路:对换热管内相分布进行调控,使得内壁面周围尽量充满气体进行膜状冷凝传热。所以插入相分布丝网管法具有很大的发展潜力。

2.4 其他插入物

其他的管内插入物还有混合器、双螺旋弹簧、螺旋片等,关于这些插入物对管内冷凝传热影响的研究目前还比较少。如图 8 所示,混合器由一段段小单元组成,相邻单元内部是相反的螺旋结构,Azer 等^[16]研究了 R-113 在插入混合器的水平管内的冷凝情况,发现较普通光管能够明显强化传热,但是压降也明显上升。隋海明^[8]实验研究了水蒸汽在插入双螺旋弹簧的管内冷凝传热强化效果,结果表明,插入双螺旋弹簧的管内冷凝传热系数和普通光管相比提高了 15% ~ 25%,总压降也增加了 8.1 倍。插入螺旋片对管内沸腾传热强化作用的研究已经有很多,但它对管内冷凝传热的强化作用还没有被研究和证实。

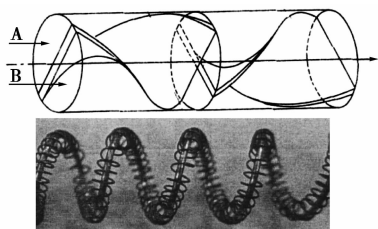


图 8 混合器示意图和双螺旋弹簧管实物图

3 外部辅助强化法

外部辅助强化法需要借助外部辅助设备强化管内冷凝传热。外部辅助强化法中常见的是电场强化传热法(EHD),通过在流体中施加电场,利用电场、流场和温度场之间的相互和协同作用达到强化传热的效果。关于 EHD 技术对管内冷凝传热的影响,Singh 等^[17]研究采用 EHD 技术对有机工质 R-134a 管内冷凝传热过程的强化效果,实验测试了 6 种不同的电极,对于强化效果最优的电极,传热强化效果可以达到 6.5 倍,但是电极功耗却很低,EHD 电极能量的消耗不及冷凝效率的 0.08%。EHD 方法的优点明显,可以随着外加电场的变化快速智能地控制强化效果,不会有复杂的机械设计使得设计变得很简单,强化冷凝传热过程中的能量消耗很少,并且能够适应一些特殊的环境和空间,有很大的发展潜力。

EHD 强化冷凝传热的原理是使冷凝液膜和气泡在电场作用下发生破裂等变化,另外有一种方法可能可以达到类似的效果,就是利用声波使得流体发生震动。Zhou^[18]研究证明了水平换热管中单项流体传热效率由于声波的作用得到加强,但是声波对于管内冷凝的强化传热效果还需要进一步被证实。

另一种利用外部辅助结构法是利用外部离心结构使得换热管旋转。Mohamed^[19]研究水蒸汽在竖直旋转光管和粗糙管内的冷凝传热效果,实验表明,旋转光管传热系数较普通光管提高了 78%,旋转后的粗糙管传热系数提高了 13.7%。

外部辅助强化法是新一代的管内冷凝传热强化方法,相关的研究成果还不多。这种方法能够有效提高管内冷凝传热效率,压力损失较小。

4 总结和展望

从实现方式上总结了一些比较常见的强化管内冷凝传热的方法,对各种方法的最近进展做了扼要的介绍,分别给出了一些简要的结论:换热管处理法具有更好的强化冷凝传热综合效应,但它的加工成本较高,而且容易结垢和沾污,导致传热效果恶化,同时不易清洗;插入物法强化管内冷凝传热综合效应不高,但是它有不可取代的优势,加工成本低,容易安装和清洗,可以在已有的冷凝换热器中实施;外部辅助强化法是新一代强化管内冷凝传热的方法,有快速智能等优点。

这些冷凝传热强化方法在实际运用中不常单独使用,有时候2种或者多种综合使用可以达到更好的冷凝传热强化效果,比如在内肋管中插入旋转纽带可以更好地强化冷凝传热^[20],水平内肋管通过EHD技术可以更好地提高冷凝传热效率^[21]。管内冷凝传热强化的方法有很多,各有各的优势和缺点,所以要根据冷凝传热具体要求选择合适的冷凝传热强化方法。

基于上面的分析和讨论,提出下面几点展望。

(1)内肋管和插入旋转纽带等是常见和有效的管内冷凝传热强化方法,对于它们的优化和改进是一个需要持续进行的工作。

(2)插入相分布调控丝网管方法提供了一种强化管内冷凝传热的新思路,根据这个思路可以进行相分布调控结构的优化设计和研究,具有较大的发展空间。

(3)外部辅助强化法是新一代的管内冷凝传热强化方法,关于它的研究还不是很充分,可以进行比较深入的研究和探讨。

参考文献

[1] Schlager L M, Pate M B, Bergles A E. Evaporation and condensation heat transfer and pressure drop in horizontal, 12.7 mm microfin tubes with refrigerant 22 [J]. *ASME J Heat Transfer*, 1990, 112 (4): 1041 - 1047.

[2] Muzzio A, Niro A, Arosio S. Heat transfer and pressure drop during evaporation and condensation of R22 inside 9.52 mm O. D. microfin tubes of different geometries [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 1998, 5: 39 - 52.

[3] Itoh M, Shikazono N, Uchida M. Enhancement of condensation in a horizontal micro-fin tube for zeotropic refrigerant mixtures [J]. *Oji Intern Seminar*, 1997, 21: 233 - 238.

[4] Chamra L M, Webb R L, Randlett M R. Advanced micro-fin tubes for condensation [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 39 (9): 1839 - 1846.

[5] Olivier J A, Liebenberg L, Thome J R, *et al.* Heat transfer, pressure drop, and flow pattern recognition during condensation inside smooth, helical micro-fin, and herringbone tubes [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30: 609 - 623.

[6] Luu M, Bergles A E. Augmentation of in-tube condensation of R-113 by means of surface roughness [J]. *ASHRAE Trans*, 1981, 26 (3): 375 - 382.

[7] Guo S P, Wu Z, Li W, *et al.* Condensation and evaporation heat transfer characteristics in horizontal smooth, herringbone and enhanced surface EHT tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 85: 281 - 291.

[8] 隋海明. 水蒸气在竖直管内冷凝换热的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

[9] Suriyan L, Somchai W. The effects of corrugation pitch on the condensation heat transfer coefficient and pressure drop of R-134a inside horizontal corrugated tube [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 2924 - 2931.

[10] Royal J H, Bergles A E. Augmentation of horizontal in-tube condensation by means of twisted-tape inserts and internally finned tubes [J]. *J Heat Transfer*, 1978, 100(1): 17 - 24.

[11] Hejazi V, Akhavan-Behabadi M A, Afshari A. Experimental investigation of twisted tape inserts performance on condensation heat transfer enhancement and pressure drop [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37: 1376 - 1387.

[12] Ji T F, Liebenberg L, Meyer J P. Heat transfer enhancement during condensation in smooth tubes with helical wire inserts [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2009, 30: 337 - 352.

[13] Akhavan-Behabadi M A, Salimpour M R, Pazouki V A. Pressure drop increase of forced convective condensation inside horizontal coiled wire inserted tubes [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, 35: 1220 - 1226.

[14] Chen H X, Xu J L, Li Z J, *et al.* Flow pattern modulation in a horizontal tube by the passive phase separation concept [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 45: 12 - 23.

[15] Xie J, Xu J L, Xing F, *et al.* The phase separation concept condensation heat transfer in horizontal tubes for low-grade energy utilization [J]. *Energy*, 2014, 69: 787 - 800.

[16] Azer N Z, Fan L T, Lin S T. Augmentation of condensation heat transfer with in-line static mixers [J]. *Heat Transfer and Fluid Mech Inst, Stanford Univ*, 1976, 26: 512 - 526.

[17] Singh A, Ohadi M M, Dessiatoun S. EHD enhancement of in-tube condensation heat transfer of alternate refrigerant R-134a in smooth and microfin tubes [J]. *ASHRAE Trans Symp*, 1997, 103 (1): 813 - 823.

[18] Zhou D W. Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 3109 - 3117.

[19] Mohamed H A. Effect of rotation and surface roughness on heat transfer rate to flow through vertical cylinders in steam condensation process [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128: 318 - 323.

[20] Ma X H, Briggs A, Rose J W. Heat transfer and pressure drop characteristics for condensation of R113 in a vertical micro-finned tube with wire insert [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2004, 31: 619 - 627.

[21] Suriyan L, Somchai W. Effects of EHD on heat transfer enhancement and pressure drop during two-phase condensation of pure R-134a at high mass flux in a horizontal micro-fin tube [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30: 675 - 686. ■