文章编号：1008－8857(2015)03－0125－06 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.001

管外冷凝强化换热管的结构及发展趋势

林 梦，欧阳新萍，袁道安
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：介绍了各种类型的管外冷凝强化换热管，分析了其强化机理及结构特点，并总结得出：管外冷凝强化管的换热系数与管型有关，且各管型的结构参数对强化传热具有重要的作用.对国内外管外冷凝强化技术研究工作进行分析，结果表明，目前管外冷凝强化换热管的研究主要集中于翅片形状、翅片密度、翅片高度等结构参数对换热性能的影响.强化换热管的冷凝传热性能不仅与翅片结构参数有关，而且也与管材的表面特性和导热系数有关.管外冷凝强化换热管的研究重点是开发新型三维结构翅片的双侧强化管并研究其传热关联式，以及研究不锈钢等低成本材料制造的强化管换热管的传热性能和强化结构的优化.

关键词：管外冷凝；强化换热管；传热机理

中图分类号：TB 61^{+}1 **文献标志码**：A

Structure and development of enhanced tubes for outer condensation heat transfer

LIN Meng, OUYANG Xinping, YUAN Daoan
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The structure of enhanced tubes for outer condensation is introduced. And their corresponding mechanism is revealed. The conclusions can be drawn that the heat transfer coefficient is related with the shape of the fin as well as the structure parameters. The methods for enhancing the condensation heat transfer are compared. It is indicated that the research on the enhanced tube for condensation heat transfer focuses on the parameters, such as the fin shape, fin density, and fin height. The performance of the enhanced tubes is related with the surface properties and the thermal conductivity. The priorities of the enhanced tube research are to develop the fin with 3D structure, study their heat transfer correlation, study the heat transfer performance of the enhanced tubes manufactured with cheap materials such as the stainless steel, and optimize the reinforcement structure.

Keywords: outer condensation; enhanced tube; heat transfer mechanism

冷凝器作为制冷系统中主要的换热元件其换热效率对于系统节能具有重要意义.凝结换热能够以较低的温差获得较大的热流密度，在传热和节能领域占有十分重要的地位.由于凝结换热的主要热阻在制冷剂侧，故管外冷凝强化换热管主要通过机械加工换热管表面结构使换热面积增加、液膜厚度减小，从而达到强化换热的目的.

随着加工技术的发展，管外冷凝强化换热管

收稿日期：2014－03－11
第一作者：林 梦(1989—)，女，硕士研究生. 研究方向：强化传热. E-mail：lemon7374@126.com

的开发和应用也日趋成熟.从二维到三维,由简单到复杂,国内外出现了各种类型的强化管,如整体翅片管、波纹管、螺旋扁管和各种复合强化管等.强化管的传热系数与管型有关,且加工参数对其传热性能也有较大的影响.

1 管外冷凝强化换热管

1.1 整体翅片管

低肋管是最早采用强化管外蒸气冷凝传热的强化管.低肋管的翅片结构不仅增加了换热面积,而且拉薄了冷凝液膜.在低肋管的基础上,德国 Wieland 公司开发出 GEWA 翅片管,它的翅片外缘呈 V 字形,且其管外凝结传热系数是低肋管的 1.2～1.6 倍[1].

强化管技术的发展及加工技术的进步,推动了异型翅片管的发展.图 1 给出了各种强化管结构.这些翅片管的翅片形状特殊,其中 Thermoexcel－C 管(简称翅片 C 管)最具有代表性,如图 1(a)所示.翅片 C 管是三维翅片管,其冷凝传热系数是低肋管的 1.5～2 倍,比 GEWA 翅片管的约高 80%.翅片 C 管的强化凝结换热主要机理是由于三维翅片结构增加了表面张力,从而拉薄了翅片液膜表面凝结厚度;翅片 C 管的冷凝液淹没区小于相同肋间距的低肋管,并且在淹没区的凝结换热性能优于低肋管.而后日本制造的 CCS 管,如图 1(b)所示,其凝结换热性能与翅片 C 管的相当.

由于三维翅片管优越的传热效果,很多学者对三维翅片的开发进行了大量研究,如华南理工大学开发了锯齿形翅片管、花瓣形翅片管、A 形翅片管,分别如图 1(c)、(d)、(e)所示.当冷凝传热温差相同时,锯齿形翅片管的凝结换热系数是普通低肋管的 1.5～2 倍[2].当热流密度相同时,花瓣形翅片管的凝结换热系数高达光滑管的 14～20 倍.铜制 A 形翅片管冷凝强化传热性能可达相同内径和壁厚光管的 7 倍左右.类似的三维结构翅片管还有斜翅管和矩翅管,分别如图 1(f)、(g)所示.陈建红等[3]对斜翅管和矩翅管进行了传热实验分析,得出斜翅管比低肋管的管外凝结换热性能提高了 89%～106%.

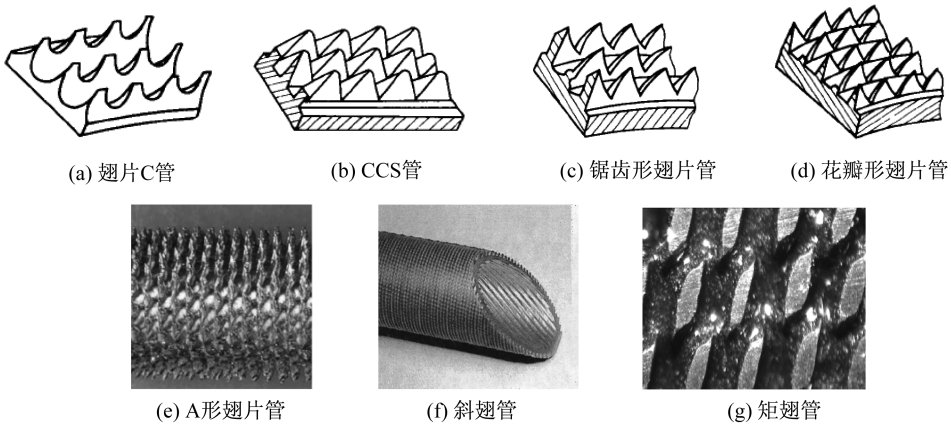

图 1 各种强化管结构

Fig. 1 Structure of different enhanced tubes

当管外传热得到有效强化后,管外侧热阻明显减小,管内侧热阻的影响就会突显出来,于是出现了对内表面采用螺旋线或横纹结构的双侧强化管,运用促进湍流的原理强化了管内冷却水的对流换热,从而使整个传热过程能得到更为有效的强化[4].双侧强化的螺旋槽锯齿形翅片管与单侧强化的锯齿形翅片管相比,其总传热系数高 22%～35%,并且管内表面对流换热系数和管外凝结换热系数几乎一样[5].赵安利等[6]的研究表明,在一定范围内,强化倍率随内齿高的升高而增大.

1.2 异形强化管

最常见的异形强化管有螺旋槽管、螺旋扁管和波纹管.螺旋槽管如图 2 所示,其管外冷凝换热的强化机理为:管内壁上的螺旋型凹槽结构使得工质在近壁面流动时产生一种附加的螺旋形流动,使得边界层厚度减小,热阻减小;管外冷凝液在表面张力和螺旋型排液通道的作用下产生了较

高的离心力，有利于排除冷凝液，并且减小了液膜厚度. 螺旋管管外传热系数约为光滑管的1.5 倍，整体传热性能较光滑管提高 2～4 倍[7]. 近年来，国际上出现了一种新的强化管，即螺旋扁管，如图 3所示. 由于其具有高效的传热性能，故国内外对其进行了大量研究[8]. 螺旋扁管换热器壳程不需要布置折流板，避免了流动死区的产生，而且具有较小的流动阻力，其特殊的螺旋结构还促进了污垢的自清洁. 杨胜等[9]研究了螺旋扁管管外蒸气双侧强化换热性能，指出：管内表面螺旋结构使得流体产生纵向旋转和二次旋转流动，促进了流体的扰动，从而提高了换热效率；管外冷凝传热过程中换热表面曲率半径发生变化，使得产生的表面张力有助于冷凝液的排除. 顾红芳[10]研究得出，在质量流量较大时，管径 Φ25 mm×2.5 mm、翅片节距 160 mm 的螺旋扁管的凝结换热系数是相同条件下光管的 2～3.4 倍.

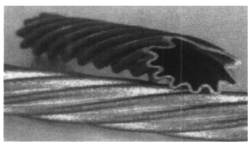

图 2　螺旋槽管

Fig. 2　Spiral groove tube

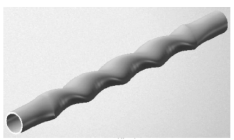

图 3　螺旋扁管

Fig. 3　Twisted tube

波纹管结构如图 4 所示，是近年来强化换热领域出现的具有重要意义的一种强化管结构. 波峰区的冷凝是膜状的，但传热系数却在珠状传热系数范围内[11]，是相同条件下光管的 4.5～6 倍[12]. 波纹管强化传热有两个特点[13]：① 面积增加；② 波纹管波纹表面曲率很小，冷凝液膜受表面张力的影响较大，促使波峰区液膜变薄. 其中后者起主要的强化传热作用. 并且波纹管弧形段内壁处由于形成两次反向拢动，在很大程度上破坏了边界层，使得管内换热系数得到很大的提高[14].

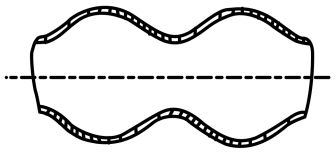

图 4　波纹管

Fig. 4　Corrugated tube

2　管外冷凝强化管的研究新进展和发展趋势

2.1　管外冷凝强化管的研究新进展

2.1.1　新型强化管的开发

近年来，有学者在现有管外冷凝强化换热管的基础上研究开发出了一些新型强化管，如异形凹槽螺旋槽管和新型纵向流开槽伞形翅片管.

异形凹槽螺旋槽管[15]是在螺旋槽管基础上加工而成的一种新型强化管，如图 5 所示. 异形凹槽螺旋槽管的剖面呈非圆弧形，并运用半流线的结构面，在管壁上形成一种具有外凹内凸的特殊表面结构. 这种凹槽结构由于其流线型使得流动阻力较小，而且后一半的陡壁结构又促使边界层产生了分离. 异形凹槽螺旋槽管最大的特点在于冷凝液的滞流区形成了漩涡集中区，有效强化了管外传热系数. 其管壁上这种特殊的凹凸结构使得管内外的换热系数均得到了很大的提高.

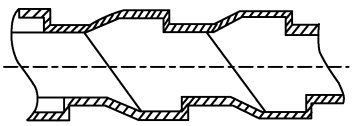

图 5　异形凹槽螺旋槽管

Fig. 5　Special-shaped spirally fluted tube

李静等[16]提出一种新型纵向流开槽伞形翅片管. 这种特殊结构的强化管是在传统纵向翅片管的基础上加工而成，即将纵向翅片纵向断开，如图 6 所示. 翅片为三角形，断开部分呈梯形槽状. 与圆形翅片管相比，其流动阻力更小. 其对管外冷凝换热的强化机理不仅在于扩大了传热面积，而且三维翅片结构使得表面张力增加，液膜厚度减小. 烟气实验表明，当翅片后侧与基管之间夹角为 105°时，纵向流开槽伞形翅片管的换热性能最优，说明该夹角与其换热系数有很大关系.

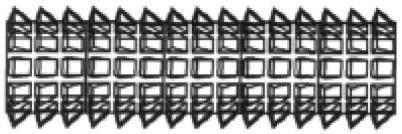

图 6 新型纵向流开槽伞形翅片管

Fig. 6 New longitudinal flow slotted umbrella fin tube

2.1.2 强化管管型和结构参数的研究进展

在开发新型强化管的同时，许多学者就表面传热强化管的结构参数对换热性能的影响也进行了大量研究.

在二维整体翅片管的研究方面，谷波等[17]对低螺纹管进行冷凝换热分析时发现：随着冷凝温度、翅片夹角、翅片间距和当量翅高的增大，传热系数均呈减小趋势；当翅片间距增加至某一值时，传热系数的变化非常小，而当量翅高的增加，对传热系数的下降梯度影响不大. Park 等[18]的研究表明，外径 19 mm 的低肋管的换热系数随着翅片密度的增加而增大，但当翅片密度超过每英寸 28 片时，换热系数将急剧减小. Yun 等[19]对低热流量下不锈钢整体翅片管进行了膜状凝结换热实验，计算得出翅片密度为每英寸 19 片的强化管的强化换热增强系数大于翅片密度为每英寸 26 片的强化管，且当冷凝液膜的温差小于 0.7 ℃时，这两种强化管的强化换热增强系数之间的差值会更大. Ji 等[20]对 5 种翅片密度的二维翅片管和三维翅片管进行了单管和管束换热性能研究，通过实验分析指出：在高雷诺数时，二维翅片管的换热系数随着翅片密度的增加而增大，甚至超过三维翅片管的换热系数.

在三维整体翅片管的研究方面，Zhang 等[21-22]的研究表明，花瓣形翅片管的换热系数随着翅片高度的增加而增加，随着翅片间距的增加而减小，且花瓣形翅片管外添加螺旋折流板后其换热系数是低肋管添加螺旋折流板后的 1.56 倍. Zhang 等[23]对一组三维翅片管和二维低肋管进行了传热实验，研究得出，三维翅片管换热增强系数比二维低肋管的大，且翅片密度越大，增强系数越大. 黄纬等[24]研究了三维整体外翅片铜管的冷凝换热性能，指出：切削深度由 0.75 mm 增大至 0.90 mm时，管外凝结换热系数增加了 30%；进给量由1.80 mm·r^{-1}增加至 1.65 mm·r^{-1}时，管外凝结换热系数增加了 77.4%. 这表明随着翅片高度和翅片密度的增大，管外换热系数增加，且受翅片密度的影响更大. 史维秀等[25]对两种新型强化管(管 1 和管 2)分别进行试验研究. 管 1 外表面结构为在螺纹槽表面加工波纹槽，同时内表面与外表面波纹槽对应凸起；管 2 外表面加工成棱柱状凸起. 研究表明，管 1 和管 2 两种强化管的管外凝结换热系数分别为光滑管的 2.89 倍和 1.75 倍. Ali 等[26]对一种截面为矩形的针翅管进行了传热试验，研究发现：该强化管的换热系数与圆周方向的翅片厚度无关，但受圆周方向的翅片间距影响很大，最佳翅片间距比试验中的0.5 mm小；该强化管的增强系数为4.9，与二维翅片管中的最大值相近，是光滑管的1.2 倍.

在其它强化管的研究方面，顾红芳等[27]对水平螺旋管外 V 型槽外强化冷凝传热的研究表明：随着 V 型槽角度的增加，换热系数将增加，同时压力梯度减小导致冷凝液流速减小；而随着槽数的增加，使得传热面积增加，表面张力增大，换热系数增加，但增加到一定值时，换热系数反而降低，且槽数对换热系数的影响比对角度的影响大，故存在一个最佳角度和最佳槽数；槽角度为 60°、槽数为 28 时，换热系数可达螺旋光滑管的 8 倍. 武俊梅等[28]研究了具有纵向肋片的水平复合管的传热性能，采用二维模型计算得出：随着肋片相对高度和肋片数的增加，换热量增大，但增加到一定值时，换热量增加缓慢；6 个肋片、相对高度均为 4.0 时，换热量可达最大值. 余敏等[29]的研究表明，螺旋升角对螺旋槽管的凝结换热过程有着不可忽视的影响，较大的螺旋升角有利于排除冷凝液，从而增强换热系数. Esfahani 等[30]的研究表明，椭圆管的换热系数随着椭圆率的减小而增大. Zhang 等[31]研究得出螺旋扁管的管外冷凝换热系数随着节距和椭圆率的增大而增大.

由此可见，管外冷凝强化管的换热系数与管型有关，且各管型的结构参数对强化传热效果具有重要的影响. 在强化传热技术的发展中，研究管型和结构参数对冷凝强化管换热性能的影响有着不可忽视的意义.

2.2 管外冷凝强化换热管的发展趋势

由于三维结构翅片管具有最高的管外凝结换热系数，因此目前三维翅片强化管成为管外冷凝

强化换热技术领域研究的焦点. 新型管外冷凝强化换热管的研究主要是在现有的三维翅片管的基础上，对其翅片形状、翅片密度、翅片高度、翅片与基管的角度等结构参数进行优化，以获得最佳传热系数. 同时，不同的基管管型（圆形、椭圆形）也是各种三维翅片强化管研究的重点. 其中，三维结构翅片双侧强化管不仅管外凝结换热系数大大增强，而且管内换热系数也得到提高，从而提高了总换热系数，故开发新型三维结构翅片的双侧强化管仍然是今后研究的重点.

与三维结构翅片管复杂的加工工艺相比，螺旋扁管和波纹管等异形换热管因为其简单的制造工艺、自洁能力和双侧强化传热机理也成为近年来研究的焦点. 虽然其换热系数不及三维结构翅片管高，但由于其在管壳式换热器的壳程设计中不需要折流板，以及自身良好的自洁能力，从而减少了换热器的体积，简化了清洁工序，故在实际运用中具有重要的意义.

强化管的冷凝传热性能不仅与翅片结构参数有关，而且也与管材的表面特性和导热系数有关. 有关学者对制冷工质在白铜、不锈钢和钛材强化管外的凝结换热性能的研究[32－33]表明：对于 R22 管外的凝结换热，白铜强化管的凝结换热系数高达其光管的 3.4～5.3 倍，而紫铜 Turbo－C 管的凝结换热系数则是其光管的 8 倍左右；对于 R134a，钛材低肋管外的凝结换热的强化倍率是钛材光管的 3.54～4.1 倍. 文献[19]研究了不锈钢低肋管外的凝结换热性能，得出翅片密度为每英寸 19 片的低肋管的强化倍率是不锈钢光管的 4.4 倍以上. 由此可看出，强化管材料不同将会使得其传热性能大不相同. 对于不锈钢制成的强化管，在同样的工况条件下，其强化倍率大约只有紫铜强化管的一半. 不锈钢由于其价格低廉越来越受到市场的青睐，故研究不锈钢强化管的传热性能和强化结构的优化必定会为传热领域带来一场新的革命.

对于管外冷凝，我国目前在制冷与空调系统中的冷凝器大部分采用了双侧强化三维结构翅片管，新型的冷凝强化传热技术还在研究中. 从传热的强化倍率来看，其数值很难再有重大提升，研究重点应在成本的降低、材料的选用以及传热特性的分析方面. 目前涉及强化管的传热关联式都需要结合理论和专门的实验研究，并没有统一、具体的传热关联式可用于实际分析中. 为了推动强化传热技术的发展与应用，如何解决这些问题将成为研究的焦点.

3　结　语

本文介绍了各种具有高效管外凝结换热性能的强化管，并分析了其强化传热机理. 目前研究主要集中在翅片结构参数对三维结构翅片管换热性能的影响上. 由于三维结构翅片双侧强化管大大提高了管外凝结换热系数，同时管内换热系数也得到提高，从而提高了总换热系数，故开发新型三维结构翅片的双侧强化管和研究其传热关联式仍然是今后研究的重点. 加快不锈钢等低成本材料强化管的开发和应用对当今市场也具有一定的促进意义.

参考文献：

[1] WEBB R L, MURAWSKI C G. Row effect for R-11 condensation on enhanced tubes[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, **112**(3): 768－776.

[2] 王世平. 锯齿形翅片管强化冷凝给热的实验研究及其准则方程[D]. 广州：华南理工大学，1981.

[3] 陈建红，欧阳新萍，熊高鹏，等. 几种管外凝结强化管的传热试验及分析[J]. 制冷与空调，2008，**8**(2)：71－74.

[4] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社，2006.

[5] 林培森，王世平. 双面强化传热管 R12 水冷冷凝器试验研究[J]. 流体机械，1987(11)：43－47.

[6] 赵安利，田松娜，张定才，等. 双侧强化管热阻分离实验研究[J]. 中原工学院学报，2011，**22**(1)：15－18.

[7] 王丽芝. 螺旋槽管强化传热研究与应用[D]. 济南：山东大学，2005.

[8] BUTTERWORTH D. Process heat transfer 2010 [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, **24**(8/9): 1395－1407.

[9] 杨胜，张莉，徐宏，等. 螺旋扁管管外蒸汽冷凝双侧强化传热试验研究[J]. 制冷技术，2011，**38**(10)：50－53.

[10] 顾红芳. 煤油－空气混合物两相流相变与无相变换热和压降特性的研究[D]. 西安：西安交通大学，2000.

[11] GREGPROG R. Film condensation of fine grooved surfaces with consideration of surface tension[J]. ZAMP, 1954(5): 36 - 49.

[12] 党高健,罗毓珊,陈听宽,等. 波纹管管外冷凝特性的研究[J]. 化学工程, 2007, **35**(12): 22 - 25.

[13] 冯殿义,胡建生. 波纹管管外冷凝传热特性分析与实验研究[J]. 核动力工程, 2008, **29**(1): 110 - 114.

[14] 王玉,王涛. 4 种常用强化换热管综合性能研究综述[J]. 管道技术与设备, 2006(5): 22 - 23.

[15] 王斌斌,仇性启. 高效传热技术的研究现状及进展[J]. 工业加热, 2006, **35**(4): 48 - 51.

[16] 李静,余美玲,刘建勇,等. 三种不同结构换热管管外传热特性的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012, **33**(5): 839 - 845.

[17] 谷波,魏跃文,韩荣梅. 低螺纹管的冷凝换热分析[J]. 制冷学报, 2001(4): 6 - 10.

[18] PARK K J, JONG D S. Optimum fin density of low fin tubes for the condensers of building chillers with HCFC123 [J]. Energy Conversion and Management, 2008, **49**(8): 2090 - 2094.

[19] YUN R, JAEHYEOK H J, KIM Y. Film condensation heat transfer characteristics of R134a on horizontal stainless steel integral-fin tubes at low heat transfer rate[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, **32**(5): 865 - 873.

[20] JI W T, ZHAO C Y, ZHANG D C, et al. Influence of condensate inundation on heat transfer of R134a condensing on three dimensional enhanced tubes and integral-fin tubes with high fin density [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, **38**: 151 - 159.

[21] ZHANG Z G, YU Z, FANG X M. An experimental heat transfer study for helically flowing outside petal-shaped finned tubes with different geometrical parameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, **27**(1): 268 - 272.

[22] ZHANG Z G, LI Q X, XU T, et al. Condensation heat transfer characteristics of zeotropic refrigerant mixture R407C on single, three-row petal-shaped finned tubes and helically baffled condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, **39**: 63 - 69.

[23] ZHANG D C, ZHAO A L, DU J D, et al. Experimental investigations on condensation heat transfer outside enhanced tubes-effect of tube types[C] // Proceedings of the 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment, IEEE, 2011, **2**: 1338 - 1342.

[24] 黄纬,王小伍,万珍平,等. 加工参数对三维整体外翅片铜管冷凝换热性能影响研究[J]. 工业加热, 2013, **42**(1): 33 - 35.

[25] 史维秀,李惟毅,谈西峰,等. 机械加工表面强化管管外全凝与部分凝结换热实验[J]. 天津大学学报, 2011, **44**(6): 529 - 534.

[26] ALI H M, BRIGGS A. Condensation of ethylene glycol on pin-fin tubes: Effect of circumferential pin spacing and thickness [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, **49**: 9 - 13.

[27] 顾红芳,孙丹,章燕谋,等. 水平螺旋管外 V 型槽强化冷凝传热的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, **33**(7): 62 - 65.

[28] 武俊梅,陶文铨. 具有纵向外肋片的水平复合管外表面自然对流换热的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2004, **25**(S1): 91 - 94.

[29] 余敏,郭莹,杨茉,等. 螺旋升角对凝结换热特性影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2007, **28**(3): 499 - 501.

[30] ESFAHANI J A, MODIRKHAZENI M. Entropy generation of forced convection film condensation on a horizontal elliptical tube[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2012, **340**(7): 543 - 551.

[31] ZHANG L, YANG S, XU H. Experimental study on condensation heat transfer characteristics of steam on horizontal twisted elliptical tubes [J]. Applied Energy, 2012, **97**: 881 - 887.

[32] FERNANDEZ-SEARA J, UHIA F J, DIZ R, et al. Vapour condensation of R22 retrofit substitutes R417A, R422A and R422D on CuNi turbo C tubes [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, **33**(1): 148 - 157.

[33] ZHANG D C, JI W T, TAO W Q. Condensation heat transfer of HFC134a on horizontal low thermal conductivity tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, **34**(8): 917 - 923.