

板翅式换热器研究进展

张良俊^{1,2}, 吴静怡¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240;

2. 上海宇航系统工程研究所 上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201108)

摘要:板翅式换热器是一种高效、紧凑的换热设备。介绍了板翅式换热器的近年来国内外研究进展,数值模拟技术在板翅式换热器设计中的应用、翅片传热及表面流动特性、新型翅片结构、影响流体分配特性的封头、分配器及流道结构、优化设计方法及在新领域应用等,并对板翅式换热器发展前景进行了展望,提出在设计过程中将CFD技术与理论分析、试验研究有机结合,多目标优化设计与多算法交叉应用以及新材料与新工艺的发展是未来的研究和方向。

关键词:板翅式换热器;数值模拟;翅片;分配特性;优化设计

中图分类号:TB657.5

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2016)03-0138-05

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2016.03.003

RESEARCH PROGRESS OF PLATE FIN HEAT EXCHANGER

ZHANG Liang-jun^{1,2}, WU Jing-yi¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201108, China)

Abstract: Plate-fin heat exchanger (PFHE) is an efficient, compact heat transfer equipment. The domestic and foreign research progress on the plate-fin heat exchanger in recent years is reviewed, emphatically introduces the design of PFHE based on numerical simulation technology, heat transfer and flow characteristics of different fin structures, new fin structures, head, distributor and channel structure which influence the distribution performance, optimization design methods, new fields of application at home and abroad. Some prospects and suggestions of the application and development of PFHE are discussed. The research and development directions in the future, such as: combining CFD technology with theory and experimental research in the design, multi-objective optimization designing, Multi-algorithm crossly using, new material and new technology are proposed.

Key words: plate-fin heat exchanger; numerical simulation; fin; distribution performance; optimization design

0 引言

板翅式换热器自1930年由英国Marston Excel-sior公司首次研制后,经过80多年的发展,目前已得到广泛应用。由于其传热效率高、适应性大、制造工艺复杂,因而世界各国关于对其的研究持续不断,研究内容包括理论分析、试验研究、优化设计、工艺改进及新材料应用等。

1 数值模拟

CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术早已被广泛用于各种换热器设计中^[1]。大量的数值计算与实际试验结果分析有良好一致性的事实也表明,CFD是研究各类换热器流动及传热的有效途径^[2]。文键等^[3]利用有限元软件ANSYS,对不锈钢锯齿型板翅结构进行了强度分析,认为翅距、翅厚、压差是

收稿日期:2016-01-20

基金项目:上海市航天基金(HTJ10-13)和上海市科学技术委员会资助(06dz22105)

作者简介:张良俊(1980-),男,安徽省合肥市人,博士研究生,高级工程师,从事空间环境试验模拟技术研究。

E-mail:liangjunzh@126.com。

影响翅片强度的重要因素。Goyal等^[4]提出了一种基于有限体积法的多股流板翅式换热器数值模型,该模型成功用于低温应用下的多股流板翅式换热器评估计算,且计算结果与商用软件 Aspen MUSE 能很好吻合。Liu等^[5]数值模拟研究了板翅式换热器传热系数和压降受空气入口角的影响。Villanueva等^[6]利用CFD方法建立了一种高温陶瓷板翅式换热器换热性能与压降关系的数值模型。Nagarajan等^[7]数值分析了陶瓷板翅式换热器不同翅片结构及排列形式下,壁面化学反应的SO₃分解率。

2 翅片

2.1 传热与流动特性研究

Aliabadi等^[8]对板翅式换热器平直、多孔、锯齿、波浪及针形五种不同结构的翅片,在空气、水、油和乙二醇等不同工作流体的性能进行对比研究,研究结果对设计应用于不同类型冷却液的板翅式换热器时的翅片形式选择有较大的参考价值。Fernández-Seara等^[9]实验分析了钛钎焊锯齿式翅片板翅式换热器在液-液传热过程中的压降及传热特性。唐成^[10]对在混合热边界条件下,板翅式换热器平直翅片通道的传热特性进行了数值模拟,认为板翅式换热器二次传热主要是由其翅片完成,且随着雷诺数Re的增大,其流体平均温度降低,流体区内部的传热传质作用加大。Yang等^[11]对锯齿翅片板翅式换热器传热性能进行了评估,提出了一个被称为“嫡产分布因子”的新参数,用于评价锯齿翅片板翅式换热器在热力学上的优势。

2.2 新型翅片结构

杜文江等^[12]分析研究了平直翅片和3种带有涡流发生器的结构改进型翅片的对流换热性能,通过分析认为带有涡流发生器的改进型翅片可大大增强换热效果。王威^[13]提出了一种改进型翅片结构的双尺度锯齿翅片,采用小尺寸偏移量来部分代替大尺寸偏移量,使得在换热强度削减不多的前提下,使得翅片压降有明显的降低。李晓宁等^[14]发明了一种能够同时兼具错列翅片、波纹翅片和开缝翅片优点的新型高效低压降板翅式换热器翅片。Guo等^[15]研究了逆流板翅式换热器翅片结构形式的最优化选择方法,该方法对于大型多股流板翅式换热器的设计更加有效。

3 流体分配特性及流道结构

3.1 封头及分配器

沈素萍等^[16]从封头曲线对流体的引导作用出

发,将常用的下抛物型一次封头结构改进为上抛物型和正切型,优化了换热器入口段流场均匀性,提出板翅式换热器一次封头的优化设计思路。王斯民等^[17]提出3种改进型的S弯封头结构,并比较了原始封头和改进型封头出口流体分布的均匀性。田津津等^[18]研究了板翅式换热器封头高度与流体分配之间的关系,通过实验分析认为说明板翅式换热器的流体分配与封头高度有很大关系,封头高度越高流体分配就越均匀。Zhang等^[19]对两相流流体在板翅式换热器内的分配特性进行了实验研究,为了研究翅式换热器流体不均匀的原因,研究了多种分配器参数配置在不同运行条件下的流体分配特性及热性能变化情况。李焱^[20]提出了一种新型的气液分配器,相对于传统封头结构,其气液分配特性得到有效改善,气液分配不均匀度降低了一个数量级。

3.2 流道结构

郝建设等^[21]对板翅式热交换器周期性正弦流道中层流流体的传热性能进行研究,得出翅片流道截面结构尺寸、振幅和波长对正弦流道传热综合性能的影响。Tian^[22]提出了一种可减少累积热负荷、简化流道安装并提高传热性能的流道布置方法,同时应用分布参数模型得到了换热器的温度分布,并在此基础上提出进一步的优化方案。Aliabadi等^[23-24]比较评价了7种常见的用于板翅式换热器的流道结构,并加工制造、试验分析了所有流道结构,并提出了一种带有横向涡流发生器矩形翅片的板翅式换热器流道,分析了其流道内的传热及液体流动特性。刘景成等^[25]设计了一种新型板翅式换热器流道结构,该新型流道结构可以增大流体的湍流性能,强化换热器的换热效果;还采用多目标优化方法对板翅式换热器导流结构参数进行了优化。

4 优化设计方法

4.1 遗传算法

Ghosh^[26]利用遗传算法确立了一种多股流板翅式换热器夹层最佳叠置形式的方法。胡云云等^[27]在多股流板翅式换热器柔性设计区间,确定虚拟工况点,建立了以累积热负荷最小均方差为目标函数的优化模型,并采用遗传算法优化多股流板翅式换热器的通道排列。Zhao等^[28]利用遗传算法优化设计了多股流板翅式换热器的分层形式。Yin等^[29]利用单目标优化和多目标优化的遗传算法,得到了一种适用于空调系统的水-水板翅式换热器的最佳结构参数。

4.2 粒子群优化算法

严已杰等^[30]以板翅式换热器的质量作为目标函数,以换热器芯体外形尺寸和翅片参数作为优化变量,采用粒子群优化算法对其结构尺寸进行优化设计。Hajabdollahi^[31]对两个换热边采用相似、不同或不相似翅片的板翅式换热器进行了热经济学优化。同时,采用多目标粒子群优化算法对换热效率和年总成本也进行了优化。藏明君等^[32]提出基于领地行为的多目标粒子群算法,并将所提算法应用于板翅式换热器结构多目标综合优化设计中,同时考虑了芯体重量、传热效率、压降及强度校核等要求。Turgut^[33]研究了混合混沌量子行为粒子群优化算法,该方法成功将一种演变的量子行为粒子群优化算法和高效的局部搜索机制结合,并将该方法应用于板翅式换热器热优化设计中。

4.3 混合算法

Yousefi等^[34]利用一种混合进化算法-遗传算法混合粒子群优化设计算法优化设计了板翅式换热器,两种算法的结合不但提高解的多样性,而且可以降低作为粒子群优化算法主要缺点的陷入局部最优解的概率。Guo等^[35]为了防止特殊应用下相邻通道壁的流体泄漏问题,利用遗传算法结合蒙特卡罗算法对板翅式换热器翅片安全结构进行优化设计,经优化后的结构可以提供一种新型的、可行的、安全的板翅式换热器。杨辉著等^[36]、文键等^[37]采用结合Kriging响应面技术的遗传算法,克服了传统优化方法对经验关联式的依赖,对锯齿型板翅式换热器翅片结构参数进行了优化设计。

4.4 其他算法

Yousefi等^[38]研究探讨了一种改进的和声搜索算法在板翅式换热器设计优化中的应用,通过实例分析可知,该算法的效率和精度均比传统算法高。Pate等^[39]将一种改进的基于多目标教学的优化算法应用在板翅式换热器多目标综合优化设计中,并运用两个实例证实了算法的效率和精度。Zarea等^[40]将蜜蜂算法应用在逆流板翅式换热器的优化设计中。Wang等^[41]介绍了采用多目标布谷鸟算法对板翅式换热器进行优化设计,这是一种基于杜鹃繁殖行为的启发式优化算法。Hadidi^[42]将一种全新的生物地理学优化算法用于板翅式换热器的优化设计中。

5 新应用

王明富等^[43]介绍了板翅式换热器在航天发射低温加注液氧过冷器中的应用,对换热器的构型选择、

结构设计、性能试验及使用情况作了阐述。胡忠军等^[44]为了同时满足中国散裂中子源工程(CSNS)低温系统中两台加速器冷量需求,研制了1台集合漏率小于 1.0×10^{-10} Pa·m³/s的液氢温区的铝制板翅式氦气换热器。Mizokami等^[45]为了满足高温气冷反应堆(HTGR)950℃使用条件,提出了一种针对侧杆形式的板翅钎焊高温结构设计准则。梁维好等^[46]阐述了高温高压板翅式换热器在国内某乙烯项目的甲烷冷却器中,替代管壳式换热器的应用情况。朱伟平等^[47]介绍了铝制板翅式换热器在中科院理化技术研究所10 kW@20 K大型低温氦制冷系统中的应用情况。Chang等^[48]介绍了一款板翅式换热器在10 kW布雷顿制冷机和高温超导电力电缆(HTS)工程低温冷却系统中的应用情况。

6 结论

(1)随着CFD技术的不断发展及其在板翅式换热器设计开发的广泛应用,如何将数值模拟技术与理论分析、实验研究有机结合,缩短研发周期、减少研发成本、提高研发效率将是发展趋势之一;

(2)板翅式换热器设计参数多、关联性强,单目标、单算法优化设计技术不能科学、客观反映多关键因素的耦合效应。因此,多目标优化设计、多算法交叉应用技术将是发展趋势之一;

(3)航天、核能、船舶、超导等尖端技术的不断推进,板翅式换热器的应用领域将不断拓展。同时,新应用需求也必将带动板翅式换热器新材料及新工艺的发展。

参考文献:

- [1] Bhutta M M A, Hayat N, Bashir M H, et al. CFD applications in various heat exchangers design: a review[J]. Appl Applied Thermal Engineering, 2012, 32(2): 1-12.
- [2] Liu Z, Li H, Shi L, et al. Numerical study of the air inlet angle influence on the air-side performance of plate-fin heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 356-364.
- [3] 文键, 李亚梅, 王少华, 等. 板翅式换热器板翅结构强度影响因素分析[J]. 低温工程, 2013(2): 52-59.
- [4] Goyal M, Chakravarty A, Atrey M D. Two dimensional model for multistream plate fin heat exchangers[J]. Cryogenics, 2014, 61: 70-78.
- [5] Liu Z, Li H, Shi L, et al. Numerical study of the air inlet angle influence on the air-side performance of plate-fin heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 356-364.

- [6] Villanueva H H S, de Mello P E B. Heat transfer and pressure drop correlations for finned plate ceramic heat exchangers[J]. *Energy*, 2015, 88: 118–125.
- [7] Nagarajan V, Chen Y, Wang Q, et al. CFD modeling and simulation of sulfur trioxide decomposition in ceramic plate-fin high temperature heat exchanger and decomposer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 329–343.
- [8] Aliabadi M K, Hormozi F. Performance analysis of plate-fin heat exchangers: different fin configurations and coolants[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2013, 27(3): 515–525.
- [9] Fernández-Seara J, Diz R, Uhía F J. Pressure drop and heat transfer characteristics of titanium brazed plate-fin heat exchanger with offset strip fins[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51: 502–511.
- [10] 唐成. 板翅式换热器平直翅片通道耦合换热特性[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- [11] Yang Y J, Li Y Z, Biao S, et al. Performance Evaluation of Heat Transfer Enhancement in Plate-fin Heat Exchangers with Offset Strip Fins[J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 543–550.
- [12] 杜文江, 王良璧. 板翅式换热器流道内的对流换热数值模拟研究[J]. *甘肃科学学报*, 2013, 25(2): 92–96.
- [13] 王威. 板翅式换热器双尺度锯齿翅片流动与传热性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [14] 李晓宁, 数个群, 李团兵, 等. 一种新型高效低压降的板翅式换热器翅片: 中国, CN103994686A[P]. 2014–8–20.
- [15] Guo K, Zhang N, Smith R. Optimisation of fin selection and thermal design of counter-current plate-fin heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 491–499.
- [16] 沈素萍, 蒲亮, 厉彦忠. 封头形状对板翅式换热器入口段流场影响的数值研究[J]. *低温工程*, 2013(3): 26–34.
- [17] 王斯民, 许世峰, 王萌萌. 板翅式换热器S弯改进型封头的性能研究[J]. *中国科技论文*, 2014, 9(9): 973–976.
- [18] 田津津, 张哲, 厉彦忠, 等. 封头结构对板翅式换热器流体分配性能的影响[J]. *低温工程*, 2013(4): 19–22.
- [19] Zhang Z, Mehendale S, Tian J J, et al. Experimental investigation of distributor configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 85: 111–123.
- [20] 李焱, 李玉星, 胡其会, 等. 一种新型板翅式换热器气液分配器分配特性的敏感性分析[J]. *化工学报*, 2013(6): 2007–2014.
- [21] 郝建设, 董其伍, 刘敏珊, 等. 板翅式热交换器中一种新型正弦波纹流道的数值模拟[J]. *石油化工设备*, 2012, 41(5): 6–9.
- [22] Tian Q, He G, Zhao L, et al. Passage arrangement optimization of multi-stream plate-fin heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1): 963–974.
- [23] Khoshvaght-Aliabadi M, Hormozi F, Zamzamin A. Role of channel shape on performance of plate-fin heat exchangers: Experimental assessment[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 79: 183–193.
- [24] Khoshvaght-Aliabadi M, Zangouei S, Hormozi F. Performance of a plate-fin heat exchanger with vortex-generator channels: 3D-CFD simulation and experimental validation[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 88: 180–192.
- [25] 刘景成, 张树有, 徐敬华, 等. 板翅换热器导流结构非线性映射与性能多目标优化[J]. *化工学报*, 2015(5): 1821–1830.
- [26] Ghosh S, Ghosh I, Pratihar D K, et al. Optimum stacking pattern for multi-stream plate-fin heat exchanger through a genetic algorithm[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(2): 214–224.
- [27] 胡云云, 肖武, 贺高红. 遗传算法优化变工况板翅式换热器的通道排列[J]. *计算机与应用化学*, 2012, 29(1): 10–14.
- [28] Zhao M, Li Y. An effective layer pattern optimization model for multi-stream plate-fin heat exchanger using genetic algorithm[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 480–489.
- [29] Yin H, Ooka R. Shape optimization of water-to-water plate-fin heat exchanger using computational fluid dynamics and genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 310–318.
- [30] 严巴杰, 胡建华, 黄炳琼, 等. 基于粒子群优化算法的板翅式换热器优化设计[J]. *化工机械*, 2012, 39(1): 55–57.
- [31] Hajabdollahi H. Investigating the effect of non-similar fins in thermoeconomic optimization of plate fin heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 82: 152–161.
- [32] 藏明君, 张树有, 郑维强, 等. 基于领地行为的多目标粒子群算法及在板翅换热器设计中的应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2015(1): 76–87.
- [33] Turgut O E. Hybrid Chaotic Quantum behaved Particle Swarm Optimization algorithm for thermal design of plate fin heat exchangers[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(1): 50–69.
- [34] Yousefi M, Enayatifar R, Darus A N. Optimal design of plate-fin heat exchangers by a hybrid evolutionary algorithm[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39(2): 258–263.

- [35] Guo D, Liu M, Xie L, et al. Optimization in plate-fin safety structure of heat exchanger using genetic and Monte Carlo algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70 (1) : 341-349.
- [36] 杨辉著,文键,童欣,等.板翅式换热器锯齿型翅片参数的遗传算法优化研究[J].西安交通大学学报,2015,49(12): 1-9.
- [37] Wen J, Yang H, Tong X, et al. Optimization investigation on configuration parameters of serrated fin in plate-fin heat exchanger using genetic algorithm[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 101 : 116-125.
- [38] Yousefi M, Enayatifar R, Darus A N, et al. Optimization of plate-fin heat exchangers by an improved harmony search algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50 (1) : 877-885.
- [39] Patel V, Savsani V. Optimization of a plate-fin heat exchanger design through an improved multi-objective teaching-learning based optimization (MO-ITLBO) algorithm[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(11) : 2371-2382.
- [40] Zarea H, Kashkooli F M, Mehryan A M, et al. Optimal design of plate-fin heat exchangers by a Bees Algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 69(1) : 267-277.
- [41] Wang Z, Li Y. Irreversibility analysis for optimization design of plate fin heat exchangers using a multi-objective cuckoo search algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 126-135.
- [42] Hadidi A. A robust approach for optimal design of plate fin heat exchangers using biogeography based optimization (BBO) algorithm[J]. Applied Energy, 2015, 150: 196-210.
- [43] 王明富,刘忠明,张杰板.翅式换热器在航天发射低温加注中的应用[J].真空与低温,2011,17(8):97-400.
- [44] 胡忠军,张宁,邱一男,等.低漏率板翅式氦气低温换热器的试制[J].真空与低温,2011,17(1):132-136.
- [45] Mizokami Y, Igari T, Kawashima F, et al. Development of structural design procedure of plate-fin heat exchanger for HTGR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 255: 248-262.
- [46] 梁维好,王明志,孔翔.高温高压铝制板翅式换热器的设计[J].石油和化工设备,2013(16):14-16.
- [47] 朱伟平,徐鹏,龚领会.铝制板翅式换热器在大型低温制冷系统中的应用[C]//第四届全国粒子加速器真空低温技术研讨会论文集,2014.
- [48] Chang H M, Gwak K H, Jung S, et al. Plate-fin Heat-exchangers for a 10 kW Brayton Cryocooler and a 1 km HTS Cable[J]. Physics Procedia, 2015, 67: 221-226.

中国计量测试学会真空计量专委会第十四届年会 暨中国航天科技集团公司五院科技委真空与低温专业组学术年会在兰州召开

2016年6月18-19日,中国计量测试学会真空计量专委会第十四届年会、中国航天科技集团公司五院科技委“真空与低温”专业组学术年会在兰州召开。

中国计量测试学会副理事长兼秘书长马爱文发来贺词,中国航天科技集团公司五院科技委秘书长卢春平、五院科技委真空与低温专业组组长邱家稳致辞。大会由中国真空计量专委会主任委员、五院科技委真空与低温专业组副组长、510所副所长李得天研究员主持。来自航天系统、计量院、中科院、高校等单位188人参加了会议,收到论文56篇。同时,大会选举了新一届的中国计量专委会委员,选出89名委员和5名副主任及秘书长,并颁发了聘书。

大会围绕“质谱技术及应用”等主题进行交流,主要有磁偏转质谱计、离子阱质谱计、飞行时间质谱计和四级质谱计取得的最新成果,以及前沿技术在真空领域中的应用,如碳纳米管、微纳加工、石墨烯、场发射等。

会议有6家公司参展,通过产品介绍了解国内外最新技术状况,加强最新成果的应用和推广。德国LEYBOLD公司STEFAN博士介绍了他们的最新真空产品。510所《真空与低温》编辑部参展的《真空设计手册》(第3版)、《真空科学技术丛书》、《真空计量新技术》、《泄漏检测方法与应用》、《载人航天与太空旅游》等图书引起了参会人员极大兴趣。

会后,代表参观了510所展室和国防科技工业真空一级计量站。参会人员对510所和一级站取得的成绩给予了肯定,并表达了开展合作的愿望。