

# 管壳式换热器强化传热技术概述

齐洪洋,高磊,张莹莹,周辰琳

(辽宁石油化工大学,辽宁抚顺 113000)

**摘要:**总结了近年来国内外新型管壳式换热器的研究进展,从管程、壳程、管束三方面介绍了管壳式换热器的发展历程、结构改进及强化传热机理,并与普通弓形折流板换热器进行对比,概括了各式换热器的强化传热特点。最后指出了换热器的研究方向。

**关键词:**管壳式换热器;强化传热;研究方向

中图分类号:TH183.1;TE965 文献标识码:B 文章编号:1001-4837(2012)07-0073-06

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2012.07.014

## Overview of the Shell and Tube Heat Exchangers about Heat Transfer Enhancement Technology

QI Hong-yang, GAO Lei, ZHANG Ying-ying, ZHOU Chen-lin

(Liaoning Shihua University, Fushun 113000, China)

**Abstract:** The research progress of shell and tube heat exchanger were summarized. The development, structural improvement and heat transfer enhancement of the heat exchangers were introduced through three aspects, e. g. tube pass, shell pass and the whole tub bundle etc. Compared with the traditional segmental baffle heat exchanger, various types of heat exchangers' characteristics about heat transfer enhancement were epitomized. At last, the studying directions of heat exchangers were pointed out.

**Key words:** shell and tube heat exchanger; heat transfer enhancement; studying direction

### 0 引言

《“十二五”节能减排综合性工作方案》明确提出,到2015年,全国万元国内生产总值能耗下降到0.869吨标准煤;“十二五”期间,实现节约能源6.7亿吨标准煤。主要实施的措施是调整优化产业结构,加快淘汰落后产能,推动传统产业改造升级,加快节能减排技术开发和推广应用,重点推广高效换热器等节能减排技术。

我国石化行业的换热设备以管壳式换热器为主,而且传统弓形折流板换热器占到总量的70%

~80%。弓形折流板换热器固然有其优点,并在产业节能方面做出了巨大贡献,但在新的节能减排形势下,其缺点(压降大、存在大量流动死区、振动大、传热效率低等)严重限制了自身的生存和发展空间,同时也推进了强化传热理论和换热器的发展。

### 1 强化传热理论的工程应用

根据强化传热理论<sup>[1]</sup>,在管的两侧范围内,需要增大传热系数较小的一侧才能有效改进总传热系数。由于无法确定所有工况下,需要增大管

内或管外的传热系数以得到最高的总传热系数,因此,强化传热理论在工程中的应用不是单一的模式,而是呈现出3种趋势,即对管内、管外、管束整体的强化传热。无论是那种类型的强化传热结构,都已经细化出许多更新类型,且其适用的工作环境和强化效果各异。

### 1.1 管程强化传热

高效强化传热管的研究一直是传热领域最活跃和最有生命力的重要研究课题<sup>[2]</sup>。管程强化传热技术可归结为两个方面,其一是改变换热管形状以加大管程流体湍流程度或传热面积,如螺旋管、伸缩管、波纹管、翅片管等,其中研究较多、较典型的是螺旋管和翅片管;另一种是管内插物,用来增强管程湍流程度,常见的有管内插纽带、绕丝花环等,其中,内插纽带由于制造简单,传热效果优良,得到了国内外研究人员的广泛认定。

#### (1) 螺旋管换热器

1964年,兰州石油机械研究所的螺旋管轧制成功,国产换热器中开始采用螺旋管;1965年,兰州石油机械研究所研制的螺旋管换热器在兰州炼油厂应用取得成功;20世纪80年代,在南京炼油厂常减压装置中开始大面积推广应用螺旋管换热器,取得了良好效果<sup>[3]</sup>。

螺旋管(见图1)由光滑管在车床上轧制而成,分为单头和多头,用于强化管内气体或液体的传热、强化管内液体的沸腾或管外蒸汽的冷凝<sup>[4]</sup>。



图1 螺旋管示意

由于螺旋型沟槽的存在,使得管内壁面处的流体产生了二次流和旋转流,有利于减薄边界层,降低壁面热阻,强化传热;在流体湍流核心处没有出现很强二次流和旋转流,从而不会使得阻力增加很大<sup>[5]</sup>。

20世纪90年代以来,随着计算机模拟技术的发展,得到了大量与试验接近的模拟数据。通

过数值模拟研究,李占峰等<sup>[5]</sup>发现在湍流工况下,随着流速的增加,换热器性能越好。模拟使用的螺旋槽管平均 $Nu$ 数大约是光管的1.6~2.1倍,阻力系数大约是光管的1.5~4.5倍。

通过对该管型污垢的试验研究,曾力丁等<sup>[6]</sup>发现螺旋管可用于预防或减轻污垢的堆积。试验结果表明,螺旋管的热阻是光管的52%~88%,努塞尔数是光管的1.8倍。当流体流速从0.25 m/s增加到0.75 m/s,污垢热阻将减小至66.7%。

#### (2) 翅片管换热器

翅片管是1971年由美国人首先提出来,后经过日本、前苏联等国进行了大量研究工作,不断完善而成的一种换热元件。翅片管是由光管外接翅片制成,其连接部分可以采用焊接和胀接等方式。该结构既增大了传热面积,又造成了强烈的扰动,起到了提高雷诺数和减小边界层厚度的作用,多用于壳程热阻较大的情况。翅片可按截面形状分为矩形(见图2)、花瓣形<sup>[7]</sup>、T形、钉翅等。其中,某些类型的钉翅管甚至可以利用翅片相互支撑,而取消折流板。

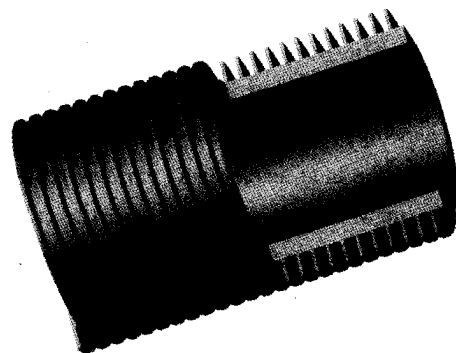


图2 矩形翅片管示意

在此基础上,近几年国内外研究人员相继提出了一种异型钉翅管<sup>[8-9]</sup>。异型钉翅管的结构是在光管外交错排列许多钉翅。试验表明,与光管相比,异型钉翅管的传热系数和努塞尔数均有极大提高,分别为100倍和65~105倍;与其他翅片管相比,其传热效果最佳,是较理想的换热管,应用潜力巨大。

#### (3) 管内插纽带换热器

管内插纽带(见图3(a))最早是波兰人A.

Klaczak 于1964年提出并进行试验研究的一种高效传热元件,由薄钢板条扭曲而成。通过在管内插入扭曲带产生涡流,加强了流体近壁面和中心区域的混合,从而达到强化传热的目的<sup>[10]</sup>。因其卓越的稳定性、简单的构造及易于装配等特点,已经被国内外研究人员广泛试验和讨论。

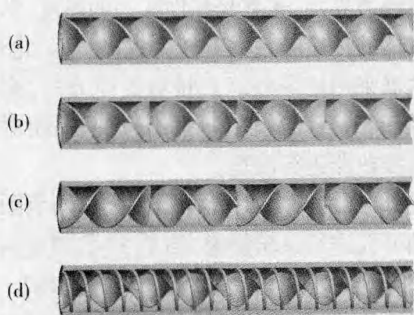


图3 管内插扭带示意

在文献[11]中,研究人员对光管内插扭带进行试验。试验中使用两种扭带:普通扭带(见图3(b))和顺时针、逆时针方向相接的扭带(见图3(c))。结果表明,在雷诺数为3000~27000范围内,后者表现出更高的传热率、摩擦系数及强化传热系数。此外,两者的努塞尔数比光管分别大12.8%~41.9%和27.3%~90.5%。

在文献[12]中,研究者在扭带外套扰动线圈(见图3(d)),增强了管内气体的湍流程度。试验表明,在雷诺数为3000~18000范围内,和光管相比,外套线圈的扭曲带换热管的强化传热效果是单独使用线圈或扭曲带的2倍。而且,扭曲带扭曲程度越高、线圈排布越密,传热效果越好。

## 1.2 壳程强化传热

在壳程介质为液体的工况下,传统弓形折流板换热器的流体流动阻力和振动较大,能量损失严重,因此,壳程强化传热显得尤为重要。近年来,人们采用了各种各样的折流支撑结构来改善壳程流体的强化传热,常用的方式有:异形折流板(花隔板<sup>[13]</sup>、螺旋折流板、整圆折流板、螺旋叶片、折流杆<sup>[14]</sup>等)及壳程内插物(扭曲带、空心环<sup>[15]</sup>)等。一般认为螺旋折流板、壳程扭曲带结构优于其他结构,而引起较多业内人士的关注。

### (1) 螺旋折流板换热器

螺旋折流板换热器(见图4)是20世纪80年代末由美国科研人员提出的,1994年由美国ABB公司首先实现了产业化;国内对其研究和开发始于20世纪90年代,1998年国内第一台单壳程螺旋折流板换热器首次应用于抚顺石油二厂炼油装置,取得良好效果。该结构是将多块1/4椭圆扇形平板首尾相互连接,使其一个直边垂直于轴线、圆心位于轴线上且圆周紧贴筒体内壁,另一个直边与轴线在其构成的平面内呈一定角度( $25^\circ \sim 40^\circ$ ),从而总体上形成近似螺旋面,使壳程流体以螺旋状流动。与传统弓形折流板换热器相比,壳程流体流动方式的改变使其具有壳程压力损失小,单位压降下壳程传热系数高等诸多优点。

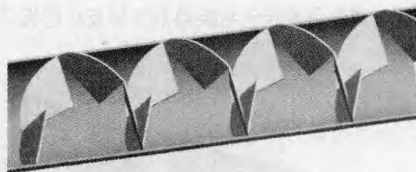


图4 螺旋折流板换热器壳体及折流板示意

进入21世纪,国内对螺旋折流板换热器进行了深入研究。王晨等<sup>[16]</sup>利用先进的PIV激光粒子图形测速技术,对螺旋折流板换热器进行研究。结果表明,由于螺旋折流板的存在,壳程流体流动方向与轴线呈一定角度,流体斜向冲刷换热管及折流板,减小了管束的震动和死区。而且,管间流场存在着沿轴线方向波动的径向速度,这可以增加流体的扰动,减薄边界层的厚度,有利于增大传热系数。

虽然螺旋折流板很好地改善了传统弓形折流板换热器的缺点,但其结构设计决定了折流板无法达到无缝连接,结果是一部分流体在缝隙较大处近似平行轴线流动,无法进行螺旋流动和强化传热,而造成无法挽回的损失,这一问题已引起国内外学者的讨论。目前,对连续型螺旋折流板换热器(见图5)的研究已被提上日程。谢洪虎等<sup>[17]</sup>对连续折流板换热器进行了数值模拟,并得到了连续型螺旋折流板的螺旋节距 $L$ 与螺旋折流板管壳式换热器强化传热效果变化规律的关系和最佳螺旋节距。

此外,李久生等<sup>[18]</sup>从实际出发,讨论了在高



温、高压、大直径工况下,单壳程螺旋折流板的结构会受到螺旋倾角范围的限制,提出了双壳程螺旋折流板结构(见图6),使得螺旋折流板换热器适用范围更广。



图5 连续型螺旋折流板换热器壳体及折流板示意

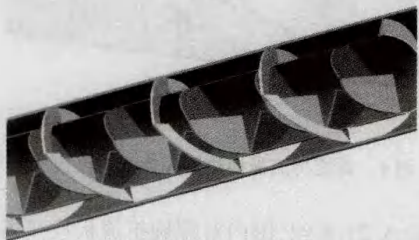


图6 双壳程螺旋折流板换热器壳体及折流板示意

## (2) 纵向多螺旋流管壳式换热器

该型换热器是典型壳程插入物型换热器。1998年,AlFahed S等<sup>[19]</sup>对螺旋扭带插入物(见图7)进行了全面的试验和理论研究,证明该型换热器可有效提高传热系数。国内方面,2005年,华南理工大学的王杨君等<sup>[20]</sup>研究了多种管间支撑物的流阻和传热的效果,结果表明,在一定试验条件范围内,该结构的综合性能要优于其他支撑类型的换热器。

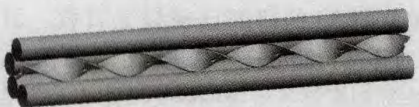


图7 管间插入螺旋扭片的位置示意

壳程换热管之间插入螺旋扭片,有效地改变壳程流体的流动形式,使得壳程流体在管隙间始终保持多股纵向自螺旋流状态,有效提高换热管束壁面的流体速度,实现不同壳体半径处流体的充分混合<sup>[21]</sup>。靠近管壁面的流体产生明显的周期性螺旋流动,加强管束近壁面处流体的扰动,推动流体的混合。并且,周期性的螺旋流动可以有效地减薄边界层,尤其是黏性底层的厚度,从而使壳程流体的传热膜系数有较大提高<sup>[22]</sup>。此外,该型换热器采用扭带外缘点接触支撑方式,充分利用换热面积,且结构简单,拆卸方便,易于对传统管壳式换热器进行改造。

此外,江楠等<sup>[23]</sup>对壳程螺旋扭片的节距及有规律的开孔进行试验研究,结果表明,螺旋扭片的节距和开孔对壳程传热性能均有较大影响。节距太大或太小,强化传热效果都无法达到最佳状态。螺旋扭片对壳程阻力有影响,壳程流体流速越高,其压降较光管管束增加的幅度也相应增大。对于未开孔的扭片,螺旋扭片不同节距之间的压降差别不明显。对于开孔的扭片,开孔扭片管束的压降比不开孔扭片管束的压降略高,同时,给出了一组试验范围内的最优解。

## 1.3 整体强化传热

整体强化有两种趋势,一种是将以上两类强化有机结合;另一种是通过改变管束实现强化传热。后者加工简单,易于更新现有设备,强化效果好,应用前景广泛,具有代表性的有扭曲扁管换热器<sup>[24]</sup>和交错扁管换热器<sup>[25]</sup>。

### (1) 扭曲扁管换热器

扭曲扁管(见图8)换热器是20世纪80年代由俄国专家首先提出,并由瑞典Allares公司首先将其产业化的高效换热元件,由普通圆管轧制而成,其横截面为椭圆形,外缘为螺旋线。管束中不设置折流板,换热管之间通过外缘线保持点接触支撑。管束由扎箍固定,故可在管间形成紧密的螺旋流道。因此,该型换热器的管程与壳程都是螺旋流,即流体在换热器轴线方向流动的同时,还产生沿管壁周向的二次流,这有助于提高流体的湍流程度,防止污垢堆积,减小边界层厚度。由于扭曲管换热器管间距由压扁程度决定,且通常比弓形折流板换热器的管间距小,因此,换热器体积较小,节约较多壳体材料和减小总体积。

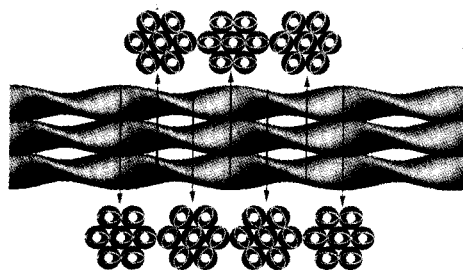


图8 扭曲扁管管束及一个扭曲周期内的截面示意

文献[26]通过计算机模拟和试验验证,在低雷诺数的情况下,扭曲管管内 $Nu$ 是普通直椭圆管的2~3倍,综合传热性能是普通直椭圆管的1.5~2倍。但是由于在相同管内流速下,扭曲管管内压降较椭圆管偏高,且随着管内流速的升高,扭曲管管内压降高的劣势越来越明显,综合强化传热效果也逐渐下降。因此扭曲管更适用于管内流体流速较慢的情况。一般认为,当雷诺数在小于4000时,扭曲管换热器有非常好的传热综合表现<sup>[26-27]</sup>。

## (2) 交错扁管换热器

交错扁管(见图9)换热器是近几年开发和推广的新型强化换热器,国内外较少有文献介绍对其进行试验研究。该型换热器与普通的管壳式换热器壳程结构基本相同,仍按GB 151—1989《钢制管壳式换热器》来设计和制造,不同的是用变截面管代替圆管<sup>[28]</sup>。交错扁管由普通圆管经压辊滚压而成,相隔一定节距管子被压制成90°的扁圆形截面,由这种管子组成的管束,其扁圆形截面长轴部分互相支撑形成壳程的扰流元件。



图9 交错扁管管束示意

交错扁管换热器壳程没有折流板,不存在流动死区,同时降低了成本。由于在轴线方向上管型不断变化管程流体和壳程流体均产生波浪式为主要特征的复杂流动,尤其在管型变化处形成交错湍流,获得较强的搅动,从而较大程度地强化了传热过程,并且管壁在壳程流体的作用下可自行

清洁表面,不易结垢。换热管之间靠点接触,而且壳程流体主要作纵向流动,与管内流体形成纯逆流,既提高了换热管的效率又能很好地克服诱导振动。管束由扎箍捆扎在一起,用于固定,使结构紧凑。

## 2 换热器发展方向

从诸多文献中不难看出,换热器的发展趋势是多样化的,传统弓形折流板换热器无法适应未来工业对节能减排的要求,各种新型换热器必然会在各个领域和工况中逐渐取代大量旧式换热器。新的研究方式(如数值模拟分析)、新的设计流程(如使用针对不同类型换热器的设计软件进行设计和加工)、新的设计理念(如大型化、集成化等)和新的设计灵感将被逐步引入换热器的研制和开发中,这将极大加速换热器的更新换代。

### 参考文献:

- [1] 史美中,王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社,2009:265.
- [2] Bruce Tilton, Robert Sigal, Umesh Ratnam. Designing and Rating Process Heat Exchangers[J]. Chemical Processing,1998,61(4):65-76.
- [3] 李敏孝. 螺旋管冷轧工艺的研究和发展[J]. 石油化工设备,2007,36(2):59-62.
- [4] 冯国红,曹艳芝,郝红. 管壳式换热器的研究进展[J]. 化工技术与开发,2009,38(6):41-46.
- [5] 李占峰,杨学忠. 螺旋槽管管内湍流流动与换热的三维数值模拟[J]. 制冷技术,2008,36(11):56-60.
- [6] ZENG Li ding, ZHU Dong sheng, QIAN Song wen, et al. Characteristics of Fouling in Spirally Indented and Experimental Investigation of Fouling Prevention[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2008,26(2):12-15.
- [7] 王世平,林培森,詹亚韶,等. 花瓣形翅片传热管:中国,93204279.1[P]. 1994-01-12.
- [8] Sahiti N, Durst F, Dewan A. Heat Transfer Enhancement by Pin Elements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2005,48(23-24):4738-4747.
- [9] 杨传健,江楠,廖晓懿. 新型高效强化传热元件——钉翅管的传热性能[J]. 石油化工设备,2007,36(2):15-17.
- [10] Jian Guo, Aiwu Fan, Xiaoyu Zhang, et al. A Numerical

- Study on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Laminar Flow in a Circular Tube Fitted with Center - cleared Twisted Tape[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(7): 1263 - 1270.
- [11] Smith Eiamsa - ard, Pongjet Promvonge. Performance Assessment in a Heat Exchanger Tube with Alternate Clockwise and Counter - clockwise Twisted - tape Inserts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(7 - 8): 1364 - 1372.
- [12] Pongjet Promvonge. Thermal Augmentation in Circular Tube with Twisted Tape and Wire Coil Turbulators [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 2949 - 2955.
- [13] 李炜炜, 赖学江, 黄素逸. 一种新型壳侧支撑结构的管壳式换热器——花隔板换热器的实验研究[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(3): 186 - 191.
- [14] 张建秀. 折流杆换热器管束的制造工艺[J]. 化工机械, 2009, 36(6): 619 - 620.
- [15] 邓先和, 陈详明, 张志孝. 空心环管壳式换热器工业化应用回顾[J]. 有色冶金, 2001, (3): 4 - 5.
- [16] 王晨, 桑芝富. 螺旋折流板换热器壳程流动特性研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2): 19 - 23.
- [17] 谢洪虎, 江楠. 连续形螺旋折流板管壳式换热器强化传热机理的数值模拟[J]. 石油化工设备, 2009, 38(增刊): 6 - 11.
- [18] 李久生, 刘莉, 李卓, 等. 双壳程螺旋折流板换热器结构设计[J]. 石油化工设备, 2006, 35(4): 31 - 33.
- [19] AlFahed S, Chamra L M. Pressure Drop and Heat Transfer Comparison for Both Micro - fin and Twisted - tape Inserts in Laminar Flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1999, 18: 323 - 333.
- [20] 王杨君, 邓先和, 李志武, 等. 旋流片支撑管束的传热与流阻性能[J]. 化工学报, 2007, 58(1): 21 - 26.
- [21] 杨传健, 江楠. 纵向多螺旋流管壳式换热器的实验研究[A]. 2007 年中国机械工程学会年会论文集[C]. 长沙: 中国机械工程学会, 2007: 578 - 581.
- [22] 谢洪虎, 江楠. 管壳式换热器壳程流体流动与换热的数值模拟[J]. 化学工程, 2009, 37(9): 9 - 12.
- [23] 江楠, 吴秋华, 杨传健. 壳程螺旋扭片强化传热试验研究[J]. 压力容器, 2010, 27(4): 1 - 4.
- [24] 张迎恺, 高磊, 任立阳, 等. 双壳程螺旋扭片扁管换热器: 中国, 200820012364 [P]. 2008 - 04 - 23.
- [25] 张迎恺, 蹇江海, 高丽萍, 等. 一种扁圆交错管式换热器: 中国, 200920288131 [P]. 2009 - 12 - 17.
- [26] 杨蕾, 朱冬生, 曾力丁, 等. 扭曲管传热性能数值模拟与实验研究[J]. 化学工程, 2010, 38(1): 26 - 29.
- [27] 杨胜, 张颂, 张莉, 等. 螺旋扁管强化传热技术研究进展[J]. 冶金能源, 2010, 29(3): 17 - 22.
- [28] 江楠, 甄亮. 变截面管换热器的结构及计算[J]. 化工设备设计, 1999, 36(6): 5 - 8.

收稿日期: 2012 - 04 - 08 修稿日期: 2012 - 07 - 18

作者简介: 齐洪洋(1987 - ), 男, 研究方向为新型高效节能装备, E - mail: yang719151171@126.com.

通讯作者: 张莹莹(1981 - ), 讲师, 主要从事材料热加工及焊接方向研究, 通信地址: 113001 辽宁石油化工大学, E - mail: zyy\_fs@163.com.

#### (上接第 13 页)

- [7] Yoon SH, Kim JH, Hwang YW, et al. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics During the In - tube Cooling Process of Carbon Dioxide in the Supercritical Region [J]. Int J Refrigeration, 2003, 26: 857 - 864.
- [8] 曹侃, 董其伍, 刘敏珊, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 冷却特性数值模拟[J]. 低温工程, 2012, (1): 56 - 60.
- [9] Jackson J D, Hall W B, Fewster J, et al. Heat Transfer to Supercritical Pressure Fluids[R]. U. K. A. E. A. A. E. R. E. - R8158, Design Report 34.
- [10] Kakac S. The Effect of Temperature - Dependent Fluid Properties on Convective Heat Transfer [A]. Handbook of Single - phase Convective Heat Transfer [C]. New York, 1987.
- [11] 张丽娜, 刘敏珊, 董其伍, 等. 超临界二氧化碳微细管内冷却换热研究[J]. 低温工程, 2010, (1): 38 - 42.
- [12] 朱冬生, 郭新超, 刘庆亮. 扭曲管管内传热及流动特性数值模拟[J]. 流体机械, 2010, 40(2): 63 - 67.
- [13] 陶文铨. 数值传热学(第 2 版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [14] Dang C, Hihara E. In - tube Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide——Part 1: Experimental Measurement [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(7): 736 - 747.

收稿日期: 2012 - 05 - 14 修稿日期: 2012 - 05 - 28

作者简介: 靳遵龙(1973 - ), 男, 副教授, 主要从事过程系统能量综合优化、换热设备流体流动及传热强化研究工作, 通信地址: 450002 河南省郑州市金水区文化路 97 号 郑州大学热能工程研究中心, E - mail: zljn@zzu.edu.cn.