

研究论文

螺旋转子的结构参数对管内换热影响的数值研究

邢 程, 孟继安, 李志信

(清华大学航天航空学院热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 管内插入物是一种强化管内换热的有效方法, 内插可以旋转的结构在强化换热的同时还具有良好的除垢效果。数值研究了内插螺旋转子的管内流动与换热, 发现与光管相比, 换热强化 30%, 而阻力则为光管的 6~7 倍。数值计算结果表明, 叶片与管壁间隙、转子螺旋节距的增加以及转轴半径的减小, 可引起转子转速不同程度的减小, 从而导致管内 Nusselt 数和阻力系数的减小。适当增加转子螺旋节距, 减小转轴半径及叶片与管壁间隙, 可使其强化换热性能更优。

关键词: 螺旋转子; 强化换热; 阻力特性; 数值研究

中图分类号: TK 172

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 12-2969-06

Numerical study on influence of structural parameters of spiral rotor internal insert on heat transfer

XING Cheng, MENG Ji'an, LI Zhixin

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Internal inserts can effectively enhance heat transfer, and also have good anti-scaling and scale removing performance. In the present numerical study, the effects of structural parameters of the spiral rotor internal insert on heat transfer and flow resistance were investigated. The numerical results confirmed that the heat transfer is enhanced by 30% and the friction resistance is increased by 600%~700% as compared with those in plain tube respectively. The increase in the clearance between blade and tube wall, the increase in the helix pitch of rotor, and the decrease in the radius of rotating shaft can decrease the rotational speed and then decrease the heat transfer rate and friction factor. Appropriately increasing the helix pitch of rotor, reducing the clearance between blade and tube wall and reducing the radius of rotating shaft can lead to a better heat transfer performance.

Key words: spiral rotor; heat transfer enhancement; friction factor; numerical study

引 言

换热器作为基本传热设备, 广泛应用于石油、

化工、核能、冶金、制冷、航天航空等领域中, 设计和制造高性能换热器是高效利用、节约能源的重要手段和提高经济效益的重要途径。管内插入物可

2009-06-29 收到初稿, 2009-09-10 收到修改稿。

联系人: 孟继安。第一作者: 邢程 (1982—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB206901)。

Received date: 2009-06-29.

Corresponding author: MENG Ji'an, mja@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2007CB206901).

有效强化换热,但换热增加的同时,阻力增加过大,而且结垢更加严重。Tijing 等^[1]研究了内插五角芯结构,换热强化 35%,阻力增加 286%。Eiamsa-ard 等^[2]研究了内插螺旋纽带的换热,换热强化最大达到 160%,但阻力最大增加 9 倍。Yakut 等^[3]研究了内插螺旋线圈的管内换热,换热强化 150%,阻力却增加约 10 倍。Eiamsa-ard 等^[4]研究了内插树杈型结构,换热最大增加 280%,阻力同时增大 3~4 倍。由于阻力增加过大,管内插入物强化换热技术的实用性较差。近年来,国内一些学者设法利用流体流动使内插物旋转从而减小阻力,并同时达到对换热管除垢的效果。俞秀民等^[5-7]研究了不同结构的旋转纽带,得到换热强化约 170%,阻力增大约 3 倍,污垢附着速率降低 40%。林清宇等^[8-10]研究了内置液轮机结构,传热系数平均提高了 52%,阻力增加约 3 倍,污垢增加速率降低约 30%。但是由于只有在一定流动速度下,内插物才能起转,其实际应用受到限制。杨卫民等^[11-12]提出了一种新型的管内螺旋转子结构(如图 1 所示),可在较低的流速下起转,实际使用的结果表明,具有强化换热和除垢的双重效果。但是其强化换热能力并没有得到充分的分析,而且阻力增加较大。为达到更好的节能效果,需要对其结构和参数进行优化。本文数值研究了内插螺旋转子的管内流动与换热及其结构参数对换热、阻力及转速的影响,希望为其结构优化提供参考。

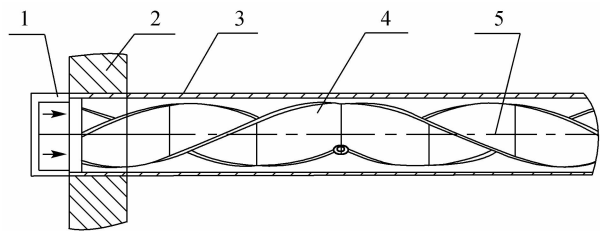


图 1 螺旋转子的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spiral rotor

1—fixed mount; 2—tube plate; 3—tube; 4—rotor; 5—steel wire

1 计算模型

此结构为多个单独的转子通过一根线连接而成,考虑到转子之间的间隙很小,计算模型中将相邻转子之间的距离设为零。当流动达到稳定之后,管内流场随转子的周期性布置而呈现周期性。由于每个转子有 3 个在周向均匀布置的叶片,为了保证

进出口边界的周期性边界条件,选取叶片转过 120°所对应的转子长度为计算区域的长度,叶片与管壁间隙为 S ,转轴半径为 C ,如图 2 所示。由于转子的螺旋节距为叶片转过 360°所对应的转子长度,可知计算区域的长度 L 为转子螺旋节距的 1/3。

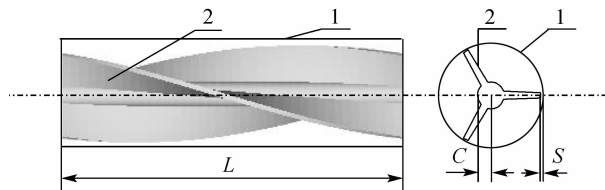


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Calculation model

1—wall; 2—rotor

计算时,管壁为恒定温度 290 K,来流温度为 310 K,转子表面绝热,工质为水,换热管直径为 22.6 mm。网格划分软件采用的是 Gambit 2.2.30,网格数量在 80 万~120 万之间,计算软件采用的是 FLUENT 6.3.26,选取 $k-\epsilon$ 湍流模型。

2 转子转速的确定

转子在实际转速下应满足所受合力矩为零的条件。转子在旋转过程中受到流体冲击叶片的推力、流体与叶片及旋转轴之间的摩擦力、流体压差所带来的形状阻力、转子与钢丝之间的摩擦力、转子之间的摩擦力等,相对应的力矩分别为流体冲击叶片的动力矩、黏性阻力矩、形状阻力矩、转子与钢丝之间的摩擦阻力矩、转子之间的摩擦阻力矩。前 3 个力矩的合力矩可在 FLUENT 软件的计算结果中直接得到,转子与钢丝之间的摩擦阻力矩由于阻力和力臂都很小,所以相比其他力矩可忽略不计,而转子之间的摩擦阻力矩需要通过式 (1) 计算获得

$$M = \mu N l \quad (1)$$

其中, μ 为摩擦系数, N 为压力, l 为力臂。转子材料为 POM 聚甲醛,文献 [13] 中给出此材料的摩擦系数为 0.3; N 即为转子所受的轴向力,可由 FLUENT 计算结果中直接得到;转子之间的接触部分为圆环面,内径为 2 mm,外径为 3 mm,所以力臂 l 选取为 2.5 mm,利用式 (1) 就可计算得到转子之间的摩擦阻力矩。

在某个来流速度下给定转子转速,比较计算得到的动力矩和阻力矩是否相等,如果相等即得到该

来流速度下所对应的转子转速，不等则需要继续修正转速直至合力矩为零。

图3所示为 $L=34\text{ mm}$ ， $S=1.8\text{ mm}$ ， $C=3.0\text{ mm}$ 时转速的计算值与实验值的比较。从图中可以看出，计算值与实验值误差在10%以内，说明上述转速确定方法的合理性。从图中还可以看出，转子的转速基本与来流速度呈线性递增关系，与文献[12]的结论相符。

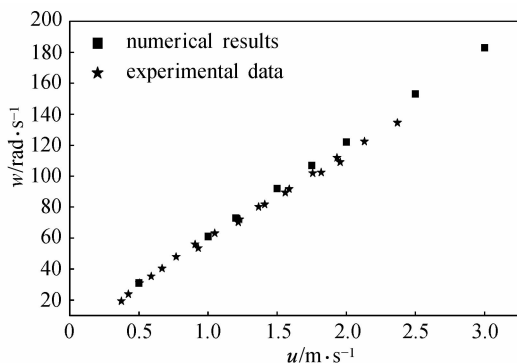


图3 不同来流速度下转速的计算值与实验值的比较

Fig. 3 Comparison between numerical and experimental rotating speed under different stream speeds

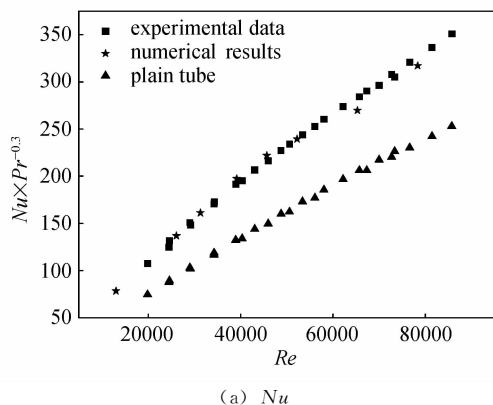
3 结果与讨论

3.1 内插螺旋转子的管内换热及阻力特性

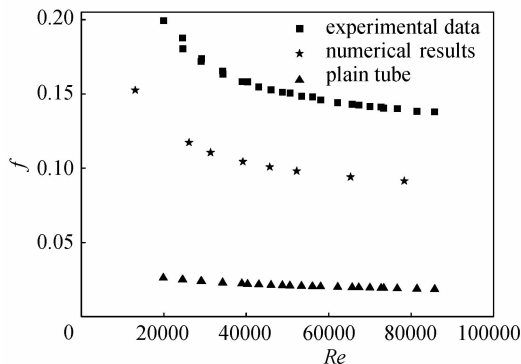
模拟了 Re 在10000~90000范围内， $L=34\text{ mm}$ ， $S=1.8\text{ mm}$ ， $C=3.0\text{ mm}$ 的内插螺旋转子的管内流动与换热， $Nu \times Pr^{-0.3}$ 和阻力系数 f 随 Re 的变化示于图4。为便于比较，相同结构参数下螺旋转子的实验结果及光管的 $Nu \times Pr^{-0.3}$ 和 f 的实验结果也示于图中。

从图4的实验结果可以看出，与光管相比，内插螺旋转子使换热增强约30%，而流动阻力却增加了6~7倍。螺旋转子强化换热的机理是使得流体在流动过程中产生径向及切向的速度，从而形成漩涡。同时也正是这些漩涡的存在，大大增加了流动阻力，除此之外，润湿周长的增加和流通面积的减小也是阻力增加较大的原因。从图4的计算结果中可以看出，换热的计算值与实验值吻合很好，但阻力系数相差约30%，可能是因为模型中没有考虑进出口管端固定件对阻力的影响，同时，实际运行时各转子的旋转速度不同对阻力系数也有一定影响。

显然，螺旋转子的存在使得阻力增加过大，为优化其结构设计，需要讨论其结构参数（转子螺旋



(a) Nu



(b) f

图4 内插螺旋转子的管内换热及阻力特性

Fig. 4 Heat transfer performance and friction resistance in tube with spiral rotor inserts

节距，叶片与管壁间隙，转轴半径）对换热和流动阻力的影响。

3.2 转子螺旋节距的影响

在 $Re=10000\sim90000$ 范围内，固定 $S=1.8\text{ mm}$ ， $C=3.0\text{ mm}$ ，模拟了 L 分别为34、80、134 mm时的管内流动与换热， $Nu \times Pr^{-0.3}$ ，阻力系数 f 及转速 ω 随 Re 的变化示于图5。由于 L 等于转子螺旋节距的1/3，所以， L 的影响与转子螺旋节距的影响是等价的。

从图5可以看出，随着转子螺旋节距的增加换热略微弱化，原因在于节距增加对应转子叶片的螺旋角减小，导致对流场的扰动减弱，切向和径向速度减小。同样，对流动扰动的减弱也使得阻力减小。计算结果还表明， $L=80\text{ mm}$ 与 $L=134\text{ mm}$ 时的换热和阻力系数差别不大，说明在转子螺旋节距增大到一定程度以后其对换热及阻力的影响逐渐减弱，螺旋节距越小，转子旋转越快。

3.3 叶片与管壁间隙的影响

在 $Re=10000\sim90000$ 范围内，固定 $L=34$

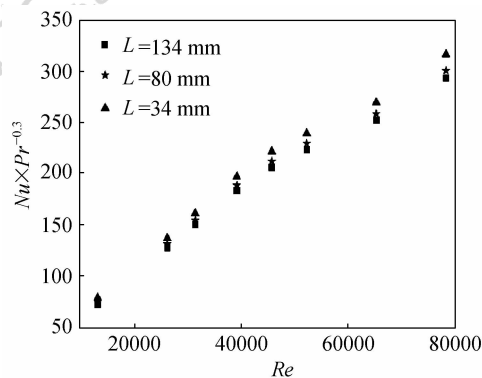
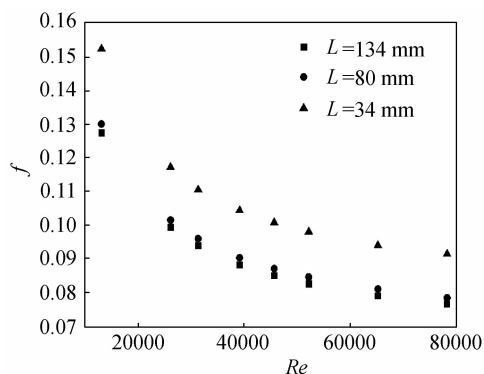
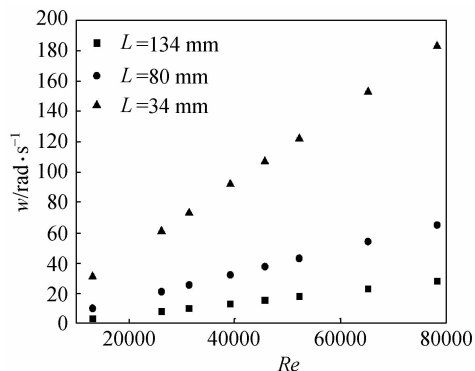
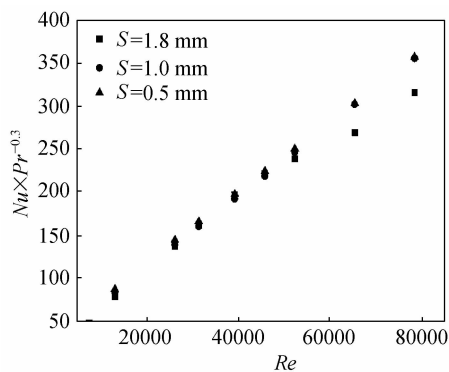
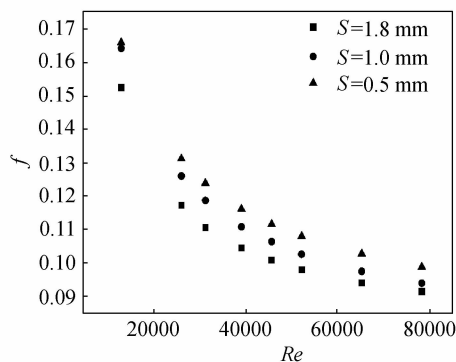
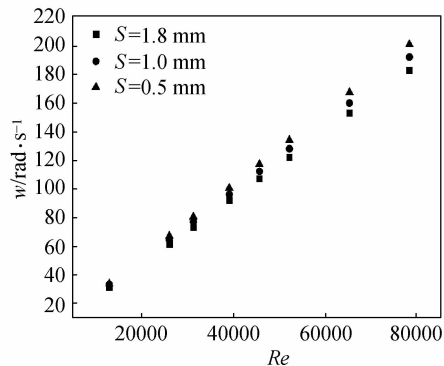
(a) Nu (b) f (c) w (a) Nu (b) f (c) w

图 5 转子螺旋节距对换热、阻力及转速的影响

Fig. 5 Effects of helix pitch of rotor on heat transfer, friction resistance and rotating speed

图 6 叶片与管壁间隙对换热、阻力及转速的影响

Fig. 6 Effects of clearance between blade and tube wall on heat transfer, friction resistance and rotating speed

mm, $C=3.0$ mm, 模拟了 S 分别为 0.5、1.0、1.8 mm 时的管内流动与换热, 其 $Nu \times Pr^{-0.3}$ 及阻力系数 f 随 Re 的变化示于图 6。

可见, 随着 S 的增加, f 逐渐减小, 其原因是 S 的增加导致叶片对湍流黏性底层的扰动作用减弱。在 $Re < 60000$ 时, 上述 3 种间隙下的换热基本相同; 当 $Re > 60000$ 之后, $S=1.8$ mm 时强化换热作用减弱, 而 $S=1.0$ mm 与 $S=0.5$ mm 基本相同。 S 的增加使转速略有减小。

3.4 转轴半径的影响

在 $Re=10000 \sim 90000$ 范围内, 固定 $L=34$ mm, $S=1.8$ mm, 模拟了 C 分别为 2.0、3.0、4.0 mm 3 种结构的管内流动与换热, $Nu \times Pr^{-0.3}$, 阻力系数 f 及转速随 Re 的变化示于图 7。

从图 7 可以看出, 随着转轴半径的增加 $Nu \times Pr^{-0.3}$ 和 f 都逐渐增大, 这是因为旋转轴半径的增加意味着流体流通面积的减小, 流速增加, 使得转

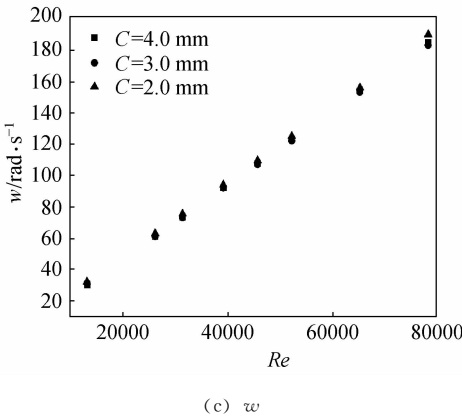
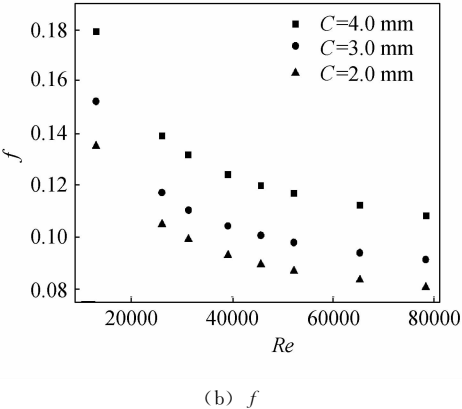
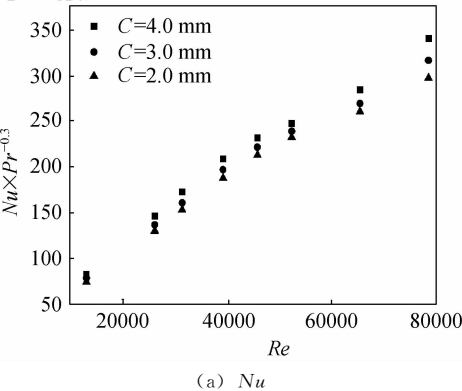


图 7 转轴半径对换热、阻力及转速的影响
Fig. 7 Effects of radius of rotating shaft on heat transfer, friction resistance and rotational speed

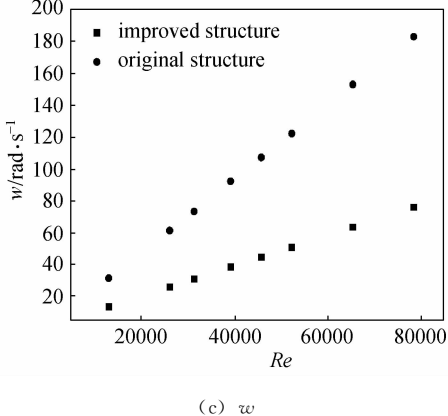
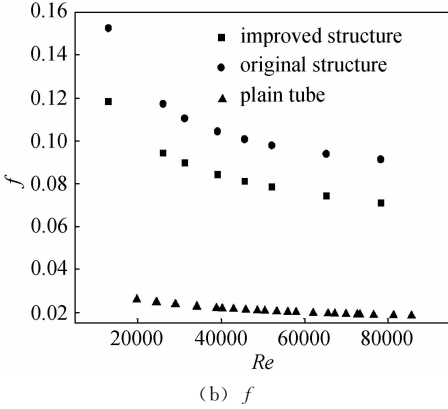
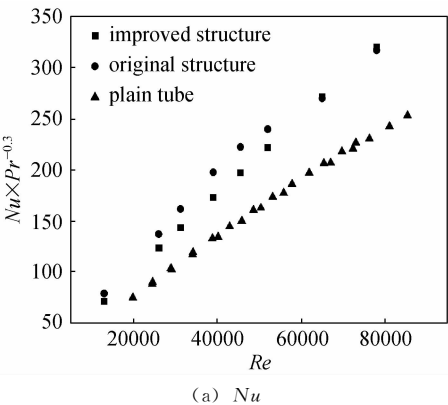


图 8 改进后螺旋转子的换热、阻力及转速
Fig. 8 Heat transfer performance, friction resistance and rotating speed of improved spiral rotor

子对流体的扰动作用加大。 C 的改变对转速基本没有影响。

3.5 改进型螺旋转子的性能

从上述数值计算结果得到的主要结论包括：转子螺旋节距增大到一定程度以后，再增加节距对换热影响不大，但仍可使阻力减小；叶片与管壁间隙 S 减小到一定程度以后，再减小间隙对换热强化影响不大，但会使阻力增大；随着转子转轴半径 C 的减小，阻力和换热都有一定程度的减小。再综合

考虑结构参数对转速的影响，为了达到保持强化换热基本不变而进一步减小流动阻力的目的，应该适当减小 S 和 C ，并增加转子螺旋节距。为此，给出如下改进的结构参数： $L=80$ mm， $S=1.0$ mm， $C=2.0$ mm。计算得到的 $Nu \times Pr^{-0.3}$ 及阻力系数 f 及转速随 Re 的变化示于图 8。

从图 8 中可以看出，改进的结构使换热稍微削弱了，而阻力系数 f 减小了 20%~30%，在一定程度上优化了螺旋转子的性能。虽然改进后的参数

使得转速降低了 1/2 左右,但转速仍然比较快,仍然具有除垢的性能。

4 结 论

数值计算表明,内插螺旋转子使管内换热强化 30% 左右,但阻力增加 6~7 倍,从节能的角度考虑,需要进一步优化其结构参数,以进一步减小阻力的增加。

随着转子螺旋节距、叶片与管壁间隙 S 的增加及转轴半径 C 的减小,管内 Nu 和阻力系数 f 都减小。转子螺旋节距增大到一定程度后,对换热及阻力的影响逐渐减弱。转子螺旋节距的减小可使转子转速显著增加,而 S 大小和 C 的改变基本不影响转子的转速。综合考虑以上各个参数对换热和流阻的影响,按照在换热强化改变不大及转速足够大以便具有除垢性能的条件下尽可能减小阻力的原则,给出了一组改进型螺旋转子的结构参数,螺旋节距的 1/3, $L=80\text{ mm}$, $S=1.0\text{ mm}$, $C=2.0\text{ mm}$,数值计算表明其换热略有减弱,但阻力系数减小 20%~30%。

符 号 说 明

C ——转轴半径, m

f ——阻力系数

L ——叶片转过 120° 对应的转子长度,为 1/3 节距, m

l ——力臂, m

M ——力矩, $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$

N ——转子所受轴向力, $kg \cdot m \cdot s^{-2}$

S ——转子叶片与管壁间隙, m

u ——来流速度, $m \cdot s^{-1}$

ω ——转子转动速度, $rad \cdot s^{-1}$

μ ——摩擦系数

References

- [1] Tijing L D, Pak B C, Baek B J, Lee D H. A study on heat transfer enhancement using straight and twisted internal fin inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, **33** (6): 719-726
- [2] Eiamsa-ard S, Promvong P. Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*, 2005, **78** (4): 483-494
- [3] Yakut K, Sahin B. The effects of vortex characteristics on performance of coiled wire turbulators used for heat transfer augmentation. *Applied Thermal Engineering*, 2004, **24** (16): 2427-2438
- [4] Eiamsa-ard S, Pethkool S, Thianpong C, Promvong P. Turbulent flow heat transfer and pressure loss in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, **35** (2): 120-129
- [5] Chen Guoping (陈国平), Yu Tianlan (俞天兰), Yu Xiumin (俞秀民). Researching on auto-clearing technique and conducting-heat's intensification of inclined tooth-like plastic dynamic twisted tapes. *Chemical Equipment & Anticorrosion* (化工设备与防腐蚀), 2004 (1): 39-41
- [6] Qing Depan (卿德藩), Zhou Li (周立), Yu Tianlan (俞天兰), Peng Deqi (彭德其), Yu Xiumin (俞秀民). Investigation on effects of automatic cleaning twisted stripe on fluid resistance in fouling condenser in power plant. *Mechanical Research & Application* (机械研究与应用), 2001, **14** (2): 3-4
- [7] Zhang Lin (张琳), You Yikuang (尤一匡), Qian Hongwei (钱红卫), Liu Yi (柳毅), Zhang Chengjun (张成军), Yu Xiumin (俞秀民). Experimental research of self-preventing fouling technology for the self-rotating twisted tape in heat exchangers. *Chemical Engineering* (化学工程), 2006, **34** (3): 16-19
- [8] Lin Rongduan (林榕端), Lin Qingyu (林清宇), Feng Qingge (冯庆革), Shi Weijun (石卫军). Study on the miniature hydraulic turbine in the heat exchanger tube. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2001, **37** (7): 41-43
- [9] Zhai Lihua (翟丽华), Zhu Zhibin (朱志彬), Dong Meiyong (董美英), Wu Shuang (吴爽), Wang Huaming (王华明), Lin Qingyu (林清宇), Hu Weipeng (胡卫朋), Lin Rongduan (林榕端). Experimental study on built-in mini-hydraulic turbine in heat exchanger tubes. *Equipment Manufacturing Technology* (装备制造技术), 2004, **1**: 13-15
- [10] Lin Qingyu (林清宇), Li Peining (李培宁), Lin Rongduan (林榕端), Feng Qingge (冯庆革), Zhai Lihua (翟丽华), Dong Meiyong (董美英). Study on the heat transfer enhancement by the hydraulic turbine in a tube. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2004, **40** (5): 165-169
- [11] Yang Weimin (杨卫民), Yan Hua (阎华), Geng Libo (耿立波). Jienengxin will bring energy saving into a new era. *Advanced Materials Industry* (新材料产业), 2006, **7**: 75-77
- [12] Yang Weimin (杨卫民), Geng Libo (耿立波), Yan Hua (阎华), Huang Wei (黄伟), Ding Yumei (丁玉梅), Xie Pengcheng (谢鹏程), Lai Shixing (赖士兴). Principle of energy saving and application about Jienengxin. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2006, **25**: 198-200
- [13] Chen Jinyao (陈金耀), Cao Ya (曹亚), Li Huilin (李惠林), Wang Zhaoxu (王朝旭). A study on friction and wear properties of POM/LDPE blends. *Polymer Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2004 (1): 104-107