

椭圆齿旋流口平带传热管内自动清洗及其传热强化

Automatic Fouling Removal and Heat Transfer Enhancement in Tubes Using Straight Strip-inserts with Elliptical Teeth and Broken Edge

俞天兰/YU Tian-lan¹, 蒋少青/JIANG Shao-qing², 俞秀民/YU Xiu-min¹, 金俊杰/JIN Jun-jie³

1. 湖南工业大学机械清洗研究所, 湖南株洲 412008

2. 长沙理工大学, 长沙 410076

3. 长沙华海节能设备公司, 长沙 410000

1. Mechanical Cleaning Institute, Hunan Polytechnic University, Zhuzhou 412008, Hunan Province, China

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China

3. Changsha Huahai Energy-saving Equipment Co. Ltd., Changsha 410000, China

[摘要] 介绍了一种特殊结构的旋流口椭圆齿平带的研制。平带上的每个椭圆齿都是使平带自转的流体动力结构元素,平带两侧的旋流口结构能够使管内的部分液体形成螺旋线流,因而具有近似斜齿扭带那样能够在较低流速下自转实现管内污垢在线自动清洗的宝贵性能。由于椭圆齿后的大量涡流、管内部分液体流线转变为螺旋线流股以及螺旋线流股与轴向流股分合交错这样3方面的作用,管内的对流传热强化的幅度由此远远高于光滑扭带。试验结果表明,这种平带不仅容易制造,并且综合性能好,在管内流速0.5 m/s左右就可运行;管内侧的传热系数提高170%,流体阻力在一般工程许可的范围内,因此具有较高的工程应用价值。

[关键词] 塑料带;自动清洗;流体动力;流体阻力

[中图分类号] TH17

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)07-0038-03

Abstract: This paper researches and develops the straight strip-insert of special structure, which has elliptical teeth and broken edge on both sides. The teeth are the elements to drive the insert self-rotate under the action of fluidic power. With the broken edge, part of the fluid in tubes is led to flow spirally. So, this straight strip with elliptical teeth can remove the fouling on tubes wall automatically at low flowing velocity just like that twisted strip with oblique teeth. The convection heat transfer enhancement is much more than that of the plain twisted strip because of three factors: much eddy flow behind the elliptical teeth, fluid flow being changed into spiral flow, and the combination and separation of the spiral flow and axial flow. The experiments show that this new insert can be manufactured easily and has great comprehensive performance. It can work reliably at a low velocity of 0.5 m/s and make the heat transfer coefficient inside tubes be increased by 170%. The flowing resistance is in the range of industrial permission. Therefore, it has great significance of industrial application

Key Words: plastic strip; automatic fouling removal; hydrodynamic; flow resistance

CLC Number: TH17

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)07-0038-03

1 引言

大多数传热设备的管内流速较低,容易生长污垢,传热效率低下。斜齿螺旋扭带能够同时解决较低流速下传热管内的自动清

洗和传热强化,对传热设备的节能、节水、降耗、增产、增效非常有益^[1]。但是,因螺旋扭带加斜齿的结构复杂,目前尚未突破工业化生产的制造难关。文献[2]提出的椭圆齿平带技术,虽然制造容易,

收稿日期:2006-02-05

基金项目:科技部火炬计划项目(99D231D7700584),教育部重点项目(00208),湖南省基金项目(02JJY2070)

作者简介:俞天兰,女,湖南工业大学过程装备与控制专业教研室,副教授,主要研究方向为传热强化与节能;

E-mail: zzyutianlan@163.com

gies [J]. Annals of Allergy, Asthma, & Immunology, 1996, 77: 460-466.

[2] 曹阳, 郎四维. 介绍一种新型空气自净系统 [J]. 建筑科学, 1998, 14(1): 58-61.

[3] FREY A H. Modification of animal room odor by passing the room supply air through a complex electrical field [J]. Bull Environ

Contam Toxicol, 1983, 31(6): 699-704.

[4] 唐敏康. 电除尘器中亚微粒子凝并机理的研究 [J]. 工业安全与防尘, 1995(6): 1-5.

[5] HINDS W C. Aerosol Technology [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999.

(责任编辑 王 芷)

但是自转困难,相当不可靠。为此,本文提出一种新结构的椭圆齿螺旋流口平带,既能采用注塑成型破解螺旋齿带的制造难题,又有螺旋斜齿扭带自转性能好的特性。

2 结构原理

图1所示的平带,两面均设置有均布排列的椭圆齿。每个椭圆齿受到传热管内液体冲推力,在横截面的分量 F_r 都对平带的中心线产生一个自转的动力矩。虽然所有椭圆齿合成的总动力矩比光滑扭带的自转动力矩成倍加大,但是,试验中发现这种椭圆齿平带存在自转启动困难和自转速度慢的问题。其原因是被椭圆齿导向的液流前方受到平带自身和传热管壁的阻碍,因为在前方没有像螺旋斜齿扭带的螺旋流道那样的流通面积^[1]。为此,在每个椭圆齿下游侧设计一个螺旋流口,使被椭圆齿导向的液流通过旋流口流到平带的背面,在管内形成的螺旋线流动,其螺距与齿距相等,从而使螺旋椭圆齿扭带具有螺旋流道的结构特点,以此解决自转启动困难和自转速度慢的问题,比较好地保持螺旋斜齿扭带的自转动力矩大、能够在较低流速下自转清洗、高效传热强化的性能优越性。

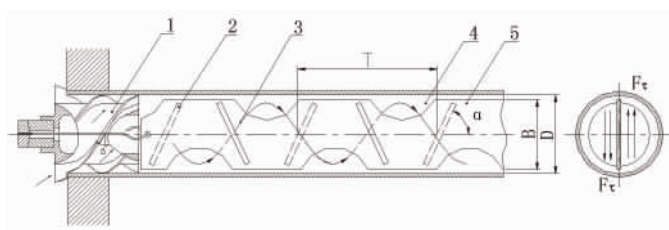


图1 传热管内椭圆齿螺旋流口平带结构原理示意图
注:1 管口旋流轴承;2 椭圆斜齿;3 螺旋流线;4 旋流口;5 旋流口平带
Fig. 1 Sketch map of the straight strip-inserts with elliptical teeth and broken edge

3 自转动力矩设计理论

椭圆齿平带设计首先要追求的是能够成倍地增大平带的自转清洗力矩,达到在低流速下也能克服清洗力矩阻力矩,保障连续自转的可靠性,实现自动清洗。

为了工程计算的方便,对动力矩的计算作如下的近似简化:
① 分析时不考虑边界层影响,将截面流速视为常数;
② 不考虑由于上游椭圆齿使液体的螺旋流动方向发生的改变;
③ 液流对齿面的冲推力是均匀的;
④ 平带的厚度相对于椭圆齿的高度可以忽略。

在计算中对其相关的几何结构参数规定如下:平带的长度为 L ,宽度为 B ;平带的正面与背面均设置有椭圆齿,其齿距为 T ,液流螺旋线的螺旋角为 α ,椭圆齿与传热管中心线的斜交角为 β 。椭圆齿为半椭圆形,其短轴与平带宽度 B 相等,椭圆短轴与管内径之比值记为 p 。记椭圆齿的面积与完整椭圆面积之比为 k_1 ,记传热管横截面的投影面积中心到传热管的中心线的垂直距离为 k_2R 。

用动量定理求取单个椭圆齿受到液体冲推作用产生的扭带转动动力矩 M 。结合图2受力分析计算如下。管内液体速度为 $u/\sin \alpha$,该流速相对于椭圆齿的法向分速度为 $u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha$ 。

于是单个椭圆齿受到的冲推力 F 为:

$$F = \frac{k_1 \pi}{2} (pR)^2 u p [u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha]. \quad (1)$$

冲推力在横截面的分力为:

$$F_r = \frac{k_1 \pi}{2} (pR)^2 u p [u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha] \cos \beta \quad (2)$$

产生的动力矩 M 为:

$$M = \frac{\pi}{2} k_1 (pR)^2 u p [u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha] \cos \beta k_2 R \quad (3)$$

因此,整个扭带上所有椭圆齿产生的合力矩 M 为:

$$M = 2 \frac{L}{T} \frac{\pi}{2} k_1 (pR)^2 u p [u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha] \cos \beta k_2 R \\ = k_1 k_2 \pi p^2 R^3 u^2 p \frac{L \cos(\alpha+\beta) \cos \beta}{T \sin \alpha} \quad (4)$$

由式(4)可知,动力矩最大化的结构优化,在管径、流速、液体密度相同条件下,除了齿高参数比显然是尽可能大为好,其余3个结构参数——齿形($k_1 k_2 p$)、齿距 T 、齿的斜角 β 是相互影响关联,没有简单的数学关系。例如,齿距 $[u \cos(\alpha+\beta)/\sin \alpha] \cos \beta$ 似乎愈小愈好,但是随着齿距 T 的减少,液流螺旋线的螺旋角为 α 就愈来愈大,值会愈来愈小。因此,采用结构优化试验的办法来研究确定。

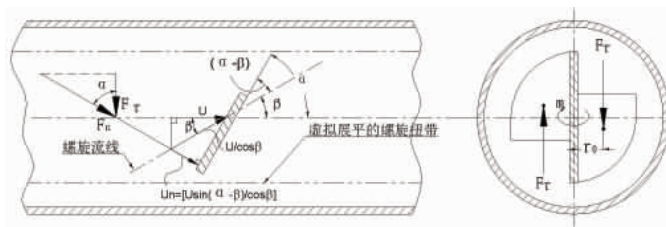


图2 椭圆齿螺旋流口平带上单个椭圆齿的动力矩计算分析图
Fig. 2 Kinetic moment of a single elliptical tooth

4 流体动力性能优化试验

试验装置如图3所示。竖直的不锈钢管40 mm×4 mm×2 000 mm,管内装上结构参数不同的试验平带。测量流体阻力的2根软管接口之间的距离为800 mm,而齿带长 L 为1 000 mm。管口采用600螺旋管口轴承座。采用玻璃转子流量计测量流速。由于动力矩绝对值很小,没有适合的仪器来测量,为了保证测试结果的可靠性和精度,自制了能够测量微小力矩需要的高灵敏弹簧测力计。平带阻力通过差压仪测量。

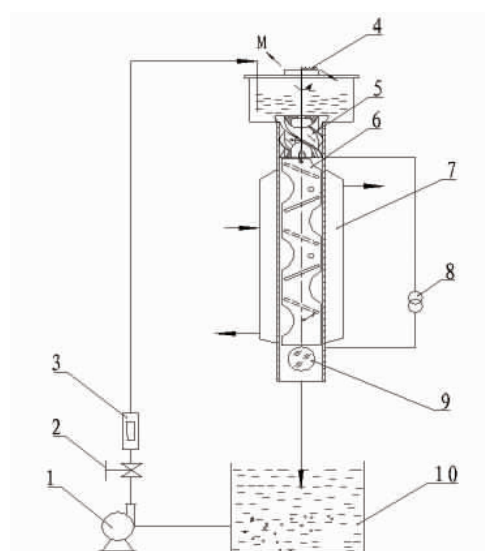


图3 椭圆齿螺旋流口平带优化试验装置
注:1. 泵;2. 调节阀;3. 流量计;4. 力矩仪;5. 轴承;6. 旋流口平带;
7. 加热管夹套;8. 阻力仪;9. 观察窗;10. 水槽

Fig. 3 Testing equipment for optimizing the straight strip-inserts with elliptical teeth and broken edge

考虑自转清洗动力矩最大化和流体阻力较低的综性能优化,设计了不同齿距、不同斜角、不同大小旋流口的5种试验样带。试验结果如图4和图5的性能曲线。可见其中结构为6030型和5045型比较好。

椭圆齿旋流口平带是专为较低流速的传热管内(一般0.8 m/s以下)研制的自动清洗带。从图5曲线可知,在管内流速0.625 m/s时的流体阻力为5.25 Kpa/m。因此,即使4管程、传热管的长度为6 m,设备的总阻力也只有0.132 MPa。这是一般工程所容许的。

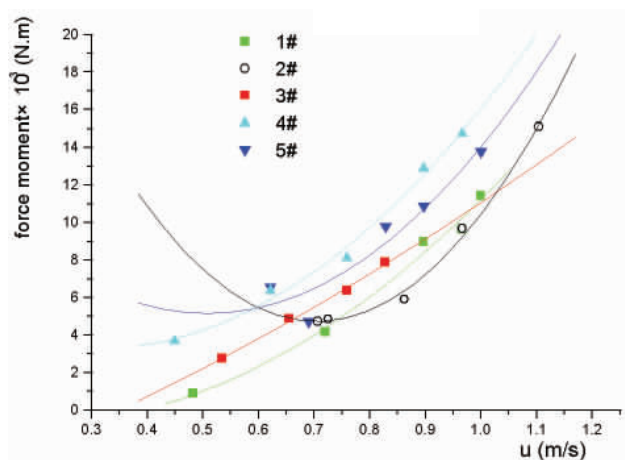


图4 椭圆齿旋流口平带动力矩最大化比较试验曲线
Fig. 4 Testing curve of maximizing the kinetic moment

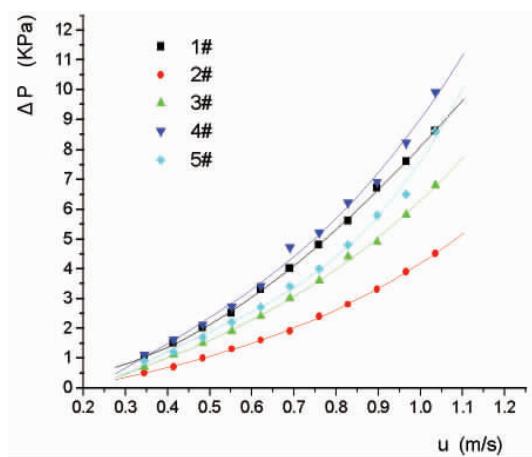


图5 椭圆齿旋流口平带的阻力特性试验曲线
Fig. 5 Testing curve of the drag characteristics

5 自转动力矩的入口强化

为了进一步增强椭圆齿旋流口平带的自转动力矩,采用类似汽轮机的结构原理,配套在管口安装螺旋流轴承座。管内液体通过螺旋流轴承座时,被转变为贴近管壁的、成倍加快的螺旋线流动,并且液体的螺旋流向恰与平带斜齿导向形成的螺旋流线反向。因此,由轴承座出来的入口液流直冲椭圆斜齿,使平带的椭圆齿得到一个入口冲推动力矩。这种螺旋流轴承座-椭圆齿平带的动力矩强化效果相当好。由试验测量曲线图6可知,与光滑纽带的动力矩相比,平均强化幅度高达75%~101%。

6 对流传热的强化

自转清洗的光滑纽带的纯传热强化作用不够高,一般只有8%~15%^[5]。但是,平带的每个椭圆齿的作用不仅是自动清洗的自转动力矩强化齿,更重要的作用还在于高效传热强化齿。在 $\phi 40$ mm $\times$ 4 mm $\times$ 2 000 mm的不锈钢管,管外水蒸汽加热,管内通冷却水,对椭圆齿平带的传热系数进行实验测量。试验结果如图6所示。椭圆齿旋流口平带的传热系数比光滑纽带平均提高了171%。使管内的对流传热系数成倍提高作用最大的是每个椭圆齿的下游出现的大量涡流;其次,另一部分液流仍然保持原来的轴向流动,与螺旋流的融合和齿带自转对液流的有效扰动,也使传热管内液体的对流传热效率得以进一步强化。

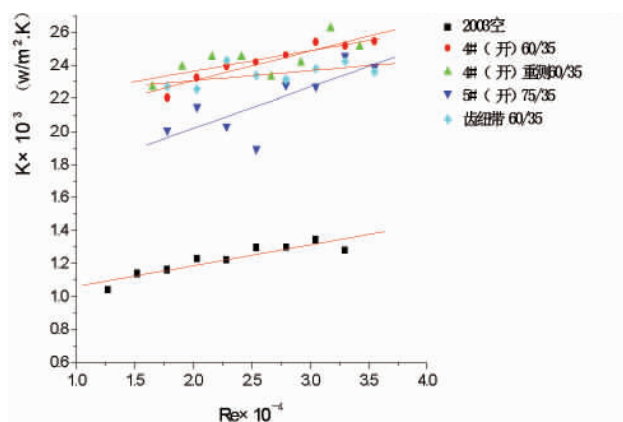


图6 椭圆齿旋流口平带的传热系数曲线
Fig. 6 Testing curve of the heat transfer coefficient

7 结论

- 1) 椭圆齿旋流口平带具有较大的流体动力矩,像螺旋椭圆齿纽带那样能够在较低流速的传热设备中实现自动清洗防垢。
- 2) 椭圆齿旋流口平带的传热强化效果很好,传热系数略高于类型椭圆齿纽带,是光滑纽带的2倍左右。
- 3) 在相同流速下,椭圆齿旋流口平带的流体阻力远高于光滑纽带;但若正确地在较低流速下应用它,传热设备的总阻力在一般工程容许的范围内。
- 4) 椭圆齿旋流口平带破解了螺旋齿带的制造难题,注塑成型制造费用低、制品质量好,便于工业化生产。

参考文献 (References)

- [1] 余德渊. 我国换热器研究及其工业化进程 [C]. 机械部兰州石油机械研究所, 1988.
- [2] 俞秀民. 传热设备污垢的重大经济意义 [J]. 化学清洗, 1995, 118(3): 22-24.
- [3] 俞秀民. 列管式水冷设备塑料纽带自动清洗防垢技术 [J]. 湘潭大学学报, 1998 (3): 120-123.
- [4] ROSEN N D. 冷凝机械清洗工艺现状 [J]. 水处理, 1990(1): 28-35.
- [5] 刘志儒. 流体动力自动清洗螺旋纽带的污垢清洗动力矩研究 [J]. 流体机械, 2001, 29(3): 15-17.
- [6] 支校衡, 俞秀民, 俞天兰, 等. 能源系统低流速传热设备的齿形纽带自动清洗新技术 [J]. 煤矿机械, 2003 (4): 85-86.
- [7] 俞天兰, 俞秀民, 支校衡, 等. 低流速传热管自动清洗强化齿型纽带研究 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2004, 26(1): 89-91.

(责任编辑 黄永明)