

椭圆翅片管对风洞气流湍流特性影响研究

赵波^{1,2}, 符澄^{1,2}, 裴海涛², 廖达雄^{1,2}, 朱博²

(1.中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;)
(2.中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要:针对风洞中应用的某型椭圆翅片管热交换器,开展了换热管束对气流扰动特性仿真研究。首先利用试验结果验证了数值方法的可靠性,然后通过数值仿真着重对比分析了不同来流条件下热交换器下游湍流发展变化特性,并对管排数目和翅片间距对热交换器下游气流扰动和流场分布的影响展开了研究。结果表明:热交换器换热管束对上游不均匀来流有较强的整流作用,可使流动分布趋向均匀;热交换器后气流的湍流强度受来流条件影响不大,主要取决于换热管束本身的结构参数;热交换器后气流湍流强度在入口流体流动方向上很快衰减,该型热交换器在入口下游600 mm处湍流强度即可减小到7.5%,与试验测试值吻合较好。

关键词:风洞;热交换器;椭圆翅片管;湍流特性;数值仿真

中图分类号:TK172 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2020)02-0303-06

近年来,国内大型连续式跨声速风洞发展迅速,许多大型设备建设逐渐展开。作为风洞重要组成部分,热交换器主要起到调节风洞气流温度的作用^[1]。布置在风洞内的热交换器会对气流产生扰动,进而使得下游的温度场均匀性和速度场均匀性变差^[2],这对高流场品质的风洞来说十分不利,为此有必要开展热交换器对气流扰动特性的研究工作。椭圆翅片管热交换器相比圆管翅片管热交换器具有更优良的传热压损性能^[3],因此逐渐替代圆管翅片管热交换器,被应用于对流场品质要求较高的风洞中。目前椭圆翅片管热交换器研究主要集中在提高传热压损性能上,采用的方式包括优化管排和翅片结构参数及布局^[4-5]、在翅片上增设扰流结构^[6-7]等。换热管束对流体扰动特性和扰动发展变化的研究还不多见,通常在分析传热和压损的机理时会研究管束间的流动形态,如谢洪虎等人通过数值计算方法分析了折流板和管束共同作用下的湍流流动强化传热机理^[8],邓丁元等采用数值计算方法对涡轮叶片椭圆形扰流柱排冷却通道的流动和换热进行了研究^[9],Moore等则在试验中通过格栅改变来流的湍流强度,利用热线风速仪和流场显

示的方法研究了单排翅片圆管的流动和换热机理^[10],这些研究的着眼点也都落在强化传热或者降低压损上。

本文针对某型风洞用椭圆翅片管热交换器,对不同来流条件下其后湍流发展变化特性展开对比分析,同时研究管排数目和翅片间距对热交换器后气流湍流强度的影响,以期探明热交换器对气流扰动的的影响大小以及扰动在下游的传播情况,对设计满足风洞流场品质要求的热交换器提供有力支撑。

1 模型及计算方法

研究中使用基准结构为4排椭圆翅片管,根据周期性特性,仿真计算中采用2列椭圆管和1层翅片做计算区域,换热管束计算模型及网格如图1所示, x 轴正向为入口流体流动方向。采用结构网格,管壁和翅片壁面边界层加密处理,第一层网格距壁面0.1 mm,对应 Y^+ 在1~5之间。鉴于本风洞中气流温度变化范围不大,热交换器部段气流速度小于12 m/s,研究中暂不考虑传热对流动的影响,数值计算中只求质量守恒方程和动量守恒方程,采用二

阶迎风离散格式和基于压力修正的 SIMPLE 算法求解不可压流场,入口为速度边界,出口为压力边界,换热管壁和翅片壁为壁面边界,其余流体边界设为周期性边界。根据风洞热交换器的风速范围,热交换器入口风速取 6,8,10 和 12 m/s。



图 1 4 排椭圆翅片管模型网格

2 计算方法验证

2.1 湍流模型研究

按照图 1 建立的模型,对比不同湍流模型的计算结果,计算区域入口流体流动方向中轴线上湍流分布如图 2 所示,其中,SWF 表示标准壁面函数,EWT 表示增强壁面函数处理。rke-SWF 和 skw 的计算结果出现明显不合理波动;剩余 5 种模型的结果中,SST 模型计算的湍流强度最高;ske-EWT 模型计算的湍流强度最低,在热交换器入口下游 600 mm 处为 7.5%,与试验结果的 6.0% 最符合(见 2.3 节),最终湍流模型选择 ske-EWT 模型。

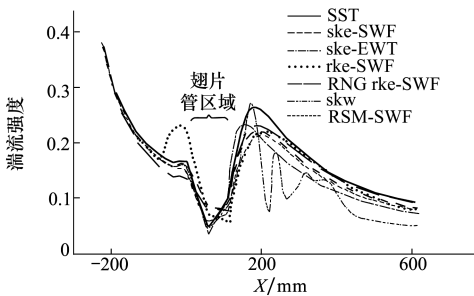


图 2 不同湍流模型的计算区域中轴线湍流分布

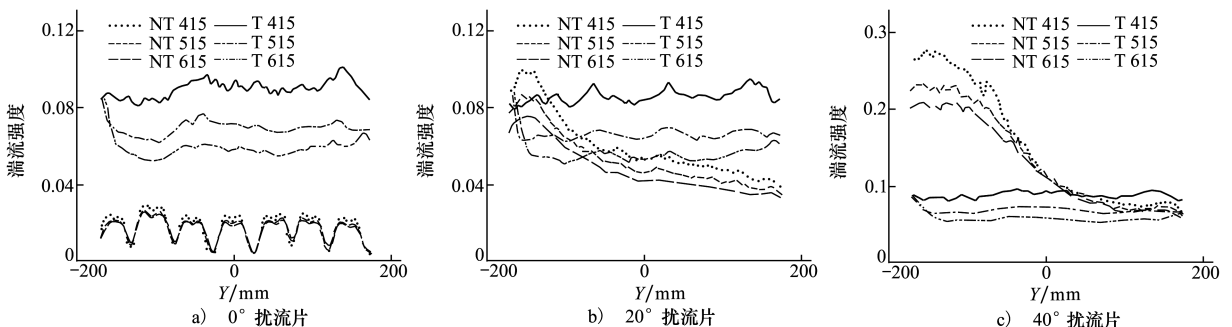


图 4 无管束及带管束时截面湍流分布

2.2 验证试验设计

按图 1 所示模型,试制了 4 排椭圆翅片管热交换器试验件。为调整热交换器入口湍流强度,在热交换器入口上游 200 mm 处设置 7 个扰流薄片,水平放置,间距 50 mm,厚度 4 mm,宽 40 mm,可自由调节偏斜角。其中一个扰流片对应的流动区域如图 3 的数值模型所示。使用 Dantec 公司的热线风速仪对热交换器下游不同截面的湍流强度和速度进行测量,它可沿横向、竖向及轴向 3 个方向移动,最大移测范围为 600 mm,标准测速范围在 0.02~300 m/s 间,标定器速度精度 1%,标定器湍流强度精度 0.1%。

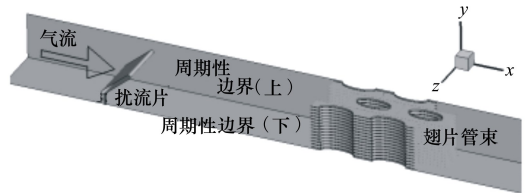


图 3 与试验对应的热交换器扰流仿真模型

2.3 试验对比研究

当来流风速为 10 m/s 时,测试了不同扰流片角度下热交换下游湍流分布和发展变化,比较了在测试截面与扰流片之间放置热交换器和不放置热交换器时的差异。图 4 为扰流片与水平方向夹角为 0°, 20°, 40° 时,热交换器入口下游 415, 515 和 615 mm 截面(对应于热交换器出口下游 300, 400 和 500 mm 截面)竖直中轴线上的湍流强度分布,其中,横坐标为竖直方向位置,NT 表示无换热管束,T 表示有换热管束,其后数字表示测试截面与热交换器入口距离(无换热管束与有换热管束在同一截面位置测试)。

无换热管束时,当扰流片倾斜角增大,下游截面垂直方向的湍流逐渐增强,并且由于扰流片斜向上冲击到洞壁上表面,风洞下部区域出现较大的低速回流区,此区域的湍流强度比上部区域的湍流强度要大很多。但当换热管束存在时,垂直方向的湍流分布变得均匀起来,越向下游发展越均匀,排除边壁效应,在热交换器入口下游 615 mm 截面的湍流强度在 6% 左右,波动范围在 $\pm 0.5\%$ 以内;并且当来流湍流强度较低时,经过换热管束气流湍流强度会增大,而当来流湍流强度逐渐增大时,换热管束下游的湍流强度大小基本不受来流湍流强度变化的影响。结果显示,换热管束对上游不均匀的来流具有一定的整流效果。

按照与试验一致的换热管束和来流条件,开展了热交换器流动仿真计算,计算区域中轴线上湍流分布结果如图 5 所示,其中,1 个周期单元为图 1 所示的 1 层翅片计算域,14 个周期单元为图 3 所示的 14 层翅片计算域。4 种算例的热交换器下游湍流强度基本一致,说明热交换器下游湍流强度由换热管束本身的结构参数决定,来流条件对其影响很小。数值仿真中热交换器入口下游 400,500,600 mm 3 个截面的湍流强度分别约为 11.0%,9.0%,7.5%,对应截面试验测试的湍流强度分别约为 9.0%,7.0%,6%,两者在湍流强度的数值和衰减速率上都相吻合。另外,从热交换器出口下游的湍流强度在入口流体流动方向上的分布可见,单个周期单元结果与 14 个周期单元结果完全重合,表明数值仿真中采用单个周期计算区域的结果是可靠的。后续数值研究将使用单个周期计算区域模型开展研究。

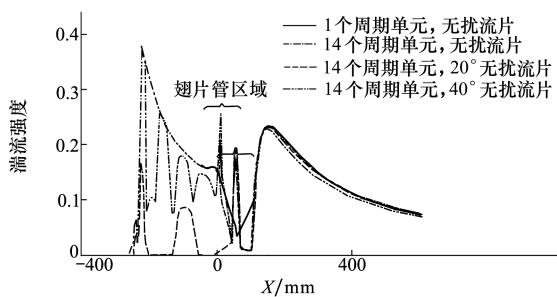


图 5 不同扰流片倾角下计算区域中轴线湍流分布

3 湍流特性仿真结果分析

3.1 来流条件的影响

设定来流湍流强度为 40%,图 6 给出了不同来

流速度时计算区域中轴线上湍流分布结果。紧挨换热管束后的区域湍流强度差别很大,速度越高,管后湍流强度峰值越小;而热交换器入口下游 300 mm 后的湍流强度大小趋向一致。

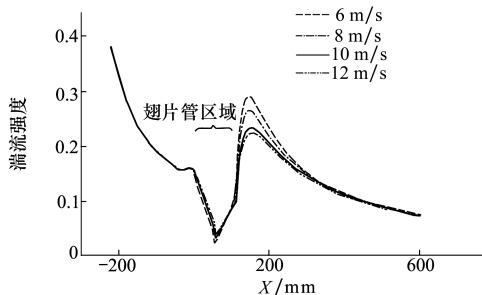


图 6 不同来流风速下计算区域中轴线湍流分布

从图 7 可见,随着来流速度的提高,换热管束后旋涡减小,主流对管后的脉动抑制随之增强,旋涡后附近的湍流强度明显减小。在管束下游 200 mm 后,横向湍流强度分布逐渐趋向一致。

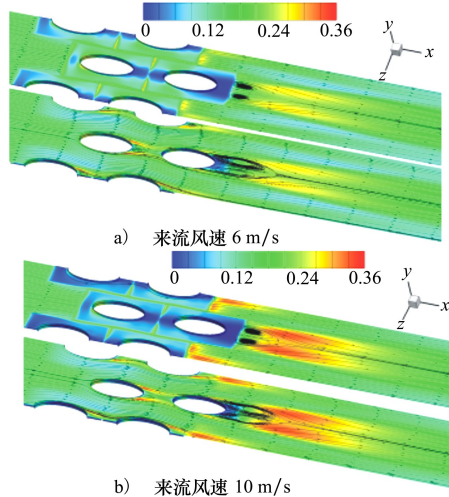


图 7 水平截面湍流强度云图及流线图

图 8 给出了扰流片倾斜角为 0° 时,试验测试的不同风速条件下热交换器入口下游 615 mm 截面垂直中轴线上的湍流强度分布,这几种风速条件下的湍流强度最大差别约为 1.5%,而数值仿真结果的该项差值约为 1%。

设定不同的来流湍流强度,图 9 给出来流速度为 10 m/s 时计算区域中轴线上湍流分布结果。可见换热管束下游的湍流强度大小及分布不受来流湍流强度大小的影响。该结论表明热交换器下游的湍流强度主要由换热管束本身的结构决定,降低下游

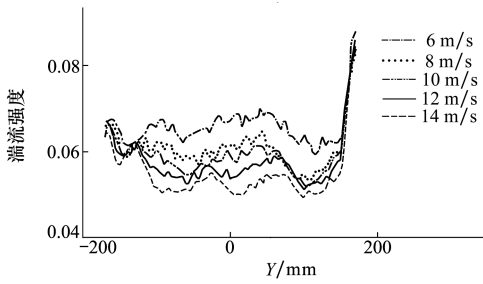


图 8 不同来流风速下热交换器 615 mm 截面湍流测试值

湍流的关键方法是选用自生湍流强度较低的换热芯体。

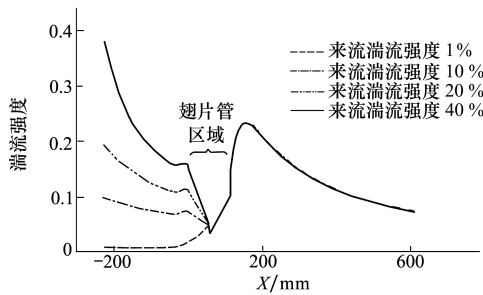


图 9 不同来流湍流强度下计算区域中轴线湍流分布

3.2 换热管束结构的影响

换热管的外形、管间距、排列方式及翅片参数等,都会影响管后旋涡结构和相互间的作用。针对风洞选用的该型热交换器,本文主要研究管排数目和翅片距离对下游湍流分布的影响。

图 10 给出了管排数目分别为 4,6,8 时,计算区域中轴线上湍流分布结果。可见管排数目对热交换器下游的湍流分布及衰减速率影响很小。

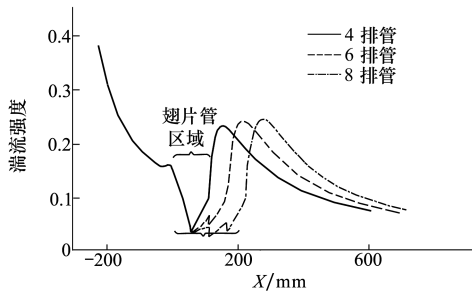


图 10 不同管排数目下计算区域中轴线湍流分布

图 11 给出了翅距 3.5 mm、翅距 7 mm 和无翅光管 3 种情况下的计算区域中轴线上湍流分布结果,其中 FD 表示翅片距离。在上游无扰流片即来流均

匀时,翅片距离越大,热交换器下游的湍流强度越小,在热交换器入口下游 600 mm 截面处相差约为 2%,这是因为翅片是固壁,它的加入影响了管后分离涡的形态,气流和壁面作用导致气流扰动增强。在上游设置倾角为 40° 的扰流片即来流为强扰动流动时,换热管后的湍流强度峰值相对均匀来流情况并没有明显变化,但翅距越小,热交换器下游湍流衰减速度变化越小,表明翅距会影响到上游复杂流动向下游的传递。

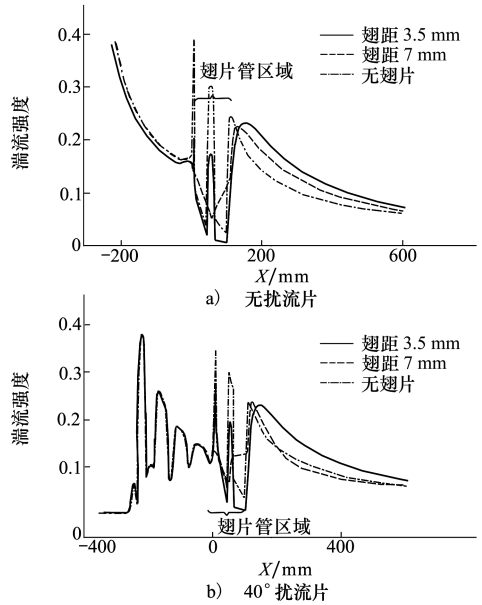


图 11 不同翅片距离下计算区域中轴线湍流分布

4 结 论

本文通过数值仿真方法研究了来流条件和换热管束结构参数对椭圆翅片管热交换器下游湍流特性的影响,得到以下结论:

- 1) 热交换器下游湍流强度主要由换热管束结构决定,来流条件对其影响很小,降低下游湍流的核心是选用对气流扰动小、自生湍流较低的换热芯体。
- 2) 热交换器对上游气流扰动的抑制作用明显,当上游扰流片倾角为 20° 和 40° 时,下游湍流强度分布与上游来流均匀时差别不大,热交换器入口下游 600 mm 处的湍流强度差别小于 1%。
- 3) 当入口风速增大时,热交换器下游湍流强度峰值变小,主要由于漩涡尺度减小,扰动频率加快,导致黏性耗散作用增强,但在 6~12 m/s 的速度范围内,热交换器入口下游 600 mm 处的湍流强度最大差别已经减小到 1% 以内。

4) 随着管排数目增多,热交换器后气流湍流强度有小幅的增大,但衰减速度也有所增大,热交换器入口下游 600 mm 处的湍流强度基本相同。

5) 热交换器的翅距对其后湍流强度影响较大。上游来流均匀时,翅片的存在影响了流体的三维流

动,翅壁和流体的作用使得下游湍流强度增大。当上游来流强烈扰动时,热交换器下游的湍流强度分布规律变得很复杂,一个总的趋势是,翅距越小,热交换器自身结构对气流的作用就越强烈,其后气流受上游的影响就越小。

参考文献:

- [1] 刘晓波,廖达雄,张巧芸. 大型连续式跨声速风洞热交换器概述[J]. 实验流体力学, 2009, 23(1): 99-104
LIU Xiaobo, LIAO Daxiong, ZHANG Qiaoyun. A Review of Heat Exchanger Study for Large-Scale Continuous Transonic Wind Tunnels[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(1): 99-104 (in Chinese)
- [2] 赵波,廖达雄,陈吉明,等. 大型连续式跨声速风洞热交换器设计技术初步研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(6): 696-702
ZHAO Bo, LIAO Daxiong, CHEN Jiming, et al. Investigation of Heat Exchanger Design for Continuous Transonic and Supersonic Wind Tunnel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(6): 696-702 (in Chinese)
- [3] 史美中,王中铮. 换热器原理与设计[M]2版. 南京:东南大学出版社, 2003
SHI Meizhong, WANG Zhongzheng. Principia and Design of Heat Transfer Derice [M] 2nd Edition. Nanjing: Southeast University Press, 2003 (in Chinese)
- [4] Naphon P, Wongwises S. A Review of Flow and Heat Transfer Characteristics in Curved Tubes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10: 463-490
- [5] 冯丽丽,杜小泽,杨勇平,等. 椭圆管矩形翅片间空气流动的扰流特征[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 119-122
FENG Lili, DU Xiaoze, YANG Yongping, et al. Characteristics of Air Flow around Elliptical Tubes with Rectangular Fins[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 119-122 (in Chinese)
- [6] 党艳辉,明廷臻,刘伟,等. 开孔矩形翅片椭圆管流动及传热特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2009, 60(12): 2975-2980
DANG Yanhui, MING Tingzhen, LIU Wei, et al. Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer Characteristics of Rectangular-Wing Elliptic Tube with Interrupted Holes[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(12): 2975-2980 (in Chinese)
- [7] 阴继翔,马建宗,武广剑,等. 平直-波纹翅片椭圆管外空气流动与传热特性的数值研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(4): 455-460
YIN Jixiang, MA Jianzong, WU Guangjian, et al. Numerical Study of Air Flow and Heat Transfer Characteristics on the Outside of Combined Plane-Wavy Fin-and-Oval Tube[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(4): 455-460 (in Chinese)
- [8] 谢洪虎,江楠. 折流板换热器壳程湍流流动与换热的三维数值模拟[J]. 化工进展, 2009, 28(9): 1518-1521
XIE Honghu, JIANG Nan. Three-Dimensional Numerical Simulation for Shell Side Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics in Baffle-Pate Heat Exchangers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(9): 1518-1521 (in Chinese)
- [9] 邓丁元,高行山,虞跨海,等. 椭圆形扰流柱冷却通道流动与换热数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1545-1552
DENG Dingyuan, GAO Kingshan, YU Kuahai, et al. Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer of Elliptical Pin-Fins in Cooling Channel[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1545-1552 (in Chinese)
- [10] Moore J A, Stevenson J P J, Grimes R. Thermal and Flow Characteristics of a Single-Row Circular-Finned Tube Heat Exchanger under Elevated Free-Stream Turbulence[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 57: 48-57

Study on the Effect of Oval Tubes on Airflow Turbulence Characteristics in Wind Tunnel

ZHAO Bo^{1,2}, FU Cheng^{1,2}, PEI Haitao², LIAO Daxiong^{1,2}, ZHU Bo²

(1.State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang 621000, China;
2.Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang 621000, China)

Abstract: The flow Turbulence characteristics of finned oval tube heat exchanger used in wind tunnel were studied by using numerical simulation method. Firstly, the reliability of the numerical method was verified by the experimental results. And then the research was focused on the comparative analysis of the characteristics of turbulent flow downstream of heat exchanger under different inflow conditions, and the influence of the tubes number and fins spacing on the airflow turbulence and the flow field distribution downstream of heat exchanger were obtained too. The results indicate that oval tubes have a significant effect for improving the flow quality when incoming flow is inhomogeneous, and the velocity distribution behind heat exchanger tends to become uniform. Inflow conditions have a slight effect on the turbulence intensity behind heat exchanger, which mainly depends on the structural parameters of heat transfer tubes. The turbulence intensity decays very quickly in the flow direction. The value is reduced to 7.5% at the cross section 600 mm downstream of the heat exchanger inlet, which agrees well with the experimental result.

Keywords: wind tunnel; heat exchanger; finned oval tube; turbulence characteristic; numerical simulation