

紧凑式强预冷换热器叉排管束的大涡模拟

陈一鸣¹, 李泽鹏¹, 张俊强¹, 邹正平^{1,2,3}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191)

摘 要: 采用大涡模拟方法对紧凑式强预冷换热器叉排管束的对流换热问题进行了研究,并运用动力模态分解(DMD)方法对流场的拟序结构及换热统计特性进行了分析。结果表明:在计算工况内($Re \leq 6000$),前排管束的流动结构为有规律的剪切层运动和尾涡脱落。后排管束的流动结构为无规律的小尺度旋涡结构,同时其流场表现出无序性;前排管表面瞬时努塞尔数具有较为固定的波动频率,而后排管壁由于受到前排圆管脱落旋涡的无规律撞击,其管壁瞬时 Nu 无固定波动频率;在 $Re=2600$ 的工况下,管束内的熵产主要来源于换热而非耗散,主要流动结构对耗散熵产和换热熵产的贡献在管壁边界层和自由剪切层位置,其对前排管的熵产有较大贡献,而对后排管熵产的贡献较小。

关键词: 预冷换热器; 叉排管束; 流热耦合; 大涡模拟; 动力模态分解; 拟序结构

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Large eddy simulation on the staggered tube bundle of the compact precooler

CHEN Yiming¹, LI Zepeng¹, ZHANG Junqiang¹, ZOU Zhengping^{1,2,3}

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

3. Research Institute of Aero-engine,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The large-eddy simulation was carried out to research convective heat transfer in the staggered tube bundle of the compact precooler. Besides, the dynamic mode decomposition (DMD) method was used to analyze the coherent structure and statistical characteristic of heat transfer of cross-row tube bundles. Results showed that within the simulated operating range ($Re \leq 6000$), the flow structure of the front tube bundle exhibited regular shear

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 民用飞机专项科研技术研究项目(MJ-2016-D-35)

作者简介: 陈一鸣(1991—),男,博士生,研究领域为吸气式高超声速动力。

通信作者: 邹正平(1970—),男,教授、博士生导师,博士,研究领域为吸气式高超声速动力及涡轮机气体动力学。

E-mail: zouzhenping@buaa.edu.cn

引用格式: 陈一鸣,李泽鹏,张俊强,等. 紧凑式强预冷换热器叉排管束的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2021, 36(4): 701-712. CHEN Yiming, LI Zepeng, ZHANG Junqiang, et al. Large eddy simulation on the staggered tube bundle of the compact precooler [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(4): 701-712.

layer movement and wake vortex shedding. The flow structure of the rear tube bundle was an irregular small-scale vortex structure, and the disorderly flow field of the rear tube bundle was presented. The instantaneous Nusselt number on the surface of the front rows had a relatively fixed wave frequency, while the instantaneous Nu on the back rows had no fixed wave frequency because of the irregular impact of the falling vortex of the front rows. Under the condition of $Re = 2\,600$, the entropy production in the bundle mainly came from heat transfer rather than dissipation. The main flow structure contributed to the dissipative entropy production and heat transfer entropy production in the location of the boundary layer and free shear layer on the tube wall. It contributed greatly to the entropy production in the front row tubes, but less to the entropy production in the back row tubes.

Key words: precooler; staggered tube bundle; fluid-thermal coupling; large eddy simulation; dynamic mode decomposition; coherent structure

紧凑式强预冷换热器是高超声速强预冷发动机的核心部件之一^[1],可实现对大流量高温来流的大幅冷却^[2],使空气压气机进口气流的温度回归到材料、滑油系统等所能正常工作的范围,极大地拓宽了航空涡轮发动机的工作范围^[3-5]。

紧凑式强预冷换热器管束间的流体伴随着复杂的流动现象,如旋涡形成、脱落以及耗散等,因此其内部的流动、换热特性一直以来都是相关领域的研究重点^[6-9]。武翼飞^[10]以强预冷器内微小尺度圆管换热为研究对象,对其内部流动和外部绕流的流动和换热特性进行了研究分析,研究结果表明,对于管内流动换热,减小管径或增加进口雷诺数都可以提高壁面的表面传热系数,但也会导致熵产的增加,对于管外绕流,进口雷诺数增加会使总压恢复系数降低,表面传热系数升高。Yu等^[11]基于进化算法的方法,从换热效率、总压降、紧凑性3个角度对强预冷换热器进行了优化。研究结果发现:在保持进口速度、密度不变时,预冷换热器的冷却效率与管阵紧凑度、总压降密切相关。近年来,得益于数值模拟与实验技术的发展,流动换热机理研究逐渐成为紧凑式强预冷换热器流动换热研究的重要领域^[12-14]。Webber等通过实验测量了在紧凑换热器内圆管表面不同雷诺数下的努塞尔数(Nu)分布^[15],研究结果表明,和单管圆柱绕流不同,管阵中圆管背风侧 Nu 沿圆管分布较为平滑,管背风面的换热系数远小于迎风面。Taler^[16]对紧凑式换热器的管束外部流动换热开展了数值模拟研究,结果表明,管背风面的回流对换热的贡献较小。而Yoo等^[17]采用实验方法研究了无量纲管间距对叉排管束阵列换热的影响,发现圆管的局部表面传热系数随着无量纲管间距减小而增大,并推测其原因在于更小的管距

布局下,前一排管回流区更小,该区域内涡的强度更高,换热更强。目前关于紧凑式强预冷换热器的流动换热机理研究已经取得了众多的重要研究成果,但这些研究对流动结构与换热现象之间相互影响的研究多属于定性的讨论,缺少比较系统性的详细分析。紧凑式强预冷换热器管束间的流动与换热过程具有流热强耦合、非定常等特征,全面地掌握其内部流动、换热机理是实现高性能紧凑式强预冷换热器设计的关键。

本文以紧凑式强预冷换热器叉排管束为研究对象,采用大涡模拟方法对叉排管束间的表面传热问题进行研究,同时采用动力学模态分解(DMD)方法和涡量可视化对管束内各频率对应的流动结构进行识别,从模态的稳定性上分析流动结构对流场的贡献,并利用所获得的叉排管束流场的拟序结构和换热统计特性来揭示叉排管束的流动换热机理。

1 研究对象及研究方法

1.1 研究对象

本文的研究对象参考了SABRE(synergetic air-breathing rocket engine)发动机紧凑式强预冷换热器(如图1)的叉排管束结构,为保证管束内流动充分发展,模拟时管排数取为13排,计算域如图2所示。圆管直径 $D = 5\text{ mm}$,展向(Z 轴方向)长度为 πD 。管束横向(Y 轴方向)节径比 $X_t = 2.0$,纵向(X 轴方向)节径比为 $X_l = 1.5$ 。为避免出口回流和入口效应的影响,计算域设置了长度均取为 $8D$ 的进口段和出口段。

1.2 研究方法

流体流动和换热满足质量、动量和能量守恒定律。由于所研究的工况范围内,来流速度很低,

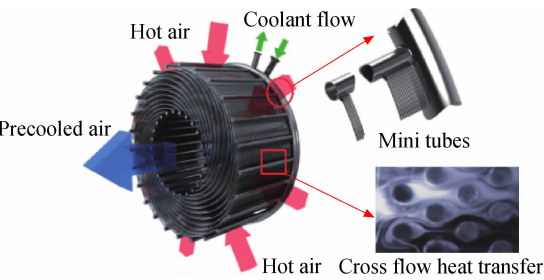


图 1 紧凑型强预冷换热器结构图^[5]
Fig. 1 Schematic diagram of the compact pre-cooler^[5]

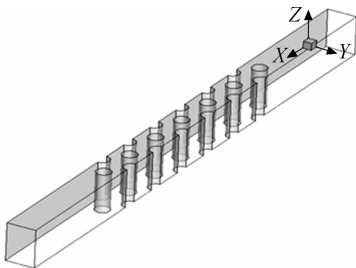


图 2 数值计算模型
Fig. 2 Numerical simulation model

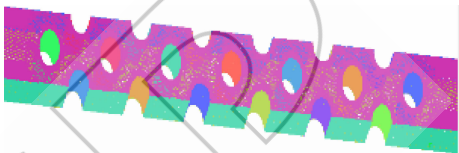
远低于马赫数 $Ma=0.1$, 选取基于压力的求解器求解三维非定常 Navier-Stokes 方程, 采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法进行速度和压力的耦合求解, 雷诺应力、扩散项、压力应变率、耗散项和生成项方程均采用 3 阶精度 QUCIK (quadratic upstream interpolation for connective kinematics) 格式进行空间离散, 时间离散采用 2 阶精度双时间部隐式格式。大涡模拟模型选用 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型封闭方程组。计算参数以及边界条件的设定如表 1 所示。其中时间步长为 2.6×10^{-6} ,

表 1 叉排管束计算的计算参数以及边界条件的设定

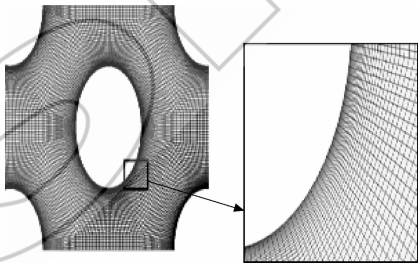
Table 1 Calculation parameters and boundary conditions setting for simulation on staggered tube bundle	
计算参数	参数设定
收敛容差	10^{-6}
时间步长	2.6×10^{-6}
虚拟时间步	15
主流空气温度/K	300
进出口边界条件	进出口总压
壁面边界条件	定温无滑移壁面
无换热壁面温度/K	300
冷却壁面温度/K	260
垂直于 Y 方向边界条件	周期边界条件
垂直于 Z 方向边界条件	对称边界条件

在本文的网格尺度下确保克朗数 (Courant number) 小于 1 的必要条件, 且能保证每个旋涡脱落周期的迭代步数超过 500 以保证计算能够捕捉多排管流场内复杂流动结构的完整时空演化过程。

圆管外部绕流采用 O 型网格, 壁面周围进行加密。首先对网格进行无关性验证, 为充分捕捉速度边界层和温度边界层内的信息, 将第一层网格高度 0.002 mm , 最大 $y^+ \approx 0.2$ 。管束进口段分布 80 个节点, 出口段分布 100 个节点。整体计算域及圆管局部网格如图 3 所示。



(a) 整体计算域网格



(b) 管壁周围局部放大图

图 3 网格划分示意图
Fig. 3 Schematic diagram for grid

通过调节圆管周向、径向和展向的网格数来进行网格无关性验证, 最终确定叉排管束计算域网格参数如表 2 所示。

表 2 叉排管束计算域网格参数

Table 2 Grid parameters of the staggered tube bundle	
网格参数	数值
径向	40
圆管周向	204
径向膨胀比	1.12
展向	45
网格总数/万	550

文献[18]中公开了 REL (Reaction Engines Limited) 公司通过实验得出的预冷器雷诺数与单位长度压降之间的关系, 本文通过大涡模拟得出的管壁无换热条件下各工况下数值计算结果与实验结果的对比如图 4 所示。纵坐标为文献[18]中

所定义雷诺数(Re),其特征长度为叉排管束的水力直径。由图可知,不同压降条件下数值计算得到的雷诺数与文献[18]中实验数据较为吻合,由此验证了本文采用的数值模拟方法具有可靠性。

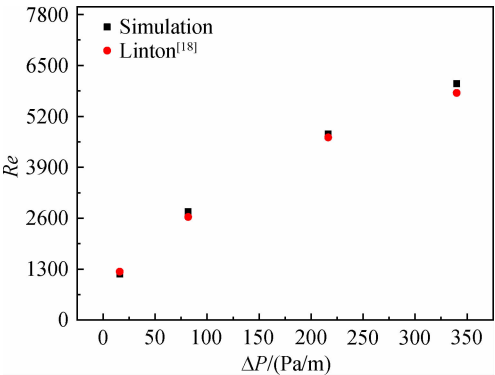


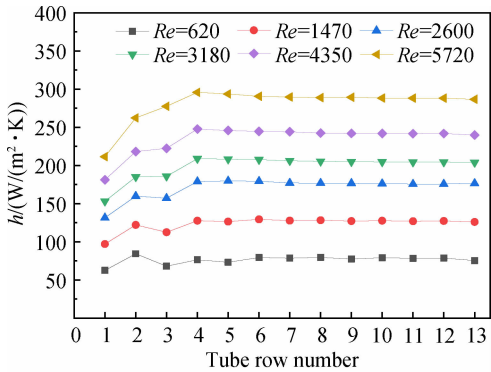
图 4 计算结果与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results and experimental results

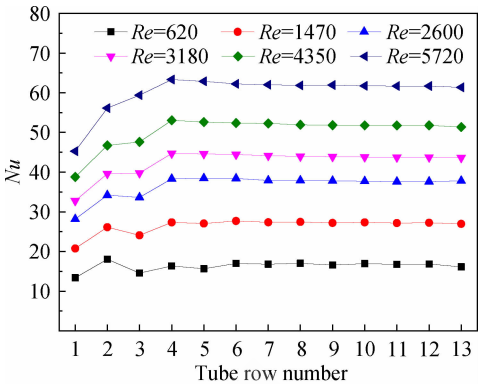
2 结果与分析

2.1 来流雷诺数对叉排管束换热的影响

图 5 为各排管的对流换热强度随来流雷诺数的变化规律,本节中不同来流雷诺数工况所对应的叉排管束具有相同的几何和近壁面气体导热率,因此在本节所研究的雷诺数范围内,表面传热系数 h 呈现出同 Nu 一致的变化规律。由图可知,管壁 Nu 随 Re 的增加而增大,该规律与流体横掠圆管表面传热系数关联式 $Nu=CR^aPr^b$ 一致,其中 a 和 b 为由实验数据拟合确定的数值, C 为与管束排布有关的常数, Pr 为普朗特数,不同的换热环境有不同的数值。在绕圆管流动过程中,各排管对来流的作用相当于湍流格子,在第 4 排管之后,管束内流动已充分发展,因此,对流换热强度在第 4 排管后基本不变。



(a) 表面传热系数



(b) 努塞尔数

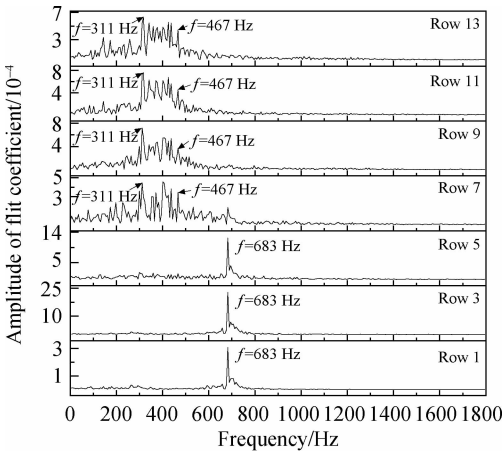
图 5 各排管对流换热强度随来流雷诺数变化规律
Fig. 5 Variation of the average heat exchange strength for each tube row with the incoming Reynolds number

2.2 叉排管束流场拟序结构分析

本文对来流 $Re=2600$ 下管壁有冷却和无冷却两种壁面条件下奇数排共 7 排管的升力系数进行了监控,并将其曲线进行快速傅里叶变换,得到其频域图如图 6 所示。

图 6 所示的叉排管束升力系数频谱图上出现了多个峰值,表明其流场中存在多个频率的周期性流动结构。在前排管流场,有换热壁面冷却的工况中出现单一频率的流动结构,其频率为 683 Hz,无壁面冷却工况中前排管流场有两个频率对应的流动结构,该现象与文献[19]中的现象一致,对应频率分别为 311 Hz 和 604 Hz。在后排管流场,有壁面冷却工况下出现频率范围 311 Hz 到 467 Hz 的频带,而无换热条件下,相应流动结构为单一峰值,其频率为 353 Hz。因此壁面冷却导致管束间流动结发生了改变。

受管间非定常流场的影响,管束的进口段和出口段的速度会发生周期性的脉动,如图 7 所示,进



(a) 有冷却

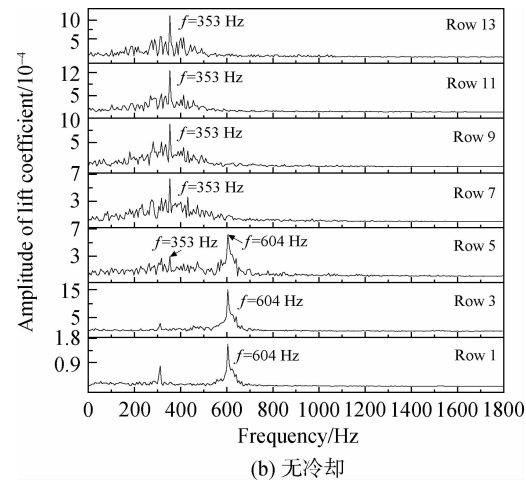


图 6 叉排管束不同位置流动结构的频率

Fig. 6 Frequency of the flow structure at different positions for the staggered tube bundle

出口速度的波动频率均为 945 Hz 或者 946 Hz,该频率下对应的纵坐标表示该脉动能量幅值 E 的大小,表明叉排管束的来流条件存在一个固有频率。

为探究壁面冷却条件下流场内不同频率所对应的流动结构,对管束流场的展向涡量 ω 进行了 DMD 文献[20-22]分析,分析样本为 25 个周期的涡量场,快照序列总数为 1401 个,每两个快照序列的时间间隔为 2.6×10^{-5} s,满足奈奎斯特采样定理。DMD 分析得到频谱图如图 8 所示,图中横坐标为流动结构对应的频率,纵坐标为流动结构对流场的贡献程度,由图可知,除了 0 阶模态以

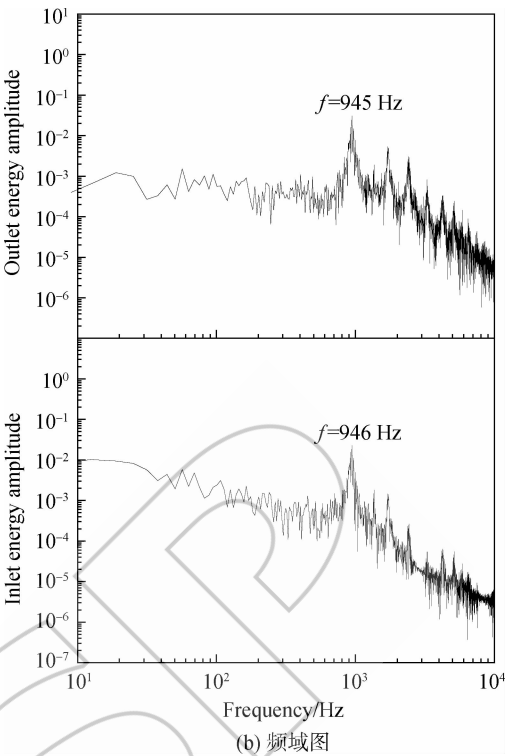


图 7 管束进出口速度脉动

Fig. 7 Speed pulsation of inlet and outlet for the tube bundle

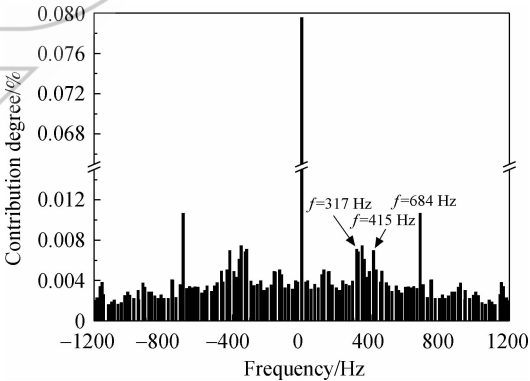
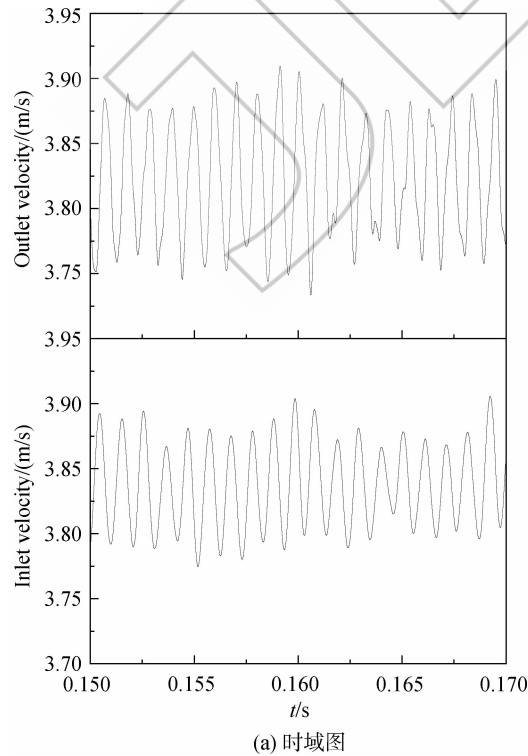


图 8 壁面冷却条件下不同流动结构频谱图

Fig. 8 Spectrograms of different flow structures under wall cooling conditions

外,有壁面冷却时对流场贡献最大的流动结构对应频率 f 依次为:684、349、317、415 Hz。各频率对应的流动结构如图 9 所示,684 Hz 频率对应的流动结构出现在前排管流场的剪切层和尾迹处,其对应的流动结构为剪切层的运动和尾涡的脱落;而 349、317 Hz 和 415 Hz 频率对应的流动结构为后排管的剪切层位置和尾迹处,形式较为杂乱,其对应流动结构为后排管剪切层运动及涡结构的脱落。

图 9 所示的 DMD 分析结果确认了相应频率

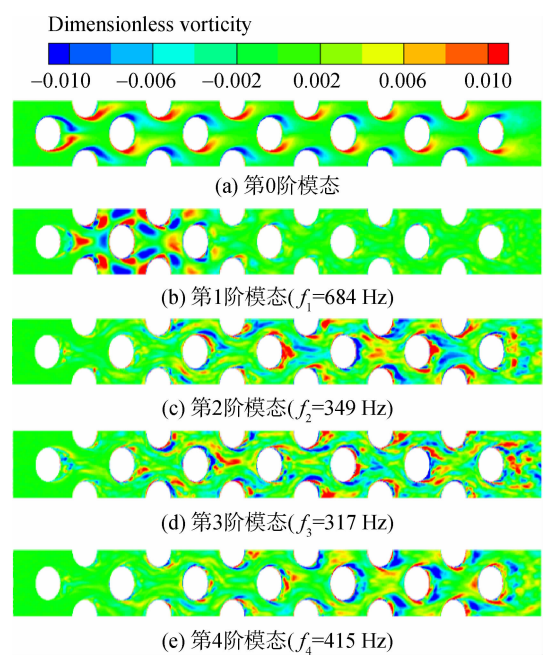


图 9 有壁面冷却条件下叉排管束流场中不同频率的流动结构图

Fig. 9 Flow structure diagram of different frequencies in the staggered tube bundle under the wall cooling conditions

的流动结构在管排中出现的位置及其形态,为得到相应频率流动结构的运动特征,通过求解非定常流场的展向涡量,对能够反映流场主要动力信息的一阶模态进行了分析,其频率 $f_2 = 684 \text{ Hz}$,相应流动结构的周期 $T_2 = 1/684 \text{ s}$ 。首先对前 6 排管涡量场的流动结构进行分析,如图 10 所示,选取时间长度为 1 个周期,展示了不同的时间段中的 Z 向涡量云图,每幅图的时间间隔为 $1/5 T_2$ 。

通过第 2 排下部管附近的流动来说明对应流动结构的运动周期,流动结构用圆圈标出便于跟踪其运动路径。在图 10(a)中,剪切层开始与壁面发生分离,形成自由剪切层,经过 $1/5 T_2$ 时间后从片段图 10(b)中可以看出,自由剪切层开始卷起,到了片段图 10(c)中自由剪切层卷起形成旋涡并发生分离,形成脱落涡,片段图 10(d)~图 10(e)中脱落涡沿着尾迹向下游迁移,其强度在迁移过程中不断衰减,同时,圆柱表面的边界层也在生长并逐渐与壁面发生分离。最后,片段图 10(f)中形成自由剪切层,与片段图 10(a)处于相同状态,开始进入下一个周期。

从图 10 可以看出第 3 排管的尾涡脱落过程也较为明显,其周期与第 2 排管相同。第 4 排管只能大概看出其涡从生长到脱落、迁移的周期性,但与前几排管相比不是很明显,原因是第 3 排管

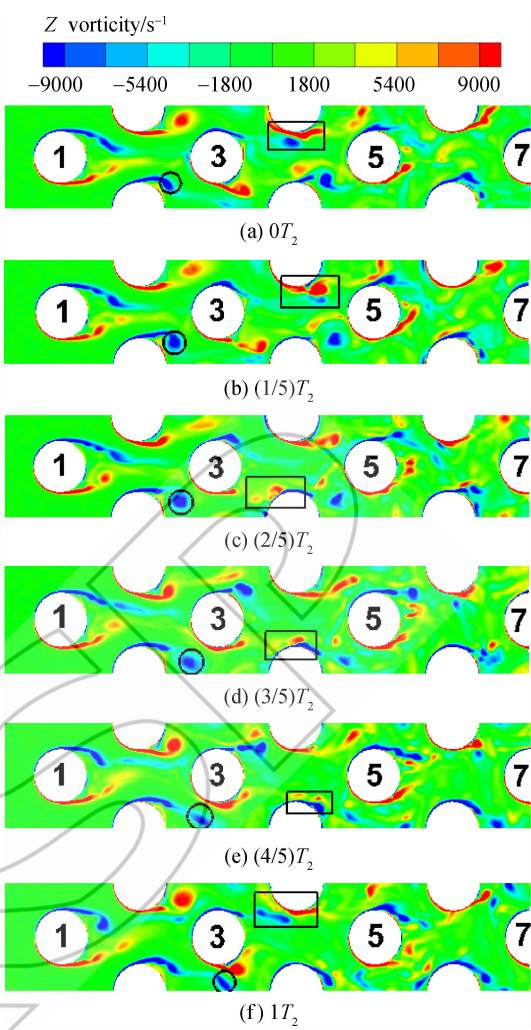


图 10 叉排管束前排 1 个周期内的涡量场

Fig. 10 Front vorticity field of cross tube bundles in one period

的正负涡涡在向下游迁移的过程中分别与第 4 排上下两根管发生了撞击,在图 10 中用矩形框标出。由于第 3 排管的尾涡涡量与第 4 排管边界层涡量方向相反,因此撞击对第 4 排管的尾涡的形成和脱落造成了干扰。另外,图 10(b)中显示出第 5 排管的尾迹中的 684 Hz 对应流动结构已经十分微弱,从片段图 10(b)、图 10(c)中可以看出前排管尾涡撞击形成的小尺度涡又继续撞击第 5 排管的边界层,对第五排管尾涡的形成以及脱落产生了较大的影响,改变了其附近流动结构的周期性运动状态,使得第 5 排管附近出现其他频率的流动结构,如图 10(c)、图 10(d)所示,对应的速度矢量图如图 11 所示。

图 12 为后排同一时间段的涡量场,与图 10 所示的前排管的涡量场不同,后排管的展向涡量场中规则的脱落涡结构较少,且后排的整个涡量场较为杂乱,图 13 表示用 Q 准则^[22] 识别的叉排

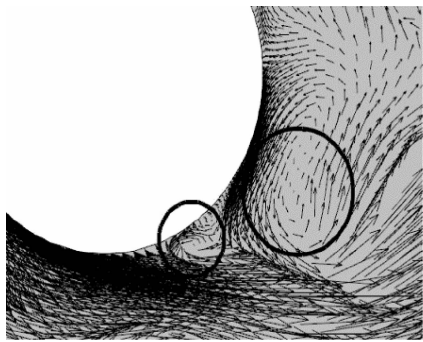


图 11 第 5 排管管壁脱落涡矢量图
Fig. 11 Shedding vortex vector diagram of the fifth row tube

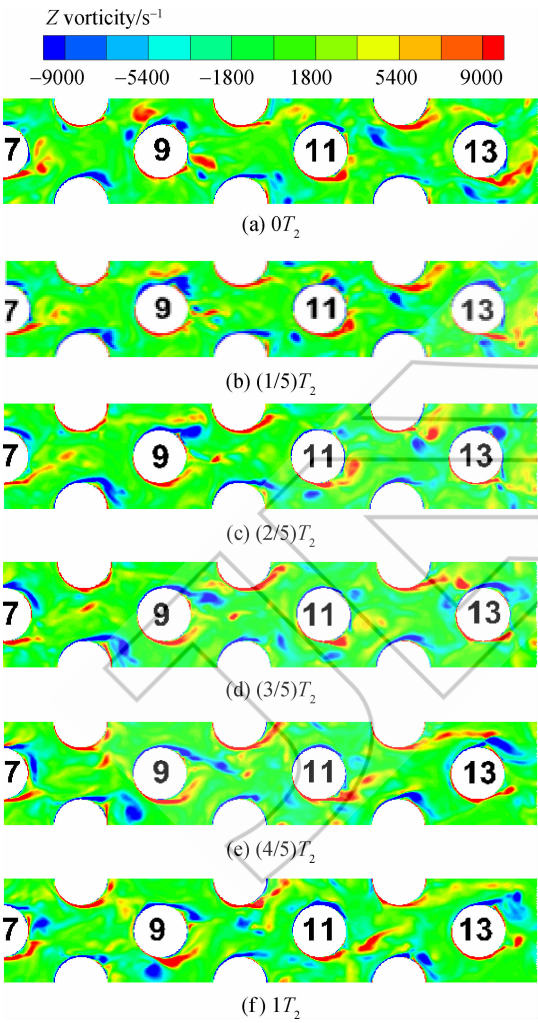


图 12 叉排管束后排 1 个周期内的涡量场
Fig. 12 Rear vorticity field of the staggered tube bundle in one period

管束内的三维旋涡相干结构,可以看出后排管流场内均为小尺度流动结构,这是因为从前排圆管脱落的尾涡在迁移过程中相互碰撞导致涡破碎,同时前排尾迹的旋涡撞击后排管壁的边

界层,影响了其边界层的发展,导致后排管旋涡脱落的周期特性不够明显。同时,后排管涡的撞击导致旋涡的破碎,使得后排管的流场中分布着无规律小尺度的涡结构,造成了后排管流场的无序性。

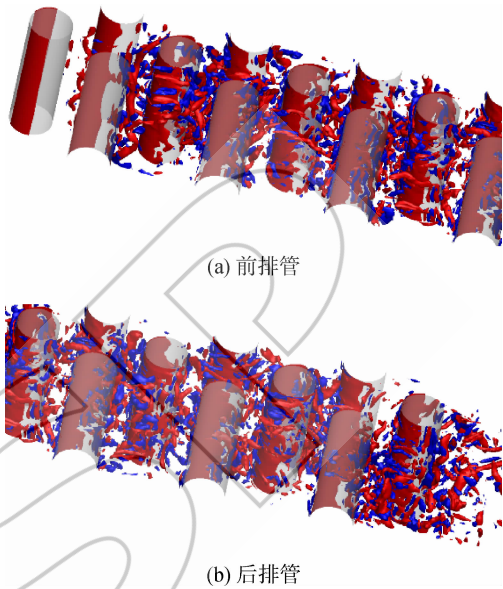


图 13 叉排管束中的旋涡相干结构
Fig. 13 Vortex coherent structure in the staggered tube bundle

如上所述,后排管自由剪切层的发展受到了前排旋涡脱落的影响,其耗散加剧,导致自由剪切层需要更多的时间增厚然后形成一个跨越尾流的卷起,自由剪切层的生长周期变长,频率相应减小,所以图 6、图 9 显示的后排管流动结构频率小于前排管。

2.3 叉排管束表面对流换热强度分析

对流 $Re=2600$ 下时前排管和后排管管壁 Nu 的脉动及其与流动的关系进行了分析。参考温度取各时刻各排管周围的平均温度,取第 1、3 和 9 排为研究对象,图 14 为 3 排管表面 Nu 随时间的变化,可以看到各排管的表面 Nu 在随时间波动,且第 1 排管的波动幅度相对较小。将各时域图进行快速傅里叶变换,得到其对应频域图如图 15 所示,第 1 排管的频率与流场的固有频率相同,可以得出管束流场的固有频率引起了第 1 排管迎流 Re 以相应频率变化,导致第 1 排管表面的 Nu 以相应周期波动,但由于管束流场固有振动的振幅较小,所以第 1 排管 Nu 变化的幅度相对较小。

对于第 3 排管,如图 15 所示,其表面 Nu 的

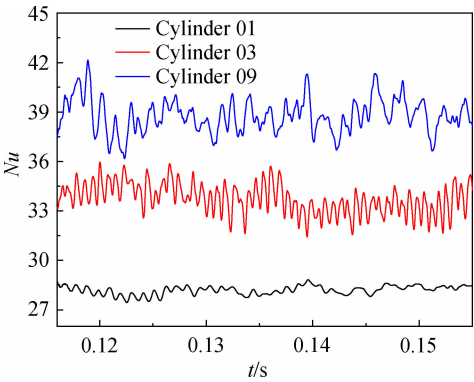


图 14 各排管表面 Nu 时域图

Fig. 14 Time domain diagram of Nu on the surface for each tube

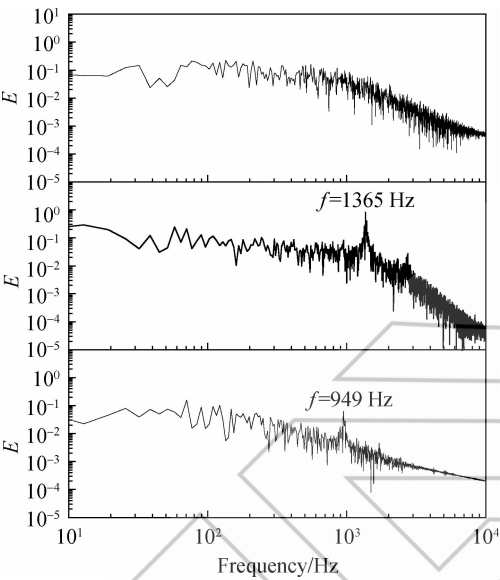


图 15 各排管表面 Nu 频域图

Fig. 15 Frequency domain diagram of Nu on the surface for each tube

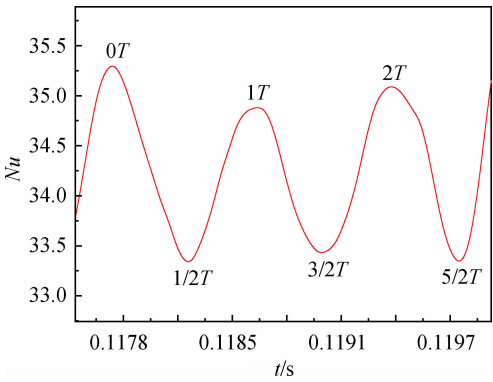


图 16 第 3 排管表面 Nu 在 3 个周期内的变化

Fig. 16 Change of Nu on the surface for the third row tube in three cycles

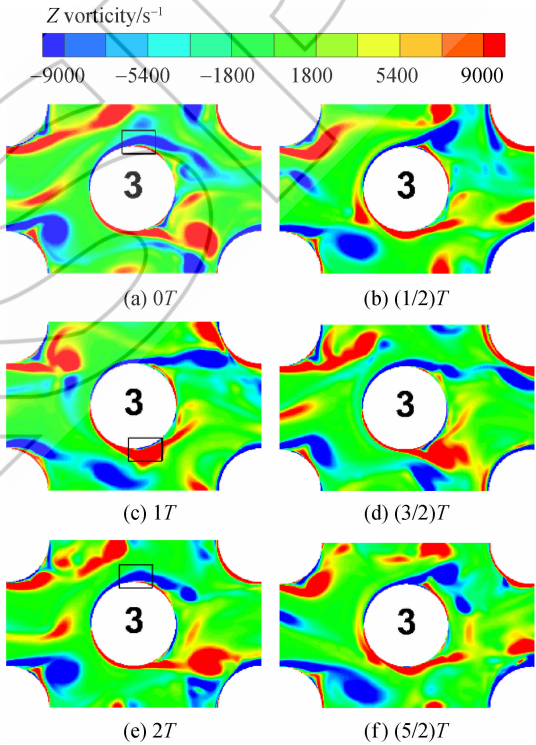


图 17 第 3 排管流场涡量图

Fig. 17 Vorticity diagram of the flow field around the third row tube

波动频率为 $1365\text{ Hz}=2f_z$ ，为前排管涡脱落频率的两倍，因此前排管表面 Nu 发生的周期变化与管壁两侧旋涡脱落有关。结合管束前排管的涡量图对 3 个周期的 Nu 时域图进行分析，图 16 为选取的第 3 排管 3 个周期内 Nu 的变化，图 17 表示所选的 3 个周期内的涡量场，左侧图 17(a)、图 17(c)、图 17(e)代表 Nu 的峰值对应的瞬时涡量场，右侧图 17(b)、图 17(d)、图 17(f)代表 Nu 的谷值对应的瞬时涡量场。结合图 10 以及前述对前排管涡量场的分析可知，图 17 左侧 Nu 峰值所对应时刻的涡量场正处于剪切层刚与壁面发生分离的时刻，从图 17 左侧图方框中的壁面处可以明显地看到与主流涡量方向相反的回流，在分离点处壁面剪切层内缘脱离壁

面，圆柱分离点的下游区域为脱体区，脱体区流动的扰动作用强化了换热，局部 Nu 相比上游剪切层覆盖区域较高。

在剪切层刚脱离壁面的时刻，分离点在圆柱的位置靠前，使得分离点后脱体区的面积较大，因此该时刻的圆管 Nu 在 1 个周期内最高。在图 17 的右侧图中，旋涡即将与自由剪切层发生分离，这时自由剪切层开始重新附着于壁面，由于前排管壁面边界层为层流边界层，其内部传热能力较弱，当壁面被剪切层包裹面积较多时，

脱体区的面积随之减小,管壁 Nu 因此较低。因此,在前排管的流场中,管壁表面剪切层的周期性运动是造成其表面 Nu 发生周期性波动的直接原因。

在后排管区域,图 14 所示的第 9 排管的管壁 Nu 随时间呈无规律变化,另外从图 15 中可以看出,第 9 排管表面的 Nu 无明显的频率峰值,根据前文对后排管流场的分析,前排圆管脱落的旋涡对后排管壁的无规律撞击影响了后排管壁表面边界层的正常发展,因此后排管管壁的对流换热强度随时间无规律波动。

2.4 叉排管束流场损失分析

图 18 表示某一时刻流场的耗散熵产 $S_{gen,f}$ 和换热熵产 $S_{gen,h}$ 分布,由图可知, $Re=2\,600$ 时管束内流场的换热熵产比耗散熵产大一个数量级,说明管束内的熵产主要来源于温差而非耗散。对比图 18(a)和图 18(b)可以看出,耗散熵产主要产生于管束内小尺度的流动结构,这是因为耗散熵产来源于流体的黏性剪切作用,同时各排管相当于湍流格子中的作用,将大尺度流动结构分割成小尺度结构,不同速度的流动结构的掺混使得耗散熵产增加。换热熵产主要产生于管壁剪切层、脱落涡等大尺度流动结构,由于换热熵产来源于温差,管壁剪切层和脱落涡将管壁低温流体输运至下游,与主流温差较大,因此导致换热熵产较大。

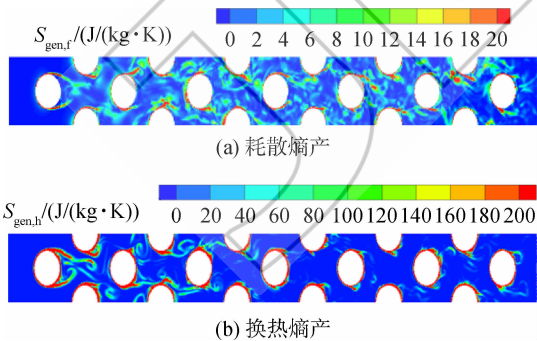


图 18 同一时刻流场的耗散熵产和换热熵产
Fig. 18 Distribution of dissipative entropy generation and heat transfer entropy generation of flow field at the same instant

对 38 个前排管涡脱落周期的耗散熵产和换热熵产数据分别进行 DMD 分析,得到主要流动结构对流场内熵产的贡献。各频率 f 的流动结构对耗散熵产和换热熵产的贡献如图 19 所示,从图 19(a)可以看出对耗散熵产场做出主要贡献的

是 $f=686\text{ Hz}$ 和 $350\text{ Hz}<f<450\text{ Hz}$ 之间的流动结构,与图 8 涡量场的主要流动结构一致,因为耗散熵产场和涡量场均与速度的耗散有关,而图 19(b)显示 686 Hz 对应流动结构对换热熵产场做出了明显贡献。

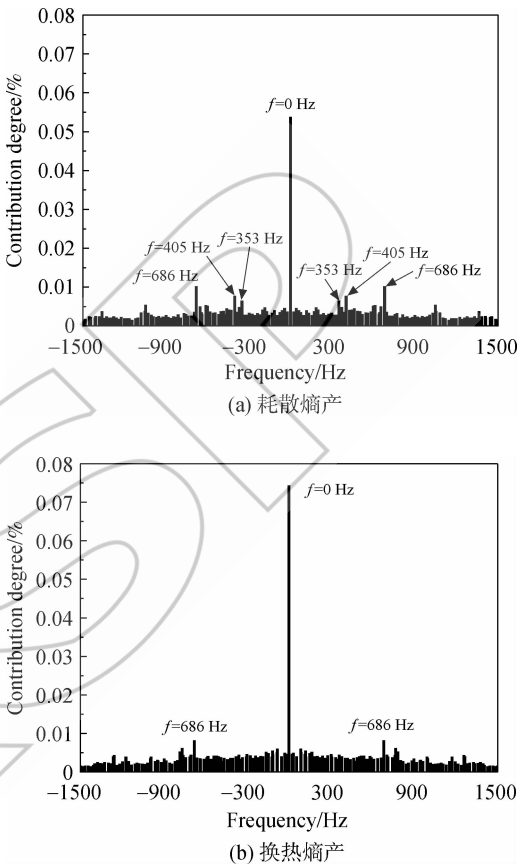


图 19 不同频率流动结构对耗散熵产和换热熵产贡献
Fig. 19 Contribution of flow structures with different frequency to dissipative entropy generation and heat transfer entropy generation

为进一步探究主要流动结构对计算域内耗散熵产和换热熵产的贡献,对图 19(a)标记的耗散熵产前 7 阶模态进行重构,对图 19(b)标记的前 3 阶换热熵产进行重构,重构熵产代表了主要流动结构对熵产的贡献,重构熵产场与原熵产场对比如图 20 和图 21 所示。可以看出对于耗散熵产和换热熵产场而言,主要流动结构的贡献在于管壁边界层及自由剪切层位置。

在第 2、3 排管和第 9 排管的流域设置一条标记线,如图 20 和图 21 中的黑线所示,并对线上的耗散熵产和换热熵产进行提取,得到图 22 和图 23 的量化对比。从图 22(a)、图 23(a)可以看出第 2、3 排管的主要流动结构对耗散熵产和换热熵产的影响较大,第 2 排管附近的重构熵产与原熵

产几乎重合,这是因为第 2 排管不受前排管脱落涡的影响,其剪切层和脱落涡的生长较稳定,无其他流动结构的干扰,所以其熵产生于主要流动结构。而后排管流场小尺度的流动结构较多,对速度的掺混和温度掺混均有较大影响,所以从图 22(b)和图 23(b)中可以看出主要流动结构的重构熵产与原熵产相差较大。

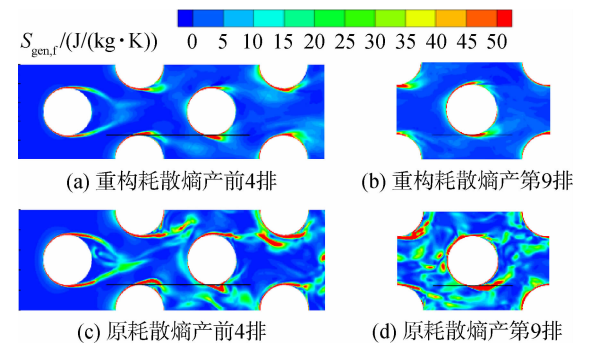


图 20 重构耗散熵产与原耗散熵产对比
Fig. 20 Comparison between reconstructed distribution and original distribution of dissipative entropy generation

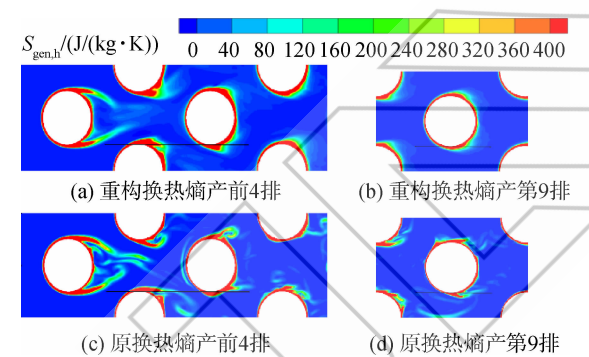


图 21 重构换热熵产与原换热熵产对比
Fig. 21 Comparison between reconstructed distribution and original distribution of heat transfer entropy generation

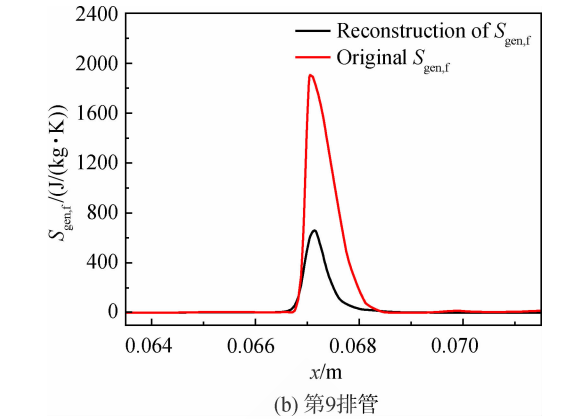
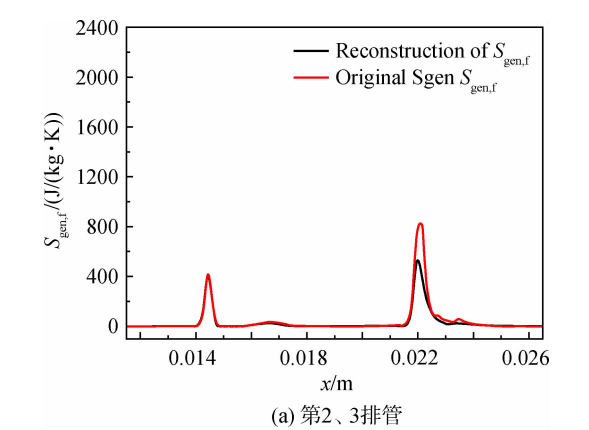


图 22 划线处重构耗散熵产与原耗散熵产对比
Fig. 22 Comparison of reconstructed dissipative entropy production and original dissipative entropy production at the mark

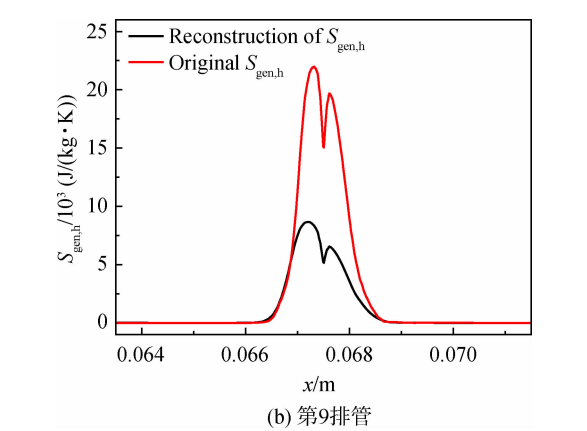
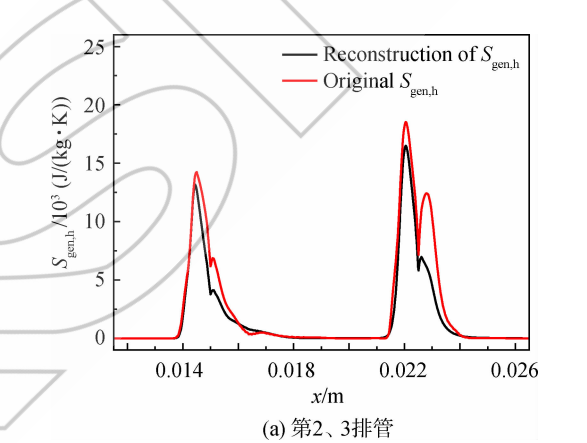


图 23 划线处重构换热熵产与原换热熵产对比
Fig. 23 Comparison of reconstructed heat transfer entropy production and original heat transfer entropy production at the mark

3 结 论

本文运用大涡模拟方法对叉排管束间的对流换热问题进行了研究,同时采用 DMD 方法从模

态的稳定性上分析流动结构对流场的贡献,并对管束内的流动换热机制和能量损失情况进行了研究。结论如下:

1) 管壁 Nu 随 Re 的增加而增大,在同一起来流雷诺数下,第 1 排管的 Nu 最小,第 2 排管的 Nu 升高,在第 4 排管之后,管束内流动已充分发展, Nu 在第 4 排管后基本不变。

2) 采用 DMD 方法提取出流场在换热过程中包含主要动力信息的模态,得到了其频率和与之对应的流动结构。前排管束对应流动结构为有规律的剪切层运动和尾涡脱落。后排管束对应的流动结构为无规律的小尺度旋涡结构,同时其流场表现出无序性。

3) 管束内各排管的表面瞬时 Nu 随时间波动,第 1 排管的 Nu 波动幅度最小,其频率为流场的固有来流频率,第 3 排管表面 Nu 随圆管两边剪切层的周期性运动而波动,其波动频率为两倍前排管涡脱落频率,管壁 Nu 峰值对应边界层与壁面发生分离的时刻。前排圆管脱落的旋涡对后排管壁的无规律撞击影响了后排管壁表面剪切层的正常发展,后排管壁的 Nu 随时间的波动无固定频率。

4) $Re=2600$ 的工况下管束内的熵产主要来源于换热而非耗散,主要流动结构对耗散熵产和换热熵产的贡献在于管壁边界层和自由剪切层位置,其对前排管的熵产有主要贡献,但对后排管熵产的贡献较小。

参考文献:

[1] 邹正平,刘火星,唐海龙,等.高超声速航空发动机强预冷技术研究[J].航空学报,2015,36(8):2544-2562.
ZOU Zhengping,LIU Huoxing,TANG Hailong,et al. Pre-cooling technology study of hypersonic aeroengine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2015,36(8):2544-2562. (in Chinese)

[2] TANG Ming,MAMPLATA C,et al. Two steps instead of a giant leap-an approach for air breathing hypersonic flight [R]. AIAA-2011-2237,2011.

[3] 朱岩,马元,张蒙正.预冷空气涡轮火箭发动机氮循环系统的参数特性[J].航空动力学报,2018,33(8):2016-2024.
ZHU Yan,MA Yuan,ZHANG Mengzheng. Characteristic of helium cycle systems parameters for pre-cooling air turbo rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(8):2016-2024. (in Chinese)

[4] LONGSTAFF R,BOND A. The SKYLON project [R]. AIAA-2011-2244,2011.

[5] CECERE D,GIACOMAZZI E,INGENITO A. A review on hydrogen industrial aerospace applications[J]. Interna-

tional Journal of Hydrogen Energy,2014,39(20):10731-10747.

[6] VARVILL R. Heat exchanger development at Reaction Engines Ltd. [J]. Acta Astronautica,2010,66(9/10):1468-1474.

[7] MURRAY J J,HEMPSELL C M,BOND A. An experimental precooler for airbreathing rocket engines[J]. Journal of the British Interplanetary Society,2001,54:199-209.

[8] 汪元,王振国.空气预冷发动机及微小通道流动传热研究综述[J].宇航学报,2016,37(1):11-20.
WANG Yuan,WANG Zhenguo. Review on precooled combined cycle engine and mini and micro channel flow heat transfer[J]. Journal of Astronautics,2016,37(1):11-20. (in Chinese)

[9] 杨新全,聂万胜,刘晓慧. SABRE 吸气模式热力循环及预冷器性能分析[J]. 战术导弹技术,2018(1):104-110.
YANG Xinlei,NIE Wansheng,LIU Xiaohui. Performance analysis of thermodynamic cycle and pre-cooler in sabre air-breathing mode[J]. Journal of Tactical Missile Technology,2018(1):104-110. (in Chinese)

[10] 武翼飞.微小尺度流动换热及换热器不确定性研究[D].北京:北京航空航天大学,2016.
WU Yifei. Study on microscale flow with heat transfer and uncertainty design of heat exchangers[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2016. (in Chinese)

[11] YU Shufang,JONES T,OGAWA H,et al. Multi-objective design optimization of precoolers for hypersonic airbreathing propulsion [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer,2016,31(2):1-13.

[12] ZDRAVISTCH F,FLETCHER C A,BEHNIA M. Numerical laminar and turbulent fluid flow and heat transfer predictions,in tube banks[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow,1995,5(8):717-733.

[13] PAUL S S,ORMISTON S J,TACHIE M F. Experimental and numerical investigation of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2008,29(2):387-414.

[14] LIANG C,PAPADAKIS G. Large eddy simulation of cross-flow through a staggered tube bundle at subcritical Reynolds number [J]. Journal of Fluids and Structures,2007,23(8):1215-1230.

[15] WEBBER H,TAYLOR N. Local heat transfer measurements inside a compact heat exchanger [R]. AIAA-2010-4653,2010.

[16] TALER D. Prediction of heat transfer correlations for compact heat exchangers[J]. Forschung Im Ingenieurwesen,2005,69(3):137-150.

[17] YOO S Y,KWON H K,KIM J H. A study on heat transfer characteristics for staggered tube banks in cross-flow [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2007,

21(3);505-512.

[18] LINTON D, THORNER B. Direct numerical simulation of transitional flow in a staggered tube bundle[J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(2):31-60.

[19] KOU Jiaqing, ZHANG Weiwei. An improved criterion to select dominant modes from dynamic mode decomposition [J]. *European Journal of Mechanics; B Fluids*, 2017, 62: 109-129.

[20] SEENA A, SUNG H J. Dynamic mode decomposition of turbulent cavity flows for self- sustained oscillation[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, 32(6): 1098-1110.

[21] ZDRAVKOVICH M M. Flow around circular cylinders; volume I fundamentals[M]. Oxford, UK:Oxford Science Publications, 1997.

[22] 吴亚东, 李涛, 赖生智. POD 和 DMD 方法分析不同间隙压气机旋转不稳定性特性[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(9): 2018-2026.

WU Yadong, LI Tao, LAI Shengzhi. Analysis of rotating instability characteristics in compressor with different tip clearances by POD and DMD methods[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(9): 2018-2026. (in Chinese)

[23] DA SILVA C B, PEREIRA J C F. Invariants of the velocity gradient, rate-of-strain, and rate-of-rotation tensors across the turbulent/nonturbulent interface in jets[J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(5):55101. 1-55101. 18.

(编辑:张 雪)