

引用格式: 姜羽, 姜根山, 于淼, 等. 声波作用下的单圆柱绕流及传热特性数值研究[J]. 声学技术, 2021, 40(3): 308-315. [JIANG Yu, JIANG Genshan, YU Miao, et al. Numerical study of flow and its heat transfer characteristics of a single cylinder under the action of acoustic waves[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(3): 308-315.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.03.002

声波作用下的单圆柱绕流及传热特性数值研究

姜羽¹, 姜根山¹, 于淼², 杨延锋², 孙建浩²

(1. 华北电力大学数理学院, 河北保定 071003; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 为了研究声波对单圆柱绕流流动和传热特性的影响, 建立了流场、声场、对流传热多物理场耦合的二维数学模型, 并利用有限元软件 COMSOL 进行数值模拟。结果表明: (1) 当频率 $f=50$ Hz、声压级 $L_{SP}=123\sim 149$ dB 时, 斯特劳哈尔数 St 随声压级增大而减小, 圆柱表面压力系数 C_p 随声压级增大而增大; (2) $L_{SP}=143$ dB、 $f=20\sim 80$ Hz 时, 斯特劳哈尔数 St 、压力系数 C_p 均随频率 f 增大而增大; (3) 对比 $f=50$ Hz、 $L_{SP}=143$ dB 声波作用与无声波作用的情况, 阻力系数 C_{DF} 和升力系数 C_{DL} 都呈周期性变化, 但有声波作用时振幅增大; (4) 声波作用会促进圆柱表面热量传递, 但当 $L_{SP}>143$ dB, 圆柱表面局部努塞尔数 Nu_θ 开始减小。该研究结果为强化圆柱绕流传热提供了理论研究基础。

关键词: 声波特性; 圆柱绕流; 漩涡脱落; 强化传热

中图分类号: O424

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-03-0308-08

Numerical study of flow and its heat transfer characteristics of a single cylinder under the action of acoustic waves

JIANG Yu¹, JIANG Genshan¹, YU Miao², YANG Yanfeng², SUN Jianhao²

(1. School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to study the effect of sound waves on flow around a single cylinder and its heat transfer characteristics, a two-dimensional mathematical model of multi-physical coupling flow field, sound field, and convection heat transfer is established, and the finite element software COMSOL is used for numerical simulation. The results show: (1) when the frequency $f=50$ Hz and the sound pressure level $L_{SP}=123-149$ dB, the Strouhal number St decreases and the cylindrical surface pressure coefficient C_p increases as L_{SP} increases; (2) When $L_{SP}=143$ dB and $f=20-80$ Hz, both St and pressure coefficient C_p increase with the increase of f ; (3) Under the condition of having sound wave action ($f=50$ Hz and $L_{SP}=143$ dB) or no sound wave action, the drag coefficient C_{DF} and lift coefficient C_{DL} all change periodically, but the amplitude under sound wave action increases; (4) The effect of acoustic waves can promote heat transfer on the cylindrical surface, but when $L_{SP}>143$ dB, the local Nusselt number Nu_θ on the cylindrical surface begins to decrease. The research results provide a theoretical research foundation for enhancing heat transfer around a cylinder.

Key words: acoustic characteristics; flow around a cylinder; vortex shedding; enhanced heat transfer

0 引言

圆柱绕流是一种典型的绕流形式, 具有广泛的工程实际应用背景, 因此关于圆柱绕流和对流传热的问题也受到许多专家学者的关注^[1-3]。

Saxena 等^[4]对比了稳定流和脉动流中矩形通道纵横比对圆管传热的影响, 发现在低纵横比下圆柱

会发生自然漩涡脱落和“锁定”脱落, 抑制漩涡发散, 换热效率下降。Mikheev 等^[5]对脉动流中圆柱绕流的漩涡脱落和换热进行了实验研究, 分析了圆柱周围的流动模式, 得到局部表面换热系数的分布与圆柱绕流流型和脉动振幅的关系, 阐述了脉动流强化传热的机理。Gupta 等^[6]对中低雷诺数下紊流流体脉动流过加热圆柱时, 层流强制对流的动量和传热问题进行数值模拟, 得到紊流流体中, 流体脉动对加热圆柱附近速度场及温度场的影响规律。Li^[7]采用计算流体动力学的方法, 研究了脉动流对错排换热管传热过程的影响, 结果表明, 低频和高振幅情况下传热系数较大, 且脉动流对换热管的影响长度有限。Li 等^[8]还研究了单圆柱在脉动流中的传热特性, 得到传热系数随脉动幅值、频率、斯特劳哈

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12074118、11674093); 河北省自然科学基金资助项目(A2019502160); 声场声信息国家重点实验室项目(SKLA201808)。

作者简介: 姜羽(1996—), 女, 辽宁庄河人, 硕士研究生, 研究方向为声波强化管束传热。

通信作者: 姜根山, E-mail: gsjiang@ncepu.edu.cn

尔数以及雷诺数的变化规律。随着炉内声学技术的不断发展，对声波强化传热的研究也备受关注。许伟龙等^[9]研究了强声波作用下单煤粉颗粒的传热特性，结果表明，声波的作用会促使颗粒表面时均努塞尔数增大。张东伟等^[10]对超声强化传热进行研究，提出“空化链式反应”，解释了超声强化传热的机理，并通过数值模拟对产生强化传热的效果进行验证。

上述研究多是利用脉动流的机械作用或是超声波的作用强化传热效率，对可听声在圆柱绕流和传热中的研究还相对较少。崔淑媛等^[11]利用数值分析的方法研究了管道绕流产生的声场特性，但没有研究声波对圆柱绕流的影响。于淼等^[12]实验证明了声波可以诱导管内流场发生从层流到湍流的转化，该结果表明，声波对流场有明显的调制作用，但没有涉及对传热效率的影响。

本文对声波作用下单圆柱绕流和对流传热特性进行数值研究，分析层流状态下圆柱绕流漩涡的生长和脱落、圆柱表面压力系数、升阻力系数以及局部努塞尔数随声波频率和声压级的变化情况，得到声波参数对圆柱周围温度场和流场的影响规律，可以为声波在圆柱绕流和对流传热中的工程应用提供理论研究基础。

1 物理模型与控制方程

1.1 物理模型

考虑冷流体外掠单圆柱换热情况，建立如图 1 所示二维数值计算模型。其中换热管管径 $D=40\text{ mm}$ ，计算域高度为 $10D$ ，宽度为 $27D$ 。由于流体入口速度呈对称分布，为了触发涡流，在模型建立过程中将圆柱从流体流动中心做微小偏移，做不对称处理。采用正弦形式速度 $U=U_0+U_g\sin(2\pi ft)$ 作为入口条件， U_0 是流体流速， U_g 表示质点速度振幅。

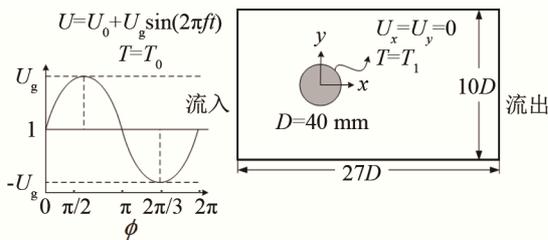


图 1 数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model

1.2 控制方程

对于二维不可压缩层流的对流传热问题，无声

波作用时在柱坐标系下的连续性方程和动量方程如式(1)、(2)所示^[13]：

连续性方程：

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r u_r u_x) + \nu \left(\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} \right) \quad (2)$$

式中： u_r 和 u_x 分别表示流体沿径向和轴向的速度分量； ρ 为流体密度； P 为平均压力； U 为平均流速； ν 为流体运动黏度。

当引入声波作用，假设流体流速 $U=U_0+U_1$ ， U_0 为流体流入速度， U_1 为声波引起的质点振动速度； $P=P_0+P_1$ ， P_0 表示流体静压力， P_1 表示声压。用 \bar{K} 表示流体平均湍动能，则声场与流场的耦合方程为

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dP_0}{dx} + \frac{dP_1}{dx} \right) = -\frac{2}{3r} \frac{d}{dr} (r \bar{K}) + \nu \left(\frac{d^2 U_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_1}{dr} \right) + \nu \left(\frac{d^2 U_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_0}{dr} \right) \quad (3)$$

1.3 边界条件

本研究中雷诺数 $Re=500$ ，马赫数 $Ma \ll 0.3$ ，普朗克数 $Pr \approx 0.7$ 。根据物理模型需求，将边界条件设置如下：

入口条件：设置速度入口边界，规定沿 x 方向的正弦速度为 U ，流体流入温度为 $T_0=293\text{ K}$ ，则：

$$U=U_0+U_g \sin(2\pi ft), \quad T=T_0 \quad (4)$$

式中： U_g 表示声波质点的速度振幅， $U_g=P_a/\rho_0 c_0$ ， P_a 表示声压振幅； f 表示声波频率； ρ_0 为空气密度； c_0 为声速。利用 P_{ref} 和 U_{ref} 分别表示参考声压和质点振动的参考速度， $p_{ref}=2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ ， $U_{ref}=4.83 \times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，则声压级的大小可由式(5)计算：

$$L_{sp} = 20 \lg \left(\frac{p_a}{\sqrt{2} p_{ref}} \right) = 20 \lg \left(\frac{U_g}{\sqrt{2} U_{ref}} \right) \quad (5)$$

换热表面条件：给定流动的无滑移和能量方程的恒温条件，即：

$$U_x=U_y=0, \quad T=T_1=493\text{ K} \quad (6)$$

出口条件：定义计算域的出口为标准流出边界条件：

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad P=0 \quad (7)$$

上下边界条件设置为无滑移的绝热壁面条件。

1.4 网格划分与独立性检验

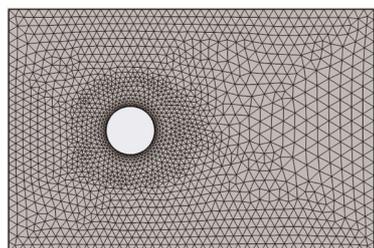
利用 COMSOL 内置物理场控制的网格划分方法对模型进行网格划分，为保证数值计算结果的准

确性, 分别选取网格 1、网格 2、网格 3、网格 4 四种不同类型的网格进行独立性验证, 确保数值计算所选用的网格满足网格的独立性要求, 对比四种网格下的平均阻力系数 \bar{C}_d 、斯特劳哈尔数 Sr 和平均努塞尔数 Nu , 计算结果如表 1 所示。

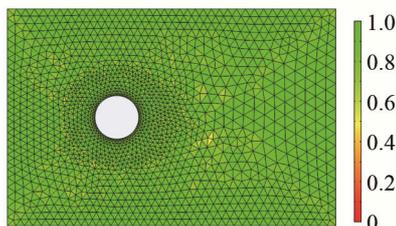
表 1 网格独立性检验
Table 1 Grid independence test

网格类型	网格单元数	最小网格质量	平均网格质量	\bar{C}_d	Sr	Nu
网格 1	6214	0.354 5	0.839 1	1.77	0	0.693 15
网格 2	12 938	0.398 9	0.846 4	1.80	0.116	0.716 95
网格 3	31 584	0.463 8	0.861 7	2.03	0.152	0.967 45
网格 4	57 796	0.433 4	0.874 0	2.05	0.156	0.966 48

由表 1 可知, 当网格密度达到网格 3 以上时, 计算结果的误差缩小到 1% 以内, 可以满足网格独立性要求。综合考虑网格质量以及节省计算资源, 采用网格 3 的网格划分类型进行模拟计算。所得网格最大单元为 5.33 mm, 小于所用声波波长的 1/10, 总单元数为 31 584, 最小网格质量为 0.464, 平均质量为 0.862, 网格划分结果如图 2 所示。图 2(b)中色棒的数值越小表明网格质量越差, 越接近 1 表明网格质量越好。



(a) 网格划分图



(b) 网格质量分布

图 2 网格划分结果

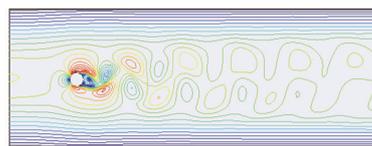
Fig.2 Grid partition results

2 结果与讨论

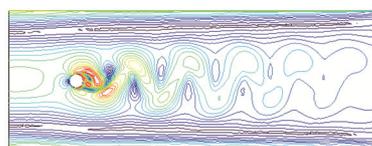
2.1 声波特性对圆柱绕流漩涡分布的影响

图 3 为有无声波作用时的漩涡分布图。由图 3(a)可以看出, 当无声波作用时, 圆柱尾部有一个漩涡生成并按照一定的频率交替脱落; 图 3(b)可以

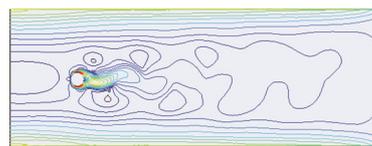
看出当 $L_{sp}=143$ dB 时, 圆柱尾部产生两个漩涡, 下涡拉拽迫使剪切层断裂, 脱离圆柱体表面并发生破裂, 同时形成新的上涡; 图 3(c)表明, 当 $L_{sp}=149$ dB 时, 由于声能量的作用, 漩涡刚产生便发生破裂, 无漩涡交替脱落的现象产生。由图 3 可知, 与无声波作用相比, 声波作用使圆柱绕流剪切层变薄, Sr 数减小, 且声压级增大, 圆柱绕流尾涡长度变短。



(a) 无声波作用



(b) $L_{sp}=143$ dB

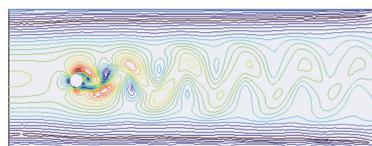


(c) $L_{sp}=149$ dB

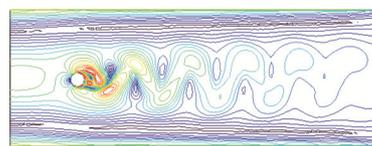
图 3 不同声压级下圆柱绕流漩涡分布

Fig.3 Vortex distribution around a cylinder under different sound pressure levels

图 4 为 $L_{sp}=143$ dB、 $f=30\sim 80$ Hz 时, 圆柱绕流漩涡分布。由图 4(a)可以看出, 当 $f=30$ Hz 时, 圆柱尾部有稳定脱落的漩涡产生, 上、下涡交替撕扯剪切层离开圆柱表面, 尾涡形成的区域较长; 在



(a) $f=30$ Hz



(b) $f=50$ Hz



(c) $f=80$ Hz

图 4 不同频率下圆柱绕流漩涡分布

Fig.4 Vortex distribution of flow around a cylinder at different frequencies

图 4(b)中, $f=50\text{ Hz}$ 时, 圆柱尾部仍然形成两列交替脱落的漩涡, 漩涡破裂速度加快, 尾涡长度变短; 在图 4(c)中, $f=80\text{ Hz}$ 时, 漩涡尾迹仅为无声波作用时的一半。因此增大声波频率时, 加快漩涡破裂, 使漩涡尾迹变短。

2.2 声波特性对圆柱表面压力系数的影响

流体绕圆柱运动时会对圆柱表面产生压力作用, 利用压力系数 C_p 表示圆柱表面的相对压力分布, 其定义为^[6]

$$C_p = \frac{P - P_{\text{ref}}}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (8)$$

式中: P 为圆柱表面压力; P_{ref} 为参考基准值(取 $\theta=180^\circ$ 时的压力值), $\theta=180^\circ$ 时, $C_p=0$; ρ 为流体密度。

图 5 为无声波作用时圆柱表面压力系数分布图。A、C 分别为圆柱上下表面流动分离点, 沿迎流面顺时针方向取 $\theta=0^\circ$ 为前驻点, $\theta=180^\circ$ 为后驻点。由图 5 中可以看出, 无声场扰动时, 圆柱表面最大压力系数为 5; 在流动分离点之前, 圆柱表面压力系数关于前后驻点呈对称分布, 且由于流体流过圆柱导致流动截面缩小, 流速加快, 压力系数减小; 在 A、C 点处边界层开始发生分离, 压力系数出现回升; 在 $75^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$ 范围内, 是圆柱绕流尾迹区, 该区域内尾涡发生脱离, 由于逆时环量的存在叠加来流, 导致上表面流速加快、下表面流速减慢, 因此圆柱表面压力不再呈对称分布, 而是以 B 点为分割点, 圆柱下表面压力系数大于上表面压力系数, 形成压强差。

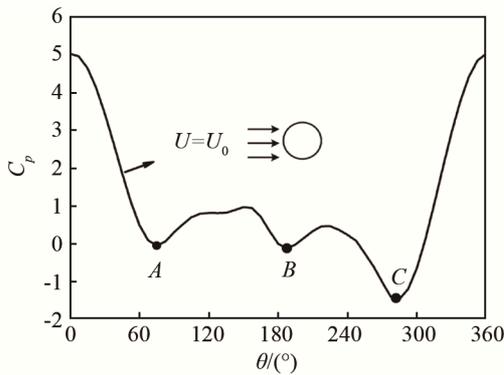
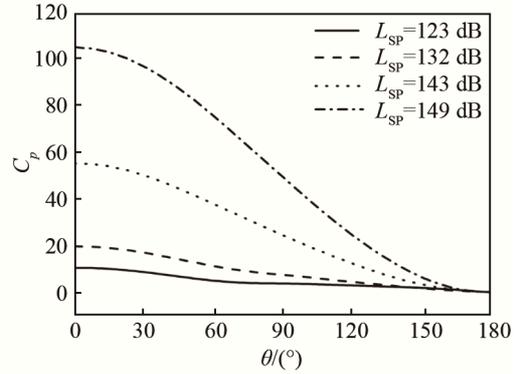


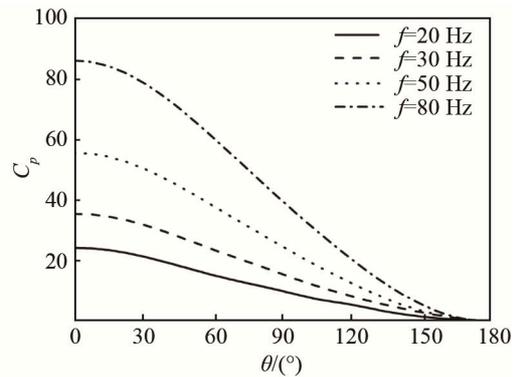
图 5 无声场作用圆柱表面压力系数
Fig.5 Cylinder surface pressure coefficient without sound field

当对流体施加声波作用时, 圆柱表面压力系数如图 6 所示, 此时压力分布关于前后驻点对称, 故取 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 进行分析。图 6(a)为声波频率 $f=50\text{ Hz}$ 、声压级 $L_{\text{SP}}=123\sim 149\text{ dB}$ 时圆柱表面的压力系数。可以看出 C_p 随声压级增大而增大。图 6(b)

为声压级 $L_{\text{SP}}=143\text{ dB}$ 、频率 $f=20\sim 80\text{ Hz}$ 时圆柱表面的压力系数, 可以看出声波频率增大, C_p 同样增大。对比无声波作用下的压力系数可以发现, 当存在声波激励时, 声压作用于圆柱使圆柱表面压力明显增大, 同时随着 θ 的增大, 圆柱表面压力系数递减, 在 $\theta=180^\circ$ 处最小。



(a) 不同声压级时的压力系数



(b) 不同声波频率时的压力系数

图 6 声波作用下圆柱表面压力系数

Fig.6 Cylinder surface pressure coefficient under the action of sound wave

2.3 声波作用对圆柱表面升阻力系数的影响

黏性流体绕物体运动时, 物体表面会受到压力和摩擦力作用, 两者合力可以分解为沿来流方向上的绕流阻力 F_{DF} 以及垂直于来流速度 U_0 方向上的绕流升力 F_{DL} , 合力 $F_{\text{D}}=F_{\text{DF}}+F_{\text{DL}}$ 。S 表示圆柱表面积, 则绕流阻力系数和升力系数定义为

总阻力系数:

$$C_{\text{D}}=C_{\text{DF}}+C_{\text{DL}} \quad (9)$$

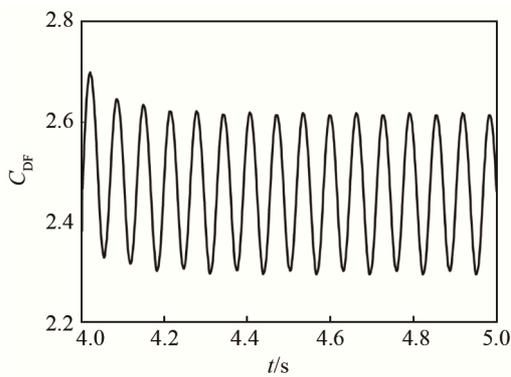
绕流阻力系数:

$$C_{\text{DF}}=\frac{F_{\text{DF}}}{\frac{1}{2} \rho S U_0^2} \quad (10)$$

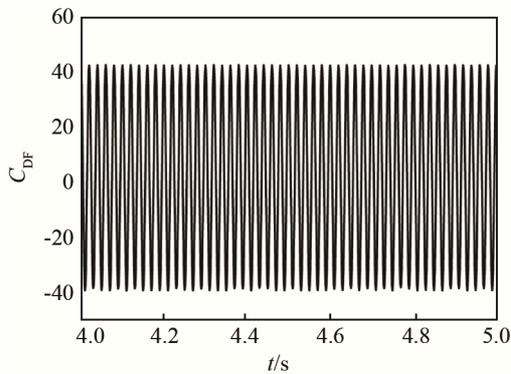
绕流升力系数:

$$C_{\text{DL}}=\frac{F_{\text{DL}}}{\frac{1}{2} \rho S U_0^2} \quad (11)$$

图 7 为有无声波作用圆柱表面阻力系数。从图 7 中可以看出, 无声波作用时, 圆柱绕流阻力系数最大值约为 2.7, 呈正弦形式变化, 当对流体施加 $L_{sp}=143$ dB、 $f=50$ Hz 的声波扰动之后, 圆柱绕流阻力系数可达 45, 仍然呈正弦形式, 频率与声波频率一致。图 8 为有无声波作用时升力系数的变化情况, 可以看出声波的作用使升力系数由正弦形式变为非正弦的周期性变化, 振幅增大。升力指圆柱表面垂直于流速方向的力, 在无声波作用时由压力和摩擦力提供。当将声波作用于稳定流体之后, 圆柱表面除了受流体压力和摩擦力的作用, 还受声波压力作用, 因此圆柱绕流升、阻力系数发生变化。



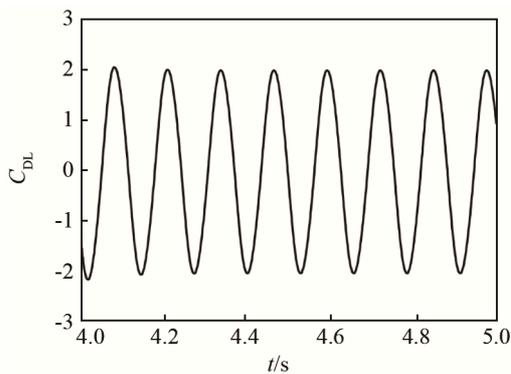
(a) 无声波



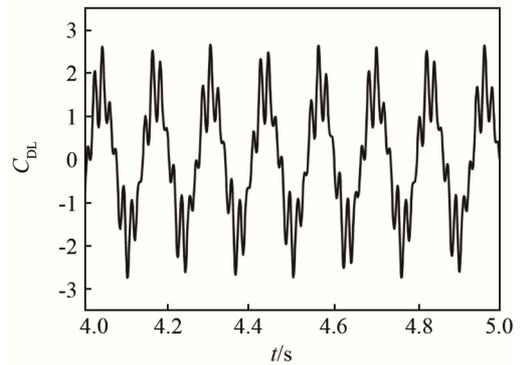
(b) 存在 $f=50$ Hz 和 $L_{sp}=143$ dB 的声波

图 7 圆柱表面阻力系数

Fig.7 Cylinder surface resistance coefficient



(a) 无声波



(b) 存在 $f=50$ Hz 和 $L_{sp}=143$ dB 的声波

图 8 圆柱表面升力系数

Fig.8 Cylinder surface lift coefficient

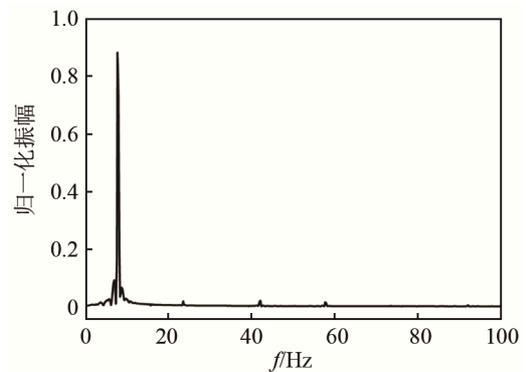
2.4 声波特性对斯特劳哈尔数的影响

圆柱直径、漩涡脱落频率、来流速度之间的关系为

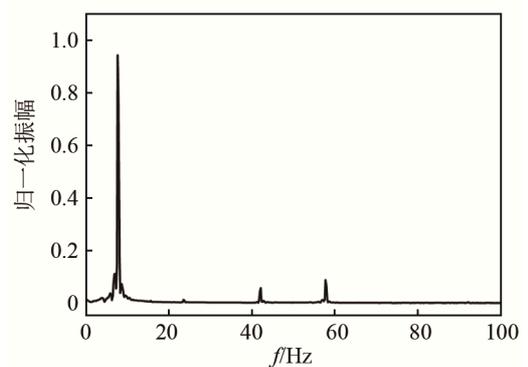
$$Sr = \frac{Df_s}{U_0} \tag{12}$$

式中: D 表示圆柱直径; f_s 表示漩涡脱落频率; U_0 表示流场来流速度。

图 9 为 $f=50$ Hz、不同声压级作用下圆柱绕流升力系数的频谱图。由图 9(a)可知, 声压级 $L_{sp}=123$ dB 时, 圆柱绕流升力系数的频谱图只存在一个较明显的主频, 即为漩涡脱落频率; 由图 9(b)~



(a) $L_{sp}=123$ dB



(b) $L_{sp}=132$ dB

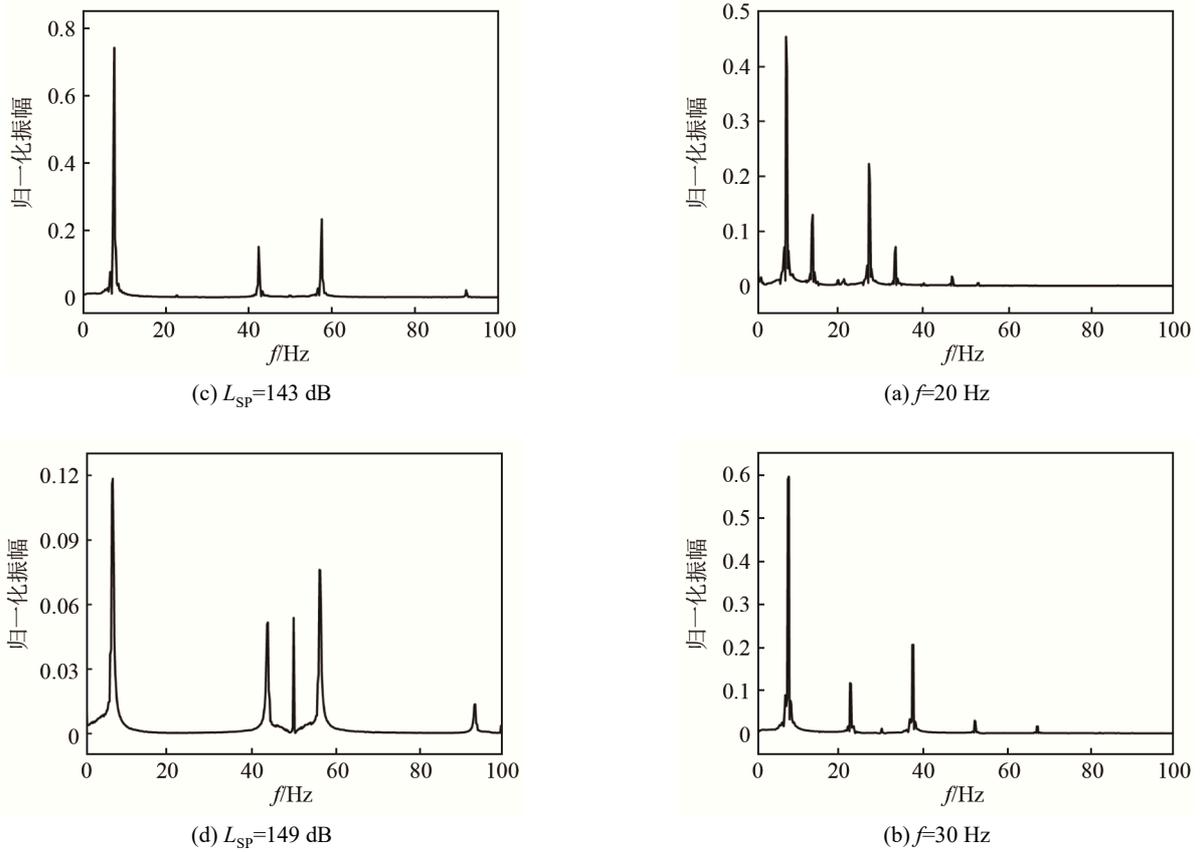


图 9 不同声压级下升力系数频谱图

Fig.9 Spectrograms of lift coefficient at different sound pressure levels

9(d)中可以看出，随着声压级的增大，升力系数频谱图出现多个高阶谱峰，其中振幅最大的主频为漩涡的脱落频率 f_s ，其他频率为声波频率与漩涡脱落频率叠加所得。

表 2 为各声压级下漩涡的脱落频率，从表 2 中可以看出，当 $f=50$ Hz、 $L_{sp}=123\sim 149$ dB 时， Sr 数随声压级增大而减小，这是因为声压级增大，声能量增大，加快漩涡的破裂，漩涡脱落频率减慢。同时漩涡破裂会破坏热边界层，可以提高圆柱绕流的对流传热效率。

表 2 不同声压级下漩涡脱落频率

Table 2 Vortex shedding frequencies at different sound pressure levels

声压级 L_{sp}/dB	漩涡脱落频率 f_s/Hz	斯特劳哈尔数 Sr
123	8.0	0.320
132	7.8	0.312
143	7.6	0.304
149	6.4	0.256

图 10 为 $L_{sp}=143$ dB、 $f=20\sim 80$ Hz 时，圆柱绕流升力系数频谱图。由图 10 中可以看出，除了漩涡脱落频率之外，同样存在高阶谱峰，且随着声波

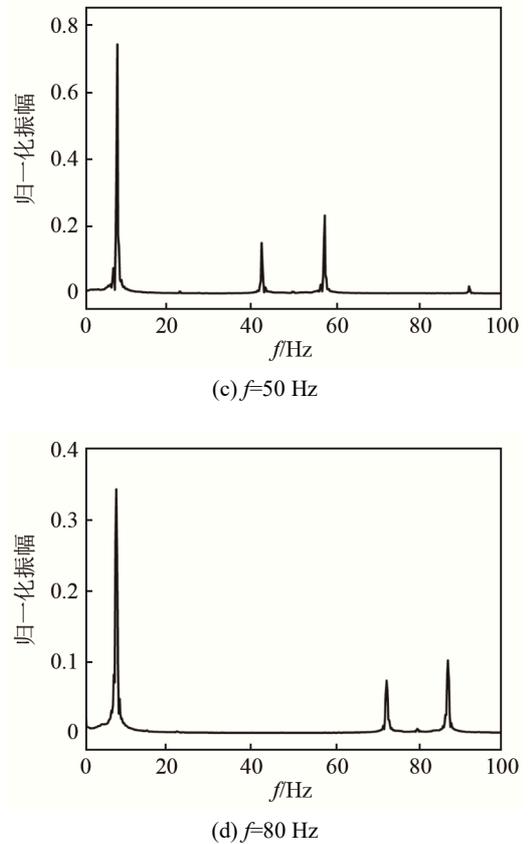


图 10 不同声波频率下升力系数频谱图

Fig.10 Spectrograms of lift coefficient at different acoustic frequencies

频率的增大而增大。将不同声波频率下的漩涡脱落频率记录在表3中,可以看出随着声波频率的增加, Sr 增大,圆柱绕流漩涡的脱落频率加快,可以有效促进换热管壁与流体之间的热量传递。当声波频率 $f > 100$ Hz时,漩涡脱落频率 f_s 与作用于流体的声波频率一致,说明此时漩涡的脱落主要受声波频率的影响。在此情况下会引起圆柱共振,造成管壁疲劳损伤,在实际应用中应避免相应的频率。

表3 不同声波频率下漩涡脱落频率
Table 3 Vortex shedding frequencies under different acoustic frequencies

声波频率 f/Hz	漩涡脱落频率 f_s/Hz	斯特劳哈尔数 Sr
10	5	0.200
20	7	0.280
80	7.6	0.304
100	100	4.000
200	200	8.000

2.5 声波特性对圆柱表面局部努塞尔数的影响

为研究声波对圆柱对流传热的影响,设定圆柱管壁为恒温条件:

$$T = T_1 \quad (13)$$

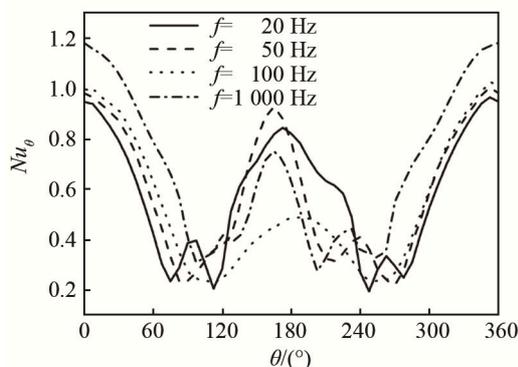
用垂直于圆柱表面的温度梯度表示局部努塞尔数 Nu_θ ^[6]:

$$Nu_\theta = \frac{hD}{\lambda} = \left(-\frac{\partial T}{\partial n_s}\right)_{\text{surface}} \quad (14)$$

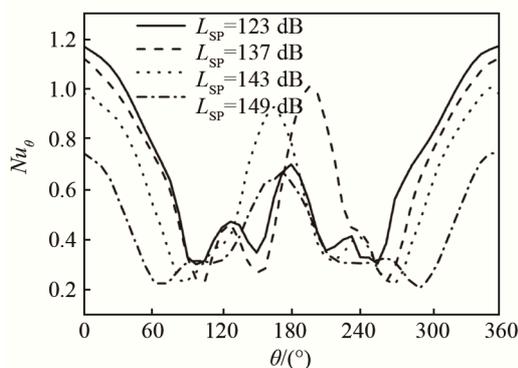
其中: n_s 为圆柱表面法向量,方向垂直于圆柱表面向外, h 为表面传热系数, λ 为流体导热系数。

图11为声波频率和声压级对 Nu_θ 的影响。图11(a)为 $L_{sp} = 143$ dB、 $f = 20 \sim 1\,000$ Hz时圆柱表面局部对流传热系数 Nu_θ 的分布情况。从图11(a)中可以看出,在前驻点处 Nu_θ 的值最大,因为前驻点处流体对圆柱作用力最大,传热推动力最强;在绕圆柱运动过程中,随着热边界层的生长, Nu_θ 逐渐减小,在流动分离点处达到最小值;在流动分离点之后,由于漩涡的脱落, Nu_θ 变大,在 $\theta = 180^\circ$ 时, Nu_θ 达到极大值。在流动分离点之前,局部努塞尔数 Nu_θ 随频率增大而增大;在圆柱尾迹区局部努塞尔数随频率先增大后减小;频率达到1 000 Hz时, Nu_θ 明显增大,平均努塞尔数 Nu 较 $f = 20$ Hz时提高17%。图11(b)为 $f = 50$ Hz、 $L_{sp} = 123 \sim 149$ dB时局部努塞尔数 Nu_θ 分布情况。从图11(b)中可以看出,随着声压级的增大,在 $110^\circ \leq \theta \leq 250^\circ$ 范围内,局部努塞尔数 Nu_θ 先增大后减小。这是因为当有声波作用时,声能量对流体的激励作用会诱导其做周期性运动,破坏流动边界层和热边界层,同时形成漩涡促

进边界层内部的对流。随着声压级的增大,声能量对流体的作用越强,促进尾迹区热量交换;但是当声压级 $L_{sp} > 143$ dB时,声波作用使流体流速大幅度增加,同时加快漩涡破裂,流体与管壁接触时间过短,传热效率下降。



(a) 声波频率的影响



(b) 声压级的影响

图11 声波频率和声压级对 Nu_θ 的影响

Fig. 11 The influences of sound wave frequency and sound pressure level on Nu_θ

3 结论

通过数值模拟研究了声波对单圆柱绕流及对流传热的影响,对计算结果进行分析可以得到如下结论:

(1) 在声波作用下,圆柱表面压力系数分布关于前后驻点对称,在 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 范围内,圆柱表面压力系数 C_p 随 θ 增加而递减,随声压级和声波频率的增大而增大。

(2) 当存在 $f = 50$ Hz、 $L_{sp} = 143$ dB的声波时,与无声波作用时相比,声波作用于圆柱表面使圆柱绕流阻力系数 C_{DF} 和升力系数 C_{DL} 振幅变大;升力系数 C_{DL} 由无声波作用时的正弦形式变化变为非正弦的周期性变化。

(3) 斯特劳哈尔数 Sr 随声压级增大而减小,随声波频率增大而增大;当声波频率 $f > 100$ Hz,漩涡

脱落频率与声波频率一致。

(4) 声波频率和声压级的增加会促进圆柱周围流体与管壁的热量交换，但当声压级 $L_{sp} > 143$ dB 时，局部努塞尔数 Nu_{θ} 随声压级增大而减小，此时传热效率下降。

参 考 文 献

- [1] TSUTSUI T. Heat transfer enhancement of a single row of tube[J]. EPJ Web of Conferences, 2017, 143: 02132.
- [2] 刘万旺, 许志美, 宗原, 等. 顺排管束流动和传热数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 15-22.
LIU Wanwang, XU Zhimei, ZONG Yuan, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer of in-line tube banks[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2019, 45(1): 15-22.
- [3] 凌玲, 杨荣, 王文洁, 等. 非稳态横掠管束对流传热的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 135-141.
LING Ling, YANG Mo, WANG Wenjie, et al. Numerical simulation of convection heat transfer in unsteady transverse tube banks[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 135-141.
- [4] SAXENA A, NG E Y K. Steady and pulsating flow past a heated rectangular cylinder(s) in a channel[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2017, 32(2): 401-413.
- [5] MIKHEEV N I, MOLOCHNIKOV V M, MIKHEEV A N, et al. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 254-265.
- [6] GUPTA S, PATEL S A, CHHABRA R P. Pulsatile flow of power-law fluids over a heated cylinder: Flow and heat transfer characteristics[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 152: 106330.
- [7] LI G N. Numerical simulation of characteristics of cross-flow heat transfer in pulsating flow[J]. Advanced Materials Research, 2011, 187: 242-246.
- [8] LI G N, ZHENG Y Q, HU G L, et al. Experimental study of the heat transfer enhancement from a circular cylinder in laminar pulsating cross-flows[J]. Heat Transfer Engineering, 2016, 37(6): 535-544.
- [9] 许伟龙, 姜根山, 安连锁, 等. 强声波作用下烟气夹带单颗粒煤粉传热特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2017, 37(10): 788-795.
XU Weilong, JIANG Genshan, AN Liansuo, et al. Heat transfer characteristics around single coal particles entrained by flue gas under the action of high intensity acoustic field[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(10): 788-795.
- [10] 张东伟, 李凯华, 周俊杰, 等. 超声波强化传热的链式反应机理与模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 145-148.
ZHANG Dongwei, LI Kaihua, ZHOU Junjie, et al. Investigation on the chain reaction mechanism and simulation of heat transfer process enhanced by ultrasonic vibrations[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 145-148.
- [11] 崔淑媛, 姜根山, 许伟龙, 等. 炉内换热器管道气体绕流风吹声特性研究[J]. 声学技术, 2016, 35(6): 618-621.
CUI Shuyuan, JIANG Genshan, XU Weilong, et al. Research on the flow field and the aerodynamic noise around heat exchanger tube[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(6): 618-621.
- [12] 于淼, 姜根山, 姜羽, 等. 声波诱导层流致湍流转捩的实验研究[J]. 声学技术, 2019, 38(5): 31-32.
YU Miao, JIANG Genshan, JIANG Yu, et al. Experimental study on laminar flow induced turbulent transition induced by acoustic[J]. Technical Acoustics, 2019, 38(5): 31-32.
- [13] CHOU K H, LEE P S, SHAW D T. Acoustically induced turbulence and shock waves under a traveling-wave condition[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(6): 1780-1789.