

文章编号:1006-2467(2019)10-1238-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.99.002

## 二维开缝圆柱环流动力特性

朱睿, 李尚, 陈子煜, 刘锦生, 鲍锋, 刘志荣

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361001)

**摘要:** 使用粒子图像测速(PIV)技术对各二维开缝圆柱环流流场的动力特性进行定性及定量研究,揭示雷诺数( $Re$ )、开缝位置角、开缝倾角及相对缝宽( $s/d$ ,  $s$ 为缝隙宽度,  $d$ 为圆柱直径)对环流动力特性的影响规律. 获取瞬态流场、时均流场以及斯特劳哈尔数( $St$ )等关键流场信息,研究开缝圆柱环流流场的结构及演变规律. 结果表明:脱落涡与圆柱表面环流的此消彼长,引起  $120^\circ$  以及  $180^\circ$  开缝圆柱的吹吸效应,显著提前圆柱尾流脱落涡的耦合时间;  $240^\circ$  开缝圆柱的缝隙位置接近圆柱后缘,流体未达到缝隙位置时已经发生流动分离,不会形成有效吹吸效应;  $120^\circ$  以及  $180^\circ$  开缝圆柱的尾流脱落涡运动轨迹振幅较大,其流阻系数大于基准圆柱以及  $240^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数;狭缝角  $\alpha$  为  $180^\circ$ ,相对缝宽为 0.15 开缝圆柱的尾流  $St$  在 0.218~0.225 范围内波动最小,具备最优的线性稳定性.

**关键词:** 开缝圆柱; 粒子图像测速(PIV); 吹吸效应; 脱落涡

中图分类号: O 357.1 文献标志码: A

## Flow Field Dynamic Characteristics of Slit Cylinders

ZHU Rui, LI Shang, CHEN Ziyu, LIU Jinsheng, BAO Feng, LIU Zhirong

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361001, Fujian, China)

**Abstract:** The particle image velocimetry (PIV) experiments are carried out to qualitative and quantitative study the flow field dynamic characteristics for different slit cylinders in order to reveal the influence of the  $Re$ , the slit position, the incline angle and width of the slit on the overall flow characteristics. The transient flow field, the time-averaged flow field and the  $St$  are obtained and the detailed overall flow structures and its transformation disciplines are studied. The results show that the interactions of the shedding vortex and the circumflux around the cylinder surface induce the blow-suction effect of the  $120^\circ$  and  $180^\circ$  slits, which makes the wake shedding vortex coupling happen significantly earlier. The  $240^\circ$  slit is close to the cylinder trailing edge so that the flow separation already happens before the fluid reach the slit, which fails to generate the effective blow-suction effect. The wake flow resistances for the  $120^\circ$  and  $180^\circ$  slit cylinders are higher because the motion trajectory amplitudes of shedding vortex are higher than that of the basic and  $240^\circ$  types.  $St$  values for the slit cylinder with  $\alpha=180^\circ$  and  $s/d=0.15$  ( $\alpha$  is the slit angle,  $s$  is the gap width,  $d$  is the cylinder diameter) are in the range of 0.218~0.225, which exhibits the strongest linear stability.

**Key words:** slit cylinder; particle image velocimetry (PIV); blow-suction effect; shedding vortex

收稿日期:2018-11-26

基金项目:装备预研教育部联合基金(6141A02033529),国家自然科学基金(11072206),福建省自然科学基金(2012J01023)资助项目

作者简介:朱睿(1980-),男,福建省厦门市人,助理教授,研究方向为实验流体力学与微纳工艺交叉学科.

通信作者:刘志荣,男,工程师,电话(Tel.):13515969361;E-mail:lzr1222@126.com.

钝体绕流广泛应用于桥梁、海洋、兵器以及航空航天等领域<sup>[1]</sup>. 当流体以一定的速度流过柱形钝体时,会在钝体尾部形成规则的脱落旋涡,此旋涡经过非线性作用后形成卡门涡街<sup>[2]</sup>. 针对圆柱扰流机理问题的研究是流体力学研究的热点问题之一. 研究发现,在基准圆柱的基础上进行结构改进可改变圆柱绕流流场的结构,获得优化的圆柱环流动力特性,从而更好地满足各工程领域的实际应用需求<sup>[3-5]</sup>.

Ma 等<sup>[6]</sup>利用 ANSYS/Fluent 软件对雷诺数 ( $Re$ ) 小于 200, 缝隙宽度与圆柱直径之比为 0.03~0.3 的开缝圆柱环流进行二维流动模拟,采用改进的相位平均法研究缝隙的内流特性、边界层流以及尾流的演变过程. Wang 等<sup>[7]</sup>采用大涡模拟方法对小尺寸开缝圆柱矩形通道的传热和流动特性进行了数值研究. 刘志荣等<sup>[8]</sup>采用流动显示技术观察了开缝圆柱的近场区流场特性,探究缝隙对流场结构的影响,发现随着  $Re$  的增大,开缝圆柱脱落涡的脱落频率明显增大,尾流特征更加明显. 江建华等<sup>[9]</sup>利用粒子成像测速技术在水槽中探究缝隙对圆柱流场结构的影响,采用频谱分析和本征正交分解方法研究了开缝圆柱流场的相干结构.

已有研究缺乏对开缝圆柱环流流场结构的精确测定. 因此,本文采用高分辨率粒子图像测速技术获取各开缝圆柱环流流场的细腻流场结构并采集流场的特征信息,深入研究开缝圆柱环流流场演变及其动力特性.

### 1 试验方案

开缝圆柱试验模型设计如图 1 所示,该模型分为连接件和圆柱两部分,连接件与圆柱之间通过深度为 30 mm 的 M12 螺纹连接,各圆柱构型的参数见表 1. 表中: $d$  为圆柱直径; $l$  为圆柱展向长度; $\alpha$  为缝隙角; $\beta$  为缝隙倾角; $s$  为缝隙宽度. 连接件顶端设有一段直径为 10 mm 的连杆,通过水槽测力天平底部的 10 mm 模型安装孔与台车连接,试验的水流速度为 0~0.2 m/s.

开缝圆柱环流流场粒子图像测速(PIV)技术方案如图 2(a)所示,图中 CCD 为摄像头,精密循环水槽试验段尺寸为 500 mm×500 mm×3 000 mm,湍流度小于 1%,流场品质良好. 激光片光从水槽底部射入,照亮圆柱纵向中截面,高速相机在水槽一侧进行拍摄. 图像采集坐标系统如图 2(b)所示,各部件

表 1 圆柱构型参数值  
Tab. 1 Model structural parameters

参数	取值
$d/mm$	40
$l/mm$	440
$s/mm$	4,6
$s/d$	0.10,0.15
$\alpha/(^\circ)$	120,180,240
$\beta/(^\circ)$	80~90

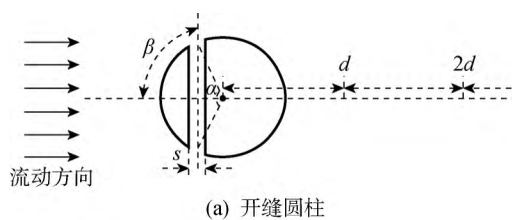


图 1 试验模型  
Fig. 1 Test model

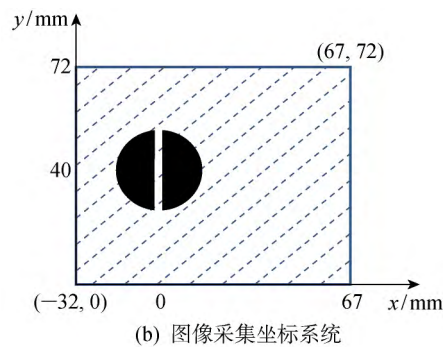
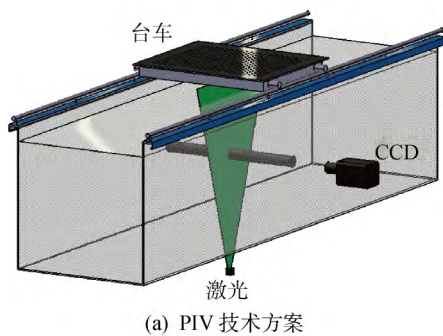


图 2 PIV 系统  
Fig. 2 PIV measurements

参数见表 2. 试验中最大采样频率为 1 kHz, 频响为采样频率的 1/2,  $Re$  分别为 2 039, 3 255, 4 410, 5 418.

表 2 PIV 设备部件参数  
Tab. 2 PIV device parameters

部件	型号	参数
激光器	Nd:YAG	功率 15 W
CCD	SpeedSense 9040	分辨率 1 632 pix×1 200 pix
定焦镜头	Micro-Nikkor	焦距 55 mm
软件	Dynamic Studio	版本号 v 3. 31
示踪粒子	PSP	直径 20 $\mu\text{m}$

本文在试验前已计算和校准各流速下速度分量的均方根和对应的湍流强度. 在试验工况下, 来流速度分量的均方根和湍流强度均较低, 可保证流场的均匀度以及测量精度. 此外, 本文试验的精密循环水槽使用多级稳流设备对来流进行稳流处理, 可控制

水槽试验段水流的湍流度小于 1%, 以保证低流速下试验段流场的高均匀度.  $Re$  为 2 039, 3 255, 4 410, 5 418 时对应的来流速度分别为 0. 07, 0. 11, 0. 14, 0. 18 m/s, 均符合均匀流场的要求. 由于湍流度小于 1%, 所以各试验流速工况均可视为理想均匀流场. 使用高速相机采集到大小为 200 万像素 (1 632 pix×1 200 pix) 且信噪比良好的原始粒子图像. 根据粒子浓度的大小, 在 Dynamic Studio 软件速度场计算过程中设置查询区域的像素为 32 pix×32 pix, 水平和垂直方向的重叠度为 50%. 计算得到的速度矢量场准确率较高, 错误点较少, 测量误差控制在 1% 以内.

### 2 环流瞬态流场

在开缝圆柱环流速度场的基础上, 采用涡量准则计算得到以涡量为背景环流演变周期瞬态流线图, 本文定义逆时针旋转涡量为正, 顺时针涡旋量为负. 图 3 为  $Re=3\ 255$ ,  $\alpha=180^\circ$ ,  $s/d=0.15$  时,

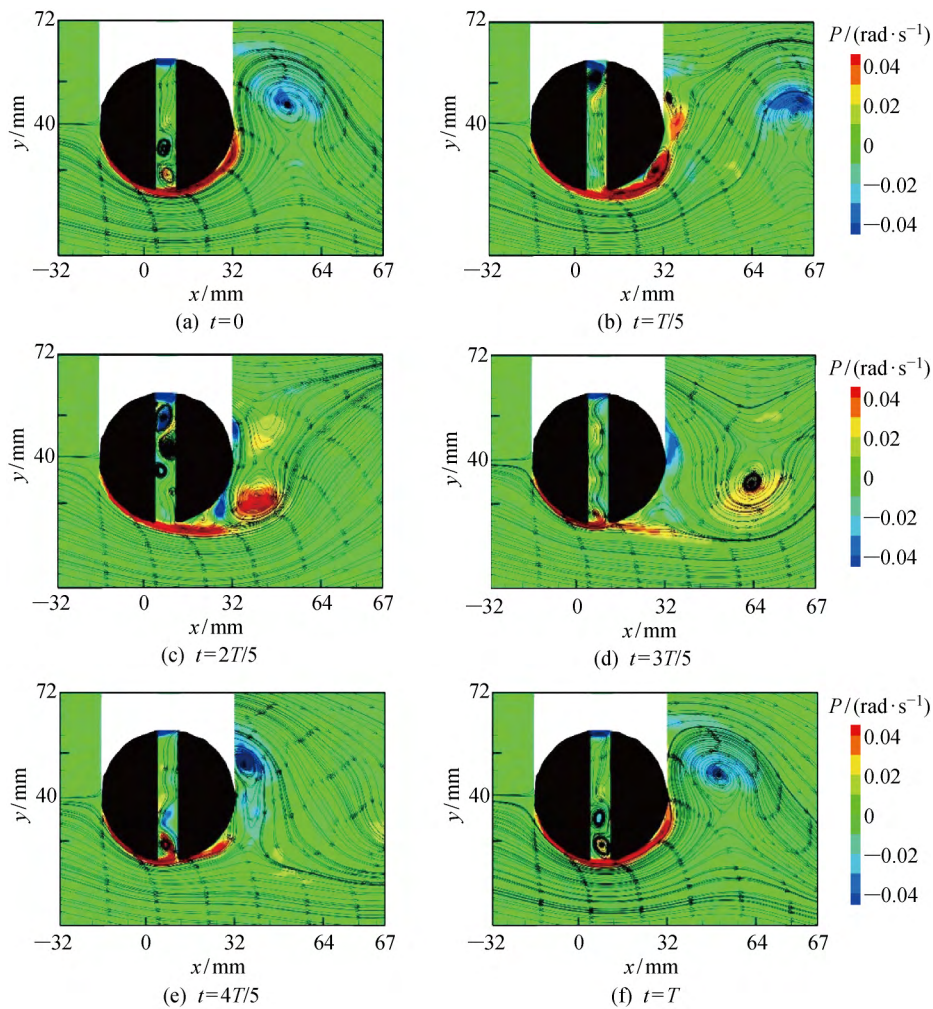


图 3 环流瞬态流场

Fig. 3 Circumferential instantaneous flow



开缝圆柱在 1 个演变周期  $T(T=1.66\text{ s})$  内的环流瞬态流场,图中  $P$  为涡流强度.  $t=0$  时,缝隙下端口存在 2 个旋向相反的小漩涡,圆柱右上侧顺时针漩涡已经进入脱落阶段.  $t=T/5$  时,缝隙下端口仍然处于吹出边界层的状态,上端口吸入边界层形成顺时针漩涡,圆柱后缘下侧逆时针旋转的附着涡开始形成,同时后缘上侧 1 个逆时针旋转的附着涡进入采集区域.  $t=2T/5$  时,缝隙上端口继续吸入边界层,但是吸入的速度明显降低,缝隙内形成 3 个协动漩涡,圆柱后缘下侧的附着涡在上侧剪切流的冲击下从圆柱表面脱落.  $t=3T/5$  时,缝隙上端口转变为吹出边界层状态,上下端口流体的吹吸速度较大,下端口开始形成逆时针旋转的小漩涡,圆柱后缘下侧的脱落涡向下游运动,涡核尺寸逐渐变小.  $t=4T/5$  时,缝隙上下端口的吹吸速度减小,圆柱后缘下侧的冲击剪切流上切,使得圆柱上侧顺时针旋转的附着涡开始脱落.  $t=T$  时,瞬态流场与  $t=0$  时较为相似,意味着开缝圆柱环流流场即将开启新一轮的环流演变周期.

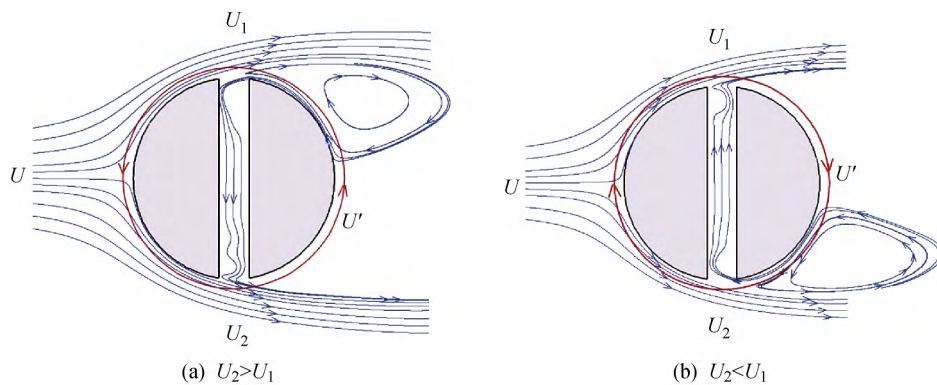


图 4 缝隙流动机理

Fig. 4 Slit flow mechanism

## 4 尾流场结构

### 4.1 时均流场

时均流场可呈现出各开缝圆柱尾流场在一个周期内的整体流动趋势、流场结构以及各关键流场信息如涡强、速度分布等. 通过分析开缝位置、角度、宽度等参数,可揭示其对尾流场结构、流动分离、涡强、流向速度分布、流阻系数等流场动力特征的影响. 故时均特性分析是本文 PIV 数据解析的关键.

将开缝圆柱环流速度矢量场数据导入 MATLAB 软件进行计算,通过时均化处理得到各开缝圆柱尾流的时均流场分布特性. 以  $Re=3\ 255, s/d=0.15$  的时均流场为例进行分析,结果如图 5 所示. 图 5(a)为基准圆柱的时均流场,从平均流线可见 1

## 3 缝隙流动机理

虽然缝隙流动的动力特性较为复杂,但缝隙吹吸效应的本质为脱落涡与圆柱表面环流的此消彼长<sup>[5]</sup>. 根据 Kelvins 旋涡守恒定律,首先,圆圆柱环形表面形成一个与圆柱尾流脱落涡(负涡)强度相等且旋向相反的绕流涡(正涡),亦称绕形环流,如图 4(a)所示. 图中:  $U$  为来流流速;  $U_1$ 、 $U_2$  分别为缝隙上、下端口的局部流速;  $U'$  为绕形环流流速. 在环流与来流的叠加作用下  $U_1 = U - U'$ ,  $U_2 = U + U'$  因此  $U_2 > U_1$ . 根据伯努利方程,缝隙上端口高压将流体推向缝隙下端口流出并与主流汇合,从而在圆柱尾流产生更强的逆时针脱落涡并在圆柱表面诱导出更强的顺时针绕流涡<sup>[10-11]</sup>. 此时,当圆柱表面的顺时针绕流涡强度大于逆时针绕流涡强度时,就会驱使绕流涡顺时针旋转,使得  $U_2 < U_1$ , 缝隙下端口高压将流体推向缝隙上端口流出,进而重复圆柱表面的绕流演变循环,呈现出缝隙内流体不断上下运动的吹吸效应,如图 4(b)所示.

个对称的分离区形成于圆柱后缘,这表明基准圆柱尾流存在显著的流动分离现象. 图 5(b)为  $\alpha=120^\circ$  开缝圆柱的时均流场. 可以看出,流动分离区基本消失且涡量的深色区域范围显著变小,这表明涡街耦合的位置较基准圆柱显著前移. 图 5(c)为  $\alpha=180^\circ$  开缝圆柱的时均流场,可见其流动分离区完全消失,其时均流场分布与  $\alpha=120^\circ$  的时均流场较为相似. 图 5(d)为  $\alpha=240^\circ$  开缝圆柱的时均流场,其与基准圆柱的时均流场相似且尾流区域形成明显的流动分离现象.

上述现象产生的原因在于,  $120^\circ$  及  $180^\circ$  缝隙的吹吸效应使得尾流的流动分离受到抑制,并将脱落涡相互耦合的时间提前. 因此,  $120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的时均流场具有相似性. 由图 6 所示的流动分离

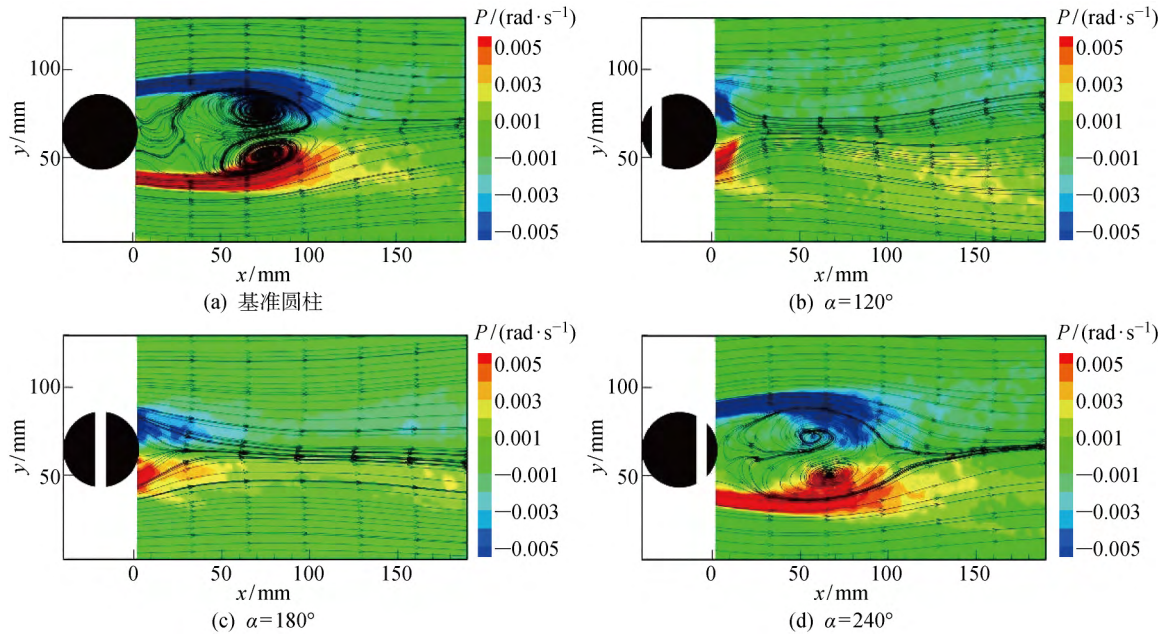


图 5 尾流时均流场

Fig. 5 Time-averaged wake flow

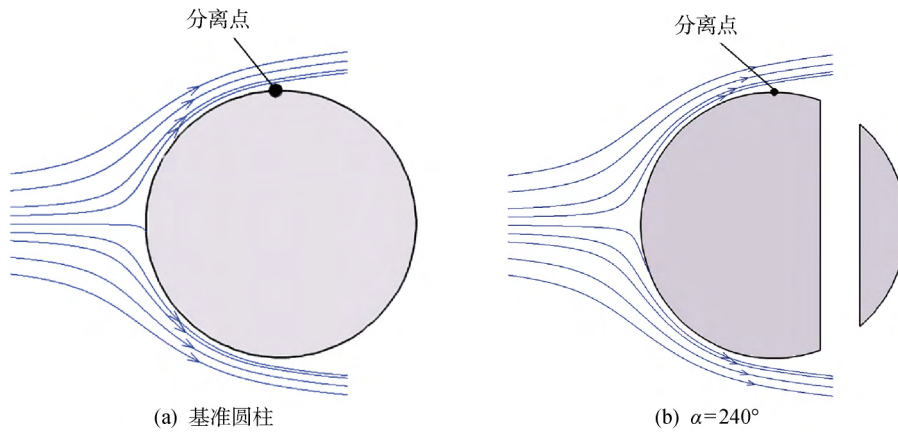


图 6 流动分离点

Fig. 6 Flow separation point

点可见,由于  $240^\circ$  缝隙位置接近圆柱后缘,流体在未达到缝隙之前已发生流动分离,分离点同基准圆柱的分离点类似,所以  $240^\circ$  开缝圆柱与基准圆柱的时均流场分布特征相似.

#### 4.2 时均涡流强度

在时均速度场基础上进行速度梯度计算得到的涡量值只反映漩涡的强度而不分正负<sup>[12]</sup>.由前文分析可知,尾流漩涡强度在旋向相反的脱落涡发生耦合前达到最大,随后逐渐减小并呈现上下对称的特点.相比基准圆柱,开缝圆柱的涡量峰值较低, $\alpha = 120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的涡量峰值约为基准圆柱涡量峰值的  $1/2$ ,其涡强峰值向尾流中线靠拢,且涡强的分布在圆柱下游相对分散并具有不连续性,说明

其脱落涡的运动轨迹振幅较大.图 7 和 8 分别为基准圆柱及  $s/d=0.10, 0.15$  在  $Re=3\ 255$  时的时均

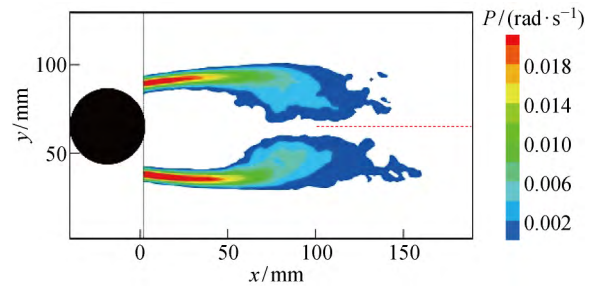


图 7 时均涡流强度

Fig. 7 Time-averaged vortex magnitude of the reference cylinder



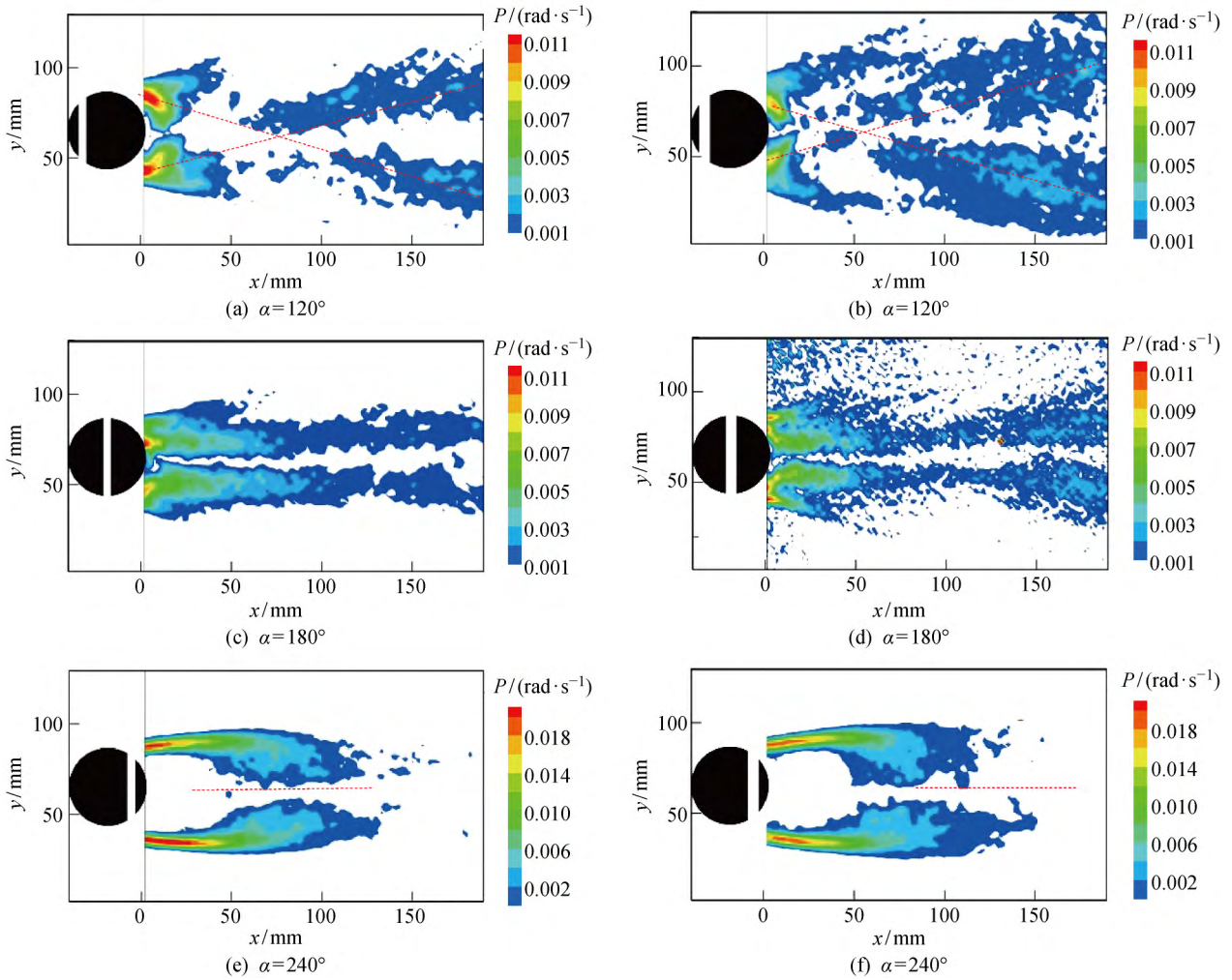


图 8  $s/d=0.10, 0.15$  时时均涡流强度

Fig. 8 Time-averaged vortex magnitude while  $s/d=0.10, 0.15$

涡流强度场,图中红色虚线为尾流卡门涡街结构的运动轨迹.可见, $\alpha=120^\circ$  开缝圆柱卡门的涡街振幅最大.

### 5 尾流速度分布

#### 5.1 流向时均速度

图 9 和 10 分别为基准圆柱及  $s/d=0.10, 0.15$  在  $Re=3\ 255$  时  $x$  轴的流向时均速度分量.可以看出, $\alpha=120^\circ$  时,不同  $s/d$  开缝圆柱的尾流流向速度剖面均以中轴线为对称中心且分离区不存在回流扰动;在与圆心相距  $d$  的位置,沿  $y$  轴方向的流向速度先缓慢增大后迅速降低,继而急剧变大后又缓慢减小;流向速度剖面沿流向先趋于平稳而后呈现出不均匀的变化趋势, $s/d=0.15$  开缝圆柱的下游流向速度不均匀程度较强; $\alpha=180^\circ$  时,不同  $s/d$  开缝圆柱流向速度分布基本一致,分离区不存在回流现象,速度剖面往下游发展的过程中先迅速收缩后趋于平缓; $s/d=0.15$  开缝圆柱的尾流速度收缩较慢; $\alpha=$

$240^\circ$  时,不同  $s/d$  开缝圆柱流向速度的变化趋势基本一致且分离区均存在回流扰动现象.

由此可见, $\alpha=120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱尾流流向的速度分布相似,而  $\alpha=240^\circ$  开缝圆柱与基准圆柱尾流流向的速度分布相似,且前者与后者具有明显区别:① 前者的流动分离区明显小于后者;② 前者的流动分离区不存在回流,而后者的分离区内形成

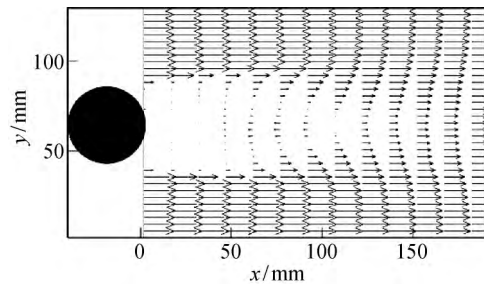


图 9 基准圆柱流向时均速度分量

Fig. 9 Streamwise time-averaged velocity of wake flow for the reference cylinder

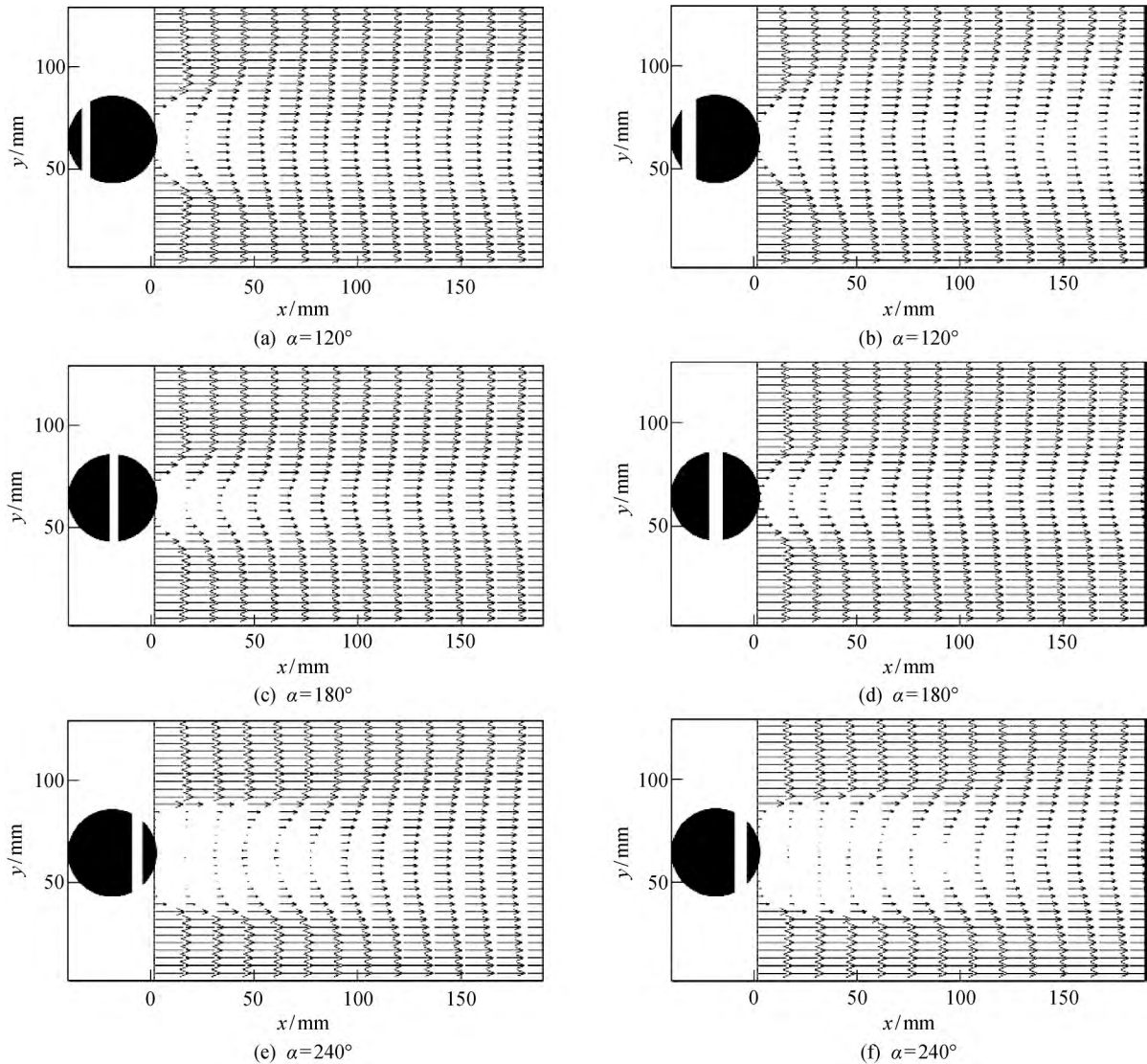


图 10  $s/d=0.10, 0.15$  时流向时均速度分量

Fig. 10 Streamwise time-averaged velocity of wake flow while  $s/d=0.10, 0.15$

回流扰动;③ 前者的尾流流向速度分布稳定性和恢复速率显著高于后者. 原因在于,  $120^\circ$  及  $180^\circ$  的吹吸效应极大地抑制了尾流的流动分离, 使得流动分离区显著减小, 进而抑制回流的形成且吹吸效应使得脱落涡相互耦合的时间提前, 加速了尾流稳定性的恢复.

5.2 时均速度云图

图 11 和 12 分别为基准圆柱,  $s/d=0.10, 0.15$  在  $Re=3\ 255$  时的尾流时均速度( $V$ )云图. 可见, 基准圆柱及  $240^\circ$  开缝圆柱尾流宽度在圆柱下游缓慢变窄, 而  $120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱尾迹低速区沿流向方向的速度比基准圆柱及  $240^\circ$  开缝圆柱显著减小, 这表明  $120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的流阻系数比基准圆柱及  $240^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数大. 此外,  $\alpha$  不变时,  $s/d$  越大, 其尾迹收缩得越快, 对应的流阻系

数也越大;  $s/d$  不变时,  $120^\circ$  开缝圆柱尾流的流阻系数大于  $180^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数;  $240^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数大于基准圆柱的尾流流阻系数.

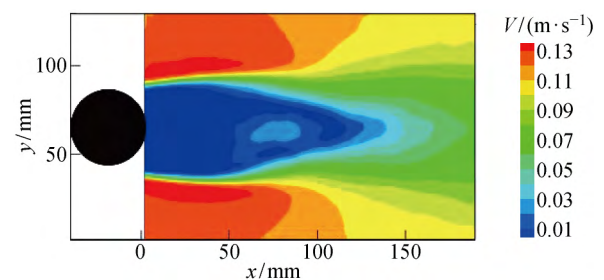


图 11 基准圆柱的尾流时均速度云图

Fig. 11 Time-averaged velocity nephogram of wake flow for the reference cylinder



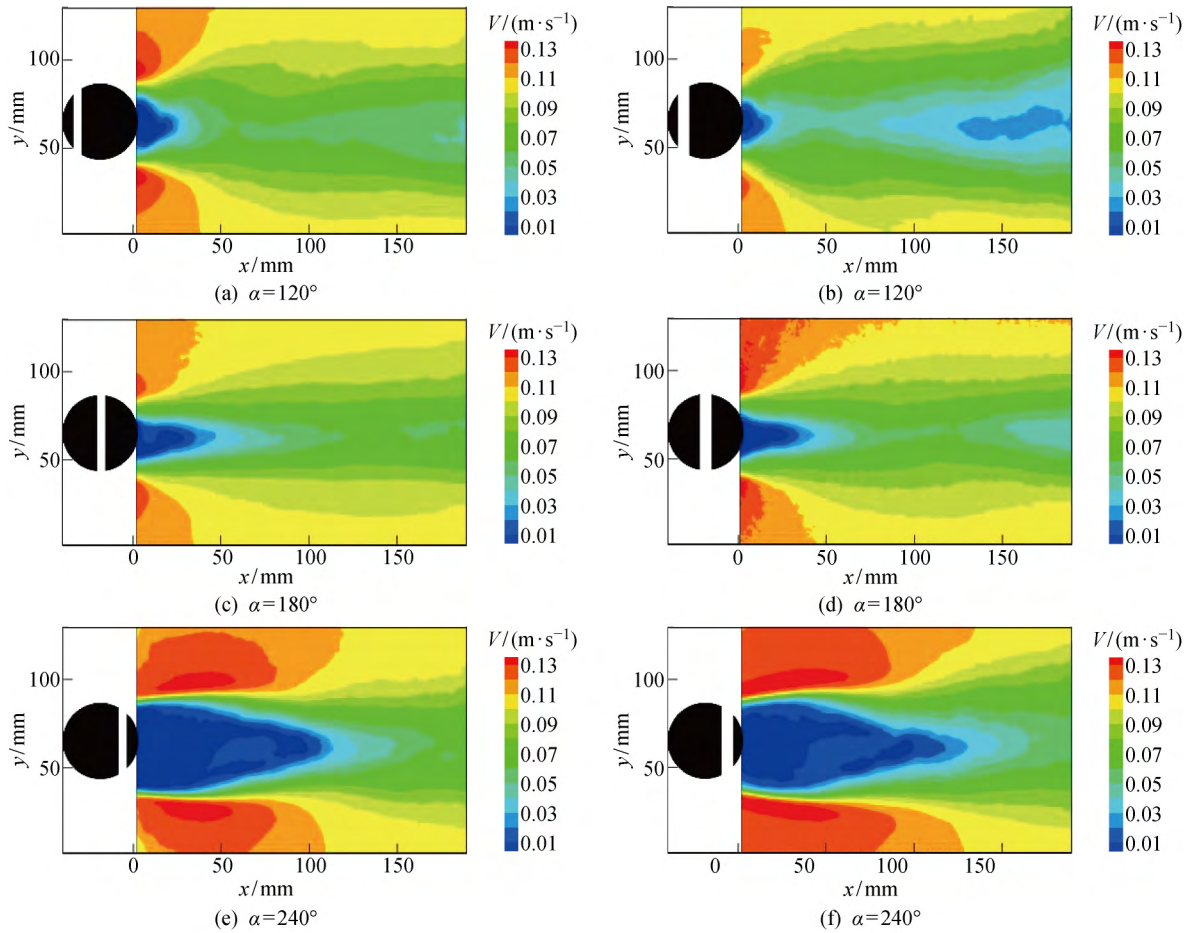


图 12  $s/d=0.10, 0.15$  时尾流时均速度云图

Fig. 12 Time-averaged velocity nephogram of wake flow while  $s/d=0.10, 0.15$

### 6 尾流动力特性

#### 6.1 脱落涡频率

采用快速 Fourier 变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 方法计算各圆柱尾流流场中同一监测点的速度与时间的关系可得其脱落涡频率<sup>[13]</sup>. 尾流场监测点的选择直接影响 FFT 的功率谱特性, 各圆柱

尾流流场的频率信号功率分布形态存在差异, 而近脱落涡分离区内的频率特征不突出, 因此监测点位置应能够充分凸显各圆柱尾流场的频率特征. 本文选取最佳信噪比监测点 (80, 60) mm, 在尾流场信息解析中, 该点能够充分体现各圆柱尾流场的频率特征. 经 FFT 计算得到各圆柱尾流轴线下游不同位置的特征频率分布, 如图 13 所示. 可见,  $\alpha = 120^\circ$  及

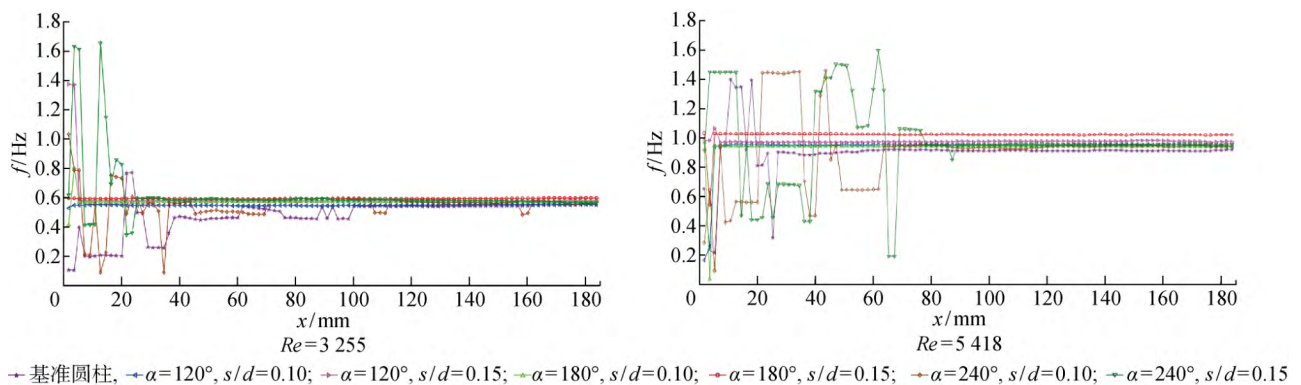


图 13 特征频率分布

Fig. 13 Characteristic frequency distribution



180° 开缝圆柱尾流轴线下游不同位置的特征频率值比较稳定,而基准圆柱和  $\alpha=240^\circ$  开缝圆柱尾流轴线上的特征频率值在初始阶段存在一个不稳定区且  $\alpha=240^\circ$  开缝圆柱的不稳定区较基准圆柱长;随着  $Re$  的增大,不稳定区域的长度增大.此外,  $\alpha=120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱脱落涡迅速耦合形成稳定的卡门涡街且  $Re$  不同时均能保持良好的尾流稳定性.表 3 为不同  $Re$  的各圆柱尾流轴线稳定区域的特征频率( $f$ )值.

表 3 特征频率  
Tab. 3 Characteristic frequency

圆柱类型		$f/Hz$			
$\alpha/(\circ)$	$s/d$	$Re=2\ 039$	$Re=3\ 255$	$Re=4\ 410$	$Re=5\ 418$
基准圆柱		0.367 0	0.553 3	0.749 7	0.912 1
120	0.10	0.365 2	0.558 6	0.767 7	0.947 5
	0.15	0.381 0	0.582 5	0.782 1	0.974 1
180	0.10	0.375 7	0.574 6	0.778 5	0.960 8
	0.15	0.393 2	0.601 2	0.821 8	1.000 6
240	0.10	0.367 0	0.563 9	0.767 7	0.934 2
	0.15	0.374 0	0.566 6	0.774 9	0.956 3

6.2 斯特劳哈尔数

斯特劳哈尔数 ( $Sr$ ) 是流场局部惯性力与迁移力的比值,反映流场非定常运动的特性,  $Sr = fd/v$ ,  $v$  为来流速度<sup>[14]</sup>.对于周期性非定常流动,  $Sr$  可反映周期性流动演变特征.图 14 为不同  $Re$  的各圆柱尾流的  $Sr$  分布.综合考虑  $f$  及  $Sr$  取值的变化可

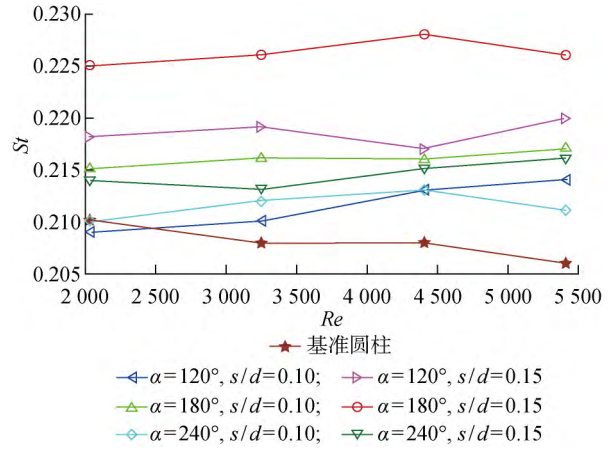


图 14  $Sr$  分布

Fig. 14  $Sr$  distributions

知,  $\alpha=120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱均表现出优于基准圆柱及  $240^\circ$  开缝圆柱的流动演变稳定性.

针对  $\alpha=120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的  $\beta$  对脱落涡演变规律的影响,统计  $Re=3\ 255, \beta=80^\circ \sim 90^\circ$  时的  $Sr$ ,研究  $Sr$  对缝隙倾角变化的敏感性,如图 15 和 16 所示.图中  $p$  为信号幅值,可以看出,相比  $\beta=80^\circ, \beta=90^\circ$  时的特征频率较大;  $s/d$  越小,信噪比越大.

不同  $\beta$  圆柱的  $Sr$  分布如图 17 所示.可以看出,  $\beta$  增大时,  $Sr$  增大.  $\alpha=180^\circ, s/d=0.15$  开缝圆柱的  $Sr$  取值范围为  $0.218 \sim 0.225$ ,较  $\alpha=120^\circ$  圆柱具有更强的线性稳定性.因此,  $180^\circ$  开缝圆柱对于缝隙倾角的变化呈现出弱敏感性,能更好地应用于卡门涡街流量计的设计.

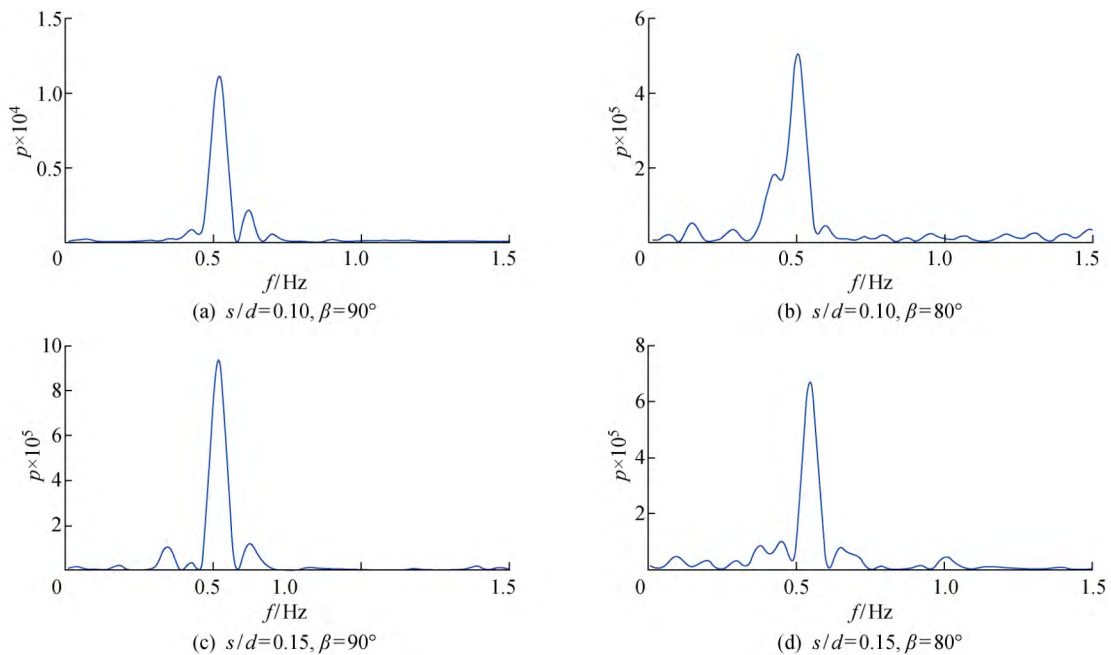


图 15  $\alpha=120^\circ$  时的频谱特性

Fig. 15 Spectral characteristic while  $\alpha=120^\circ$

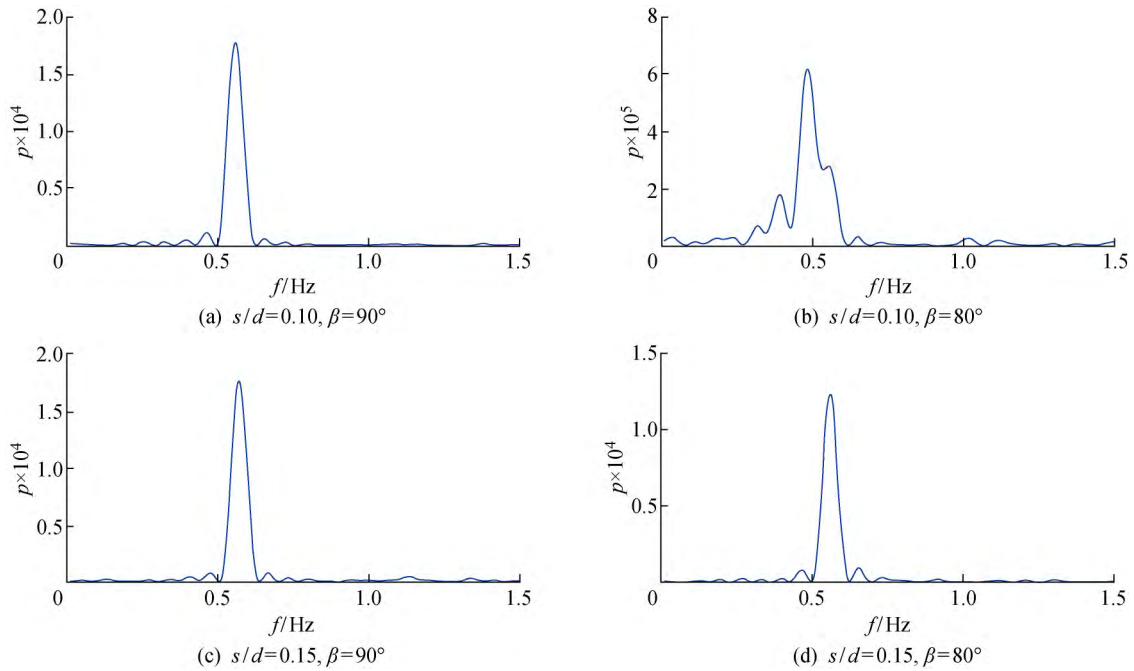


图 16  $\alpha=180^\circ$  时的频谱特性

Fig. 16 Spectral characteristic while  $\alpha=180^\circ$

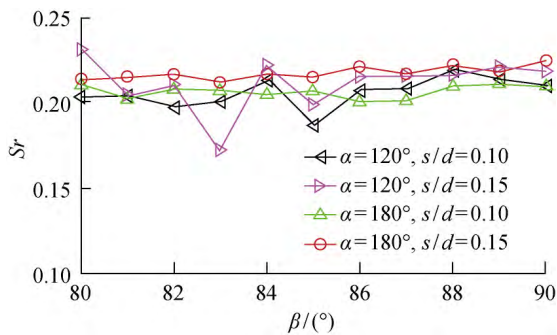


图 17  $S_r$  与  $\beta$  的相关性

Fig. 17 The correlation between  $S_r$  and  $\beta$

### 7 结论

本文通过 PIV 技术对二维开缝圆柱环流流场的动力特性进行定性及定量分析,研究  $Re$ 、开缝位置角、开缝倾角及相对缝宽对环流动力特性的影响规律,主要结论有:

(1)  $120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的缝前缘位置位于基准圆柱流动分离点之前,可以触发缝隙的边界层吹吸效应。

(2)  $120^\circ$  及  $180^\circ$  缝隙的吹吸效应使得尾流流动分离受到抑制,并缩短脱落涡相互耦合的时间,呈现出尾流时均流场相似性; $240^\circ$  缝隙位置接近圆柱后缘,流体在未达到缝隙之前已发生流动分离,未能产生吹吸效应,因此  $240^\circ$  开缝圆柱与基准圆柱的尾

流时均流场分布特征相似。

(3) 相比于基准圆柱及  $240^\circ$  开缝圆柱, $120^\circ$  及  $180^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数较大; $\alpha$  不变时, $s/d$  越大,流阻系数越大; $s/d$  不变时, $120^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数大于  $180^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数; $240^\circ$  开缝圆柱的尾流流阻系数大于基准圆柱的尾流流阻系数。

(4) 缝隙倾斜角增大时, $S_r$  逐渐增大; $\alpha=180^\circ$ ,  $s/d=0.15$  开缝圆柱的尾流  $S_r$  具有最优的线性稳定性,对于缝隙倾角变化的敏感性最弱,能更好地应用于卡门涡街流量计的设计。

### 参考文献:

[1] GAO D L, CHEN W L, LI H, *et al.* Flow around a circular cylinder with slit[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2017, 82: 287-301.

[2] RAHMANI A M, SHAO Y, JUPITERWALA M, *et al.* Nanoscale flow past a colloidal cylinder confined in a slit channel: Lubrication theory and molecular dynamics analysis[J]. **Physics of Fluids**, 2015, 27(8): 082004.

[3] ORDIA L, VENUGOPAL A, AGRAWAL A, *et al.* Vortex shedding characteristics of a cylinder with a parallel slit placed in a circular pipe[J]. **Journal of Visualization**, 2017, 20(2): 263-275.

[4] LIU D, CHAO C Q, WANG Y Z, *et al.* Axial slit wall effect on the flow instability and heat transfer in

- rotating concentric cylinders[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2016, 30(12): 5513-5519.
- [5] WANG J S, WANG C. Heat transfer and flow characteristics of a rectangular channel with a small circular cylinder having slit-vent vortex generator[J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2016, 104: 158-171.
- [6] MA H L, KUO C H. Control of boundary layer flow and lock-on of wake behind a circular cylinder with a normal slit[J]. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, 2016, 59: 99-114.
- [7] WANG J S, DONG Y W. The numerical investigation of flow and heat transfer characteristics of flow past a slit-cylinder[J]. **Science China Technological Sciences**, 2017, 60(4): 602-612.
- [8] 刘志荣, 邹赫, 刘锦生, 等. 开缝圆柱缝隙倾斜角对脱落涡的影响[J]. **北京航空航天大学学报**, 2017, 43(1): 128-135.  
LIU Zhirong, ZOU He, LIU Jinsheng, *et al.* Effect of angle of slit on shedding vortex of slotted circular cylinder[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2017, 43(1): 128-135.
- [9] 江建华, 鲍锋. 基于 POD 方法开缝圆柱绕流流场的研究[J]. **气体物理**, 2017, 2(2): 28-36.  
JIANG Jianhua, BAO Feng. POD analysis of a slit circular cylinder near wake[J]. **Physics of Gases**, 2017, 2(2): 28-36.
- [10] WANG J S, WANG C. Features of flow past a circular cylinder with a slit[J]. **Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering**, 2016, 23(5): 2097-2112.
- [11] LIU D, ZHU J, WANG Y Z, *et al.* Study of slit wall aspect ratio effect on the flow stability and heat transfer in rotating concentric cylinders[J]. **Journal of Engineering Research**, 2017, 5(3): 216-229.
- [12] ZHU H Y, WANG C Y, WANG H P, *et al.* Tomographic PIV investigation on 3D wake structures for flow over a wall-mounted short cylinder[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2017, 831: 743-778.
- [13] 冯俊杰, 孙冰, 姜杰, 等. 射流场中单个气泡破裂的 CFD 模拟与 PIV 实验研究[J]. **高校化学工程学报**, 2018, 32(2): 286-294.  
FENG Junjie, SUN Bing, JIANG Jie, *et al.* CFD simulation and PIV investigation on single bubble breakup in turbulent jet flow[J]. **Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities**, 2018, 32(2): 286-294.
- [14] 贾宇鹏, 王景甫, 郑坤灿, 等. 应用粒子图像测试技术测量球床多孔介质单相流动的流场[J]. **物理学报**, 2016, 65(10): 106701.  
JIA Yupeng, WANG Jingfu, ZHENG Kuncan, *et al.* Measurement of single phase flow in porous media using PIV technique[J]. **Acta Physica Sinica**, 2016, 65(10): 106701.

(本文编辑:陈晓燕)