

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0058

# 开缝圆柱缝隙倾斜角对脱落涡的影响

刘志荣<sup>1</sup>, 邹赫<sup>1</sup>, 刘锦生<sup>2</sup>, 鲍锋<sup>1</sup>, 朱睿<sup>1,\*</sup>

(1. 厦门大学 航空航天学院, 厦门 361005; 2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘 要:** 开缝圆柱绕流作为钝体绕流研究的分支, 具备很强的应用前景, 但是对其复杂的流动现象的物理本质的理解仍不完善。本文采用流动显示技术和粒子成像测速技术(PIV)探究缝隙对开缝圆柱流场结构的影响, 在数据处理方面采用本征正交分解(POD)方法对开缝圆柱流场信息进行了重建。实验研究表明: 在一定雷诺数范围内, 开缝圆柱缝隙的存在从根本上改变了圆柱绕流近区尾流的结构; 开缝圆柱脱落涡的脱落频率对开缝圆柱缝隙倾斜角具有一定的敏感性, 随着缝隙倾斜角的增大其斯特劳哈尔数逐渐变大, 对比发现开缝圆柱狭缝比(缝隙/直径)为0.15时较0.10的斯特劳哈尔数具有更强的稳定性。

**关键词:** 开缝圆柱; 脱落涡; 粒子成像测速技术(PIV); 本征正交分解(POD); 斯特劳哈尔数

中图分类号: O357

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2017)01-0128-08

开缝圆柱由于缝隙的存在会对圆柱体前后压力差产生影响, 从而影响圆柱扰流的阻力和漩涡脱落的频率等, 对开缝圆柱的基础研究在流动减阻和流量测量等实际问题中具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。国内外不少学者采用实验测量和仿真计算的方法对开缝圆柱绕流流场特性进行了一定的研究, 但是对于开缝圆柱缝隙对边界层的影响的认识理解仍不完善。

在实验研究方面日本横须贺国防研究院 Igarashi 教授在风洞中对开缝圆柱流场进行了系统的测量, 总结了开缝圆柱在不同工况下的流场特征<sup>[2-3]</sup>; 纽卡斯尔大学的 Olsen 教授和 Rajagopalan 则重点研究了缝隙大小和圆柱外轮廓形状对斯特劳哈尔数和阻力系数的影响<sup>[4]</sup>; 台湾成功大学 Miao 教授等<sup>[5]</sup>在 Igarashi<sup>[2-3]</sup>的研究基础之上, 在水洞和风洞里对不同缝隙比的开缝圆柱流场进行了更为细致测量工作。国内北航的王晋军教授等

的实验研究也表明开缝圆柱缝隙倾角在一定范围内可以减小流动阻力<sup>[6]</sup>; 中国计量学院的王慧和黄咏梅教授通过实验的方法对带狭缝圆柱钝体流量测量仪器进行了研究, 表明带狭缝圆柱的涡街信号强度和信噪比高, 斯特劳哈尔数线性关系较好<sup>[7]</sup>; 厦门大学的鲍锋教授等在循环水洞中对开缝圆柱缝隙内部流场进行了细致的测量工作, 对开缝圆柱的流态进行了补充<sup>[1]</sup>。

在数值计算方面, 针对圆柱扰流学术界普遍认为采用大涡模拟(large eddy simulation)的方式进行三维数值模拟具有较高的准确性<sup>[8-11]</sup>, 但直接对开缝圆柱绕流特性直接数值计算研究的相对较少<sup>[1]</sup>。国内厦门大学的鲍锋教授等采用大涡模拟的方式对不同雷诺数下不同缝隙宽的开缝圆柱仿真发现开缝圆柱尾流场具有一定的三维性, 其仿真结果与实验数据能较好地吻合<sup>[1]</sup>; 中国计量学院的王慧和黄咏梅也用数值模拟方法发现了

收稿日期: 2016-01-18; 录用日期: 2016-01-27; 网络出版时间: 2016-04-13 15:38

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160413.1538.008.html

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11072206); 福建省科学基金(2012J01023)

\* 通讯作者: E-mail: zhurui@xmu.edu.cn

引用格式: 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 Z R, ZOU H, LIU J S, 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 (in Chinese).

带狭缝圆柱产生的涡街信号强度高, 旋涡尺寸较大, 斯特劳哈尔数线性度好<sup>[7]</sup>; 但值得注意的是也存在一些学者从其他领域侧面对开缝圆柱流场特性进行了分析, 如对开缝旋转圆筒固定小翼构成的飞机颤振激励器的气动特性<sup>[12]</sup>和开缝圆柱强化对流换热<sup>[13-15]</sup>的仿真结果都从侧面对开缝圆柱绕流流场特性进行了分析。

本文主要工作是基于厦门大学流体 & 粒子成像测速(PIV)系统实验室的精密循环水槽, 采用非介入式流场测试技术, 对不同狭缝比的开缝圆柱在不同缝隙倾斜角下的流场特性进行了细致的测量, 本文的工作进一步对开缝圆柱绕流流场特性进行了补充。

### 1 实验模型与研究方法

本文所涉及的实验测量工作均在开放式循环水槽中进行, 该型多功能精密循环卧式水槽结构示意图如图 1 所示, 水槽试验段上方设置有光学平板和六分量测力天平, 天平下端开设有直径 10 mm 的模型安装孔, 可垂直悬挂模型并实现攻角调节; 水槽动力配套有调节转速的数字变频器, 频率调节范围为 0 ~ 70 Hz, 对应实验段水位高度为 500 mm 的水流速度为 0 ~ 0.3 m/s, 水流速度连续可调, 在工作范围内湍流度被控制 1% 以内; 实验段水体截面尺寸为 500 mm × 500 mm, 长度 3 000 mm, 采用高透光率的光学玻璃搭建而成, 实现四面良好的光学可达性。

本文需对开缝圆柱绕流的瞬态流场进行分析, 因此建立了时序 PIV 系统, 系统参数如表 1 所示。该 PIV 系统主要包括了高分辨率相机、激光器、同步器、PIV 图像处理分析软件和示踪粒子等。其中 PIV 相机选用高速 CMOS 相机, 分辨率 200 万像素, 最大触发频率为 1 kHz。本文实验图像采集和数据后处理软件采用 Dynamic Studio 软件, 系统误差在 1% 以内。

为保证 PIV 实验测量的精度, 模型外径公差控制在 ±0.2 μm, 并进行黑色阳极氧化处理, 减少激光的发射, 实验模型如图 2 所示。

实验时, 模型垂直吊装在拖曳台车上方的天平上, 通过控制天平内部伺服电机旋转角度达到改变开缝圆柱与来流方向夹角的目的。测量时激光切面从水槽侧面玻璃垂直入射, 切面与水流流向平行, 并照射在模型中部。实验模型安装与激光切面位置如图 3 所示, 实验堵塞比低于 8%。

实验模型选用直径  $d = 40$  mm, 缝隙宽度  $s = 4$  ~  $6$  mm 轴向有效长度  $l = 440$  mm 的开缝圆柱,  $\beta$  为开缝圆柱缝隙中心线与来流方向的夹角, 具体参数见表 2。

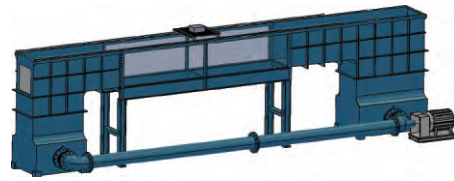


图 1 实验水槽

Fig. 1 Experiment water channel

表 1 PIV 系统参数

Table 1 PIV system parameters

组件	型号	参数及数值
激光		最大输出功率 15 W 波长 532 nm
相机	SpeedSense 9040	1 632 像素 × 1 200 像素
镜头	Micro-Nikkor	焦距 55 mm
处理软件	Dynamic Studio V3.40	
示踪粒子		PSP 粒子直径 20 μm



图 2 实验模型

Fig. 2 Experimental model

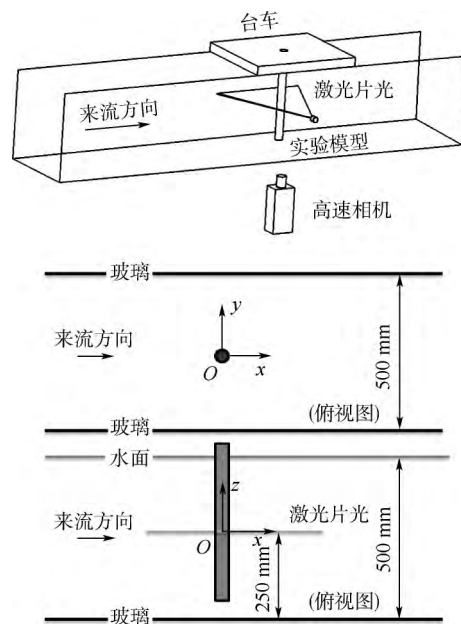


图 3 实验模型及激光切面安装位置

Fig. 3 Mounting position of experimental model and laser section

表2 开缝圆柱尺寸参数

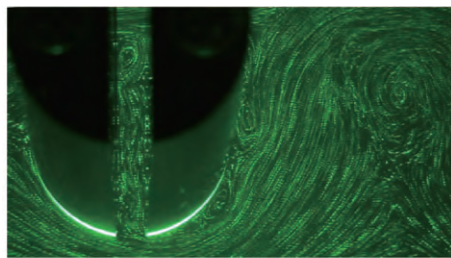
Table 2 Geometrical parameters of slotted cylinder

参数	数值
$d/mm$	40
$l/mm$	440
$d/l$	11
$s/mm$	$4\beta$
$s/d$	$0.10\beta$
$\alpha/(\circ)$	8.63

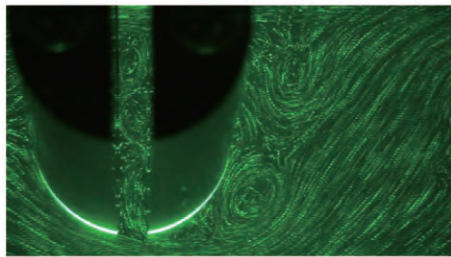
注:  $d/l$  为长宽比;  $\alpha = \arcsin(s/d)$  为开缝角度。

## 2 开缝圆柱流场特性的流动显示

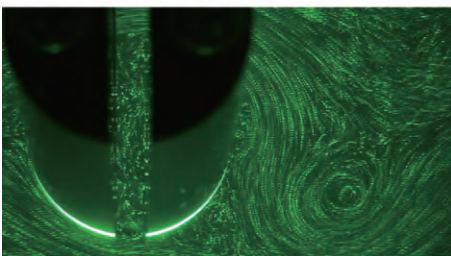
首先进行了开缝圆柱近场区流场特性流动显示实验。为了更加细腻地显示流场信息,选用激光粒子,采用波长为 532 nm 的绿色激光片光照明,摄像机拍摄图像。图4为来流速度  $u =$



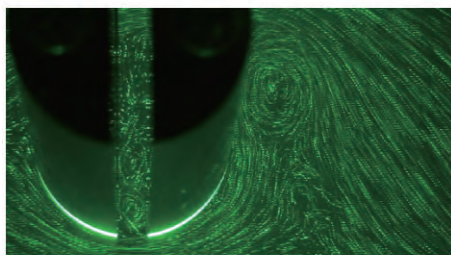
(a)  $t_0=0$



(b)  $t_1=(1/4)T$



(c)  $t_2=(2/4)T$



(d)  $t_3=(3/4)T$

图4  $Re_d = 5837$  时缝隙内部流动

Fig. 4 Fluid flow in slit-vent at  $Re_d = 5837$

$0.15\text{ m/s}$   $\beta = 90^\circ$  (基于圆柱直径的雷诺数  $Re_d = 5837$ ,下同) 工况下开缝圆柱缝隙内部及近壁面的流体流动一个完整周期  $T$  的演化过程。

$t_0$  时刻,开缝圆柱上侧边界层被“吸进”缝隙,缝隙下方的流体被“吹出”,此时在圆柱下表面附着逆时针旋转的小旋涡。

$t_1$  时刻,缝隙上端生成 2 个旋转方向相反的协动小旋涡, $t_0$  时刻在圆柱下表面形成的旋涡涡核发展变大,逐渐从圆柱表面开始脱落。

$t_2$  时刻,缝隙内的流体短暂静止,该时刻缝隙内部无旋涡存在。

$t_3$  时刻,缝隙内部经历短暂静止后,缝隙上下两端流向进入逆转,缝隙下端口吸入边界层,并在缝隙内部形成 2 个旋向相反的协动小旋涡,而缝隙下端口吹出边界层。

总结边界层吹吸与旋涡演化过程之间的演化关系可概述为:当缝隙下端口发生边界层吸入效应,则缝隙入口处依上而下形成顺时针和逆时针方向旋涡,同时在圆柱的上表面后方生成顺时针旋涡;当下方由边界层吸入效应转变为边界层吹出效应时,圆柱后方旋涡逐渐发展至脱落;而当缝隙下方处于边界层吹出的状态时,流体沿缝隙右表面底部向外“溢出”,同时圆柱下表面后方生成逆时针旋涡,当下方由边界层吹出向边界层吸入过渡时,旋涡逐渐发展至脱落。在整个周期内缝隙内部形成近似于“活塞”的流动现象,即流体上下周期性地振荡,并会形成一系列的协动小旋涡。

## 3 PIV 实验结果及分析

### 3.1 不同来流速度对其脱落涡的影响

在 PIV 实验过程中,激光切面从水槽侧面玻璃垂直入射,切面与水流流向平行,相机在水槽底部拍摄,记录开缝圆柱尾缘的流场信息。根据实验设备的性能和流场测量需求,在实验过程中设置高频相机的工作频率为 100 Hz,在一定的相机的存储空间下尽可能捕捉较长时域的流场状态,相机捕捉的图幅大小和相应的坐标说明如图 5 所示。

本文对开缝圆柱脱落频率  $f$  的统计采用环量

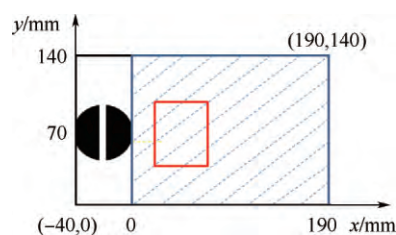


图5 PIV 数据坐标系

Fig. 5 Coordinate system of PIV data



监控的方式 在原始采集图片划定区域作为脱落涡周期监控窗口(图 5 红色框内) 对于速度场解算 采用自适应相关(adaptive correlation)算法 查问区域(interrogation areas) 32 像素 × 32 像素 水平和垂直方向的重叠度(overlap) 为 50% 窗口监控指标取其顺时针旋涡环量  $\Gamma$  变化 采用这种方式可以在一定程度上避免由于 PIV 分辨率问题带来的相关统计信息的误差。环量是流场中速度在某一封闭周线切线上的分量  $\vec{V}$  沿封闭曲线  $\vec{S}$  的积分 环量  $\Gamma$  的计算可以根据斯托克斯公式表述为式(1) 即可以根据对涡量的面积分  $A$  求得环量, 二维情况下 涡量  $\omega$  的计算的如式(2) 所示  $u$  与  $v$  分别为  $x$  与  $y$  方向的速度分量  $L$  为封闭曲线。

$$\Gamma = \oint_L \vec{V} \cdot d\vec{S} = 2 \iint_A \omega dA \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

下面以狭缝比  $s/d = 0.15$   $\beta = 90^\circ$  的开缝圆柱周期统计进行分析, 实验来流速度  $u$  设置在 0.035、0.070、0.100、0.145 和 0.180 m/s 时, 截取监控窗口环量  $\Gamma$  在 12 s 内的变化 如图 6 所示。

在本文设置的雷诺数范围内 随着雷诺数的提高 监控区内脱落涡整体环量增强 每个周期内的环量  $\Gamma$  变化存在差异。

在环量统计的基础上运用 FFT 变换 得到不同雷诺数下环量变化频谱图 见图 7。图中:  $P$  为能量。

从不同来流速度下的频谱图可以看出 随着流场速度的提高 开缝圆柱的脱落涡脱落频率增大 特征频率信号也逐渐增强。

斯特劳哈尔数  $St$  是当地惯性力与迁移力的比值 反映了流动非定常运动的相似性 对于周期性的非定常运动就反映周期性相似 所以和周期性相关的非定常流动由  $St$  决定<sup>[1]</sup> 在频率统计  $f$  的基础上 这里采用式(3) 计算斯特劳哈尔数。

$$St = \frac{fd}{u} \quad (3)$$

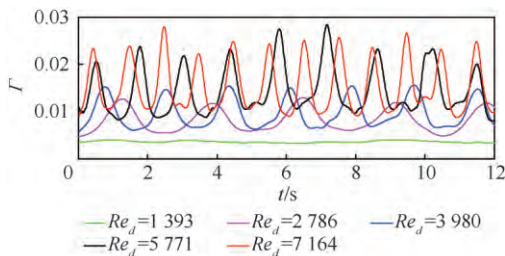


图 6  $\beta = 90^\circ$  时不同  $Re_d$  下环量发展变化曲线

Fig. 6 Circulation development curves at different  $Re_d$  when  $\beta = 90^\circ$

不同  $u$  下的  $Re_d$ 、 $f$  和  $St$  如表 3 所示 通过统计数据 可以发现本文测量计算的结果与文献[5]结论吻合 开缝圆柱的斯特劳哈尔数  $St$  具有很好的线性关系 其实验值在 0.22 ~ 0.23 之间。

本节采用了本征正交分解(POD)方法对开缝圆柱流场做更为细致的分析。POD 方法是基于主元分析思想 依据 Karhunen-Loève 展开 将流场进行分解 并按照能量比计算出各阶模态 识别出流动中大尺度的拟序结构<sup>[16]</sup>。本节中采用的 POD 方法是 Dynamic Studio 软件自带的快照 POD(Snapshot POD) 算法。该算法将瞬时流场分解为时均速度场和脉动速度场 然后对脉动速度场进行 POD 分解 这样流场的全部信息可分解为时均流场和脉动流场 任意瞬时流场可视为各阶模态一定的线性组合。在实际运用中 POD 方法对于流场大尺度结构解算具有明显的优势<sup>[16-17]</sup>。

本节取能量占比 90% 以上(0 ~ 5 阶)的模态 对来流速度  $u = 0.10$  m/s( $Re_d = 3980$ ) 下基准圆柱、狭缝比  $s/d = 0.10$  和  $s/d = 0.15$  的开缝圆柱

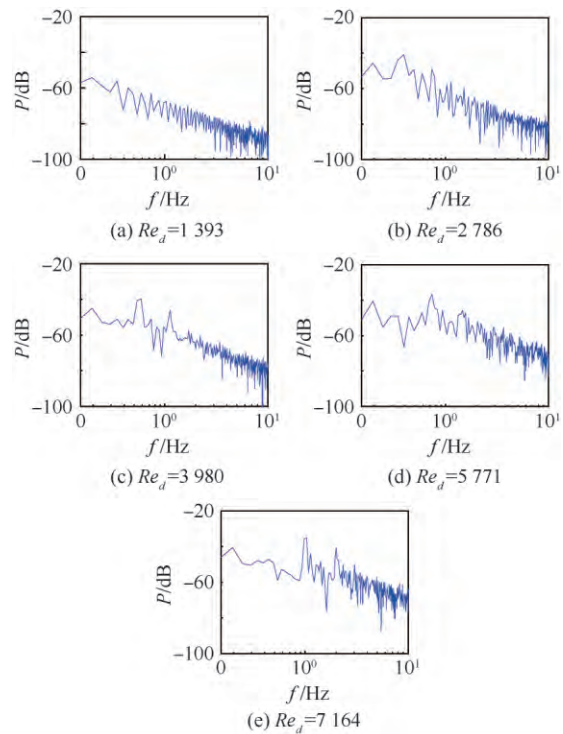


图 7  $\beta = 90^\circ$  时不同  $Re_d$  下的频谱图

Fig. 7 Spectrogram at different  $Re_d$  when  $\beta = 90^\circ$

表 3 不同  $u$  下的  $Re_d$ 、 $f$  和  $St$

Table 3  $Re_d$ ,  $f$  and  $St$  at different  $u$

$u/(m \cdot s^{-1})$	0.035	0.070	0.100	0.145	0.180
$Re_d$	1393	2786	3980	5771	7164
$f/Hz$	0.196	0.393	0.566	0.822	1.020
$St$	0.224	0.225	0.226	0.227	0.227

流场进行流场重构,得到一个周期内的速度矢量图(取图5蓝色实线框区域),如图8~图10所示。

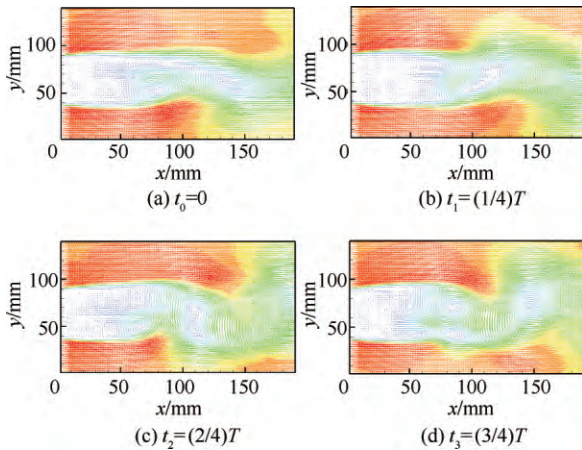


图8 基准圆柱一个周期内的流态

Fig. 8 Fluid flow of a base cylinder in a period

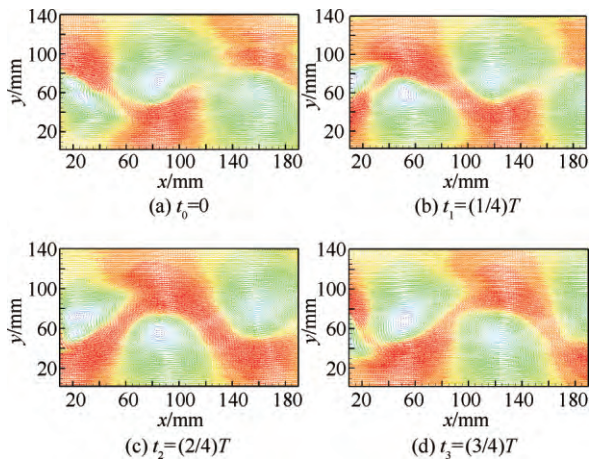


图9 s/d=0.10的开缝圆柱一个周期内的流态

Fig. 9 Fluid flow of a slotted cylinder with s/d=0.10 in a period

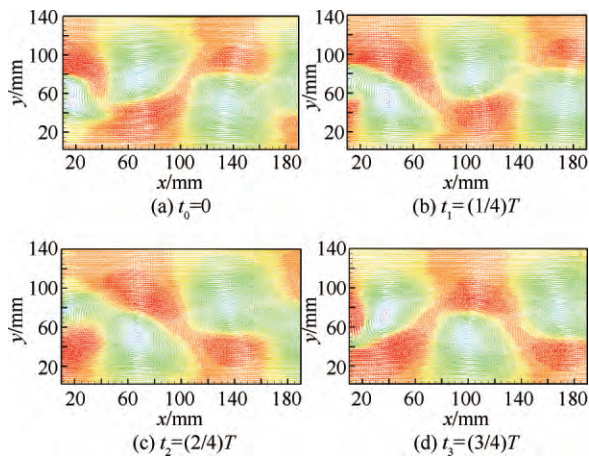


图10 s/d=0.15的开缝圆柱一个周期内的流态

Fig. 10 Fluid flow of a slotted cylinder with s/d=0.15 in a period

通过对比以上不同实验模型在一个周期内的流态结构,在相同雷诺数下,缝隙的存在对圆柱尾流结构产生明显的影响,其卡门涡街特征更为明显,漩涡脱落周期缩短;狭缝比 s/d = 0.10 和 s/d = 0.15 的开缝圆柱在脱落周期的差异不大。

### 3.2 缝隙倾斜角对脱落涡的影响

为进一步探究开缝圆柱的流场特性,本节在 u = 0.10 m/s (Re\_d = 3980) 下通过改变开缝圆柱缝隙与来流方向的夹角 β,探究开缝圆柱 St 对缝隙倾斜角 β 的敏感性,如图11所示。

根据文献 [2-3],开缝圆柱缝隙倾斜角在 60° ≤ β ≤ 90°,开缝圆柱缝隙对边界层的抽吸现象主导尾流流动,故本节设置了从 70° ~ 90° 共计 21 组不同倾斜角 β 工况,统计得到在不同倾斜角下,开缝圆柱的斯特劳哈尔数 St 的变化见图12,可以看出随着缝隙倾斜角 β 的变大,其 St 逐渐变大,相比狭缝比 s/d = 0.15 和 s/d = 0.10 的斯特劳哈尔数, s/d = 0.15 的开缝圆柱 St 稳定性更强。

本节还选取了狭缝比 s/d = 0.15 开缝圆柱在 β 为 90°、85° 和 80° 条件下一个周期内的速度云图变化,如图13所示。

对比可以发现,在实验参数范围内,随着缝隙倾斜角 β 的减小,整体流态变化不大,但其脱落涡尾迹会出现轻微的上扬,对缝隙倾斜角存在一定的敏感性。

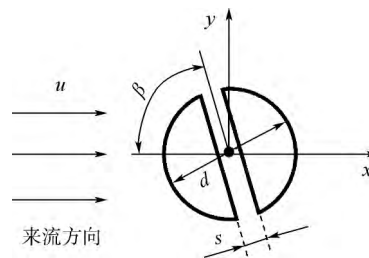


图11 开缝圆柱示意图

Fig. 11 Sketch of circular cylinder with a slit

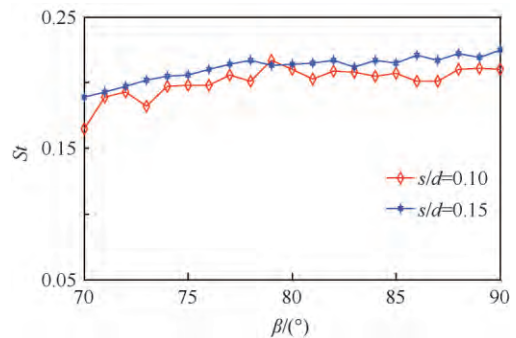


图12 St 变化曲线在 β = 70° ~ 90°

Fig. 12 St development curves at β = 70° - 90°



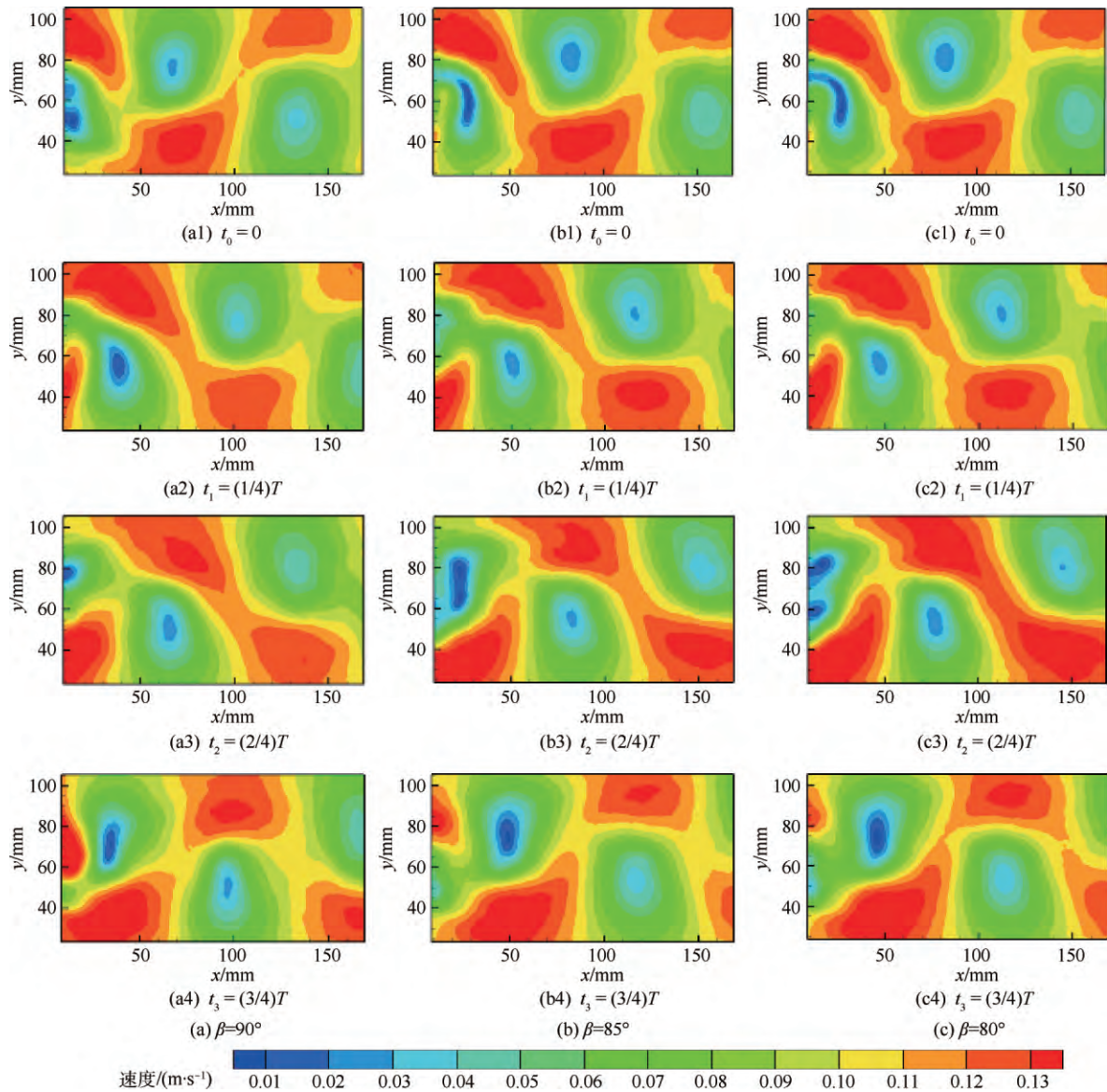


图 13  $\beta = 90^\circ, 85^\circ, 80^\circ$  一个周期内的流态

Fig. 13 Fluid flow of a slotted cylinder in a period at  $\beta = 90^\circ, 85^\circ, 80^\circ$

### 4 结 论

本文采用流动显示技术,观察了开缝圆柱的近场区流场特性,探究缝隙对其流场的影响,并采用 PIV 测量技术测量了开缝圆柱的缝隙倾斜角对其脱落涡的影响,得到以下结论:

1) 缝隙垂直于来流的开缝圆柱在实验雷诺数范围内,当流体流经开缝圆柱时,在圆柱缝隙内部形成了类似于“活塞”的流动现象,并导致了近壁面区边界层出现的“吹吸”效应,缝隙内部会形成一定数量的协动小漩涡。

2) 当缝隙倾斜角  $\beta = 90^\circ$  时,实验雷诺数范围内,随着雷诺数的增大,其脱落涡频率也明显增大,涡街特征更加显著,开缝圆柱的  $St$  与雷诺数具有很强的线性关系。

3) 开缝圆柱缝隙在不同倾斜角下,随着缝隙倾斜角  $\beta$  的变大,其脱落涡的频率对开缝圆柱缝隙倾斜角存在一定的敏感性,且缝隙倾斜角对尾流形态也产生了一定的影响,相比狭缝比  $s/d = 0.15$  与  $s/d = 0.10$  的开缝圆柱,  $s/d = 0.15$  开缝圆柱的  $St$  稳定性更佳。

### 参考文献 (References)

[1] 杨锦文,何意,鲍锋. 开缝圆柱近场尾流的大涡模拟和实验测量[J]. 空气动力学报, 2014, 32(3): 308-314.  
 YANG J W, HE Y, BAO F. Large eddy stimulation and experimental measurement of near wake structures of a slotted circular cylinder[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(3): 308-314 (in Chinese).

[2] IGARASHI T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 1st report, flow control and flow patterns[J]. Bulle-

- tin of the JSME ,1978 21( 154) : 656-664.
- [ 3 ] IGARASHI T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 2nd report effect of boundary layer flow [J]. Bulletin of the JSME ,1982 25( 207) : 1389-1397.
- [ 4 ] OLSEN J F ,RAJAGOPALAN S. Vortex shedding behind modified circular cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2000 86( 1) : 55-63.
- [ 5 ] PENG B H ,MIAU J J ,BAO F ,et al. Performance of vortex shedding from a circular cylinder with a slit normal to the stream [J]. Flow Measurement and Instrumentation 2012 25: 54-62.
- [ 6 ] 谭广琨,王晋军,李秋胜. 圆柱体减阻技术及其机理初步研究[J]. 北京航空航天大学学报 2001 27( 6) : 658-661.  
TAN G K ,WANG J J ,LI Q S. Drag reduction technique of cylinder and mechanism research [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,2001 ,27( 6) : 658-661 ( in Chinese) .
- [ 7 ] 王慧,黄咏梅. 带狭缝圆柱钝体流量测量特性研究[J]. 传感技术学报 2013 26( 12) : 1661-1665.  
WANG H ,HUANG Y M. Study of flowrate measurement characteristics of a circular cylinder with a slit [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators ,2013 ,26( 12) : 1661-1665 ( in Chinese) .
- [ 8 ] 郝鹏,李国栋,杨兰,等. 圆柱绕流流场结构的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报 2012 29( 4) : 437-443.  
HAO P ,LI G D ,YANG L ,et al. Large eddy simulation of the circular cylinder flow in different regimes [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics 2012 29( 4) : 437-443 ( in Chinese) .
- [ 9 ] BREUER M. A challenging test case for large eddy simulation: High Reynolds number circular cylinder flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2000 21( 5) : 648-654.
- [ 10 ] SARKAR S ,SARKAR S. Large-eddy simulation of wake and boundary layer interactions behind a circular cylinder [J]. Journal of Fluid Engineering 2009 ,131( 9) : 091201-14.
- [ 11 ] SARKAR S ,SARKAR S. Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall [J]. Journal of Fluids and Structures 2010 ,26( 1) : 19-40.
- [ 12 ] 杨智春,党会学,孙勇军,等. 带开缝旋转圆筒固定小翼气动特性的数值模拟[J]. 工程力学 2009 29( 11) : 222-227.  
YANG Z C ,DANG H X ,SUN Y J ,et al. Numerical simulation of the aerodynamic characteristics of a fixed wing with trailing edge rotating slotted cylinder [J]. Engineering Mechanics , 2009 29( 11) : 222-227( in Chinese) .
- [ 13 ] 申春赞,杨荣,王津,等. 圆内开缝圆不同开缝方向自然对流换热[J]. 上海理工大学学报 2013 35( 5) : 425-429.  
SHEN C Y ,YANG M ,WANG J ,et al. Natural convection heat transfer characteristics of a circle with an internal concentric round slotted in different direction [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology ,2013 ,35( 5) : 425-429 ( in Chinese) .
- [ 14 ] 汪健生,刘志毅,张金凤,等. 斜截圆柱式涡流发生器强化传热的大涡模拟[J]. 机械工程学报,2007 ,43( 10) : 55-61.  
WANG J S ,LIU Z Y ,ZHANG J F ,et al. Large eddy simulation on heat transfer enhancement of inclined-cut ellipsoidal vortex generator [J]. Journal of Mechanical Engineering ,2007 ,43( 10) : 55-61 ( in Chinese) .
- [ 15 ] 汪健生,王晓,朱强,等. 湍流边界层内钝体扰流的流动与传热特性[J]. 机械工程学报 2015 51( 24) : 168-176.  
WANG J S ,WANG X ,ZHU Q ,et al. Flow and heat transfer characteristics of flow past the bluff body in turbulent boundary layer [J]. Journal of Mechanical Engineering ,2015 ,51( 24) : 168-176 ( in Chinese) .
- [ 16 ] MA L Q ,FENG L H ,PAN C ,et al. Fourier mode decomposition of PIV data [J]. Science China Technological Sciences 2015 ,58( 11) : 1935-1948.
- [ 17 ] 王汉封,徐胜金. 用 POD 方法研究有限长方形棱柱尾流的双稳态现象[J]. 空气动力学学报 2014 32( 6) : 827-833.  
WANG H F ,XU S J. On the bistable phenomenon of a finite length square cylinder wake with POD method [J]. Acta Aerodynamica Sinica 2014 32( 6) : 827-833 ( in Chinese) .

#### 作者简介:

刘志荣 男,硕士,工程师。主要研究方向:实验流体力学、流动控制。

朱睿 男,博士,讲师,硕士生导师。主要研究方向:实验流体力学、流动控制、民航安全。

## Effect of angle of slit on shedding vortex of slotted circular cylinder

LIU Zhirong<sup>1</sup>, ZOU He<sup>1</sup>, LIU Jinsheng<sup>2</sup>, BAO Feng<sup>1</sup>, ZHU Rui<sup>1\*</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Aeronautics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Vortex shedding from a circular cylinder with a slit which belongs to the unsteady flow of bluff bodies has very strong application prospects. However, it is still difficult to fully understand the complex flow phenomenon. Using flow visualization and particle image velocimetry (PIV) measurement, we explored the influence of a slit on the flow field structure. Adopting the method of proper orthogonal decomposition (POD), we reconstructed the flow field in the series of operations on PIV data. The experimental results show that the flow in the slit demonstrates periodic motion, and this oscillating vent-flow greatly alters the near wake flow features within a certain range of Reynolds number. Shedding vortex frequency of slotted cylinder has certain sensitivity with the angle of slit. The Strouhal number increases gradually with the increase of the angle, and the Strouhal number of slit ratio (slit/diameter) equals to 0.15 is more stable than that of slit ratio equals to 0.10.

**Keywords:** slotted circular cylinder; shedding vortex; particle image velocimetry (PIV); proper orthogonal decomposition (POD); Strouhal number

**Received:** 2016-01-18; **Accepted:** 2016-01-27; **Published online:** 2016-04-13 15:38

**URL:** [www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160413.1538.008.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160413.1538.008.html)

**Foundation items:** The General Program of National Natural Science Foundation of China (11072206); Science Foundation of the Fujian Province, China (2012J01023)

\* **Corresponding author.** E-mail: zhurui@xmu.edu.cn