

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.04.008

## 覆盖多孔介质的圆柱减阻特性和机理研究

杜海<sup>1,2</sup>, 张琴林<sup>2</sup>, 何玲艳<sup>2</sup>, 李奇轩<sup>2</sup>

(1. 西华大学航空航天学院, 成都 610039; 2. 西华大学能源与动力工程学院, 成都 610039)

**摘要:** 多孔材料由于其独特的孔隙结构, 可用于声学降噪以及流动控制领域。首先, 采用大涡模拟 (Large eddy simulation, LES) 方法, 开展了亚临界雷诺数条件下有、无覆盖多孔介质的圆柱绕流数值计算; 其次, 对比了两种不同工况的升、阻力系数大小, 分析多孔介质的减阻控制效果; 最后, 结合气动力以及流场结构变化, 揭示出多孔介质的减阻控制机理。研究表明: 雷诺数为  $5.6 \times 10^4$ , 圆柱表面后缘处铺设位置角为  $270^\circ$  的多孔介质时, 减阻效果可达到 8.53%。由于多孔介质表面具有渗透性, 一方面可提高多孔-流体交界面处的滑移速度, 稳定圆柱表面的分离剪切层, 降低涡脱落频率; 另一方面, 流体穿过多孔介质可产生类似微射流的作用效果, 增强分离区圆柱表面的压力, 降低圆柱上下游的压力差, 从而显著减小圆柱表面的总阻力。

**关键词:** 多孔介质; 减阻; 数值模拟; 涡脱频率; 微射流

中图分类号: O355

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)04-0611-12

## Drag Reduction Characteristics and Mechanism of Cylinder Covered with Porous Medium

DU Hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Qinlin<sup>2</sup>, HE Lingyan<sup>2</sup>, LI Qixuan<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Due to porous materials have unique pore structure, it can be used in the field of acoustic noise reduction and flow control. Firstly, the large eddy simulation (LES) method is used to simulate the flow around a circular cylinder with or without porous medium at subcritical Reynolds number. Secondly, the lift and drag coefficients under two different working conditions are compared, and the drag reduction control effect of porous medium is analyzed. Finally, the drag reduction control mechanism of porous medium is revealed by combining aerodynamic force and flow field structure changes. The results show that at the Reynolds number of  $5.6 \times 10^4$ , the maximum drag reduction rate is reached to 8.53% when the porous medium is laid at azimuth angle of  $270^\circ$  at the leeward side of the cylinder surface. On the one hand, due to the permeability of porous medium, it can improve the slip velocity at the interface between porous medium and fluid, stabilize the separated shear layer on the cylinder surface, and reduce the vortex frequency. On the other hand, the fluid can pass through porous medium, then produce the effect similar to micro-jet, which enhance the pressure on the cylinder surface in the separation zone, and significantly reduce the pressure difference between the upstream and downstream of the cylinder and the total drag on the cylinder surface.

**Key words:** porous medium; drag reduction; numerical simulation; vortex shedding frequency; micro-jet

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(51806181); 2020年中央引导地方科技发展专项资金(2020ZYD050); 航空发动机气动热力国防科技重点实验室开放基金(6142702190102)。

**收稿日期:** 2021-08-06; **修订日期:** 2021-12-07

**通信作者:** 杜海, 男, 副教授, E-mail: duhai2017@163.com。

**引用格式:** 杜海, 张琴林, 何玲艳, 等. 覆盖多孔介质的圆柱减阻特性和机理研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 611-622. DU Hai, ZHANG Qinlin, HE Lingyan, et al. Drag reduction characteristics and mechanism of cylinder covered with porous medium[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 611-622.

减阻控制是流体力学的研究热点,而钝体作为航空航天、流体机械及交通运输等诸多领域典型的绕流部件,都迫切需要研究有效的减阻控制方法来降低阻力<sup>[1]</sup>。通常将控制技术分为主动控制<sup>[2-4]</sup>和被动控制<sup>[5-8]</sup>两大类。主动控制技术一般需要外部提供动量或能量,而被动控制技术则不需要,且具有结构简单、高效以及易实施等特点,从而在各工程领域中得到广泛的应用。多孔介质内部具有众多细小的空隙结构,孔隙之间允许其他相通过。因其独特的内部结构,使得钝体上覆盖多孔介质<sup>[9-12]</sup>成为一种有效的被动控制方式,被广泛的应用于降噪<sup>[13]</sup>、减阻<sup>[14-15]</sup>以及减缓气动热<sup>[16]</sup>等流动控制中,近年来受到了国内外学者们的广泛关注。在多孔介质减阻控制研究方面,主要是围绕多孔介质的控制参数和控制机理两方面内容开展了大量研究工作。在控制参数方面:Liu等<sup>[17-19]</sup>对不同孔隙率、不同厚度的多孔介质进行数值模拟研究,研究发现:柱体平均阻力系数随着厚度比 $t/D$ 及孔隙率的增大而减小。Klausmann等<sup>[20]</sup>在 $3 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ 雷诺数范围内,对背风侧覆盖多孔介质的圆柱绕流进行风洞实验,经测试发现:在背风侧铺设多孔介质时,阻力系数可降低7.7%~13.2%,当多孔涂层角度 $\beta > 100^\circ$ 时,减阻效果较好。Aguiar等<sup>[21]</sup>对多孔介质不同铺设方位角进行研究,发现圆柱背风侧铺设方位角为 $270^\circ$ 时,减阻控制效果最佳。在流动控制机理方面,Bruneau等<sup>[22-24]</sup>将多孔介质应用于钝体进行流动控制。利用罚函数法,将包覆多孔介质的复杂结构简化为固体-多孔-流体模型。一系列的研究发现,多孔材料主要通过达西流动来降低阻力,从而将非滑移边界条件转换为准滑移傅里叶边界条件。Yu等<sup>[25]</sup>提出:由于多孔介质内部允许流体通过,使得多孔表面的法向速度分量是非零的,初步推测出多孔介质的渗透性特征将产生类似于带有底部射流的柱体流动。Naito等<sup>[26]</sup>实验研究了不同雷诺数下多孔材料对流动的影响,并试图通过多孔表面的滑移速度和多孔材料内部的能量耗散来解释流动减阻的控制机理。胡兴军等<sup>[27]</sup>对铺设有多孔介质材料的货车进行探究,发现多孔材料不但可以使货车阻力降低,而且还可改变其压力场以及应力分布。上述大多数研究描述了利用多孔介质实现控制减阻时的宏观流场变化,但从微流动的角度研究多孔表面渗透性引起的微射流与圆柱尾流结构之间的相互作用需进一步的探究。本文将采用三维大涡模拟方法,对亚临界雷诺数条件下圆柱开展多孔介质减阻控制研究,获得多孔介质的减阻特性,揭示多孔介质的减阻机理。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 几何模型及计算区域

#### (1) 几何模型

圆柱模型直径 $D=40\text{ mm}$ (图1),后缘铺设多孔介质方位角为 $270^\circ$ ,多孔介质的厚度为4 mm,多孔介质的物理参数在1.3节详细介绍。计算流域如图2所示,其直径为 $D$ ,展向长度为 $4D$ ,圆柱距离左右边界均为 $15D$ 。流场入口距离圆柱中心为 $12.5D$ ,出口距离圆柱中心为 $50D$ ,以保证流场充分发展。

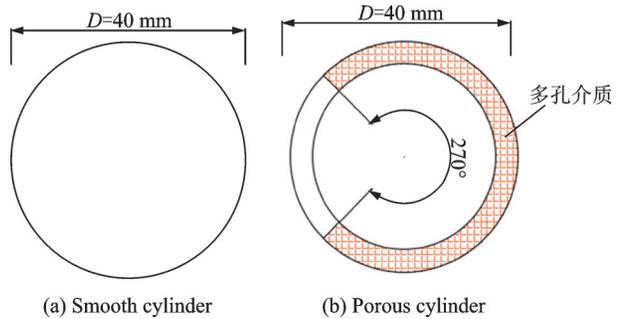


图1 圆柱模型

Fig.1 Cylinder model

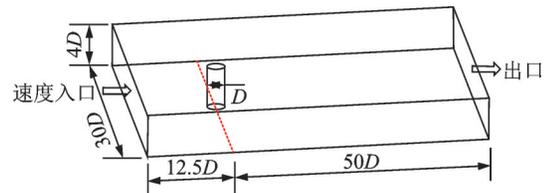


图2 几何模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of geometric model

#### (2) 计算域网格

对计算域进行结构化网格划分,光滑圆柱体网格总数为224万个,带多孔介质的圆柱网格总数为251万个。在圆柱体表面速度变化较大的区域,进行了加密处理(图3),网格质量以壁面 $Y^+$ ( $Y^+ = \frac{y}{\nu} \left( \frac{t_w}{\rho} \right)^{0.5}$ ,其中 $y$ 为第1层网格高度, $t_w$ 为壁面切应力, $\nu$ 为运动黏性系数, $\rho$ 为流体密度)来进行评估,本次模拟计算的壁面 $Y^+$ 均在1以内(图4),满足大涡模拟要求。

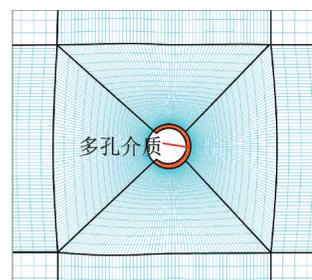


图3 计算域网格

Fig.3 Computing domain grid

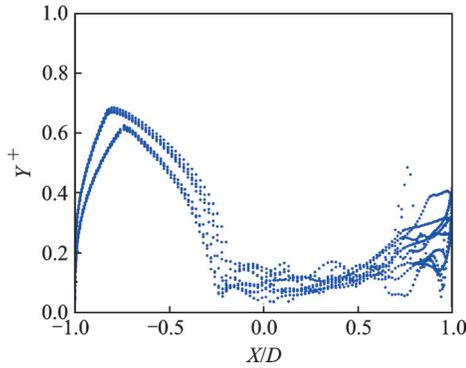


图4 壁面  $Y^+$  值分布

Fig.4 Distribution of  $Y^+$  value on wall

### 1.2 边界条件

将计算域的左边界设定为速度入口边界( $x$  方向速度  $u=U_0$ ,  $y$  方向速度  $v=0$ ,  $z$  方向速度  $w=0$ ), 计算域右边界设置为自由出流, 四周边界设定为对称边界条件, 圆柱表面定义为无滑移壁面条件。针对覆盖多孔介质的模型, 设置了多孔区域, 并将多孔介质表面定义为多孔跃阶边界条件。

### 1.3 控制方程

本文的数值模拟采用大涡模拟<sup>[28]</sup>进行计算, 其连续性和 N-S 方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:  $\bar{u}$  为流体速度平均值;  $\bar{p}$  为流体静压平均值;  $x_i, x_j$  为坐标 ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ , 分别对应  $x, y, z$  方向);  $u_i, u_j$  为  $x, y, z$  方向的流速分量;  $\nu$  为动力黏度系数;  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$  为亚格子应力。

对于多孔介质区域, 其动量方程具有附加的动量源项。其中源项由两部分组成: 一部分是黏性损失项(符合 Darcy 定理); 另一部分是内部损失项, 计算公式为

$$S_i = -\left( \frac{\mu}{K} \mathbf{u} + \frac{1.75}{\sqrt{150\epsilon^3 K}} \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u} \right) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为局部平均速度矢量(达西速度);  $K$  为多孔介质渗透率, 本文多孔材料渗透率为  $0.241 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ ;  $\epsilon$  为多孔介质孔隙率, 本文设定为常量 0.95, 是介质内空隙体积占介质总体积的比值。

## 2 数值模拟验证

为了与项目组前期开展的实验结果、以及国内外其他学者已发表的论文数据<sup>[29-32]</sup>进行对比验证,

本文选取雷诺数  $Re=0.56 \times 10^5, 1.4 \times 10^5$  进行数值模拟研究。首先在亚临界雷诺数下, 对三维光滑圆柱数值模拟结果进行了验证(表 1), 采用 3 套不同数量的网格, 分别为 60、146 和 224 万个。随着网格数的增加, 阻力系数及升力系数的均方根变化量逐渐变小。且在网格数量达到 224 万个时, 本次数值模拟结果与 Breuer 等<sup>[33]</sup>的计算结果基本一致。

表 1 不同网格参数下数值模拟计算结果

Table 1 Numerical simulation results under different grid parameters

Case	$Re/10^5$	Grid	$C_D$	$C'_L$	$St$
1	0.56	210×290×10	1.05	0.408 9	0.172
2	0.56	210×290×24	1.288	0.483 3	0.198
3	0.56	340×220×30	1.29	0.485 2	0.20
4	1.4	210×290×10	1.242	0.455 2	0.203
5	1.4	210×290×24	1.239	0.425 3	0.188
6	1.4	340×220×30	1.236	0.421 1	0.187
Breuer (大涡 模拟) <sup>[33]</sup>	1.4	165×165×64	1.22		0.217
Cantwell (实验 结果) <sup>[29]</sup>	1.4		1.24		0.187

在  $Re=1.4 \times 10^5$  时, 将本文数值模拟对应的圆柱绕流压强系数分布与已发表论文结果<sup>[21-24]</sup>进行对比验证, 如图 5 所示, 其吻合度较好。其中, 用来研究圆柱绕流的主要参数包括压力系数  $C_p$ 、阻力系数  $C_D$ 、升力系数  $C_L$ 、升力系数均方根值  $C'_L$  和斯特劳哈尔数  $St$ , 它们的定义为

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A U_0^2} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A U_0^2} \quad (6)$$

$$C'_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N C_{L_i}^2}{N}} = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_1^2 + \dots + C_{1N}^2}{N}} \quad (7)$$

$$St = \frac{fD}{U_0} = \frac{D}{TU_0} \quad (8)$$

式中:  $P$  为当地静压,  $P_0$  为入口来流静压,  $U_0$  为无穷远处来流速度;  $F_D$  和  $F_L$  分别为阻力和升力;  $A$  为圆柱的特征面积  $A=D \times L$ ,  $L$  为圆柱的展向长度;  $C_{L_i}$  为瞬时升力系数,  $N$  为采样频率;  $f$  为旋涡脱落的频率,  $T$  为旋涡脱落的周期。

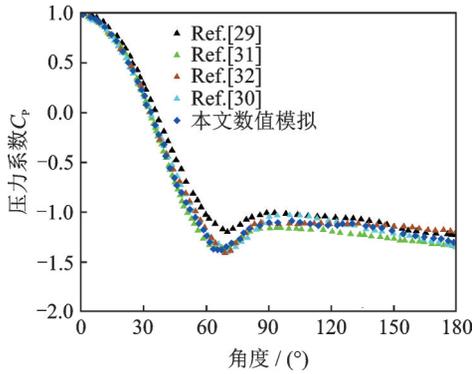


图5 圆柱表面压力系数分布 ( $Re=1.4 \times 10^5$ )

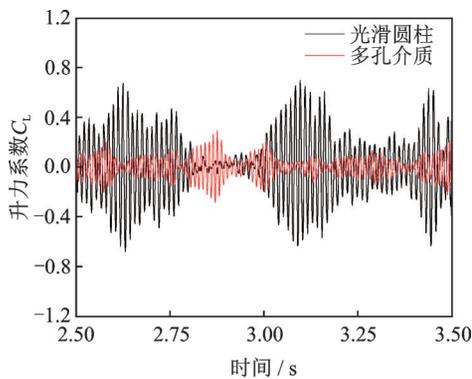
Fig.5 Pressure coefficient distribution on the cylinder surface at  $Re = 1.4 \times 10^5$

### 3 多孔介质减阻特性

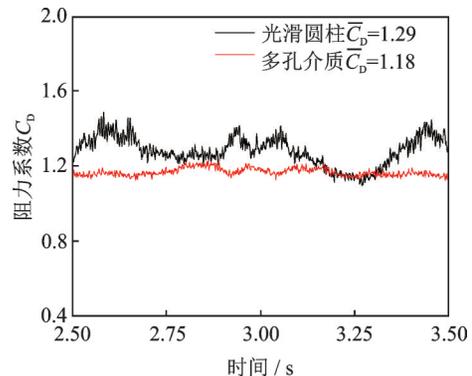
#### 3.1 升力、阻力控制特性

在  $Re = 5.6 \times 10^4$  的条件下,对有无多孔介质圆柱绕流的结果进行分析,得到升力、阻力系数的变化规律如图6所示,图中  $\bar{C}_D$  为平均阻力系数。从曲线可知,圆柱后缘覆盖多孔介质后,气动力系数最大幅值和脉动量均明显减小。此外从减阻控制效果来看,光滑圆柱平均阻力系数为1.29,而后缘覆盖有多孔介质的圆柱平均阻力系数减小为1.18(图6(b)),减阻率达8.53%。

由于圆柱非定常的气动力主要是由尾迹脱落涡引起,所以圆柱气动力的频率反映了脱落涡的频



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient

图6 升阻力系数对比图

Fig.6 Comparison of lift and drag coefficients

率。观察图7中的数据可知,光滑圆柱绕流的涡脱频率  $f=99.91$  Hz,对应的  $St=0.20$ (项目组实验结果  $f=99.82$  Hz,  $St=0.199$ );  $270^\circ$ 后缘铺设多孔介质圆柱绕流的脱落涡频率  $f=81.19$  Hz,  $St=0.162$ (项目组实验结果  $f=78.21$  Hz,  $St=0.156$ )。通过对比分析,可知在后缘覆盖多孔介质不仅可以实现减阻,而且可使圆柱绕流尾涡脱落频率和振幅减小。

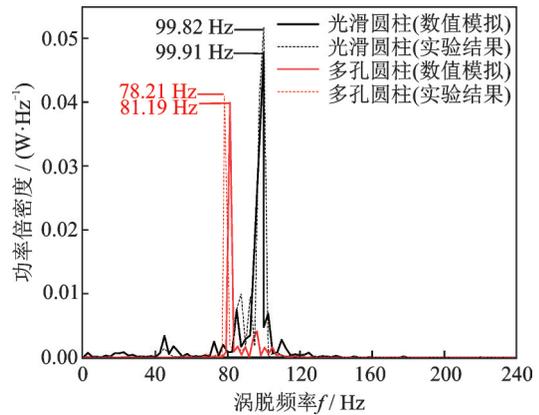


图7 光滑圆柱和多孔介质圆柱的升力系数功率谱密度 ( $Re=5.6 \times 10^4$ )

Fig.7 Power spectral density of lift coefficient of smooth cylinder and porous cylinder at  $Re = 5.6 \times 10^4$

#### 3.2 多孔介质减阻类别

通常来说,绕圆柱的阻力主要由摩擦阻力和压差阻力构成,在上文中已经得到,在圆柱体后缘处覆盖多孔介质可以达到减阻的目的,接下来对总阻力进行分解,来探究多孔介质减阻的具体类别。

##### 3.2.1 总阻力分解

图8为光滑及覆盖有多孔介质圆柱的各阻力系数分量对比图,从图中可以看出,相对光滑圆柱体而言,覆盖多孔介质后,总阻力及压差阻力均减小(总阻力减小8.53%,压差阻力减小11.64%),但摩擦阻力增大(摩擦阻力增大1倍)。注意到在亚临界雷诺数下,圆柱绕流摩擦阻力对总阻力的贡献非常小(摩擦阻力占总阻力的

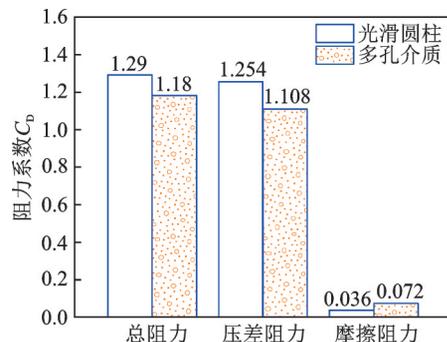


图8 各阻力分量对比图

Fig.8 Comparison of drag components

2.79%), 其主要是由圆柱上下游压力差所产生的阻力(即压差阻力)。可见在本文的研究条件下,覆盖多孔介质的圆柱减阻归结于对压差阻力的有效控制。

### 3.2.2 压力系数分布

在  $Re=5.6 \times 10^4$  时,光滑圆柱与多孔介质圆柱表面的压力系数  $C_p$  曲线如图 9 所示(角度  $\theta$  为圆上监测点与来流方向的夹角)。由图 9 可以得到,圆柱体后缘覆盖多孔介质后,背风面负压绝对值明显减小。而根据单位长度圆柱所受压差阻力的表达式为

$$F_{\text{pressure}} = \frac{D}{2} \int_0^{\pi} (P - P_0) \cos \theta d\theta \quad (9)$$

当负压区压力绝对值减小时,使得圆柱上下游压力差减小,将导致圆柱整体的压差阻力的减小,整体上实现了圆柱的减阻。

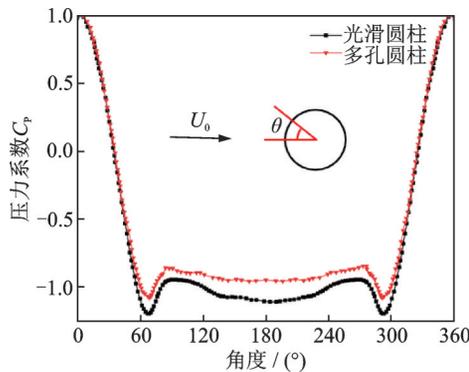


图 9 压强分布图

Fig.9 Graph of pressure distribution

## 4 多孔介质减阻机理

为了研究多孔介质实现减阻的内在机理,从时间平均的湍流强度、速度场、多孔介质微射流和圆柱绕流相互作用现象以及瞬态流场的角度进行研究。

### 4.1 湍流强度分析

湍流强度  $I$  反应了脉动速度的相对强度,其计算公式为

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}} \quad (10)$$

式中:  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的脉动速度;  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度。

图 10(a) 给出了光滑圆柱的时间平均的湍流强度,图 10(b) 给出了覆盖多孔介质圆柱的时间平均湍流强度。可见在相同雷诺数下,覆盖多孔介质后,尾迹湍流耗散加快、湍流强度减弱。

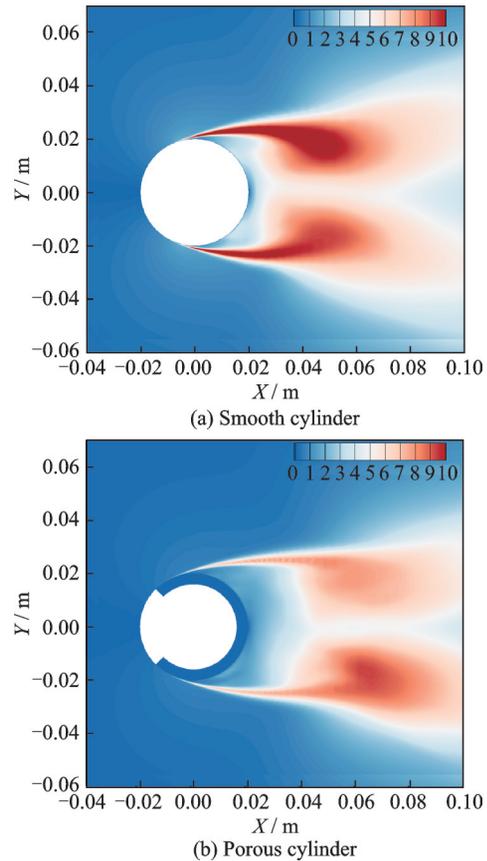


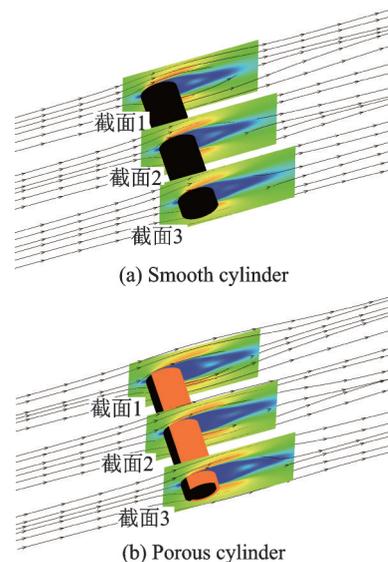
图 10 湍流强度图

Fig.10 Turbulence intensity

### 4.2 时均流线图分析

图 11 为光滑圆柱及多孔介质圆柱的时均流场图。可以发现,时间平均下,光滑圆柱尾迹中有两个接近对称的大尺度旋涡,而在近壁区,形成了明显的二次涡结构。覆盖多孔介质后,同样也存在两个大尺度旋涡和二次旋涡,但尾迹区速度场被拓宽、拉长,圆柱尾流中的脱落涡位置更靠下游。

图 12 为光滑圆柱及多孔圆柱的速度矢量图。由光滑圆柱近壁速度矢量图(图 12(a))可知,在主



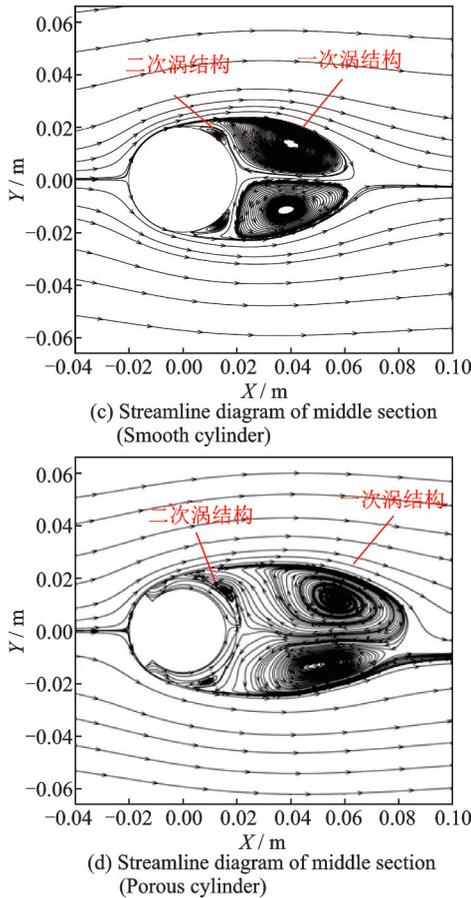


图11 时均流场图

Fig.11 Diagram of time averaged flow field

旋涡和二次旋涡的作用下,光滑圆柱尾迹存在两条分离线(主分离线和次分离线)。主分离线将外流和圆柱尾迹流动区分开来,形成了圆柱的分离剪切层;次分离线将二次旋涡和近壁流动区分开来,形成了主旋涡和二次旋涡的交界面。覆盖多孔介质后(图12(b)),同样也存在两条分离线,但覆盖多孔介质后,流体可穿过多孔介质,且流动方向与来流方向相同,即在多孔介质与气流的交界面处存在速度的滑移,使壁面速度梯度发生改变。

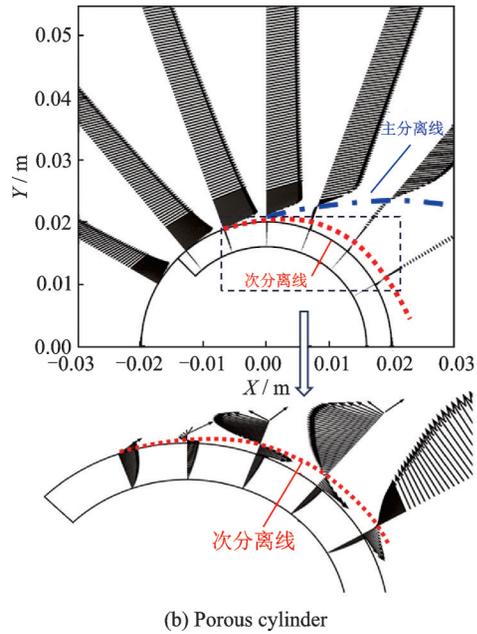
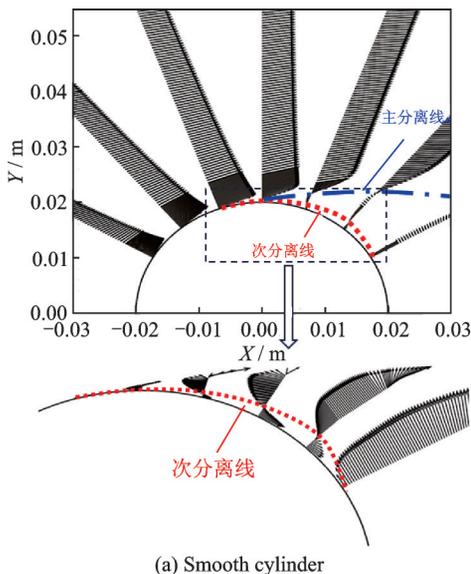


图12 速度矢量图

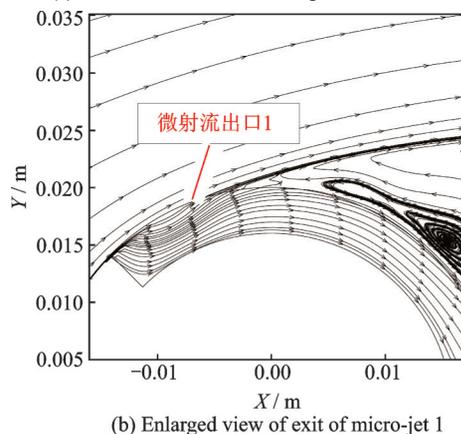
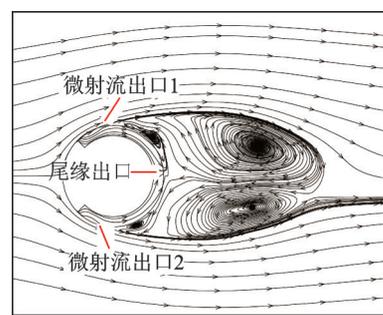
Fig.12 Vector diagram of velocity

### 4.3 多孔介质产生的微射流和圆柱绕流相互作用现象

#### 4.3.1 微射流速度场

从上一节时间平均的速度场可以看出有气流穿透多孔介质,本节将对多孔介质喷出的微射流如何影响圆柱绕流尾迹这一问题进行研究。图13给出了多孔介质近壁面流场图,可以看出,从多孔介质内部喷出的射流可分成两部分,分别是微射流1,2和尾缘出口射流。

可见微射流一部分作用于圆柱的分离点附近



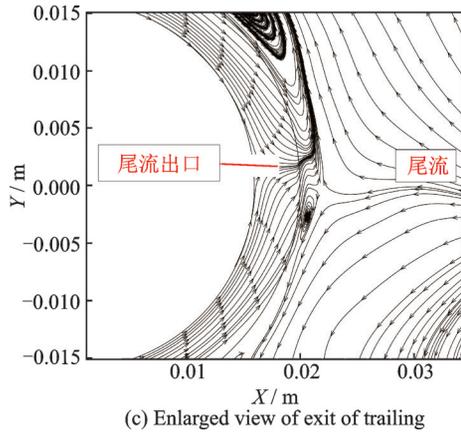


图 13 多孔介质近壁面流场图

Fig.13 Near wall streamline diagram of porous cylinder

(图中标注微射流出口 1、2),与分离剪切层相互作用(局部放大见图 13(b)),使自由剪切层更加稳定,同时湍流强度减弱;此外,圆柱的后缘附近也会产生微射流(局部放大见图 13(c)),微射流与尾迹中的分离流相互作用,影响了尾迹旋涡的强度以及位置,同时改善了圆柱上下游的压力差。

#### 4.3.2 体积力分析

多孔介质在下游会产生微射流,其物理作用可归结于“动量效应”,而体积力是表征动量效应的一个重要参数。因此,通过对体积力进行分析,来探究其动力学行为。

本文数值模拟计算为三维结构,因此选取三维 N-S 方程求解体积力分布,有

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U - \nu \nabla^2 U = -\nabla p + \frac{F}{\rho} \quad (11)$$

式中:  $U$  为流场速度矢量;  $p$  为空气压力;  $F$  为体积力;  $t$  为时间;  $\nabla U$  为速度矢量的梯度。

对时均流场的 N-S 方程进行分解,得到微分形式的计算空间体积力分布,有

$$f_x = \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho \frac{\partial p}{\partial x} \quad (12)$$

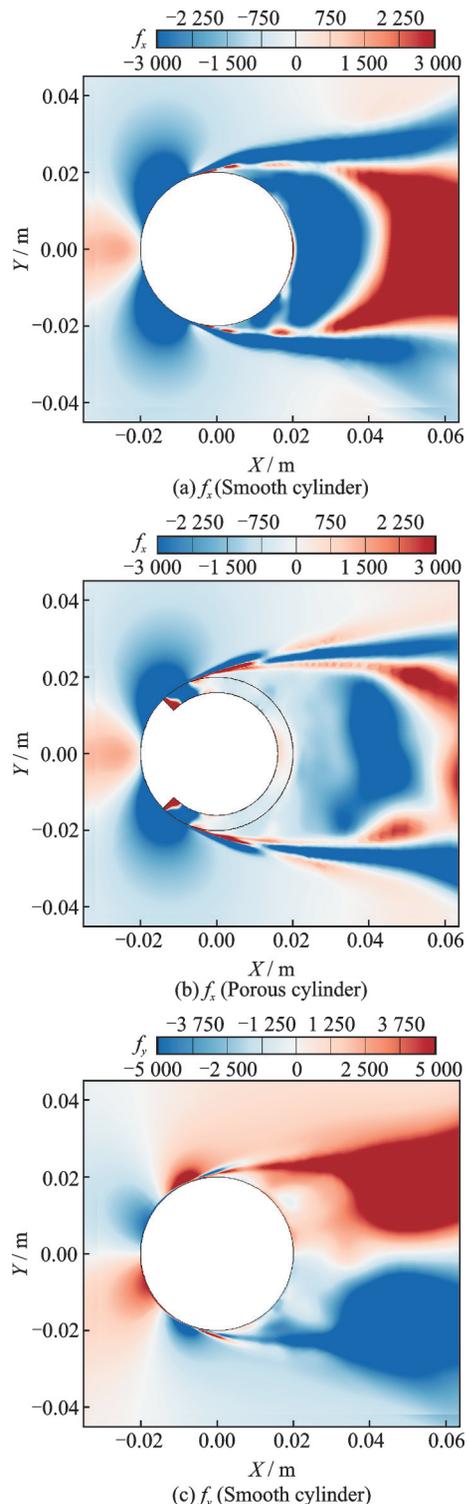
$$f_y = \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho \frac{\partial p}{\partial y} \quad (13)$$

$$f_z = \rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho \frac{\partial p}{\partial z} \quad (14)$$

式中  $f_x, f_y, f_z$  分别为  $x, y, z$  方向的体积力分布。

图 14(a)、(c)、(e) 分别为光滑圆柱  $x, y, z$  方向

体积力分布图;图 14(b)、(d)、(f) 分别为多孔介质圆柱体  $x, y, z$  方向体积力分布图。分析发现:一方面,圆柱后缘位置铺设多孔介质后,流体可以穿过多孔介质,流动方向与来流方向相同,产生正向的推动力(类似于微射流的作用效果),从而使背风面负向体积力明显减弱,表现为压差阻力减小;另一方面,流体可以穿过多孔介质,在  $y$  方向上主要作用于圆柱上下游两侧,  $y$  正方向产生正向体积力,  $y$  负方向产生负向体积力,使得尾迹区旋涡被拓宽、拉长。



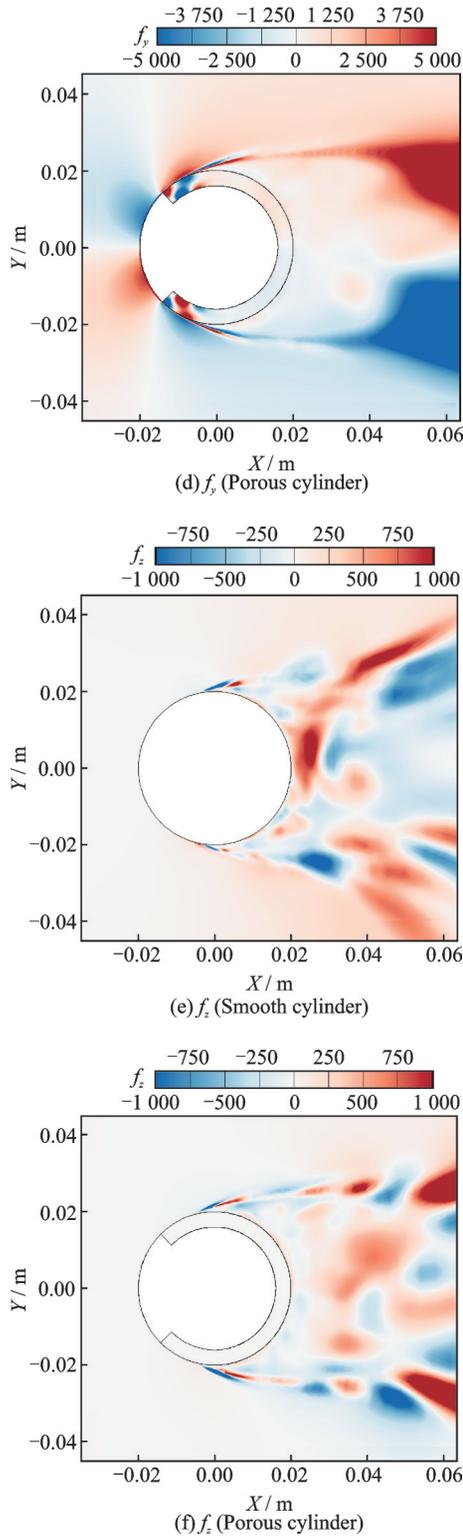


图14 各方向体积力分析

Fig.14 Analysis of volume force in three directions of smooth and porous cylinders

#### 4.4 瞬态流场分析

4.2节和4.3节分析了时间平均的多孔介质减阻机理,本节将从非定常的角度分析多孔介质在圆柱上的减阻机理。

##### 4.4.1 瞬态涡量场

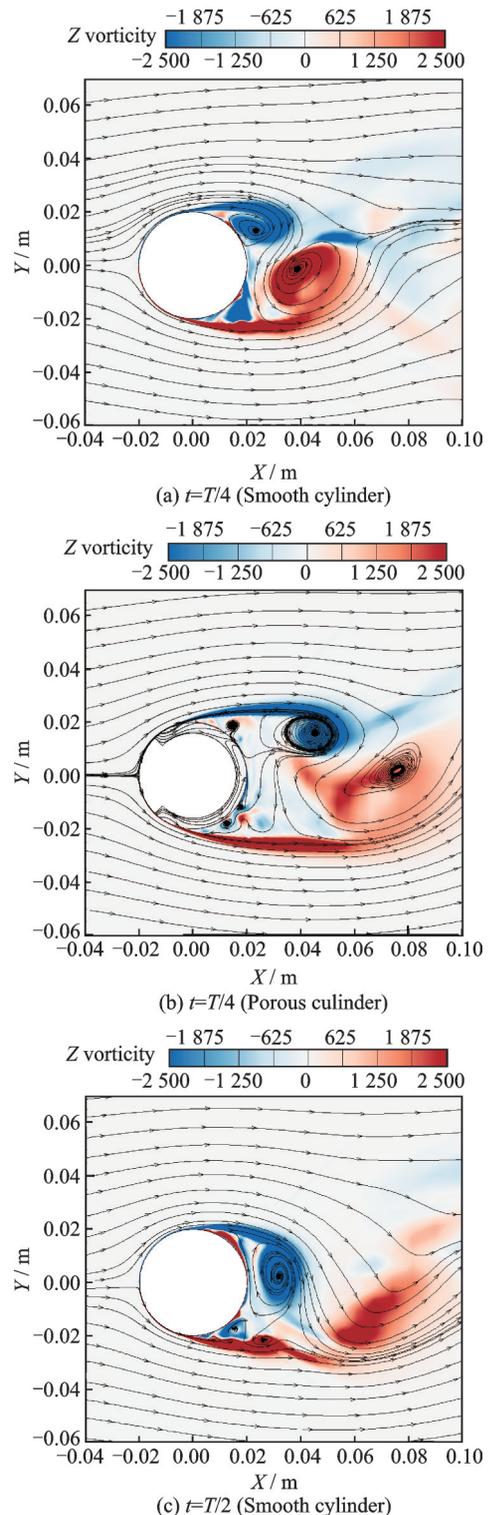
涡量  $\mathbf{W}$  可表示为流体速度矢量的旋度,其计算公式为

$$\mathbf{W} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (15)$$

式中  $\mathbf{W}$  表示空间向量的一组基底。其中,涡量

$$\omega_z = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)。$$

光滑圆柱与多孔介质圆柱体的中截面尾流区漩涡在1个周期内涡量变化分别如图15(a,c,e,g)及图15(b,d,f,h)所示。从图中可以看出,后缘铺设多孔介质后,旋涡变得更加细长且靠近圆柱体尾



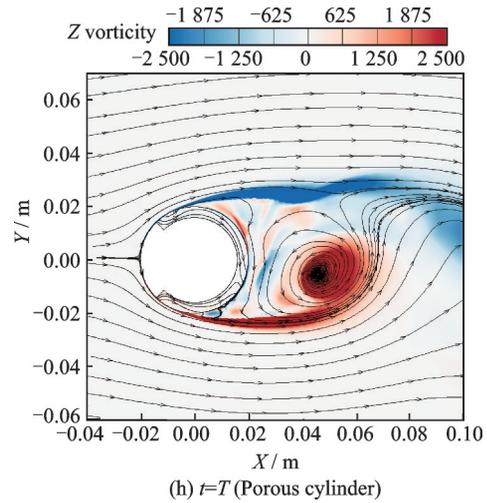
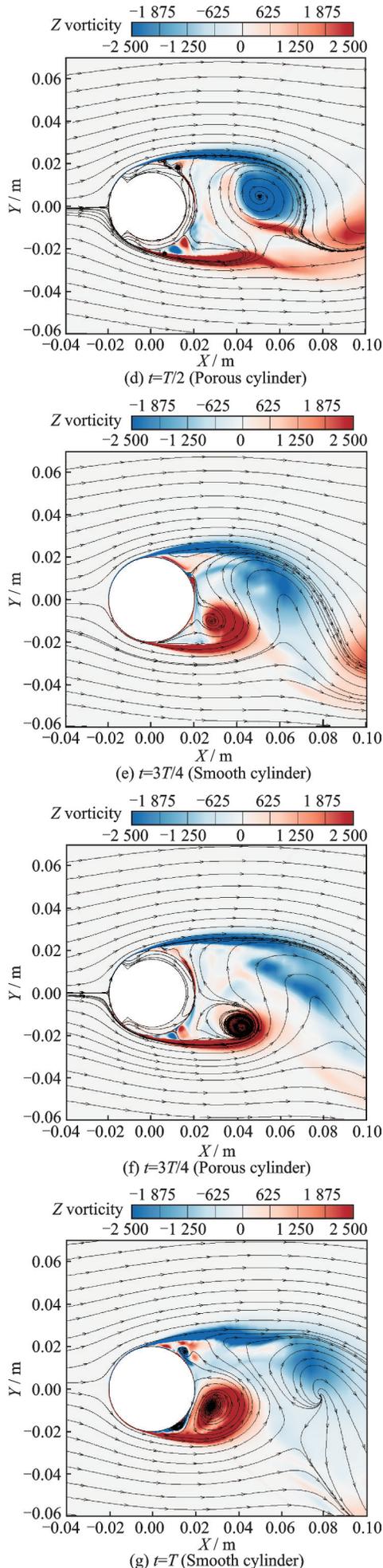


图 15 周期内瞬态涡量场

Fig.15 Variation of transient vorticity field in a period

缘处的旋涡更加离散化。利用尾迹区对应时刻流线图来分析多孔介质改变涡量场结构的内在机理为:圆柱尾迹处穿过多孔介质内部的大部分流体从出口(如上述的尾缘出口)排出,产生类似微射流效果,且当上游涡形成、下游涡脱落过程中,穿过多孔介质内部流体的喷口位置往上移动,使靠近壁面的涡结构被破碎,同时将上游涡往后推动,反之同理。

#### 4.4.2 瞬态速度场分析

在圆柱中截面流场中选取 3 个检测点(即  $P_1$  ( $x/D=0, y/D=0.75$ )、 $P_2$  ( $x/D=0.75, y/D=1.25$ )、 $P_3$  ( $x/D=2, y/D=1.25$ )),位置如图 16 所示),分析其对应速度  $u$ ( $x$ 方向速度)、 $v$ ( $y$ 方向速度)的变化曲线,来对比分析圆柱上加多孔介质后,尾迹非定常的速度变化规律。

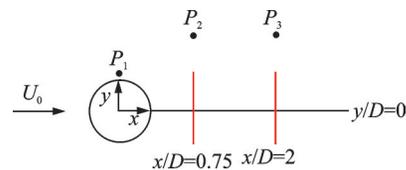


图 16 监测点位置示意图

Fig.16 Schematic diagram of monitoring points

图 17 给出了光滑圆柱及多孔介质圆柱  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  点的速度曲线。从图 17 可以看出,圆柱尾迹中不同位置处,扰动速度的波动幅值不一样。 $P_1$  点在分离点附近,速度波动较小,速度  $u$  波动范围为 23~29 m/s,速度  $v$  波动范围为 2~7 m/s; $P_2$  点在剪切层上,速度波动比  $P_1$  点大,速度  $u$  波动幅值为 19.5~25 m/s,速度  $v$  波动幅值为 -3~3.5 m/s;而  $P_3$  点在远场尾迹中,速度波动幅值更大,速度  $u$  波动幅值为 6~26 m/s,速度  $v$  波动幅值为 -5~12.5 m/s。

而在圆柱覆盖多孔介质后,所有监测点的速度波动均变小,  $P_1$  点处,速度  $u$  波动范围为 24~27.5 m/s,速度  $v$  波动范围为 3~6 m/s;  $P_2$  点上,速度  $u$  波动幅值为 21~24.5 m/s,速度  $v$  波动幅值为

-2~2.5 m/s;  $P_3$ 点上,速度  $u$  波动幅值为 14~26 m/s,速度  $v$  波动幅值为 -5~7.5 m/s,这说明加多

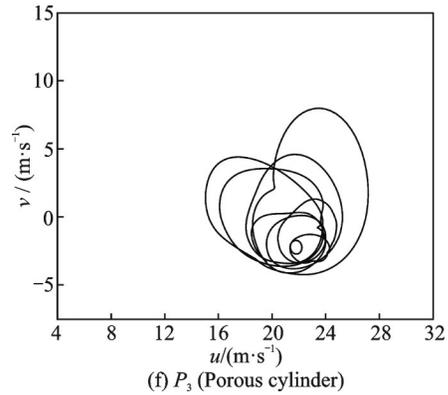
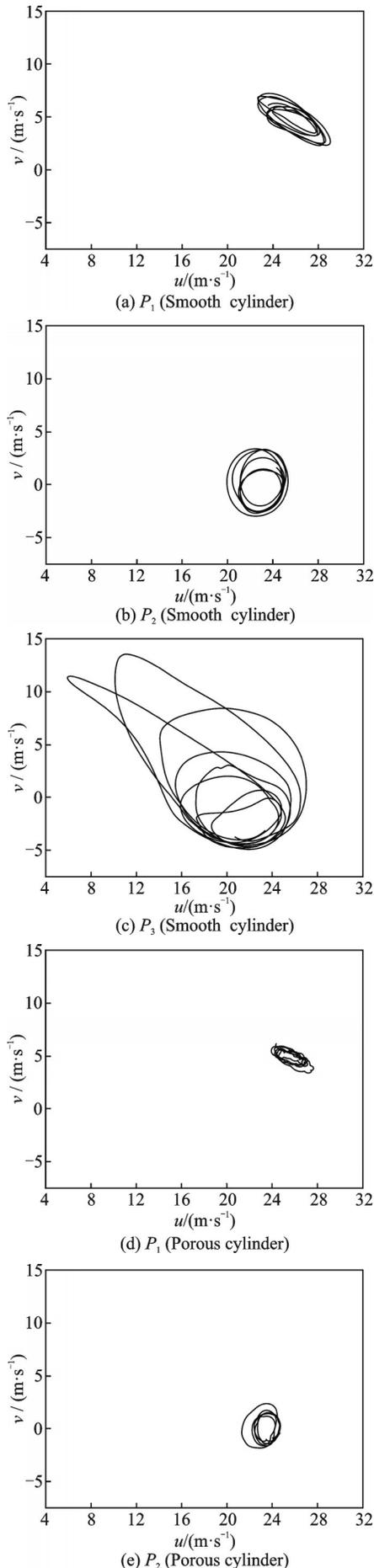


图17 光滑圆柱与多孔介质圆柱  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 点的  $u$ 、 $v$  速度对比曲线

Fig.17  $u$  and  $v$  velocity comparison curves of  $P_1$ ,  $P_2$  and  $P_3$  points of smooth and porous cylinders

孔介质后,剪切层和尾迹流动变得稳定。

## 5 结 论

本文在亚临界雷诺数下(雷诺数为  $5.6 \times 10^4$ ),开展了多孔介质对圆柱体减阻控制的研究。从气动力、压力系数分布及尾迹速度场、涡量场和体积力等角度出发,研究了多孔介质对圆柱尾迹流场的控制机理,获得的主要结论如下:

(1)圆柱后缘覆盖多孔介质后,气动力系数幅值和脉动量均明显减小,最大减阻率可达 8.53%。同时多孔介质使圆柱绕流尾涡脱落频率和振幅减小。在本文的研究条件下,覆盖多孔介质的圆柱减阻归结于对压差阻力的有效控制。

(2)时间平均及瞬态流场结果可知,覆盖多孔介质后,圆柱绕流旋涡结构变得细长且旋涡中心更加远离壁面、湍流强度减弱,旋涡结构更加稳定,从而实现阻力减小、尾涡脱落频率降低。

(3)多孔介质与气流的交界面会形成了速度滑移,有气流穿透多孔介质,形成了两类微射流。微射流一部分作用于圆柱的分离点附近,与分离剪切层相互作用,使剪切层更加稳定,从而影响尾迹结构;另一处微射流作用于圆柱的后缘附近,产生正体积力,使得微射流与尾迹中的分离流相互作用,影响了尾迹旋涡的强度及位置。

(4)从瞬态速度场角度来看,圆柱铺设多孔介质后,圆柱尾迹中不同位置处扰动速度的波动幅值明显降低。

### 参考文献:

- [1] CHAN A S, DEWEY P A, JAMESO A, et al. Vortex suppression and drag reduction in the wake of counter-rotating cylinders[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 679: 343-382.

- [2] DU H, SHI Z, CHENG K, et al. Topological structures of vortex flow on a flying wing aircraft controlled by a nanosecond pulse discharge plasma actuator[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 246.
- [3] BHATTACHARYA S, GREGORY J W. Investigation of the cylinder wake under spanwise periodic forcing with a segmented plasma actuator[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(1): 14102.
- [4] 王帅杰, 崔晓通, 白建侠, 等. 减阻工况下壁面周期扰动对湍流边界层多尺度的影响[J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 767-774.  
WANG Shuaijie, CUI Xiaotong, BAI Jianxia, et al. Effect of periodic wall disturbance on multi-scale turbulent boundary layer under drag reduction condition[J]. *Acta mechanica Sinica*, 2019, 51(3): 767-774.
- [5] WATANABE K, UDAGAWA H. Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall[J]. *Aiche Journal*, 2001, 47(2): 225-238.
- [6] 芮桃明, 孙磊. 不同深度V沟槽结构的圆柱绕流减阻机理[J]. *船舶工程*, 2021, 43(4): 128-135.  
RUI Taoming, SUN Lei. Drag reduction mechanism of V-groove structure with different depth[J]. *Marine Engineering*, 2021, 43(4): 128-135.
- [7] GOWREE E R, JAGADEESH C, ATKIN C J. Skin friction drag reduction over staggered three dimensional cavities[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 520-529.
- [8] 冯家兴, 胡海豹, 卢丙举, 等. 超疏水沟槽表面通气减阻实验研究[J]. *力学学报*, 2020, 52(1): 24-30.  
FENG Jiaxing, HU Haibao, LU Bingju, et al. Experimental study on drag reduction of superhydrophobic grooved surfaces[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 52(1): 24-30.
- [9] HU Z, LIU H. Vortex shedding noise and flow mode analysis of cylinder with full/partial porous coating[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 106(1): 106154.
- [10] 魏峥, 夏超, 袁海东, 等. 覆盖多孔介质的圆柱尾迹实验研究[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(2): 265-270, 89.  
WEI Zheng, XIA Chao, YUAN Haidong, et al. Experimental study on cylindrical wake covered with porous media[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(2): 265-270, 89.
- [11] XUC, MAO Y, HU Z. Control of cylinder wake flow and noise through a downstream porous treatment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 88(2): 33-43.
- [12] RUCK B, KLAUSMANN K, WACKER T. The flow around circular cylinders partially coated with porous media [C]//*Proceedings of Porous Media and Its Applications in Science, Engineering, and Industry: Fourth International Conference*. [S.l.]: AIP Publishing, 2012, 1453(1): 49-54.
- [13] GEYER T F. Vortex shedding noise from finite, wall-mounted, circular cylinders modified with porous material[J]. *AIAA Journal*, 2020(1): 1-15.
- [14] 苗月兴. 基于多孔介质的厢式载货汽车气动减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
MIAO Yuexing. Research on aerodynamic drag reduction of van based on porous media[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [15] 袁志群, 谷正气. 基于多孔介质材料和仿生设计的汽车阻流板减阻机理[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(7): 777-785.  
YUAN Zhiqun, GU Zhengqi. Drag reduction mechanism of automobile baffle based on porous media materials and bionic design[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(7): 777-785.
- [16] 陆家希, 曹丹, 阚安康, 等. 纤维多孔介质介观尺度结构对其真空绝热性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(1): 158-166.  
LU Jiayi, CAO Dan, KAN Ankang, et al. Effect of mesoscale structure of fiber porous media on its vacuum insulation performance[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(1): 158-166.
- [17] LIU H, WEI J, QU Z. Prediction of aerodynamic noise reduction by using open-cell metal foam[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(7): 1483-1497.
- [18] LIU H, WEI J, QU Z. The interaction of porous material coating with the near wake of bluff body[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2013, 136(2): 21302-21309.
- [19] ZHANG P, YU L. Numerical study on reducing aerodynamic drag and noise of circular cylinders with non-uniform porous coatings[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 107(1): 1-14.
- [20] KLAUSMANN K, RUCK B. Drag reduction of circular cylinders by porous coating on the leeward side[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 813(3): 382-411.
- [21] AGUIAR J, BIRCH D M, PELACCI M. Wake vortex mechanisms behind semi-porous cylinders [C]//*Proceedings of Applied Aerodynamics Conference*. [S.l.]: AIAA, 2018: 25-29.
- [22] BRUNEAU C H, MORTAZAVI I. Numerical modelling and passive flow control using porous media[J]. *Computers & Fluids*, 2008, 37(5): 488-498.
- [23] BRUNEAU C H, CREUSÉ E, DEPEYRAS D, et al. Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body[J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(10): 1875-1892.
- [24] BRUNEAU C H, CREUSÉ E, DEPEYRAS D, et

- al. Active and passive flow control around simplified ground vehicles[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2012, 5(1): 111-119.
- [25] YU P, ZENG Y, LEE T S. Wake structure for flow past and through a porous square cylinder[J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2010, 31(2): 141-153.
- [26] NAITO H, FUKAGATA K. Numerical simulation of flow around a circular cylinder having porous surface [J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(11): 113.
- [27] 胡兴军, 郭鹏, 惠政, 等. 多孔介质对厢式货车气动特性的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(2): 345-350.
- HU Xingjun, GUO Peng, HUI Zheng, et al. Effect of porous media on aerodynamic characteristics of van [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2019, 49(2): 345-350.
- [28] JIMÉ J, MOSER R D. Large-eddy simulations: Where are we and what can we expect? [J]. *AIAA Journal*, 2015, 38(4): 605-612.
- [29] CANTWELL B, COLES D. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder[J]. *Physics of Fluids*, 1983, 136(8): 321-374.
- [30] WU G F, DU X Q, WANG Y L. LES of flow around two staggered circular cylinders at a high subcritical Reynolds number of  $1.4 \times 10^5$  [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 196: 104044.
- [31] NISHIMURA H, TANIKE Y. Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(7/8): 713-723.
- [32] ACHENBACH E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re=5 \times 10^6$  [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 34(4): 625-639.
- [33] 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: 648-654.

(编辑:刘彦东)