

## 横向磁场作用下近壁面圆柱绕流问题特性分析

袁如意, 倪明玖, 张年梅\*

中国科学院大学工程科学学院

邮箱 nmzhang@ucas.ac.cn

## 介绍

近壁圆柱扰流问题广泛应用于港口工程、海洋工程, 其对壁面传热效率的影响也可应用于强磁场下核聚变反应堆包层部件的设计中。本文采用CFD开源软件openfoam模拟分析了磁场强度和间隙比对圆柱绕流脱涡模式影响的物理机制, 获得了横向磁场强度、间隙与圆柱受力的关系。研究表明: 壁面对圆柱脱涡仅有抑制作用, 磁场强度对流动脱涡呈现先促进后抑制的作用。

## 研究方法

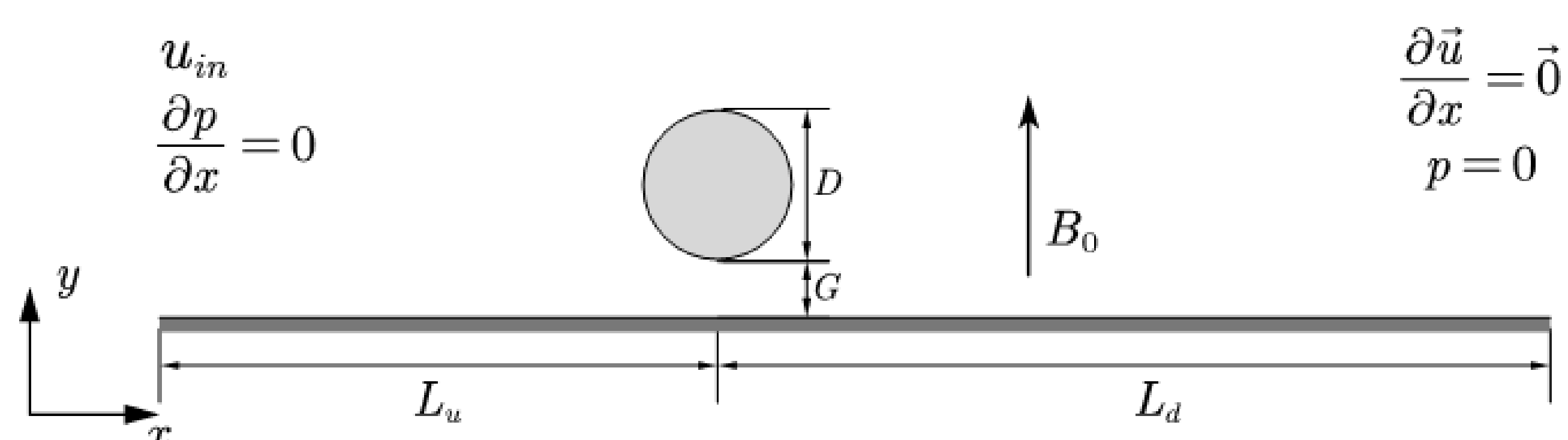


图1 几何模型及边界条件示意图

采用openfoam进行数值模拟来分析横向磁场作用下壁面附近圆柱绕流问题。几何模型如图1所示, 入口, 出口距圆柱中心分别为15D, 25D, 流体域上部采用滑移边界条件, 并距壁面15D以消除对圆柱附近流场的影响, 入口为均匀来流, 磁场垂直于圆柱轴线及流向, 此工况下流体方程可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

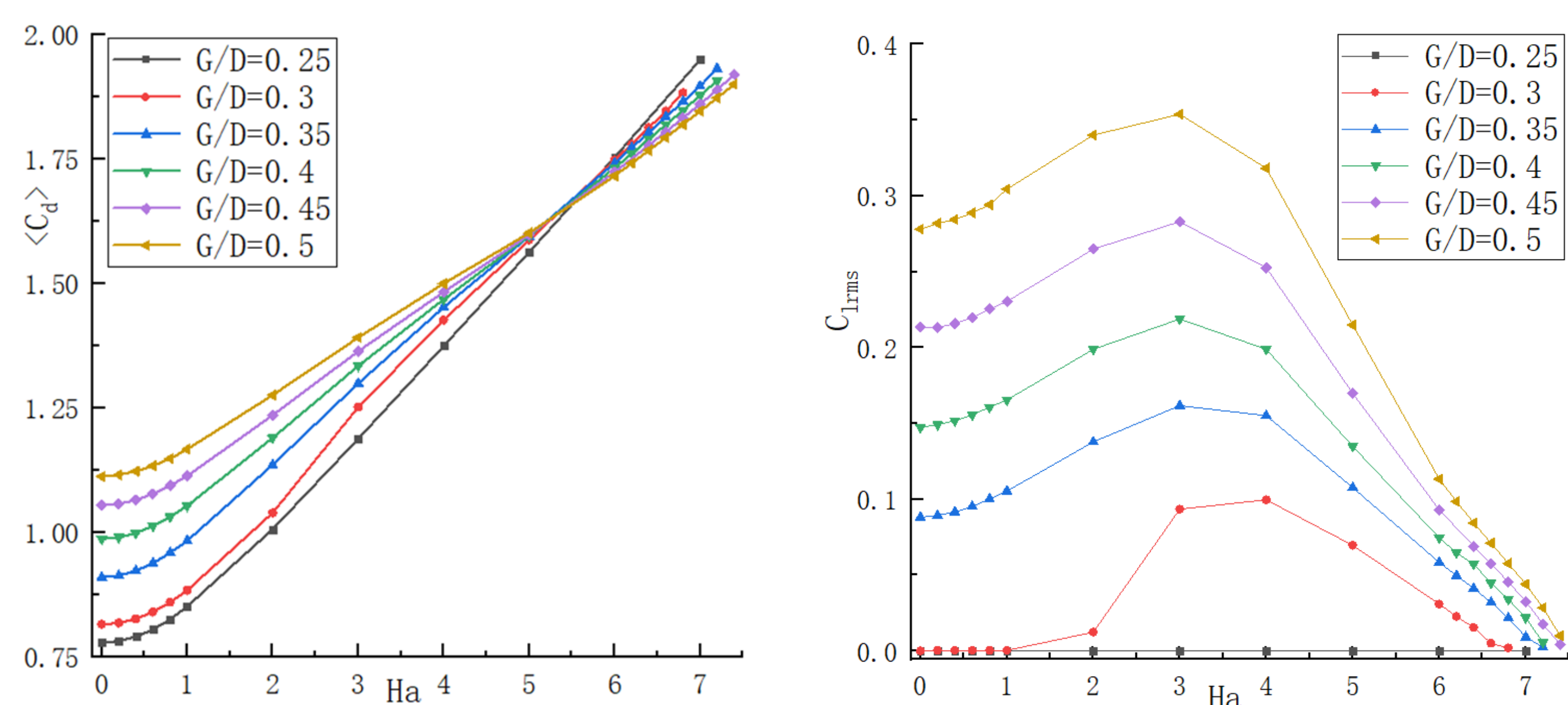
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_{\text{lorenz}}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

其中  $F_{\text{lorenz}} = -\frac{\sigma B_0^2}{\rho} u$ 。

当前工况无量纲参数:  $\text{Re} = \frac{U_{in} D}{\nu} = 300$ ,  $\text{Ha} = D U_{in} \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} = 0 \sim 7.5$ ,

$\frac{G}{D} = 0.25 \sim 0.5$

图6 不同磁场强度和G/D下, 阻力系数平均值( $\langle C_d \rangle$ )和升力系数脉动均方根 $C_{lrms}$ 

## 结果和讨论

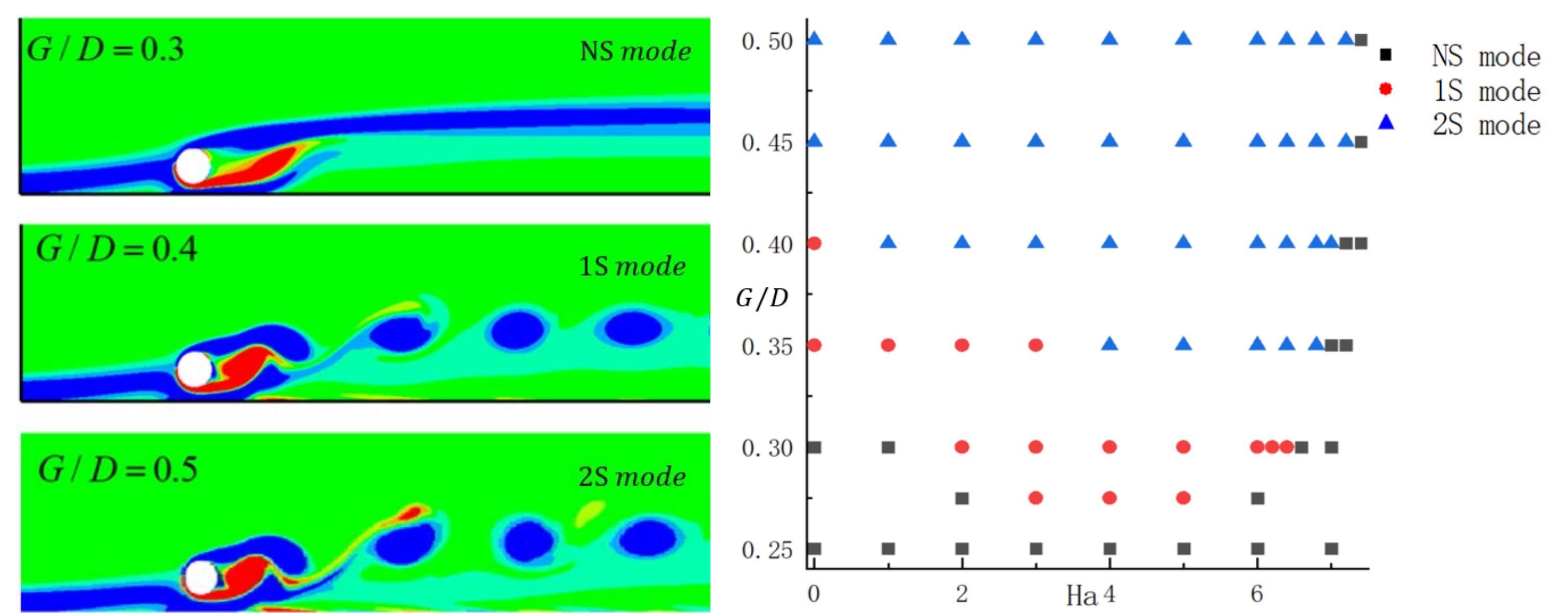


图3 Ha=0时, 不同脱涡模式下涡量云图

图4 不同Ha和G/D下流动脱涡模式相图

如图3所示, 在壁面和横向磁场作用下, 流动出现了三种不同脱涡模式: 无脱涡模式 (NS mode), 单侧脱涡模式 (1S mode), 双侧脱涡模式 (2S mode)。从图4中可以看出, 随着G/D增大, 流动模式从NS  $\rightarrow$  1S  $\rightarrow$  2S, 磁场强度较大时 ( $\text{Ha} > 6.5$ ), 流动模式从NS  $\rightarrow$  2S, 壁面对流动脱涡呈现抑制作用; 随着磁场强度增大,  $G/D=0.275, 0.3$ 时, 流动模式从NS  $\rightarrow$  1S  $\rightarrow$  NS,  $G/D=0.35, 0.4$ 时, 流动模式从1S  $\rightarrow$  2S  $\rightarrow$  NS,  $G/D > 0.4$ 时, 流动模式从2S  $\rightarrow$  NS, 磁场强度对流动脱涡呈现先促进后抑制的作用。这是由于磁场的增强, 一方面导致圆柱附近流速增加 (如图5), 促进圆柱脱涡, 另一方面洛伦兹力增加, 抑制流动脱涡。

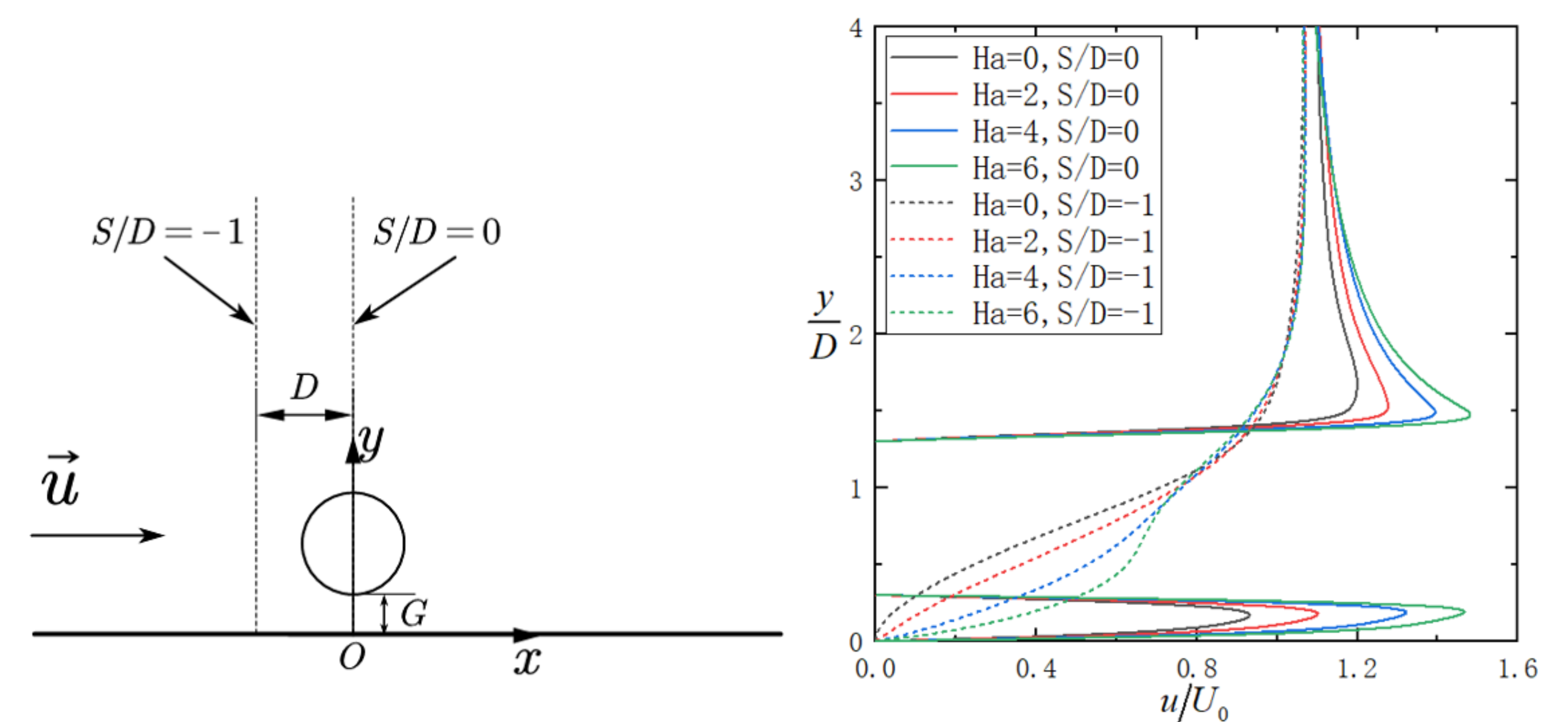


图5 G/D=0.3时, 不同磁场强度下在圆柱中心和圆柱中心前一个D处流向速度沿y轴分布

如图6所示, 磁场强度较小时 ( $\text{Ha} < 5.5$ ),  $\langle C_d \rangle$  随G/D增大而增大, 磁场强度较大时 ( $\text{Ha} > 5.5$ ), 圆柱所受阻力随G/D增大而减小; 不同磁场强度下,  $C_{lrms}$  均随G/D增大而增大。同一G/D下,  $\langle C_d \rangle$  随磁场强度增大单调增大, 且  $\text{Ha} < 1$  时,  $\langle C_d \rangle \sim \text{Ha}^2$ ,  $\text{Ha} > 1$  时,  $\langle C_d \rangle \sim \text{Ha}$ ,  $C_{lrms}$  随磁场增加先增大后减小。

## 结论 Conclusions

- 壁面对圆柱脱涡仅有抑制作用:  $G/D \leq 0.25$ 时, 脱涡被完全抑制
- 磁场强度对流动脱涡先促进后抑制:  $\text{Ha} < 3$ 时, 促进流动脱涡;  $\text{Ha} > 3$ 时, 抑制流动脱涡
- $\langle C_d \rangle$  随磁场增强单调增大,  $\text{Ha} < 1$ 时,  $\langle C_d \rangle \sim \text{Ha}^2$ ,  $\text{Ha} > 1$ 时,  $\langle C_d \rangle \sim \text{Ha}$ ;  $C_{lrms}$  随磁场先增大后减小。