

⑥ 36-40

圆柱表面矩形绊条扰流减阻的实验研究^{*}

Study on Drag Reduction of the Flow Past a Circular Cylinder by Setting Rectangular Stripes on Its Surface

何川
He Chuan

辛明道
Xin Mingdao

0357.4

(重庆大学工程热物理研究所, 重庆, 630044; 第一作者 40岁, 男, 副教授, 博士生)

A 摘要 提出了一种降低钝体绕流阻力的“再附-减阻”(RDR)构想,并在圆柱表面上安置矩形绊条对该构想进行了实验验证。在实验雷诺数范围内,该方法可使圆柱绕流阻力降低40%,阻力的降低与矩形绊条的高度及安装位置有关,与绊条的宽度无关。

关键词 分离流; 减阻; 再附着

圆柱, 绕流, 矩形绊条

中国图书资料分类法分类号 O357.4; O357.43

ABSTRACT An idea called "Reattachemnt-Drag Reduction" (RDR) declared and an experimental investigation of the flow past a circular cylinder which is setted two little rectangular stripes on its surface engaged to judge the idea in present paper. The experiment result shows that the pressure distribution on the cylindrical surface was changed from ausual cylinder and the drag reduced about 40% at $Re = 10^3 - 4 \times 10^4$ and the drag reduction changed with the height and the seat, unchanged with the width of the stripes.

KEYWORDS separated flow; drag reduction; reattachment

0 引言

在流动及传热领域,横绕圆柱是最基本的绕流现象,在工业中有广泛的应用。探索其低阻运行的机制,是人们长期关注的课题。圆柱同圆球一样,属于典型的钝体,其绕流的阻力曲线也十分相似^[1],如图1。两曲线均在其亚临界流动区内维持一较高的常值,在临界区发生阻力系数的大幅度下降。工业中实际应用的圆柱绕流大多处于亚临界流动区,常规运行必对应于较高的阻力。Achenbach 等对绕流阻力进行分类,发现亚音速绕流物

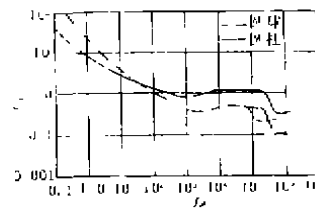


图1 典型钝体绕流阻力曲线

* 收文日期 1995-10-23

重庆市优秀中青年科技专家基金资助项目

体的阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两部分,摩擦阻力源于流体的粘性,压差阻力则归因于流动的分流。存在流动分离的钝体绕流,压差阻力在总阻力中所占的比例超过 95%^[2]。降低钝体绕流阻力的基本思路是减缓流动分离,降低压差阻力。Prandtl 曾做过一个著名的圆球绊线实验^[3],它在圆球的赤道前不远处安置一条细金属线(绊线),使其绕流阻力在亚临界区内发生了类似临界区的突降(如图 1 中虚线所示)。不少学者在分析其减阻机理时均认为,球面上绊线对流体产生的近壁扰动触发了附壁边界层内的流态从层流向紊流的转换,紊流具有强烈的横向掺混作用,可使流动分离点沿壁面向下游移动,从而导致尾涡区相应减小,压差阻力降低。这种流态转换导致阻力降低的观点称为“转换-减阻”(TDR)理论。Zukausks 等依据这一理论,细致研究了可能触发边界层流态转换的多种因素(包括来流紊流度,物面粗糙度及流道壅塞度等)对圆柱绕流阻力的影响^[4],但未能得到 Prandtl 圆球绊线实验类似的减阻结果。

我们认为,绊线本身为一有曲率物体,流体绕其流过时,在其表面产生分离,绊线的尺度虽然很小,其所诱发的分离却足以破坏物面原有边界层的发展,当流体在绊线后方的物面上重新附着(再附)时,边界层便于再附点上重新形成并向下游发展,这种新形成的边界层将维持到原有边界层分离点的下游一段距离才发生分离,导致尾涡区变窄,压差阻力减小,总阻力降低。为区别于传统的“转换-减阻”(TDR)理论,这种由再附所引发的减阻可称为“再附-减阻”(Reattachment Drag Reduction, RDR)。为了证实这一思想,我们将具有定点分离特性的矩形绊条安放在圆柱表面上,实验考察其对圆柱绕流阻力和柱面压力分布的影响。

1 实验研究

本实验在立式开路风洞中进行,来流紊流速度 $T_u < 0.5\%$, 断面阻碍系数 $\eta < 0.1$ 。实验元件如图 2(a) 所示。

实验雷诺数范围

$$Re = 10^3 \sim 4 \times 10^4$$

无量纲数定义:

$$\text{阻力系数} \quad C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 D L} \quad (1)$$

$$\text{绕流雷诺数} \quad Re = \frac{u_\infty D}{\nu} \quad (2)$$

$$\text{压力系数} \quad C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (3)$$

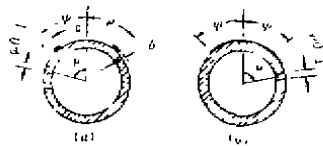


图 2 实验元件 $D = 40 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

其中 F ——绕流阻力,用测力天平测量*;

D ——圆管外径, $D = 40 \text{ mm}$;

ρ ——流体密度,依气流温度、压力折算;

L ——圆管长度, $L = 200 \text{ mm}$;

* SM-1 型立式风洞测力天平系统及误差分析·重庆大学工程热物理研究所研究报告·1993

- u ——来流流速,用毕托管测量;
 p ——压强,用微压计测量;
 ν ——流体运动粘性系数,依温度折算;
 ∞ ——角标,来流标计。

对测量值作如下修正^[5]:

$$\frac{u_{\infty c}}{u_{\infty}} = 1 + \frac{1}{4}C_D \left(\frac{D}{H}\right) + \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{D}{H}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{C_{DC}}{C_D} = 1 - \frac{1}{2}C_D \left(\frac{D}{H}\right) - \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{D}{H}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{C_{rc} - 1}{C_r - 1} = \left(\frac{U_{\infty c}}{U_{\infty}}\right)^2 \quad (6)$$

其中,下标 c 表示修正后的参数, H 为风洞实验段宽度。

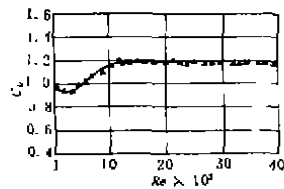


图3 阻力曲线比较 光滑圆柱面

▲——本实验测量值
 ——参考阻力曲线[1]

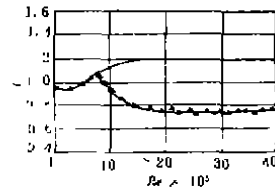


图4 阻力曲线 扰流圆柱面

$\delta = 0.3 \text{ mm}, \phi = 65^\circ, b = 1 \text{ mm}$
 ▲——扰流圆柱面
 ——光滑圆柱面

实验中首先用光滑圆管对实验装置做标定性阻力实验,实验结果如图3所示。由图可知,本实验装置所测结果可用。光管的测量结果亦作为安置矩形绊条后的实验对照基准。

图4给出绊条厚度 $\delta = 0.3 \text{ mm}$,宽度 $b = 1 \text{ mm}$,安装角 $\phi = 65^\circ$ 时圆柱绕流阻力系数 C_D 随绕流雷诺数 Re 的变化关系。明显看出,绊条的存在使阻力系数发生了大幅度的下降。

图5给出该绊条作用下柱面压力分布与光管情形的比较。曲线显示,绊条上游的压力略有上升,绊条附近压力下降,其后缘处发生流动分离, $\theta = 82^\circ$ 时产生再附, $\theta = 115^\circ$ 时边界层分离,分离点由光管的 $\theta = 85^\circ$ 后移至 115° 。图中亦给出 Achenbach 在临界流动区所测得的压力分布曲线^[2],可见绊条扰流与临界流动区的“转换-减阻”(TDR)机制是不相同的。

图6、图7、图8分别给出绊条高度,宽度及安装角度对流动阻力的影响情况。可以看出,矩形绊条扰流减阻,存在一个有效高度及有效安装角范围,宽度对减阻的作用甚微。

图9给出由正交试验法^[6],得出的最佳减阻绊条结构作用下圆柱绕流阻力系数与雷诺数之间的关系。可以看出,该绊条结构在实验雷诺数范围内具有稳定的减阻作用,减阻效果

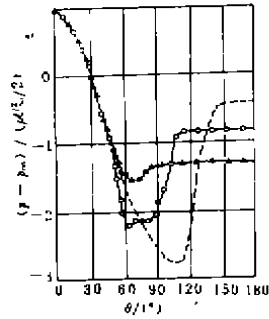


图 5 壁面压力分布曲线

▲—光滑圆柱面 $Re = 25 \times 10^3$
 ○—扰流圆柱面 $Re = 25 \times 10^3$
 ---光滑圆柱面 $Re = 85 \times 10^3$

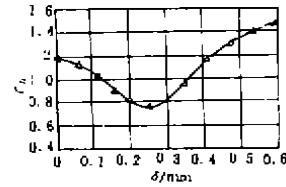


图 6 绊条高度对阻力系数的影响
 $\phi = 60^\circ, b = 1 \text{ mm}, Re = 30 \times 10^3$

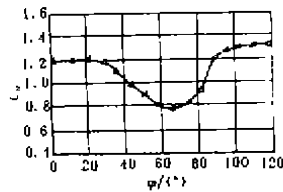


图 7 绊条安装角度对阻力系数的影响
 $\delta = 20 \text{ mm}, b = 1 \text{ mm}, Re = 30 \times 10^3$

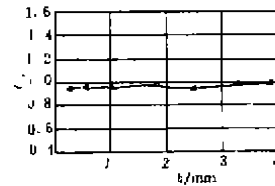


图 8 绊条宽度对阻力系数的影响
 $\delta = 0.2 \text{ mm}, \phi = 60^\circ, Re = 30 \times 10^3$

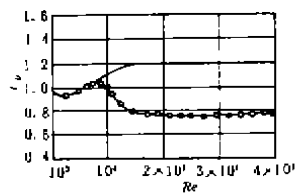


图 9 阻力曲线 最佳矩形绊条扰流圆柱面
 ▲—扰流圆柱面 ——光滑圆柱面

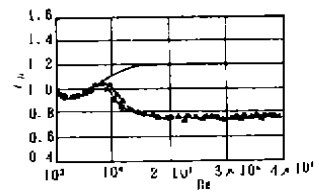


图 10 不同扰流柱面阻力曲线比较
 ▲——矩形绊条扰流圆柱面
 ---光滑圆柱面
 ●——后面台阶扰流圆柱面

可达40%。

显然,矩形绊条具有前向和后向两个台阶,它们都对绕流产生影响。后向台阶的作用可解释为诱发定点分离并在一定雷诺数范围内形成再附,前向台阶的作用则要复杂得多。试图将矩形绊条的作用解释为“再附-减阻”,必须去除前向台阶的影响。为此,我们在圆柱表面上单独设置后向台阶(实验元件如图2(b)所示)进行甄别性实验,实验结果示于图10及图11中。不难看出,后向台阶与矩形绊条对圆柱绕流阻力和柱面压力分布的影响效果几乎完全相同,说明起作用的主要是后向台阶,因此,我们认为矩形绊条在实验参数范围内的减阻作用是由与后向台阶的作用密切相关的“再附-减阻”机理所实现的。

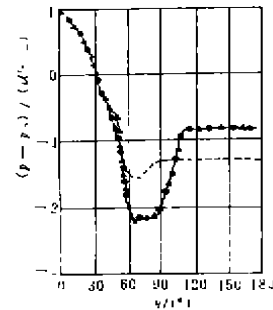


图11 不同扰流柱面壁面压力分布比较
 ▲—矩形绊条扰流圆柱面 $Re = 3 \times 10^4$
 ---光滑圆柱面 $Re = 3 \times 10^4$
 ●—后向台阶扰流圆柱面 $Re = 3 \times 10^4$

2 结 论

1) 柱面上设置的微小矩形绊条可在亚临界流动区较大幅度地降低圆柱绕流阻力。其对流阻的影响与绊条的高度及安装角有关。

2) 对于钝体绕流,除传统的“转捩-减阻”(TDR)理论外,还存在由再附引发的“再附-减阻”(RDR)机理,本文进行的矩形绊条扰流减阻实验可作为“再附-减阻”理论的一个说明。

参 考 文 献

- 1 Schlichting H. Boundary-Layer Theory, 7th ed., McGraw-Hill Book Company, 1979, 15~16
- 2 Achenbach E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^4$. J F M. 1968, 34, 625~639
- 3 Prandtl L. Der luftwiderstand von kugeln. Math. Phys. 1914, 177~190
- 4 Morkovin M V. Flow around circular cylinder—A kaleidoscope of challenging fluid phenomena, Proceedings of Fluids Engineering Division Conference, ASME, 1964, 102~118
- 5 张远君. 流体力学大全. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991, 232
- 6 中国科学院数学研究所数理统计组. 正交试验法, 北京:人民教育出版社, 1975