科学通报
第41卷 第18期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1996年9月

平板上低表面能涂层的水筒减阻研究*

田 军 薛群基
(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放实验室,兰州 730000)

关键词 低表面能涂层 减阻 边界层

在金属表面上涂覆特种涂层,可降低其航行阻力和噪声. 人造海豚皮(厚2.5 mm)的非各向同性柔性壁有利于层流边界层的转捩延迟,因而在一定的速度范围内有明显的减阻作用[1]. 水溶性线型高分子涂层:一是由于涂层表面溶解出来的线型高分子抑制初始剪切涡,吸收压力脉动能量;二是溶胀涂层的柔性效应抑制和吸收压力脉动,减小航行体阻力[2]. 而边界层中微气泡可使平板表面摩擦阻力降低60%左右[3]. 本文给出具有低表面能的涂层平板模型阻力测量结果. 描述了低表面能涂层的厚度、疏水性和表面粗糙度等特征,考察了涂层表面湍流边界层和层流边界层延迟转捩减阻的可能性.

1 试验装置和试验方法

平板模型试验在西北工业大学航海学院的水筒中进行. 试验段尺寸 $\varnothing$0.4 m×2 m,试验时的水速为6,7,9,10,12,14 m/s. 水筒内试验段压力恒定为0.06 MPa,水温15℃,空气含量0.88. 用LY12铝合金制作的平板模型前后缘为半圆柱形(平板轮廓尺寸500 mm×400 mm×10 mm,沾湿面积 $\Omega=0.299\ m^2$). 平板模型柄上端用固定孔紧固在三分力天平上,保证模型的安装一致,试验攻角0°. 分别测量铝合金平板(光板)与涂有低表面能涂层平板模型的阻力. 模型装入水筒后先除气1 h,控制压力和速度恒定后,再进行测试分析,重复3次取值.

2 低表面能涂层[4]的表面性能

涂层表面的疏水性考察在日本协和株式会社产的CA-A型接触角仪上,用内切法测量涂层与水的接触角. 测定水在两种饱和碳氢化合物(正己烷、环己烷)中与涂层表面的接触角 θ_1 及 θ_2,通过计算[5]得到涂层的表面能色散力分量和涂层—水之间非色散力的相互作用力(表1). 从以上的测试看出,低表面能涂层模型板厚度有所增加,涂层的表面光洁度下降. 但涂层的表面能很低,其值与PTFE板的数值相近,具有强的疏水性、耐水性及耐水冲刷性.

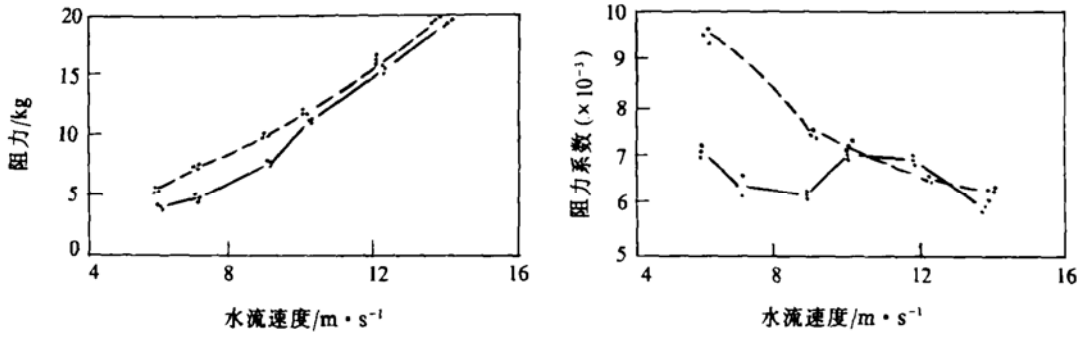
3 试验结果

铝合金平板与带有低表面能涂层的平板模型其阻力及阻力系数曲线对比于图1中. 阻力系数定义为 $C_f=F/(0.5\rho U^2\Omega)$,其中 F 是阻力,ρ 是水密度,U 是水流速度. 低表面能涂层在低速 $U\leqslant 9$ m/s时,表现出明显的降阻效果,减阻范围在18%~30%左右. 随着水流速度的

1996-01-15 收稿,1996-04-26 收修改稿

表1 涂层的表面性能

性 能	聚四氟乙烯板	光 板	涂层
粗糙度/μm	1.9±0.5	2.4±0.6	5.7±2.1
涂层厚度/mm		0	0.137~0.150
空气中涂层与水的接触角	104.0°		147.0°
正己烷中涂层与水的接触角	156.3°		155.0°
环己烷中涂层与水的接触角	156.6°		159.0°
涂层的表面能色散力分量/mN·m^{-1}	28.4		37.1
涂层与水之间非色散力的相互作用力/mN·m^{-1}	3.9		3.58
耐水冲刷性(14 m/s, 15℃, 2 h)			无变化
耐腐蚀性(海平面下0.2 m, 2 a)			无变化
耐冲击性/5 N·m			良好



(a) (b)

图1 阻力随水流速度变化的曲线(a)和阻力系数随水流速度变化的曲线(b)
——光板, —涂层

增加,涂层的减阻效果降低. 从阻力系数中看出带有低表面能涂层的平板模型,在9~10 m/s速度范围内,有一极大值. 这完全不同于光板的阻力系数随水流速度增加而逐步下降的情况. 这时雷诺数 $Re=4\times10^6$.

4 分析与讨论

下面通过初步的分析来考察涂层对边界层的影响. 假设不考虑表面粗糙和厚度的因素,由于涂敷了低表面能涂层使得层流到湍流的边界层过渡点比光板后移了 $X=X_{tr}$. 因此,对于光板来说,由于用湍流边界层代替了 $X=0\sim X_{tr}$的一段层流边界层,而引起的阻力增加部分为 $\triangle D_f=0.5\rho U^2X_{tr}(C_{f,t}-C_{f,l})_{tr}$. 其中 $C_{f,t}$为湍流的平均摩擦系数, $C_{f,l}$是层流的平均摩擦系数. 这样 C_f 的增加量为 $\triangle\overline{C_f}=\triangle D_f/(0.5\rho U^2\Omega)=A/Re$, A 为过渡点的 Re 数 $Re_{tr}=UX_{tr}/\nu$ 的一元函数,它由下式近似表示:

$$A=0.0098Re_{tr}^{0.919}\qquad(3\times10^5<Re_{tr}<3\times10^6).$$

从图1中测得光板阻力与涂层平板阻力间的增加值 $\triangle D_f$ 和从以上的公式中求出转捩点后移

位置 X_{tr}及由指数定律得出的湍流边界层厚度 $\delta = 0.382(Re_{tr})^{4/5}/Re$. 表 2 即为低表面能涂层减阻时所得出的层流边界层延迟转捩位置和湍流边界层厚度的增加值. 可见,由于低表面能涂层的存在使层流边界层延迟转捩,并使湍流边界层厚度增加. 速度越高,转捩点后移倾向越小;边界层厚度增加也越小. 而在 9 m/s 速度时,涂层的层流边界层延迟转捩及边界层厚度增大的数值发生了突变,引起了阻力的极大变化. 因此,分析结果表明,低表面能涂层的减阻主要来自于湍流边界层的减阻,湍流边界层前层流边界层的转捩点后移造成了阻力的减小. 在速度较低时 $U<9$ m/s,低表面能涂层平板其阻力大大地小于光板模型的,此时由于其表面粗糙度和形阻使涂层的平板阻力增加不大,而低的涂层与液体水间的界面作用力表现出大的降阻效果. 当速度增加时,涂层的表面粗糙度及形阻引起的阻力也随之上升,抵消了一部分由于低的界面相互作用力而引起的降阻效果. 即是这样在 12,14 m/s 速度下,涂层仍具有一定的降阻效果. 在 9～10 m/s 速度范围内,涂有低表面能涂层平板的阻力系数有一极大值,反映出它的湍流边界层稳定性受到了影响,其机理还需进一步考察.

表 2　涂层的转捩点后移和边界层厚度的增加值

水流速度/m·s^{-1}	涂层转捩点后移/m	边界层厚度增加值/cm
6	0.43	1.77
7	0.40	1.61
9	0.18	0.81
14	0.06	0.30

5　小结

在铝合金平板表面上涂敷一层非常薄的低表面能涂层,在 $U\leqslant 9$ m/s 的水筒试验中,可降低平板阻力 18%～30%. 低表面能涂层的疏水性质,使平板的湍流边界层增厚和转捩点的后移,从而造成了平板阻力的降低.

致谢　对西北工业大学航海学院施仲庆、黄景泉等同志的大力支持,在此表示衷心感谢.

参　考　文　献

1　李万平, 杨新祥. 柔性壁减阻的试验研究. 水动力学研究与进展, 1991, 6(4):108～112

2　金善熙. 高分子减阻涂料. 海军工程学院学报, 1987, (1):86～94

3　宋保维, 黄景泉. 微气泡降低平板阻力的研究. 水动力学研究与进展, 1989, 4(4):105～114

4　田　军, 周兆福, 徐锦芬等. 中国专利,95104124 X, 1995-04-13

5　Badey J P, Urbaczewski-Espuche, Jugnet Y *et al*. Surface modification of polytetrafluoroethylene by microwave plasma downstream treatment. Polymer, 1994, 35(12):2 472～2 479