

## 凹槽构型对平板气层减阻影响试验分析\*

吴浩,董文才,欧勇鹏

(海军工程大学舰船工程系,湖北武汉 430033)

**摘要:**通过平板凹槽喷气减阻模型试验,研究了航速和气流量等因素对平板气层减阻规律的影响,并利用水下摄像系统对不同凹槽构型内的气层形态进行了观测。试验结果表明:不喷气时凹槽的存在会使平板的阻力增加;喷气可以有效减小平板阻力,存在饱和气流量;饱和气流量随着槽深的增加而减小,饱和气流量下平板的绝对减阻率随航速的增加而降低;设置凹槽构型是保持平板下表面气层稳定性的有效措施,合适的凹槽构型可以明显改善平板底部喷气流场,提高平板喷气减阻效果;在  $Fr$  为 0.119 时,饱和气流量下平板的绝对减阻率可以达到 40% 以上。

**关键词:**平板;凹槽构型;气层形态;绝对减阻率;稳定性

**中图分类号:**U661.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)02-158-06

## Experimental study for the influence of groove configuration on plate air layer drag reduction

WU Hao, DONG Wencai, OU Yongpeng

(Department of Naval Architecture, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The influence of speed and air flow on the flat gas reservoir law of drag reduction was investigated by an experiment of plate with air injection, and the air layer formation in different groove configuration was observed by an underwater imaging system. The results show that the grooves increase the resistance of the plate without air; the resistance of flat plate can be reduced with the injection of air, and there is an optimal air flow; the optimal air flow decreases with the rise of the groove depth, and the absolute drag reduction rate decreases with the increase of the speed; the configuration of the groove is an effective measure to maintain the stability of the plat bottom surface air layer; the appropriate groove configuration significantly improves the flow field at the bottom of the flat plate and increases the effect of the flat drag reduction with air injection; the absolute drag reduction rate reaches more than 40% under the optimal air flow when the  $Fr$  is 0.119.

**Key words:** flat plate; configuration of groove; air layer formation; absolute drag reduction rate; stability

气层减阻技术可以有效减少船舶航行中的摩擦阻力<sup>[1-2]</sup>。目前,在船底形成气层的方式主要有两种。其一是在船底部开设喷气孔或者喷气缝,直接向船底喷入气体,在船底形成气层;其二是在船舶底部设置凹槽构型,形成船底凹槽,向凹槽内喷入气体形成气层<sup>[3-5]</sup>。前者方法比较简单,但是很难形成稳定的气层,而且开设喷口的位置和大小等参数难以确定。后者对于船舶底部的加工较为复杂,但是该方法易形成比较稳定的气层。俄罗斯的学者已经研制出了开设凹槽的气泡船,然而由于技术保密的原因,并未公开发表过关于船底凹槽设计等关键问题的文章,对凹槽中的气层形态及影响因素的研究也未对外阐述过<sup>[6]</sup>。

Matveev<sup>[7]</sup>基于势流理论,对二维凹槽、三维

凹槽及滑行艇的艇底气层形态及波动特性进行计算,并针对简单的小型模型研究了凹槽构型对气层形态的影响规律。Elbing 等<sup>[8-13]</sup>在美国海军威廉摩根大型空化水槽内开展了长为 12.9 m 的平板凹槽减阻试验,研究了凹槽参数对大型平板气层形态的形成和平板底部不同位置处的局部摩擦力的影响,但是缺乏对平板底部气层形态的稳定性研究和减阻效果的评估。Zverkhovskiy 等<sup>[14-16]</sup>针对一条长 2 m、宽 0.298 m 的平板,在循环水槽中进行了系统的气层减阻试验,试验结果表明:在平板两侧安装侧板可以延长平板下表面的气层长度、提高减阻效果。Kodama 等<sup>[17]</sup>针对一条长度为 22 m、宽度为 1 m 的平板,在平板首部安装喷气装置,沿着纵向和横向均布置了局

\* 收稿日期:2015-10-14

基金项目:工信部高技术船舶科研资助项目(2011530);高性能船舶技术教育部重点实验室开放基金资助项目(2013033102)

作者简介:吴浩(1987—),男,湖北武汉人,博士研究生,E-mail:hgwuhao@126.com;

欧勇鹏(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:oubad@163.com

部摩擦力传感器,进行了气层减阻试验,结果表明:平板受到的总阻力减阻率、局部摩擦力和平板下表面名义气层厚度密切相关,在合适的名义气层厚度下平板的总阻力减阻效果明显。叶青等<sup>[18]</sup>针对95000DWT散货船模型进行了凹槽气层减阻试验研究,研究结果表明:凹槽深度增加,阻力降低幅度增大,但是不喷气时凹槽会导致阻力增加,存在最佳凹槽深度。

为了推动气层减阻技术在我国的应用,本文开展了凹槽构型对平板喷气减阻影响的试验研究,探讨了凹槽形状、凹槽深度、航速和气流量等因素对平板气层减阻的影响规律,讨论了凹槽参数变化对平板减阻效果的影响,得到了一些有意义的结论,可以为肥大型船舶的气层减阻研究提供指导。

## 1 试验简介

### 1.1 试验模型凹槽构型设计

图1给出了试验模型的示意图:平板模型总长5016 mm,总宽1000 mm,厚120 mm。平板首部及尾部采用NACA0015翼型进行光顺过渡,中间部分为平行中体。在平板下表面设置喷气装置。

在向平板下表面直接喷气时,由于气层的横向扩散和气层厚度难以控制,气层减阻的效果不甚理想。为此设计了两种不同类型的平板凹槽,设计思路如图1(a)所示:①仅在平板两侧安装纵向侧板形成“开放式凹槽”,该设计方法旨在侧板少量增加摩擦阻力时防止气层的横向扩散,通过增加气层厚度、延长气层长度来提高减阻效果;②在平板两侧安装纵向侧板的同时更换平板模型的首部和尾部形成平板底部“封闭式凹槽”,图1(b)给出了封闭式凹槽构型的示意图。该设计中凹槽断阶的存在会增加平板的形状阻力,但是可以有效控制气层的横向扩散和尾部溢出,而且有利于气层的稳定性。

试验中平板的首部断阶、尾部断阶和侧板高度变化为20 mm和30 mm;侧板长度为4250 mm;尾部斜坡倾角为11.3°。凹槽首部距离平板前部466 mm,凹槽尾部距离平板尾端300 mm。沿平板下表面中线布置了7个摩擦力传感器,它们的纵向间距为650 mm,具体布置如图1(b)所示。试验中通过首尾断阶和侧板的不同组合方式可形成5种不同形式的凹槽构型,具体匹配方案见表1,其中方案1和3属于开放式凹槽,方案2,4和5属于封闭式凹槽。

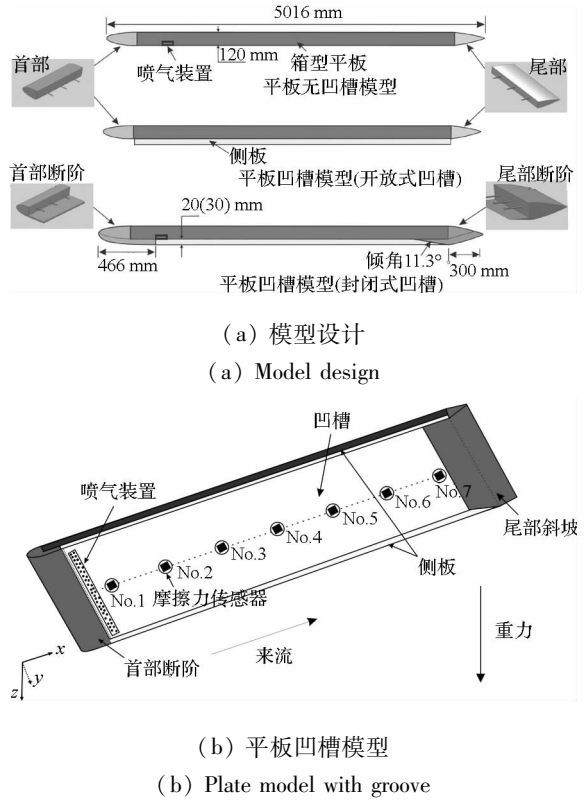


图1 试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental model

表1 试验中5种喷气减阻凹槽构型方案

Tab. 1 Five kinds of groove configuration scheme for air layer drag reduction in the test

序号	方案介绍
初始方案	无凹槽
方案1	侧板20 mm
方案2	等深20 mm凹槽:首部断阶20 mm + 侧板20 mm + 尾部断阶20 mm
方案3	侧板30 mm
方案4	等深30 mm凹槽:首部断阶30 mm + 侧板30 mm + 尾部断阶30 mm
方案5	不等深凹槽:首部断阶30 mm + 侧板30 mm + 尾部断阶20 mm

### 1.2 模型安装

图2给出了试验模型的安装和气层观察系统的布置。试验模型采用双支柱固定,通过伸缩导航机构与拖车连接。支柱采用流线型导流罩以减小对流场的干扰;支柱的横向位置位于模型的中纵剖面上;纵向关于平板长度方向的中心轴对称布置,前支柱中心线距离平板首部1016 mm,后支柱中心线距离前支柱中心线2600 mm。

支柱下端通过单分力传感器与平板连接;上端面与圆柱形支撑杆相连;圆柱支撑杆与拖车上的拖曳系统固定连接。支柱沿着高度方向的长度可变,使得平板下表面的吃水达到 1000 mm,在水池底部某处布置水下光源和水下摄像系统实时拍摄和记录试验中不同状态下的气层形态。试验中通过拖车控制平板的前进速度;玻璃转子流量计测量气流量;两个单分力传感器测量平板总阻力;局部摩擦力传感器测量平板下表面特定位置处的局部摩擦力。

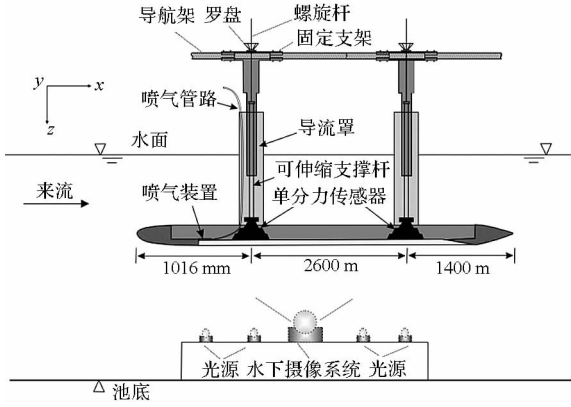


图 2 试验模型的安装和气层观察系统的布置

Fig. 2 Installation of test model and observation system

## 2 凹槽构型对平板气层减阻影响分析

在拖曳水池里开展了水深 1.0 m,  $Fr$  分别为 0.119, 0.143, 0.172, 0.202, 0.272, 0.356 时,不同凹槽参数变化对平板喷气减阻影响的试验研究,试验中测量了水温、气流量、拖车速度、总阻力、局部摩擦力等参数,并对平板下表面气层形态进行了观测。定义平板绝对减阻率  $\eta$  和无因次气流量系数  $Cq$ ,表达式如下:

$$\eta = \frac{R_{(不开槽,不喷气)} - R_{(开槽,喷气)}}{R_{(不开槽,不喷气)}} \quad (1)$$

$$Cq = \frac{Q}{V \cdot B \cdot \delta} \quad (2)$$

其中:  $R_{(不开槽,不喷气)}$  表示平板无凹槽模型不喷气时的阻力值,  $R_{(开槽,喷气)}$  表示平板凹槽模型喷气时的阻力值;  $Q$  表示气流量,  $V$  表示来流速度,  $B$  表示喷气口的横向宽度,  $\delta$  表示不喷气时喷气口处的边界层厚度,利用下式计算:

$$\delta = \begin{cases} 5.2R_e^{-\frac{1}{2}}x & R_e < (3.5 \sim 5) \times 10^6 \\ \frac{0.0598x}{\lg R_e - 3.107} & R_e > 3 \times 10^6 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $Re$  表示喷气口处的雷诺数,计算公式为:

$$R_e = \frac{V \cdot x}{\nu} \quad (4)$$

式中:  $x$  表示喷气口距平板首部的距离;  $\nu$  表示水的黏性系数,常温下取  $\nu = 1.003 \times 10^{-6}$ 。

### 2.1 总阻力性能

图 3 给出了不同凹槽方案不喷气时平板阻力增加随速度变化的曲线,由图 3 可知:首尾部断阶和两侧板的存在均使平板阻力增加,并且凹槽深度越大,平板阻力增值越大;封闭式凹槽方案阻力增值明显比开放式凹槽方案的阻力增值大。首尾部断阶改变了平板首尾部流场的均匀性,使得平板的形状阻力增值明显,其中安装首尾部断阶和两侧板(30 mm)的方案 4 阻力增值最大。

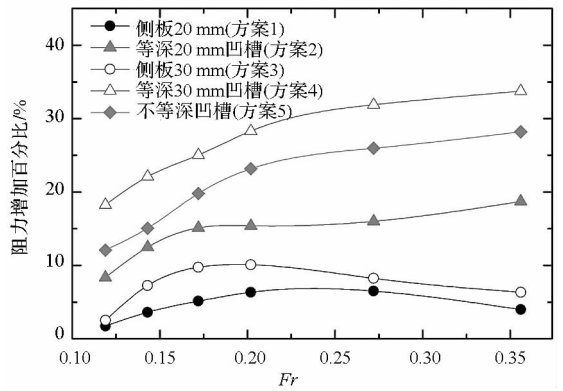


图 3 不同方案下不喷气时平板阻力增值随航速变化

Fig. 3 Drag increment varying with speed under different schemes without air

图 4 给出了  $Fr = 0.172$  时不同方案平板喷气状态下的减阻率随无因次气流量系数的变化,由图 4 可知:喷气引起阻力的降低,阻力下降的幅度随着无因次气流量系数的增加而增大,但当无因次气流量系数达到饱和值时,继续增加无因次气流量系数对减阻效果没有明显改善;不同凹槽设计方案的饱和无因次气流量系数区别较大。开放式的凹槽方案,无法抑制气体的尾部溢出,饱和无因次气流量系数较大。在同时设置首尾断阶和侧板时可以有效地抑制气体的横向扩散和尾部溢出,饱和无因次气流量系数明显降低至 1.5。

由图 4 还可知:封闭式凹槽方案的减阻效果较开放式凹槽方案的减阻效果好。对于开放式凹槽方案,对比方案 1 和 3 可知:侧板高度越大,平板凹槽内气层厚度越大,饱和无因次系数下减阻效果越好,对于方案 3,  $Fr = 0.172, Cq = 2.254$  时的平板绝对减阻率为 19%。对比各方案可知:平板底部凹槽喷气可以提高减阻效果,槽深越大,饱和无因次系数越小;对于不等深凹槽方案 5,  $Fr = 0.172, Cq = 3.005$  时平板绝对减阻率可以达 28.8%。

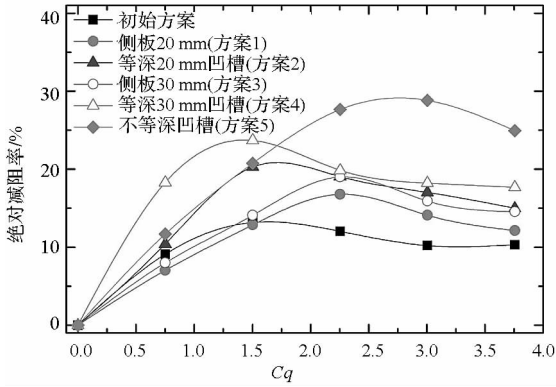


图4  $Fr=0.172$  时不同方案喷气时平板减阻率曲线  
Fig.4 Air layer drag reduction rate curve at  $Fr=0.172$  under different schemes

图5给出了不等深凹槽方案5平板喷气减阻率随无因次气流量系数的变化曲线。由图5可知:饱和无因次系数随着航速的提高而增大;在相同的无因次气流量系数下,航速越低,减阻率越大。在  $Fr=0.119$  时,饱和无因次系数下平板的绝对减阻率可达到41.5%以上。

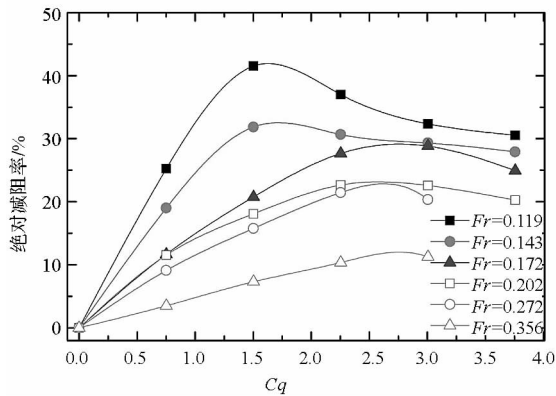


图5 不等深凹槽方案5平板喷气减阻率曲线  
Fig.5 Air layer drag reduction rate curve under scheme 5

### 2.2 局部摩擦力分析

图6~7给出了不同航速和无因次气流量系数下沿来流方向7个位置上局部摩擦力的减阻率变化,  $X/L_h$  表示传感器中心距离喷气口中心的纵向距离与凹槽长度之比。由图6~7可知:所有方案在喷气口附近的局部摩擦力减阻率均接近100%;平板无凹槽方案,沿着来流的方向,由于气泡受到浮力和平板湍流的扰动,气泡会迁移离开平板下表面的近壁区域向后方和两侧扩散,局部摩擦力在凹槽尾部急剧降低至零;对于开放式的凹槽方案,由于侧板的存在抑制了气层的横向扩散,气层延长,局部摩擦力减阻效果较高,只有在航速较高时,平板尾部局部摩擦力减阻效果有所降低;对于封闭式凹槽方案,气层覆盖平板下表面

较好,局部摩擦力减阻率亦较高。

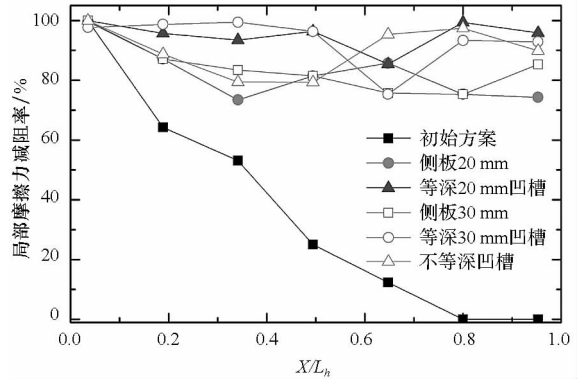


图6  $Fr=0.172, Cq=1.455$  时局部摩擦力减阻率  
Fig.6 Local friction drag reduction rate at  $Fr=0.172, Cq=1.455$

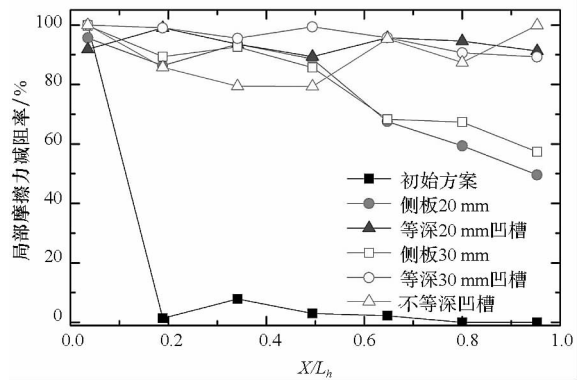


图7  $Fr=0.357, Cq=3.005$  时局部摩擦力减阻率  
Fig.7 Local friction drag reduction rate at  $Fr=0.357, Cq=3.005$

### 2.3 气层稳定性分析

图8给出了无凹槽方案、开放式凹槽方案3和封闭式凹槽方案5在  $Fr=0.119, Cq=1.503$  下变喷气流量下的平板阻力的时历曲线。试验中喷气时刻为  $t=55$  s, 停止喷气时刻为  $t=145$  s(持续喷气时间约为90 s)。由图8可知:向平板无凹槽模型下表面喷气,平板总阻力会减小,绝对减阻率为21.04%,持续喷气,气层会一直保持,停止喷气后,减阻效果迅速消失,平板下表面气层维持时间仅为12 s;在开放式凹槽方案3模型下表面持续喷气,平板的绝对减阻率为32.3%,停止喷气后,减阻效果持续一段时间后消失,气层维持时间约为50 s;在封闭式凹槽方案5的模型下表面持续喷气,平板绝对减阻率可以达到41.5%,停止喷气后,凹槽内气层的维持时间可以达到154 s。由此可以说明:平板凹槽模型中的侧板和尾部断阶可以有效控制气体的溢出,利于凹槽内气层的形成和保持。

为了更加深入地了解凹槽构型对平板喷气减阻的影响机理,对平板下表面气层形态进行了观

测,研究了侧板和首尾部断阶对气层形态稳定性的影响。图 9 给出了无凹槽方案、开放式凹槽方案 3 和封闭式凹槽方案 5 在  $Fr = 0.119, Cq = 1.503$  下平板下表面气层形态。由图 9 可知:初始方案由于没有措施控制模型下表面气体的横向和纵向扩散,气体会从模型尾部和两侧迅速溢出,

如果需要维持船底气层,就需持续供气;对于开放式凹槽方案 3 的模型两侧板可以抑制气体的横向溢出,延长平板下表面气层长度;对于封闭式凹槽方案 5 的模型两侧板和凹槽尾部断阶斜坡板可以有效防止气体的横向溢出和尾部溢出,在喷气停止后凹槽内的气层亦能保持较长的时间。

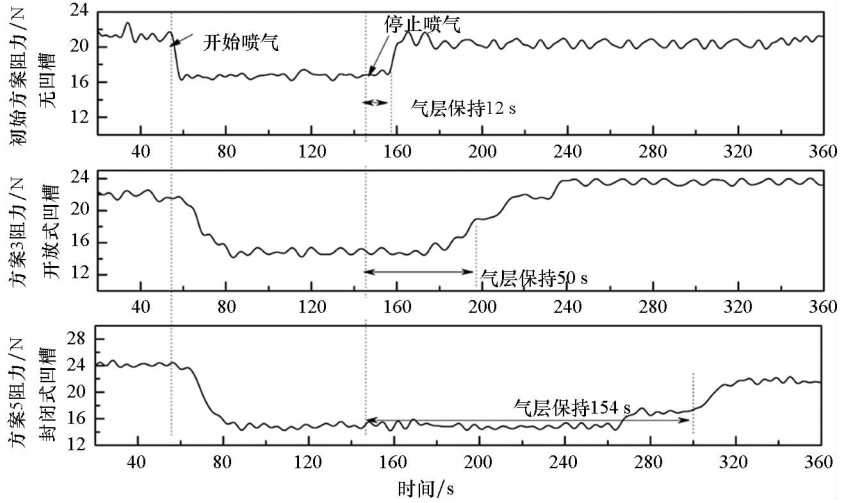
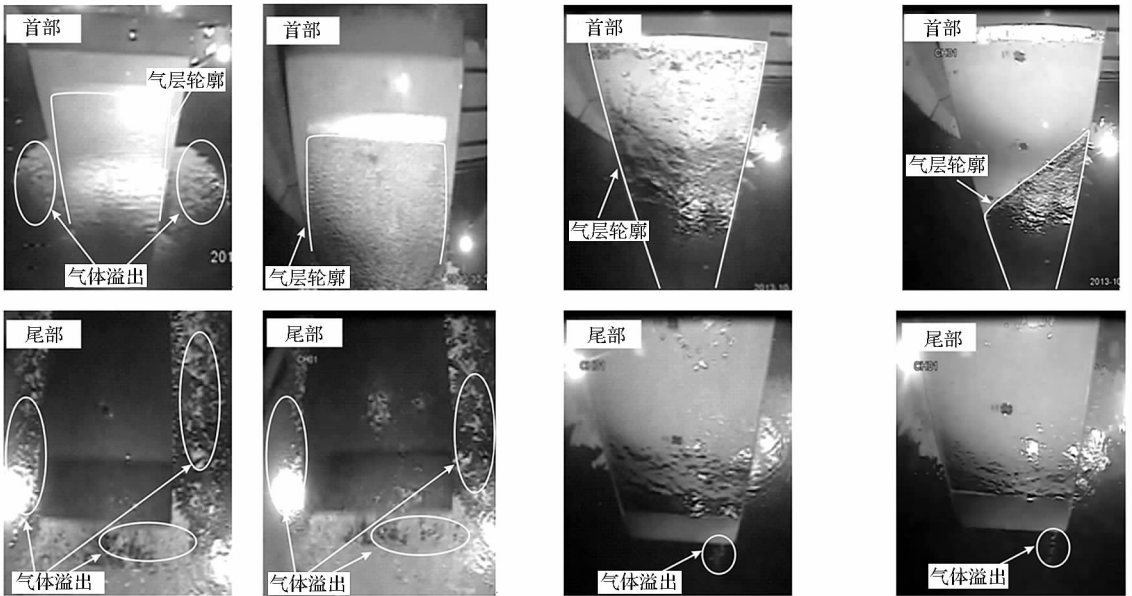


图 8  $Fr = 0.119, Cq = 1.503$  时不同方案下平板阻力时历曲线

Fig. 8 Plate resistance curve at  $Fr = 0.119, Cq = 1.503$  under different schemes



(a) 初始方案 (a) Original case (b) 方案 3 (b) Case 3 (c) 方案 5 (停止喷气 12 s) (c) Case 5 (stop injection for 12 s) (d) 方案 5 (停止喷气 85 s) (d) Case 5 (stop injection for 85 s)

图 9 在  $Fr = 0.119, Cq = 1.503$  时不同方案下平板下表面气层形态

Fig. 9 Air layer shape at different schemes with  $Fr = 0.119, Cq = 1.503$

### 3 结论

1) 平板下表面凹槽主要影响平板不喷气时的阻力,封闭式的凹槽阻力增值比开放式的凹槽

阻力增值大;槽深增加,不喷气时平板的阻力增大;向凹槽内喷入气体可以减小平板所受阻力,槽深增加,所需要的饱和无因次系数随之减小。

2) 不同的首部断阶、尾部断阶和侧板高度组

合可以提高平板的减阻率,对于封闭式的不等深凹槽构型可以使平板在  $Fr = 0.119$ ,  $Cq = 1.503$  时的减阻率达到 40% 以上。

3) 平板下表面气层形态表明,设置凹槽构型是保持平板下表面气层稳定性的有利措施。不等深凹槽构型的平板较光滑平板更能形成稳定的气层,在停止喷气后平板下表面气层亦能保持较长时间。

## 参考文献 (References)

- [1] 叶青,董文才,欧勇鹏. 平板喷气流场特性影响因素试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(1): 25-29.  
YE Qing, DONG Wencai, OU Yongpeng. An experimental study of the flow field around the flat plate with air injection[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(1): 25-29. (in Chinese)
- [2] Sverchkov A V. Potential of the artificial air cavity technology for raising the economic efficiency of china's inland waterway shipping[C]//Proceedings of Ninth International Conference on Fast Sea Transportation FAST2007, 2007.
- [3] Sverchkov A V. Application of air cavities on high-speed ships in russia[C]//Proceedings of International Conference on Ship Drag Reduction SMOOTH-SHIPS, 2010.
- [4] Butuzov A A, Gorbachov Y N, Ivanov A N. Reduction of ship resistance using ventilated gas cavities[J]. Shipbuilding, 1990, 11: 3-64.
- [5] 张大有. 关于 A Cavity Craft 的研究及关键技术分析[J]. 武汉造船, 1997, 113(5): 21-25.  
ZHANG Dayou. Research and analysis on the key technology of a cavity craft[J]. Wuhan Shipbuilding, 1997, 113(5): 21-25. (in Chinese)
- [6] Gokcay S, Insel M, Odabasi A Y. Revisiting artificial air cavity concept for high speed craft[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(3/4): 253-267.
- [7] Matveev K I. Three-dimensional wave patterns in long air cavities on a horizontal plane[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(13): 1882-1891.
- [8] Elbing B R, Winkel E S, Lay K A, et al. Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 612: 201-236.
- [9] Sanders W C, Winkel E S, Dowling D R, et al. Bubble friction drag reduction in a high Reynolds number flat plate turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 552: 353-380.
- [10] Lay K A, Yakushiji R, Makiharju S A, et al. Partial cavity drag reduction at high Reynolds numbers[J]. Journal of Ship Research, 2010, 54(2): 109-119.
- [11] Oweis G F, Winkel E S, Cutbrith J M, et al. The mean velocity profile of a smooth-flat-plate turbulent boundary layer at high Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 665(4): 357-381.
- [12] Elbing B R, Makiharju S, Wiggins A, et al. On the scaling of air layer drag reduction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 717(2): 484-513.
- [13] Makiharju S A, Elbing B R, Wiggins A, et al. On the scaling of air entrainment from a ventilated partial cavity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 732(5): 47-76.
- [14] Zverkhovskiy O, van Terwisga T J C, Delfos R. Flat plate drag reduction by an air cavity[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Measurement Technology for EU Maritime Industry (AMT'13), 2013.
- [15] Zverkhovskiy O, van Terwisga T J C, Delfos R, et al. Experimental study on developed air cavities horizontal flat plate[C]//Proceedings of 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012), 2012.
- [16] Zverkhovskiy O. Ship drag reduction by air cavities[D]. Nederland: Technische Universiteit Delft, 2014.
- [17] Makino M, Kodama Y, Hori T, et al. 22m flate experiment on the speed dependence of skin friction reduction by air lubrication[C]//Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 2007, G1(3): 63-66.
- [18] 叶青,董文才. 95000DWT 散货船喷气减阻模型试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 68-72.  
YE Qing, DONG Wencai. Model experimental study on resistance reduction of a 95000DWT bulk carrier by air lubrication[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(1): 68-72. (in Chinese)