

不同材料水翼水动力特性实验研究

刘韵晴, 吴钦*, 陈倩, 黄彪, 张汉哲, 王国玉

(北京理工大学流体机械工程研究所, 北京, 100081, Email: wuqin919@bit.edu.cn)

摘要: 为了研究复合材料水翼的流场特性, 以 Clark-Y 水翼为研究对象, 基于高速空化水洞实验平台, 对铝制水翼和复合材料水翼的水动力性能进行了实验测量。实验结果表明: 铝制水翼和复合材料水翼发生转捩的攻角一致, 且铝制水翼的转捩位置比复合材料水翼更接近水翼前缘; 在攻角大于 19° 时, 铝制水翼的升力系数迅速增长, 而复合材料水翼的升力系数随攻角增加逐渐增大; 两种水翼的升阻比均随着攻角和升力系数的增加先增大后减小, 且复合材料水翼的升阻比大于铝制水翼。

关键词: 复合材料水翼; 水动力特性; 实验研究

1 引言

水力机械作为重要的工业装备, 在水电开发、农业灌溉、海洋运输等领域起着重要的作用。传统水力机械通常采用刚性材料, 但由于复杂水下环境易造成叶轮机、螺旋桨等水力机械的严重腐蚀, 致使其使用寿命降低。近年来, 由于复合材料具有良好的适应性、减重效果显著、抗腐蚀性强等特点, 被广泛应用于水力机械和航天航空^[1-3]领域。

在实验研究方面, Motley 等^[4]研究了不同来流条件下螺旋桨叶片倾角随水动力载荷的变化情况, 结果表明: 复合材料提高了结构系统在非设计工况下的水力性能。Zarruk 等^[5]对不锈钢水翼、铝制水翼和铺层角为 0° 和 30° 的复合材料水翼水动力性能和结构响应进行研究, 结果表明: 在来流作用下, 0° 铺层复合材料水翼产生正扭转变形, 水翼有效攻角增加, 而 30° 铺层复合材料水翼由于弯扭耦合特性的存在, 使水翼呈现出负扭转变形, 水翼有效攻角减小。王宁^[6]对不同材料水翼的空化水弹性响应及其振动特性进行了实验及数值模拟研究, 结果表明: 水翼的振动幅度在云状空化阶段达到最大。张汉哲等^[7]通过数值计算研究了复合材料水翼的变形特性, 并提出复合材料水翼尖端扭转角和中面扭转曲率之间的关系。

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 51839001, 51679005 和 91752105), 北京国家自然科学基金 (批准号: 3172029) 和中央高校的基础研究经费资助项目。

目前国内外学者已对复合材料水翼做了部分研究，但现有研究较少对复合材料水翼和传统金属材料水翼的水动力性能差异进行分析。因此，本研究针对不同材料水翼的水动力特性，采用实验方法对铝制水翼和复合材料水翼的水动力特性进行了测量，并对可能造成两种水翼水动力特性差异的原因进行了分析。

2 实验方法

实验在瑞士洛桑联邦理工大学水力机械实验室（EPFL-LMH）的高速空化水洞实验台完成^[8]，水洞由水管、收缩段、实验段、扩散段和回水管组成。实验采用 Clark-Y 水翼，其弦长 $c=100\text{mm}$ ，展长 $b=150\text{mm}$ ，最大厚度比约为 12%，水翼材质分别为铝和复合材料，其材料属性见表 1，复合材料水翼铺层材料为碳纤维，从水翼中间层向两侧呈镜像对称方式铺层，单侧的铺层序列为[45/90]s，共 50 层。

实验中，重要的无量纲化参数分别定义为：空化数 $\sigma=(p-p_v)/(0.5\rho u_i^2)$ ；雷诺数 $Re=u_i c/\nu$ ，其中 p 、 p_v 分别为来流压力和饱和蒸汽压， ρ 为流体密度， u_i 为来流速度， c 为水翼弦长， ν 为液体的运动黏度。实验采用的流速分别为 $u_1=5\text{m/s}$ 、 $u_2=8\text{m/s}$ 和 $u_3=12\text{m/s}$ ，对应的雷诺数分别是 $Re_1=0.5\times 10^6$ 、 $Re_2=0.8\times 10^6$ 、 $Re_3=1.0\times 10^6$ 。

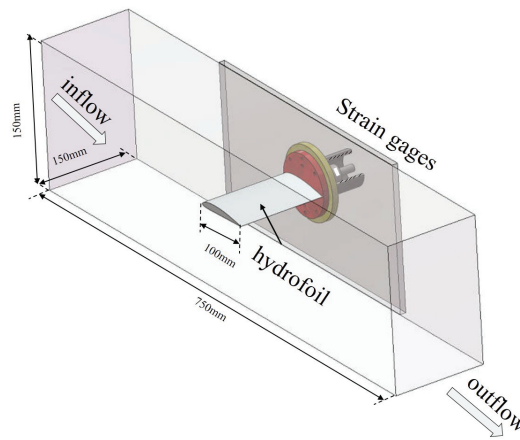


图 1 实验装置图

表 1 不同材料属性

材料	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	杨氏模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 ν	剪切模量 $G(\text{GPa})$
Carbon-UD	2034	12.5	0.27	7
Al	2770	71	0.33	26.69

3 结果与讨论

为了研究不同材料水翼的水动力性能,图 2 和图 3 分别给出了铝制水翼和复合材料水翼升力系数($C_l = L/(0.5\rho u^2 bc)$)、阻力系数($C_d = D/(0.5\rho u^2 bc)$)和俯仰力矩($C_{Mz} = M/(0.5\rho u^2 bc^2)$)随攻角的变化曲线。

由图 2 可知,当攻角 $\alpha=0^\circ\sim 12^\circ$ 时,升力系数和俯仰力矩均随着攻角的增加而增加;当攻角 $\alpha=12^\circ\sim 14^\circ$ 时,升力系数随着攻角的增加而下降,当 $\alpha>14^\circ$ 时,升力系数迅速增长,而俯仰力矩随着攻角的增加而减小。阻力系数随着攻角的增加均呈现增长趋势。由图 3 可知,复合材料水翼水动力性能的变化趋势与铝制水翼一致,但在攻角约为 19° 时,铝制水翼升力系数出现迅速增长,而复合材料水翼升力随攻角增加而逐渐增大。且由图 2 和图 3 可知,不同材料水翼的水动力性能随雷诺数的增加无明显变化。

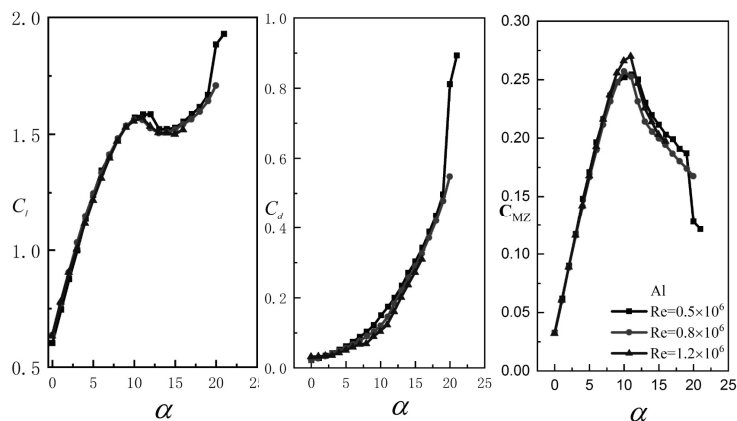


图 2 铝制水翼的水动力系数随攻角的变化

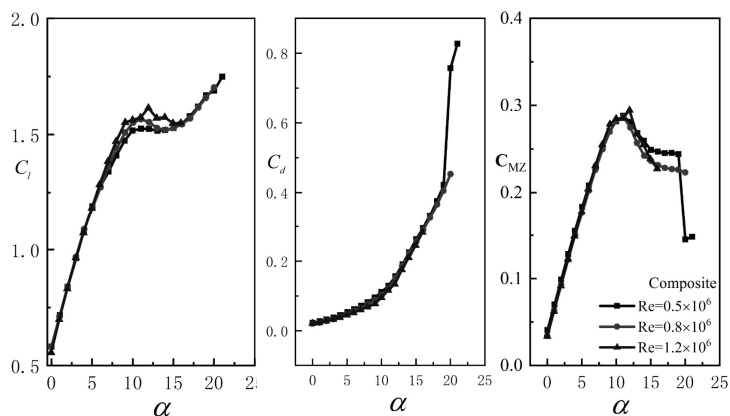


图 3 复合材料水翼的水动力系数随攻角的变化

为了阐明图 2 中水翼升力系数出现拐点和激增的原因,图 4 分别给出了雷诺数 $Re=0.5 \times 10^6$ 时,铝制水翼和复合材料水翼的水动力系数图和攻角分别为 12° 和 19° 的流线图。由图 2 可知,当攻角 $\alpha=12^\circ$ 时,水翼的前缘端均出现了转捩现象,产生了局部逆流,使其局部流动由层流转变为湍流状态,其中铝制水翼转捩位置更接近水翼前缘。同时铝制水翼产生了尾缘涡,而复合材料水翼尾缘并未出现涡流,使得铝制水翼的升力系数大于复合材料水翼。当攻角 $\alpha=19^\circ$ 时,由于逆压梯度作用使铝制水翼产生了尾缘涡,导致其升力系数出现迅速增长现象,而复合材料水翼无尾缘涡形成,其升力系数随攻角增大平缓增大。

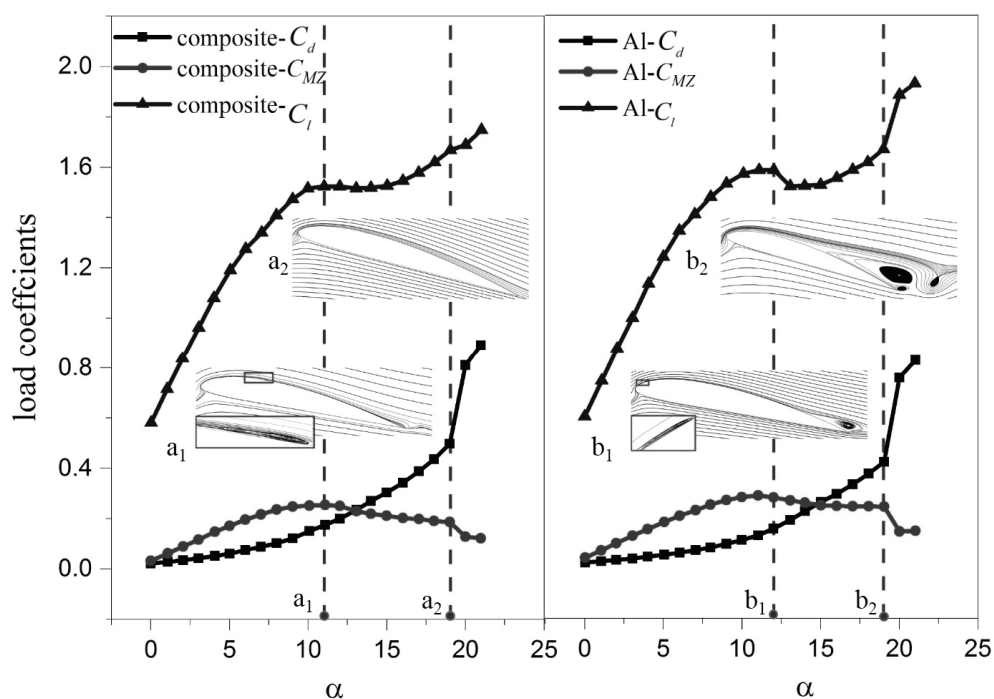


图 4 不同材料水翼 $Re=0.5 \times 10^6$ 水动力系数和特殊攻角流线

图 5 给出了 $Re=0.8 \times 10^6$ 和 $Re=1.2 \times 10^6$ 的两种水翼的升阻比随攻角和升力系数变化的曲线图。由图可知,当 $Re=0.8 \times 10^6$ 时,两种水翼的升阻比随着升力系数的增加而下降,随攻角的增加先增加后减小,且复合材料水翼的升阻比总是大于铝制水翼的升阻比。当 $Re=1.2 \times 10^6$ 时,两种水翼的升阻比均随着升力系数和攻角的增加先增大后减小,其中复合材料水翼的最大升阻比大于铝制水翼,并且达到最大升阻比时的攻角早于铝制水翼。

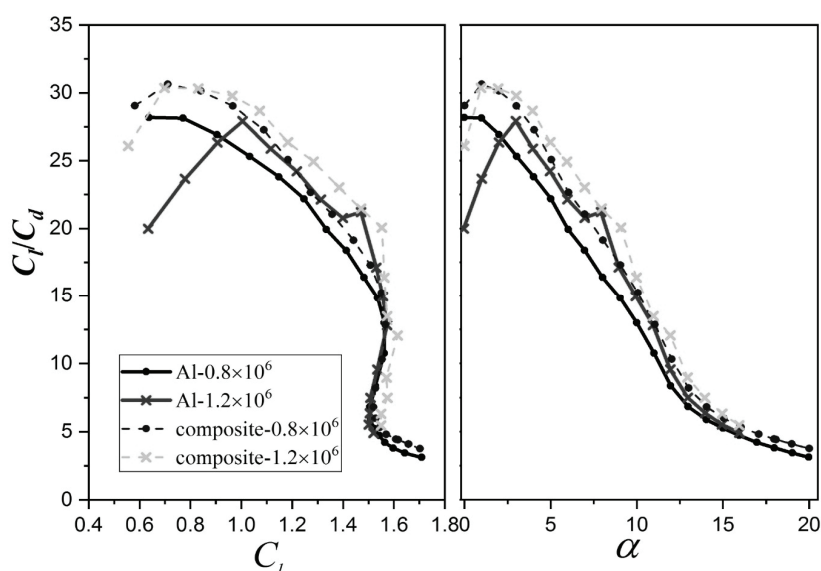


图 5 不同材料水翼升阻比随升力系数和攻角变化

4 结论

本研究以不同材料的 Clark-Y 水翼为研究对象, 通过高速水洞实验平台获取了水翼的水动力特性, 并对实验结果进行了研究分析, 得出以下结论。

(1) 两种水翼的升力系数均随攻角的增加呈现先增大后缓慢减小再迅速增加的趋势, 而阻力系数随着攻角的增加而增加, 俯仰力矩系数随着攻角的增加而减小, 同时不同材料水翼的水动力性能随雷诺数的增加无明显变化。

(2) 当攻角 $\alpha=12^\circ$ 时, 两种水翼前缘处均出现了转捩现象, 其中铝制水翼转捩位置更接近水翼前缘, 且其水翼尾部出现了尾缘涡, 而复合材料水翼尾缘处未形成尾缘涡; 当攻角 $\alpha=19^\circ$ 时, 铝制水翼产生了尾缘涡, 而复合材料水翼无尾缘涡形成。

(3) 两种水翼的升阻比均随着攻角和升力系数的增加先增大后减小, 且复合材料水翼的升阻比均大于铝制水翼, 并且达到最大升阻比时的攻角小于铝制水翼。

参考文献

- 1 黄伯云, 肖鹏, 陈康华. 复合材料研究新进展(上)[J]. 金属世界, 2007(2):46-48
- 2 Green JA. Aeroelastic tailoring of aft-swept high-aspect-ratio composite wings. J Aircraft 1987;24(11):812-9.
- 3 Yamane T, Friedmann PP. Aeroelastic tailoring analysis for preliminary design of advanced propellers with

- composite blades. *J Aircraft* 1993;30(1):119–26.
- 4 Young Y L, Baker J W, Motley M R. Reliability-based design and optimization of adaptive marine structures[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(2):244-253.
 - 5 Zarruk, G., Brandner, P., Pearce, B., and Phillips, A. W.. Experimental study of the steady fluid-structure interaction of flexible hydrofoils[J]. *Journal of Fluids and Structure*, 2014,51:326–343.
 - 6 王宁,黄彪,吴钦,王国玉,高德明. 绕水翼空化流动及振动特性的试验与数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*,2016,(04):321-327.
 - 7 Hanzhe Z , Qin W , Yongpeng L , et al. Numerical investigation of the deformation characteristics of a composite hydrofoil with different ply angles[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163:348-357.
 - 8 Avellan, F., Henry, P., and Rhyming, I. A new high speed cavitation tunnel for cavitation studies in hydraulic machinery. In *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division FED (1987)*, vol. 57, pp. 49-60.
 - 9 叶正寅, 张伟伟, 史爱明. 流固耦合力学基础及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
 - 10 Chae, E.J.,2015. *Dynamic Response and Stability of Flexible Hydrofoils in Incompressible and Viscous Flow*.University of Michigan.
 - 11 Theodorsen, T., 1935. *General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter*.

Experiment investigate on hydrodynamic characteristics of hydrofoils with different materials

LIU Yun-qing, WU Qin^{*}, CHEN Qian, HUANG Biao, ZHANG Han-zhe, WANG Guo-yu

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081.

Email: wuqin919@bit.edu.cn)

Abstract: The hydrodynamic characteristics of hydrofoils with different materials is studied using the high-speed cavitation tunnel. It is used to measure the hydrodynamic parameters and experimental phenomena. The experiment results show that, firstly, the transition has taken place in the identical incidence angle for the aluminum and composite hydrofoils, in which the position of the transition for the aluminum hydrofoil is closer to the leading edge of hydrofoil than that of the composite; as the incidence angle raise to about 19° , the lift coefficient of the aluminum hydrofoil is rapidly increase, while that of the composite hydrofoil is slowly in a growth; with the increasing incidence angles and lift coefficients, the lift-to-drag ratio is firstly increase, then decrease for both of the hydrofoils, in which that of the composition hydrofoil is larger than that of the aluminum hydrofoil.

Key words: Composite hydrofoil; Hydroelastic characteristic; Experimental study.