海水环境下玻璃纤维增强复合材料 力学性能演化规律研究

李景^{1,2}, 葛光男^{1,2,3}, 贾朋刚^{1,2}, 赵鹏^{1,2}, 侯世璞^{1,2}

(1.哈尔滨电机厂有限责任公司,哈尔滨 150040; 2.水力发电设备国家重点实验室,哈尔滨 150040; 3.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘要:目的研究海水环境下海流能发电机组叶片用玻璃纤维复合材料力学性能的变化规律。方法 在实验 室内通过海水浸泡试验、拉伸试验、弯曲试验以及剪切试验,测定叶片用玻璃纤维树脂基复合材料的吸水 特性,以及在人工海水介质中各项力学性能参数的演变规律。结果 随着浸泡时间的增加,玻璃纤维树脂基 复合材料吸水率先逐步增大、后趋于稳定,总吸水率约 0.075%。抗拉强度呈先降低、后提高、又降低的趋势,抗拉强度最高可超过 1100 MPa,最小值约为 940 MPa。弹性模量和弯曲强度呈逐渐降低的趋势,弹性 模量降幅约 9.5%,弯曲强度降幅约为 30%。弯曲模量变化起伏不定,变化幅度在 15%以内。材料剪切强度 呈先增大、后降低的趋势,最小值为 189 MPa,较初始值高 10 MPa。剪切模量呈先降低、后提高的现象, 在浸泡 28 d 时,剪切模量最小,为 16.4 GPa。结论 玻璃纤维增强树脂基复合材料经过长期海水浸泡后,拉 伸及抗剪切性能略有降低,但降幅不大,抗弯性能下降明显,需要在叶片结构设计和强度计算时,充分考 虑抗弯性能衰减的负面影响。

关键词:玻璃纤维增强复合材料;海水浸泡;力学性能 中图分类号:TB332 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2021)08-0059-06 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.011

Study on the Evolution of Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composite in Seawater Environment

LI Jing^{1,2}, GE Guang-nan^{1,2,3}, JIA Peng-gang^{1,2}, ZHAO Peng^{1,2}, HOU Shi-pu^{1,2}

(1. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Hydropower Equipment, Harbin 150040, China; 3. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: The variation of mechanical properties of glass fiber reinforced composite for blades of marine current power generation units under artificial seawater was studied. In the laboratory, the water absorption characteristics of glass fiber reinforced polymer matrix composites for blades and the evolution of mechanical property parameters in the artificial seawater me-

收稿日期: 2021-04-09; 修订日期: 2021-05-18

Received: 2021-04-09; Revised: 2021-05-18

• 59 •

基金项目:黑龙江省博士后科研启动金资助项目(LBH-Q14033)

Fund: Supported by the Heilongjiang Postdoctoral Scientific Research Development Fund (LBH-Q14033)

作者简介:李景(1983--),男,博士,高级工程师,主要研究方向为水力发电设备及汽轮发电机产品材料的应用。

Biography: LI Jing (1983—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: materials of hydroelectric equipment.

引文格式: 李景, 葛光男, 贾朋刚, 等. 海水环境下玻璃纤维增强复合材料力学性能演化规律研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 059-064. LI Jing, GE Guang-nan, JIA Peng-gang, et al. Study on the evolution of mechanical properties of glass fiber reinforced composite in seawater environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 059-064.

dium were investigated by seawater immersion test, tensile test, bending test and shear test. The results show that the water absorption of glass fiber reinforced polymer matrix composite increases initially and then gradually becomes stable with the increase of immersion time, and the final water absorption is about 0.075%. The tensile strength first decreases and then increases, and later it resumes decrease, while the maximum tensile strength can reach 1100 MPa and the minimum value is about 940 MPa. However, the elastic modulus and bending strength decrease gradually, and the decrease rates are about 9.5% and 30% respectively. The change range of bending modulus is within 15%. The shear strength of the material first increases and then decreases, with the minimum shear strength being 189 MPa, 10 MPa higher than the initial value. The shear modulus first decreases and then increases, and it decreased the lowest value, 16.4 GPa, after 28 d immersion. After immersion in seawater for a long time, the tensile and shear strength of the glass fiber reinforced resin matrix composites are slightly reduced, but the reduction is not large, while the bending strength are obviously reduced. Therefore, the negative effect of the degradation of the bending properties should be fully considered in the structural design and strength calculation of the blades.

KEY WORDS: glass fiber reinforced composite; immersion in seawater; mechanical properties

海洋环境的严酷性对海流能发电机组的生存造 成严峻的考验^[1-3]。对海流能机组的核心部件叶片而 言,其结构安全的恶化,不仅仅会影响能量捕获的效 率,甚至会造成对整个机组结构的破坏^[4-6]。受海洋 环境的影响,叶片存在梢尖发生的空蚀问题^[7]、水压 力差循环变化引起的压力脉动、高密度(相对空气) 水造成的高水推力、海水浸入造成的材料性能退化等 问题。因此,对海流能机组的叶片材料提出了更高的 要求:应在腐蚀性海水介质环境和空蚀的共同作用 下,能长期保持较高的强度和刚度水平,以及较高的 疲劳强度,以保证叶片能够承受 10⁷周次的反复载荷 作用,满足 20 a 的服役寿命要求^[8]。

基于上述因素,相对金属材料,采用增强型树脂 基复合材料进行海流能发电机叶片整体的设计和制 造,是一种相对较好的选择^[6-7,9]。目前,一些大尺 寸海流能发电机组叶片就是采用环氧树脂基碳纤维 (被称为 Prepreg 材料)或者碳纤维/玻璃纤维的复 合^[2,10-11]。GFRP 是以树脂为基体、玻璃纤维为增强 体组成的一类新材料。许多学者对 GFRP 复合材料在 静态条件下的力学性能做了大量研究。国内,在 20 世纪 90 年代初,董立明、夏源明等人^[12-13]最早开展 玻璃纤维束和单向玻璃纤维增强环氧树脂基复合材 料力学性能的研究。张磊和张硕等人^[14-15]研究了玻璃 纤维增强环氧树脂基复合材料顺纤维方向和垂直纤 维方向的准静态拉伸力学性能。王启强等人^[16]研究了 玻璃纤维与环氧树脂的配比、固化条件对玻璃纤维增 强环氧树脂基复合材料力学性能的影响。目前,国内 外对海洋环境下增强型树脂基复合材料刚强度演变 研究较少。

文中依据海流能发电机组的特点,研究了海水浸 入破坏对玻璃纤维增强树脂基复合材料的抗拉强度、 剪切强度等刚强度的影响规律,从而为海流能叶片用 复合材料的设计提供参考依据。

1 实验

1.1 材料

实验材料采用经表面处理的 S2 玻璃纤维,其性能参数见表 1。树脂基体选用天津合成材料研究所生产的 4,5-环氧环乙烷-1,2-二甲酸二缩水甘油酯 (TDE-85 环氧树脂),其为淡黄色黏性液体,环氧值 0.85 Eq/100 g,黏度为 2.0 Pa·s (25 ℃),其性能参数 见表 2。

1.2 方法

根据表 3 海水的成分配比,在实验室条件下配制 模拟海水。根据 ISO 62 "Plastic-Determination of water absorption"^[17]中的吸水率测试方法,对碳纤维复合材 料的吸水率情况进行测试分析。

Tab.1 Performance parameters of applied glass fiber										
Glass fiber	Number of single wire	Tensile strentgh/GPa	Modulus/GPa	Elongation/%	$Finesse/(g \cdot km^{-1})$	Density/(g·cm ⁻³)				
S2	1200	3.5	68	4	230	2.50				
表 2 树脂性能参数 Tab.2 Performance parameters of applied resin										
Resin type	Impact strength/(kJ·n	n ⁻²) Tensile strength/	GPa Modulus/	GPa Interfac	terface strength between S2 and resin/%					
TDE-85	10.98	78	3.7		66.8					

表 1 玻璃纤维性能参数

表 3 模拟海水成分 Tab.3 Composition of artificial seawater									
成分	NaCl	$MgCl_2$	$CaCl_2$	KCl	NaHCO ₃				
质量浓度 /(g·L ⁻¹)	24.530	5.2	1.16	0.695	0.201				

采用岛津 AGI-250 kN 电子拉力试验机进行拉伸试验、弯曲试验及剪切试验。拉伸试验按照 GB/T 1477—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》执行,弯曲试验按照 GB/T 3356—1999《单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法》执行,剪切试验按照 GB/T 3355—2005《纤维增强塑料纵横剪切试验方法》执行^[18-20]。

2 结果与讨论

2.1 吸水率

玻璃纤维增强复合材料吸水率随时间的变化规 律如图1所示。由图1可知,复合材料与传统的金属 材料不同,随着浸泡时间的延长,会吸收一部分的水, 造成质量的增加。对玻璃纤维增强复合材料而言,随 着浸泡时间的延长,吸水量有一个先逐步增大的趋 势。在浸泡时间超过150h以后,吸水率趋于稳定, 在0.075%左右。



图 1 玻璃纤维增强复合材料的吸水特性 Fig.1 water absorption characteristics of glass fiber composite

2.2 拉伸实验结果

海水浸泡时间变化对玻璃纤维增强复合材料抗 拉强度的影响规律如图 2 所示。可以看出,没有海水 浸泡的样品,抗拉强度为980 MPa。在海水中浸泡40 d 后,抗拉强度减小至940 MPa 左右。随着浸泡时间的 进一步延长,样品的抗拉强度又有所提高。总体来看, 随着浸泡时间由最开始到120 d,样品的强度表现出 先降低、后提高、又降低的趋势。样品的抗拉强度最 高时可超过1100 MPa,最小时也在940 MPa 左右。

玻璃纤维增强复合材料弹性模量随海水浸泡时间的变化情况如图 3 所示。未浸泡玻璃纤维增强复合

材料样品的弹性模量为 52 GPa。总体来看,随着海水浸泡时间的延长,试样的弹性模量呈降低的趋势。 玻璃纤维增强复合材料和碳纤维复合材料样品的泊松比结果如图 4 所示。玻璃纤维样品的泊松比在 0.3 左右,随海水浸泡时间的延长,变化较小。



图 2 玻璃纤维增强复合材料的抗拉强度在海水中的演化 规律

Fig.2 Evolution of tensile strength of glass fiber composite in seawater



图 3 玻璃纤维增强复合材料的弹性模量在海水中的演化 规律

Fig.3 Evolution of elastic modulus of glass fiber composite in seawater



图 4 玻璃纤维增强复合材料的泊松比在海水中的演化 规律

Fig.4 Evolution of Poisson's ratio of glass fiber composite in seawater

2.3 弯曲实验结果

玻璃纤维增强复合材料的弯曲强度在海水中的 变化规律如图 5a 所示。随着浸泡时间的延长,该种 材料的弯曲强度呈逐渐降低的变化趋势。从未浸泡前 的 2000 MPa 左右,浸泡 63 d 后,降低至 1400 MPa。 玻璃纤维增强复合材料弯曲弹性模量的变化规律如 图 5b 所示。玻璃纤维增强复合材料弯曲模量随海水 浸泡时间延长起伏不定,变化幅度在 15%以内。玻 璃纤维增强复合材料弯断能量和最大弯曲应变的变 化规律如图 5c、d 所示。弯断能量和最大弯曲应变 的变化规律与弯曲强度随海水浸泡时间的变化规律 一致。

2.4 剪切实验结果

玻璃纤维增强复合材料剪切强度在海水中的演 化规律如图 6a 所示。玻璃纤维复合材料的初始剪切 强度为 179 MPa,随着浸泡时间延长至 56 d,材料剪 切强度呈先增大、后降低的趋势。在浸泡 14 d 时, 剪切强度达到最大值,为 195 MPa。在浸泡 56 d 时, 降低至 189 MPa。玻璃纤维增强复合材料剪切模量在 海水中的演化规律如图 6b 所示。玻璃纤维复合材料 的初始剪切模量为 18 GPa 左右,随着浸泡时间的延 长,表现出先降低、后升高的趋势。在浸泡 28 d 时, 剪切模量最小,为 16.4 GPa。随后逐步提高,在浸泡 56 d 时,剪切模量最大,为 18.3 GPa。



图 5 玻璃纤维增强复合材料的弯曲性能在海水中的演化规律

Fig.5 Evolution of bending properties of glass fiber composite in seawater: a) bending strength; b) bending modulus; c) bending energy; d) maximum bending strain



图 6 玻璃纤维复合材料的剪切性能在海水中的演化规律

Fig.6 Evolution of shear properties of glass fiber composite in seawater: a) shear strength; b) shear modulus

2.5 讨论

玻璃纤维增强复合材料在海水介质中,纤维的吸 水性能非常弱,吸水过程主要来源于树脂基体及纤维/ 树脂界面。玻璃纤维增强复合材料在吸水过程中,其 综合性能变化主要来源于水分子浸入材料内部,导致 复合材料整体质量的增加,以及长期吸水过程导致树 脂基体发生水解、塑化,即水分子开始吸附在材料表 面,对树脂产生溶胀增塑,之后随着浸泡时间增长, 水分子逐渐破坏树脂中的官能团及—CH2—O—化学 键[21-22]。一般对玻璃纤维增强复合材料的吸水过程通 常采 Fick 定律进行描述^[23-24]。在吸水过程初始阶段, 水通过树脂基体的表面渗入基体,吸水速率呈直线上 升,吸水增重多,纤维/树脂界面黏性降低,导致材 料拉伸强度、弹性模量、弯曲强度和弯曲模量降低。 随着吸水量的增加,树脂产生溶胀增塑,导致抗拉强 度增大[22]。当吸水量达到饱和状态时,吸水率趋于稳 定,抗拉强度、弯曲强度、弯曲模量等趋于稳定,有 的呈现小幅度上升。吸水后期,水分子逐渐破坏树脂 中的官能团及—CH2—O—化学键,水分子和氯化钠 通过材料表面的微裂纹迅速渗透进材料内部,和玻璃 纤维网络结构中的粒子发生各种交换反应,同时伴随 对玻璃纤维基体产生破坏,导致抗拉强度降低^[22]。由 于在吸水初期, 玻璃纤维增强树脂基复合材料出现后 固化的现场,使剪切强度呈现增大的现象,然后随着 吸湿率的增大,逐渐减小,之后趋于稳定。

3 结语

1)对于玻璃纤维增强复合材料的吸水率而言, 随着浸泡周期的延长,先是逐步增大,在浸泡时间超 过150h以后,趋于稳定。

2)随着材料浸泡周期的延长,玻璃纤维增强复 合材料的抗拉强度虽然在起始阶段略有下降,但长期 来看,相比初始状态有所增大。弹性模量则表现出随 浸泡周期的延长呈降低的趋势,降幅约 9.5%。泊松 比受海水浸泡的影响不大。

3)玻璃纤维增强复合材料随着浸泡时间延长至 56 d 时,材料剪切强度呈先增大、后降低的趋势,最 小值为 189 MPa,较初始值高 10 MPa。剪切强度模 量呈先降低、后升高的现象,在浸泡 28 d 时,剪切 模量最小,为 16.4 GPa。

4)玻璃纤维增强复合材料的弯曲强度随浸泡周 期的延长呈降低的趋势,降幅约为 30%,对应的弯 曲能量和弯曲最大应变均呈现出相近的变化趋势。 这说明海水的长期浸泡使得玻璃纤维增强复合材料 的抗弯性能呈下降趋势,需要在进行潮流机组叶片 设计时予以重点考虑,避免叶片在较大弯矩下发生 失效。

参考文献:

- FRAENKEL P L. Power from marine currents[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part A: Journal of power and energy, 2002, 216(1): 1-14.
- [2] WINTER A I. Differences in fundamental design drivers for wind and tidal turbines[C]//OCEANS 2011, Santander: IEEE, 2011.
- [3] 邱飞.水平轴潮流能发电装置海洋环境载荷与可靠性分析[D].青岛:中国海洋大学,2012.
 QIU Fei. Environmental load and reliability analysis of horizontal axis turbine tidal current power generation[D].
 Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [4] NG K W, LAM W H, PICHIAH S. A review on potential applications of carbon nanotubes in marine current turbines[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 28: 331-339.
- [5] 张建华,杨思远,孙科,等. 潮流能水轮机复合材料叶 片优化设计[J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1561-1566. ZHANG Jian-hua, YANG Si-yuan, SUN Ke, et al. Optimal design of composite blades of tidal current energy turbine[J]. Renewable energy resources, 2018, 36(10): 1561-1566.
- [6] 林奇峰,周大庆,赵文龙.叶片材料及根部结构对潮流 能水轮机性能的影响[J].可再生能源,2017,35(4): 627-632.
 LIN Qi-feng, ZHOU Da-qing, ZHAO Wen-long. The influence of blades material and roots structure on the performance of tidal current turbine[J]. Renewable energy resources, 2017, 35(4): 627-632.
- [7] NICHOLLS-LEE R F, S R TURNOCK, S W BOYD. Simulation based optimisation of marine current turbine blades[J]. 2008,
- [8] GROGAN D M, LEEN S B, KENNEDY C R, et al. Design of composite tidal turbine blades[J]. Renewable energy, 2013, 57: 151-162.
- [9] SÆTERSTAD M L.Dimensioning loads for a tidal turbine[D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [10] DOUGLAS C A, HARRISON G P, CHICK J P. Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part M: Journal of engineering for the maritime environment, 2008, 222(1): 1-12.
- [11] HULSE M, CRONIN J, TUPPER M. Advanced composite materials for tidal turbine blades[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2011: 279-287.
- [12] 董立民,夏源明,杨报昌. 纤维束的冲击拉伸实验研究
 [J]. 复合材料学报, 1990, 7(4): 9-15.
 DONG Li-min, XIA Yuan-ming, YANG Bao-chang. Tensile impact testing of fiber bundles[J]. Acta materiae Compositae sinica, 1990, 7(4): 9-15.
- [13] 夏源明, 王兴. 单向玻璃纤维增强环氧树脂在冲击拉 伸时的一维本构方程[J]. 复合材料学报, 1994, 11(4): 110-116.

- [14] 张硕,姚宁,吴继平,等.玻璃纤维增强环氧树脂复合 材料的力学性能[J].电工材料,2016(1):11-14,19.
 ZHANG Shuo, YAO Ning, WU Ji-ping, et al. Mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composite material[J]. Electrical engineering materials, 2016(1): 11-14.
- [15] 张磊,孙清,王虎长,等.E 玻璃纤维增强环氧树脂基 复合材料力学性能试验研究[J].电力建设,2010,31(9): 118-121.
 ZHANG Lei, SUN Qing, WANG Hu-chang, et al. Experimental study on the mechanical properties of E-glass fiber/epoxy composite material[J]. Electric power construction, 2010, 31(9): 118-121.
- [16] 王启强,彭龙贵. 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的 力学性能研究[J]. 化工时刊, 2016, 30(7): 4-7.
 WANG Qi-qiang, PENG Long-gui. Mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Chemical industry times, 2016, 30(7): 4-7.
- [17] ISO 62—2008, 塑料吸水率的测定[S].
 ISO 62—2008, Plastics-determination of water absorption[S].
- [18] GB/T 3356—1999, 单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].

GB/T 3356—1999, Test method for flexural properties of unidirectional fiber reinforced plastics[S].

[19] GB/T 1447—2005, 纤维增强塑料拉伸性能试验方法
 [S].
 (SD T 1447 2005 Film if a labeling in the second secon

GB/T 1447—2005, Fiber-reinforced plastics composites Determination of tensile properties[S].

[20] GB/T 3355—2005, 纤维增强塑料纵横剪切试验方法 [S].

GB/T 3355—2005, Test method for longitudinal transverse shear (L-T shear) properties of fiber reinforced plastics[S].

- [21] 董琳琳,黄故.海水环境下玻璃纤维/聚酯基复合材料的性能研究[J]. 天津工业大学学报,2007,26(3):25-27. DONG Lin-lin, HUANG Gu. Study on properties of glass fiber/unsaturated polyester composite immersed in sea water[J]. Journal of Tianjin polytechnic university, 2007, 26(3):25-27.
- [22] ADAMS R D, SINGH M M. The dynamic properties of fibre-reinforced polymers exposed to hot, wet conditions[J]. Composites science and technology, 1996, 56(8): 977-997.
- [23] MA Gao, YAN Li-bo, SHEN Wen-kai, et al. Effects of water, alkali solution and temperature ageing on water absorption, morphology and mechanical properties of natural FRP composites: Plant-based jute vs. mineralbased basalt[J]. Composites part B: Engineering, 2018, 153: 398-412.
- [24] REDDY G, KRISHNA V, SHANKER K. Tensile and water absorption properties of FRP composite laminates without voids and with voids[J]. Procedia engineering, 2017, 173: 1684-1691.