

海洋污损生物藤壶生长过程及附着强度研究

李友炽¹, 王 贵¹, 吴敬权¹, 邓培昌², 张福泉¹, 黄俊毅¹

(1. 广东海洋大学 机械工程学院, 广东 湛江 524000; 2. 广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524000)

摘要: 研究海洋污损生物藤壶(*Barnacle*)不同生长阶段附着强度, 可为科学制定藤壶清除规范及设计相关机械设备提供依据。本文采用浸泡法在湛江调顺岛(21°31'N, 110°41'E)实海中挂板, 结合形貌观察藤壶生长过程, 利用自行设计的剪切强度测试装置, 选取网纹藤壶测试不同生长阶段剪切强度。结果表明: 试板浸泡 10 d, 幼体藤壶开始附着; 30 d 试板表面藤壶覆盖面积约占 30%, 基底直径 1~6 mm, 部分藤壶死亡形成空壳; 60 d 试板约 50% 面积被藤壶覆盖, 试板表面有覆膜, 空壳现象加剧, 藤壶基底直径最大达 10 mm; 90 d 试板约 95% 面积被藤壶覆盖, 出现藤壶相叠现象, 基底直径 1~13 mm。藤壶附着生长过程中, 剪切强度变化符合“快-慢”的特点, 以藤壶基底直径为变量, 构建藤壶剪切强度 Logistic 增长模型, 决定系数 $R^2=0.99$, 说明模型拟合良好。利用构建的 Logistic 增长模型将藤壶剪切强度划分为速增期(基底直径 4.0~6.4 mm), 缓增期(基底直径 6.4~8.7 mm)及渐停期(基底直径 >8.7 mm) 3 个阶段。结合藤壶附着生长过程, 藤壶在附着后采用机械方式清除的最佳清除时期在速增期。

关键词: 网纹藤壶(*Reticulated barnacle*); 生长过程; 实验装置; 剪切强度; Logistic 增长模型

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)8-0060-08

DOI: 10.11759/hyxx20221104002

海洋污损生物指附着在船舶、浮标、海底管线、养殖设施等海洋工程装备表面, 对人类经济活动产生不良影响的动物、植物和微生物的总称^[1]。海洋污损生物附着是长期且复杂的自然选择、生态演替过程^[2]。污损生物大量附着会降低舰船航速, 堵塞海水管道系统, 降低水中设备、仪表及转动部件的灵敏度, 干扰海洋声学仪器正常工作, 增加海洋工程设施重量, 加大其外载荷, 削弱抵抗风浪能力, 缩短使用寿命^[3-5]。此外, 海洋污损生物在金属表面附着改变腐蚀环境, 进一步增加了金属材料发生局部腐蚀或腐蚀穿孔的风险, 严重影响金属构件的使用寿命及安全^[6-8]。海洋污损生物清除是人类开发海洋资源不可逾越的障碍, 也是各国迫不及待需要解决的问题。

NOBUHIRO^[9]根据海洋污损生物对基体附着力大小分为微污损生物, 软性污损生物和硬性污损生物。藤壶(*Barnacle*)属于硬性污损生物^[10-11], 是南海海域具有代表性的一类海洋污损生物, 具有很好的环境适应能力, 繁殖能力较强^[12-13]。幼体藤壶分泌藤壶胶将藤壶钙质外壳与附着基体黏附在一起^[14]。藤壶胶具有粘性大、不溶于水的特点^[15]。成年藤壶分泌的胶结厚度约为 5~6 μm , 一旦附着, 若没有受到外力作用, 便不会移动或分离^[16-19]。目前, 关于藤壶污

损防除的研究主要集中于藤壶胶成分分析, 藤壶附着强度研究相对较少。HUI 等^[20]建立了垂直力作用下藤壶脱落力学模型, 通过有限元模拟分析藤壶基底直径 1.5~5 mm 的附着强度, 然而未考虑到藤壶在海洋环境下生长的复杂性以及基底直径大于 5 mm 后的附着强度变化。HUANG 等^[21]建立了剪切力作用下藤壶脱落力学模型, 主要讨论 kendall 模型的适用性和非均匀性的影响, 藤壶附着强度变化问题仍然没有得到很好解决。

藤壶附着强度测试根据加载方式不同分为拉伸强度测试和剪切强度测试。YULE 等^[22]设计一种藤壶拉伸强度测试装置如图 1a, 用镊子将藤壶体掏空, 向空壳内注入氰基丙烯酸酯黏合剂固定钢丝绳, 再

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 广东省海洋装备及制造工程技术研究中心建设资助项目(A16287)

[Foundation: Supported Project for the Construction of Guangdong Provincial Marine Equipment and Manufacturing Engineering Technology Research Center, No. A16287]

作者简介: 李友炽(1993—), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事海洋工程装备及材料腐蚀与防护工作, E-mail: leeyochi0920@163.com; 吴敬权(1981—), 通信作者, 广东兴宁人, 硕士, 实验师, 主要从事海洋工程装备及材料腐蚀与防护工作, E-mail: lengfeng402@163.com

使用拉伸装置测试其附着强度。但在掏空藤壶时，易破坏藤壶钙质外壳，影响钙质基底的黏接，且无法保证氰基丙烯酸酯粘合剂对藤壶拉伸强度的影响。刘建林等^[23]设计了海洋生物黏附力测试装置如图 1b，力传感器首端用连接线连接沙盒，末端使用专用夹具夹住附着物，向沙盒里缓慢施加水，直至

附着物脱落。此装置的力传感器处于悬空状态，运动过程中无法保证测量的稳定性和准确性，需要设计专门的夹具。相较而言，本文设计的剪切强度测试装置无需对藤壶进行处理，且不需设计专用夹具，操作简单，效率较高，便于对不同生长阶段的藤壶进行测试。

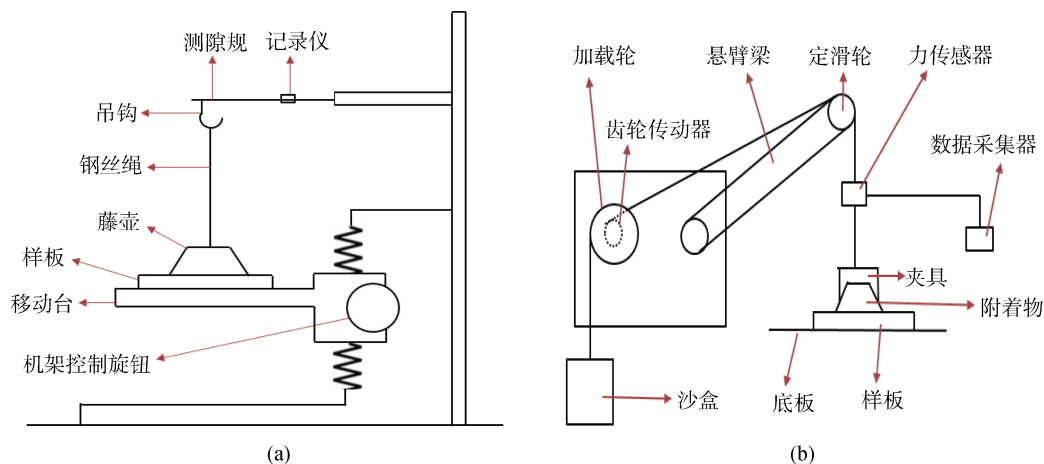


图 1 拉伸强度测试装置示意图

Fig.1 Schematic of the tensile strength test device

a. 藤壶拉伸强度测试装置^[22]; b. 海洋生物黏附力测试装置^[23]

藤壶剪切强度测试国内尚无相关试验标准，美国材料试验协会制定试验标准 D5618-20^[24]。ASTM D5618-20 试验规范中，通过手持测力装置，向藤壶基底施加力，直至将其从表面移除，然而手持测力计向藤壶施力过程无法保证力的均衡性且不能记录力的变化和峰值。为获取不同生长阶段藤壶附着强度，在湛江调顺岛(21°31'N, 110°41'E)实海中进行挂板，选取南海海域常见的网纹藤壶为研究对象，设计剪切法测试藤壶附着强度试验装置，结合藤壶附着生长过程，测试藤壶不同生长阶段的附着强度。通过分析藤壶在不同生长阶段的附着强度，为科学制定藤壶清除规范及设计相关机械设备提供依据。

25 mm×25 mm×3 mm，将角钢焊接成 3 档框架，尺寸为 950 mm×450 mm。使用扎带将试板固定在框架上，试板与框架之间保持一定的间距，如图 2 所示。

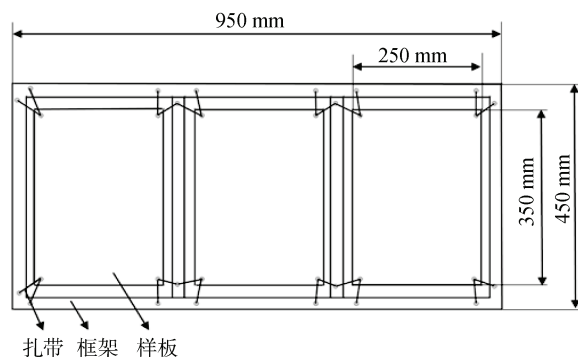


图 2 试板固定示意图

Fig. 2 Schematic of specimen fixation

1 实验材料与方法

1.1 试板的制备

试验材料选取钛合金板(TC4)，制备 3 个平行样，试板尺寸为 350 mm×250 mm×3 mm，并在试板的四个角钻孔，直径为 8 mm。实验前，分别利用丙酮，无水乙醇对试板进行除油、脱水处理。试板固定框架材料采用 304 不锈钢材质的角钢，截面尺寸为

1.2 藤壶剪切强度测试装置设计

图 3 是剪切法测试藤壶附着强度装置，主要包括工作台、驱动模块、推拉力计、刀具、测试平台和升降台。驱动模块和升降台分别设在工作台的两端，其中驱动模块包括直流电源、步进电机、两相驱动器和 DKC-Y110 步进电机控制器，测试平台设在

升降台上,推拉力计的一端与驱动模块的输出端连接,另一端与刀具连接;测试平台用于固定试板,驱动模块用于驱动刀具并对样板上的测试藤壶底部施加作用力。图4是剪切强度测试装置实体图,由于藤壶之间间距较小,且为避免撞击,试验前先在DKC-Y110步进电机控制器中设置步进电机运行速度为1 mm/s,试板固定在测试平台,调节测试平台上的Y轴运动模组,使待测藤壶处于刀具中间位置,再调整升降台在Z轴方向运动,使刀具底面尽可能贴近试板,启动步进电机驱动刀具在X轴方向运动,直至测试完成。与手持测力装置相比,藤壶剪切强度测试装置在步进电机的驱动下,能够提供稳定的运行速度、路径和方向,优化了手持测力装置操作角度偏差以及力不稳定的情况。且在测试过程中,推拉力计所受的阻力变化可通过数据端口传输到上位机软件保存,简单方便。

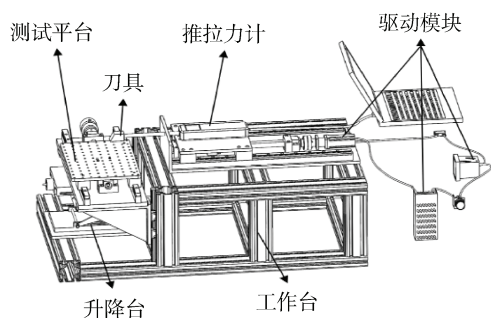


图3 测试装置模型图

Fig. 3 Test device model diagram

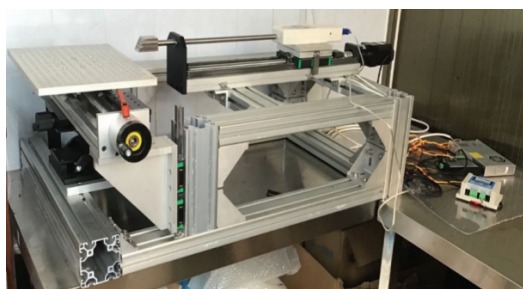


图4 测试装置实体图

Fig. 4 Physical diagram of test equipment

1.3 试验方法

试板投放于湛江调顺岛(21°31'N, 110°41'E),全年月平均水温16.3~32.6℃,盐度为24.2~26.9,pH在8.10~8.22,浊度在8.60~13.6 FTU范围内。将试板浸入海中2 m深处,使用Nikon D800E相机记录藤壶不同生长阶段形貌,使用超景深显微镜对藤壶

脱落面进行观察,使用数显游标卡尺测量藤壶基底直径等生长参数,藤壶剪切强度按照如下公式进行计算:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

其中, D 为藤壶基底直径(mm); A 为藤壶基底附着面积(mm²); F 为剪切力(N); τ 为藤壶剪切强度(MPa)。

2 实验结果与分析

2.1 藤壶的生长过程

藤壶生活周期有4个阶段^[25],分别为无节幼虫时期、金星幼虫时期、幼体藤壶和成体藤壶,主要生活方式分为浮游生活和固着生活,金星幼虫探寻到合适的区域后就会开始附着。图5为试板在海水中浸泡不同时期藤壶的生长情况。在浸泡10 d时,观察有幼体藤壶附着在试板表面,个体较小,基底直径约1~3 mm(图5a)。幼体藤壶分泌藤壶初生胶,将藤壶钙质外壳与试板黏附在一起。30 d时,藤壶数量逐渐增多,覆盖试板约30%面积,基底直径约1~6 mm,幼体藤壶出现死亡,形成空壳(图5b),部分空壳在海水的冲刷下脱落。60 d时,试板50%的面积被藤壶覆盖,试板表面存在一层覆膜,对藤壶的生存造成影响,空壳现象加剧,该时期存活下来的藤壶基底直径达10 mm(图5c)。90 d时,试板表面约95%的位置被藤壶覆盖,个别位置出现藤壶相叠现象,藤壶基底直径大小不一,约为1~13 mm(图5d)。根据BERTALANFFY^[26]构建的生物个体生长模型: $L' = r_B[L_{\infty} - L(t)]$, L 为 t 时刻藤壶基底直径, t 为生长时间, r_B 代表生长率, L_{∞} 为藤壶个体极限基底直径,这表明藤壶与大多数无脊椎动物类似,若生长时间足够长,同一种群的个体最终趋向于相同大小,即藤壶的生长过程可以使用生长时间和藤壶基底直径表示。

试板表层除了可见污损生物,还存在颗粒状的“生物泥”。“生物泥”由微生物、有机或无机颗粒沉积、微藻、苔藓虫幼体、管栖多毛类的泥管和石灰质管组成,如图6所示。“生物泥”的形成是因为细菌和硅藻等微生物膜加上有机或无机颗粒的运动、黏附和沉积作用,使微生物膜增厚^[27]。藤壶幼体在生物膜上附着,以微生物为饵料繁衍,与多种生物竞争,最后因繁殖力强、数量大,在一定时期内成为优势群体。

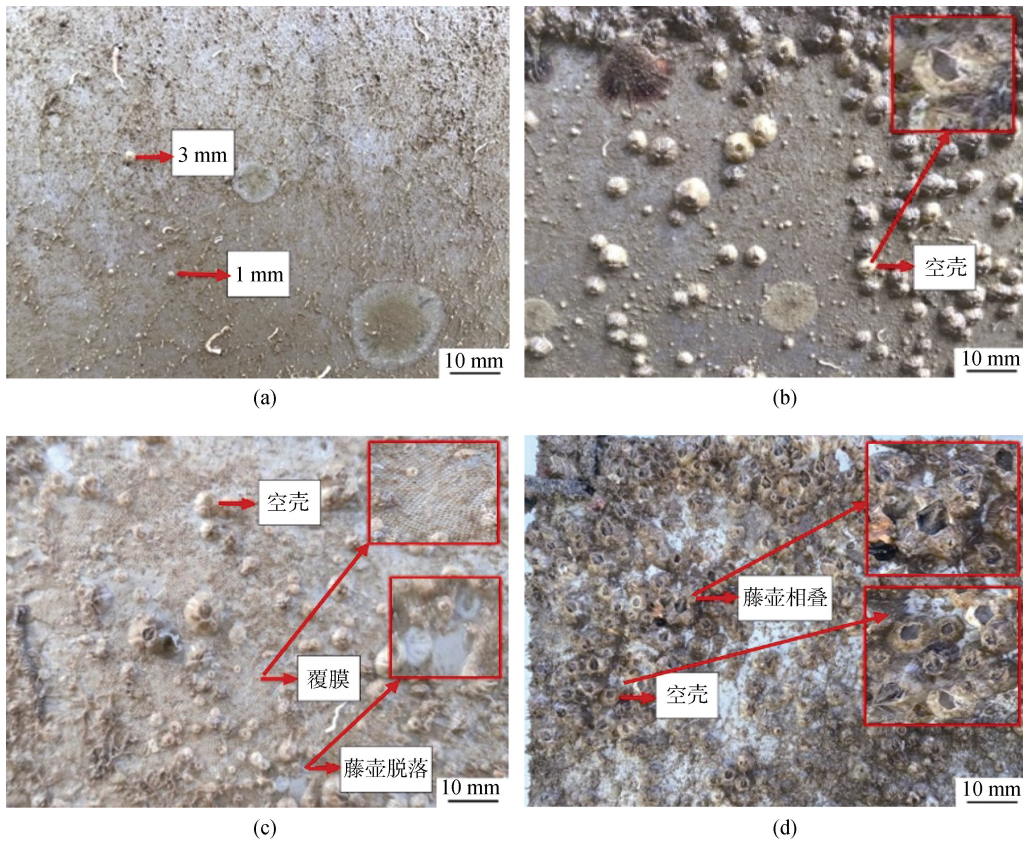


图 5 试板在海水中浸泡不同时期藤壶的生长

Fig. 5 Growth of barnacles in different periods when the samples were immersed in seawater
a. 10 d; b. 30 d; c. 60 d; d. 90 d

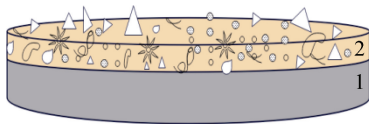


图 6 试板表面附着组成结构示意图

Fig. 6 Schematic of specimen surface attachment composition structure

1. 基底; 2. “生物泥”: 微生物、有机或无机颗粒沉积、微藻、苔藓虫幼体、管栖多毛类的泥管、石灰质管等

2.2 藤壶不同生长阶段剪切强度测试结果

对不同生长阶段的藤壶进行筛选, 将外壳破损、开裂、空壳和基底隆起的藤壶清除, 保留基底平坦且完全附着于试板上的藤壶进行测试, 测试样本数为 200。图 7 为藤壶脱落后试板的表面形貌图。藤壶从试板上脱落后, 使用超景深显微镜对试板上藤壶脱落位置进行观察, 发现表面平整光滑, 条纹清晰。BERGLIN 等^[28]通过电子显微镜和红外光谱分析表明钙以方解石的形式存在于藤壶的钙质外壳和基底中。

方解石由不规则的柱状碳酸钙晶体排列而成, 每个晶体间由有机基质连接, 受到外力时, 裂纹会沿着碳酸钙向外扩展, 因此方解石的断裂韧性相对薄弱^[29]。故在对藤壶进行剪切强度测试时, 藤壶钙质外壳受力

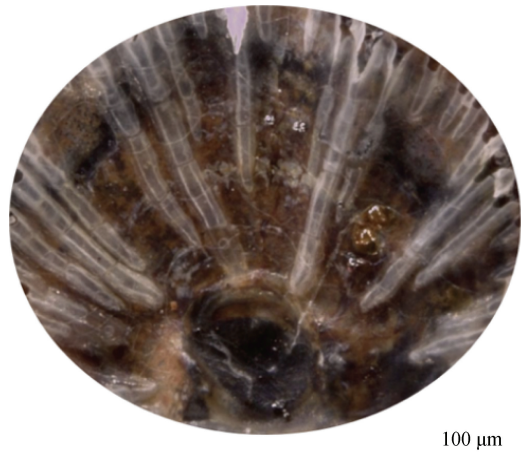


图 7 藤壶脱落后试板的表面形貌图

Fig. 7 Surface topography of the hanging plate after barnacle shedding

并不会发生变形。同时,根据 ASTM D5618-20 试验规范要求,将测试中藤壶基底在试板上残留面积超过 10%的数据剔除,结果如图 8 所示。从图中可以看出,随着藤壶基底直径的增大,藤壶剪切强度总体趋势在逐渐增大,数据点相对集中,表明藤壶直径与剪切强度之间具有较强的相关性。

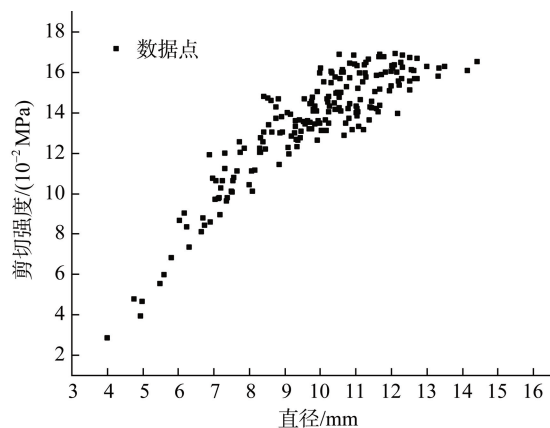


图 8 藤壶直径与剪切强度散点图

Fig. 8 Relationship between the diameter and shearing strength of barnacle

图 9 为藤壶单位直径范围平均剪切强度。藤壶剪切强度测试受环境因素或人为操作误差等多种因素影响,测试结果存在不一致的偏差,对藤壶单位直径范围的剪切强度取平均值作图,图中的红色误差棒为上偏差,蓝色误差棒为下偏差。从图中的变化趋势可以看出,藤壶剪切强度变化呈现“快-慢”的特点,符合 Logistic 曲线方程的变化规律,因此使用 Logistic 曲线方程进行拟合。

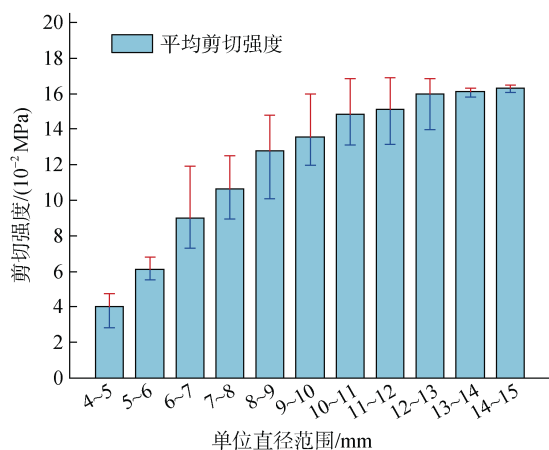


图 9 藤壶单位直径范围平均剪切强度

Fig. 9 Average shearing strength per unit barnacle diameter range

利用 Logistic 曲线方程对藤壶剪切强度变化进行拟合, Logistic 曲线方程:

$$\tau = \frac{a}{1 + b \exp^{-cD}}, \quad (3)$$

式中: τ 为藤壶剪切强度,单位 MPa; D 为藤壶基底直径,单位为 mm, a 、 b 和 c 为待求系数。经过 Logistic 曲线方程拟合,求得 $a=16.29$; $b=35.46$; $c=0.56$ 。即拟合方程所得 Logistic 曲线方程为:

$$\tau = \frac{16.29}{1 + 35.36 \exp^{-0.56D}}, \quad (4)$$

$R^2=0.99$, 说明方程拟合良好,如图 10。

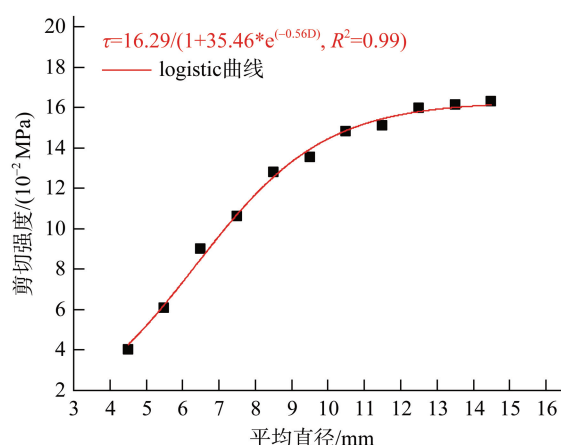


图 10 单位基底直径范围下的藤壶剪切强度平均值拟合
Fig. 10 Fitting of barnacle average shearing strength at per unit diameter range

对拟合求得的 Logistic 曲线方程求二阶导,公式如下:

$$\tau'' = \frac{abc \exp^{-cD} (bc \exp^{-c} - c)}{(1 + b \exp^{-cD})^3}, \quad (5)$$

令 $\tau''=0$, 求得 D 的值为 6.4mm, 在该点藤壶剪切强度增长速率最大,同时也是剪切强度由速增至缓增的分界点。

对 Logistic 曲线方程求三阶导,公式如下:

$$\tau''' = \frac{abc^3 \exp^{-cD} (1 - 4b \exp^{-cD} + b^2 \exp^{-2cD})}{(1 + b \exp^{-cD})^4}, \quad (6)$$

令 $\tau'''=0$, 求得 D 值为 4.0 和 8.7 mm。 $D=4.0$ mm 是藤壶附着后至剪切强度开始速增的分界点,而 8.7 mm 是剪切强度由缓增至渐停的分界点。

3 个点均为 Logistic 曲线方程的拐点,结合所测数据将藤壶剪切强度变化情况划分为 3 个阶段,速增期

4.0~6.4 mm, 该时期剪切强度增长速率逐渐加快, 到 6.4 mm 时, 增速达到最大。WENDT 等^[30]研究表明, 当藤壶的基底直径达到 5~6 mm 时, 藤壶的生长速度相对较快, 藤壶胶产生的速度也更快, 因此藤壶剪切强度变化也处于顶峰。缓增期 6.4~8.7 mm, 剪切强度增速由最大逐步减小, 到达 8.7 mm 后增速逼近 0。STAFSLIEN 等^[31]研究发现大多数藤壶在它们基底直径达到 7~8 mm 时, 已经有成熟卵巢, 藤壶的生长能量转变为生殖过程的能量, 生长速度也逐渐减缓, 藤壶胶分泌也减少, 故藤壶剪切强度变化趋向于平缓。8.7 mm 后是渐停期, 此时增速趋向于 0, 藤壶剪切强度逐渐趋于平稳。结合藤壶附着生长过程, 藤壶在附着后采用机械方式清除的最佳清除时期为速增期, 缓增期剪切强度增长速率减缓, 但依旧保持增长趋势, 此时清除效果与速增期对比较差, 进入渐停期, 剪切强度趋于平稳。

3 结论

钛合金试板在实海中浸泡 10 d, 观察发现幼体藤壶附着于试板表面, 基底直径 1~3 mm。30 d 时, 试板表面藤壶数量逐渐增多, 覆盖面积约 30%, 基底直径约 1~6 mm, 藤壶出现死亡, 形成空壳, 在海水的冲刷下脱落。60 d 时, 试板约 50% 面积被藤壶覆盖, 试板表面有一层覆膜, 对藤壶的生存造成影响, 空壳现象加剧, 该时期藤壶最大基底直径达 10 mm。90 d 时, 试板表面约 95% 面积被藤壶覆盖, 个别位置出现藤壶相叠现象, 基底直径 1~13 mm。

藤壶附着生长过程中, 剪切强度随基底直径增大而增大, 其变化符合“快-慢”的增长特点; 以藤壶基底直径作为变量, 利用 Logistic 曲线方程对藤壶剪切强度进行拟合, 得到 Logistic 增长模型为:

$$\tau = \frac{16.29}{1 + 35.46 \exp t^{-0.56D}}, R^2 = 0.99, \text{说明拟合效果良好。}$$

根据 Logistic 增长模型将不同生长阶段的藤壶剪切强度变化划分为速增期(基底直径 4.0~6.4 mm), 缓增期(基底直径 6.4~8.7 mm)及渐停期(基底直径 >8.7 mm)3 个阶段。结合藤壶变态发育附着后的生长过程, 可知藤壶在附着后采用机械方式清除的最佳清除时期为速增期, 该时期藤壶生长时间约 30 d; 60 d 后, 藤壶基底直径达到 10 mm, 进入剪切强度渐停期, 藤壶剪切强度变化不明显。

参考文献:

[1] YEBRA D M, KIIL S, DAM-JOHANSEN K. Anti-

fouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly anti-fouling coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2004, 50(2): 75-104.

[2] VENKATESAN R, MURTHY P S. Macrofouling Control in Power Plants[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.

[3] SWIFT M R, FREDRIKSSON D W, UNREIN A, et al. Drag force acting on Biofouled net panels[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35: 292-299.

[4] 段继周, 刘超, 刘会莲, 等. 海洋水下设施生物污损及其控制技术研究进展[J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 162-177.

DUAN Jizhou, LIU Chao, LIU Huilian, et al. Research progress of biofouling and its control technology in marine underwater facilities[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(8): 162-177.

[5] 陈长春, 项凌云, 刘汉奇. 海洋污损生物藤壶的附着与防除[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(4): 621-624.

CHEN Changchun, XIANG Lingyun, LIU Hanqi. Adhesion mechanism and prevention of marine biofouling barnacle[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(4): 621-624.

[6] PESIKA N S, YU T, ZHAO B X, et al. Israelachvili. Peel-Zone model of tape peeling based on the gecko adhesive system [J]. *The Journal of Adhesion*, 2007, 83(4): 383-401.

[7] CICCOTTI M, GIORGINNI B, VALLET D, et al. Complex dynamics in the peeling of an adhesive tape[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003, 24(2): 143-151.

[8] 汪江伟. 海洋污损生物环境下钙质层对 Q235 碳钢腐蚀行为影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

WANG Jiangwei. Study of calcareous deposit formed by cathodic protection for anti-corrosion of Q235 carbon steel in bio-fouling environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.

[9] NOHUHIRO F. Biofouling and antifouling[J]. *The Royal Society of Chemistry*, 2004, 21: 94-104.

[10] JEAN-PHILIPPE M, CLAIRE H. Challenges for the development of new non-toxic antifouling solutions[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10: 4623-4637.

[11] 彭文山, 刘少通, 郭为民, 等. 两种不锈钢在港口海水环境中的腐蚀行为和规律研究. *装备环境工程*, 2020, 17(7): 76-83.

PENG Wenshan, LIU Shaotong, GUO Weimin, et al. Corrosion behavior and regularities of two stainless steels in seawater environment of different harbors[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(7): 76-83.

- [12] 陈新, 唐敏, 刘秋好, 等. 藤壶黏附研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(7): 150-156.
CHEN Xin, TANG Min, LIU Qiuyu, et al. The research progress in the attachment of barnacles[J]. Marine Sciences, 2017, 41(7): 150-156.
- [13] 胥震, 欧阳清, 易定和. 海洋污损生物防除方法概述及发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(3): 192-198.
XU Zhen, OU YANG Qing, YI Dinghe. Antifouling method of marine fouling organisms-A review[J]. Corrosion Science & Protection Technology, 2012, 24(3): 192-198.
- [14] LEE C. Larval development of *Balanus reticulatus* Utinomi, 1967 (Cirripedia, Thoracica) and a comparison with other barnacle larvae[J]. Journal of Plankton Research, 1999, 21(11): 2125-2142.
- [15] 段东霞. 污损生物附着机理及酶在生物防污中的应用[J]. 海洋科学, 2011, 35(7): 107-112.
DUAN Dongxia. The adhesive strategies of fouling organism and application of enzyme in antibiofouling[J]. Marine Sciences, 2011, 35(7): 107-112.
- [16] SMITH A M, CALLOW J A. Biological adhesives[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [17] BARLOW D E, DICKINSON G H, ORIHUELA B, et al. In situ ATR-FTIR characterization of primary cement interfaces of the barnacle *Balanus amphitrite*[J]. Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, 2009, 25(4): 359-366.
- [18] RAMAN S, KUMAR R. Interfacial morphology and nanomechanics of cement of the barnacle, *Amphibalanus reticulatus* on metallic and non-metallic substrata[J]. Biofouling, 2011, 27(6): 569-577.
- [19] LI C, WANG G, CHEN K Y, et al. Mechanical analysis of a scraping method to remove attached barnacles[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(3): 150-164.
- [20] HUI C Y, LONG R, WHAL K J, et al. Barnacles resist removal by crack trapping[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(59): 868-879.
- [21] HUANG G Y, ZHOU Y N. A mechanical model for the detachment of barnacles under tangential forces[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 799-804.
- [22] YULE A B, WALKER G. The adhesion of the Barnacle, *Balanus Balanoides*, to slate surfaces[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1984, 64(1): 147-156.
- [23] 刘建林, 赵德敏, 刘赛. 海洋生物黏附力简易测试装置[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(5): 92-94.
LIU Jianlin, ZHAO Demin, LIU Sai. Simple test device for adhesion of marine organisms[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(5): 92-94.
- [24] American Society for Testing and Materials Committee. D 5618-2020 standard test method for measurement of barnacle adhesion strength in shear[S]. Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2020.
- [25] CRISP D J, BOURGET E. Growth in barnacles[J]. Advance in Marine Biology, 1985, 22: 199-244.
- [26] BERTALANFFY L V. Untersuchungen Über die Gesetzlichkeit des Wachstums: I. Teil: Allgemeine Grundlagen der Theorie; Mathematische und physiologische Gesetzlichkeiten des Wachstums bei Wassertieren[J]. Wilhelm Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 1934, 131(4): 613-652.
- [27] 马士德, 郭为民, 刘欣, 等. 工业纯钛(TA₂)在南海三亚海洋环境试验站海水全浸的生物污损与腐蚀[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 23-30.
MA Shide, GUO Weimin, LIU Xin, et al. Biofouling and corrosion analyses of industrial pure Titanium(TA₂) immersed in seawater at Sanya marine environmental test station in South China Sea[J]. Marine Sciences, 2018, 42(10): 23-30.
- [28] BERGLIN M, GATENHOLM P. The barnacle adhesive plaque: morphological and chemical differences as a response to substrate properties[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003, 28(2/3): 107-117.
- [29] 赖水发, 陈新, 彭明栋, 等. 网纹藤壶壳板矿化结构及其碳酸钙含量测定[J]. 海洋科学, 2013, 37(6): 32-36.
LAI Shuifa, CHEN Xin, PENG Mingdong, et al. Microstructure and content of bio-mineralizing calcium carbonate in the shell of *Balanus reticulatus* Utinomi[J]. Marine Sciences, 2013, 37(6): 32-36.
- [30] WENDT D E, KOWALKE G L, KIM J, et al. Factors that influence elastomeric coating performance: the effect of coating thickness on basal plate morphology, growth and critical removal stress of the barnacle *Balanus amphitrite*[J]. Biofouling, 2006, 22(1): 1-9.
- [31] STAFSLIEN S, DANIELS J, BAHR J, et al. An improved laboratory reattachment method for the rapid assessment of adult barnacle adhesion strength to fouling-release marine coatings[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2012, 9(6): 651-665.

Study on the growth process and attachment strength of marine-fouling barnacles

LI You-chi¹, WANG Gui¹, WU Jing-quan¹, DENG Pei-chang², ZHANG Fu-quan¹, HUANG Jun-yi¹

(1. College of Mechanical Engineering, Ocean University of Guangdong, Zhanjiang 524000, China; 2. College of Chemistry and Environment, Ocean University of Guangdong, Zhanjiang 524000, China)

Received: Nov. 4, 2022

Key words: *Reticulated barnacle*; growth process; experimental device; shear strength; logistic growth model

Abstract: Studying the adhesion strength of marine-fouling barnacles in different growth cycles can provide a basis for scientifically formulating barnacle removal specifications and designing related mechanical equipment. In this study, the growth process of barnacles was observed through barnacle immersion in a sea on Diaoshun island (21°31'N, 110°41'E) in Zhanjiang, and the shear strength of the barnacles at different growth periods was measured using a self-designed shear test device. The results showed that the barnacle larvae began to attach to the surface of the sample after 10 d of immersion. Barnacles covered ~30% of the sample surface on day 30, and the barnacle diameter was approximately 1–6 mm, and some barnacles died to form empty shells. On day 60, ~50% of the sample surface was covered with barnacles, and the surface was covered with a film, which aggravated the formation of empty shells, and the largest barnacle diameter was 10 mm. Approximately 95% of the 90 d sample was covered with barnacles, which overlapped to reach a diameter of 1–13 mm. During the barnacle attachment process, the barnacle shear strength first rapidly increased and then slowly increased with time. A logistic growth model of barnacle shear strength change with the barnacle diameter was established, with the determination coefficient $R^2 = 0.99$, which indicates that the model fits well. According to the logistic growth model, the change in barnacle shear strength can be divided into three stages: a rapid growth stage (base diameter 4.0–6.4 mm), slow growth stage (base diameter 6.4–8.7 mm), and gradual stop stage (base diameter >8.7 mm). The best period of the mechanical removal of attached barnacles was the rapid increase period.

(本文编辑: 谭雪静)