

吸附状态下钉螺起动流速的试验研究

陈和春 潘昭汉 叶 廉 王 场 何昌浩 马 亮

(葛洲坝水电工程学院 宜昌 443002)

(同济医科大学 武汉 430072)

摘 要 为防止钉螺随河渠水系扩散, 必须研究动水中钉螺运动规律, 通过试验研究测试了钉螺吸附在水槽底和边壁上时的起动流速; 应用河流动力学和生物力学理论推导了吸附状态下钉螺起动流速公式; 研究分析了影响钉螺起动流速的各种因素。结果表明, 由于钉螺具有较强的吸附能力, 它在开扉吸附状态下的起动流速要远大于它在闭扉无吸附状态下的起动流速, 但由于钉螺生物特性个体差异较大, 吸附状态下钉螺的起动流速有一个较大的变化范围。

关键词 钉螺 起动流速 吸附力 开扉 闭扉

分类号 Q915. 817 TV133

1 前 言

在兴建一些水利工程之后, 血吸虫病疫区有所扩大^{[1][2]}, 这是由于血吸虫的中间宿主——钉螺经涵闸水渠随水流扩散的结果。因此, 近年来开始重视研究钉螺在水中的运动特性, 其中钉螺在动水中的起动流速是重要研究内容之一。

目前, 有关钉螺起动流速的研究多半局限在闭扉钉螺。文献 [3] 用泥沙动力学理论推导了闭扉钉螺的起动流速公式, 并通过试验确定了相应的阻力系数。该公式和单个沙卵石的起动流速公式相似, 即闭扉钉螺主要靠自身的重力维持其稳定。实际上, 钉螺还有一重要的生物学特性, 即开扉钉螺能吸附在不同材料的渠壁、渠底或水草上, 以抵抗水流冲击而不被起动。为此本文将应用河流泥沙动力学理论, 并根据钉螺的生物力学特性, 研究吸附状态下钉螺在水槽中的稳定和起动。

2 钉螺的生物力学特性

钉螺是一种两栖动物, 但是其自身的生物能力很有限。在陆地上钉螺只能极缓慢地爬行, 在水中它不能象青蛙或鱼一样游动, 而且由于其自身容重大于水的容重, 钉螺也不能漂浮在水面上。不过, 钉螺具有较强的吸附能力, 不论在陆地上还是在静止的或流速不大的水下, 钉螺都能吸附到各种物体的表面。并且, 一旦吸附到物体表面以后, 它可以经受更大流速水流的冲刷而保持其稳定状态。

本文于1995年3月8日收到, 1995年9月11日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目, 项目编号: 39270630。

钉螺生物力学特性的又一方面是不同的生长期钉螺的尺寸、容重和吸附能力等较大的差异。本次试验测得各龄期钉螺的主要生物力学特性统计值如表1所示。

表1 不同生长期钉螺的生物力学特性值

Table 1. Biomechanics characters of *Oncomelania* of different ages

生长期	1 周	3 周	5 周	7 周	9 周	成 螺
螺径 D (mm)	0.57 ± 0.04	0.8 ± 0.08	1.13 ± 0.11	1.97 ± 0.18	2.90 ± 0.16	3.16 ± 0.36
螺高 h (mm)	0.9 ± 0.09	1.37 ± 0.17	2.04 ± 0.38	4.49 ± 0.49	6.32 ± 0.54	8.29 ± 1.05
体重 (10^{-5} N)	0.19 ± 0.03	2.82 ± 0.55	4.47 ± 1.70	15.2 ± 4.64	20.1 ± 5.29	70.0 ± 12.0
容重 (g/cm^3)	1.56	1.36	1.57	1.65	1.73	1.63
吸附力 (10^{-5} N)	10.9 ± 1.7	111.2 ± 54.6	164.5 ± 66.4	421.1 ± 221.0	646.2 ± 331.8	1300.6 ± 570.9

注:表中给出的钉螺容重是通过称得一批潮湿的同龄期钉螺的总重量,然后采用排开水体积法测得它们的总体积,再将总重量除以总体积即为平均湿容重。至于吸附力的测量方法将在另文中予以说明。

3 试验方法

钉螺起动流速试验在一矩形平底玻璃水槽中进行。水槽长1200cm,宽30cm,深50cm,最大供水量为35L/s。试验按钉螺的不同龄期、不同吸附材料和不同停息状态等分组进行。试验中采用的钉螺为实验室喂养和野外采集的阴性活钉螺。

试验前先测量每只钉螺的尺寸和重量。然后再将活钉螺放入有一定流量的缓慢流动的水槽中,等待15min左右让钉螺充分吸附到槽底上,再逐渐降低水深加大流速,直到钉螺被起动时测量相应的水深和流速。为了反映不同吸附材料对钉螺起动流速的影响,实验分别采用了玻璃板、木板、水泥板、铁板和杨树叶、柳树叶和茅草等作为钉螺吸附的基底材料。除玻璃板利用原水槽外,其它材料均制成5mm厚的薄片粘贴在水槽底板上,如图4所示,再让钉螺吸附到这些薄片上进行试验。另外,考虑到植物叶片的柔韧性,除将叶片平铺粘贴在底部外,这次试验还将植物叶片系在水中使其能自由飘摆,测试了钉螺吸附其上时的起动流速。

为了对比,试验还观测了无吸附状态下钉螺的起动流速。其试验方法与吸附状态下的试验方法基本相同,只是为了保证钉螺在测试过程中不会开厝吸附到水槽底板上,我们用针将钉螺软体刺伤,使其本能地长时间处于闭厝状态。

4 试验结果分析

4.1 钉螺起动流速规律描述

(1) 钉螺在水底有两种不同的稳定状态,即开厝吸附状态和闭厝吸附状态。闭厝状态下钉螺的起动流速不大,在水深为20cm H 40cm时,其值一般在0.08m/s U_c 0.24m/s范围内;而吸附状态下钉螺的起动流速较大,在水深为3cm H 10cm时,吸附在玻璃上的钉螺的起动流速可高达2.4m/s。

(2) 不同生长期在闭扉状态下钉螺的起动流速差别不大,但在吸附状态下差别较大。这是因为在闭扉状态下起稳定作用的是钉螺的重力,成螺虽较重,但因其尺寸大受到的水流冲刷作用也大,幼螺较轻,但因其尺寸小,在相同的水流条件下受到的水流冲刷作用也小;而吸附状态下起稳定作用的主要是钉螺的生物吸附力,由于成螺的吸附能力比幼螺大得多,尽管在相同水流条件下成螺要比幼螺受到更大的冲刷作用,但相抵之下成螺的起动流速还是明显大于幼螺的起动流速。图1为闭扉状态和吸附在玻璃底板时钉螺的起动流速变化规律。

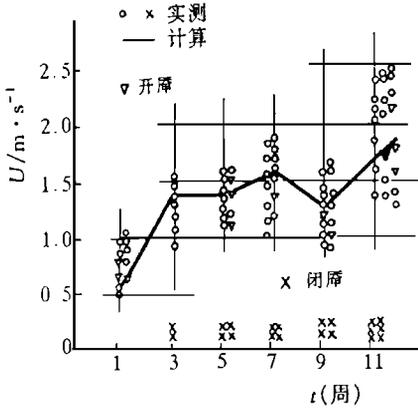


图1 不同生长期钉螺的起动流速

Fig. 1. Threshold velocity of *Oncomelania* for different ages

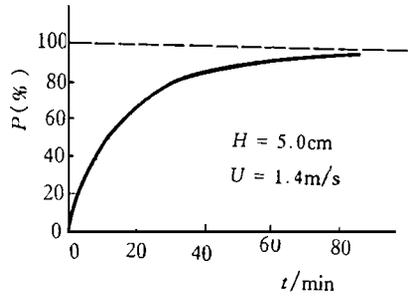


图2 钉螺起动流速与耐力关系

Fig. 2. Relationship between threshold velocity and staying power for *Oncomelania*

(3) 不同的吸附介质对钉螺的起动流速的影响一般不大。表2给出了本次试验测试的部分介质上钉螺的吸附力和起动流速的统计值。值得一提的是,当钉螺吸附在柔性的植物叶片上时,随着流速的加大,叶片将折卷和顺水流方向倒伏而遮盖部分钉螺,使这些钉螺在试验条件下的最高流速时仍能保持稳定。表2中给出的是钉螺吸附在倒伏的植物叶片上而未受叶片遮盖时的起动流速。

表2 不同介质上成螺的吸附力和起动流速统计值

Table 2. Suction and threshold velocity for different materials

材 料	水泥抹面	铁 板	刨光木板	玻璃板	柳树叶	水 草
吸附力 ($10^{-5}N$)	1212 ± 65	1272 ± 649	991 ± 401	1326 ± 588	731 ± 322	860 ± 473
起动流速 (m/s)	1.55 ~ 2.42	1.62 ~ 2.31	1.40 ~ 2.29	1.45 ~ 2.40	1.28 ~ 1.62	1.34 ~ 1.78

(4) 吸附状态下钉螺起动流速的个体差异较大。由图1可以看出,一组具有相同的生长期和生长环境、尺寸相近的钉螺的起动流速大致均匀地分布在一个较宽的范围内。这是由于钉螺生物能力的个体差异所致。

(5) 吸附状态下钉螺起动流速的大小与钉螺受冲刷的时间长短及钉螺耐力大小密切相关。这次试验测得的起动流速是钉螺在一定水流的冲刷作用下短时间内 (5min 内) 被起动时水流的垂线平均流速。但是试验结果又表明,如果实际水流的流速小于本文定义的钉螺起动流速,而使钉螺受冲刷的时间延长,钉螺也会被起动。图2描述一组成螺在一定流速的水流冲刷下,已全部将壳口正对水流不再爬行时,固定流速不变,在经历不同的冲刷时间后起动钉螺的个数占样本总数的百分比。

4.2 吸附状态下钉螺起动流速公式分析

(1) 平底上吸附钉螺的起动流速公式

经试验观察发现,在静水或流速不大的动水中钉螺吸附在水底床面上的方向是任意的,随着水流流速的增加,先是钉螺壳口转向上游以抵抗水流的冲刷,不再爬行,随后由于水流举力的作用,钉螺壳口脱离床面悬浮于水中颤动,如图3所示,直到更大流速使钉螺头足部顺床面向下游滑动而被起动。因此,在这种情况下钉螺的起动方式是钉螺壳口朝向上游,螺高方向

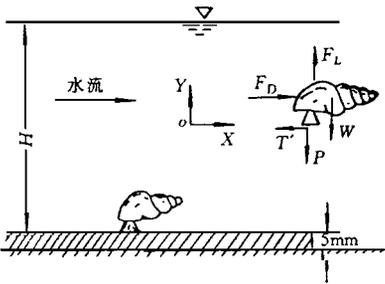


图3 平底上吸附钉螺的受力状况

Fig. 3. *Oncomelania* sticking on tested material and forces on it

近似与水流方向平行地向下游滑动。此时钉螺所受的作用力(如图3所示)为

$$\text{水下重力: } W = V(\gamma_s - \gamma_0) \quad (1)$$

$$\text{水流推力: } F_D = C_D S_D \gamma_0 \frac{u_b^2}{2g} \quad (2)$$

$$\text{水流举力: } F_L = C_L S_L \gamma_0 \frac{u_b^2}{2g} \quad (3)$$

$$\text{摩擦力: } T = (P + W - F_L)f \quad (4)$$

式中 V 为钉螺体积, γ_s 、 γ_0 分别为钉螺和水的容重, C_D 、 C_L 为推力和举力系数, S_D 、 S_L 分别为钉螺在垂直于水流方向和平行于水流方向平面上的投影面积, u_b 为作用于钉螺上的水流流速, g 为重力加速度, P 为钉螺吸附力, f 为钉螺头足部与床面间的摩擦系数。因钉螺近似呈圆锥体,可取 $V = \pi D^2 h / 12$, $S_D = \pi D^2 / 4$, $S_L = Dh / 2$, 其中 D 为螺径, h 为螺高。考虑钉螺以滑动形式起动,沿水流方向可以写成力的平衡方程如下:

$$F_D - T = 0 \quad (5)$$

将式(2)、(3)、(4)代入(5)经整理得

$$u_{bc} = \left[\frac{f}{C_D \pi + 2C_L f (h/D)} \right]^{1/2} \left[\frac{8g(P + W)}{\gamma_0 D^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

经测试发现钉螺的吸附力 P 一般比其自身的水下重量 W 大30倍以上(参见表1),近似地将式(6)中的 W 忽略不计。又令

$$K_f = \left[\frac{f}{C_D \pi + 2C_L f (h/D)} \right]^{1/2}$$

则式(6)可改写成

$$u_{bc} = K_f \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式(7)即为平底上吸附钉螺的起动流速公式。

(2) 垂直边壁上吸附钉螺的起动流速分析

吸附在垂直边壁上的钉螺与吸附在平底上的钉螺受力状况虽然不同,但它们的起动过程和起动方式却基本相同。此时钉螺的受力状况如图4所示。图中 F_D 、 F_L 、 F_V 分别为水流推力、侧举力和垂向升力, W 、 P 、 T 分别表示钉螺的水下重量、吸附力和摩擦力。 F_D 、 F_L 仍由式(2)、(3)给出,且式中的 C_D 、 C_L 和 S_D 、 S_L 取值不变; T' 由下式计算

$$T = (P - F_L)f \quad (8)$$

考虑钉螺的水下重力相对较小, 且有垂向升力 F_V 与之平衡, 可忽略垂向力对 T 方向的影响, 即认为摩擦力的方向与水流方向平行。通过分析钉螺在水流方向上的平衡, 并与平底上吸附钉螺的平衡相比较, 不难得出垂直边壁上吸附钉螺的起动流速公式与平底上起动流速公式完全相同, 即

$$u_{wc} = K_f \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

(3) 吸附状态下钉螺起动流速的应用公式

式 (7)、(9) 给出了钉螺起动时的临界作用流速, 但在实际应用中确定钉螺上作用流速很不方便, 通常采用垂线平均流速来替代。若采用指数型流速分布公式

$$u_i = u_{\max}(y/H)^m \quad (10)$$

式中 u_{\max} 为水面流速, H 为水深, u_i 为距床面 y 处的流速, m 为指数可取为 $1/7$ 。将流速 u 沿垂线积分可得垂线平均流速为: $U = u_{\max} / (1 + m)$ 或 $u_{\max} = (1 + m) U$ 代入式 (10) 得

$$u = (1 + m)(y/H)^m U \quad (11)$$

又假设 $y = D$ 时, $u = u_b$, 将式 (11) 代入式 (7) 得

$$U_{bc} = \frac{K_f}{1 + m} \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2} \right]^{1/2} \left(\frac{H}{D} \right)^m \quad (12)$$

式 (12) 即为垂线平均流速形式的起动流速公式。它只适用于平底上吸附钉螺的起动流速计算。至于垂直边壁上的吸附钉螺的起动流速, 由于没有统一的明渠水流横断面内的流速分布规律, 还不能直接给出平均流速形式的计算公式。对于矩形断面水槽, 近似地沿横向也采用指数型流速分布公式

$$u = u_{\max} [x / (B/2)]^m \quad (13)$$

式中 u_{\max} 为槽中央的流速, u 为距边壁 x 处的流速。式 (9)、(13) 相结合可确定钉螺起动时的水力条件。

为使以上导出的钉螺起动流速公式具有实用意义还需确定综合系数 K_f 的值。 K_f 由摩擦系数 f 、推力系数 C_D 、举力系数 C_L 和钉螺形状特征参数 h/D 所决定。摩擦系数 f 被定义为钉螺剪切吸附力 T 与垂直吸附力 P 的比值, 根据实测数据统计分析得 $f = 0.8$; 推力系数 C_D 和举力系数 C_L 与钉螺的形状、方位、水流紊动强度等有关, 尤其是与钉螺的颗粒雷诺数 Re_d 有关, 由于无圆锥体绕流资料, 借鉴河流动力学的研究成果^[5], 若 $Re_d > 2 \times 10^3$, 可取 $C_D = 0.7$, $C_L = 0.18$ 。将 C_D 、 C_L 值和 f 值代入 K_f 定义式中得

$$K_f = 0.6031(1 + 0.13h/D)^{-0.5}$$

于是式 (12) 可改写成

$$u_{bc} = \frac{0.6031}{1 + m} (1 + 0.13h/D)^{-0.5} \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2} \right]^{1/2} \left(\frac{H}{D} \right)^m \quad (14)$$

应用式 (14) 结合表1计算分析发现, 当 $D = 2.0\text{mm}$ 时, 计算结果与实测结果符合较好, 当 D

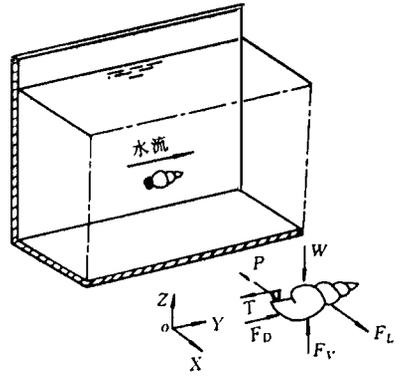


图4 垂直边壁上吸附钉螺的受力状况
Fig.4. Forces exerting on Oncomelania hanging on walls

< 2.0mm 时, 计算结果较实测值偏大, 且螺径愈小, 偏差愈大, 这是由于钉螺的颗粒雷诺数减小, C_D 、 C_L 相应增大所致。此时式 (5) 需要进行修正。根据上述分析可假设修正系数为 $a(D/D_0)^b$, 其中 $D_0 = 2.00\text{mm}$, D 为螺径, 当 $D = D_0$ 时, 取 $D/D_0 = 1$, a 、 b 为待定参数。根据实测数据回归分析求得 $a = 0.8$, $b = 0.72$ 。另外, 考虑到钉螺形状参数 h/D 对起动流速的影响不十分显著, 且其值变化不大, 可将其取为常数 2.0。将指数 m 取值为 $m = 1/7$, 则经修正后的式 (14) 改为

$$u_{bc} = 0.3761 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0.72} \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2}\right]^{1/2} \left(\frac{H}{D}\right)^{1/7} \quad (15)$$

如图1所示, 采用式 (15) 和表1计算所得结果与实测值符合较好。将修正后的 K_f 值代入式 (9) 得

$$u_{bc} = 0.3761 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0.72} \left[\frac{8gP}{\gamma_0 D^2}\right]^{1/2} \quad (16)$$

式 (16) 可用于计算吸附在垂直边壁上的钉螺的起动临界作用流速。

在实际应用中, 可根据钉螺的螺龄 (可近似由螺旋数判断) 或螺径由表 (1) 查得吸附力 P 值, 然后应用式 (15) 或式 (13) 和式 (16) 确定钉螺起动时的水流条件。

5 结 语

通过对钉螺吸附力和吸附状态下钉螺起动流速的试验研究, 得出以下结论:

(1) 由于钉螺具有较强的吸附能力, 吸附状态下钉螺的起动流速要比无吸附状态下钉螺的起动流速大许多, 但由于钉螺的吸附能力受多种因素的影响且有较大变化范围, 相应吸附状态下钉螺的起动流速也有较大的变化范围。

(2) 根据河流泥沙动力学和生物力学理论推导, 结合试验结果分析产生的钉螺起动流速公式 (15)、(16) 能较准确地反映各种因素的影响, 结合本文给出的钉螺生物力学参数, 可以用于实际问题的计算。

参 考 文 献

- 1 Man-made Water Resources and Their Impact on Schistosomiasis. WHO SCH/ WP 84 ~ 85
- 2 徐兴建, 方天起. 湖北省疫区涵闸灌溉与钉螺扩散之间的关系. The Kasetsart journal (Nat. Sci.). 1989, 23 (3): 281 ~ 286
- 3 张威, 熊正安, 潘庆葵等. 钉螺起动流速的试验研究. 长江科学院院报. 1994, 11 (4): 12
- 4 李贞儒, 陈媛儿, 赵云. 作用于床面球体的推力及举力试验研究. 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 水利电力出版社, 1983, 10: 330 ~ 340
- 5 武汉水利电力大学 (张瑞瑾主编). 河流泥沙动力学. 北京: 水利电力出版社, 1988. 58 ~ 105
- 6 王季午主编. 传染病学 (第二版). 北京: 人民卫生出版社, 1988. 177 ~ 185

Experimental Investigation of Threshold Velocity for *Oncomelania* Sticking to the Boundary of Channel

Chen Hechun, Pan Zhaoan, Ye Lian, and Wang Chang

(*Gezhouba Institute of Hydroelectric Engineering, Yichang 443002*)

He Changhao and Ma Liang

(*Tongji Medical university, Wuhan 430072*)

Abstract: To probe into the motion laws of *Oncomelania* in channel flows, the paper investigates the threshold velocity of *Oncomelania* sticking to the boundary of channel by means of experimentals in flume; two formule for the threshold velocity are derived based on the theories of river mechanics and biomechanics and the elements which effect on the threshold velocity have been analyzed. The results show that, because of the eminent biological adsorptive power, the treshold velocities for *Oncomelania* with open operculum and sticking to the boundary of channel are statistically much great than that for *Oncomelania* with close operculum and just lying on the channel bed, however, the theshold velocities scatter whthin wide limits.

Key words: *Oncomelania*; threshold velocity; adsorptive power, close operculum; open operculum.