

蚯蚓体表自润滑仿生应用试验研究

刘国敏¹, 邹猛², 李建桥³

(1. 江西农业大学 工学院, 江西 南昌 330045; 2. 清华大学 汽车系, 北京 100084; 3. 吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130025)

摘要:对蚯蚓体表自润滑行为进行分析,并设计5种仿生润湿试件:通孔型、阶梯孔型、通孔倒角型、插销型以及复合型,以水为润滑剂,通过润湿试验,探讨润湿规律,为蚯蚓耦合仿生研究提供设计依据。结果表明,无论是覆盖玻璃还是有机玻璃,通孔型的喷嘴润湿整个表面所需的时间最长,而通孔倒角型喷嘴所需时间最短;在同一流速条件下、同一时间间隔内,各仿生润湿试件按润湿面积由大到小依次是:通孔倒角型、插销型、复合型、阶梯孔型、通孔型。

关键词:蚯蚓;生物润滑;仿生;润湿

中图分类号: TB17; Q811 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 2286(2010)02 - 0378 - 05

An Experimental Study on the Bionic Application of the Earthworm Body Surface Self-lubrication

LIU Guo-min¹, ZOU Meng², LI Jian-qiao³

(1. College of Engineering and Technology, JAU, Nanchang 330045, China; 2. State Key Lab of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Key Laboratory for Bionics Engineering of Education Ministry, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The self-lubrication phenomenon of the earthworm body surface was analyzed, and according to it, five bionic samples were designed to carry out wetting test, which were the through-hole nozzle, ladder-hole nozzle, through-chamfer-hole nozzle, bolt nozzle and complex nozzle. Taking the water as the lubricants, through the wetting experiment, the wetting rule was discussed, and this would provide the design basis for the later bionic coupling research. The results showed that the time for spreading the entire surface of the through-hole nozzle was the longest, while that of the through-chamfer-hole nozzle was the shortest regardless of covering the glass or the plexiglass. Under the identical flowing speed, and in the same time gap, the order of the moist area of the bionic components from large to small was: through-chamfer-hole nozzle, bolt nozzle, complex nozzle, ladder-hole nozzle, through-hole nozzle.

Key words: earthworm; biological lubrication; bionics; wetting

土壤动物在运动过程中需要克服来自土壤的阻力,其中动物体表与土壤的摩擦阻力是构成其运动阻力的重要部分。生物减阻有多种形式,包括生物非光滑减阻、生物柔性减阻及生物润滑减阻等。

润滑是生物减小摩擦阻力的有效方式,生物润滑有体内润滑和体表润滑。动物关节、眼球、心脏中存在着典型的体内润滑^[1-3],土壤动物体表和水中鱼类存在着典型的体表润滑^[4]。许多土壤动物体表

收稿日期: 2009 - 11 - 27 修回日期: 2010 - 01 - 14

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50635030)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050183015)

作者简介: 刘国敏(1976 -),女,讲师,博士,主要从事仿生工程研究, E-mail: lgn951@163.com。

会分泌具有润滑功能的体表液,蚯蚓是典型的具有体表分泌液的土壤动物,当蚯蚓在土壤中运动或受到刺激时,便从体腔内分泌出液体物质^[5-8]。蚯蚓体表液是含有粘蛋白的水的稀溶液,体表液成为界面滑动的剪切层,在蚯蚓与土壤滑动接触过程中具有体表润滑作用^[5-8]。生物体表结构、生物润滑、生物电渗以及体表柔性等对蚯蚓的减粘降阻功能具有多元耦合作用,但近些年来对蚯蚓体表减粘降阻功能的仿生研究主要是集中在生物体表结构、生物电渗以及体表柔性等方面进行的单元仿生^[5-11]。

本文主要对蚯蚓体表自润滑现象进行分析,并由此设计了 5 种仿生润湿试件,以水为润滑剂,进行仿生润湿试件表面的润湿试验,研究喷嘴形状与界面润滑的作用规律,为蚯蚓仿生耦合应用研究提供设计依据。

1 蚯蚓体表自润滑分析

蚯蚓属环节动物门寡毛纲,形态通常为细长圆柱形,头尾稍尖,整个身体由若干环节组成,无骨骼,外披一薄而具色素的几丁质层,除前两节外,其余体节上均生有刚毛辅助运动。背中线节间位置有背孔,是位于背中央节与节之间的小孔,实现呼吸以及减少行进过程中的阻力。蚯蚓体表的背孔能自动调控开启和关闭,平时紧闭,遇干燥或刺激时孔张开,射出体表液,湿润身体表面及周围土壤,使蚯蚓易于在土壤中钻洞和保护体表。图 1 为蚯蚓体表局部放大示意图。



图 1 蚯蚓体表(局部放大)

Fig 1 Earthworm body surface partial enlarged drawing

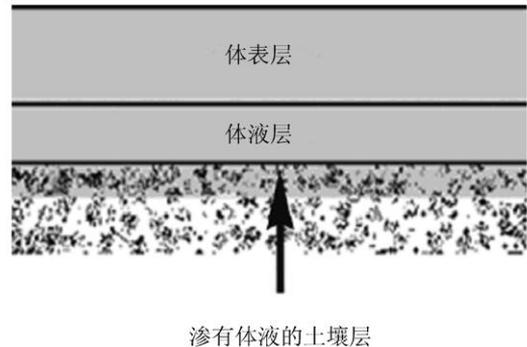


图 2 三层界面系统

Fig 2 Three interfaces schematic drawing

蚯蚓分泌的体表液是一种以有高滞留性的黏蛋白为主溶液的稀溶液,具有润滑功能,它与体表、土壤一起构成 3 层界面系统,即体表层、体液层和渗有体液的土壤层^[7-8],如图 2 所示。体表液提供了一个弱剪切层,在土壤动物体表与土壤层之间形成润滑界面,可降低土壤对动物体表的粘附。

当蚯蚓在土壤中穿行时,背孔可以适时将由表皮粘液细胞分泌的体表液喷射出来,环节状体表可以均匀地将体表液分布到蚯蚓体表和周围土壤中,体表液渗入土壤形成一层液体膜。实际上蚯蚓就是在这层液体膜的保护下运动的。同时蚯蚓运动时伸缩前进,就单个体节而言,在运动中会呈现出曲率不断变化的弧形凸圆面,使蚯蚓体表与土壤形成楔形空间,这样不仅可以减小蚯蚓与土壤的接触面积,而且可以使液体膜更易进入摩擦表面,得到更好的润滑效果,大大降低蚯蚓与土壤之间的摩擦,减少蚯蚓体表损伤。此外蚯蚓运动时体表受到周围土壤的刺激会在同一体表面形成正负电位分布,即电渗现象。虽然其体表电位幅值只有毫伏级,却可以改善体表润滑状态,即电渗作用可以改善表面润滑膜的分布和增加其厚度,避免土壤粘附与体表发生磨损破坏。

2 仿生润湿试件设计

为模拟蚯蚓体表自润滑现象,设计了 5 种喷嘴型式,分别为:通孔型、阶梯孔型、通孔倒角型、插销型以及复合型(图 3)。其中插销型和复合型试样外形相同,不同之处在于插销型是通过插销与孔配合,而复合型是在孔的上方粘贴带有十字型孔的橡胶。本次试验中所有试样均采用机械加工方法,试样材料为 45 钢。

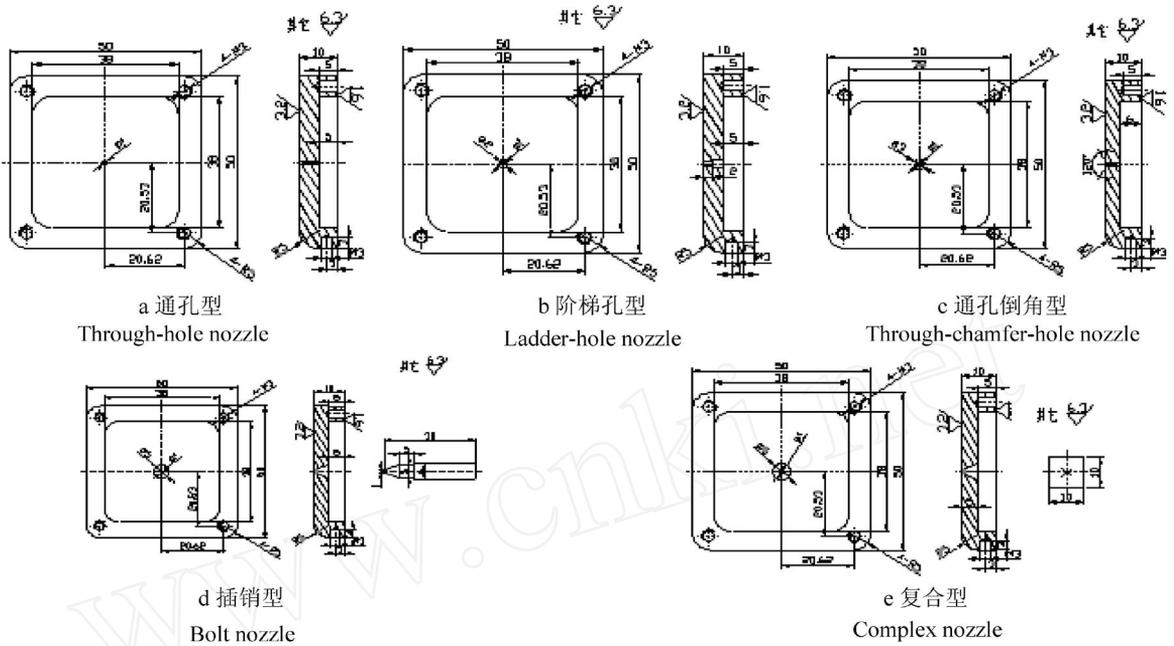


图 3 润湿试验试样结构

Fig 3 Structure schematic drawing of wetting test specimen

3 仿生润湿试件润湿试验

以水为润滑剂,进行了玻璃、有机玻璃覆盖在仿生部件表面的润湿试验。通过润湿试验,探讨润湿规律,选择合适的喷嘴型式,为后期仿生耦合研究提供设计依据。

试验指标包括润湿时间和润湿面积,润湿时间是指水膜润湿整个试样表面所需时间,而润湿面积是指某一时间内,水膜润湿试样表面的面积。

3.1 试验方法

润湿试验装置原理如图 4 所示,其中供水装置由滴流管和热水袋组成,可通过压力和阀门控制水流速度。在设计供水装置时,笔者花费了大量的时间和精力,为了使其润湿效果达到最佳而润滑液的消耗量又要尽量少,通过反复试验验证,最终采用了图 4 所示的试验装置。为了便于观察试验现象,在润滑水当中添加了红墨水,使润湿表面明晰可见。试验时,先将安装在套筒上的玻璃或有机玻璃覆盖在试样表面,然后打开阀门,给供水装置施加一定的压力,润滑液就会通过喷嘴润湿试样表面。利用数码相机对试验过程拍照和录像,记录润湿液在试件表面的铺展过程,然后进行分析。

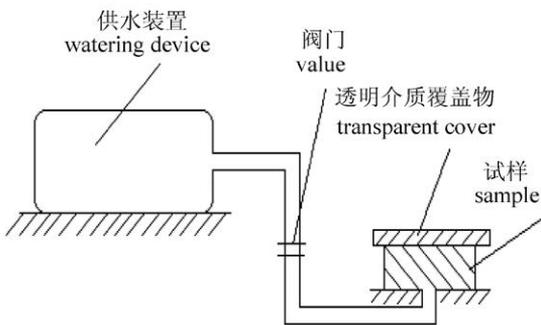


图 4 润湿试验装置原理

Fig 4 Schematic diagram of wetting test equipment

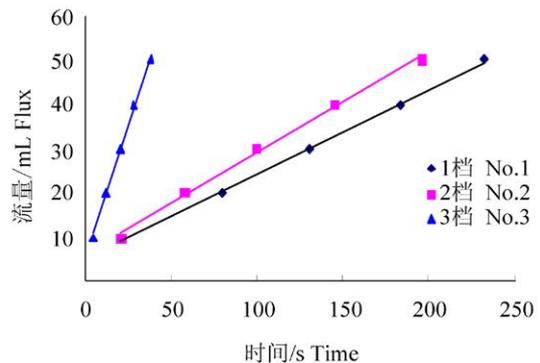


图 5 流速标定拟合曲线

Fig 5 Fitted curve of speed of flow demarcation

3.2 流速标定

正式润湿试验前,必须对供水装置的流速进行标定,对供水装置设定了 1、2、3 档速度,由测量数据

作出标定曲线(图 5)。由图 5 可知,对流速 1 采用一元线性回归拟合可得拟合方程为 $y = 0.1461x + 1.1355$, 其中 y 代表流量 (mL), x 代表达到某一流速所需时间 (s)。该回归方程的拟合度 $R = 0.9992$, 由该拟合方程可知,流速 1 约为 0.15 mL/s。同理可得,流速 2 的拟合方程为 $y = 0.1885x + 5.6137$, 拟合度为 $R = 0.9988$; 流速 3 的拟合方程为 $y = 0.228x + 6.2872$, 拟合度为 $R = 0.9964$ 。由此可知,流速 2、流速 3 分别约为 0.19 mL/s 和 0.23 mL/s。

3.3 试验结果与分析

(1) 润湿时间。基于试验效果明显且消耗量尽量小的原因,本次润湿试验在流速 1 的情况下进行,根据拍摄的录像,仿生润湿试件润湿时间计算结果见表 1。由表 1 可知,无论是覆盖玻璃还是有机玻璃,通孔型的喷嘴润湿整个表面所需的时间最长,而通孔倒角型喷嘴所需时间最短。

表 1 润湿时间计算结果(流速 0.15 mL/s)

Tab 1 Moist count-down result (speed of flow 0.15 mL/s)

喷嘴型式 Nozzle style	润湿时间 /s Wetting time	
	玻璃 Glass	有机玻璃 Plexiglass
通孔型 Through-hole nozzle	13	12
阶梯孔型 Ladder-hole nozzle	11	10
通孔倒角型 Through-chamfer-hole nozzle	9	7
插销型 Bolt nozzle	10	9
复合型 Complex nozzle	10	9

(2) 润湿面积。将拍摄的照片导入 OLYCATM M3 图像分析系统,单击几何测量图标,打开几何测量窗口,在几何量类型窗口中,利用区域测量对仿生部件的润湿面积进行测量并将测量数据显示在几何量类型窗口中,其测量界面如图 6 所示。

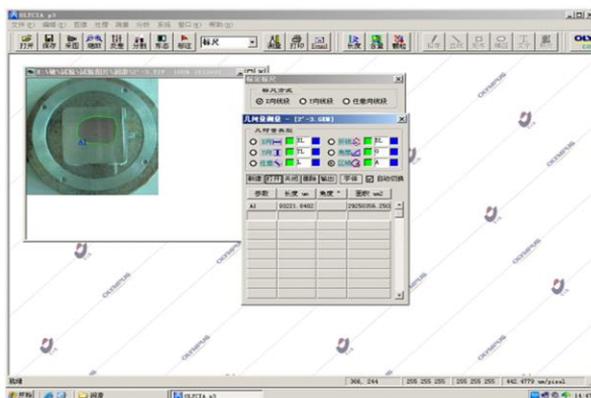


图 6 润湿面积计算界面

Fig 6 Computing interface of moist area

在供水装置流速为 0.15 mL/s 时,各喷嘴润湿面积计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,无论是覆盖玻璃还是有机玻璃,在同一时间间隔内,各喷嘴按润湿面积由大到小依次是:喷嘴 3、喷嘴 4、喷嘴 5、喷嘴 2、喷嘴 1。也就是说在同一时间间隔内,通孔倒角型的润湿面积最大,而通孔型的润湿面积最小,即在同一流速条件下通孔倒角型的分布速度最快,而通孔型的分布速度最慢。

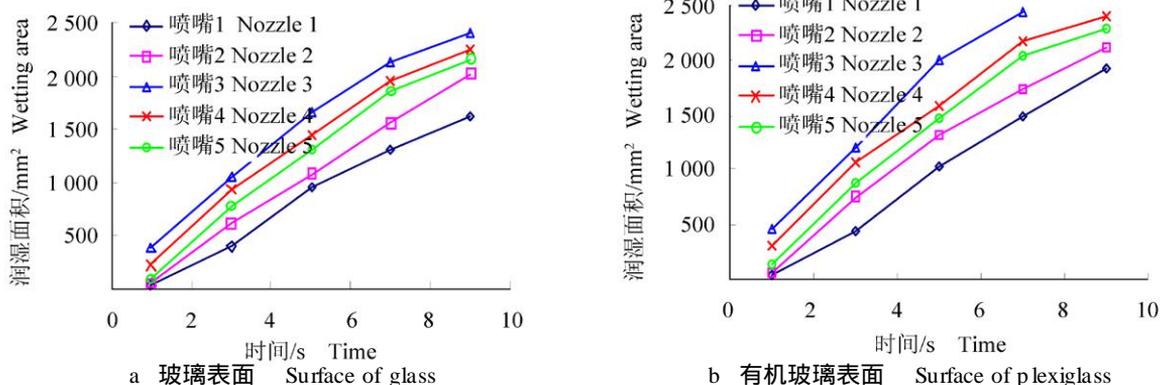


图 7 仿生润湿试件润湿面积计算结果

Fig 7 Results about moist area of the bionic moist test samples

4 结 论

主要对蚯蚓体表自润滑现象进行了分析,根据蚯蚓体表润滑现象设计了 5 种仿生润湿试件并进行了润湿试验,由试验结果可知,无论是覆盖玻璃还是有机玻璃,通孔型的喷嘴润湿整个表面所需的时间最长,而通孔倒角型喷嘴所需时间最短;在同一流速条件和同一时间间隔内,各仿生润湿试件按润湿面积由大到小依次是:通孔倒角型、插销型、复合型、阶梯孔型、通孔型。

参考文献:

- [1] Unsworth A. Recent developments in the tribology of artificial joints[J]. Tribology International, 1995, 28(7): 485 - 495.
- [2] 周银生. 陶瓷人工关节的跑合和摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(2): 103 - 107.
- [3] 亓昌祥, 郑昌琼, 冉均国. 超高分子量聚乙烯 SiC 陶瓷摩擦副生物摩擦学特性的研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(4): 332 - 337.
- [4] Hoyt J W. Hydrodynamic drag reduction due to fish slimes in swimming and flying in nature[C]. New York, Plenum Press, 1975: 653 - 672.
- [5] 陈秉聪, 任露泉, 李安琪, 等. 蚯蚓体表液收取方法的初步研究——地面机械减粘脱土仿生研究之一[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 7 - 12.
- [6] 李安琪, 任露泉, 陈秉聪, 等. 蚯蚓体表液的组成及其减粘脱土机理分析[J]. 农业工程学报, 1990, 6(3): 8 - 14.
- [7] 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(9): 1353 - 1364.
- [8] Lu Quan-ren, Jin Tong, Jian Qiao-li, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. J Agric Engng Res, 2001, 79(3): 239 - 263.
- [9] 刘国敏, 李建桥, 邹猛, 等. 蚯蚓非光滑体表形貌与降阻特性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 62 - 65.
- [10] 刘国敏, 李建桥, 田喜梅, 等. 蚯蚓非光滑体表减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 138 - 143.
- [11] Yan Y Y, Ren L Q, Li J Q. The electro-osmotically driven flow near an earthworm's body surface and the inspired bionic design in engineering[J]. International Journal of Design and Nature, 2007, 1(2): 1 - 11.

· 简讯 ·

《江西农业大学学报》网上投稿系统正式开通试用

《江西农业大学学报》网上投稿系统正式开通试用,基本可实现作者网上投稿、实时查询稿件状态及修改意见,专家网上审稿以及编辑网上处理稿件等功能,使稿件审理愈加快捷、方便、有效。

网上投稿系统登录途径:

1. 直接登录《江西农业大学学报》网上投稿系统单独域名 <http://www.jxndxuebao.com>。

2. 登录江西农业大学学报编辑部主页 <http://xuebao.jxau.edu.cn>, 然后点击投稿指南中的网址链接或主页上《江西农业大学学报》最新一期封面,即可登录到投稿系统。

作者投稿具体步骤如下:先登录投稿系统页面,然后点击左侧“作者投稿查稿”按钮,进入投稿主页(首次投稿则需进行注册),输入用户名和密码后即可登录系统进行投稿。需要注意的是请尽量按照左页面提示,按步骤分别提交稿件相关信息,尽量将个人信息及论文内容填写详细,投稿附件为 word 格式的论文稿,最后将投稿预览确认后即可提交。若稿件提交成功,屏幕上会显示稿件。

通过投稿系统投稿的作者可点击“投稿稿件文件夹”实时查询稿件审理情况。同时编辑部投稿邮箱 ndxb7775@sina.com 同步使用,未使用投稿系统的作者可投稿到本邮箱。

欢迎您使用投稿系统,您在投稿查稿过程中如果遇到问题请及时与编辑部联系。

联系电话: 0791 - 3813246

投稿邮箱: ndxb7775@sina.com

编辑部网站: <http://xuebao.jxau.edu.cn>