

蚯蚓非光滑体表形貌与降阻特性

刘国敏^{1,2}, 李建桥^{1*}, 邹猛³, 李因武¹, 田喜梅¹

(1. 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 江西农业大学工学院, 南昌 330045;
3. 清华大学汽车系, 北京 100084)

摘要:以赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)为研究对象,制备了舒张态、静息态、收缩态3种体表试样。利用OLYMPUS体视显微镜及OLYCIA™ M3图像分析系统,对蚯蚓体表形貌进行分析,结果表明蚯蚓体表形貌属于典型的波纹形非光滑结构,体部纹理小而密,非光滑单元密度较大,头部纹理大而稀,非光滑单元密度较小。头部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体宽度和高度之比分别为1.65:1:0.78和0.23:1:1.27;而体部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体宽度和高度之比分别为1.65:1:0.81和0.33:1:1.28。利用微黏附力测试系统,对蚯蚓体表展平试样和钢试样进行土壤滑动阻力试验,结果表明蚯蚓体表试样的降阻效果由大到小依次是收缩态、静息态、舒张态;而且,头部比体部降阻效果明显;与钢试样相比,头部和体部收缩态的降阻率分别为39%和29%。该研究可为生物非光滑表面仿生研究以及揭示蚯蚓体表形貌和润滑耦合仿生机制提供基础数据。

关键词:体表,特征提取,仿生耦合,蚯蚓,非光滑,土壤滑动阻力

中图分类号: S154.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0062-04

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.

Liu Guomin, Li Jianqiao, Zou Meng, et al. Feature and the characteristic of sliding resistance reduction of the earthworm's non-smooth surface[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 62—65.(in Chinese with English abstract)

0 引言

生物界许多物种,尤其是土壤动物在长期进化中具有完善的减黏脱土功能^[1,2]。蚯蚓是一种典型的土壤动物^[3],在黏性土壤中也能活动自如,身不黏土。蚯蚓这种减黏脱土功能是由于:具有有利于减黏脱土的非光滑体表结构、体表含利于减黏脱土的物质、分泌利于减黏脱土的体表液和具有可用于减黏脱土的生物电系统^[4]。

国内外许多学者对蚯蚓进行了大量研究,但大多着眼于蚯蚓的生态、构造和生理^[3,4],近年来学者们逐渐展开了对蚯蚓减黏脱土仿生学研究^[1-7],主要是从体表液和生物电方面来研究分析蚯蚓的减黏脱土功能。而对其非光滑体表的减黏脱土功能的研究主要是对其体表进行力学分析和法向黏附特性分析^[8,9]。

本文根据蚯蚓的运动特性,制备了舒张态、静息态、收缩态3种体表试样;利用体视显微镜及其图像分析系统对蚯蚓体表形貌进行分析;利用基于生物信号测试仪器的微小土壤黏附力测试系统,对蚯蚓体表展平试样的土壤滑动阻力进行测试。其结果将对生物非光滑表面仿

生研究以及揭示蚯蚓非光滑体表和润滑耦合仿生机制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验样品

试验样品蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),属环节动物门(*Annelida*),寡毛纲(*Oligochaeta*),后孔寡毛目(*Opisthopora*),正蚓科(*Lumbricidae*),爱胜蚓属(*Eisenia*),采集自吉林长春郊外,体长60~150 mm,体宽3~5 mm,体重0.4~1.2 g,全身约80~150个环节。本试验以生殖环前的环节为头部,以尾侧最后20个环节为尾部,体部定位于体长的中部,由于体部和尾部具有相同的形态特征,所以只取蚯蚓的头部和体部进行研究。

蚯蚓的运动是由其环肌和纵肌交替舒张和收缩进行而完成的。环肌收缩,纵肌舒张时,蚯蚓变细变长,环肌舒张,纵肌收缩时,蚯蚓身体变粗变短。根据蚯蚓的运动特性,制备了3种状态的试样,包括舒张态(图1a、d,环肌收缩,纵肌舒张)、静息态(图1b、e,环肌和纵肌都放松)、收缩态(图1c、f,环肌舒张,纵肌收缩)。
1) 舒张态:把蚯蚓放入托盘中,倒入250 mL清水淹没蚓体,徐徐加入25 mL 90%的乙醇,使终浓度为10%。浸泡2 h后,蚯蚓死亡,全身呈舒张状态;2) 静息态:将5 mL乙醚倒入装有脱脂棉的试剂瓶中,再放入蚯蚓,盖好瓶盖,大约10 s后,蚯蚓完全昏迷,此时蚯蚓全身呈静息状态;3) 收缩态:将蚯蚓置于4%的多聚甲醛中迅速杀死固定,蚯蚓身体急剧收缩,几秒钟后死亡,全身呈紧缩状态。

收稿日期: 2008-04-15 修订日期: 2008-10-05

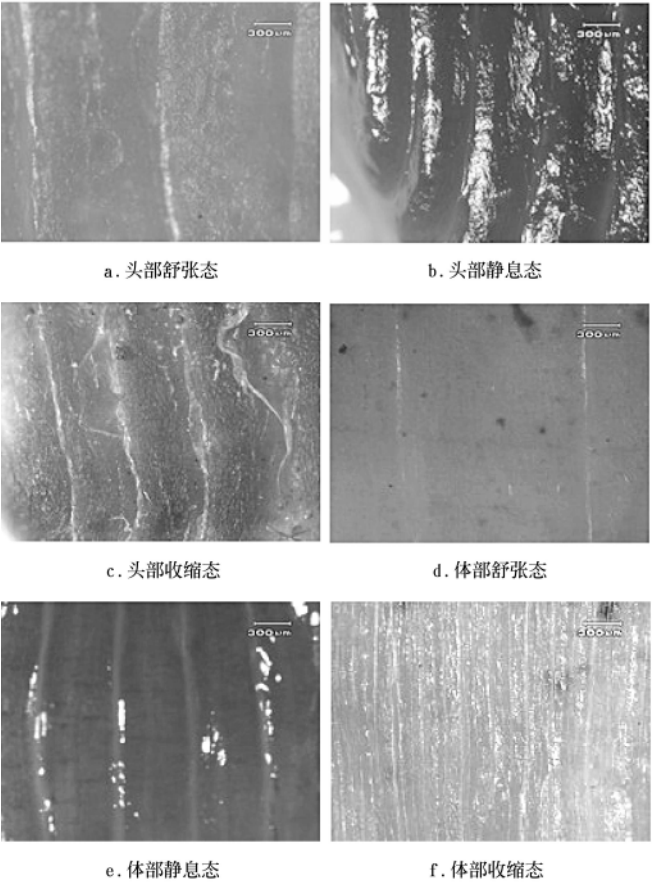
项目基金: 国家自然科学基金重点资助项目(50635030); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050183015)

作者简介: 刘国敏(1976—),女,江西分宜人,博士生。长春 吉林大学南岭校区地面机械仿生技术教育部重点实验室,130022。

Email: lgm951@163.com

※通讯作者: 李建桥(1953—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事地面机械仿生技术研究。长春吉林大学南岭校区地面机械仿生技术教育部重点实验室,130022。Email: jqli@jlu.edu.cn

每种状态均制备了圆柱形试样和相应的展平试样。圆柱形试样和展平试样的体表形态及数量关系不发生改变，只是将空间试样转换成平面试样。将处理好的蚯蚓分别截取头部和体部，即可得圆柱形试样。将圆柱形试样从腹中线解剖开，清除体内残留物，洗净之后，将其平整的展开，然后粘于纸板上并置于 4% 的甲醛中进行固定，即可得展平试样。



注：放大 50 倍图像

图 1 体表展平试样
Fig.1 Unfolding surface specimen

1.2 蚯蚓非光滑体表形貌分析方法

利用 OLYMPUS 体视显微镜 (SZX12) 采集蚯蚓圆柱形和展平体表试样的图像，利用 OLYCIA™ M3 图像分析系统对蚯蚓体表形貌进行分析。将采集的图像导入图像分析系统，单击几何测量图标，打开几何测量窗口，利用照片上的比例尺对标尺进行标定并加载标尺，然后在几何量类型窗口中，利用长度测量对蚯蚓体表几何形态参数进行测量并将测量数据显示在几何量类型窗口中，如图 2 所示。

1.3 蚯蚓非光滑体表土壤滑动阻力测定方法

为了研究蚯蚓体表的土壤黏附特性，课题组自行研制了基于生物信号测试仪器的微黏附力测试系统^[10]。根据蚯蚓展开宽度及试验需要，蚯蚓体表试样制备成长 25 mm，宽 10 mm 大小，粘在同样大小厚 5 mm 的竹片上。作为对比试验的钢试样采用相同尺寸，材料为 45 号钢。蚯蚓在运动过程中，舒张态、静息态以及收缩态

是同时存在的，其减黏降阻过程是一个复杂的动态过程，这方面的内容将在后续研究当中进行。本文主要研究三种展开试样的土壤降阻特性。



图 2 蚯蚓体表几何形态参数测量
Fig.2 Geometrical configurative parameters measurement of the earthworm surface

试验时先将搅拌均匀的土壤放入土盒，再将土盒平稳的放在试验台上，以 100 g 压力充分均匀地压在试样表面，保压 10 s 后由状态控制系统控制试验台上下运动，通过土盒边缘的定滑轮将试样的上下运动转变为试样与土壤表面的水平运动，并用多道生物信号采集处理系统 RM6240B/C 记录试验过程中产生的滑动阻力。由于单个试样接触面积太小，无法加载，经过多次反复预试验，最终将两个相同试样对称固定在长宽 25 mm、厚 10 mm 的木块上，才得以加载，从而测出了其滑动阻力。

试验所用的土样为长春市的黄黏土，其机械组成如表 1 所示，将其制备成含水率为 30% 的土壤。为了保证重复试验时土壤状态近似不变，减少试验误差，每次试验前都要更新试验用土，并对其进行压实、刮平，且每个试验点重复了 10 次。

表 1 黄黏土粒径分布
Table 1 Particle size distribution of iron clay

液限 /%	塑限 /%	颗粒百分含量/%			
		0.25~0.5 mm	0.1~0.25 mm	0.075~0.1 mm	<0.075 mm
35.4	19.5	26.7	20.3	23	30

2 试验结果

2.1 蚯蚓体表形貌分析结果

蚯蚓头部呈圆锥状，体部呈圆柱状，其体表形貌属于典型的波纹形非光滑结构：体节与节间沟组成的环节结构，形成一级宏观波纹形非光滑结构，如图 3a 所示；在高倍显微镜下，发现皮肤表面分布着大量的交错细纹，形成二级微观波纹形非光滑结构，如图 3b 所示。环的中间部分隆起形成棱，自第 2 体节始环生着刚毛，自 11/12 节间沟始，于背线处有背孔，可排出体腔液，

润湿体表。

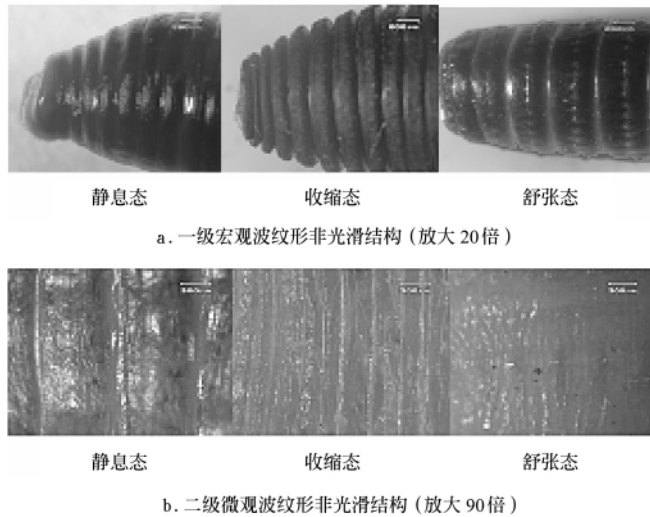


图 3 蚯蚓体表波纹形非光滑结构

Fig.3 Wavy non-smooth surface of the earthworm

蚯蚓体表不同部位的非光滑程度各不相同，体部纹理小而密，非光滑单元密度较大，头部纹理大而稀，非光滑单元密度较小。不同状态的蚯蚓体表形貌大体类似，主要区别在于非光滑单元体的宽度和高度不同，如图 4 所示。由图 4 可知，蚯蚓体表非光滑结构单元体的宽度和高度由大到小依次分别是舒张态、静息态、收缩态和收缩态、静息态、舒张态；且头部尺寸要大于体部尺寸。头部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体宽度之比和高度之比分别为 1.65 : 1 : 0.78 和 0.23 : 1 : 1.27；而体部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体宽度之比和高度之比分别为 1.65 : 1 : 0.81 和 0.33 : 1 : 1.28。舒张时，非光滑单元密度减小；收缩时，非光滑单元密度增大；静息时，非光滑单元密度居中。因此，可将蚯蚓的运动过程看作是非光滑单元密度由大到小循环变化的过程。

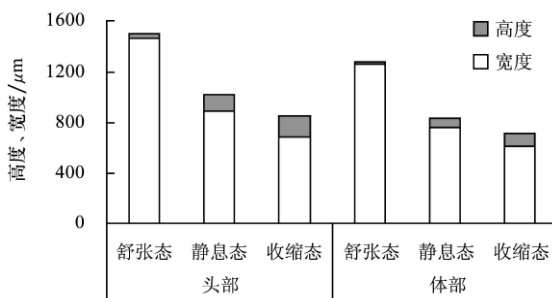


图 4 蚯蚓体表非光滑单元体的特征参数

Fig.4 Characteristic parameters of the earthworm non-smooth surface units

2.2 滑动阻力试验结果

对不同体表展平试样以及钢试样进行滑动阻力试验，正压力 100 g，滑移速度 1 mm/s，含水率 30%。试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，头部比体部减阻效果明显，且收缩态的减阻效果最明显，静息态次之，最后是舒张态。在试验条件下，体部收缩态降阻 29%，头部收

缩态降阻 39%。

表 2 不同体表试样的土壤滑动阻力试验结果
Table 2 Experimental results of soil sliding resistance of surface specimens

试样		最小值 /Pa	最大值 /Pa	平均值 /Pa	标准 方差	样本 方差	减阻率 /%
头部	舒张态	2979.45	3413.10	3186.64	128.77	16581.41	28
	静息态	2828.04	3113.71	2991.03	72.95	5322.08	32
	收缩态	2477.20	2942.45	2677.605	167.11	27925.15	39
体部	舒张态	3405.01	3912.41	3670.54	181.73	33026.99	17
	静息态	3048.54	3364.10	3168.49	96.01	9217.91	28
	收缩态	3005.17	3233.27	3103.98	77.24	5966.30	29
钢试样		4217.43	4697.39	4396.57	140.35	19699.33	

3 分析与讨论

试验结果表明，蚯蚓非光滑体表具有降阻特性，且头部的降阻效果要比体部明显，这与蚯蚓体表形貌及各部位的功能有较大关系。蚯蚓头部呈圆锥状，环节较宽较明显，纹理大而稀，非光滑程度较高；而体部呈圆柱状，环节较窄，纹理小而密，非光滑程度相对较低。蚯蚓运动时，头部先入土，土壤黏附首先集中到头部，因此需要较大的减黏降阻功能，而体部主要用于清除残留土壤，对减黏降阻需求相对较小。

蚯蚓体表形态对其切向粘附力影响明显，由表 2 可知，同部位的蚯蚓体表试样的降阻效果由大到小依次是：收缩态、静息态、舒张态。这主要是因为收缩态、静息态、舒张态体表试样的非光滑单元体宽度、棱纹的平展程度依次增大，其单元体密度依次减小。收缩态试样的降阻效果之所以最大，原因在于其非光滑表面易使体表和土壤之间存在空隙，形成无土区，且易集留空气，使体表和土壤表面间存在空气膜，减少了实际接触面积，较深的凹槽易于集存体表液，这些因素耦合作用，降低了摩擦系数和大气负压对土壤的作用，改善了土壤的黏附度，非光滑程度越高，越易形成复合界面，从而减小了粘附力。

4 结 论

1) 蚯蚓体表形貌属于典型的波纹形非光滑结构：体节与节间沟组成的环节结构，形成一级宏观波纹形非光滑结构；皮肤表面分布着大量的交错纹理，形成二级微观波纹形非光滑结构。

2) 蚯蚓体表不同部位的非光滑程度各不相同：体部纹理小而密，非光滑单元密度较大；头部纹理大而稀，非光滑单元密度较小。不同状态的蚯蚓体表形貌大体类似，其非光滑单元体的特征参数有所不同：头部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体宽度之比和高度之比分别为 1.65 : 1 : 0.78 和 0.23 : 1 : 1.27；体部舒张态、静息态、收缩态非光滑结构单元体单元体宽度之比和高度之比分别为 1.65 : 1 : 0.81 和 0.33 : 1 : 1.28。舒张时，非光滑单元密度减小；收缩时，非光滑单元密度增大；静息时，非光滑单元密度居中。

3) 蚯蚓非光滑体表具有降阻功能, 其体表展平试样的降阻效果由大到小依次是: 收缩态、静息态、舒张态, 且头部要比体部降阻明显。与钢试样相比, 头部收缩态降阻 39%, 体部收缩态降阻 29%。

[参 考 文 献]

- [1] Shelley T. Worms show way to efficiently move[J]. Eureka, 2004, 24(1): 28—29.
- [2] Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. J Agric Engng Res, 2001, 79 (3): 239—263.
- [3] 闫志民, 翟新国, 孟玉刚. 蚯蚓[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2000: 12—17.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙久荣, 孙博宁, 韦建恒, 等. 蚯蚓体表电位的测定及其与运动的关系[J]. 吉林工业大学学报, 1991, 4: 18—23.
- [7] Zu Y Q, Yan Y Y. Numerical simulation of electro osmotic flow near earthworm surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 179—186.
- [8] 施卫平, 任露泉, Yan Yuying. 蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表的力学分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 73—74.
- [9] 李建桥, 刘国敏, 邹 猛, 等. 蚯蚓非光滑体表试样的法向土壤粘附特性[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(6): 95—99.
- [10] 杨志强. 三套微小土壤粘附力测试系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 38—49.

Feature and the characteristic of sliding resistance reduction of the earthworm's non-smooth surface

Liu Guomin^{1, 2}, Li Jianqiao^{1*}, Zou Meng³, Li Yinwu¹, Tian Ximei¹

(1. Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. Engineering College of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

3. Department of Automotive Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The earthworm (*Eisenia foetida*) was used as research object, and three surface specimens: motionless, extending and shrinking were prepared. The surface feature of the earthworm was analyzed by using the OLYMPUS stereo microscope and its image analysis system OLYCIATM M3. The results showed that the earthworm surface was typical wavy non-smooth structure, the body department texture was small and dense, while the forehead texture was big and thin, and the non-smooth unit density of the body department was bigger than that of the forehead. The ratio of the width and height of the non-smooth structure unit about the forehead motionless, extending and shrinking specimens were 1.65:1:0.78 and 0.23:1:1.27, respectively, while those of the body surface specimens were 1.65:1:0.81 and 0.33:1:1.28, respectively. The sliding resistance experiments of earthworm's unfolding surface specimens and steel specimens were conducted by means of a tiny adhesion testing system. The test results showed that the shrinking specimen had the best reducing sliding resistance ability, then was motionless specimen and the extending specimen, respectively. The reducing sliding resistance ability of the forehead was better than that of the body. Compared with the steel specimen, the rate of reducing sliding resistance of the forehead and the body shrinking were 39% and 29%, respectively. This study will afford basic data for bionic research of biologic non-smooth surface and exposing biomimetic coupling mechanism.

Key words: surfaces, feature extraction, biomimetic couplings, earthworm, non-smooth, soil sliding resistance