

仿生步行足沙地力学特性研究

王颖 李建桥 张广权 黄晗

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 基于螃蟹对滩涂、沙地、湿地等有很强的运动适应性,参照中华绒螯蟹步行足指节的结构,设计了4种仿生步行足:圆锥、圆锥沟纹、棱锥和圆柱沟纹步行足,并与圆柱足对照。通过土槽试验,考察在多种试验条件下,不同步行足对入土力、支承力、推进力和出土力的影响,并采用正交试验分析影响推进力的主要因素。与圆柱足的对比试验结果表明:仿生足有良好的沙地力学特性,锥形仿生足入土力减小64.71%~95.43%;圆柱沟纹仿生足使支承力增加9.48%~24.31%,推进力提高3.84%;仿生足出土力降低13.26%~89.83%,有效减少能耗。研究成果为松软路面步行机构触土部件的设计与优化提供了基础依据。

关键词: 中华绒螯蟹; 步行足; 仿生; 力学特性; 沙地

中图分类号: TH122; Q811.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0384-06

Mechanical Characteristics of Bionic Walking Foot on Soft Sand

Wang Ying Li Jianqiao Zhang Guangquan Huang Han

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Slipping and sinking easily happens on soft terrain, and it will affect the tractive performance of the vehicle. The passing ability on the soft terrain is very important for agricultural terrain-machine and mobile mechanism. Chinese mitten crab is a kind of common arthropod in China, which inhabits the shore of river and lake with mud everywhere. Viewed this way, the capability of going through soft terrain of crab is valuable for designing bionic walking mechanism and agricultural machine, which works on the sand, swamp, beach or wetland. Four bionic walking feet compared with cylinder foot were designed by learning from the Chinese mitten crab dactylopedite. Experiments were separately carried out on dry sand, wet sand, coarse sand and fine sand. Through experimentation the impact of the shape and grooves for foot on in-soil force, bearing force, pullout force and propulsive force were examined. Moreover, the order and contribution rate of every experiment factor on propulsive force were analyzed by orthogonal tests, range analysis and ANOVA. The results showed that the bionic walking foot had superior mechanical characteristics than cylinder foot on sand. In-soil forces of cone shape bionic foot were 64.71%~95.43% smaller than those of cylinder foot. The bearing force of cylinder bionic foot with grooves was 9.48%~24.31% larger than that of cylinder foot. Moisture content was the most critical influence factor on propulsive force. And the propulsive force was increased by about 3.84% with bionic walking foot. For all the bionic walking feet, the pullout forces were smaller, and the maximum reduction reached 89.83%, which indicated that the energy consumption of bionic feet was smaller. The bionic feet could be applied in various walking mechanism for different working conditions. This research provides basis for the design and optimization of soil contact parts for walking mechanism on soft terrain.

Key words: Chinese mitten crab; walking foot; bionic; mechanical characteristics; soft sand

收稿日期: 2015-08-17 修回日期: 2015-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375199)

作者简介: 王颖(1982—),女,博士生,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail: wang_ying13@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 李建桥(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail: jqli@jlu.edu.cn

引言

松软地面的通过性始终是农业地面机械和移动机器人研究着力解决的问题^[1-4]。腿式行走能够实现离散点触式前进,适用于崎岖不平或土质松软的路面。其中,多足步行机构具有较高的稳定性,不易倾翻,被广泛研制^[5-6]。目前腿式步行机构常见的足部类型有:平足,这种足接地面积大,稳定性好,如 P4^[7]、TITAN-VII^[8-9];球形,如 Ariel^[10];圆柱状,如以 ATHLETE^[11] 为代表的轮足式机器人;不规则形状,多为仿生结构^[12],如弧形腿^[13-14]等。目前对腿式移动机构的研究多集中于对运动准确性和灵活性的协调控制,但对触土部分足部结构的研究较少,尤其对步行足的抗沉陷、驱动性能与粘附力等极少涉及。

螃蟹是栖息在松软地面的无脊椎动物,对滩涂、沙地、湿地等有很强的运动适应性,现已开展了它的运动学研究^[15-18]。中华绒螯蟹习惯栖于我国江河、

湖滩的岸边,能够在泥沙中快速移动而不受困,这一特性为步行机构的研究提供了仿生学模板。本文以中华绒螯蟹步足指节为生物原型,设计不同的仿生步行足,通过力学试验对步行足试样进行比较,研究足部形状、足体沟纹、土壤粒径、入土深度等因素对步行足行走性能的影响。

1 仿生步行足的设计

1.1 中华绒螯蟹步足指节结构

中华绒螯蟹甲壳两侧对称分布 4 对步足。第 1 对步足主要与螯共同起支承作用,第 2、3 对步足主要用于行走,第 4 对步足较其他步足形状扁平,在行走时起辅助作用^[19]。各步足指节长短不一,形状相似,如图 1a 所示。仿生步行足以中华绒螯蟹第 3 对步足指节为生物原型。通过体视显微镜下的观察,指节为弧状,变截面结构,表面分布 6 条沟纹(图 1b),横截面轮廓近似圆形(图 1c)。



图 1 中华绒螯蟹步足指节特征

Fig. 1 Features of Chinese mitten crab dactylopodite

1.2 仿生足设计

通过分析中华绒螯蟹指节的沟纹结构及轮廓形状,从原理性试验角度出发,忽略指节的弧形轮廓,设计 4 种仿生步行足,其中,参照指节的变截面形状设计了圆锥步行足;参照沟纹结构设计出圆锥沟纹、棱锥、圆柱沟纹步行足。加工了圆柱足作为比较原型。试样材料均为铝合金 6561T6。如

图 2a 所示,1~4 号为仿生足,5 号是作为对比的圆柱足。图 2b 为试样尺寸图,5 种试样长度 $L = 68.5 \text{ mm}$,最大半径 $R_{\text{max}} = 5.6 \text{ mm}$,其中仿生足 1、2、3 号母体为锥形,锥度约为 $8^{\circ}24'05''$ 。受加工条件限制,2、4 号步行足沟纹数为 4,沟纹半径为 0.5 mm ,3 号步行足为六棱锥,仿生足 4 号与圆柱足为柱状,外廓尺寸一致。

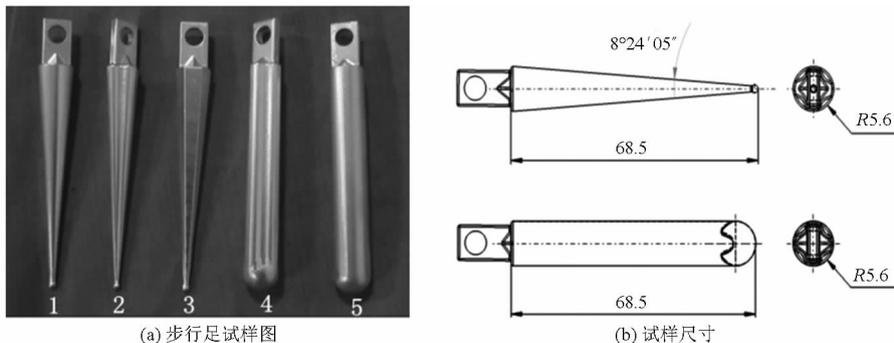


图 2 步行足试样及尺寸

Fig. 2 Samples and sizes of feet

1. 圆锥 2. 圆锥沟纹 3. 六棱锥 4. 圆柱沟纹 5. 圆柱(原型)

2 土槽试验

2.1 设备与方法

考虑试样尺寸,并保证试验时无边界效应,试验在小土槽中进行。土槽尺寸 $0.5\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),以小型万能试验机(QT-1186型)为动力源,提供试样的动力及运动。试验布置如图3所示,垂直方向力测试时,土槽放置夹具正下方,推进力测试时,土槽放在试验机侧面,用定滑轮使垂直力转换为水平力,拉动夹具沿滑轨移动。经过筛分,将石英沙按粒径分为粗沙(1~2 mm)和细沙(0.16~0.2 mm),用干燥法测得其初始含水率近似为0。土槽土层深度0.2 m,用环刀法测量试验条件下沙的容重。入土力与支承力为试样插入沙中特定深度受到的阻力;出土力为在固定深度拔出步行足时的土壤粘附力;推进力测量试样在固定深度水平运动时受到的阻力。每组试验重复3次,每次试验后用刮土板对沙做翻松和平整处理,使0.15 m深度内石英沙状态一致,控制容重误差小于10%。

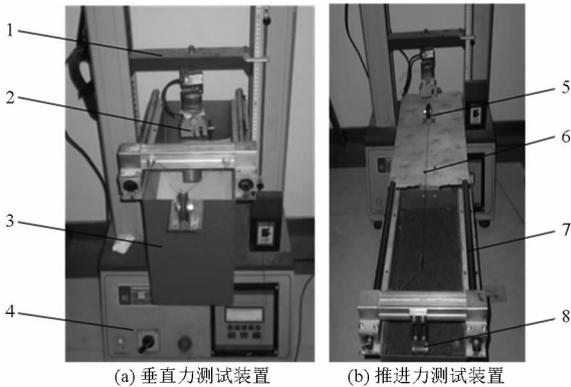


图3 试验装置

Fig.3 Test devices

1. 移动横梁
2. 夹具
3. 土槽
4. 万能试验机
5. 定滑轮
6. 钢丝绳
7. 滑轨

2.2 试验方案

根据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》测得粗沙与细沙的饱和含水率分别为 9.31%、26.69%,沙的容重为:干粗沙(1.41 ± 0.04) g/cm^3 ,干细沙(1.22 ± 0.03) g/cm^3 ,湿粗沙(1.51 ± 0.06) g/cm^3 ,湿细沙(1.56 ± 0.04) g/cm^3 。试验因素水平见表1。入土力、支承力和出土力用全试验法测量,推进力用正交试验方法测试,选择正交表 $L_9(2^2 \times 3^2)^{[20]}$,方案如表2所示。试验目的是考察不同步行足在沙地的行走性能,进而选择较优的步行足结构。

表1 试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of experiment

	水平	含水率/ %	粒径/mm	速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	深度/ mm
		入土力与 出土力	1	0	0.16~0.20
	2	9.31/26.69	1~2	20	
	3			30	
推进力	1	0	0.16~0.20	10	40
	2	9.31/26.69	1~2	20	50
	3			30	60

表2 推进力试验结果极差分析

Tab.2 Range analysis of propulsive force

试验 序号	因素				水平力/N	
	含水率	粒径	深度	速度	y_i	$y_i - 25.31$
1	1	1	1	1	7.00	-18.31
2	1	1	2	2	11.57	-13.74
3	1	2	3	3	30.71	5.40
4	1	1	2	3	10.49	-14.82
5	1	1	3	1	23.82	-1.49
6	1	2	1	2	14.85	-10.46
7	2	1	3	2	61.82	36.51
8	2	1	1	3	54.17	28.86
9	2	2	2	1	13.51	-11.80
\bar{y}_{j1}	16.41	28.15	25.34	14.78	主次因素:含水率、深度、速度、粒径	
\bar{y}_{j2}	43.16	19.69	11.86	29.41	优水平:含水率9.31% / 26.69%、深度60 mm、速度20 mm/min、粒径0.16~0.2 mm	
\bar{y}_{j3}			38.78	31.79		
R_j	26.75	8.54	26.44	17.01		

3 结果与讨论

3.1 入土力与支承力

入土力可表明步行足插入沙土过程中消耗的能量,入土力越小,机构的能量损失越小,而支承力越大,步行足越不易陷入地面。步行足在进入沙土过程中与沙垂直方向的作用力可分为入土力与支承力部分,对重复试验数据取平均值,得到20 mm/min时步行足-沙作用力曲线,如图4所示。0~10 mm为入土力,4种试验条件下,仿生足1、2、3号入土力与圆柱足差异明显,约低64.71%~95.43%,即入土能耗较少,仿生足4号因表面积增大入土力比圆柱足高24.31%~33.09%。入土深度大于10 mm之后视作支承力,仿生足1、2、3号支承力比圆柱足小48.73%~87.44%,仿生足4号支承力比圆柱足增大9.48%~24.31%。

3.2 出土力

出土力反映土壤对步行足的粘附,体现了步行足脱离土壤时的能量损失,出土力越小,能耗越小,效率越高。以仿生2号步行足在干细沙的出土力曲线为例(速度30 mm/min)(图5),出土力变化分为

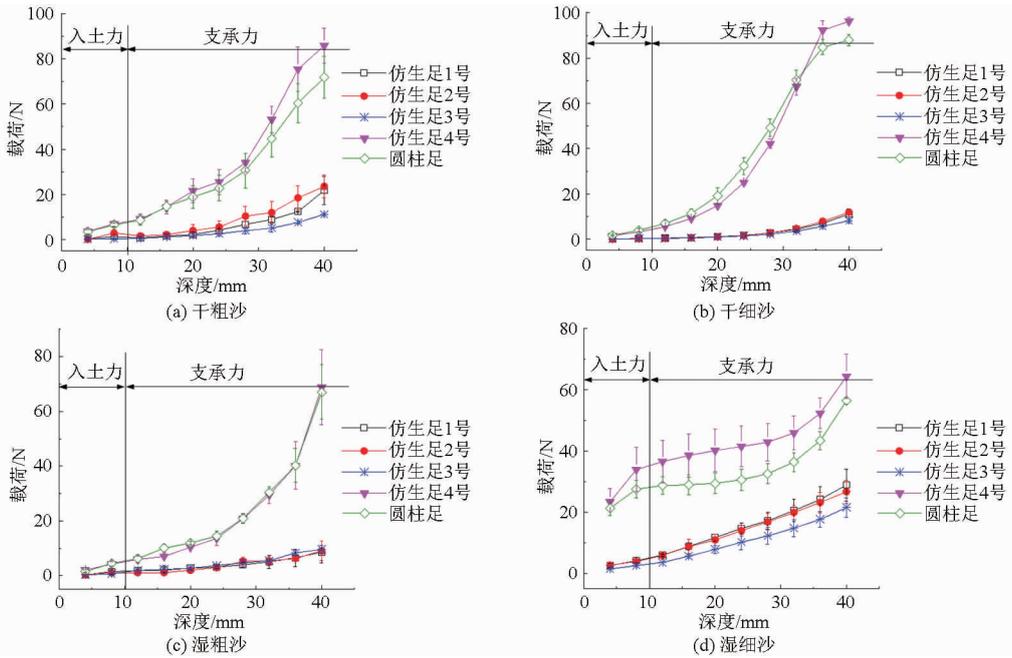


图 4 不同步行足的人土力与支承力

Fig. 4 In-soil forces and bearing forces of different feet

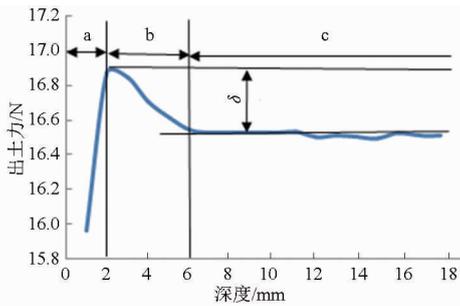


图 5 出土力曲线

Fig. 5 Curve of pullout force

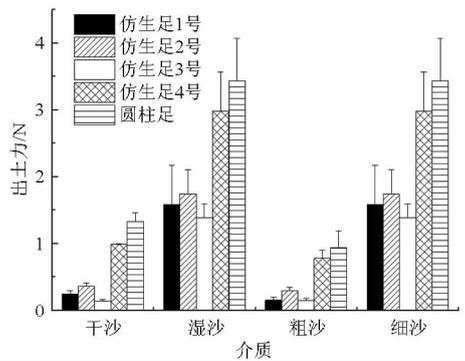


图 6 出土力比较

Fig. 6 Comparison of pullout force

上升(a)、下降(b)、平稳(c)3个阶段,分别表示步行足拔出过程中粘附力、摩擦力造成的步行足与沙之间作用力增加、逐渐减小直至稳定的过程。这里以峰值与稳定值的差值 δ 衡量出土力的大小。

图 6 为出土速度为 20 mm/min 时 5 种步行足在沙土中的出土力。可以看出,在不同含水率和粒径的条件下,4 种仿生足出土力均小于圆柱足,其中仿生足 3 号出土力最小,比圆柱足减小 59.64% ~ 89.83%,添加沟纹结构的仿生足 4 号出土力比圆柱足减小 13.26% ~ 25.41%。表明圆柱足出土过程需耗费更多能量,仿生足的结构能有效降低出土过程产生的能耗。

3.3 推进力

当步行足插入石英沙并向后摆动时,步行足在沙中受到阻力为推进力,驱动质心向前移动。土槽试验前,通过测量不加载试样时的拉力,得到装置自身的阻力,作为背景噪声在试验数据中应将其去除。试验启动阶段,产生较大的瞬时加速度,推进力曲线

迅速上升,后降至平稳。因此在数据采集时,选择推进力较稳定区段,过渡区域 50 mm,稳态区域 130 mm,试验总距离 180 mm。5 种试样均采用正交试验方案,表 2 为仿生足 2 号推进力试验数据及方差分析。

由极差分析方法得出,影响仿生足 2 号在不同沙中所受推进力的主次因素为含水率、深度、速度、粒径,为了使步行机构在运动中获得较大的推进力,各因素的优水平为含水率 9.31%/26.69%、深度 60 mm、速度 20 mm/min、粒径 0.16 ~ 0.2 mm。对结果进行方差分析(表 3),可知:含水率对仿生足 2 号推进力有极显著影响($P < 0.01$),深度和速度对其推进力有显著性影响($0.01 < P < 0.05$),粒径对推进力无显著性影响($P > 0.05$)。对其他 4 种步行足推进力做相同分析,得到相同结果。可见,含水率是影响步行足推进力的最重要因素,深度为次要因素,而速度和粒径对推进力的影响较小,5 种步行足的

试验结果均表明粒径为不显著因素。

表3 正交试验结果方差分析

Tab.3 Variance analysis of orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F	P
含水率	1 427.505	1	1 427.505	167.210	0.006
粒径	142.168	1	142.168	16.653	0.056
深度	1 087.513	2	543.757	63.693	0.016
速度	507.406	2	253.703	29.717	0.033
误差	17.074	2	8.537		

图7为5种步行足在湿细沙、20 mm/min速度条件下的推进力。可知,各步行足的推进力随深度增加线性增大,仿生足1、2、3号在沙中的推进力均小于圆柱足,其中仿生足1号的推进力最小。仿生足4号在40 mm和50 mm深度的推进力小于圆柱足,但当深度超过约54 mm时,仿生足4号的推进力大于圆柱足,且增长迅速,至60 mm时,仿生足4号的推进力比圆柱足增大3.84%。

综上所述,与圆柱足相比,仿生足1、2、3号可有效减小入土力与出土力,能量损失小,可用于轻质轻载小型步行机构,使运动灵活轻便;仿生足4号在出土力较小的同时可产生更大的承载力与推进力,对于有承载需要的步行机构可提高牵引力,并减小其在松软地面的沉陷。

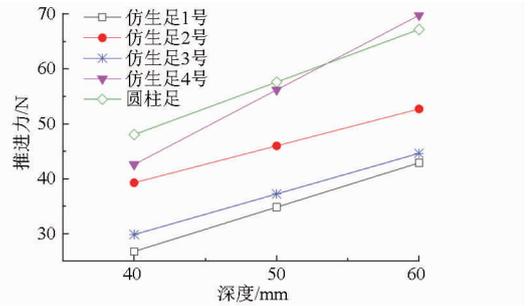


图7 步行足推进力对比

Fig.7 Comparison of propulsive forces for different feet

4 结论

(1)与圆柱足相比,仿生足1、2、3号入土力减小64.71%~95.43%,入土能耗较小;仿生足4号入土后的支承力提高9.48%~24.31%,抗沉陷性能较好。

(2)仿生足出土力均小于圆柱足,最多可减小89.83%,表明仿生结构可有效降低步行足出土时的能量损失。

(3)运用正交试验分析,对步行足推进力的最重要影响因素为含水率,其次是深度和速度,而在试验条件下沙的粒径对推进力无显著影响。

(4)在具有较小出土力的同时,仿生足4号比圆柱足产生更大的推进力,约提高3.84%。

参 考 文 献

- 李建桥,黄晗,王颖,等. 松软地面机器系统研究进展[J]. 农业机械学报,2015,46(5):306-320.
Li Jianqiao, Huang Han, Wang Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):306-320. (in Chinese)
- 丁亮亮,肖杰,宗魏,等. 与沉陷相关联的星球车挂钩牵引力模型研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):37-42.
Ding Liangliang, Xiao Jie, Zong Wet, et al. Drawbar pull model of planetary rover associated with subsidence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 37-42. (in Chinese)
- 左艳蕊,宗志坚,刘忠途,等. 基于多体接触碰撞的松软地面车轮沉陷仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(10):33-38.
Zuo Yanrui, Zong Zhijian, Liu Zhongtu, et al. Numerical simulation of wheel sinkage on soft terrain based on multibody contact problem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 33-38. (in Chinese)
- 任露泉,佟金,李建桥,等. 松软地面机械仿生理论与技术[J]. 农业机械学报,2000,31(1):5-9.
Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Biomimetics of machinery for soft terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 5-9. (in Chinese)
- 王刚,张立勋,王立权. 八足仿蟹机器人步态规划方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(4):486-491.
Wang Gang, Zhang Lixun, Wang Liquan. Research on a gait planning method for a crab-like octopod robot[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011,32(4):486-491. (in Chinese)
- Chen Xi, Wang Liquan, Ye Xiufen, et al. Prototype development and gait planning of biologically inspired multi-legged crablike robot[J]. Mechatronics, 2013, 23(4): 429-444.
- Jun Morimoto, Jun Nakanishi, Gen Endo, et al. Poincaré-map-based reinforcement learning for biped walking[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 2392-2397.
- Arikawa K, Hirose S. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII[C]//Proc. of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,1996: 208-214.
- Keisuke Kato, Shigeo Hirose. Development of the quadruped walking robot for humanitarian demining (proposal of the system and basic experiment of several foot-end-effectors)[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2005, 12(3):261-267.
- Captain R D, Captain D T. Search, identify, and destroy: a robotic solution to urban warfare[R]. Land Forces Technical Staff Programme V Royal Military College, Kingston, 2000.

- 11 Parush A, Pulsifer P, Philp K, et al. Understanding through structure: the challenges of information and navigation architecture in cybercartography[J]. *Cartographica*, 2006, 41(1):21-34.
- 12 Ding Liang, Gao Haibo, Deng Zongquan, et al. Foot-terrain interaction mechanics for legged robots: modeling and experimental validation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(13): 1585-1606.
- 13 Saranli U, Buehler M, Koditschek D E. RHex: a simple and highly mobile hexapod robot[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(7):616-631.
- 14 Holmes P, Full R J, Koditschek D, et al. The dynamics of legged locomotion: models, analyses, and challenges [J]. *Siam Review*, 2006, 48(2): 207-304.
- 15 李建桥, 张晓冬, 邹猛, 等. 中华绒螯蟹平面运动三维观测和步态分析[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊):335-338.
Li Jianqiao, Zhang Xiaodong, Zou Meng, et al. 3-D surveying and gaits analysis of chinese mitten crab in smooth road[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 335-338. (in Chinese)
- 16 Mitchell S C, DeMont M E. Analysis of the mero-carpopodite joint of the American lobster and snow crab. II. Kinematics morphometrics and moment arms[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 2003, 83(6): 1249-1259.
- 17 Chapple W. Kinematics of walking in the hermit crab, *Pagurus pollicarus*[J]. *Arthropod Struct & Development*, 2012, 41(2): 119-131.
- 18 张晓冬, 李建桥, 邹猛, 等. 中华绒螯蟹平面运动三维观测和动力学分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 30-37.
Zhang Xiaodong, Li Jianqiao, Zou Meng, et al. Three-dimensional observation and dynamics analysis of Chinese mitten crab's locomotion on smooth terrain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 30-37. (in Chinese)
- 19 Martinez M M, Full R J, Koehl M A R. Underwater punting by an intertidal crab: a novel gait revealed by the kinematics of pedestrian locomotion in air versus water[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(18): 2609-2623.
- 20 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.

(上接第 368 页)

- 12 Nerva J-G, Yamaguchi T, Iguma H, et al. Transmission electron microscopy of soot particles sampled directly from a biodiesel spray flame[C]. *SAE Paper 2011-01-2046*, 2011.
- 13 Lee J, Altman I, Choi M. Design of thermophoretic probe for precise particle sampling[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(5): 418-431.
- 14 邓鹏. 定容弹内低温燃烧条件下乙醇柴油喷雾和燃烧特性实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
Deng Peng. Experimental research on ethanol-diesel spray and combustion under low temperature combustion conditions in a constant volume combustion bomb[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 15 邓鹏, 黄荣华, 张永林, 等. 一种预混燃烧加热式定容燃烧弹的研发[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(8): 121-126.
Deng Peng, Huang Ronghua, Zhang Yonglin, et al. Development of a constant volume combustion bomb heated by premixed burning[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2013, 41(8): 121-126. (in Chinese)
- 16 王兆文, 李浩, 黄都, 等. 基于 Matlab/GUI 的汽油机缸内直接喷雾图像处理方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9):19-23.
Wang Zhaowen, Li Hao, Huang Du, et al. Digital image processing method of gasoline direct injection spray based on Matlab/GUI [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9):19-23. (in Chinese)
- 17 Ma Y J, Huang R H, Deng P, et al. The development and application of an automatic boundary segmentation methodology to evaluate the vaporizing characteristics of diesel spray under engine-like conditions [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045004.
- 18 邓鹏, 黄荣华, 马寅杰, 等. 强化混合条件下乙醇柴油和柴油的喷雾混合特性 [J]. *内燃机学报*, 2014, 32(2): 144-151.
Deng Peng, Huang Ronghua, Ma Yinjie, et al. Atomization and mixture formation characteristics of ethanol-diesel and diesel under intensified mixing conditions[J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(2): 144-151. (in Chinese)
- 19 Huang S, Deng P, Huang R, et al. Visualization research on spray atomization, evaporation and combustion processes of ethanol-diesel blend under LTC conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106:911-20.
- 20 赵洋, 王忠, 刘帅, 等. 废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7):280-285.
Zhao Yang, Wang Zhong, Liu Shuai, et al. Effect of gas composition in exhaust gas recirculation on structural feature of particulates from diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7):280-285. (in Chinese)