

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.012

复合形态深松铲耕作阻力有限元分析与试验^{*}

张强 张璐 于海业 肖英奎

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

【摘要】 以复合形态深松铲为研究对象,采用 ANSYS/LS-DYNA 分析了深松铲在土壤耕作过程中耕深与前进速度对深松耕作阻力的影响,并以圆弧形深松铲为比较对象,分析了复合形态深松铲的减阻效果。为了验证有限元分析方法的可行性,对复合形态深松铲和圆弧形深松铲进行了室内土槽的耕作阻力验证试验。研究结果表明,通过有限元法模拟出的深松铲耕作阻力与室内土槽试验所测定的结果具有相同的变化趋势,利用有限元法可以分析深松铲的工作性能。在深松铲前进速度为 4~5 km/h 范围内,相对于圆弧形深松铲,用有限元法模拟复合形态深松铲的耕作阻力在耕深为 300、350 和 400 mm 时,平均减阻分别为 44.07%、43.71% 和 33.83%。

关键词: 深松铲 耕作阻力 有限元 土槽试验

中图分类号: S222.12⁺⁹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0061-05

Finite Element Analysis and Experiment of Soil Resistance of Multiplex-modality Subsoiler

Zhang Qiang Zhang Lu Yu Haiye Xiao Yingkui

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The general explicit nonlinear finite element program ANSYS/LS-DYNA was used as a tool to research the influence of tillage depth and operating speed on operating resistance of the multiplex-modality subsoiler, as well as to study the significance of operating resistance reduction of the multiplex-modality subsoiler compared with the standard arc-shape subsoiler. In order to prove the reliability of the finite element analysis method, the operating resistance of the multiplex-modality subsoiler and the standard arc-shape subsoiler was tested in a soil bin. The result showed that there was a same varying trend between the operating resistance data obtained by the finite element method and soil bin test, and the finite element method was suitable to the research of the performance of subsoiling. With the fixing operating speed of 4~5 km/h, average operating resistance of the multiplex-modality subsoiler reduced by 44.07%, 43.71% and 33.83% than of the standard arc-shape subsoiler, based on tillage depth of 300 mm, 350 mm and 400 mm, respectively. All these data proved that the multiplex-modality subsoiler had a significant effect on operating resistance reduction.

Key words Subsoiler, Tillage resistance, Finite element, Soil bin experiment

引言

深松耕作是农业保护性耕作的重要组成部分,而深松铲是实现深松耕作的关键部件。通过深松铲

的深松作业可以打破犁底层,改善土壤透水与透气性能,从而改善耕层土壤结构、提高蓄水保墒能力,为农作物根系生长创造良好环境^[1-5]。由于传统的土壤深松部件的能耗较大,特别是随着耕深和机器

收稿日期:2012-05-23 修回日期:2012-06-14

^{*}“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B09)

作者简介:张强,副教授,主要从事农业工程装备技术研究,E-mail:zhangqiang@jlu.edu.cn

通讯作者:于海业,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境测控与节能技术研究,E-mail:haiye@jlu.edu.cn

前进速度的增加机具牵引阻力显著增大,因此优化深松土壤耕作部件的几何形状,降低耕作阻力,对于减少深松作业能耗具有重要的意义^[6-7]。

LS-DYNA 是功能齐全的通用显式非线性动力分析的有限元程序包,其显式算法适合于分析各种非线性结构冲击动力学问题^[8]。实践证明土壤本构模型的选择对有限元模拟结果的准确性至关重要,而目前应用较为广泛的 Drucker-Prager 非线性弹塑性本构模型能提供满足适当精度要求的模拟结果^[9]。LS-DYNA 提供了一种适合土壤模型的材料类型 MAT147,它是针对实体单元且考虑损伤特性的各向同性材料模型,采用的是修正的 Drucker-Prager 塑性模型。该模型以 Mohr-Coulomb 屈服准则为基础,扩展了含水率、变形率的影响,考虑了塑性硬化、塑性软化、应变速率效应和孔隙水压力效应,使模拟结果更加准确,可用于土壤切削问题的模拟^[10-12]。

本文以复合形态深松铲和圆弧形深松铲为研究对象,利用有限元分析方法研究耕深和前进速度对深松铲耕作阻力的影响。并将分析结果与室内土槽耕作阻力试验结果进行比较,评价复合形态深松铲的减阻效果,并验证采用有限元分析方法研究深松铲耕作阻力的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验材料与过程

试验所用复合形态深松铲是通过模仿土壤动物爪趾轮廓形态与倾斜直线组合所设计的一种深松铲,结构形态如图 1 所示,最大耕深设计为 400 mm,其中铲柄切土刃角 φ 为 60° 、铲尖入土角为 20° 、铲柄厚度为 30 mm。铲尖上端面后部为矩形,前部刃线由一对称圆弧线组成,铲尖厚度为 10 mm,铲尖宽度为 40 mm。采用 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》所规定的圆弧形中型深松铲作为比较对象,所用铲尖为箭形。

试验在吉林大学农机工程实验室土槽内进行,取土槽长度 18 m 为工作区,其中中间 10 m 为耕作

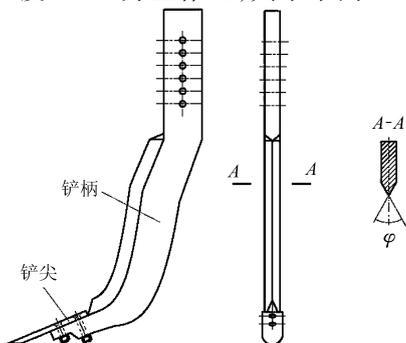


图 1 复合形态深松铲结构简图

Fig. 1 Structure of subsoiler

阻力测试区,测试区前后各留 4 m 作为过渡区。为保证试验中土壤状态相同,试验前 7 d 对土壤浇适量水,渗透 3 d 后用深松铲浅松,平整土壤并略微压实,使土壤含水率达到 10%~15%,300~400 mm 土层土壤坚实度达到 900~1 500 kPa。利用八角环传感器测取深松铲的耕作阻力。测试装置连接方式如图 2 所示,在机架和深松铲之间安装八角环传感器。深松铲的机架通过三点悬挂装置安装在土槽测试车上,通过三点悬挂装置调节耕深,通过控制系统控制土槽测试车的前进速度。

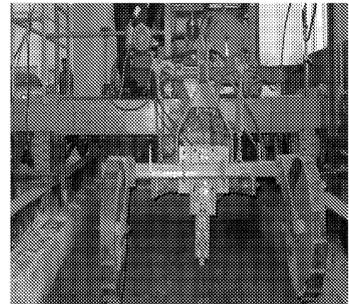


图 2 耕作阻力测试系统

Fig. 2 Tillage resistance measuring system

1.2 研究方法

用有限元分析和室内土槽试验两种方法,分别研究复合形态深松铲和圆弧形深松铲在耕深分别取 300、350 和 400 mm,机器前进速度分别取 4、4.5 和 5 km/h 条件下 9 组参数组合的耕作阻力,并对比有限元模拟和土槽试验两种测试结果。

1.2.1 有限元分析方法

采用 LS-DYNA 对深松铲进行土壤耕作过程模拟。

(1) 材料特性

深松铲模型材料定义为刚体,其特性参数设置参照锰钢,土壤材料采用 LS-DYNA 提供的 MAT_FHWA_SOIL 模型,主要参数设置见表 1。

表 1 土壤和深松铲材料特性参数

Tab. 1 Material properties of soil and subsoiler

参数	数值
土粒密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.08×10^3
土粒相对密度	2.68
土壤含水率/%	12
土壤内摩擦角/rad	0.436
土壤凝聚力/Pa	1.0×10^4
深松铲密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7.8×10^3
深松铲弹性模量/Pa	2.06×10^{11}
深松铲泊松比	0.29

(2) 定义接触

深松铲与土壤之间切削过程适合用侵蚀接触进行模拟计算,深松铲与土壤间的接触算法选择面面

接触侵蚀算法,接触刚度系数为 2.0。

(3) 建模与网格划分

深松铲模型的几何结构按照实物进行 1:1 建模,土壤模型的几何结构设置为 $1.00\text{ m} \times 0.60\text{ m} \times 0.30\text{ m}$ 的实体。深松铲和土壤模型单元类型定义为 LS-DYNA Explicit 三维实体单元 SOLID 164,算法为拉格朗日单点积分。两种深松铲模型均采用自由法划分为四面体四节点的网格,其中复合形态深松铲的单元数为 534,节点数为 266,圆弧形深松铲的单元数为 551,节点数为 263。土壤模型采用扫掠法划分为六面体八节点的网格,单元数为 5 760,节点数为 7 176。两种深松铲和土壤的几何模型、初始位置及网格划分如图 3 和图 4 所示。

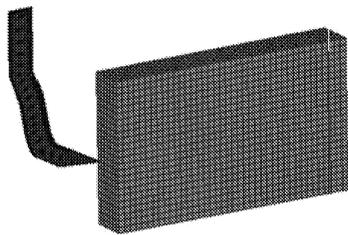


图 3 复合形态深松铲和土壤几何模型

Fig. 3 Geometric model of soil and multiplex-modality subsoiler

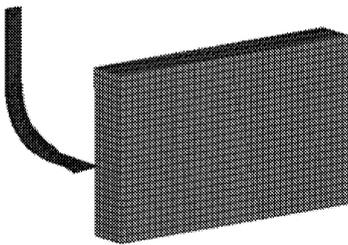


图 4 圆弧形深松铲和土壤几何模型

Fig. 4 Geometric model of soil and standard arc-shape subsoiler

(4) 约束设置

以深松铲铲尖初始位置为坐标原点建立坐标系,深松铲的水平运动方向为 x 轴,铅垂方向为 y 轴,与 x 轴和 y 轴垂直的方向为 z 轴。约束深松铲的 y 轴、 z 轴的平动自由度和所有坐标轴的转动自由度。约束土壤底面的全自由度,约束土壤侧面 z 轴的平动自由度、 x 轴和 y 轴的转动自由度。约束待接触表面对面的 x 轴平动自由度、 y 轴和 z 轴的转动自由度。

(5) 载荷与沙漏控制

设置深松铲 x 轴方向的初速度,并对深松铲加载 x 轴方向上的时间对位移的函数,以此来控制深松铲的运动状态。粘性阻尼算法采用 LS-DYNA 标准类型,沙漏控制系数设定为 0.1。

1.2.2 土槽试验方法

通过八角环传感器把深松铲的受力转换成电压信号,通过应变测试仪放大和 A/D 转换,利用数据

采集软件由计算机进行数据采集和输出。数据采集频率为 50 Hz,测试前对八角环传感器进行了受力标定。试验时,首先调整耕深达到测试水平,启动数据采集系统,然后启动土槽测试车使其移动速度达到测试水平,数据采集系统自动记录深松铲的耕作阻力。通过计算求得 10m 长度测试区内耕作阻力的平均值作为测试结果,每组参数条件下重复 3 次试验,3 次试验测试结果的平均值作为平均耕作阻力。

2 结果与分析

图 5 为深松铲耕深为 350 mm、前进速度为 4.5 km/h 时,LS-DYNA 模拟出的深松铲耕作阻力随时间变化曲线。图 6 是耕深为 350 mm、前进速度为 4.5 km/h 时深松铲耕作阻力在测试区内随时间变化的土槽试验结果。其他不同耕深和前进速度条件下耕作阻力随时间变化的趋势与图 5、6 相同。

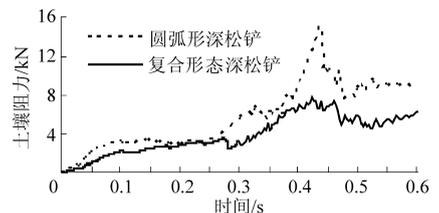


图 5 深松铲耕作阻力-模拟曲线

Fig. 5 Simulation curves of operating resistance of two subsoilers

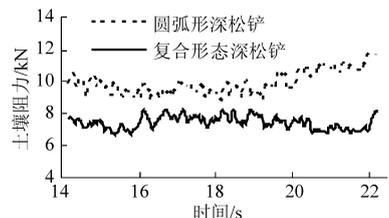


图 6 深松铲耕作阻力试验曲线

Fig. 6 Operating resistance curves of two subsoilers

从图 5 可以看出,随着深松铲的铲柄开始大面积接触土壤,土壤阻力显著增加,在 0.44 s 附近达到一个峰值,然后迅速下降。当土壤的凝聚力结合键被破坏时,发生初始失效。随后土壤开始出现软化效应,强度降低,土壤阻力逐渐减小,最终在 0.5 s 之后,随着深松铲在土壤中稳定前进,土壤阻力保持在一定的稳定值。稳定后的耕作阻力更适合用来估计深松铲实际耕作时的平均阻力。因此,以 0.5 s 之后的耕作阻力的平均值作为有限元模拟的平均耕作阻力。

图 6 表明深松铲在 10 m 长度的测试区内耕作阻力总体上保持在一定的变化范围,主要是由于土壤条件的差异造成耕作阻力存在波动情况。通过计算可以获得测区范围内复合形态深松铲平均耕作阻

力为 6.639 kN, 变异系数为 5.17%; 圆弧形深松铲平均耕作阻力为 9.917 kN, 变异系数为 4.92%。

9 组参数条件下平均耕作阻力计算结果如表 2 所示, 其中 F_{11} 和 F_{12} 为复合形态深松铲与圆弧形深松铲模拟的平均耕作阻力, F_{21} 和 F_{22} 为对应土槽试

验的平均耕作阻力 3 次重复试验平均值。重复试验获得的平均耕作阻力变异系数均小于 1%。 η_1 为模拟减阻率, η_2 为试验测定减阻率, δ_1 和 δ_2 分别为复合形态和圆弧形深松铲平均耕作阻力的模拟与试验测定结果的相对误差。

表 2 深松铲耕作阻力
Tab. 2 Tillage resistance

耕深 /mm	速度 /km·h ⁻¹	F_{11} /kN	F_{12} /kN	F_{21} /kN	F_{22} /kN	η_1 /%	η_2 /%	δ_1 /%	δ_2 /%	同一耕深减阻率/%	
										模拟	土槽试验
300	4.0	3.236	6.233	3.684	7.219	48.08	48.97	12.16	13.66	44.07	44.77
	4.5	3.913	6.937	4.448	7.686	43.59	42.13	12.03	9.74		
	5.0	4.813	8.096	4.726	8.322	40.55	43.21	-1.84	2.72		
350	4.0	4.534	8.790	5.689	9.897	48.42	42.52	20.30	11.18	43.71	39.68
	4.5	4.986	8.877	6.149	10.292	43.83	40.26	18.91	13.75		
	5.0	5.467	8.950	7.506	11.780	38.92	36.28	27.16	24.02		
400	4.0	8.345	11.113	7.904	12.217	24.91	35.30	-5.58	9.04	33.83	34.16
	4.5	8.472	12.681	9.394	13.368	33.19	29.73	9.81	5.14		
	5.0	8.596	15.188	9.496	15.180	43.40	37.44	9.48	-0.05		

由表 2 可见, 有限元模拟出的平均耕作阻力与土槽试验测定结果的相对误差在耕深为 300 mm 和 400 mm 时较小, 最大为 13.66%, 最小为 0.05%; 耕深为 350 mm 时相对误差最大为 27.16%, 最小为 11.18%。这说明耕深在 300 mm 和 400 mm 时耕作阻力模拟值较接近试验测试值, 模拟效果较好。但耕深为 350 mm 时, 耕作阻力模拟值小于耕作阻力测试值, 且相对误差较大, 可能是土壤模型及其参数选取或者三维建模方面带来的误差, 具体原因还需更深入研究。

2 种方法所测定的深松铲平均耕作阻力在不同耕深和前进速度下的变化规律基本吻合, 这说明通用显式非线性动力分析能较好地模拟耕作部件切削土壤的过程, 模拟得出的深松铲平均耕作阻力对于实际情况的预测具有很好的参考价值。

上述分析结果表明, 在前进速度为 4 ~ 5 km/h 范围内, 耕深相同条件下, 深松铲前进速度越高, 耕作阻力越大。相对于圆弧形深松铲, 在耕深分别为

300、350 和 400 mm 时, 利用有限元模拟的复合形态深松铲的耕作阻力平均减阻率分别为 44.07%、43.71% 和 33.83%, 而室内土槽试验时平均减阻率分别为 44.77%、39.68% 和 34.16%, 二者数据相差不大, 都表明了复合形态深松铲具有较好的减阻效果。但由于实际田间土壤状况及其与室内土槽土壤条件的差异, 减阻效果还有待通过田间试验来确定。

3 结束语

采用 LS-DYNA 软件模拟与室内土槽试验验证相结合的方法, 分析了复合形态深松铲在进行土壤耕作过程中, 耕深和前进速度对耕作阻力的影响。结果表明两种方法获得的耕作阻力在不同耕深和前进速度下的变化规律基本吻合, 均随耕深和前进速度的增加而增大。有限元分析方法与室内土槽试验结果均表明复合形态深松铲具有较好的减阻效果, 进一步证明了利用有限元分析方法能很好地研究深松铲的耕作阻力。

参 考 文 献

- 1 Kaveh Mollazade, Ali Jafari, Ebrahim Ebrahimi. Application of dynamical analysis to choose best subsoiler's shape using ANSYS [J]. New York Science Journal, 2010, 3(3): 93 ~ 100.
- 2 郭新荣. 土壤深松技术的应用研究[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(1): 74 ~ 77.
Guo Xinrong. Research of deep loosening technology[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2005, 25(1): 74 ~ 77. (in Chinese)
- 3 李洪文, 陈君达, 李问盈. 保护性耕作条件下深松技术研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 42 ~ 45.
Li Hongwen, Chen Junda, Li Wenying. Study on subsoiling technique for conservation tillage field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 42 ~ 45. (in Chinese)

- 4 Manuwa S I. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil[J]. *Soil & Tillage Research*,2009,103(2):399~405.
- 5 朱瑞祥,张军昌,薛少平,等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. *农业工程学报*,2009,25(6):145~147.
Zhu Ruixiang, Zhang Junchang, Xue Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2009,25(6):145~147. (in Chinese)
- 6 Ren Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2009,52(2):273~284.
- 7 任露泉,陈德兴,胡建国. 土壤动物减粘脱土规律初步分析[J]. *农业工程学报*,1990,6(1):15~20.
Ren Luquan, Chen Dexing, Hu Jianguo. Initial analysis on the law of reducing adhesion of soil animals[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1990,6(1):15~20. (in Chinese)
- 8 尚晓江,苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:3~4.
- 9 郭志军,周志立,张毅,等. 土壤耕作部件仿生优化设计研究[J]. *中国科学 E 辑:技术科学*,2009,39(4):720~728.
- 10 U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Evaluation of LS-DYNA soil material model147[R]. Volpe National Transportation Systems Center, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-094, 2004.
- 11 U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Manual for LS-DYNA soil material model147[R]. Volpe National Transportation Systems Center, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-04-095, 2004.
- 12 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J]. *农业机械学报*,2012,43(1):59~62.
Jiang Jiandong, Gao Jie, Zhao Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(1):59~62. (in Chinese)

(上接第 55 页)

- 4 俞高红,孙良,赵匀. 混合齿轮行星系分插机构的人机交互参数优化[J]. *农业机械学报*,2008,39(2):47~50.
Yu Gaohong, Sun Liang, Zhao Yun. Parameters optimization based on human-computer conversation of transplanting mechanism with planetary spur gears and elliptical gears[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2008,39(2):47~50. (in Chinese)
- 5 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- 6 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 7 洪家振,扬长俊. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社,2007
- 8 李养成. 空间解析几何[M]. 北京:科学出版社,2007.
- 9 俞高红,张玮炜,孙良,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星轮系在后插旋转式分插机构中的应用[J]. *农业工程学报*,2011,27(4):100~105.
Yu Gaohong, Zhang Weiwei, Sun Liang, et al. Application and analysis of planetary gear train with eccentric gears and non-circular gear in backward rotary transplanting mechanism [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4):100~105. (in Chinese)
- 10 赵匀,赵雄,张玮炜,等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. *农业机械学报*,2011,42(3):65~68,43.
Zhao Yun, Zhao Xiong, Zhang Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(3):65~68,43. (in Chinese)
- 11 赵匀,黄巨明,张国凤,等. 变形椭圆齿轮分插机构运动分析与优化[J]. *农业机械学报*,2011,42(4):48~52,61.
Zhao Yun, Huang Juming, Zhang Guofeng, et al. Kinematic analysis and optimization of transplanting mechanism with deformable elliptic gears transmission[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(4):48~52,61. (in Chinese)