

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.024

基于 SPH 算法的立式旋耕刀土壤切削仿真模拟^①

韩煜杰, 李云伍, 赵华慧, 陈浩, 刘得雄

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 立式旋耕是丘陵山地改善土壤结构、增加耕作深度的耕作方式之一, 为研究立式旋耕刀与土壤切削的作用机理, 优化刀片结构达到减阻降耗的目的, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件并采用 SPH 方法对旋耕刀进行有限元动态仿真, 对 3 种不同螺旋线型的刀片进行对比分析. 根据仿真结果分析了旋耕刀的切削阻力和切削功率变化规律, 最终选用的 B 刀片比 A 刀片切削阻力降低 9.42%, 切削功率降低 14.02%, 并对 B 旋耕刀进行田间实验, 其功率和扭矩与仿真分析结论一致.

关键词: 旋耕刀; SPH; 土壤切削; 减阻降耗

中图分类号: S222.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2016)12-0150-06

我国耕地大约有 69.27% 分布在山地、丘陵和高原地区^[1], 微耕机的出现大大推进了丘陵山区的耕作机械化^[2]. 然而, 微耕机大部分实际耕深只有 10~15 cm, 使用微耕机长期浅耕已经带来了诸多严重问题, 如耕层下面土壤板结, 肥料利用率低, 土地蓄水保水能力弱化和病虫害增加等. 因此, 为了改善土壤结构, 提高农作物产量, 就必须增加耕深.

立式小型深耕机是丘陵山区增加耕作深度的耕作机具之一. 为研究立式深耕作业过程土壤切削作用机理, 优化旋耕刀线型, 本文设计了耕深达到 30 cm 的立式旋耕刀, 采用 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)算法及土壤切削有限元动态仿真对其进行分析及优化, 并对优选的旋耕刀片的功率和扭矩进行了实验验证.

SPH 算法是 Lucy、Gingold 和 Monaghan 首先提出的, 近 20 多年来逐步发展起来的一种无网格方法^[3-4]. 由于质点之间不存在网格关系, 因此可避免极大变形时网格扭曲而造成的精度破坏等问题, 并且也能较方便地处理不同介质的交界面, 特别适合于求解高速碰撞等动态大变形问题.

1 SPH 算法基本原理

SPH 可以理解成一系列具有相互作用且带有质量、速度等物理量的质点集合, 通过求解各个质点的力学方程及质点的轨迹, 获得整个系统的动力学的方法.

SPH 方法的核心是插值理论^[5], 要求解各个质点在任意时刻的能量和速度, 需引入核函数. 场函数经过核函数“光滑化”, 再在整个求解域上积分, 便得到了表征各个质点的动力学特征的函数.

$$\prod^h f(x) = \int f(y)W(x-y, h)dy \tag{1}$$

式中, W 为使用辅助函数定义:

^① 收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475385); 重庆市应用开发计划项目(cstc2014yykfA80001).

作者简介: 韩煜杰(1991-), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事农业机械化研究.

通信作者: 李云伍, 副教授, 硕士研究生导师.

$$W(x, h) = \frac{1}{h(x)^v} \theta(x)$$

(2)

式中, v 为空间维数, h 为光滑长度.

处理土壤动力学问题时, 在 SPH 方程中加入人工粘性项对冲击波进行光滑, 避免产生不连续性. Monaghan 和 Gingold 导出了适用于 SPH 方法的人为粘性项.

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\varphi_{ij} \alpha \Pi \overline{c_{ij}} + \beta \Pi \varphi_{ij}^2}{\overline{\rho_{ij}}} & u_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & u_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

(3)

式中, c_i, c_j 为粒子速度, α_Π, β_Π 为可调参数.

通过上述人工粘性表达式可以看出: 只有当 $\varphi_{ij} < 0$ 时, 人为粘性才存在; 而当粒子分离时人为粘性为零. J. WSwegle 给出了修正公式忽略了 φ_{ij} 的影响, 使粒子分离时也存在人为粘性^[6].

$$\Pi_{ij} = \frac{\varphi_{ij} (\alpha \Pi \overline{c_{ij}} + \beta \Pi |\varphi_{ij}|)}{\overline{\rho_{ij}}}$$

(4)

2 旋耕刀和土壤模型的建立

2.1 旋耕刀的有限元模型

根据丘陵山区的土壤特性和土壤切削的动力学分析, 设计了螺旋曲面的立式旋耕刀. 首先在软件 SOLIDWORKS 中建立旋耕刀的三维实体模型, 保存成 X_T 格式文件导入 ANSYS/LS-DYNA 软件中. 然后对模型进行材料添加和网格划分, 定义网格单元类型为 SOLID3D 164, 采用 Lagrange 型单点积分算法, 网格边长尺寸为 10 mm, 并将旋耕刀设置为刚体, 材料选用 65 Mn, 密度为 7 830 kg/m³, 弹性模量为 207 GPa^[7], 泊松比为 0.3. 设置完成后划分网格建立旋耕刀有限元实体模型^[8].

2.2 土壤的有限元模型

在 LS-PREPOST 中直接建立土壤 SPH 模型, 设置土壤整体尺寸为 500×400×400 mm. 土壤有限元模型材料选择 MAT147 并采用了 Drucke_Prager 塑性模型, 以 Mohr_Coulomb 屈服准则进行修正^[9], 考虑了粘塑性和切削应变失效等方面的因素, 使仿真模型更加符合实际, 计算结果更加准确可信. 表 1 为土壤模型的设置参数:

表 1 土壤模型参数

土壤参数	
土粒密度/(kg·m ⁻³)	2 082
土粒比重	2.68
粘塑性参数	1.1
体积模量/Pa	3.5×10 ⁷
剪切模量/Pa	2×10 ⁷
内摩擦角/rad	0.436
内聚力/Pa	2.2×10 ⁴
含水率/%	10



图 1 旋耕刀具

3 土壤切削有限元仿真

3.1 土壤切削模型的建立

在进行土壤切削仿真过程中选取螺旋圈数为 0.5 的刀具作为研究对象, 根据机组前进速度定义旋耕刀的前进速度为 0.3 m/s, 设置中心旋转轴及惯性张量且旋转速度为 25 rad/s, 切削的耕深为 30 cm. 对土壤模型的底面和两侧面添加固定约束, 定义滑动界面惩罚因子为 0.2, 动摩擦因素为 0.18^[10], 静摩擦因素为 0.2. 同时, 设置旋耕刀与土壤接触方式为点面侵蚀接触, 所有边界条件设置完成后保存 K 文件并导入到

LS-DYNA Solver 中计算求解, 求解时间为 1 s.

3.2 仿真结果分析

3.2.1 旋耕刀切削阻力分析

在切削的过程中, 旋耕刀初始位置在土壤的前方, 并没有与土壤接触(图 3a), 然后旋耕刀进入土壤并逐步增大与土壤的接触, 土壤开始受到刀具的挤压与剪切, 最大等效应力明显增加, 最大 Mises 等效应力为 3.367 Mpa(图 3b); 随后, 旋耕刀继续增大与土壤切削接触, 土壤发生硬化, 切削的阻力达到峰值且土壤被破坏的面积也逐渐增大, 最大 Mises 等效应力为 3.47 Mpa(图 3c); 最后, 土壤粒子之间的结合键发生断裂, 土壤发生失效, 出现软化, 最大 Mises 等效应力趋于 1 Mpa 左右(图 3d 和图 3e). 图 3a、3b、3c、3d 和 3e 对应的仿真时间点分别为 0, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 s.

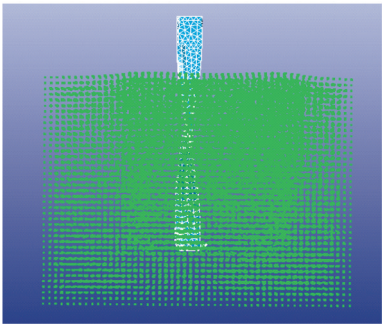


图 2 土壤切削动态模型

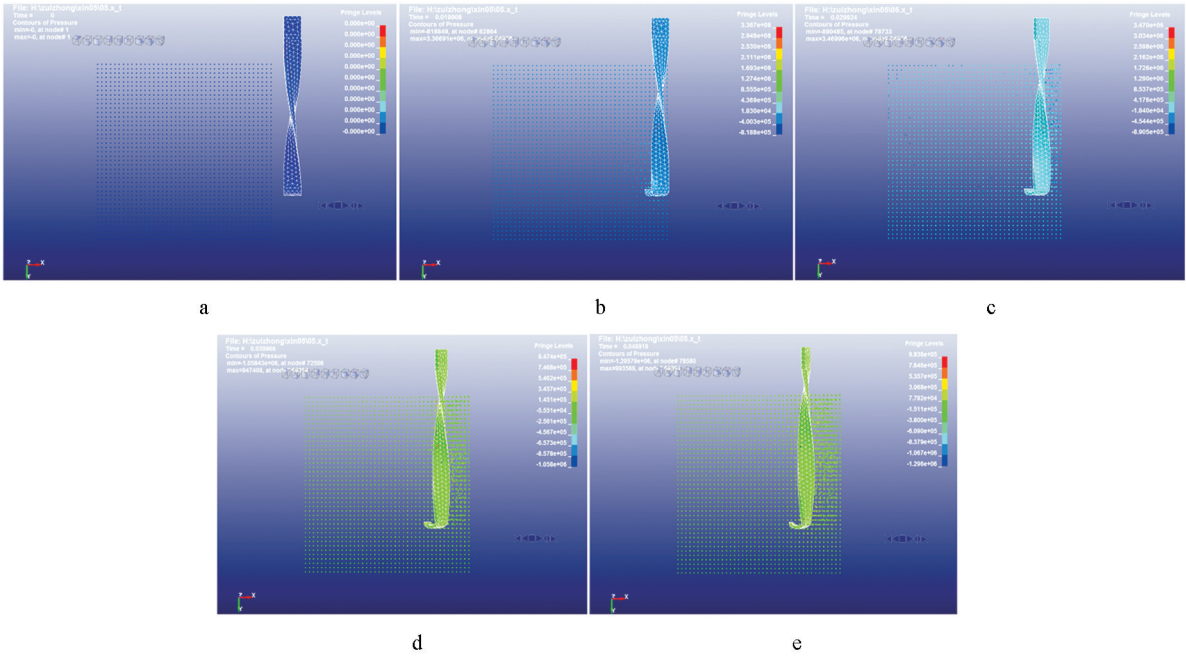


图 3 土壤切削仿真过程应力云图

从图 4 中, 可以清楚地观察到旋耕刀切削土壤随着时间的推移, 切削阻力是逐步变大并趋于稳定的规律. 这主要是因为 0.025~0.125 s, 0.25~0.4 s, 0.5~1 s 之间旋耕刀与土壤的接触面积不断增大, 切削阻力也就随之增大, 而当整个刀片完全浸没土壤中, 切削阻力稳定在 740N 左右; 0~0.025 s、0.125~0.25 s、0.4~0.5 s 这些时间段里没有切削阻力是由于在仿真过程中旋耕刀没有与土壤接触, 处于空转状态.

3.2.2 旋耕刀功率消耗分析

旋耕刀的切削总能耗主要包括两方面: 旋耕刀破碎土壤消耗的能量和旋耕刀自身旋转运动的动能^[11]. 从图 5 中, 可以看出旋耕刀随着切削土壤时间的推移, 切削功率消耗量逐步增大, 最后趋于稳定. 从图 6 得知, 以 0.25~0.4 s 时间段为例, 这主要是由于 0.25~0.275 s 之间旋耕刀工作与土壤的接触面积逐步增大, 切削总能耗也在不断增大; 0.275~0.4 s 之间, 旋耕刀全部浸没在土壤中, 接触面积不变, 切削总能耗基本会直线增加, 切削功率趋于稳定状态.

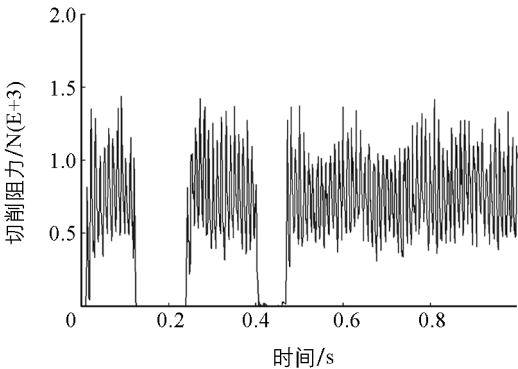


图 4 旋耕刀切削阻力图

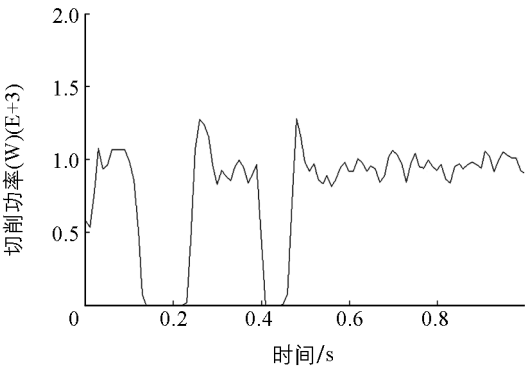


图 5 旋耕刀切削功率图

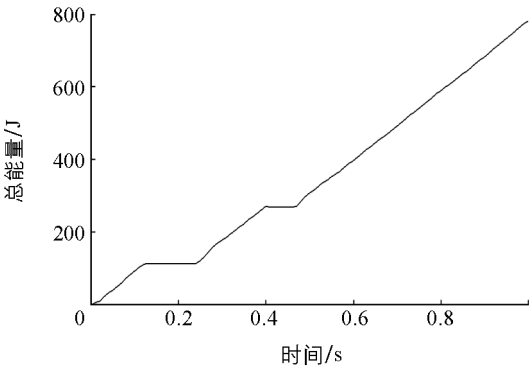


图 6 旋耕刀的切削总能量消耗图

4 旋耕刀的优选及实验验证

4.1 旋耕刀的优选

为验证设计的立式旋耕刀是否能达到比较好的切土效果及较小的切削阻力和功率，设计了 3 种螺旋旋耕刀(刀长为 350 mm)进行仿真比较，得出较优的刀片线型. 如图 7，3 种刀片的定长不变，A 刀片螺旋圈数为 0.5，B 刀片螺旋圈数为 1，C 刀片螺旋圈数为 1.5.

取 0.7~0.8 s 时间段，即旋耕刀全部浸没土壤中且稳定切削的一段时间作为 3 种不同线型切削功率的对比基准，结果如图 8 所示；取 0.7~0.72 s 时间段，作为切削阻力的对比基准，结果如图 9 所示.

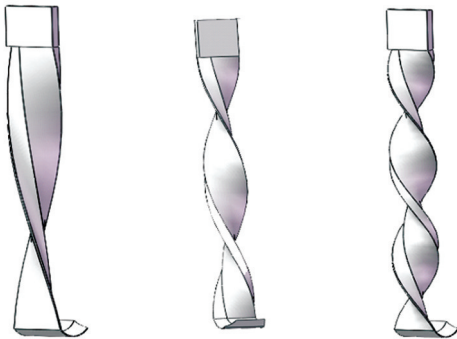


图 7 三种线型旋耕刀

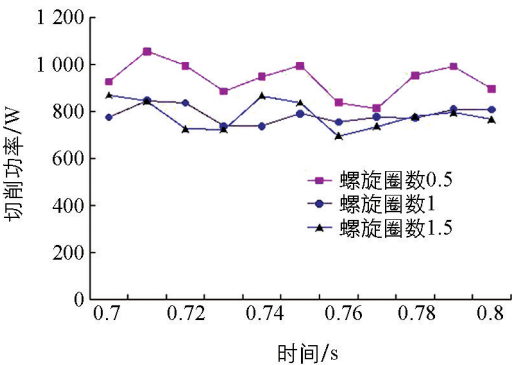


图 8 切削功率对比图

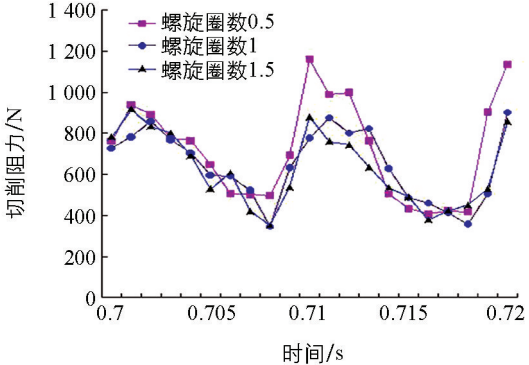


图 9 切削阻力对比

表 2 不同线型旋耕刀仿真结果对比

线型	平均切削功率/W	平均切削阻力/N
A	936.9	741.8
B	805.5	671.9
C	824.1	673.7

由图 8 和图 9 知，A 旋耕刀的切削功率和切削阻力明显高于另外两种，而 B 和 C 旋耕刀的切削功率和切削阻力相差不大。同时考虑到刀片的工作强度，则 B 要优于 C 旋耕刀，因为在相同厚度和材料的情况下，螺旋圈数越多，刀片的内端面的曲率变大，成为应力集中的区域^[12-13]，刀片强度就会下降。综合以上分析最终以目前设定的所有工作参数和土壤参数的条件下，B 旋耕刀是较优刀片线型。

由表 2 可得，选用 B 比最初 A 旋耕刀切削阻力降低了 9.42%，切削功率降低了 14.02%。由此可见，优化后的旋耕刀在切削阻力和切削功率两方面都得到了降低，达到了减阻降耗的效果并且土壤的运动状态也得到了一定的改善。

针对所设计的旋耕刀与刀盘安装构成悬臂支撑, 在切削土壤过程中, 旋耕刀的受力在刀刃部位, 成非均匀分布. 而检验刀具是否正常工作主要是校验刀具与刀盘固定部位承受的弯矩正应力是否在允许范围内. 由图 9 可知, 旋耕刀受到的切削阻力合力最大也不会超过 1 200 N, 设定合力的作用点在旋耕刀的端部进行验证, 此时刀具所受弯矩最大, 刀具的总长为 40 cm, 截面长宽分别为 10 mm 和 5 mm.

由公式,

$$M = FL \tag{5}$$
$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \tag{6}$$

计算得出, $\sigma_{\max}$ 为 11.52 Mpa, 而 45 钢的抗弯强度为 400 Mpa, 因而刀具完全可以正常工作, 在实验过程中, 刀具也运转良好.

4.2 实验结果验证

为了验证仿真结果的真实性, 由设计的土壤立式铣削测试平台测试刀具实际作业功率和扭矩. 图 10 实验平台由两台功率为 2.2 kW 的异步三相电机、两台扭矩传感器、两个变频器、刀盘、旋耕刀、车架及传动装置等组成.

两台异步三相电机分别放置车架前后, 前面纵置电机连着一台 ZH07 型扭矩传感器, 下面通过六边形的轴和销安装刀盘, 驱动刀盘旋转运动, 且轴上有 3 个孔调节刀具的耕作深度; 后面横置电机同样连着一台 ZH07 型扭矩传感器, 传感器另一端连着齿轮, 由链条传递给车轮驱动力; 两台电机分别由两台 2.2 kW 的变频器控制其转速; 车架后面安置两个 12V 的电池给两个传感器测试数据供电, 进行实验时, 通过传感器配置的曲线测试软件得到刀片的转速、扭矩和功率.

根据上述仿真数据的对比分析, B 旋耕刀相比其余两者较优, 故在田间实验过程中, 选用验证的刀具为 B 旋耕刀, 设置前进速度为 0.3 m/s, 刀片旋转速度为 220 r/min, 耕深为 30 cm.

通过测试实验土样的密度为 2 082 kg/m³, 含水率为 10%, 土壤内聚力为 0.022 Mpa. 表 3 为平台上土壤切削传感器测出的 10 组实验数据.



图 10 实验平台

表 3 实验测试数据

	实 验 数 据									
转速/(r · min ⁻¹)	218.7	219.9	219.3	221.2	218.1	220.4	220.4	222.4	221.8	222.8
扭矩/(N · m)	36.16	37.73	32.35	32.52	34.49	32.87	36.02	33.02	31.24	30.79
功率/W	828.1	868.8	742.9	753.2	787.7	758.6	831.3	769	725.6	718.3

而仿真的平均扭矩可通过平均阻力和作用半径求得: (平均阻力由表 2 可知为 671.9 N, 作用半径即为刀刃距刀盘轴的距离为 0.07 m).

$$T = Fr = 46.97 N \cdot m$$

对于刀具的功率计算为

$$P = T\omega + fv \tag{7}$$

式中: f 为刀片前进的阻力, v 为刀片前进的速度, ω 为刀片旋转的角速度, T 为刀片受到阻力矩. 整个平台耕作过程的功率消耗主要由旋耕刀与土壤切削产生的, 刀片的旋转速度远远大于刀片前进的速度, 因而 fv 这一项相对于前者很小, 可忽略不计, 则验证刀片的功率可直接由 $P = T\omega$ 计算. 由表 2 中 B 刀具的数据和表 3 数据对比, 仿真与实验的功率和转矩结果基本一致, 同时也是满足公式 (7) 理论计算结果, 有些差异可能是实验土壤的松紧、石子等各种避免不了的客观因素造成的.

5 结 论

1) 使用 ANSYS/LS-DYNA 软件并采用 SPH 方法对设计的旋耕刀进行动态仿真分析, 能够清楚地观察土壤粒子运动的速度和轨迹, 有效地模拟了土壤切削过程.

2) 通过实验数据的验证, 刀具的功率和扭矩的误差在允许范围内, SPH 仿真模拟土壤切削是切实可行的。

3) 在设定的工作参数和土壤条件下, 选用 B 线型的旋耕刀比 A 线型的旋耕刀切削阻力降低了 9.42%, 切削功率降低了 14.02%。

参考文献:

- [1] 郝芳华, 常 影, 宁大同. 中国耕地资源面临的挑战与可持续利用对策 [J]. 环境保护, 2003(4): 30—33.
- [2] 谭崇静, 陈 建, 叶 进, 等. 重庆市农业装备产业技术路线图研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(8): 42—48.
- [3] 高建民, 周 鹏, 张 兵, 等. 基于光滑粒子流体动力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 20—26.
- [4] 李良品. 基于 SPH 法的板结土壤深耕技术研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [5] MONAGHAN J J, GINGOLD R A. Shock Simulation by the Particle Method SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1983, 52(2): 374—389.
- [6] MONAGHAN J J. Axisymmetric Stars with Both Poloidal and Toroidal Magnetic Fields [J]. Astrophysics and Space Science, 1976, 40(2): 385—391.
- [7] WANG J. Benchmark Work of Simulation of Explosion in Soil and Air [J]. Defense Science and Technology Organization, 2001(6): 2—4.
- [8] 时党勇, 李欲春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显性动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147 [R]. Georgetown: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2004.
- [10] 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): 58—62.
- [11] 朱留宪. 基于 SPH 算法的微耕机旋耕刀有限元仿真与优化 [D]. 重庆, 西南大学, 2012.
- [12] 马爱丽, 廖庆喜, 田波平, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀具土壤切削的数值模拟 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(2): 248—252.
- [13] 张晋西, 袁腾飞, 程亭森, 等. 一种钻耕刀具的设计及颗粒土壤切削运动与动力仿真 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(8): 34—37.

Simulation of Soil Cutting by Vertical Rotary Blade Based on SPH Method

HAN Yu-jie, LI Yun-wu, ZHAO Hua-hui,
CHEN Hao, LIU De-xiong

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Vertical rotary tillage in hilly area is one of tillage methods to improve soil structure and increase tillage depth. It is necessary to research the action mechanism of vertical rotary blade with soil, so the resistance and power can be reduced by optimizing the structure of blade. The SPH method and ANSYS/LS-DYNA software are used to analyze three helix type blades, then relevant results are compared. The laws of cutting resistance and cutting power variation are concluded by simulations based on the vertical rotary blade. The simulation results show that cutting resistance of the B blade is smaller 9.42% than the A blade. Correspondingly, the cutting power of the B blade is decreased 14.02%. The B blade was conducted experiments in the field, and the power values and the torque values of the B blade are consistent with the simulation results.

Key words: rotary blade; SPH; soil cutting; reducing resistance and power

责任编辑 汤振金

