

基于 EDEM 及 SolidWorks Simulation 的清茬单体刀盘轴疲劳分析

顿国强<sup>1</sup>, 陈海涛<sup>2</sup>, 纪文义<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:**清茬单体作为斜抛式大豆免耕精播机的关键作业部件,其使用寿命对机具的无故障工作时间起决定性作用。本文首先在介绍免耕精播机作业功能及清茬单体结构组成的基础上,应用 EDEM 对清茬单体刀齿的土壤切削过程进行模拟仿真,获得单组刀齿单程土壤切削载荷数据及全刀齿土壤切削的载荷-时间历程数据;依此,利用 SolidWorks Simulation 对清茬单体刀盘轴进行有限元静力学分析,模型最大应力发生在键槽端部,值为 119.5 MPa,小于材料 45 号钢许用应力 353.2 MPa,满足强度设计要求;清茬单体恒幅及变幅疲劳分析结果表明:模型损坏百分比 7.15%,生命周期 864 h,刀盘轴是安全的,在作业时段内清茬单体刀盘轴损伤是由中低平均应力循环及较小应力幅值所引起的。研究为清茬单体的疲劳分析提供了一种新的方法。

**关键词:**大豆免耕精播机;清茬单体;疲劳分析;EDEM 仿真;SolidWorks Simulation

**中图分类号:**S223.2      **文献标识码:**A      **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.05.0796

Fatigue Analysis of Stubble Clearing Unit Knife Plate Shaft Based on EDEM and SolidWorks Simulation

DUN Guo-qiang<sup>1</sup>, CHEN Hai-tao<sup>2</sup>, JI Wen-yi<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** As a key part of oblique tossing soybean no-till seeder, stubble clearing unit's fatigue life directly determined the reliability of machine. First, function of oblique tossing soybean no-till seeder and stubble clearing unit's structure had been introduced, knife teeth's soil cutting process had been simulated by EDEM and acquired soil cutting resistance force data of a set of knives and time history of all knives unit soil cutting loading tooth, finite element static analysis result of knife plate shaft by SolidWorks simulation indicate that concentrated stress was located on keyways' end, its max stress was 119.5 MPa, smaller than allowable stresses of 45 steel, it was safe. The constant amplitude loading fatigue indicate that fatigue damage factor is 7.15 % and total life is 864 hours, shaft was safe. Damage rain flow matrix in loading history of variable amplitude fatigue indicated that most damage of model was caused by mid-low average stress cycle and smaller stress amplitude. The research provided a new method of stubble clearing unit's fatigue analysis.

**Keywords:** Soybean no-till seeder; Stubble clearing unit; Fatigue analysis; EDEM simulation; SolidWorks Simulation

清茬单体作为斜抛式大豆免耕精播机的免耕防堵装置,其主要功能是依靠高速旋转的清茬单体刀齿清除播种带上的秸秆根茬,创造良好的种床状况,以顺利进行后续的施肥播种作业<sup>[1-2]</sup>。清茬单体作为机具的主要作业部件,其疲劳寿命对机具的作业效率、可靠性及使用寿命起到了决定性作用,因此,精准预测其疲劳寿命,对提升机具的可靠性具有重要的意义<sup>[3-4]</sup>。对清茬单体进行有限元疲劳分析,需要获取其外部极限载荷及载荷-时间历程数据<sup>[5]</sup>,通常其载荷数据需要通过试验获取,但采用试验的方法具有周期长及经济性差等缺点<sup>[6]</sup>。而离散元法<sup>[7]</sup>可通过对其土壤切削过程进行模拟仿真,获得其作业载荷数据,且具有研究成本低及

耗时短的优点<sup>[8-9]</sup>。

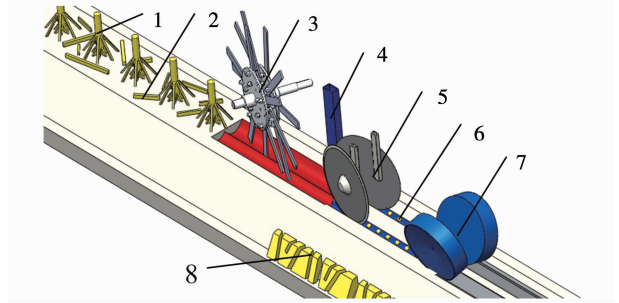
本文在介绍斜抛式大豆免耕精播机工作原理及关键部件清茬单体结构组成的基础上,利用 EDEM 仿真获取清茬单体土壤切削过程的载荷数据,依此,利用 SolidWorks Simulation 对清茬单体刀盘轴进行有限元静力学分析,并对其进行恒幅及变幅疲劳分析。

1 斜抛式大豆免耕精播机工作原理

斜抛式大豆免耕精播机作业过程如图 1 所示,作业时,播种机沿垄向前进,由拖拉机动力输出轴通过传动系统驱动清茬单体逆时针高速旋转,其清茬单体回转轴与前进方向呈一定夹角,且依靠其轴

收稿日期:2017-03-20  
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572017BB10);中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金暨双一流经费(41112417);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303011);国家现代农业产业技术体系建设专项(GARS-04)。  
第一作者简介:顿国强(1986-),男,博士,讲师,主要从事农业及林业机械装备研究。E-mail:dunguoqiang1986@163.com。

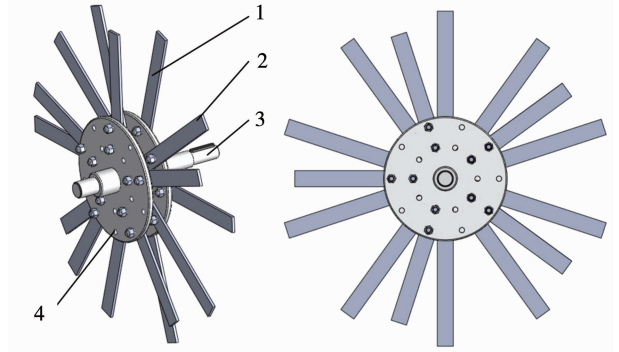
向均匀布置的刀齿打击垄体表面的秸秆及根茬,而后施肥开沟器完成侧深施肥,双圆盘开沟器垄上大豆双行精量播种,最后由 V 形镇压器完成覆土镇压作业。清茬单体作为斜抛式大豆免耕精播机的关键作业部件,其直接与土壤、秸秆及根茬作用,具有极复杂的作业载荷状况,其结构的可靠与否直接影响机具的作业性能及使用寿命,因此选取出差单体为研究对象,同时,为获取其作业过程的外部载荷,利用 EDEM 对清茬单体的土壤切削过程进行模拟仿真,以获取其载荷数据。



1:根茬;2:秸秆;3:清茬单体;4:肥开沟器;5:种开沟器;6:大豆;7:覆土镇压器;8:打碎的秸秆根茬。  
1:Stubble; 2:Straw; 3:Stubble clearing unit; 4:Fertilizer furrow opener; 5:Seed double disc opener; 6:Soybean seed; 7:V type roller; 8:Chopped straw and stubble.

图1 斜抛式大豆免耕精播机工作原理  
Fig.1 Function of oblique tossing soybean no-till seeder

如图2所示,清茬单体主要由刀盘、刀轴、清茬刀齿及抛秸刀齿组成,其中刀轴与内外两个刀盘焊接在一起构成刀盘轴,内刀盘两侧周向均布安装10个清茬刀齿,其功能为打击切碎施肥播种带上的玉米根茬,外刀盘单侧周向均布5个抛秸刀齿,且其刀齿回转半径小于清茬刀齿回转半径,其功能为辅助抛撒秸秆根茬,每两个清茬刀齿与一个抛秸刀齿构成一组作业刀齿。



1:清茬刀齿;2:抛秸刀齿;3:刀轴;4:刀盘。  
1:Stubble clearing knife teeth; 2:Straw tossing knife teeth; 3:Knife shaft;4:Knife plate.

图2 清茬单体结构组成  
Fig.2 Structure of stubble clearing unit

## 2 基于 EDEM 的清茬单体土壤切削过程仿真

利用 SolidWorks 建立装配一组作业刀齿的清茬单体三维实体模型,并对其进行模型简化,使整个清茬单体构成单一实体,并同时建立土槽及颗粒工厂的三维实体模型,这里,清茬单体沿 y 轴正向前进,绕刀轴顺时针旋转,刀轴位于 xoy 面上,且与 x 呈 20° 夹角,并将模型导出为 model.igs 格式文件<sup>[10]</sup>。

新建 EDEM 仿真算例 Soil cutting. dem,采用系统默认的 Hertz-mindlin( no-slip) 模型定义土壤颗粒间、土壤颗粒与清茬单体及土槽间的接触力学模型,查阅相关文献<sup>[11-12]</sup>,确定模型参数见表1。

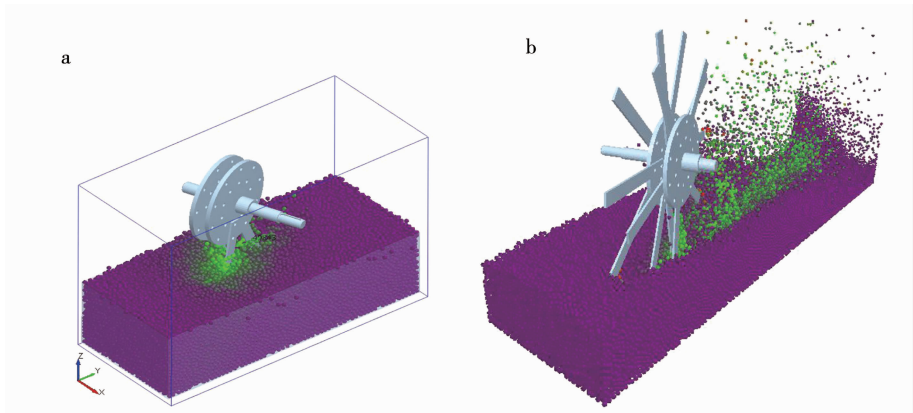
表1 全局变量参数设置		
Table 1 Pre-treatment parameters setting		
项目 Item	属性 Property	值 Value
土壤颗粒	泊松比	0.5
Soil particle	剪切模量/Pa	$2.0 \times 10^7$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2600
土槽、清茬单体	泊松比	0.3
Soil box, stubble	剪切模量/Pa	$7.9 \times 10^{10}$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7865
颗粒-颗粒	恢复系数	0.2
	静摩擦系数	0.25
Particle-particle	动摩擦系数	0.04
	恢复系数	0.1
颗粒-土槽、清茬单体	静摩擦系数	0.2
	动摩擦系数	0.02
stubble clearing unit		

为提高清茬单体土壤切削过程与真实作业情况的相近程度,土壤颗粒采用球体颗粒建模,颗粒半径 5 mm,软件自动计算其质量属性,将 SolidWorks 建立的 model.igs 文件导入 EDEM,并进行名称修改及材料属性添加,设定清茬单体沿 y 轴正向以  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  作业速度前进,刀轴转速  $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,经反复仿真确定清茬刀齿极限入土深度 10 cm 所需的土壤颗粒数量为 72 000,且颗粒半径服从正态分布。为描述单组刀齿的土壤切削过程,设定仿真时长 0.125 s,仿真步长  $2.202 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,已知刀轴转速  $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,则其单周时长  $1/9 \text{ s}$ ,数据记录时间间隔 0.001 s,清茬单体单组刀齿土壤切削过程 EDEM 仿真模型如图 3a 所示。

在清茬单体实际作业时,作业载荷为随时间变化的随机变量,为分析清茬单体在一段作业时间段

内的疲劳性能,需获取单体的载荷-时间历程数据<sup>[13-14]</sup>,为此,新建清茬单体配装全部刀齿的 EDEM 土壤切削仿真算例,采用相同的仿真基础参数设置,为保证相同入土深度及一定的作业行程,设定

土槽长度1 200 mm,颗粒数量130 000,数据记录时间间隔0.001 s,全刀齿清茬单体 EDEM 仿真模型如图 3b 所示。



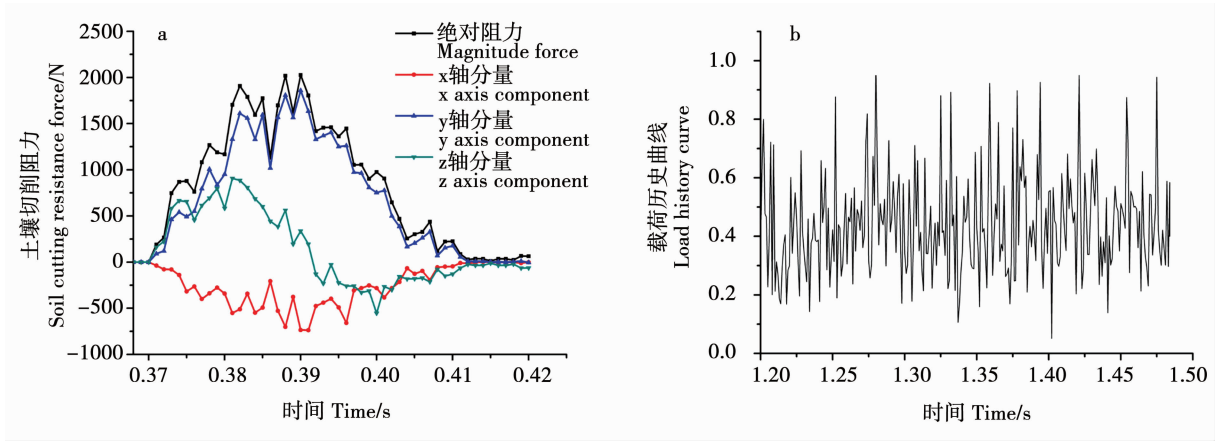
a. 单组刀齿单程作业; b. 全刀齿全程作业。  
a. Single set of knives one-way cutting; b. All knives whole-range cutting.

图 3 清茬单体 EDEM 土壤切削仿真模型

Fig. 3 Simulation model of stubble clearing unit soil cutting in EDEM

利用 EDEM 后处理模块,提取出单组刀齿清茬单体土壤切削过程所受的合力及分量载荷数据如图 4a 所示。同时,提取全刀齿清茬单体刀齿稳定切

深 10 cm 的绝对切土阻力数据,并对载荷数据进行标准化处理,即将载荷数据的每个数据值除以载荷最大值,以获得载荷-时间历程数据如图 4b 所示。



a. 单组刀齿土壤切削阻力数据曲线; b. 全刀齿单体土壤切削载荷时间历程。  
a. Curve of a set of knives soil cutting resistance force data; b. Time history of all knives unit soil cutting loading.

图 4 清茬单体土壤切削阻力

Fig. 4 Stubble clearing unit soil cutting resistance force

由图 4a 可知,单组刀齿清茬单体在一个切土行程中,其绝对切土阻力(magnitude force)为近似单峰函数,在 0.37 s 时刀齿与土壤接触,载荷开始出现且逐渐增大,在 0.39 s 时达到最大值,而后逐渐减小,在 0.415 s,载荷消失,这时刀齿脱离土壤模型;绝对切土阻力的 y 轴分量与其具有相同的趋势,且

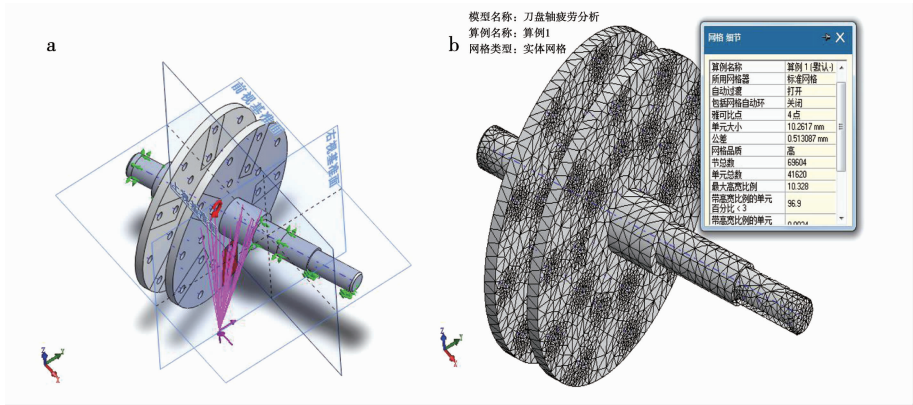
皆为正值,这是由于在土壤切削过程中,刀齿绝对运动速度方向为 y 轴负向;x 轴分量载荷为负值,同为单峰函数;而绝对切土削阻力的 z 轴分量在切土前半程为正值,后半程为负值,这是因为刀齿单一切土过程中,刀齿速度先沿 z 轴负向入土,而后沿 z 轴正向出土所导致的。在 0.39 s 时,清茬单体绝对

切土阻力达到最大值 202.63 N,其  $x$  轴分量  $-73.54$  N, $y$  轴分量  $185.78$  N, $z$  轴分量  $33.67$  N,此时刀轴转角  $95^\circ$ ,载荷加载几何中心坐标( $x = -70.817\ 6, y = -25.775\ 5, z = -250$ )。

3 清茬单体刀盘轴有限元静力学分析

利用 SolidWorks 2012 软件对清茬单体刀盘轴进行建模,为保证其有限元分析的准确性,对清茬单体的约束面及受载部位进行分割线划分<sup>[10]</sup>,其包括轴承座安装位置、刀齿加载面,同时,将清茬单体旋转到与其 EDEM 仿真模型中切削阻力最大的时刻相同的空间位置。设定材料为 45 号钢,弹性模量 206 MPa,泊松比 0.33,屈服强度 353.2 MPa,零件疲劳分析需定义材料的 S-N 曲线,查阅相关资料<sup>[15-16]</sup>,设定由对称循环疲劳测试获得的 S-N 曲

线,此时,其应力比率为  $R = -1$ 。清茬单体作业时,由两个轴承装配在主机架上,并由万向轴驱动旋转,轴承限制其径向及轴向自由度,平键限制其旋转自由度,因此,利用固定铰链约束限制轴承连接处的径向位移,利用在平面上限制轴承座安装端面轴向位移,采用固定几何体对轴上的键槽的内部扭矩承载面进行固定约束,利用远程载荷特征将清茬单体土壤离散元仿真获取的最大切土阻力以分量方式加载到刀齿组载荷加载几何中心上,并设定单体离心载荷  $540\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,清茬单体的模型约束及载荷加载如图 5a 所示。采用 Simulation 默认的空间四面体网格对清茬单体进行网格划分,利用[自由过渡]特征对螺栓孔及焊缝等易于出现应力集中的部位进行网格精细化处理<sup>[17]</sup>。模型网格划分如图 5b 所示,其网格划分节点数 69 604 个,单元数 41 620。



a:约束及载荷加载; b:模型网格划分。  
a: Constraints and ultimate load setting; b: Model meshing.

图 5 约束、载荷加载及模型网格划分

Fig. 5 Constraints and ultimate load setting and model meshing

完成以上设置后,利用默认 FFEPlus 解算器对清茬单体有限元模型进行求解运算,得到模型应力云图 6a 及变形云图 6b。

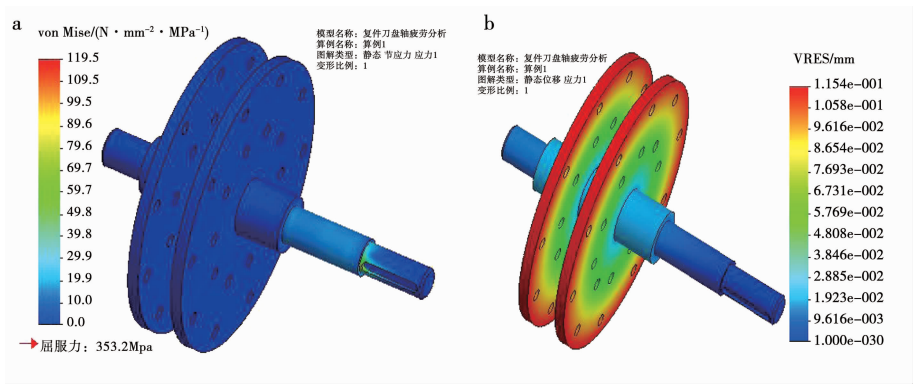
由图 6a 可知,清茬单体除平键链接处外,颜色以蓝色为主,且较为均匀,模型的应力集中部位为键槽内端根部,这主要因为此处既承载主要载荷,又具有最小的截面尺寸,即抗扭截面系数最小,因此,模型的应力集中主要发生在此处,同时,模型最大应力 119.5 MPa,小于材料 45 号钢的许用应力 353.2 MPa,清茬单体满足强度设计要求。由图 6b 可知,清茬单体的变形沿刀轴由键槽到无键槽端逐渐减小,沿刀盘半径方向逐渐增大,变形最大位置发生在刀盘的边缘处,最大变形位移为 0.115 4 mm,

处于安全范围内。

4 清茬单体刀盘轴有限元疲劳分析

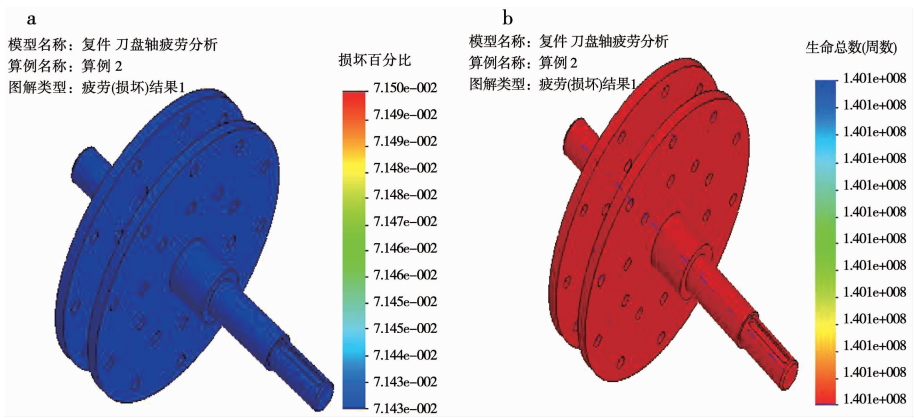
创建清茬单体疲劳分析算例,设定算例属性为恒定振幅事件的恒定循环,设定恒定振幅事件交互作用类型为随意交互作用,计算交替应力手段为对等应力(Von Mises),平均应力纠正选用适合韧性材料的 Gerber 应力修正算法<sup>[18]</sup>,以上述静力学分析算例为疲劳分析的基本算例,循环次数设定  $10^5$ ,算例的负载类型为[LR = 0],疲劳强度缩减因子  $K_f = 1$ ,运行疲劳分析算例,得出模型的“损坏”及“寿命”图解如图 7 所示。





a:应力云图; b:变形云图。  
a: Stress nephogram; b: Deformation nephogram.

图 6 清茬单体应力及变形云图  
Fig. 6 Stress and deformation nephogram of stubble clearing unit



a:损坏图解; b:寿命图解。  
a: Model damage diagram; b: Model life diagram.

图 7 刀盘轴恒幅疲劳分析结果  
Fig. 7 Constant amplitude fatigue analysis result of knife plate shaft

损坏图解表征材料的损坏寿命,数值被称为破坏因子,代表零件寿命消耗的百分比,值越小越好,当值大于等于 1 时,疲劳破坏就会发生。由图 7a 可知,刀盘轴的破坏因子最大值为 0.071 5,远小于 1,轴是安全的。由图 7b 可知,刀盘轴的生命总数为  $1.401 \times 10^8$  次,生命总数表征物体在给定载荷下发生疲劳破坏的最大循环周期,按刀轴转速  $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  计算,单体每秒切削土壤 45 次,则可计算清茬单体的最小无故障作业时间为 36 d。

为分析清茬单体在一定载荷时段下的疲劳性能,对其进行变幅疲劳分析。创建变幅疲劳分析算例,设定计算交替应力手段为对等应力 (von mises),平均应力修正算法选用 Gerber 应力修正算法,疲劳强度缩减因子  $K_f = 1$ ,同时采用系统默认的雨流周期计数方法<sup>[19-20]</sup>对清茬单体的载荷-时间历

程数据进行周期分解计算,以使软件利用平均应力纠正算法来表征平均应力的影响,并对模型累积损伤进行计算,设定箱格数 30 个,利用添加事件-获取曲线功能导入图 4b 的载荷-时间历程数据,设定块复制数为 1,即分析模型在这一时间段的疲劳损伤情况,设定结果选项为整个模型,如图 8 所示,提取模型最差损坏位置的损坏雨流矩阵图。

雨流损伤矩阵图中两水平轴分别代表交变应力的应力幅值及平均应力,纵轴代表在相应应力幅及平均应力下的箱数,雨流损伤矩阵图可表征清茬单体切削土壤的载荷历史构成。由图 8 可知,多数交变应力周期的平均应力分布在  $4.5 \sim 8.5 \text{ MPa}$  范围内,而应力幅值集中分布在  $0.5 \sim 7.5 \text{ MPa}$  范围内,即在作业时段内清茬单体刀盘轴大部分的损伤是由中低平均应力循环及较小应力幅值所引起的。

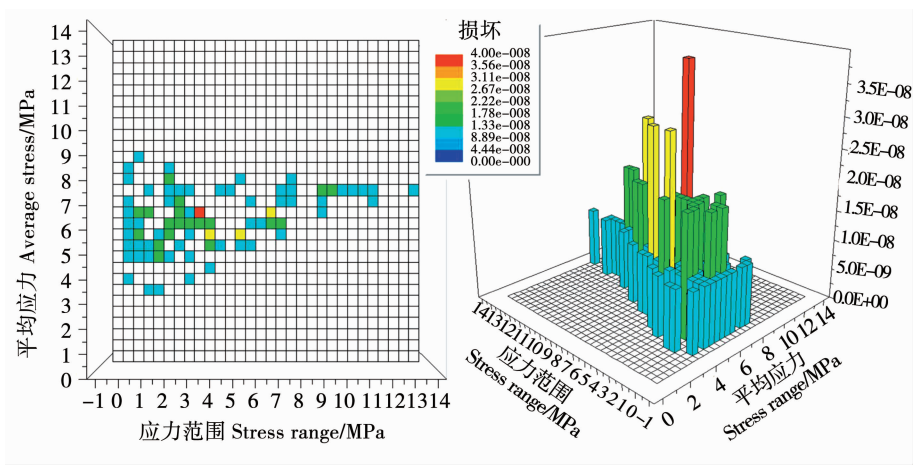


图 8 清茬单体刀盘轴损伤雨流矩阵图

Fig. 8 Damage rain flow matrix diagram of knife plate shaft

5 结 论

(1)在介绍斜抛式大豆免耕精播机作业功能及关键部件清茬单体结构组成的基础上,应用 EDEM 对清茬单体刀齿的土壤切削过程进行模拟仿真,获得单组刀齿单程土壤切削载荷数据及全刀齿土壤切削的载荷-时间历程数据。

(2)利用 SolidWorks Simulation 对清茬单体刀盘轴进行有限元静力学分析,模型最大应力发生在键槽根部,值为 119.5 MPa,小于材料 45 号钢许用应力 353.2 MPa,满足强度设计要求。

(3)清茬单体恒幅疲劳分析结果表明:模型损坏百分比 7.15%,生命周期 864 h,刀盘轴是安全的。清茬单体变幅疲劳分析结果表明:在作业时段内清茬单体刀盘轴损伤是由中低平均应力循环及较小应力幅值所引起的。

参考文献

[1] 顿国强,陈海涛,李昂,等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清茬单体性能的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(12):48-56. (Dun G Q, Chen H T, Li A, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(12):48-56.)

[2] 杨纪龙,陈海涛,侯守印,等. 2BMFJ-BL5 型原茬地大豆免耕覆秸精量播种机性能试验研究[J]. 大豆科学,2016,35(5):840-846. (Yang J L, Chen H T, Hou S Y, et al. Experiment of 2BMFJ-BL5 no-tillage soybean precision seeder in original stubble field[J]. Soybean Science, 2016,35(5):840-846.)

[3] 高东明,王德成,王光辉,等. 草地切根机切刀的疲劳寿命分析[J]. 江苏大学学报,2012,33(3):283-287. (Gao D M, Wang D C, Wang G H, et al. Fatigue life analysis of root cutting machine blade[J]. Journal of Jiangsu University (National Science

Edition),2012,33(3):283-287.)

[4] 李耀明,田进,赵湛,等. 联合收割机行走底盘变速箱齿轮的疲劳分析[J]. 农业工程学报,2011,27(4):106-110. (Li Y M, Tian J, Zhao Z, et al. Fatigue analysis of gears in combine harvester chassis gearbox[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(4):106-110.)

[5] 刘永臣,王国林,孙丽. 车辆控制臂疲劳损伤分析与寿命预测[J]. 农业工程学报,2013,29(16):83-91. (Liu Y C, Wang G L, Sun L. Fatigue damage analysis and life prediction for vehicle control arm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(16):83-91.)

[6] 葛宜元,张金波,邱新伟,等. 还田机刀轴动态载荷模拟加载测试系统设计及试验[J]. 中国科技论文,2016,11(10):1124-1127. (Ge Y Y, Zhang J B, Qiu X W, et al. Design and experiment of dynamic load simulation test system of a cutter shaft in a whole-straw recycling machine[J]. China Science Paper,2016,11(10):1124-1127.)

[7] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):36-42. (Dun G Q, Chen H T, Feng Y N, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(7):36-42.)

[8] 赵吉坤,黄书君,邢蕾,等. 秸秆覆盖下土壤耕作非线性动态过程研究[J]. 南京农业大学学报,2016,39(4):696-702. (Zhao J K, Huang S J, Xing L, et al. Nonlinear dynamic process soil tillage under straw mulching model[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2016,39(4):696-702.)

[9] 顿国强,陈海涛,查韶辉. 基于 EDEM 的大豆窝眼轮式排种盘型孔参数优化与验证[J]. 大豆科学,2016,35(5):830-839. (Dun G Q, Chen H T, Zha S H. Parameter optimization and validation of soybean cell wheel seeding plate type-hole based on EDEM[J]. Soybean Science,2016,35(5):830-839.)

[10] 陈海涛,顿国强. 基于虚拟样机动力学仿真的大豆扶禾器参数优化[J]. 农业工程学报,2012,28(18):23-29. (Chen H T, Dun G Q. Optimization of parameters for soybean lifter based on dynamic simulation of virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(18):23-29.)

- [11] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):80-88. (Huang Y X, Hang C G, Yuan M C, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of sub soiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):80-88.)
- [12] 方会敏,姬长英,Farman A C,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报,2016,47(3):22-28. (Fang H M, Ji C Y, Farman A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):22-28.)
- [13] 高云凯,徐成民,方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. 机械工程学报,2014,50(4):92-98. (Gao Y K, Xu C M, Fang J G. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test[J]. Journal of Mechanical Engineering,2014,47(3):22-28.)
- [14] 薛海,李强. 1 万 t 重载组合列车的车钩力特性分析[J]. 中国铁道科学,2016,37(3):88-94. (Xue H, Li Q. Characteristics analysis of coupler force for 10000t heavy haul combined train[J]. China Railway Science,2016,37(3):88-94.)
- [15] 黄国,黄海明,王超,等. 45 车轴钢疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(4):71-76. (Huang G, Huang H M, Wang C, et al. Experimental study on the fatigue properties of 45 axle steel[J]. China Railway Science, 2013,34(4):71-76.)
- [16] 叶晓飞,李耀明,徐立章,等. 联合收割机行走半轴的疲劳分析[J]. 农机化研究,2014(1):32-35. (Ye X F, Li M Y, Xu L Z, et al. Fatigue analysis of half axle of combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(1):32-35.)
- [17] 顿国强,陈海涛,刘环宇,等. 基于正交试验和 Solid Works Simulation 的大豆种子脱粒过程碰撞模拟分析[J]. 图学学报,2016,36(5):724-729. (Dun G Q, Chen H T, Liu H Y, et al. Soybean impacting simulation analysis in threshing process based on Solid Works Simulation and orthogonal test[J]. Journal of Graphics, 2016,36(5):724-729.)
- [18] 白茹,蔡钢,张晓敏,等. 覆冰工况下电力导线非对称疲劳失效的数值模拟分析[J]. 材料研究学报,2016,30(2):149-155. (Bai R, Cai G, Zhang X M, et al. Numerical simulation analysis of asymmetric fatigue failure for iced electric power transmission line[J]. Chinese Journal of Materials Research,2016,30(2):149-155.)
- [19] 叶继红,申会谦. 风荷载下空间网格结构疲劳性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(4):842-847. (Ye J H, Shen H Q. Fatigue performance of spatial latticed structures under wind loads[J]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition), 2016,46(4):842-847.)
- [20] 曾发林,阮洋,李建康. 道路载荷谱采集可靠度评判方法的研究与应用[J]. 汽车工程,2016,38(1):91-96,108. (Zeng F L, Ruan Y, Li J K. Study and application of the reliability evaluation method for road load spectra acquisition[J]. Automotive Engineering, 2016,38(1):91-96,108.)

## 欢迎订阅 2018 年《中国生态农业学报》

《中国生态农业学报》由中国科学院遗传与发育生物研究所和中国生态经济学会主办,中国科学院主管,科学出版社出版。系中国期刊方阵双效期刊、中国科技精品期刊、百种中国杰出学术期刊、中文核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊,为中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊全文数据库、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国科技论文与引文数据库、CNKI 中国期刊全文数据库源刊,并被国际农业生物学文摘(CABI)、美国化学文摘(CA)、哥白尼索引(IC)、美国乌利希国际期刊指南等国际数据库及检索单位收录。荣获第三届、四届全国农业优秀期刊一等奖和首届北方优秀期刊奖,中国北方优秀期刊,连续多届获得河北省优秀期刊奖。

《中国生态农业学报》主要报道全球环境变化与农业、农业生态系统与生态农业理论基础、农田生态系统与农业资源、生态农业模式和技术体系、农业生态经济学、农业环境质量及环境保护、农业有害生物的综合防治等领域创新性研究成果。适于从事农业生态学、生态学、生态经济学以及环境保护等领域科技人员、高等院校有关专业师生,农业及环境管理工作者和基层从事生态农业建设的技术人员阅读与投稿。

《中国生态农业学报》国内外公开发行人,国内刊号 CN13-1315/S, 国际刊号 ISSN1671-3990。月刊,国际标准大 16 开本,160 页,每期定价 35 元,全年 420 元。邮发代号:82-973,全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订(需另加邮资 50.00 元/年)。

地址:(050022) 河北省石家庄市槐中路 286 号 中科院遗传发育所农业资源研究中心《中国生态农业学报》编辑部

电话:(0311) 85818007 传真:(0311) 85815093

网址:<http://www.ecoagri.ac.cn> E-mail:editor@sjziam.ac.cn



公众微信号: zgstnyxb