

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.004

仿形弹性镇压辊减粘防滑结构设计*与试验*

贾洪雷^{1,2} 王文君^{1,2} 庄健^{1,2} 罗晓峰^{1,2} 姚鹏飞^{1,2} 李杨^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 针对仿形弹性镇压辊粘附土壤和滑移率较大的问题, 基于典型土壤动物蚯蚓的体表柔性几何特征, 设计了一种适用于仿形弹性镇压辊的减粘防滑结构, 其主体是橡胶凸起, 同时采用肋条结构对其进行固定。这种结构具有粘附土壤少、滑移率低、镇压力分布均匀、碎土效果好等优点。通过理论计算和运动学分析对减粘防滑结构的运动过程进行研究, 得出橡胶凸起的特征方程, 以及凸起高度和肋条高度的取值范围。通过三因素三水平正交组合试验得出影响镇压辊粘附土壤量因素的显著性顺序依次为: 凸起高度、肋条高度、载荷; 影响镇压辊滑移率因素的显著性顺序依次为: 肋条高度、凸起高度、载荷; 得到减粘防滑结构的最佳参数组合为: 载荷 450.0 N、凸起高度 13.9 mm、肋条高度 15.1 mm, 并找到各因素对粘附土壤质量和滑移率的影响。田间验证试验和对比试验得到镇压辊的粘附土壤质量为 39.2 g, 滑移率为 3.89%, 分别比没有减粘防滑结构的镇压辊降低 60.1% 和 54.3%。

关键词: 弹性镇压辊 仿形 减粘防滑结构

中图分类号: S222.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0020-08

Design and Experiment on Reducing Soil Adhesion and Anti-slip Structure of Profiling Elastic Press Roller

Jia Honglei^{1,2} Wang Wenjun^{1,2} Zhuang Jian^{1,2} Luo Xiaofeng^{1,2} Yao Pengfei^{1,2} Li Yang^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: During the working process of press roller, the deficiencies in the soil adhesion and the large slip rate on the profiling elastic press roller are existed. Based on the flexible geometry features of the typical soil animal body surface, the reducing soil adhesion and anti-slip structure were designed to solve the problem. The structure consists of rubber bulges, which are fixed by the existing bionic rib structure. This structure has the advantages of less soil adhesion, lower slip rate, more uniform pressure distribution and better soil crushing effect. The movement process of the reducing soil adhesion and anti-slip structure was researched by using theoretical calculation and kinematics analysis, the characteristic equation of rubber bulges and the value ranges of bulge height and rib height were obtained. The orthogonal combination experiments of three factors and three levels were designed and performed. The results showed that the primacy sequence of the experiment factors influencing soil adhesion was: rubber bulge height (H), rib height (L), total loads (F) and the primacy sequence of the experiment factors influencing slip rate was: rib height, rubber bulge height and total loads. Optimal levels of the experiment factors influencing soil adhesion and slip rate were F of 450.0 N, H of 13.9 mm, L of 15.1 mm. At the same time, verification tests and comparison tests were conducted in the field. The results showed the soil adhesion quality was 39.2 g, the slip rate was 3.89%, compared with the roller without the reducing soil adhesion and anti-slip structure, the soil adhesion quality was reduced by 60.1% and the slip rate was reduced by 54.3%.

Key words: Elastic press roller Profiling Reducing soil adhesion and anti-slip structure

收稿日期: 2015-01-26 修回日期: 2015-04-16

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)和国家自然科学基金资助项目(51305158)

作者简介: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术及仿生智能作业机械研究, E-mail: jiahl@vip.163.com

通讯作者: 庄健, 博士后, 主要从事农业机械部件耦合仿生设计研究, E-mail: zhuangjian_2001@163.com

引言

镇压辊是耕播机械中常见的触土部件,主要用于耕播作业后压实土壤。播种后进行适当地镇压是十分必要的,能够显著提高作物的出苗率和产量^[1-3]。

仿形弹性镇压辊具有良好的横向和纵向仿形能力,能更好地保证横向镇压的均匀性,且镇压作业稳定,镇压力满足农艺要求。但是,在试验过程中仿形弹性镇压辊在减少土壤粘附和滑移率上不尽理想。在作业过程中,若镇压辊易粘附土壤,会造成镇压表面不平整,镇压力不均匀,影响种子的发芽;镇压辊可为排种器提供驱动力,而镇压辊滑移率大,会造成排种器漏播,影响播种质量^[4]。因此,减少土壤在镇压辊表面的粘附以及镇压辊自身的滑移率,对提高播后的镇压质量具有重要的现实意义。

目前,关于镇压辊减粘防滑方面的研究主要是在镇压辊的表面使用一些特殊材料和工艺或者特殊结构,以达到减粘防滑的效果。相关研究取得了较大的进展,其减粘防滑效果也大大改善^[5-7]。但是由于仿形弹性镇压辊采用弹性辐条结构,如果使用传统的减粘防滑结构,会造成运动过程中有弹性辐条的部位镇压力较大,而弹性辐条之间的部位镇压力较小,即镇压力会产生周期变化,影响镇压质量。因此需要设计一种适合仿形弹性镇压辊的减粘防滑装置,在保证均匀镇压力的同时,解决镇压辊粘附土壤和滑移率较大的问题。

任露泉等通过对某些典型土壤动物(如蚯蚓等)的研究发现^[8],蚯蚓靠体壁肌肉舒张与收缩实现运动,体节与体表刚毛共同构成了柔性结构,这种柔性结构在与土壤接触时,对来自土壤的作用力具有缓冲作用,并通过柔性单元体的相互位移、扭曲变形等使其接触的土壤被脱掉。本文从镇压辊与土壤相互作用的力学与运动学关系出发,采用现代仿生学原理设计一种与蚯蚓体表体节结构相似的减粘防滑结构。

1 减粘防滑结构设计

1.1 蚯蚓体表结构分析与应用

橡胶材料被广泛应用于镇压辊表面。传统橡胶套镇压辊的橡胶套直径大于辊筒直径,两者之间有间隙,作业过程中,橡胶套在辊筒表面发生变形和相对转动使表面土壤脱掉。这种镇压辊虽能达到脱附效果,但在实际生产作业过程中,橡胶套的变形和相对转动会使镇压辊产生较大的滑移率,影响镇压质量的均匀性和一致性,且影响其作为驱动的可靠性。

典型土壤动物蚯蚓特殊的体表结构为解决镇压辊粘附土壤和滑移问题提供了借鉴。

蚯蚓体表结构示意图^[9]如图1所示,典型土壤动物蚯蚓的体表形貌属于非光滑波纹形,其主要特征是它的身体由许多体节构成,蠕动过程中受到土壤压力,在纵向肌肉收缩力的作用下,体节发生扭曲变形、相对运动和振动,使其粘附的土壤被脱离^[10]。

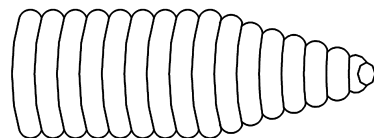


图1 蚯蚓体表结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of earthworm body surface

施卫平等对蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表进行了力学分析,将蚯蚓体表静息时的形态简化,从蚯蚓的身体中截取包含若干个体节的形体,其母线为^[11]

$$r = r_0 + a \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

式中 r ——水平距离为 x 时对应蚯蚓的半径, mm

r_0 ——蚯蚓的平均半径, mm

a ——蚯蚓体表非光滑波纹表面的振幅, mm

x ——距坐标原点的水平距离, mm

λ ——波长(即一个体节的长度), mm

仿形弹性镇压辊结构实体模型如图2所示。将式(1)曲线应用在仿形弹性镇压辊橡胶凸起的轮廓上,蚯蚓体表非光滑波纹表面的振幅 a 相当于橡胶凸起高度 H , 一个体节的长度 λ 相当于 $\pi/6$, 得到橡胶凸起的特征方程为

$$R = R_0 + H |\sin(3\alpha)| \quad (2)$$

式中 R ——橡胶凸起各点到中心轴的距离, mm

R_0 ——辊筒半径, mm

α ——转过的角度, rad

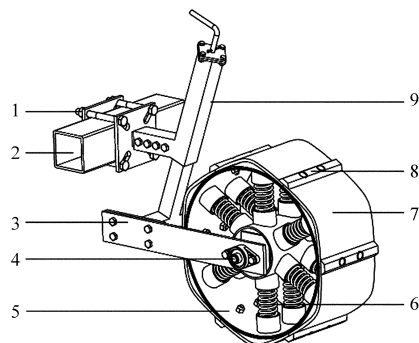


图2 仿形弹性镇压辊结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of profiling elastic press roller

1. 夹持板 2. 机架 3. 辊架 4. 中心轴 5. 辊筒 6. 弹性辐条
7. 橡胶凸起 8. 肋条 9. 高度调节装置

橡胶凸起采用肋条结构进行固定^[12],2种结构集成应用在仿形弹性镇压辊表面,实现减粘脱附、碎土防滑的效果:其中橡胶材料自身具有良好的防止土壤粘附的作用^[13],被广泛应用于镇压辊的表面;肋条材料超高分子聚乙烯具有良好的疏水性,是一种典型的防粘减阻材料^[14]。

仿形弹性镇压辊采用双排弹性辐条结构,每排均布6根弹性辐条,使其具有良好的横向和纵向仿形能力,但在作业过程中,若载荷和辊架高度一定,当辐条与地面垂直时,对土壤的镇压力较大;当辐条转过一定角度,与地面不垂直时,对土壤镇压力较小,即造成镇压力在前进方向上随镇压辊的转动周期性变化。为解决这个问题,肋条安装在辐条的中间位置,一是起到固定橡胶凸起的作用,二是能减小作业过程中由于辐条所处位置不同产生的镇压力变化,起到均匀镇压力的作用。因此,镇压辊表面设计了6个橡胶凸起和6个超高分子聚乙烯肋条通过螺栓固定在镇压辊表面。

1.2 橡胶凸起结构

橡胶凸起展开的结构尺寸如图3所示,图中 W 表示橡胶凸起展开后的长度,其决定了凸起高度 H 。通过实际测量得到了橡胶凸起长度和对应凸起高度的7组数据,利用Origin软件对这7组数据进行多项式拟合,拟合结果如图4所示。由图4可知,凸起高度 H 与凸起长度 W 之间的关系为

$$H = 0.014W^2 - 5.941W + 621.886 \quad (3)$$

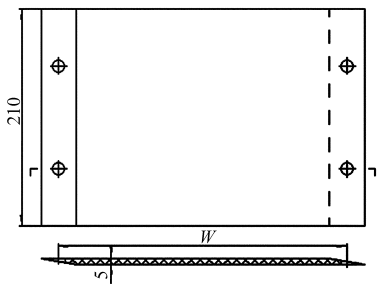


图3 橡胶凸起展开的结构尺寸

Fig. 3 Dimensions of expanded rubber bulge

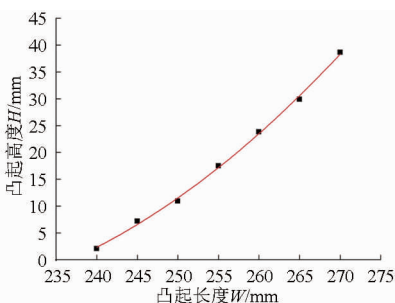


图4 凸起高度和凸起长度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of bulge height and bulge length

凸起高度直接影响镇压辊的脱附能力,凸起过

大,会造成橡胶凸起在运动过程中受到土壤挤压发生折叠,影响脱附效果;凸起过小,则不能产生足够的脱附力弹开土壤。

橡胶过厚,橡胶凸起弹性恢复能力强,但扭曲变形能力弱;橡胶过薄,橡胶凸起的扭曲变形能力强,但弹性恢复能力弱。根据实际镇压轮的结构尺寸,选择橡胶厚度为5mm,通过测试得到当凸起高度为28mm时,橡胶凸起运动过程中会产生折叠现象,因此凸起高度 $H < 28$ mm。

橡胶凸起弹起的过程,是一个先加速后减速的过程,为方便计算将此过程简化为先匀加速后匀减速过程。通过对橡胶凸起进行受力分析得到

$$H = \int_{w_0}^W \frac{F_1}{ES(x)} dx = \int_{w_0}^W \frac{F_1}{EB(x-40)} dx \quad (4)$$

$$F_1 = ma_1 \quad (5)$$

式中 F_1 ——压缩量为 H 时的最小压力,N

E ——橡胶凸起弹性模量,Pa

$S(x)$ ——橡胶凸起面积, mm^2

W_0 ——橡胶凸起最小长度,mm

B ——镇压辊宽度,mm

m ——粘附土壤质量,kg

a_1 ——匀加速运动加速度, m/s^2

当橡胶凸起弹起恢复到自然状态的瞬间,橡胶凸起减速运动,粘附土壤在惯性作用下继续运动。脱附土壤需要满足

$$F_1 = ma_1 > F = KB(W-40) \quad (6)$$

式中 F ——粘附力,N

K ——土壤对橡胶的粘附系数,MPa

式(4)~(6)联立化简得到

$$\frac{EH}{K} > (W - W_0) \ln \frac{W - 40}{W_0 - 40} \quad (7)$$

式中 $W_0 = 235$ mm,取 $E = 240$ Pa, $K = 150$ Pa,代入得到满足条件的凸起高度最小值为5.7mm。综上,凸起高度的取值范围为: $5.7 \text{ mm} < H < 28 \text{ mm}$ 。

1.3 肋条结构

减粘防滑结构中的肋条的主要作用是固定橡胶凸起和减少镇压辊运动过程中的滑移率,肋条的截面选择梯形,与弧形相比有更强的抓地能力,能更大程度减小滑移率,其结构尺寸如图5所示,图中 L 表示肋条高度。

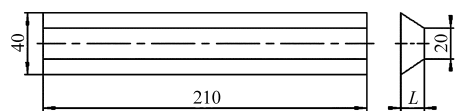


图5 肋条的结构尺寸

Fig. 5 Dimensions of rib

肋条高度对镇压辊的作业质量有较大影响,肋

条过高,能有效减小滑移率,但会造成运动不稳定,镇压力不均匀;肋条高度过小,镇压辊运动稳定镇压力均匀,但抓地能力不够,不能有效减小滑移率。因此,根据凸起高度的范围,初步选定肋条高度取值为: $10\text{ mm} \leq L \leq 20\text{ mm}$ 。

1.4 减粘防滑结构的工作机理

蚯蚓在土壤中的运动包括3种状态:静息态、舒张态、收缩态,运动过程中通过不断转换运动状态实现脱附土壤。减粘防滑结构也是如此,在运动过程中,当橡胶凸起边缘开始接触土壤时,随着镇压辊的转动,橡胶凸起受到土壤的挤压,产生前进方向的相对运动,发生变形和扭曲,凸起被推到肋条处(收缩态),受到肋条反作用力的作用,同时凸起被土壤挤压,橡胶凸起则产生相对土壤向后的运动(舒张态),并产生一定振动,橡胶凸起逐渐离开土壤(静息态),下一个橡胶凸起则开始与土壤接触,之后发生相同的变化,周而复始。橡胶凸起在这个运动过程中不断发生扭曲变形、相对位移和一定程度的振动,这种扭曲变形、相对位移和振动对接触土壤产生脱附作用,降低了镇压辊的土壤粘附,同时这种振动和相对位移也会产生一定的碎土作用。

作业过程中,镇压辊表面的肋条结构在载荷作用下压入土壤,减小了镇压辊作业过程中的滑移率,从而为排种器作业提供了较为稳定的驱动力。

2 试验

2.1 土槽试验

2.1.1 试验方法

于2014年10月9—18日在吉林大学工程仿生教育部重点实验室土槽试验台进行正交组合试验。土槽试验的试验条件:土槽长40 m,宽2.8 m,深1.8 m,翻后土壤0~100 mm处容积密度为 1.03 g/cm^3 ,100~200 mm处容积密度为 1.20 g/cm^3 ,0~100 mm处土壤含水率为12.5%,100~200 mm处土壤含水率为14.6%。起垄后,将土壤表面刮平,采用SC-900型土壤紧实度仪测试其坚实度,以保证每次试验前的土壤坚实度误差在 $\pm 10\%$ 范围内,镇压辊采用自制连接件与土槽台车横梁连接,土槽试验现场如图6所示。

试验用的主要仪器设备:土槽台车测试系统、SC-900型土壤紧实度仪、MS-350型水分测定仪、环刀组件(容积 100 cm^3)、电子天平等。

土槽试验为正交组合试验,每组试验重复3次取平均值作为试验结果,试验中土槽台车作业速度设定为 1.0 m/s 。每次试验完成后用毛刷将粘附在镇压辊上的土壤刮下,测量其质量,作为土壤粘附

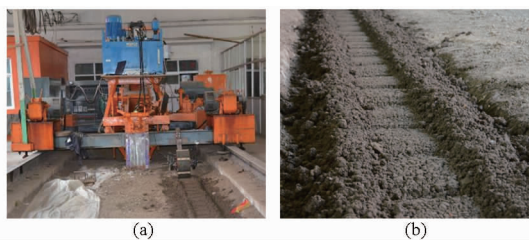


图6 土槽试验现场

Fig. 6 Test site in an indoor soil bin

(a) 土槽试验 (b) 土槽作业效果

量;同时根据镇压辊在垄台上留下的肋条的压痕,得到镇压辊旋转的圈数,计算出其滑移率。

2.1.2 土槽试验方案

土槽试验目的是通过正交组合试验的方法,找到减粘防滑结构的最佳参数,并探寻各个因素对镇压辊土壤粘附和滑移率的影响。

土槽试验选取的影响因素为:载荷 F ,凸起高度 H 和肋条高度 L ,每个影响因素选取3个水平。根据 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken Design 组合设计原理,以土壤粘附量和滑移率作为试验指标,设计了三因素三水平的正交组合试验,试验总次数为17,其中的12组作为析因点,5组作为零点,零点试验重复多次以估计试验误差^[15-16]。因素水平编码如表1所示。

表1 因素水平

Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	因素		
	载荷 F/N	凸起高度 H/mm	肋条高度 L/mm
-1	450	6	10
0	600	16	15
1	750	26	20

2.1.3 土槽试验结果

试验测试指标中滑移率的计算式为

$$\delta = \frac{l - \pi dn}{l} \times 100\% \quad (8)$$

式中 δ ——滑移率, %

l ——地段实测长度, mm

d ——镇压辊的直径, mm

n ——实测地段内镇压辊转的圈数

土槽试验是以各个影响因素水平编码值作为自变量,以粘附土壤量和滑移率作为试验指标,试验方案和结果如表2所示,表中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别为载荷、凸起高度、肋条高度的因素编码值。

2.1.4 土槽试验结果方差分析

利用 Design-Expert 软件对数据处理后,得出镇压辊粘附土壤量的方差分析结果如表3所示。对表2中的数据进行二次多元回归拟合,得到镇压辊粘

表2 试验方案与结果
Tab.2 Test scheme and results

试验序号	x_1	x_2	x_3	粘附土壤量	滑移率
				y_1/g	$y_2/\%$
1	0	0	0	49.6	4.30
2	-1	1	0	86.7	5.09
3	0	1	1	88.3	4.86
4	0	0	0	48.9	4.55
5	-1	0	1	63.6	4.55
6	1	0	1	59.1	4.28
7	0	0	0	49.2	4.68
8	-1	0	-1	38.9	6.05
9	1	-1	0	108.4	3.81
10	-1	-1	0	90.8	3.60
11	0	-1	1	101.5	4.85
12	0	-1	-1	90.1	5.17
13	0	1	-1	80.5	6.43
14	1	1	0	89.5	4.15
15	1	0	-1	59.9	6.08
16	0	0	0	50.1	4.45
17	0	0	0	51.0	4.58

表3 粘附土壤量方差分析

Tab.3 Variance analysis of soil adhesion quality

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值
模型	7 665.10	9	851.68	805.70	0.000 1
x_1	170.20	1	170.20	161.01	0.000 1
x_2	262.21	1	262.21	248.05	0.000 1
x_3	232.20	1	232.20	219.66	0.000 1
x_1x_2	54.76	1	54.76	51.80	0.000 2
x_1x_3	162.56	1	162.56	153.79	0.000 1
x_2x_3	3.24	1	3.24	3.07	0.123 5
x_1^2	92.32	1	92.32	87.33	0.000 1
x_2^2	6 538.74	1	6 538.74	6 185.71	0.000 1
x_3^2	3.66	1	3.66	3.46	0.105 0
失拟项	4.67	3	1.56	2.28	0.221 6
纯误差	2.73	4	0.68		
总和	7 672.50	16			

附土壤量对编码自变量的二次多元回归方程为

$$y_1 = 49.76 + 4.61x_1 - 5.72x_2 + 5.39x_3 - 3.70x_1x_2 - 6.38x_1x_3 + 4.68x_1^2 + 39.41x_2^2 \quad (9)$$

根据表3中的方差分析结果可知,影响因子 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 极显著,其他影响因子不显著;失拟项的 P 值为0.221 6,显然 $P > 0.05$,表明二次多元回归拟合程度较高,无失拟因素存在,可以用该方程代替试验真实点进行分析;同时也可得到各个影响因子对镇压辊粘附土壤量的显著性顺序从大到小依次为:凸起高度、肋条高度、载荷。

利用Design-Expert软件对数据处理后,得出镇压辊滑移率的方差分析结果如表4所示。对表2中

的数据进行二次多元回归拟合,得到镇压辊滑移率对编码自变量的二次多元回归方程为

$$y_2 = 4.51 + 0.39x_2 - 0.65x_3 - 0.29x_1x_2 - 0.31x_2x_3 + 0.95x_3^2 \quad (10)$$

根据表4中的方差分析结果可知,影响因子 x_2 、 x_3 、 x_3^2 极显著,影响因子 x_1x_2 、 x_2x_3 显著,其他影响因子不显著;失拟项的 P 值为0.074 8,显然 $P > 0.05$,表明二次多元回归拟合程度较高,无失拟因素存在,可以用该方程代替试验真实点进行分析;同时也可得到各个影响因子对镇压辊粘附土壤量的显著性顺序从大到小依次为:肋条高度、凸起高度、载荷。

表4 滑移率方差分析

Tab.4 Variance analysis of slip ratio

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值
模型	9.36	9	1.04	18.16	0.000 5
x_1	0.12	1	0.12	2.05	0.194 9
x_2	1.20	1	1.20	20.98	0.002 5
x_3	3.37	1	3.37	58.80	0.000 1
x_1x_2	0.33	1	0.33	5.77	0.047 3
x_1x_3	0.02	1	0.02	0.39	0.550 6
x_2x_3	0.39	1	0.39	6.82	0.034 8
x_1^2	0.20	1	0.20	3.51	0.103 1
x_2^2	0.07	1	0.07	1.26	0.298 3
x_3^2	3.77	1	3.77	65.88	0.000 1
失拟项	0.32	3	0.11	5.10	0.074 8
纯误差	0.08	4	0.02		
总和	9.76	16			

2.1.5 土槽试验结果响应曲面法分析

利用Design-Expert软件中的响应曲面法分析载荷、凸起高度、肋条高度3个影响因素对镇压辊粘附土壤量和滑移率的影响。分析中固定3个因素中的1个因素为零水平,考察另外2个因素对镇压辊粘附土壤量和滑移率的影响。

(1) 载荷和凸起高度对粘附土壤量的影响

固定肋条高度为15 mm,由图7可知,在肋条高度为15 mm试验水平下,凸起高度对粘附土壤量的影响比载荷显著;粘附土壤量随载荷的增加而上升,且上升趋势逐渐增强,粘附土壤量随凸起高度的增加呈先减小后增加的趋势,且变化幅度较大;凸起高度和载荷对粘附土壤量具有交互作用。

(2) 载荷和肋条高度对粘附土壤量的影响

固定凸起高度为250 mm,由图8可知,在凸起高度为250 mm试验水平下,肋条高度对粘附土壤量的影响比载荷显著;粘附土壤量随载荷的增加而上升,且上升的趋势逐渐增强,粘附土壤量随肋条高度的增加而上升,且上升趋势稳定;凸起高度和载荷对粘附土壤量具有交互作用。

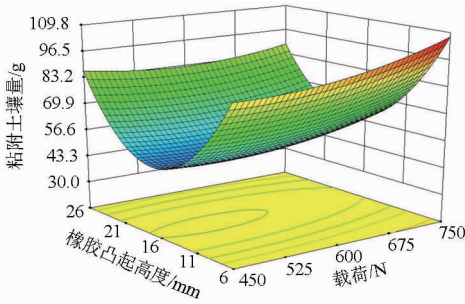


图 7 载荷和凸起高度对粘附土壤量影响的响应曲面

Fig.7 Response surface showing effects of load and rubber bulge height on soil adhesion quality

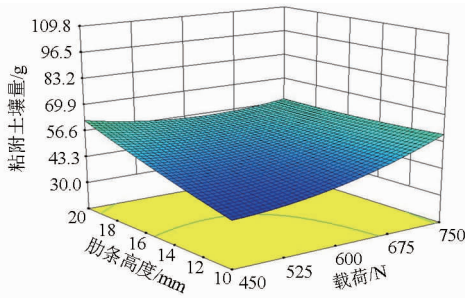


图 8 载荷和肋条高度对粘附土壤量影响的响应曲面

Fig.8 Response surface showing effects of load and rib height on soil adhesion quality

(3) 凸起高度和肋条高度对粘附土壤量的影响

固定载荷为 600 N,由图 9 可知,在载荷为 600 N 的试验水平下,凸起高度对粘附土壤量的影响比肋条高度显著;粘附土壤量随凸起高度的增加呈先减小后增加的趋势,且变化幅度较大,粘附土壤量随肋条高度的增加而上升,且上升趋势稳定;凸起高度和肋条高度对粘附土壤量并无交互作用。

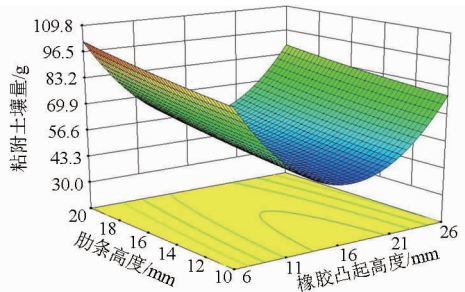


图 9 凸起高度和肋条高度对粘附土壤量影响响应曲面

Fig.9 Response surface showing effects of rubber bulge height and rib height on soil adhesion quality

(4) 载荷和橡胶凸起高度对滑移率的影响

固定肋条高度为 15 mm,由图 10 可知,在肋条高度为 15 mm 试验水平下,凸起高度对滑移率的影响比载荷显著;滑移率随载荷和凸起高度的增加而上升,且上升的趋势逐渐减缓;凸起高度和载荷对滑移率无交互作用。

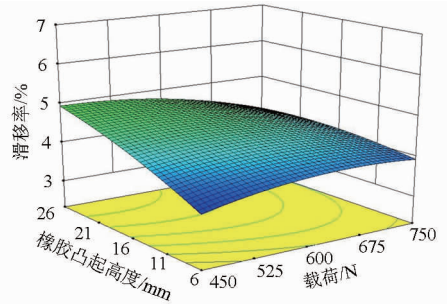


图 10 载荷和凸起高度对滑移率影响的响应曲面

Fig.10 Response surface showing effects of load and rubber bulge height on slip ratio

(5) 载荷和肋条高度对滑移率的影响

固定凸起高度为 250 mm,由图 11 可知,在凸起高度为 250 mm 试验水平下,肋条高度对滑移率的影响比载荷显著;滑移率随载荷的增加而上升,且上升趋势逐渐减缓,滑移率随肋条高度的增加呈先减小后增加的趋势,且变化幅度较大;凸起高度和载荷对滑移率无交互作用。

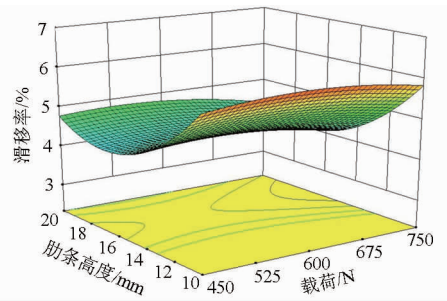


图 11 载荷和肋条高度对滑移率影响的响应曲面

Fig.11 Response surface showing effects of load and rib height on slip ratio

(6) 凸起高度和肋条高度对滑移率的影响

固定载荷为 600 N,由图 12 可知,在载荷为 600 N 的试验水平下,肋条高度对滑移率的影响比凸起高度显著;滑移率随凸起高度的增加而上升,且上升的趋势逐渐减缓,滑移率随肋条高度的增加呈先减小后增加的趋势,且变化幅度较大;凸起高度和肋条高度对滑移率有交互作用。

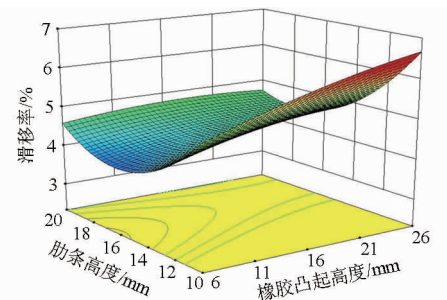


图 12 凸起高度和肋条高度对滑移率影响的响应曲面

Fig.12 Response surface showing effects of rubber bulge height and rib height on slip ratio

在试验结果回归分析和拟合的基础上,利用

Design-Expert 软件进一步优化,预测出减粘防滑结构的最佳工作参数组合为:载荷 450.0 N、凸起高度 13.9 mm、肋条高度 15.1 mm。

2.2 田间试验

2.2.1 试验方法

于 2014 年 10 月 19—21 日在吉林大学农学部试验田进行验证试验和对比试验。田间试验的试验条件:耕作方式为垄作,翻耕后土壤 0~100 mm 处容积密度为 1.09 g/cm³,100~200 mm 处容积密度为 1.24 g/cm³,0~100 mm 处土壤含水率为 11.2%,100~200 mm 处土壤含水率为 15.1%。试验田为均匀垄大豆地,无秸秆残茬覆盖,仿形弹性镇压辊连接在 2BYMQF-4 型播种机机架上,由约翰迪尔 904 型拖拉机提供动力,田间试验现场如图 13 所示。



图 13 田间试验现场

Fig. 13 Test site in the field

(a) 减粘防滑结构 (b) 田间试验

(c) 田间作业效果 (d) 作业效果局部放大图

试验用的主要仪器设备:约翰迪尔 904 型拖拉机、2BYMQF-4 型播种机、SC-900 型土壤紧实度仪、MS-350 型水分测定仪、环刀组件(容积 100 cm³)、电子天平等。

田间试验为验证试验和对比试验,试验中机具作业速度设定为 1.0 m/s,机具作业 100 m 测量一组数据,每组重复 10 次。

2.2.2 田间试验结果

田间试验的目的是验证土槽试验得出的减粘防滑结构最佳工作参数组合是否具有好的作业效果。验证试验用 2BYMQF-4 型播种机在吉林大学农学部试验田进行,为了消除试验产生的随机误差,进行 10 次重复试验。试验结果为:粘附土壤量最大为 52.7 g,最小为 24.5 g,平均 31.2 g;滑移率最大为 5.03%,最小为 2.97%,平均 3.89%。

将镇压辊表面减粘防滑结构拆掉,在相同试验条件下进行对比试验,作业速度 1.0 m/s,载荷也选 450.0 N,进行重复试验,所得试验结果如表 5 所示。有减粘防滑结构的镇压辊与没有减粘防滑结构的镇

压辊对比,粘附土壤量降低 60.1%,滑移率降低 54.3%。

表 5 对比试验结果

Tab. 5 Test results of contrast test

试验序号	粘附土壤量/g	滑移率/%
1	60.5	8.65
2	98.2	7.57
3	57.6	9.72
4	103.5	8.47
5	88.2	7.37
6	79.7	8.23
7	65.0	8.91
8	51.2	10.51
9	86.4	7.64
10	90.5	8.12
均值	78.1	8.52

2.2.3 田间试验压实效果

选取作业后的 10 垄测试压实情况,每垄随机选取 5 个点测量,取其平均值作为此垄的土壤容积密度,一垄为一组试验,共 10 组。镇压作业之后土壤容积密度如表 6 所示。东北地区,大豆种植最适宜的土壤容积密度为 1.0~1.3 g/cm³[17]。从试验结果可知,带减粘防滑结构的仿形弹性镇压辊能达到大豆种植农艺要求。

表 6 镇压后土壤容积密度

Tab. 6 Soil bulk density after compaction g/cm³

深度/mm	试验序号				
	1	2	3	4	5
0~100	1.04	1.18	1.23	1.15	1.21
100~200	1.19	1.24	1.27	1.22	1.24
深度/mm	试验序号				
	6	7	8	9	10
0~100	1.23	1.14	1.20	1.16	1.24
100~200	1.29	1.20	1.26	1.25	1.30

3 结论

(1) 基于典型土壤动物蚯蚓的体表柔性几何特征,设计了一种适用于仿形弹性镇压辊的减粘防滑结构,其主体是橡胶凸起,同时借鉴已有肋条结构对其进行固定,是多种仿生结构的集成应用。

(2) 通过三水平三因素正交组合试验,利用 Design-Expert 软件分析得出各因素对镇压辊粘附土壤量影响的显著性顺序为:凸起高度、肋条高度、载荷;各因素对镇压辊滑移率影响的显著性顺序为:肋条高度、凸起高度、载荷。

(3) 通过 Design-Expert 软件分析得出减粘防滑结构的最佳作业参数组合为:载荷 450.0 N、凸起高度

13.9 mm,肋条高度 15.1 mm。并进行验证试验和对比试验,得到镇压辊粘附土壤量平均为 31.2 g,滑移率为 3.89%,分别比没有减粘防滑结构的镇压辊降低 60.1% 和 54.3%。

参 考 文 献

- 1 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 161-164.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 161-164. (in Chinese)
- 2 Ichiro I, Hiroshi M, Takeshi S, et al. Study on improving the emergence of direct sowing sugar beets (part 1)—improving emergence rate by press roller attached to seeder[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2006, 68(6): 75-82.
- 3 Ichiro I, Masatoshi O, Takeshi S. Study on improving the emergence of direct sowing sugar beets (part 2)—the soil compaction to middle-layer for increasing emergence[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2006, 68(6): 83-90.
- 4 任露泉. 土壤粘附力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- 5 钱定华,张际先. 土壤对金属材料粘附和摩擦研究状况概述[J]. 农业机械学报, 1984, 15(1): 69-78.
Qian Dinghua, Zhang Jixian. A summary of study of adhesion and friction between soil and metals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 15(1): 69-78. (in Chinese)
- 6 张毅,周志立. 耕地机械触土部件材料及其仿生研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2002(4): 30-31.
- 7 Tong J, Zhang Q Z, Chen D H, et al. Effects of bionic geometric structure press rollers on reducing rolling resistance and adhesion against soil[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 461: 63-72.
- 8 任露泉,王云鹏. 典型生物柔性非光滑体表的防粘研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 31-36.
Ren Luquan, Wang Yunpeng. Bionic research on flexible nonsmooth surface of typical animals[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(4): 31-36. (in Chinese)
- 9 刘芳,施卫平. 蚯蚓爬行的生物力学分析与数值计算[J]. 力学学报, 2010, 42(5): 951-956.
Liu Fang, Shi Weiping. Biomechanical analysis and numerical calculation of earthworm crawling [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(5): 951-956. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 施卫平,任露泉. 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.
Shi Weiping, Ren Luquan. The creeping mechanism of the non-smooth wavy surface of earthworm body [J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(3): 73-74. (in Chinese)
- 12 佟金,张清珠,常原,等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135-140.
Tong Jin, Zhang Qingzhu, Chang Yuan, et al. Experiment on reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135-140. (in Chinese)
- 13 Freakley P K, Payne A R. 橡胶在工程中应用的理论与实践[M]. 杜承泽,译. 北京:化学工业出版社, 1985.
- 14 刘朝宗,任露泉. 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)及其复合材料的土壤粘附[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 37-41.
Liu Chaozong, Ren Luquan. Soil adhesion of UHMWPE and its composite materials [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 37-41. (in Chinese)
- 15 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- 16 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- 17 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社, 1995.