

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.012

水稻收获机械抖动板加热脱附试验研究

程超^{1,2} 付君^{1,2} 唐心龙³ 陈志^{2,4} 任露泉^{1,2}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022;
3. 吉林大学农业实验基地, 长春 130062; 4. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080)

摘要: 为解决水稻收获机械物料抖动板表面极细小湿黏物料粘附的问题, 提出了利用界面加热实现金属抖动板减粘脱附的方法。以镀锌板和不锈钢板两种基材为试验部件, 以极细小湿黏水稻物料为试验对象, 构建了湿黏水稻物料与金属抖动板表面的粘附界面模型, 分析得出水膜的毛细作用是形成粘附界面的重要原因, 揭示了金属抖动板表面加热对粘附界面的脱附作用机理。通过加载加热脱附试验, 得到两种金属抖动板脱附率曲线模型, 分析表明, 粘附界面加热可以有效抑制湿黏水稻物料粘附在金属抖动板表面, 当温度为 50℃ 时, 镀锌板和不锈钢板的脱附率分别达到 61.81% 和 61.33%。振动加热脱附试验表明, 金属抖动板的振动强度影响加热脱附效果, 采用较低温加热、较高强度振动的方案, 脱附效果更好, 抖动板采用 40℃ 加热, 设定振频 6 Hz、振幅 40 mm 的作业参数, 脱附率超过 65%, 满足实际作业要求。验证试验表明, 热气流加热是实现水稻收获机械抖动板与湿黏物料减粘脱附的有效方式。

关键词: 水稻; 收获机械; 抖动板; 界面加热; 脱附; 机理

中图分类号: S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0110-09

Heating Anti-adhesion Experiments of Jitter Plate of Rice Harvesting Machinery

CHENG Chao^{1,2} FU Jun^{1,2} TANG Xinlong³ CHEN Zhi^{2,4} REN Luquan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China
2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
3. Agriculture Test Station, Jilin University, Changchun 130062, China
4. National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China)

Abstract: Small, wet and sticky materials in rice threshed mixtures could be easily to adhere to the surface of metal jitter plate in cleaning device. A method to reduce the adhesion of wet sticky rice materials and metal jitter plate by interface heating was proposed. The Galvanized plate and stainless steel plate were used as test parts. The small wet sticky rice material was processed by crusher. Firstly, the model of adhesion interface between wet sticky rice material and metal jitter plate was constructed. The capillarity of water film was an important reason for the formation of adhesion interface. The anti-adhesion mechanism of interface heating of metal jitter plates was revealed. Secondly, loading and heating anti-adhesion test was carried out with electronic universal testing machine. The anti-adhesion rate curve models of Galvanized plate and stainless steel plate were obtained. The results showed that wet sticky rice materials were effectively inhibited to adhere to the surface of test parts through interface heating. The anti-adhesion rate of two kinds of metal jitter plates were respectively 61.81% and 61.33% when the temperature was 50℃. Then, vibrating and heating anti-adhesion test was carried out by using linear vibration test bed. The results showed that anti-adhesion rate was influenced by vibration strength of metal jitter plates. When the temperature of metal jitter plate was 40℃, the vibration frequency was 6 Hz, and the amplitude was 40 mm, the anti-adhesion rate exceeded 65%, which met the actual operation requirements. Finally, the verification test showed that the application of hot flow heating was an effective interface heating way to reduce adhesion between wet sticky rice materials and jitter plate in actual cleaning process.

Key words: rice; harvesting machinery; jitter plate; interface heating; anti-adhesion; mechanism

收稿日期: 2018-12-06 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700302)和吉林省省校共建计划专项(SXGJXX2017-6)

作者简介: 程超(1991—), 男, 博士生, 主要从事仿生收获技术与装备研究, E-mail: chengchao17@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 付君(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事仿生收获技术与装备研究, E-mail: fu_jun@jlu.edu.cn

0 引言

抖动板是水稻等谷物收获机械的重要作业部件,其主要作用是通过往复振动将来自脱粒装置的脱出物喂入清选筛。然而,水稻收获时含水率较高,其脱出物中的细小湿黏物料与抖动板接触时,极易产生粘附和堵塞现象,造成抖动板抛送效率下降、作业功耗增大、清选喂入量不均匀等问题,严重影响水稻收获质量和收获机械作业可靠性。因此,提高水稻收获机械物料抖动板表面的抗粘附特性、减少粘附物很有必要。

在农业工程领域,学者们针对农业机械触土部件减粘脱附问题进行了大量研究,研究主要包括土壤粘附特性^[1-4]、机械式土壤脱附^[5-6]、触土部件表面改形及改性^[7-9]等方面,此外,仿生学的发展为农业机械触土部件减粘脱附提供了新思路,陈秉聪院士、任露泉院士等通过对土壤动物研究发现,土壤动物的器官构型和非光滑体表形貌具有减粘降阻和脱附效应^[10-12],这种仿生减粘脱附技术在铧式犁犁壁^[13-15]、播种机开沟器^[16-17]等农机零部件上得到广泛的应用。然而,目前国内外学者对收获机械零部件与农业物料的减粘脱附研究较少。其中,李耀明等^[18]将仿生非光滑表面应用到油菜收获机的振动筛上,试验证明仿生非光滑筛面减粘脱附效果显著,稳定性、适用性较强,但非光滑筛面加工工艺复杂、生产成本低。傅美贞等^[19]通过对振动筛表面喷涂聚四氟乙烯,使其表面不沾水、不沾污,但涂层耐磨性能和耐久性差,未得到推广应用。

加热是调控粘附界面力学属性的重要方法,能够减弱界面法向或切向粘附性能^[20],表面分布着粘性液体的湿黏水稻物料,与金属抖动板构成了物料-金属接触界面,对该界面加热可减小水膜的表面张力,降低接触粘附力。本文构建水稻湿黏物料表面与金属板表面的加热脱附界面理论模型,分别进行加载加热脱附试验、振动加热脱附试验和热气流加热脱附试验,揭示金属抖动板的脱附规律及机理,为提高水稻收获机械的综合作业性能提供理论依据。

1 试验材料

水稻物料在脱粒装置中受到反复击打、揉搓,会产生大量的细小碎屑,碎屑表面残留伤流液,极易粘附在收获机械的金属抖动板上,形成粘附物。为提高加热脱附显著性,试验以粘附性强的细小湿黏水稻物料为试验对象,水稻取自吉林省东辽县安恕镇,品种为科裕47,湿黏物料制备方法参考文献^[18],根据筛面粘附物成分及尺寸分布情况,利用粉碎机

处理新鲜水稻秸秆和稻叶,配制各种尺寸梯度的细小湿黏物料混合物,如图1所示,其含水率为76.54%^[21],湿黏物料尺寸范围比例如图2所示,物料中尺寸不超过1 mm的成分约占50%,物料中尺寸超过5 mm的成分约占10%,最大尺寸不超过10 mm,为保证试验结果的准确性,每组试验需要重新配制湿黏物料,且保存时间不宜过长。



图1 湿黏水稻物料实物图

Fig. 1 Picture of wet and sticky rice materials

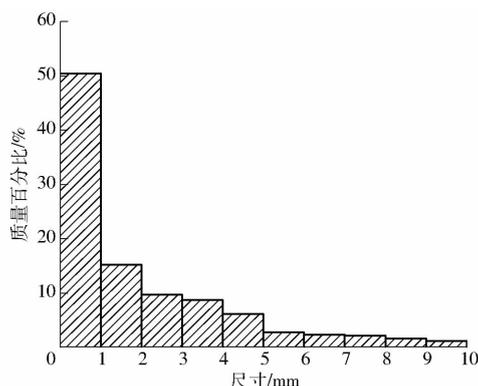


图2 湿黏水稻物料尺寸范围比例

Fig. 2 Size range ratio of wet and sticky rice materials

水稻收获机械中抖动板的材质多为镀锌板和不锈钢板,为了减少物料粘附,目前部分抖动板表面设计有条纹,但这种表面改形的脱附方式只能有助于大尺寸物料流动,对于细小的湿黏物料会形成阻碍,导致粘附加剧,根据本文试验目的,同时排除其他脱附因素的干扰,本文试验选用平面镀锌板和不锈钢板两种基材作为加热脱附试验部件。两种金属抖动板厚度均为1 mm,试验前对金属抖动板表面油渍、毛刺加以处理,确保金属抖动板表面光洁。为了能够精确、稳定地控制金属抖动板温度,试验选用硅橡胶加热片对其进行加热保温,如图3所示。



图3 金属抖动板加热方案

Fig. 3 Heating scheme of metal plate

1. 塑料板 2. 硅橡胶加热片 3. 金属抖动板 4. 温度控制器

硅橡胶加热片嵌套在金属抖动板和塑料板之间,金属抖动板和塑料板固定在一起,试验时通过温度控制器调节硅橡胶加热片的温度,温度控制精度为 1°C ,硅橡胶加热片尺寸为 $300\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,故金属抖动板的有效加热面积为 0.06 m^2 ,塑料板厚度为 2 mm ,加热过程中起到绝热、减少热量损失的作用。

2 加热脱附界面理论

在水稻机械化收获过程中,金属部件对水稻物料的击打、揉搓是不可避免的。利用体视显微镜观察受损的伤湿黏水稻物料的表面形貌发现,其表面附着大量水膜,如图4所示,水膜的毛细作用是造成界面粘附的重要原因。

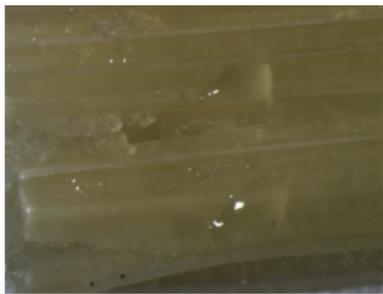


图4 湿黏水稻物料表面附着水膜

Fig. 4 Water film attached to surface of wet sticky rice material

根据界面科学理论^[22],构建湿黏水稻物料表面与金属抖动板表面的粘附界面几何模型。当湿黏水稻物料与金属抖动板接触时,如图5a所示,水膜介于二者之间形成毛细桥梁,此时,毛细力远大于范德华力,粘附力主要表现为毛细桥梁的毛细力。当金属抖动板被加热时,金属抖动板表面和湿黏物料表面产生温度差,根据热量平衡原理,水膜不断吸收金属抖动板表面的热量,并随着热量的不断积累而产生汽化现象;因毛细桥梁处于粘附界面的最外部,最先挥发;因金属抖动板表面的温度高于水稻湿黏物料表面的温度,故与金属抖动板表面接触的水膜挥发速度较快,湿黏界面被破坏的过程如图5b所示。当水膜汽化消失后,湿黏的水稻物料与金属抖动板的粘附界面模型被完全破坏,如图5c所示,毛细力彻底消失,金属抖动板实现脱附。

因此,温度是影响金属抖动板抗粘特性的重要因素;在安全工况温度条件下,金属抖动板的温度越高,其表面的水膜吸热速率越快,汽化越高效,抗粘特性越优良;本节构建的加热脱附界面理论,为揭示水稻收获机械抖动板加热脱附规律奠定了理论依据。

为验证上述加热脱附界面理论,如图6所示,依

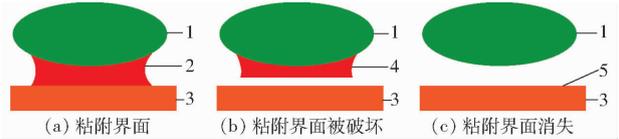


图5 湿黏水稻物料与金属抖动板的粘附界面

Fig. 5 Adhesion interface between wet sticky rice material and metal jitter plate

1. 水稻物料 2. 毛细桥梁 3. 金属抖动板 4. 水稻物料表面残留水膜 5. 金属抖动板表面

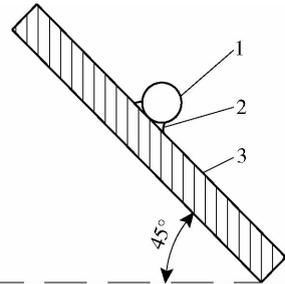


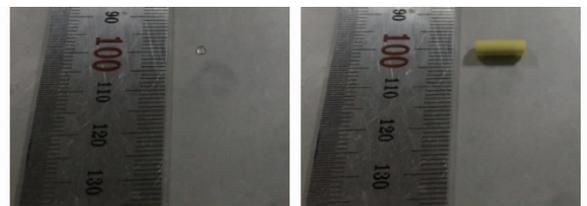
图6 粘附秸秆滑落试验方案

Fig. 6 Adhesive straw slip test scheme

1. 水稻秸秆 2. 毛细桥梁 3. 金属抖动板

据清选装置常用的振动方向角度,将金属抖动板倾斜 45° 放置并对其加热,测试热脱附条件下水稻秸秆在金属抖动板上的滑落运动过程。

为保证对比试验的合理性及有效性,设计试验方案如下:首先进行对照组试验,金属抖动板不加热,如图7a所示,利用滴定管在金属抖动板上滴 0.05 mL 蒸馏水,如图7b所示,将长 10 mm 、直径 4 mm 的水稻秸秆置于水滴上,水稻秸秆由于水膜的作用,粘附在倾斜的抖动板上;然后进行验证组试验,金属抖动板加热到 35°C ,水膜及秸秆的处理方式与上组试验相同,水稻秸秆粘附在加热的金属抖动板上。利用摄像机记录两组粘附秸秆的运动状态。



(a) 滴定蒸馏水

(b) 秸秆粘附

图7 对照组中粘附秸秆滑动情况

Fig. 7 Adhesive straw slippage in control group

根据摄像机记录结果发现,对照组中粘附在金属抖动板上的秸秆在 5 min 内保持不动,未发生滑动,表明水稻秸秆处于稳定的粘附模型中。而验证组中粘附在加热金属抖动板上的秸秆的运动过程如图8所示,在 10 s 时,发生初次滑动,在 15 s 时,秸秆滑动距离超过 10 mm ,在 17 s 时,秸秆滑动距离超过 20 mm ,随着加热时间的延长,秸秆不断向下滑动,

在金属抖动板表面秸秆滑落的路径上无水膜痕迹,当秸秆从金属抖动板完全滑落时,观察秸秆表面形貌发现,水膜完全消失。

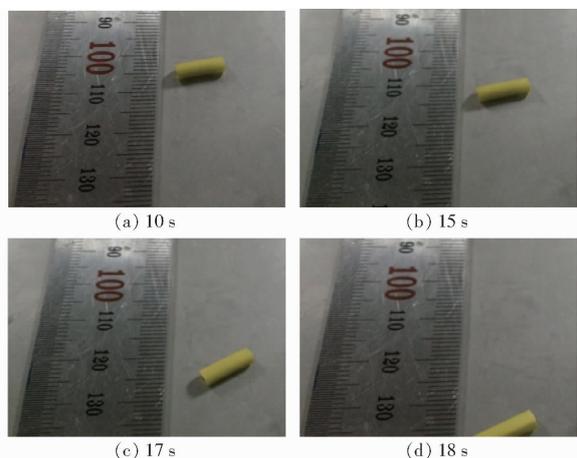


图8 验证组中粘附秸秆滑动情况

Fig. 8 Adhesive straw slippage in validation group

在图6所示的粘附秸秆滑落试验方案中,秸秆的受力平衡是由粘附力和重力共同作用形成的,重力沿金属抖动板向下的分力是造成秸秆滑落的诱因。对比试验结果表明,加热破坏了粘附模型中的水膜,使得毛细力消失,粘附力大幅减小,打破了秸秆的平衡状态,从而造成秸秆向下滑落。

3 试验结果与分析

3.1 加载加热脱附试验

参考油菜混合物与仿生筛面基体间粘附特性研究方法^[18],本文设计的加载加热脱附试验系统如图9所示,金属抖动板整体固定到微机控制电子万能试验机上,湿黏水稻物料均匀铺放在金属抖动板正下方,利用电子万能试验机带动金属抖动板对湿黏水稻物料进行定量加载,试验以常温下金属抖动板加载脱附试验作为对照,试验变量为金属抖动板的表面温度。

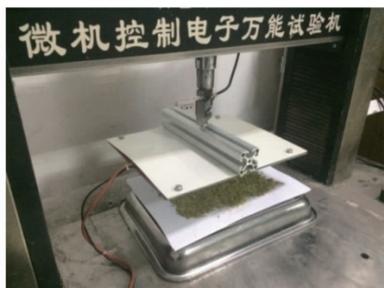


图9 加载加热脱附试验系统

Fig. 9 Loading and heating anti-adhesion test system

试验前测得室内温度为26.3℃,在不加热情况下,利用红外线测温仪测得镀锌抖动板和不锈钢抖动板表面温度分别为25.0℃和25.1℃,因此对照组试验温度选定为25℃,各加热温度分别为30、35、

40、45、50℃,利用硅橡胶加热片对金属抖动板加热时,要保证其加热均匀、稳定,利用红外线测温仪确认无误后,启动电子万能试验机,设定电子万能试验机加载速度为1 mm/min,载荷达到预设值5 N时进入恒压加载模式,30 s后将金属抖动板取下,收集粘附物,并统计其质量,每组试验重复5次,取平均值。不同温度下,镀锌抖动板和不锈钢抖动板上粘附物质量变化情况如图10所示,粘附物分布情况分别如图11、12所示。

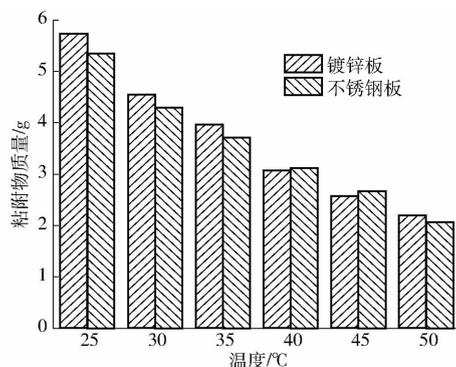


图10 不同温度下2种金属抖动板上粘附物质量分布

Fig. 10 Mass distribution of adhesion on two metal jitter plates at different temperatures

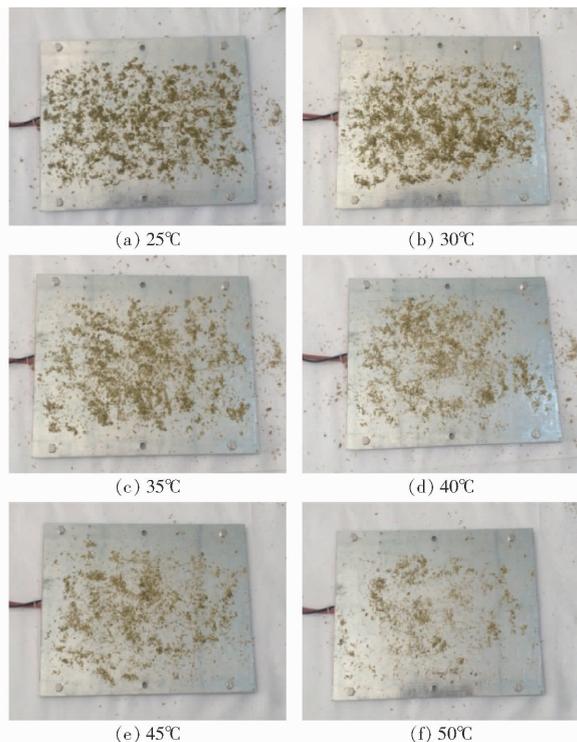


图11 不同温度下镀锌抖动板上粘附物分布

Fig. 11 Adhesion distribution on galvanized jitter plate at different temperatures

由图10分析可知,随着温度升高,镀锌板和不锈钢板两种金属抖动板上粘附物质量变化规律较为相似,均呈现逐渐减少的趋势。由图11和图12可以看出,随着温度升高两种金属抖动板上粘附物明

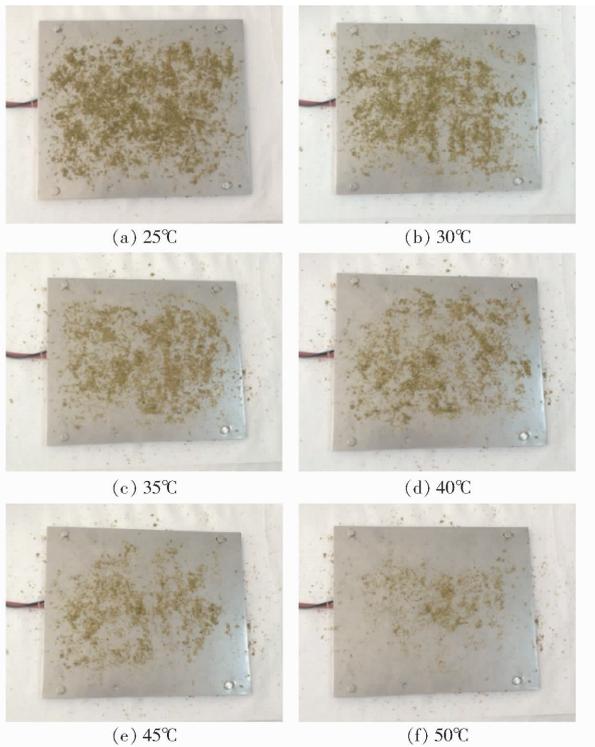


图 12 不同温度下不锈钢抖动板上粘附物分布
Fig. 12 Adhesion distribution on stainless steel jitter plate at different temperatures

显减少,在不加热的情况下,即温度为 25℃时,金属抖动板上粘附物分布面积最大。随着加热温度提高,粘附物分布面积逐渐减小,特别是温度超过 40℃时,脱附现象尤为明显,粘附面积大幅减少。根据以上分析表明,通过加热可以改善金属抖动板和湿黏水稻物料粘附界面脱附条件,有效抑制界面粘附,减少湿黏水稻物料粘附质量和分布面积,加热脱附适用于不同材质的金属抖动板,温度是影响湿黏水稻物料和金属抖动板界面加热脱附特性的重要因素。

为量化温度对湿黏水稻物料和金属抖动板粘附界面脱附的影响程度,以对照试验组(25℃)粘附物质量为基数,定义脱附率为

$$\eta_T = \frac{m - m_T}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中 η_T ——温度为 T 时金属抖动板的脱附率, %
 m ——对照试验组金属抖动板上粘附物质量, g
 m_T ——温度为 T 时金属抖动板上粘附物质量, g

根据图 10 的试验结果,结合式(1)求得不同加热温度下两种金属抖动板脱附率,如图 13 所示,利用 Origin 软件对脱附率变化规律进行拟合,得到两种金属抖动板脱附率曲线模型

$$\eta_{T1} = -0.0548T^2 + 6.5561T - 128.95 \quad (R^2 = 0.9955) \quad (2)$$

$$\eta_{T2} = -0.0374T^2 + 5.1411T - 103.61 \quad (R^2 = 0.9937) \quad (3)$$

式中 η_{T1} ——温度为 T 时镀锌板的脱附率, %
 η_{T2} ——温度为 T 时不锈钢板的脱附率, %
 T ——温度, ℃

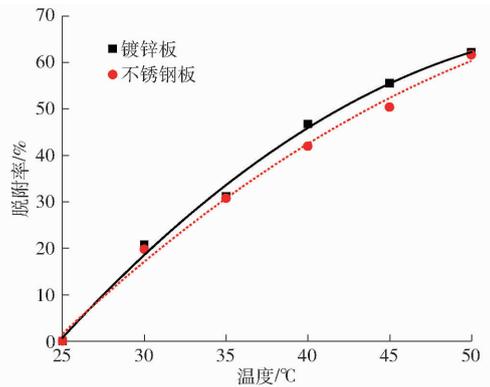


图 13 不同温度下两种金属板脱附率变化曲线
Fig. 13 Anti-adhesion rate changing curves of two test parts at different temperatures

由图 13 分析可知,随着温度升高,两种金属抖动板的脱附率变化规律较为相似,金属抖动板温度越高,其抗粘特性越强,脱附率越高,温度为 50℃时,镀锌板与不锈钢板的脱附率分别为 61.81% 和 61.33%,但根据曲线模型可知,随着温度升高,脱附率增长速率逐渐减小。

3.2 振动加热脱附试验

根据上述试验结果可知,在接近静态的条件下金属抖动板通过加热可以提高其减粘脱附特性,然而,在水稻收获机械作业时,抖动板的粘附问题多是在振动条件下造成的,当抖动板上湿黏水稻物料受到的粘附力大于惯性力时,湿黏物料与抖动板的表面会形成稳定的界面粘附系统,加热可以破坏界面粘附系统的稳定性,因此,进一步探究在振动条件下金属抖动板加热减粘脱附特性及其规律。

振动加热脱附试验装置如图 14 所示,试验在直线振动试验台上进行,将塑料板、硅橡胶加热片和金属抖动板由下至上依次固定到振动架上,温度控制器固定在机架上,电机通过曲柄连杆机构带动振动架及金属抖动板往复振动,金属抖动板的振动频率通过控制电机转速来调节,振动幅度通过更换曲柄调节。

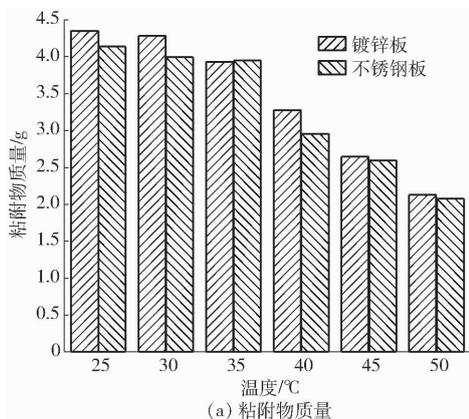
比较不同振动强度下金属抖动板加热脱附特性,试验选定较低、中等和较高 3 种振动强度作业工况,分别为振频 2 Hz、振幅 10 mm,振频 4 Hz、振幅 20 mm,振频 6 Hz、振幅 40 mm,对照试验温度选定为 25℃,各加热温度分别为 30、35、40、45、50℃,每组试验前调整振动参数,利用硅橡胶加热片调节金属



图 14 振动加热脱附试验装置

Fig. 14 Vibration heating anti-adhesion test device

抖动板温度,经充分预热后,利用红外线测温仪取多



点进行测温确认,称取 100 g 湿黏水稻物料,均匀铺放在金属抖动板上,然后启动电机,30 s 后关闭电机,将金属抖动板取下,收集金属抖动板上的粘附物,统计粘附物质量,3 种作业工况下每组试验重复 5 次,取平均值,并根据式(1)计算脱附率,每次试验结束后清理金属抖动板表面杂物和水渍,确保不影响下组试验。较低、中等和较高 3 种振动强度作业工况下,随着温度升高,镀锌板和不锈钢板两种金属抖动板上粘附物质量及脱附率变化情况如图 15 ~ 17 所示。

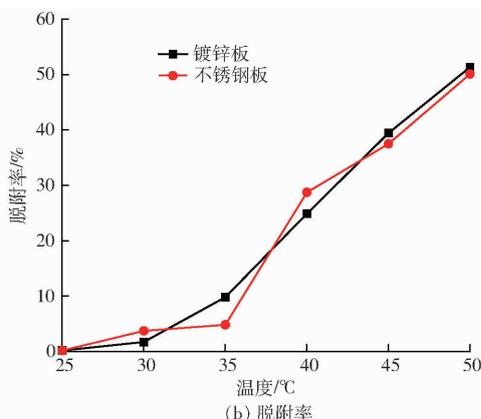


图 15 振频为 2 Hz、振幅为 10 mm 时,随着温度升高两种金属抖动板上粘附物质量及脱附率变化情况

Fig. 15 Change of adhesion weight and anti-adhesion rate on two metal jitter plates with increase of temperature when vibration frequency was 2 Hz and amplitude was 10 mm

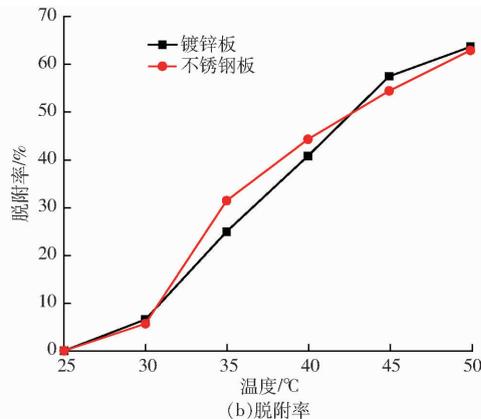
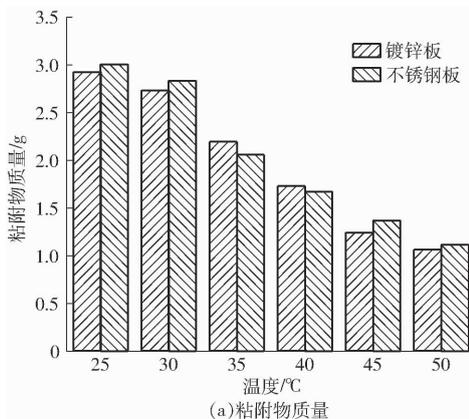


图 16 振频为 4 Hz、振幅为 20 mm 时,随着温度升高两种金属抖动板上粘附物质量及脱附率变化情况

Fig. 16 Change of adhesion weight and anti-adhesion rate on two metal jitter plates with increase of temperature when vibration frequency was 4 Hz and amplitude was 20 mm

由图 15a 分析可知,随着温度升高,镀锌板和不锈钢板上粘附物质量整体呈现减少趋势,二者差别不明显,在 25 ~ 35°C 区间内,随着温度升高,粘附物质量变化不大,减少趋势缓慢,在 35 ~ 50°C 区间内,随着温度升高,粘附物质量快速减少。结合图 15b 可知,在 25 ~ 35°C 区间内,随着温度升高,金属抖动板加热脱附率升高缓慢,温度为 35°C 时,脱附率不超过 10%,金属抖动板加热减粘脱附效果不显著,在 35 ~ 50°C 区间内,随着温度升高,金属抖动板加

热脱附率提高明显,温度为 40°C 时,脱附率超过 25%,温度为 50°C 时,脱附率约为 50%。

根据以上分析表明,当振频为 2 Hz、振幅为 10 mm 时,镀锌抖动板和不锈钢抖动板通过较低温加热对湿黏水稻物料的减粘脱附作用不大,只有加热温度超过 35°C 时,随着温度升高,金属板减粘特性增强,脱附效果非常显著,造成这种现象的原因是,金属抖动板振动强度较低时,无法为湿黏水稻物料提供足够大的惯性力使其克服粘附力,但如果加

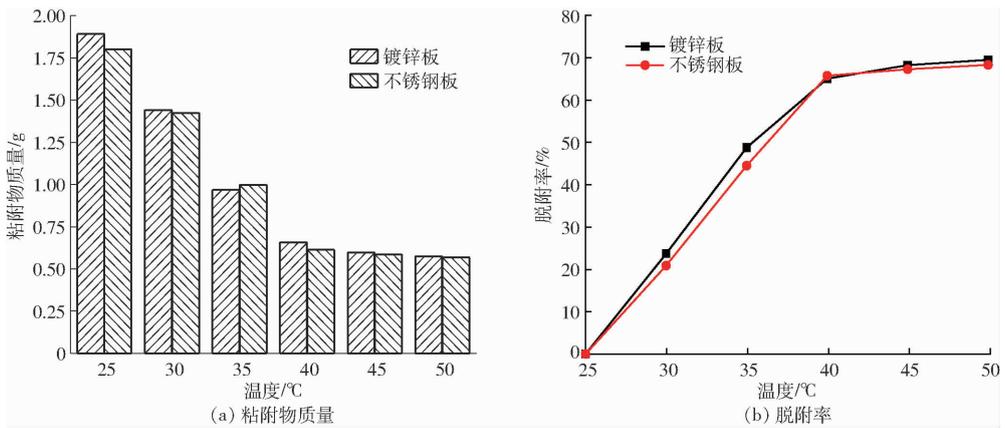


图 17 振频为 6 Hz、振幅为 40 mm 时,随着温度升高两种金属抖动板上粘附物质量及脱附率变化情况

Fig. 17 Change of adhesion weight and anti-adhesion rate on two metal jitter plates with increase of temperature when vibration frequency was 6 Hz and amplitude was 40 mm

热温度较低,即便界面粘附力降低,也不足以帮助湿黏水稻物料脱附。

由图 16a 分析可知,随着温度升高,镀锌板和不锈钢板两种金属板上粘附物质量逐渐减少,二者指标变化较为相似,在 25 ~ 30℃ 区间内,随着温度升高,粘附物质量变化较小,在 30 ~ 50℃ 区间内,随着温度升高,粘附物质量快速减少,变化明显。由图 16b 分析可知,随温度升高,金属抖动板脱附率逐渐升高,在 25 ~ 30℃ 区间内,金属抖动板脱附率升高缓慢,温度为 30℃ 时,脱附率不超过 10%,当温度大于 30℃ 时,脱附率快速升高,温度为 40℃ 时,脱附率已超过 40%,温度为 50℃ 时,脱附率超过 60%。

根据以上分析表明,在中等振动强度下,镀锌板和不锈钢板两种材质抖动板温度低于 30℃ 时,加热减粘脱附作用不显著,温度超过 30℃ 时,金属抖动板温度越高,减粘脱附特性越强,脱附效果显著,与较低振动强度下脱附效果相比,中等振动强度下,试验部件脱附速率更快,相同温度下脱附率更高。

由图 17a 分析可知,在较高振动强度工况下,随着温度升高,镀锌板和不锈钢板上粘附物质量整体呈现减少趋势,二者没有明显区别,在 25 ~ 40℃ 区间内,随着温度升高,粘附物质量快速降低,在 40 ~ 50℃ 区间内,随着温度升高,粘附物质量变化较小,减速缓慢。由图 17b 可知,随着温度升高,脱附率整体呈现升高趋势,在 25 ~ 40℃ 区间内,随着温度升高,金属抖动板加热脱附率快速升高,温度为 30℃ 时,脱附率超过了 20%,温度为 40℃ 时,脱附率达到了 65%,金属抖动板加热减粘脱附效果显著,在 40 ~ 50℃ 区间内,随着温度升高,金属抖动板加热脱附率增长缓慢,温度为 50℃ 时,脱附率接近 70%。

根据以上分析表明,在较高振动强度条件下,金属抖动板通过低温加热可以实现快速减粘脱附,在 25 ~ 40℃ 区间内,脱附率快速增长,加热温度超过

40℃ 时,脱附率已经接近峰值,脱附率超过 65%,金属抖动板减粘特性保持稳定。由于振动强度高,惯性力大,即便加热温度不高,在一定程度上也能降低金属抖动板与湿黏水稻物料的界面粘附力,相比于较低、中等强度振动加热脱附效果,较高振动强度脱附速度更快,脱附率更高,实际清选作业过程中,抖动板加热受到能耗等因素限制,采用较低温加热、较高强度振动的方案的可行性更高,因此,抖动板采用 40℃ 加热,设定振频 6 Hz、振幅 40 mm 的作业参数,能够很好地实现减粘脱附。

3.3 验证试验

加载和振动加热脱附试验结果充分表明,金属抖动板通过加热可以有效抑制湿黏水稻物料粘附在其表面,加热减粘脱附效果显著,水稻抖动抛送过程中脱出物易在抖动板上产生粘附,本质上就是湿黏物料与金属部件的粘附问题,因此,加热为实现水稻收获机械抖动板减粘脱附提供了新方案。

考虑到利用硅橡胶加热片对抖动板进行加热在实际生产中可行性不大,选择合适的加热方式非常重要,为保证加热效果,同时根据抖动板的位置及结构特点,利用热气流对金属抖动板进行加热在实际生产中可行性较高,由于水稻联合收获机作业时,柴油发动机会产生大量的余热,发动机余热回收利用技术较为成熟,在粮食干燥等方面应用较多,发动机余热利用为抖动板加热提供了技术保障^[23-24]。在前文试验的基础上,以热气流为热源,开展验证试验,试验方案如图 18 所示,以直线振动试验台架为基础,将小型热风泵的管道出风口固定在振动架的前端,气流出口在振动架后端,振动架内形成相对密闭的环境,将热敏风速仪的探头固定在振动架内,用来测试管道出风口处的风速和温度。

验证试验按照下述方案进行:振动架作业参数设定为振频 4 Hz、振幅 20 mm,试验共包括 3 组,常



图18 热气流加热试验方案

Fig. 18 Hot gas flow heating test scheme

1. 金属抖动板 2. 振动架 3. 管道 4. 电机 5. 热风泵 6. 热敏风速仪

温下抖动金属板粘附情况作为对照组,另外两组为抖动金属板加热脱附试验,加热温度为30、35℃,加热时,开启小型热风泵,利用热敏风速仪测定风温,由于存在热量散失,设定风温比抖动金属板的预加热温度高一些,经过充分预热之后,在金属板上选取多个测量点,利用红外线测温仪测定金属板加热均匀,确认满足试验条件后,称取100 g湿黏水稻物料,均匀铺放在抖动金属板上,开启电机,振动持续30 s,结束后统计试验指标,每组试验重复5次,取平均值,验证试验结果如表1所示。

表1 验证试验结果

Tab. 1 Verification test results

试验 部件	常温 25℃		加热 30℃		加热 35℃	
	粘附物	脱附	粘附物	脱附	粘附物	脱附
	质量/g	率/%	质量/g	率/%	质量/g	率/%
镀锌板	3.105	0	2.657	14.43	2.123	31.63
不锈钢板	3.079	0	2.542	17.44	2.076	32.58

由表1分析可知,验证试验结果与图16中结果基本吻合,随着温度升高,抖动金属板减粘脱附性能逐渐增强,利用热气流加热抖动金属板同样可以有效地抑制湿黏水稻物料粘附在其表面,因此,热气流加热是实现水稻收获机械抖动板与湿黏物料减粘脱附的有效方式。

4 结论

(1) 构建了湿黏水稻物料与金属抖动板表面的粘附界面模型,分析得出水膜的毛细作用是形成粘附界面的重要原因,揭示了金属抖动板表面加热对粘附界面的脱附作用机理。

(2) 通过加载加热脱附试验,得到两种金属抖动板脱附率曲线模型,粘附界面加热可以有效抑制湿黏水稻物料粘附在金属抖动板表面,金属抖动板温度越高,抗粘特性越强,当温度为50℃时,镀锌板和不锈钢板的脱附率分别为61.81%和61.33%。

(3) 金属抖动板的振动强度影响加热脱附效果,较高振动强度脱附速度更快,脱附率更高,综合考虑加热能耗等因素,采用较低温加热、较高强度振动的脱附方案。试验表明,抖动板采用40℃加热,设定振频6 Hz、振幅40 mm的作业参数,脱附率超过65%,满足实际作业要求。

(4) 利用热气流加热两种金属抖动板,同样可以有效地抑制湿黏水稻物料的粘附,热气流加热是实现水稻收获机械抖动板与湿黏物料减粘脱附的有效方式。

参 考 文 献

- [1] 任露泉,刘朝宗,佟金,等. 土壤粘附系统中粘土颗粒群的粘附特性[J]. 农业机械学报,1997,28(4):2-5.
REN Luquan, LIU Chaozong, TONG Jin, et al. Adhesive behavior of soil particle aggregates in the soil adhesion system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(4): 2-5. (in Chinese)
- [2] 任露泉,刘朝宗,佟金,等. 土壤粘附系统中粘土颗粒群的内聚特性[J]. 农业机械学报,1997,28(增刊):5-8.
REN Luquan, LIU Chaozong, TONG Jin, et al. Cohesive behavior of soil particle aggregates in the soil adhesion system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(Supp.): 5-8. (in Chinese)
- [3] 李建桥,蒋蔓,李月潭. 钢铁的表面电位及其土壤粘附特性[J]. 农业工程学报,1997,13(2):48-51.
LI Jianqiao, JIANG Man, LI Yuetan. Study on surface characteristics of materials of plough mouldboard and their effects on soil adhesion[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(2): 48-51. (in Chinese)
- [4] 丛茜,任露泉,陈秉聪. 土壤粘附规律的化学吸附分析[J]. 农业工程学报,1996,12(3):20-24.
CONG Qian, REN Luquan, CHEN Bingcong. Study on soil adhesion phenomena by chemical adsorption[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3): 20-24. (in Chinese)
- [5] 刘宏俊,赵淑红,谭贺文,等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):86-92.
LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, TAN Hewen, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 86-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.010. (in Chinese)
- [6] 付乾坤,付君,陈志,等. 秸秆捡拾打捆机振动去土作业参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(8):26-33.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization of working parameters on soil removal of stover pickup baler by vibration

- [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 26-33. (in Chinese)
- [7] 朱恒福, 谈黎虹, 吴士渐. “彗星式通孔”减阻犁的试验研究[J]. 农业机械学报, 1992, 23(4): 20-24.
ZHU Hengfu, TAN Lihong, WU Shisi. An experimental study on the “comet type passage-holes plough of reducing resistance” [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1992, 23(4): 20-24. (in Chinese)
- [8] 贾贤, 任露泉, 陈秉聪. PA41010 和 EP1 复合涂层及其表面改性犁壁的减粘降阻性能[J]. 农业机械学报, 1996, 27(3): 8-12.
JIA Xian, REN Luquan, CHEN Bingcong. The functions of reducing adhesion and resistance of PA41010, EP1 composite coatings and surface improved mouldboards [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(3): 8-12. (in Chinese)
- [9] 李建桥, 任露泉, 陈秉聪, 等. 犁壁材料表面特性与土壤粘附间的关系[J]. 农业工程学报, 1996, 12(2): 49-52.
LI Jianqiao, REN Luquan, CHEN Bingcong, et al. Study on surface characteristics of materials of plough mouldboard and their effects on soil adhesion [J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2): 49-52. (in Chinese)
- [10] 陈秉聪, 任露泉, 徐晓波, 等. 典型土壤动物体表形态减粘脱土的初步研究[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 2-6.
CHEN Bingcong, REN Luquan, XU Xiaobo, et al. Initial research on reducing soil adhesion of body surface shapes of the typical soil animals [J]. Transactions of the CSAE, 1990, 6(2): 2-6. (in Chinese)
- [11] 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪, 等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析[J]. 农业机械学报, 1990, 21(2): 44-49.
REN Luquan, XU Xiaobo, CHEN Bingcong, et al. Initial research on claw shapes of the typical soil animals [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(2): 44-49. (in Chinese)
- [12] 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): 15-21.
REN Luquan, CHEN Dexing, HU Jianguo. Initial analysis on the law of reducing adhesion of soils animals [J]. Transactions of the CSAE, 1990, 6(1): 15-21. (in Chinese)
- [13] 邓石桥. 仿生犁壁的减粘机理及其仿生设计[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
DENG Shiqiao. The mechanism of reducing soil adhesion and the design of bionic plow [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [14] SONI P, SALOKHE V M, NAKASHIMA H. Modification of a mouldboard plough surface using arrays of polyethylene protuberances [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(6): 411-422.
- [15] DENG Shiqiao, REN Luquan, LIU Yan, et al. Tangent resistance of soil on moldboard and the mechanism of resistance reduction of bionic moldboard [J]. Journal of Bionic Engineering, 2005, 2(1): 33-46.
- [16] 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展[J]. 中国科学(技术科学), 2008, 38(9): 1353-1364.
REN Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2008, 38(9): 1353-1364. (in Chinese)
- [17] 杜卫刚. 仿生开沟器设计及其试验分析[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
DU Weigang. Design and experimental analysis of bionic furrowing opener [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [18] 李耀明, 马征, 徐立章. 油菜混合物与仿生筛面基体间的粘附特性[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 75-78.
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Adhesion property between rape mixture and bionic screen matrix [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 75-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120216&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.016. (in Chinese)
- [19] 傅美贞, 陈德俊. 联合收获机不粘水振动清选筛: 202941176U [P]. 2013-05-22.
- [20] 任露泉. 土壤粘附力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [21] GB/T 5262—2008 农业机械试验条件、测定方法的一般规定[S]. 2008.
- [22] 温诗铸, 黄平. 界面科学与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [23] 匡鹏. 联合收割机中排气余热联合远红外稻谷干燥装置的研发[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
KUANG Peng. Research and development of exhaust heat assisted far IR rice drying equipment in combine harvester [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] 吉林大学. 一种可自动控制的收割机柴油机余热回收装置: 109458269A [P]. 2019-03-12.