

# 裸燕麦籽粒剪切特性研究\*

邱述金<sup>1</sup>, 李霖霖<sup>1</sup>, 崔清亮<sup>1</sup>, 杨作梅<sup>2</sup>, 冯禹<sup>1</sup>, 郭玉明<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学农业工程学院, 山西太谷, 030801;

2. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原市, 030024)

**摘要:**为降低裸燕麦籽粒在播种、收获、储运及加工等过程中的机械损伤,研究裸燕麦籽粒的剪切破坏力学特性。试验选取广泛种植于山西的晋燕 18 号为研究对象,以含水率、剪切速度、剪切方向为试验因素,研究各因素对剪切破坏力、剪切破坏能等试验指标的影响规律。结果表明:含水率和剪切方向对裸燕麦籽粒的剪切破坏力、剪切破坏能影响均极显著。在含水率 12.04%~22.56% 范围内,裸燕麦籽粒的剪切破坏力与剪切破坏能均呈现出随含水率的提高而降低的趋势。裸燕麦籽粒腹沟侧向时,剪切破坏力最大,为 18.86 N;腹沟向上时,剪切破坏力最小,为 14.44 N。剪切速度对剪切破坏力影响不显著,剪切速度对剪切破坏能影响显著,随剪切速度的增加,裸燕麦籽粒的剪切破坏能增大。本研究为裸燕麦机械化作业装备的设计研发提供理论参考。

**关键词:**燕麦籽粒;剪切破坏力;剪切破坏能;含水率;剪切方向

**中图分类号:**S512.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2021) 06-0067-05

邱述金, 李霖霖, 崔清亮, 杨作梅, 冯禹, 郭玉明. 裸燕麦籽粒剪切特性研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 67-71  
Qiu Shujin, Li Linlin, Cui Qingliang, Yang Zuomei, Feng Yu, Guo Yuming. Research of shearing characteristics of bare oat grains [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 67-71

## 0 引言

燕麦俗称莜麦,属禾本科燕麦属,是一年生草本作物。裸燕麦籽粒纤细瘦长,有腹沟,叶鞘光滑或背有微毛,形状多呈筒形、纺锤形。皮燕麦籽粒带壳,大多数饲用。裸燕麦籽粒不带壳,是我国主要种植的品种,食用价值很高。裸燕麦的生长周期短,具有极强的抗旱、耐寒、耐脊的特性,并且具有很高的营养价值和药用价值,越来越受到广大消费者的喜爱,市场的需求量很大<sup>[1]</sup>。山西省的裸燕麦种植主要分布在晋西北,面积有 170 km<sup>2</sup>,年产量 15 万 t 左右,占据全国产量的 10%<sup>[2]</sup>。国外燕麦品种以皮燕麦为主,收获方式多以更换割台、调节运动参数等机械化手段进行。国内燕麦种植以裸燕麦为主,利用谷物联合收获机工作时籽粒破碎严重,籽粒损伤率大,因而主要以人工、半人工收获为主。从 20 世纪中期开始,国内外学者对玉米<sup>[3]</sup>、大豆<sup>[4]</sup>、小麦<sup>[5]</sup>和稻谷<sup>[6]</sup>等大籽粒谷物的力学特性进行研究<sup>[7-9]</sup>,关于裸燕麦籽粒的研究也随之开始。Anazodo 等<sup>[10]</sup>在标准压缩和弯曲模式下测试玉米籽

粒的物理力学特性,发现玉米种子和收获期对籽粒的力学特性有显著影响;Lu 等<sup>[11]</sup>通过压缩和三点弯曲试验研究了稻米精米产量与籽粒力学特性的关联性;Verma 等<sup>[12]</sup>研究了玉米的热力学特性,发现玉米籽粒破裂力、破裂能和破碎变形与含水率有关;Chenarbon 等<sup>[13]</sup>对不同含水率的 3 种玉米籽粒分别施加冲击载荷,发现玉米籽粒的品种和含水率对其破损率有较大影响;杨作梅等<sup>[14]</sup>利用物性分析仪和赫兹接触理论发现了谷子的破坏力随含水率升高而降低的规律;李春娣等<sup>[15]</sup>通过质构仪研究了大豆籽粒的压缩力学特性,发现了破坏力、破坏能、弹性模量、破坏应力、破坏应变与含水量之间的关系,并建立了各项参数与含水率之间的关系模型;耿令新等<sup>[16]</sup>设计一种燕麦籽粒揉搓式除杂装置,具有脱净率高、损失率低、损伤小的优点;赵楠等<sup>[17]</sup>综述了燕麦籽粒的粘弹性研究和机械破碎力学研究进展,指出燕麦籽粒的机械力学参数包括破坏力、破坏能、变形量和强度等;张泽璞等<sup>[18]</sup>对裸燕麦籽粒的压缩力学性能以及破裂生成规律进行了研究。目前针对玉米、大豆、小麦和稻谷等谷粒的力学特性研究

收稿日期:2020 年 8 月 21 日 修回日期:2021 年 5 月 14 日

\* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0701801);山西省高等学校科技创新项目(2019L0384)

第一作者:邱述金,男,1988 年生,山东昌邑人,博士,副教授;研究方向为农业物料机械特性与农业机械化装备。E-mail: sxauqsj@sina.com

通讯作者:崔清亮,男,1968 年生,山西繁峙人,博士,教授;研究方向为农业物料机械特性与农业机械化装备。E-mail: qlcui@126.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

已经取得了较多成果,但针对裸燕麦籽粒的剪切特性研究还尚未报道。本文研究含水率、剪切方向、剪切速度对裸燕麦籽粒剪切破坏力学特性的影响规律,为燕麦机械化生产提供理论支持。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验样品采用广泛种植于山西的晋燕 18 号,产地为山西农业大学试验田。试验时选取颗粒饱满、表面无损伤、没有霉变的裸燕麦籽粒作为试验样本。试验前测得裸燕麦籽粒的初始含水率为 11.33%(湿基,下同),在大量文献中表明含水率是影响谷物籽粒相关力学特性的重要因素<sup>[19]</sup>。为了探究不同含水率对裸燕麦籽粒剪切破坏力学特性的影响,需提前进行含水率配制的准备工作。参考文献[20]的方法制备 5 种不同含水率的裸燕麦籽粒作为试验样本。为了获得不同含水率的裸燕麦籽粒样本,先通过电子天平分别称取 5 份 500 g 初始含水率的裸燕麦籽粒,将其放置于干燥、密封良好的玻璃罐中,再通过式(1),计算得到所需加入去离子水的质量,以此来配制不同含水率的样本。

$$M = m \frac{(H_2 - H_1)}{(1 - H_2)} \quad (1)$$

式中:  $M$ ——需要加入去离子水的质量, g;

$m$ ——试验样本的质量, g;

$H_1$ ——试验样本的初始湿基含水率, %;

$H_2$ ——需要配制获得的目标样本的湿基含水率, %。

需要注意的是,若所需目标样本的含水率较高(如大于 16%)时,需要以分多次、每次少量的方式来加入去离子水,目的是为了能够获得准确的目标试验样本,提高试验的可靠性。在加入水的过程中,要控制玻璃棒搅拌与喷水二者同步进行,且所有样品在此过程中需每隔 3~4 h 搅动一次,使水分能够均匀吸收。1 d 后,将配置得到的不同含水率的试验样本装入密封塑料袋中密封以保持含水率的稳定,再置于 2℃ 冰箱内冷藏 3 d 以上,让其吸水均匀,期间每天摇动 3~5 次。在进行试验前,需提前将试验样本从冰箱中取出,在常温下静置 0.5 h 左右,使其恢复至室温 20℃,再利用水分容重仪测定试验样本的实际含水率,作为所配置样本的最终含水率。每个样本分别测定 5 次,取配制样本的含水率分别为 12.04%、13.64%、17.02%、20.73%、22.56%。

主要试验设备有:美国 Fowler 数显式游标卡尺,测量范围 0~150 mm,测量精度 0.01 mm;TA.XT.Plus 物性分析仪,测试速度范围 0.01~40 mm/s,测试

距离精度 0.001 mm,测试力量精度 0.000 2%;电子天平 MP2002,量程 300 g,精度 0.01 g。

### 1.2 试验设计

裸燕麦籽粒在收获、运输和加工过程中含水率存在差异,在不同剪切载荷的作用下,产生的破碎损伤程度也各不相同,研究裸燕麦籽粒的剪切破坏力学特性具有重要意义。

在研究裸燕麦籽粒不同含水率的剪切特性试验时,控制裸燕麦籽粒的剪切速度为 0.12 mm/s、剪切方向为腹沟向下不变,选取含水率 12.04%、13.64%、17.02%、20.73%、22.56% 为试验因素进行试验;在研究裸燕麦籽粒不同剪切方向的剪切特性试验时,控制裸燕麦籽粒的含水率为 22.56%、剪切速度为 0.12 mm/s 不变,选取剪切方向腹沟侧向、腹沟正向、轴线方向为试验因素进行试验;在研究裸燕麦籽粒不同剪切速度的剪切特性试验时,控制裸燕麦籽粒的含水率为 22.56%、剪切方向为腹沟向下不变,选取剪切速度 0.02 mm/s、0.04 mm/s、0.08 mm/s、0.12 mm/s 为试验因素进行试验;以剪切破坏力和剪切破坏能为评价指标,研究各因素对评价指标的影响规律。

采用厚度为 3 mm 的刚性平板作为加载装置(图 1),在物性分析仪编写裸燕麦籽粒剪切程序,底座配合刚性平板中心间隙也为 3 mm。剪切速度根据试验要求进行设定,触发力为 0.098 N,试验前将物性分析仪预热 15 min。试验样品提前取出,置于室内半个小时左右,恢复至室温。从密封袋取出一粒无伤无损的籽粒,迅速将密封袋密封,避免籽粒的含水率发生变化。先用游标卡尺测定裸燕麦籽粒的三轴尺寸:长( $L$ )、宽( $W$ )、高( $H$ ),试验时将裸燕麦籽粒根据试验要求放在底座平台上,同时保证裸燕麦籽粒中心与间隙中心保持一致,运行裸燕麦籽粒剪切试验程序,观察力一位移曲线变化,出现载荷有较大突变时,立即停止加载。每个处理重复 20 次。

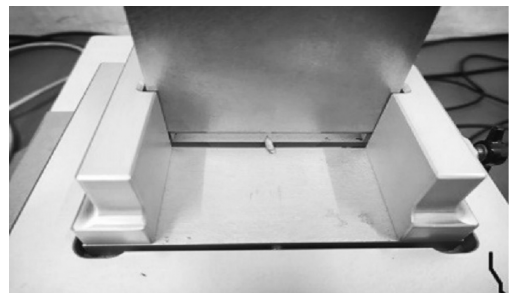


图 1 加载装置

Fig. 1 Loading device

### 1.3 评价方法

燕麦籽粒在剪切变形过程中具有明显的生物屈服点<sup>[21]</sup>,如图 2 所示。当所加载荷未达到屈服点时,

这一阶段力与变形量近似成线性关系。屈服点又称为应变软化点,通常认为,当所加载荷达到此点时,则会引起物料微观结构的破坏,当所加载荷小于屈服点时,载荷不会带来明显的伤害。故将屈服点所对应的力的大小定为裸燕麦籽粒的最大剪切破坏力  $F$ ,即籽粒在剪切变形过程中力—位移曲线上的第一个峰值。而最大剪切破坏力以前的曲线与横坐标轴所围成的面积(图 2 中阴影区域)为对应的破坏能,也叫剪切破坏能  $W$ ,即籽粒在剪切变形过程中力—位移曲线上第一个峰值点与横坐标轴所围成的面积。此后随着载荷的增加,裸燕麦籽粒发生局部组织破坏,进入塑性区。最后随着载荷的增加,达到最大峰值点,即图 2 所示破裂点,此时物料在所加载荷的作用下发生宏观结构的破坏。剪切破坏能采用式(2)进行计算。

$$W = \int_0^{D_F} FdD$$

(2)

式中： $D$ ——试验曲线第一峰值点横坐标的数值。

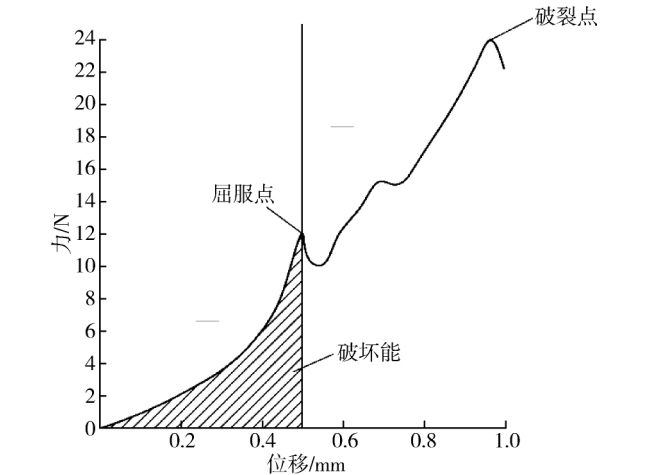


图 2 燕麦剪切破坏力—位移曲线(晋燕 18 号)  
Fig. 2 Shear force-distance curve of oat (Jinyan-18)

1.4 数据处理

利用统计分析软件 SAS<sup>[22]</sup> 进行数据处理,分别对含水率、剪切方向和剪切速度进行了方差分析,获得了各因素对剪切破坏力和剪切破坏能的影响规律。

2 结果与分析

2.1 含水率对剪切破坏力学特性影响

不同含水率裸燕麦籽粒剪切试验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,裸燕麦籽粒的剪切破坏力随含水率的增加,呈现出下降的趋势,由 23.97 N(含水率 12.04%)下降到 14.63 N(含水率 22.56%);剪切破坏能随含水率的增加,也呈下降趋势,由 15.58 J(含水率 12.04%)下降到 9.40 J(含水率 22.56%)。

表 1 不同含水率裸燕麦籽粒剪切试验结果  
Tab. 1 Results of shear experiment of naked oats with different moisture content

含水率/%	剪切破坏力 $F$ /N	剪切破坏能 $W$ /J
12.04	23.97	15.58
13.64	21.99	13.98
17.02	20.56	13.53
20.73	15.66	10.27
22.56	14.63	9.40

对试验结果进行方差分析,结果如表 2 所示。

表 2 不同含水率裸燕麦籽粒剪切特性方差分析  
Tab. 2 Analysis of variance of shear characteristics of naked oats with different moisture content

剪切特性	方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
剪切破坏力	模型	63.99	1	63.99	113.96	0.001 8
	误差	1.684 5	3	0.561 5	$R^2=0.974 3$	
剪切破坏能	模型	26.09	1	26.09	64.29	0.004 1
	误差	1.217 5	3	0.405 8	$R^2=0.955 4$	

从表 2 可以看出,含水率对裸燕麦籽粒剪切破坏力方差分析显著性  $P$  值 $<0.005$ ,决定系数  $R^2=0.974 3$ 。根据统计学显著性检验方法所得到的  $P$  值,一般以  $P<0.05$  为有显著统计学差异。决定系数  $R^2$  的大小决定了变量间相关的密切程度。 $R^2$  越大,自变量对因变量的解释程度越高,自变量引起的变动占总变动的百分比越高。故含水率对裸燕麦籽粒剪切破坏力方差分析模型是显著的。同理,含水率对裸燕麦籽粒剪切破坏能方差分析模型显著,显著性  $P$  值 $<0.005$ ,决定系数  $R^2=0.955 4$ 。

采用一元线性回归分析,拟合曲线方程及检验结果如表 3 所示。

表 3 含水率对裸燕麦籽粒剪切特性的回归模型

剪切特性	回归模型	$P$	$R^2$
剪切破坏力	$F = -0.891 4X + 34.692 9$	0.001 8	0.974 3
剪切破坏能	$W = -0.569 2X + 22.341 4$	0.004 1	0.955 4

注： $F$  为剪切破坏力； $W$  为剪切破坏能； $X$  为含水率。

从表 3 可以看出,回归模型的  $P$  值 $<0.005$ ,决定系数  $R^2$  分别达到了 0.974 3 和 0.955 4,说明一元线性回归显著且拟合精度较高。在含水率 12.04%~22.56% 范围内,裸燕麦籽粒的剪切破坏力与剪切破坏能均呈现出随含水率的提高而降低的趋势。

2.2 剪切方向对剪切破坏力学特性的影响

不同剪切方向裸燕麦籽粒剪切试验结果如表 4 所

示。从表 4 可以看出,裸燕麦籽粒腹沟侧向时,剪切破坏力最大,为 18.86 N;腹沟向上时,剪切破坏力最小,为 14.44 N。

表 4 不同剪切方向下裸燕麦籽粒剪切试验结果

Tab. 4 Results of grain shearing experiment of naked oats at different shear directions

剪切方向	剪切破坏力 $F/N$	剪切破坏能 $W/J$
腹沟侧向	18.86	19.15
腹沟向上	14.44	9.30
腹沟向下	15.63	10.40

对试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示。

表 5 裸燕麦籽粒剪切方向方差分析

Tab. 5 Variance analysis of grain shear characteristics of naked oats at shear directions

剪切特性	方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
剪切破坏力	模型	37.06	2	18.53	1 608.00	$<0.000 1$
	误差	0.069 1	6	0.011 5	$R^2=0.998 1$	
剪切破坏能	模型	26.09	2	26.09	64.29	0.004 1
	误差	1.217 5	6	0.405 8	$R^2=0.955 4$	

由表 5 可以看出,剪切方向对裸燕麦籽粒剪切破坏力方差分析模型是极显著的,显著性  $P$  值 $<0.001$ ,决定性系数  $R^2=0.998 1$ ;剪切方向对裸燕麦籽粒剪切破坏能方差分析模型显著,显著性  $P$  值 $<0.005$ ,决定系数  $R^2=0.955 4$ 。

### 2.3 剪切速度对剪切破坏力学特性的影响

不同剪切速度裸燕麦籽粒剪切试验结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,随剪切速度的增加,裸燕麦籽粒的剪切破坏力变化不显著,剪切破坏力处于 14.53~15.69 N 之间;剪切破坏能随剪切速度的增加,呈现出增大趋势,由 9.40 J 增加到 13.01 J。

表 6 不同剪切速度下裸燕麦籽粒剪切试验结果

Tab. 6 Results of grain shearing experiment of naked oats under different velocity

剪切速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	剪切破坏力 $F/N$	剪切破坏能 $W/J$
0.02	14.63	9.40
0.04	15.69	9.76
0.08	14.53	11.00
0.12	14.87	13.01

对试验结果进行方差分析,结果如表 7 所示。由表 7 可以看出,剪切速度在试验速度范围内对剪切破坏力的影响显著性  $P$  值 $>0.05$ ,可认为统计学差异不显著,即在 0.02~0.12 mm/s 范围内,剪切速度对裸燕麦籽粒的剪切破坏力影响不显著,决定性系数  $R^2$  为 0.044 7。剪切速度对裸燕麦籽粒剪切破坏能的影响

显著,显著性  $P$  值 $<0.05$ ,决定系数  $R^2$  为 0.970 4,随剪切速度的增加,裸燕麦籽粒的剪切破坏能增大。

表 7 裸燕麦籽粒剪切速度方差分析

Tab. 7 Variance analysis of grain shear characteristics of naked oats at loading speed

剪切特性	方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
剪切破坏力	模型	0.037 1	1	0.037 1	0.09	0.788 7
	误差	0.794 1	2	0.397 0	$R^2=0.044 7$	
剪切破坏能	模型	7.729 4	1	7.729 4	65.49	0.014 9
	误差	0.236 1	2	0.118 0	$R^2=0.970 4$	

## 3 结论

对裸燕麦籽粒进行了不同含水率、不同剪切速度和不同剪切方向的剪切破坏力学特性试验,获得了各因素对剪切破坏力、剪切破坏能的影响规律,并建立了含水率对剪切特性影响的力学模型,为裸燕麦籽粒的机械化播种、收获、运输及加工以及农业装备的设计与开发提供理论参考。

1) 含水率对剪切破坏力、剪切破坏能的影响显著,含水率为 12.04%~22.56% 的裸燕麦籽粒,随着含水率的增加,剪切破坏力与剪切破坏能均呈现出减小的趋势。

2) 剪切方向对剪切破坏力、剪切破坏能的影响显著,裸燕麦籽粒腹沟侧向时,剪切破坏力最大,为 18.86 N;腹沟向上时,剪切破坏力最小,为 14.44 N。

3) 剪切速度对剪切破坏力影响不显著,剪切速度对剪切破坏能影响显著,随剪切速度的增加,裸燕麦籽粒的剪切破坏能增大。

## 参 考 文 献

- [1] 刘坤. 山西特色杂粮莜麦的药用保健价值与发展前景[J]. 小麦研究, 2008, 29(2): 28—36.
- [2] 胡霞. 山西特色杂粮莜麦的特性与高产栽培技术研究[J]. 山西科技, 2017, 32(6): 45—46, 57.
- [3] 吴宝鑫. 冻玉米籽粒物理力学特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [4] 吕凤妍. 大豆籽粒物理力学性质测试分析及建模方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] 魏丽娟, 韩正晟, 戴飞, 等. 育种小麦籽粒力学特性的有限元分析[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(3): 378—382.
- [6] 张洪霞, 孙伟, 黄燕, 等. 加载速度对稻米籽粒挤压力学特性影响的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(5): 35—37.
- [7] 康艳, 金诚谦, 陈艳普, 等. 谷物籽粒损伤研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 94—104.

Kang Yan, Jin Chengqian, Chen Yanpu, et al. Research



- status of grain damage in cereals [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 94–104.
- [8] 孙静鑫, 司海涛, 李晓斌, 等. 杂粮籽粒恢复系数测定试验与分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(6): 88–93.  
Sun, Jingxin, Si Haitao, Li, Xiaobin, et al. Measurement test and analysis on the restitution coefficient of the coarse cereals grain [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 88–93.
- [9] 崔中凯, 张华, 周进, 等. 智能玉米籽粒联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 26–30.  
Cui Zhongkai, Zhang Hua, Zhou Jin, et al. Design and experiment of intelligent corn grain harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 26–30.
- [10] Anazodo U G N, Wall G L, Norris E R. Corn physical and mechanical properties as related to combine cylinder performance [J]. Canadian Agricultural Engineering, 1981, 23(1): 23–30.
- [11] Lu R, Siebenmorgen T J. Correlation of head rice yield to selected physical and mechanical properties of rice kernels [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1995, 38(3): 889–894.
- [12] Verma R C, Suresh P. Mechanical and thermal properties of maize [J]. Journal of Food Science and Technology, 2000, 37(5): 500–5005.
- [13] Chenarbon H A, Salokhe V M, Jayasuriya H, et al. Effects of impact loading on mechanical properties of corn kernel [C]. International Agricultural Engineering Conference, 2007.
- [14] 杨作梅, 孙静鑫, 郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 253–260.  
Yang Zuomei, Sun Jingxin, Guo Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 253–260.
- [15] 李春娣, 郝润霞, 冯家畅. 大豆籽粒力学特性的实验与研究[J]. 粮食储藏, 2015, 44(6): 15–21.
- [16] 耿令新, 孙成龙, 左杰文, 等. 燕麦籽粒揉搓式除杂装置设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 38–47.  
Geng Lingxin, Sun Chenglong, Zuo Jiewen, et al. Design on oat-grains purification device with rubbing roller [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 38–47.
- [17] 赵楠, 李博文. 燕麦籽粒机械力学特性的研究[J]. 中国农业信息, 2017(4): 54–56.
- [18] 张泽璞, 陶桂香, 衣淑娟, 等. 裸燕麦籽粒压缩力学性能试验及破裂生成规律分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(3): 371–377.
- [19] 张克平, 贾娟娟, 吴劲锋. 谷物力学特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 369–374.
- [20] 孙静鑫, 郭玉明, 杨作梅, 等. 荞麦籽粒生物力学性质及内芯黏弹性试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 287–298.  
Sun Jingxin, Guo Yuming, Yang Zuomei, et al. Experimental study on biomechanical properties of buckwheat grain and viscoelastic properties of buckwheat powder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 287–298.
- [21] Compression test of food materials of convex shape [R]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008.
- [22] 王玉顺, 武志明, 李晓斌, 等. 试验设计与统计分析 SAS 实践教程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.

## Research of shearing characteristics of bare oat grains

Qiu Shujin<sup>1</sup>, Li Linlin<sup>1</sup>, Cui Qingliang<sup>1</sup>, Yang Zuomei<sup>2</sup>, Feng Yu<sup>1</sup>, Guo Yuming<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu, 030801, China; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China)

**Abstract:** In order to reduce the mechanical damage of naked oat grains during sowing, harvesting, storage, transportation, and processing, the mechanical properties of naked oat grains were studied. The experiment selected Jinyan No. 18, which is widely planted in Shanxi Province, as the research object and took water content, shear rate, and shear direction as the test factors to study the influence law of each factor on the test indexes such as shear force and shear failure energy. The results showed that water content and loading direction had significant effects on the shear force and shear energy of bare oat grains. In the range of 12.04%~22.56% moisture content, the shear force and shear energy of naked oat grains showed a decreasing trend with the increase in moisture content. When naked oats grain is turned sideways, the shear failure force is the largest, 18.86 N; when the grain is upward, the shear failure force is the smallest, 14.44 N. The shear rate has no significant effect on the shear force, and the shear rate has a significant effect on the shear energy. With the increase of the shear rate, the shear failure energy of naked oat grains increases. This study provides a theoretical reference for the design and development of mechanized equipment for naked oat.

**Keywords:** oat grains; shear force; shear energy; water content; shear direction