



王军, 张宏文, 王磊, 等. 机采籽棉压缩特性及可压缩性研究[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(1): 212–221.

WANG J, ZHANG H W, WANG L, et al. Study on compression characteristics and compressibility of machine-harvested seed cotton [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(1): 212–221.

机采籽棉压缩特性及可压缩性研究

王 军^{1,2}, 张宏文^{1,2*}, 王 磊^{1,2}, 魏喜梅^{1,2}, 谷艳清^{1,2}, 张龙唱^{1,2}, 蔡云霄^{1,2}

(1. 石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要:【目的】棉花是重要的纺织原料, 机械化采收后的籽棉面临运储工序复杂、成本大。因此, 机采籽棉常被压缩成一定形状、密度与尺寸, 便于运储。为揭示机采籽棉压缩成型机理, 获取机采籽棉压缩成型有关数据, 开展机采籽棉压缩特性及可压缩性研究。【方法】以新疆石河子地区主栽机采棉品种惠远 720 为研究对象, 对不同初始条件的机采籽棉进行单轴闭式压缩试验, 分析压缩过程中各因素对机采籽棉压缩力与体积模量的影响规律。【结果】机采籽棉压缩过程中压力、体积模量与压缩密度可由幂函数($P < 0.01$, $R^2 > 0.988$)和指数函数表示($P < 0.01$, $R^2 > 0.958$), 随压缩密度的增大, 压力、体积模量不断增大, 机采籽棉可压缩性逐渐变差。当机采籽棉达到相同压缩密度时, 压缩速度、初始密度、含水率、含杂率与机采籽棉压缩过程中压力、体积模量均显著相关($P < 0.01$); 其中压缩速度、含杂率与压力、体积模量呈正相关关系, 含水率、初始密度与压力、体积模量呈负相关关系; 当压缩密度为 200 kg/m^3 时, 初始密度、含水率与压力、体积模量呈线性关系($P < 0.01$); 压缩密度大于 200 kg/m^3 时, 压力、体积模量与压缩速度、含杂率的线性关系增强($P < 0.05$); 与初始密度、含水率呈指数递减关系($P < 0.01$), 随压缩密度的增大指数关系愈加显著。【结论】通过回归拟合建立了机采籽棉压缩过程中压力、体积模量与压缩密度的数学模型, 得到了压缩速度、初始密度、含水率、含杂率对机采籽棉压缩过程中压力、体积模量均有显著影响。研究成果对机采棉收获、运输、储存及加工设备的设计具有理论研究价值和现实意义。

关键词: 机采籽棉; 可压缩性; 压缩特性; 含杂率; 含水率; 试验

中图分类号: TS112.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2022)01-0212-10

Study on Compression Characteristics and Compressibility of Machine-harvested Seed Cotton

WANG Jun^{1,2}, ZHANG Hongwen^{1,2*}, WANG Lei^{1,2}, WEI Ximei^{1,2},
GU Yanqing^{1,2}, ZHANG Longchang^{1,2}, CAI Yunxiao^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Northwest Key Laboratory of Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: [Objective] Cotton is a type of important textile material, and the machine-harvested seed cot-

收稿日期: 2021-06-03 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51605314)、新疆生产建设兵团重大科技计划项目(2018AA008)、新疆生产建设兵团重点领域创新团队建设计划项目(2019CB006)和新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2021G114)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51605314), the Corps Major Scientific and Technological Projects(2018AA008), the Corps Key Field Innovative Team Building Project(2019CB006) and the Autonomous Region Graduate Student Innovation Program(XJ2021G114)

作者简介: 王军, orcid.org/0000-0002-7315-9931, wj20192009004@163.com; *通信作者: 张宏文, 教授, 博士, 主要从事农业机械设计及机械系统仿真研究, orcid.org/0000-0001-9706-8594, zhw_mac@shzu.edu.cn。

ton faces challenges such as complicated procedures of transportation and storage with a high cost. For this reason, the machine-harvested seed cotton is often compressed with a certain shape, density and size for the convenience of transportation and storage. To reveal the mechanism of compression molding of machine-harvested seed cotton and obtain the related data, the research on the compression characteristics and compressibility of machine-harvested seed cotton was conducted. [Method] Huiyuan 720, as a type of representative machine-harvested cotton in the Shihezi area of Xinjiang was selected as the research objects. Through uniaxial closed compression experiment with different initial conditions, the effects of various factors on the compression force and bulk modulus of machine-harvested seed cotton during the compression were analysed. [Result] The experimental results showed that the relationship between pressure, bulk modulus and compression density in the compression process of machine-harvested seed cotton could be expressed by power function ($P < 0.01$, $R^2 > 0.988$) and exponential function, respectively ($P < 0.01$, $R^2 > 0.958$). The pressure and bulk modulus gradually increased with the increase of compression density, while the compressibility gradually deteriorated. Under the condition of the same compression density, the pressure and bulk modulus of machine-harvested seed cotton were significantly related to various factors ($P < 0.01$). There was a positive correlation with the compression velocity and trash content, and a negative correlation with the moisture content and initial density. When the machine-harvested seed cotton was compressed with the same compression density 200 kg/m^3 , the initial density, moisture content and pressure and bulk modulus showed a linear relationship ($P < 0.01$). When the compression density was above 200 kg/m^3 , the linear relationship between pressure, bulk modulus and compression velocity and trash content was enhanced ($P < 0.05$), and the initial density and moisture content decreased exponentially ($P < 0.01$). [Conclusion] The mathematical models of pressure, bulk modulus and compression density of machine-harvested seed cotton during compression were established by regression fitting, the compression speed, initial density, moisture content and trash content had significant effects on the pressure and bulk modulus of machine-harvested seed cotton during compression. The research results have theoretical as well as practical significance for the design of machined cotton harvesting, transportation, storage and processing equipment.

Keywords: machine-harvested seed cotton; compressibility; compression characteristics; trash content; moisture content; experiment

【研究意义】棉花是我国新疆地区重要的经济作物与纺织材料,种植面积和产量连续多年位居全国首位,随新疆棉花机采率不断提升,棉花机械化采收已成大趋势^[1-2]。机采籽棉是采棉机采收后籽棉的统称,其自然堆积密度小,属高孔隙率松散型农业纤维物料^[3]。我国采棉机整体集成化率较低,使机采籽棉需二次处理,造成储运成本大、工序繁琐。为解决上述问题,机采籽棉在储运前通常被压缩成一定形状、尺寸、密度的模块,便于运储。国外先进采棉机已将压缩成型装置同采棉机集成一体,可同时完成棉花采摘与压缩成型^[4-5],但目前针对机采籽棉压缩成型机理的研究鲜有报道。因此,研究机采籽棉压缩特性可为揭示机采籽棉压缩成型机理,设计、优化采棉机机载打包装置及二次打包装置提供基础理论数据。【前人研究进展】压缩成型的基础是物料的压缩特性^[6],国内外学者主要集中于牧草等农业纤维物料压缩特性研究,通过试验研究揭示其内在特性,部分学者通过仿真分析研究棉纤维压缩特性,但对籽棉特别是机采籽棉压缩特性的研究鲜少。其中 Robert^[7]得出初始质量对籽棉压缩过程中压缩力影响大,由于孔隙使籽棉压缩呈非弹性,同时得到含水率越高,最终的压缩密度越大;景慧^[8]将散装棉纤维压缩特性曲线分为线性(近似线性)、转变和强化3个区域,其中线性区压缩力缓慢增加,转变区压缩力增加较快,强化区压缩力急剧上升;孔凡婷等^[9]对籽棉压缩与应力松弛进行了力学模型的构建,为籽棉打包的研究与仿真提供了基础数据;李勇^[10-11]对新疆南疆地区手采棉棉纤维进行小应力压缩,得出喂入量、压缩速度越大,所需压缩力越大;陈晓川^[12]构建了一种十四面体棉纤维模型,利用有限元模拟棉纤维压缩过程中应力变化规律,确定了压缩模量与棉纤维相对密度呈幂函数关系;王则楚^[13]对比了苏联与美国棉纤维压缩特性公式,得出棉纤维压缩压力与含水率、压缩密度密切相关。目

前针对籽棉压缩特性研究较少,但对一般农业纤维物料压缩特性研究广泛、较成熟,其中内蒙古农业大学杨明韶、王春光等^[14-17]对牧草、苜蓿等物料压缩特性及可压缩性开展深入研究。其中王洪波得出含水率、压缩速度及初始密度对玉米秸秆可压缩性有影响,并得到玉米秸秆的较优压缩参数组合;张旭得出温度、含水率、初始密度与柠条体积模量的关系,随压缩密度的增大,温度对体积模量的影响显著;范林得出随压缩密度的增大,揉碎玉米秸秆可压缩性降低,同时压缩速度、含水率及初始密度对揉碎玉米秸秆的可压缩性均有影响。吕江南^[18]将红麻料片压缩过程分为松散、过渡与压紧3个阶段,其中松散阶段呈线性关系,过渡与压紧阶段呈幂函数关系。【本研究切入点】针对机采籽棉压缩方面研究较少,特别是对籽棉压缩特性及可压缩性的相关研究,现有研究忽略籽棉本身是混合物、收获期内籽棉物理特性及压缩参数等重要条件对压缩特性和可压缩性的影响问题,基于前人对一般农业纤维物料的研究成果,开展对机采籽棉压缩特性及可压缩性的研究,以探明影响机采籽棉压缩特性及可压缩性的因素与规律。【拟解决的关键问题】通过机采籽棉单轴压缩试验,建立机采籽棉压缩过程中压力、体积模量与压缩密度的数学模型,分析各因素水平对压力、体积模量的影响规律,拟为机采棉收获、储运、加工处理设备的设计提供理论依据。

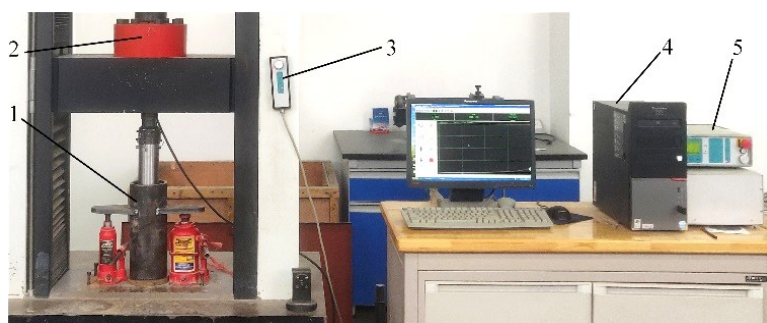
1 材料与方法

1.1 试验因素

物料含水率、压缩速度及初始密度对物料压缩特性及可压缩性均有一定影响^[19]。机采籽棉收获时含水率、含杂率受采棉机工作参数、收获时间段的影响,随机性、变化性大^[20-22];而压缩速度、初始密度等压缩参数对压缩效率、功耗有一定影响^[23]。压缩过程中物料压缩特性通常用压缩过程中的压力来描述,可压缩性用压缩过程中的体积模量来衡量。因此选取压缩过程中的压力、体积模量为试验指标,压缩速度、初始密度、机采籽棉含水率、含杂率为试验因素,开展机采籽棉压缩特性及可压缩性研究。查阅机采籽棉收获期相关文献[24-26],选取机采籽棉含水率为6%~22%;含杂率为8%~16%;查阅纤维物料压缩特性研究相关文献及现有设备参数^[14,27],选取压缩速度为10~50 mm/min;初始密度为20~60 kg/m³。

1.2 试验设备

试验设备有长春试验机研究所 CSS-44300 电子万能材料试验机,量程为 300 kN、德国 Sartorius MA100 快速水分测定仪(量程 0~100 g,精度 0.1 mg)、101-1BS 电热鼓风干燥箱、SPS402F 精密电子天平(量程 0~400 g,精度 0.01 g)、钢板尺及自制内径为 110 mm,高度为 320 mm 的压缩腔室及配套压头、底板、脱模装置(图 1)。



1:压缩装置;2:负荷传感器;3:EDC控制器;4:计算机;5:手控盒。

1: Compression device; 2: Force sensor; 3: EDC controller; 4: Computer; 5: Hand control box.

图1 机采籽棉压缩装置

Fig.1 Machine-harvested seed cotton compression device

1.3 试验材料

以石河子地区主栽机采棉品种惠远 720 为试验原料,取自石河子大学试验田,采用机采棉宽窄行种植模式(66 cm+10 cm),于 2020 年 4 月 10 日播种,10 月 10 日由 John Deere 7660 箱式采棉机采收,带回实验室晾晒自然干燥 1 个月,试验前抽样测得其含水率为 4.7%,含杂率为 11.2%^[28-29]。

1.4 试验方法

1.4.1 试样的制备 按式(1)采用复水法(复杂质法)对试样含水率与含杂率进行调节^[30]。为保证试样含杂率的均匀性,按每100 g进行等分,加入或去除相应质量的杂质;含水率按所需加入清水,装入自封袋,常温贮藏(20~25 ℃、相对湿度15%~20%)48 h以上,使试样含水率均匀一致。试验前将试样取出,并放置于试验环境(15~20 ℃、相对湿度15%~20%)3 h以上,进行后续试验工作。

$$m_d = m_o \times \frac{|d_1 - d_0|}{1 - d_1} \quad (1)$$

式中: m_d 为所添加(去除)杂质(水)的质量,g; m_o 为所需调制试样的质量,g; d_0 为试样初始含杂率(含水率),%; d_1 为试样目标含杂率(含水率),%。

1.4.2 机采籽棉压缩数据的获取 为保证试验时初始密度的准确性,根据压缩腔室体积与初始密度的水平,转换为喂入质量并称量。为保证初始密度的均匀性:喂入时随机装入,装载过程不刻意对试样进行按压;装载时装载高度须稍高于压缩腔室上端面,并将活塞压头缓慢压入,直至活塞压头下端与压缩腔室上端面平齐。为获取准确地试验数据还需保证压缩活塞与压缩腔室同轴,避免与压缩腔室内壁接触。最后设定压缩速度,进行压缩试验,通过计算机终端数据采集系统采集试验数据。

1.4.3 机采籽棉压力与体积模量的求解 为便于分析,按公式(2)、(3)将压缩过程中所测机采籽棉压缩力与压缩量转换为压力与压缩密度,为后续表征机采籽棉压缩特性及可压缩性。

$$P = \frac{1000F}{S} \quad (2)$$

$$\rho = l_0 \times \frac{\rho_0}{l_0 - l} \quad (3)$$

式中: P 为压缩过程中压力,kPa; F 为压缩过程中所测压缩力,N; S 为压头表面积, mm^2 ; ρ 为压缩过程中的压缩密度, kg/m^3 ; ρ_0 为机采籽棉的初始密度, kg/m^3 ; l_0 为机采籽棉初始高度,mm; l 为机采籽棉压缩量,mm。

为表征机采籽棉的可压缩性,引入体积模量,根据体积模量定义式(4)、(5)推导出机采籽棉压缩过程中压缩密度、压力与体积模量表达式,如式(6)所示:

$$K = -\frac{d(1000P)}{dV/V} \quad (4)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{d(m/\rho)}{m/\rho} = -\frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

$$K = \frac{d(1000P)}{d\rho/\rho} \quad (6)$$

式中: K 为压缩过程中的体积模量,kPa; P 为压缩过程中的压力,kPa; V 为体积, m^3 ; ρ 为压缩过程中压缩密度, kg/m^3 。

1.4.4 试验设计 采用单因素试验,以压缩速度、初始密度、含水率、含杂率为试验因素,以机采籽棉压缩过程中的压力、体积模量为评价指标。根据电子万能试验机所提供的速度范围选取10,20,30,40,50 mm/min共5种压缩速度;根据机采籽棉自然堆积密度及农业纤维物料压缩常用喂入密度,选取喂入密度为20,30,40,50,60 kg/m^3 ,换算为喂入质量分别为60.8,91.2,121.6,151.9,182.5 g/次共5种喂入质量;根据收获期内机采籽棉含水率及含杂率范围,含水率选取6%、10%、14%、18%、22%共5个水平;含杂率选取8%、10%、12%、14%、16%共5个水平,进行不同压缩条件的机采籽棉单因素试验。由预实验结果得:当压缩密度为400 kg/m^3 时,棉籽发生剧烈破碎,因此选取机采籽棉压缩终止条件:压缩密度为400 kg/m^3 。因此采集压缩密度为40~400 kg/m^3 内数据,每组试验重复3次。为便于试验数据的分析与处理,在所选密度范围内间隔20 kg/m^3 对应的压力作为试验数据,并进行后续分析。

2 结果与分析

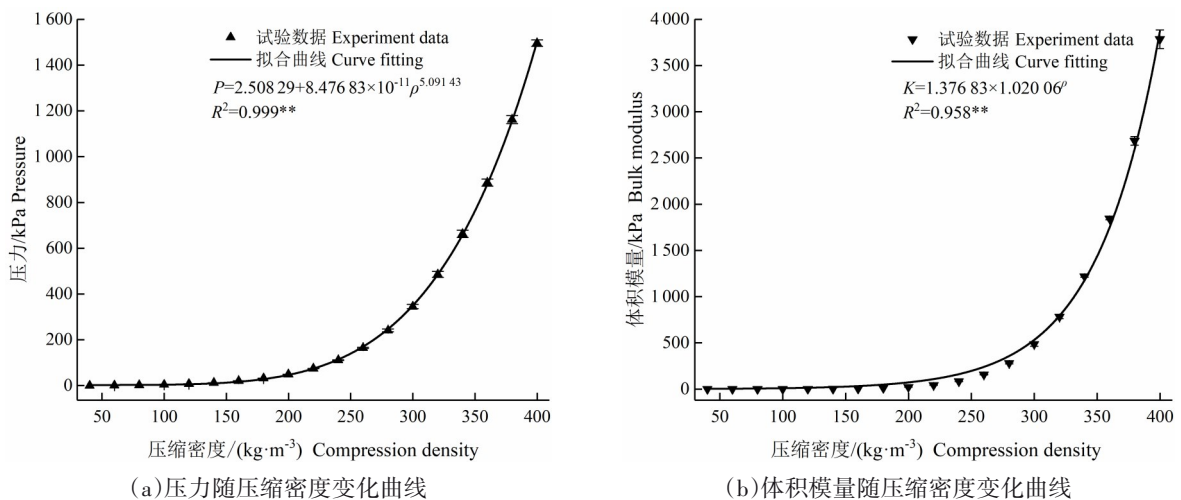
2.1 压力与压缩密度的数学模型

选取初始密度为40 kg/m^3 ,以25 mm/min速度对未经含水率、含杂率调节的机采籽棉进行压缩,获取

机采籽棉压缩量、压缩力数据,转换为压缩密度与压力,并求解其体积模量,绘制并拟合压力与压缩密度、体积模量与压缩密度的变化关系曲线(图2)。当压缩密度小于 150 kg/m^3 时,随压缩密度增大,压力值接近 0 kPa ;当压缩密度大于 150 kg/m^3 时,压力上升速度逐渐加快,且压缩密度越高越明显。由于机采籽棉属高孔隙纤维物料,压缩密度较低时,压缩主要克服机采籽棉内部孔隙,因此压力平稳变化;当压缩密度较高时,机采籽棉孔隙已被消除,机采籽棉逐渐变成固体,微小压缩量可使机采棉压缩密度剧烈变化,并产生剧烈地压力变化。对图2(a)数据分别用指数函数与幂函数进行回归拟合,得到幂函数有较高拟合度,拟合方程为 $P=2.485\ 66+8.503\ 44\times 10^{-11}\rho^{5.090\ 9}$ 。对所得机采籽棉压缩密度与压力曲线均采用幂函数拟合,得到 $R^2>0.988$, $P<0.01$,表明幂函数可较准确地描述机采籽棉压缩过程中压力随压缩密度变化规律,其回归方程可表示为: $P=a_1+b_1\rho^{c_1}$ (ρ 为实时的压缩密度; a_1 、 b_1 、 c_1 为回归方程系数)。

2.2 体积模量与压缩密度的数学模型

引入体积模量表征机采籽棉的可压缩性。对图2(a)所得数据,利用 Matlab 软件求解体积模量随压缩密度变化规律,绘制并拟合机采籽棉压缩过程中体积模量随压缩密度变化曲线,如图2(b)所示,当压缩密度小于 200 kg/m^3 时,体积模量接近 0 kPa ,表明机采籽棉可压缩性较好;当压缩密度大于 200 kg/m^3 时,体积模量随压缩密度增大逐渐加速增大,说明可压缩性不断降低;高压压缩密度下,体积模量变化愈加明显,可压缩性急剧变差。对图2(b)数据进行回归拟合,得到指数函数能更好的拟合该曲线,拟合方程为 $K=1.378\ 78\times 1.020\ 05^{\rho}$ 。对所得机采籽棉体积模量随压缩密度变化曲线均采用指数函数回归拟合,得到 $R^2>0.958$, $P<0.01$,表明指数函数可较准确地描述压缩过程中体积模量随压缩密度变化规律,其回归方程为: $K=a_2b_2^{\rho}$ (ρ 为实时压缩密度; a_2 、 b_2 为回归方程系数)。



(a) Curve of pressure changing with compression density

(b) Curve of bulk modulus changing with compression density

**表示差异 1% 水平显著性。

** significant at 0.01 level.

图2 压力、体积模量回归拟合曲线

Fig.2 Pressure and bulk modulus regression fitting curve

2.3 试验因素对机采籽棉压缩特性及可压缩性的影响

为探究试验因素对机采籽棉压缩过程中压缩特性、可压缩性的影响规律。选取 $200, 300, 400 \text{ kg/m}^3$ 共 3 个压缩密度下,压力、体积模量与压缩速度、初始密度、含水率、含杂率的相关性分析及回归分析结果如表 1 所示。当压缩密度为 200 kg/m^3 时,压缩速度与体积模量的相关性不显著外,其他各压缩密度下,各因素与压力、体积模量均显著相关 ($P<0.05$)。其中压缩速度、含杂率与压缩过程中压力、体积模量呈正相关关系 ($P<0.05$);初始密度、含水率与压缩过程中压力、体积模量呈正相关关系 ($P<0.01$)。

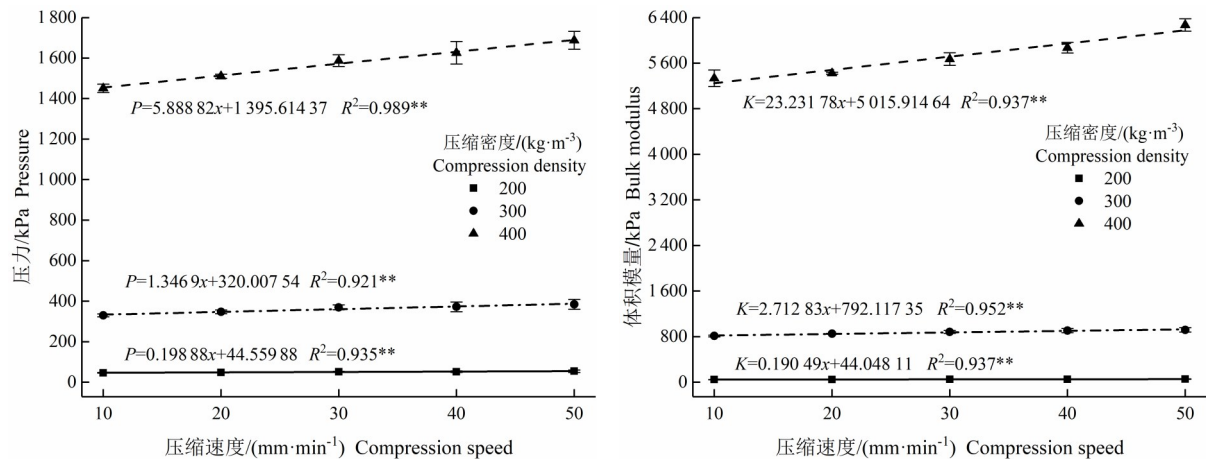
2.3.1 压缩速度的影响 为探求压缩速度对机采籽棉压力、体积模量的影响规律,绘制并拟合相同压缩密度下机采籽棉压力、体积模量随压缩速度变化曲线(图3)。分析试验结果可知:在相同压缩密度下,当

压缩密度为 200 kg/m³时,各压缩速度对应压力、体积模量均较小,低密度下用于消除机采籽棉间孔隙,机采籽棉压力、体积模量随压缩速度线性增大;压缩密度大于 200 kg/m³时,压力、体积模量随压缩速度呈较强的线性增长,可压缩性逐渐变差。由于压缩过程中压缩与应力松弛并存^[31],压缩使应力突变,应力松弛使应力均匀化,当压缩速度较小时,两者速率相近,可达到应力均匀的目的;而压缩速度较高时,压缩应力变化速率大于应力松弛均匀化速率时,应力不能及时传递,导致压力迅速增大。

表 1 相同压缩密度下各因素相关性检验结果
Tab.1 Correlation test results of various factors under the same compression density

因素 Factors	压缩密度/(kg·m ⁻³) Compression density	压力/kPa Pressure	体积模量/kPa Bulk modulus
压缩速度/(mm·min ⁻¹) Compression speed	200	0.626*	0.457
	300	0.729**	0.758**
	400	0.915**	0.939**
初始密度/(kg·m ⁻³) Initial density	200	-0.869**	-0.857**
	300	-0.877**	-0.850**
	400	-0.877**	-0.846**
含水率/% Moisture content	200	-0.974**	-0.954**
	300	-0.981**	-0.981**
	400	-0.978**	-0.963**
含杂率/% Trash content	200	0.855**	0.839**
	300	0.936**	0.940**
	400	0.958**	0.954**

**表示差异 1% 水平显著性,*表示差异 5% 水平显著性。
** significant at 0.01 level,* significant at 0.05 level.

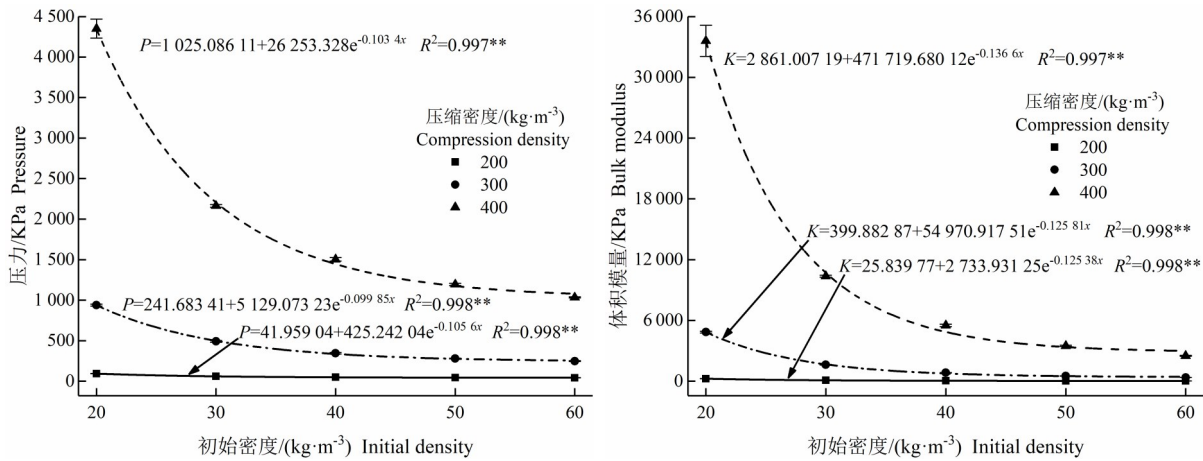


**表示差异 1% 水平显著性。
** significant at 0.01 level.

图 3 压缩速度对压力、体积模量的影响

Fig.3 Influence of compression speed on pressure and bulk modulus

2.3.2 初始密度的影响 为探求初始密度对机采籽棉压力、体积模量的影响规律,绘制并拟合相同压缩密度,压力、体积模量随初始密度的变化曲线(图 4)。分析试验结果可知:相同压缩密度下,压缩密度为 200 kg/m³时,各初始密度对应压力、体积模量基本一致;当压缩密度高于 200 kg/m³时,压力、体积模量随初始密度呈指数递减,表明相同压缩密度下,初始密度越大可压缩性越好。由于较高初始密度下机采籽棉完成预压缩,内部应力是平衡、稳定的,而机采籽棉由低初始密度压缩至高压缩密度,内部应力不均衡;当达到相同压缩密度时,较低初始密度的机采籽棉的成型高度低于较高初始密度的,同时由于应力传递距离有限,较低初始密度的机采籽棉应力剧烈上升,压力急剧增大。



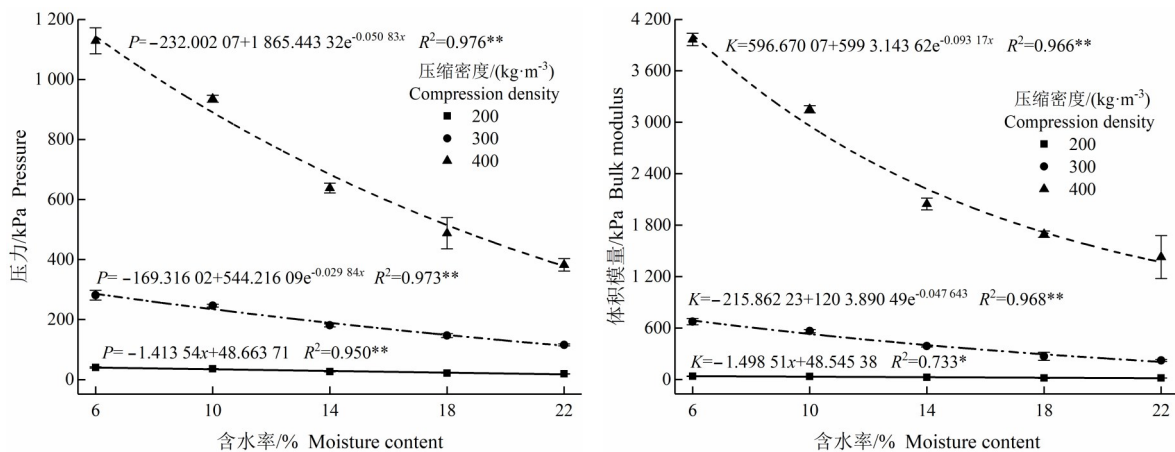
**表示差异1%水平显著性。

** significant at 0.01 level.

图4 初始密度对压力、体积模量的影响

Fig.4 Influence of initial density on pressure and bulk modulus

2.3.3 含水率的影响 为探求含水率对机采籽棉压力、体积模量的影响规律,绘制并拟合相同压缩密度下,压力、体积模量随含水率变化曲线(图5)。由试验结果可知:当压缩密度为200 kg/m³时,各含水率对应压力、体积模量基本一致,表明此阶段有良好的可压缩性;当压缩密度大于200 kg/m³时,压力、体积模量随含水率增大而减小,呈指数递减,表明压缩至相同压缩密度时,含水率高的机采籽棉有良好的可压缩性。由于含水率升高使机采籽棉堆积密度增大,使其完成“预压缩”,机采籽棉内部孔隙减小;同时机采籽棉为混合物,各组成成分对水分吸收率不相同,含水率较高时,棉杆、棉铃壳等木质素强度降低^[32],使其在大应力下更易变形,因此高含水率的机采籽棉更易被压缩,其可压缩性良好。



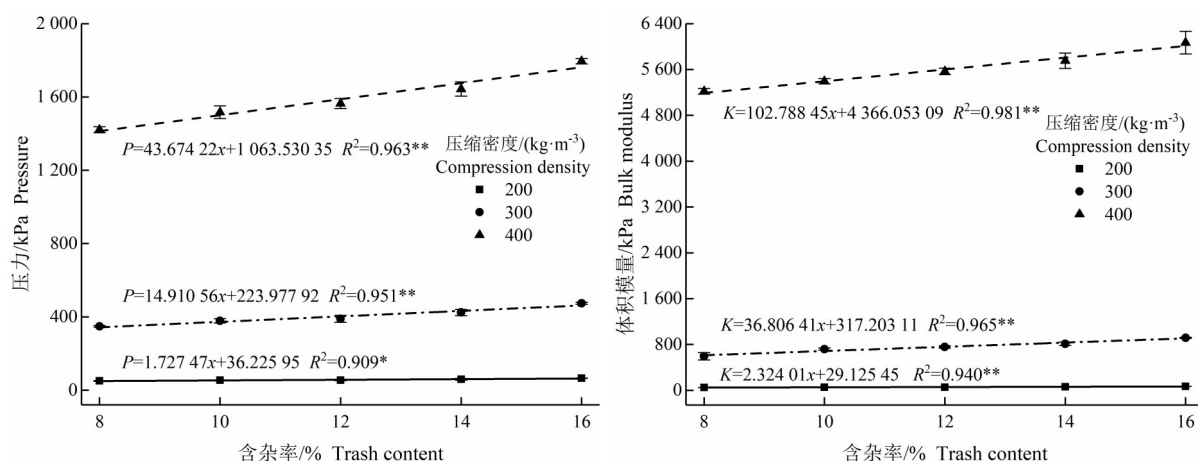
**表示差异1%水平显著性,*表示差异5%水平显著性。

** significant at 0.01 level,* significant at 0.05 level.

图5 含水率对压力、体积模量的影响

Fig.5 Influence of moisture content on pressure and bulk modulus

2.3.4 含杂率的影响 为探求含杂率对机采籽棉压力、体积模量的影响规律,绘制并拟合相同压缩密度下,压力、体积模量随含杂率变化曲线(图6)。由试验结果可知:当压缩密度小于200 kg/m³时,各含杂率对应压力、体积模量值较小,说明此阶段有良好的压缩性;当压缩密度超过200 kg/m³时,机采籽棉压缩过程中压力、体积模量与含杂率呈线性递增关系,相同压缩密度下,含杂率低有较好可压缩性,所需压力小。由于机采籽棉为混合物,不同含杂率的差异在于机采籽棉杂质中棉铃壳、棉杆及棉叶等含量占比不同,由于杂质的木质化程度较高,特别是棉杆组织结构与木材类似^[32],使棉杆有较高的抗压强度。在小应力下籽棉压缩占主导,压力变化小,达到一定压缩密度,孔隙被消除,杂质压缩模量占主导,因此高含杂率的压力比低含杂率的压力变化剧烈。



**表示差异 1% 水平显著性。

** significant at 0.01 level.

图 6 含杂率对压力、体积模量的影响

Fig.6 Influence of trash content on pressure and bulk modulus

3 结 论

(1) 机采籽棉压缩过程中压力与压缩密度的关系可由幂函数 $P=a_1+b_1\rho^c$ 表示, 体积模量与压缩密度的关系可由指数函数 $K=a_2b_2^c$ 表示, 回归拟合模型均有较高的拟合度, 说明两模型都可较准确描述机采籽棉压缩过程中压力与压缩密度、体积模量与压缩密度的变化规律。

(2) 机采籽棉压缩过程中, 随压缩密度的增大, 机采籽棉所需压力、体积模量均逐渐增大, 机采籽棉的可压缩性随压缩密度的增大而逐渐变差; 当压缩密度低于 150~200 kg/m³ 时, 机采籽棉的压力与体积模量接近 0 kPa, 此时机采籽棉有良好的可压缩性; 而压缩密度大于 200 kg/m³ 时, 压力与体积模量随压缩密度的增大加速增大, 此阶段机采籽棉可压缩性逐渐变差; 同时在高压压缩密度下更加显著。

(3) 机采籽棉压缩至相同压缩密度, 其对应压力、体积模量与压缩速度、含杂率呈正相关关系, 与初始密度、含水率呈负相关关系; 当压缩密度低于 200 kg/m³ 时, 相同压缩密度对应压力、体积模量相近; 当压缩密度为 200 kg/m³ 时, 压缩速度对机采籽棉压力、体积模量影响显著, 压力、体积模量随含杂率线性增加, 随含水率线性递减, 随初始密度指数递减; 当压缩密度高于 200 kg/m³ 时, 压力、体积模量与压缩速度、含杂率呈线性递增; 与初始密度、含水率呈指数递减, 且压缩密度越大, 关系愈加显著。

研究成果对采棉机工作参数的选取、新型棉花收获装备的设计及机采棉采后运输、储存及加工设备的设计具有理论研究价值和实际指导意义。

参考文献 References:

- [1] 卢秀茹, 贾肖月, 牛佳慧. 中国棉花产业发展现状及展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 26-36.
LU X R, JIA X Y, NIU J H. The present situation and prospects of cotton industry development in China[J]. Scientia agricultura Sinica, 2018, 51(1): 26-36.
- [2] 李洋. 籽棉回潮率测量装置控制系统的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
LI Y. Study of seed cotton moisture regain measurement device control system[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.
- [3] 邹政辉. 浅议新疆兵团机采棉发展[J]. 中国纤检, 2020, 5(1): 33.
ZOU Z H. A brief discussion on the development of machine picking cotton in Xinjiang corps[J]. China fiber inspection, 2020, 5(1): 33.
- [4] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业, 2020, 2(4): 1-16.
CHEN X G, WEN H J, ZHANG W R, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart agriculture, 2020, 2(4): 1-16.
- [5] 王瑟. 棉花地里多了“智能”机械[J]. 当代农机, 2019(11): 16-17.

- WANG S. There are more “smart” machines in cotton fields[J]. Contemporary farm machinery, 2019(11):16-17.
- [6] 王瑞丽,魏楷峰,刘洋,等.饲料用秸秆丝化多频快速压缩成型工艺参数优化[J].农业工程学报,2016,32(21):277-281.
- WANG R L, WEI K F, LIU Y, et al. Optimization of process parameters for multi-frequency rapid compression molding of corn stalk silk used for forage [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(21):277-281.
- [7] HARDIN R G. Viscoelastic properties of seed cotton and their effect on module shape and density [D]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [8] 景慧. 散纤维集合体的微观结构特征及压缩力学行为表征[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- JING H. Characterization for Mico-structure and Compressional Behaviour of General Fibrous Assemblies [D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [9] 孔凡婷,吴腾,陈长林,等.籽棉压缩与应力松弛力学特性及模型构建[J].农业工程学报,2021,37(7):53-60.
- KONG F T, WU T, CHEN C L, et al. Mechanical properties and construction of constitutive model for compression and stress relaxation of seed cotton[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(7):53-60.
- [10] 李勇,李健,雷福祥,等.原棉压缩参数与力学指标的关系[J].中国农机化学报,2021,42(4):70-75.
- LI Y, LI J, LEI F X, et al. Analysis of mechanical parameter of cotton and its influencing factors in the compressional process [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(4):70-75.
- [11] 李勇,张宏,张有强,等.棉纤维集合体压缩力传递与密度关系[J].纺织学报,2016,37(11):19-25.
- LI Y, ZHANG H, ZHANG Y Q, et al. Research on compressive force transmission properties and densities-mechanical properties model of cotton fiber assembly[J]. Journal of textile research, 2016, 37(11):19-25.
- [12] XU M, CHEN X, WANG J, et al. Finite element analysis modeling research on the compression process of cotton fiber assembly[J]. Textile research journal, 2020, 90(11):1414-1427.
- [13] 王则楚. 美国与苏联棉花压缩特性公式的比较[J]. 中国棉花加工, 1994(3):26-27.
- WANG Z C. Comparison of cotton compression characteristic formulas between the United States and the Soviet Union [J]. China cotton processing, 1994(3):26-27.
- [14] 王洪波,何冬黎,张旭.玉米秸秆的可压缩性试验研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(6):88-90.
- WANG H B, HE D L, ZHANG X. Experimental study on the compressibility of corn straw[J]. Journal of Inner Mongolia agricultural university (natural science edition), 2014, 35(6):88-90.
- [15] 张旭,王春光,韩晓玲,等.柠条可压缩性的影响因素分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(3):123-127.
- ZHANG X, WANG C G, HAN X L, et al. Analysis on the factors affecting the compression of korshinsk peashrub [J]. Journal of Inner Mongolia agricultural university (natural science edition), 2009, 30(3):123-127.
- [16] 张旭,王春光.温度对揉碎柠条可压缩性的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):150-154.
- ZHANG X, WANG C G. Effect of temperature on compressibility of rubbed korshinsk peashrub [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2010, 26(1):150-154.
- [17] 范林,王春光,王洪波,等.揉碎玉米秸秆可压缩性研究[J].农业机械学报,2008,39(11):76-80.
- FAN L, WANG C G, WANG H B, et al. Study on the Compressibility of Maize Straw Rubbed [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural machinery, 2008, 39(11):76-80.
- [18] 吕江南,龙超海,何宏彬.红麻料片的压缩特性及压力与压缩密度的数学模型[J].农业机械学报,1998,29(2):83-86.
- LU J N, LONG C H, HE H B. Compression characteristics of the kenaf chips and mathematical models of pressure-compression density [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural machinery, 1998, 29(2):83-86.
- [19] 李心平,熊师,耿令新,等.含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(2):25-31.
- LI X P, XIONG S, GENG L X, et al. Influence of water content on anti-pressing properties of corn ear [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(2):25-31.
- [20] 陈廷官,张宏文,王磊,等.水平摘锭式采棉机采摘头传动系统优化与试验[J].农业工程学报,2020,36(17):18-26.
- CHEN T G, ZHANG H W, WANG L, et al. Optimization and experiments of picking head transmission system of horizontal spindle type cotton picker [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(17):18-26.
- [21] 张龙唱,张宏文,王磊,等.不同铃壳物理参数对机采棉采摘力学特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):30-37.

- ZHANG L C, ZHANG H W, WANG L, et al. Influence of different boll shell physical parameters on mechanical properties of machine-harvested cottons[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(19): 30-37.
- [22] 张龙唱, 张宏文, 王磊, 等. 不同成熟度机采棉采摘力学特性试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 193-202.
- ZHANG L C, ZHANG H W, WANG L, et al. Study on mechanical characteristics of machine-harvested cotton at different maturity degrees [J]. Journal of Gansu agricultural university, 2020, 55(6): 193-202.
- [23] 刘立意, 邴媛媛, 董欣, 等. 玉米秸秆压缩加载条件对其裂纹和机器功耗的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 163-169.
- LIU L Y, BING Y Y, DONG X Y, et al. Effects of loading conditions on cracks of corn stalk and power consumption of machine[J]. Transactions of the Chinese Society of agricultural engineering, 2014, 30(3): 163-169.
- [24] 王士国. 新疆兵团机采籽棉预处理清理工艺试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- WANG S G. Experimental research on machine-harvested seed cotton pre-processing and cleaning flow in Xinjiang production and construction corps [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [25] 张成梁, 李蕾, 董全成, 等. 基于GA-SVM模型的机采籽棉杂质识别[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 189-196.
- ZHANG C L, LI L, DONG Q C, et al. Recognition for machine picking seed cotton impurities based on GA-SVM model[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(24): 189-196.
- [26] 张景, 田力, 纪超, 等. 农业物料压缩成型技术研究现状[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4): 93-102.
- ZHANG J, TIAN L, JI C, et al. Study status of agricultural materials compressing technology[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2019, 40(4): 93-102.
- [27] 丁龙朋, 陈永成, 葛云, 等. 棉秆剪切力学特性的研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 116-118.
- DING L P, CHEN Y C, GE Y, et al. Research on the shear mechanical property of cotton stalks[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(2): 116-118.
- [28] 中国纤维检验局. 原棉回潮率试验方法烘箱法: GB/T 6102.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- China Fiber Inspection Bureau. Raw cotton moisture return rate test method Oven method: GB/T 6102.1—2006[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2006.
- [29] 中国纤维检验局. 原棉含杂率试验方法: GB/T 6499—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Fiber Inspection Bureau. Test method for impurity rate of raw cotton: GB/T 6499—2012[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2012.
- [30] DU X, WANG C, GUO W, et al. Stress relaxation characteristics and influencing factors of sweet sorghum: experimental study[J]. Bioresources, 2018, 13(4): 8761-8774.
- [31] 马彦华, 宣传忠, 武佩, 等. 玉米秸秆振动压缩过程的应力松弛试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 88-94.
- MA Y H, XUAN C Z, WU P, et al. Experiment on stress relaxation of corn stover during compression with assisted vibration [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(19): 88-94.
- [32] 盛奎川, 钱湘群, 吴杰. 切碎棉秆高密度压缩成型的试验研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(2): 139-142.
- SHENG K C, QIAN X Q, WU J. Experimental studies on compressing chopped cotton stalks to high densities[J]. Journal of Zhejiang university (agriculture and life science), 2003, 29(2): 139-142.