

粮食温控直剪仪改造及其在大豆力学特性 研究性试验中的应用

曾长女,王少华,谷 贺

(河南工业大学 土木工程学院,郑州 450001)

摘要:为获得温度影响下的粮食力学参数,为粮仓相关设计提供参考,对现有粮食静动直剪仪进行改进,增设了保温剪切盒及智能温控系统,并利用该设备在大豆含水率 8.99%~15.12%、孔隙率 36%、温度 25~45℃、竖向应力 50~200 kPa、剪切速率 2.4 mm/min、剪切位移幅值 20 mm 条件下开展了一系列大豆籽粒群的温控单调剪切试验,测定不同温度条件下大豆籽粒群的抗剪强度及体积剪切变形参数。结果表明:大豆籽粒群内摩擦角范围为 37.1°~44.6°,咬合应力范围为 9.6~21.2 kPa;温度升高会显著降低大豆籽粒群的剪胀性,亦会改变大豆籽粒群的强度特性。改进后的粮食温控直剪仪温度控制稳定,试验结果满足测试需求,可为研究性试验开展、科技创新和工程应用等提供有力的支撑。

关键词:温控直剪仪;大豆籽粒群;力学特性;温度影响

中图分类号:TS222;G642

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)11-0138-09

A modified temperature – controlled grain direct shearing apparatus and its application in soybean mechanical properties research test

ZENG Changnyu, WANG Shaohua, GU He

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To obtain the mechanical parameter of grain under the temperature influence and provide reference for the related design of silos, the thermal insulation shear box and intelligent temperature control system were installed based on the existing grain static and dynamic direct shearing apparatus. A series of temperature – controlled direct shear tests were performed under the conditions of soybean moisture content 8.99% – 15.12%, porosity 36%, temperature 25 – 45℃, vertical stress 50 – 200 kPa, shear rate 2.4 mm/min and shear displacement amplitude 20 mm. The parameters of shear strength and the corresponding deformation were obtained to consider the effect of temperature. The results showed that the internal friction angle ranged from 37.1° to 44.6°, and the occlusal stress ranged from 9.6 kPa to 21.2 kPa. The increase of temperature could significantly reduce the dilatancy of soybean grain group and change its strength characteristics. The temperature control of the modified temperature – controlled grain direct shearing apparatus is stable, and the test results meet the test requirements, so it can

provide strong support for research experiments conducting, scientific and technological innovation and engineering applications.

Key words: temperature – controlled direct shearing apparatus; soybean grain group; mechanical property; temperature effect

收稿日期:2023-07-17;修回日期:2024-07-18

基金项目:河南省高等教育教学改革研究与实践重点项目(2021SJGLX144);河南工业大学教育教学改革研究与实践重点项目(JXYJ2021006);河南省科技研发计划联合基金项目(222103810075);河南工业大学创新基金支持计划专项资助(2022ZKCJ07)

作者简介:曾长女(1978),女,教授,博士生导师,博士,研究方向为粮油仓储结构及地基基础工程的教学与研究工作(E-mail)zengcny@126.com。

我国是一个储粮大国,国家建设了大量的粮仓,粮仓结构安全是储粮安全的根本保障。为提升储粮

能力,高大粮仓结构在我国很常见。温度对粮仓结构,尤其是高大粮仓结构的影响不容忽视。环境温度、施工温度或温差过大都可能引起粮仓结构裂缝,影响粮仓安全,温差过大也容易引起仓内储粮的储藏质量和安全^[1-2]。比如,温度会引起仓壁作用弯矩变化,其对环向拉力的影响甚至大于储料荷载的影响,该弯矩传递至储仓下框架柱,将带来不弱于恒载及地震作用的内力^[3],易引起仓壁裂缝,造成安全隐患,甚至引发粮仓安全事故^[4]。我国现行 GB 50884—2013《钢筒仓技术规范》中对于钢筒仓仓壁的温度作用并不明确,GB 50077—2017《钢筋混凝土筒仓设计标准》中按最大环拉力的百分比考虑温度作用。温度对粮仓结构安全的影响机制复杂,它不仅对仓体结构材料产生影响,对仓内储粮的力学特性也会产生影响,从而影响仓体结构作用力的计算。但现有的研究缺乏温度对储粮力学性质影响的试验数据,导致仓体结构设计时这部分不利影响被忽略。

已有学者对温度作用下仓体结构设计进行了相关研究。刘红波等^[5]提出了一种太阳辐射阴影区计算方法,分析了不同仓体型式下太阳辐射的时空分布;马越等^[6-8]进行了均匀与非均匀温度场对钢筒仓稳定性的影响对比,分析了气温、太阳辐射、热储料等温度因素下的钢筒仓仓壁侧压力变化;杨丽平等^[9]对比了不同计算方法下仓壁附加压力在温度作用下的大小及分布规律;Matiasakova 等^[1]研究了仓壁温度场的时空分布规律,分析了仓体不同位置处的温度应力大小并针对配筋计算给出了参考。但现有研究更多着力于从仓体结构本身热致应力、仓体材料与仓内储粮的不同导热系数及热膨胀系数入手,分析温度应力或由此引起的侧压力分布,给出仓壁侧压力计算办法,从而完善仓体结构设计,但均未考虑温度对仓内储粮的强度变形等力学参数的影响^[10-11]。仓壁侧压力的大小与仓内储粮的力学特性直接相关^[12],GB 50077—2017《钢筋混凝土筒仓设计标准》中明确了储料的内摩擦角用于计算侧压力系数的计算公式,但均未涉及仓内储料力学特性受温度的影响规律,导致计算公式难以量化。本课题组已开发的粮食静动直剪仪从仅能考虑静力作用发展到可考虑静动力作用^[13],但仍不能满足考虑温度影响的实际需求,有必要研发新型的粮食温控直剪仪,以适用于温度、静动力作用等各种工况下的研究性试验开展,为学生科研、科技创新、工程应用等提供有力的支撑。

本文对现有的粮食静动直剪仪进行改进,研发

了新型的粮食温控直剪仪,并基于此设备,以我国需求日益增长的重要粮食作物大豆^[14]为原料,利用直剪试验测定不同温度条件下大豆籽粒群的抗剪强度及体积应变,获取强度、变形参数,以期为粮仓相关设计提供试验参数,也为研究性试验教学开展提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆,黑龙江产黄大豆,初始含水率为 8.99%,容量为 709.5 g/L,相对密度为 1.115,籽粒饱满完整。

粮食温控直剪仪,基于自主研发的粮食静动直剪仪^[13]进行改造,施加恒温环境是本次改造的重点,为此增加了保温剪切盒和智能温控系统。保温剪切盒可制备直径和高度均为 100 mm 的试样,其构造示意图见图 1。保温剪切盒材质为黄铜,其传热系数约为 $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,是良好的导热材料,便于快速加热。而剪切盒与空气的传热系数在 $5 \sim 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间^[15],为在试验过程中有效控制剪切盒温度,选取 ESP 隔热保温板外覆在剪切盒顶面及四周外壁。ESP 隔热保温板主料为热塑性材料泡沫,其内封闭的空气总体积占 98% 以上,传热系数仅为 $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,预测试结果表明,试验中温度曲线稳定,可满足试验温度控制需求。

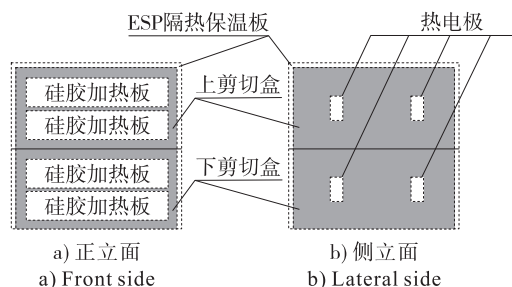


图 1 保温剪切盒构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal insulation shear box

图 2 为智能温控系统组成示意图。其中,温度控制模块主要由硅胶加热板、直流电源以及温度测试仪等部件组成。规格为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的 12 V 硅胶加热板利用 WANPTEK 直流电源供电,通过耐热胶水分别紧密粘贴在上、下剪切盒 2 个外侧面,通过热传导直接向剪切盒进行热量传递,效率更高且更稳定;通过安柏 AT-4532 多路温度测试仪,对未粘贴硅胶加热板的两个外侧面进行实时温度数据采集,实现温度变化的可视化与准确调控。本文所采用的硅胶加热板厚度较小,即使外覆 ESP 隔热保温板也不会影响剪切盒的行进路线。在实际试验时,通过在上、下剪切盒接触面涂抹凡士林的方式削弱系统摩擦力对试验结果的影响。

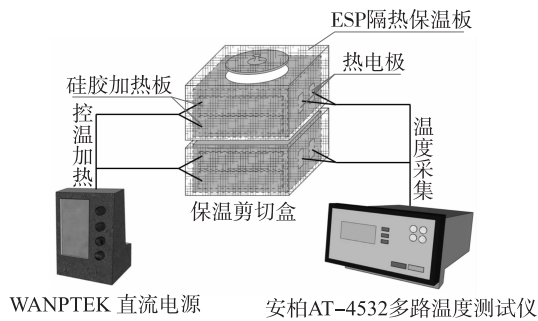


图2 智能温控系统组成示意图

Fig. 2 Composition schema for an intelligent temperature control system

1.2 试验方法

为模拟大豆籽粒群在真实卸料状态下的储粮环境,选取高大粮仓 28 m 深度处(竖向应力约为 $7.095 \times 28 = 198.66$ kPa)大豆籽粒群所受竖向应力条件,考察 50、100、150、200 kPa 4 个竖向应力等级;依据大豆籽粒群呼吸强度骤增的临界水分 14%^[16],选取 8.99%、12.24%、15.12% 3 个含水率模拟大豆籽粒群的不同含水率状态;依据 GB/T 29890—2013《粮油储藏技术规范》中可较好保持粮食品质的温度上限 25℃、开始对粮食产生致命损害的 40℃ 这一温度阈值,确定 25、35、45℃ 3 个温度模拟实际储藏运输过程中的不同储粮温度条件。

试验开始时先预热剪切盒及大豆籽粒至目标温度,称量固定质量的大豆籽粒,分层装样并酌情振捣至剪切盒体积以确保试样的平均初始孔隙率为 36% ,

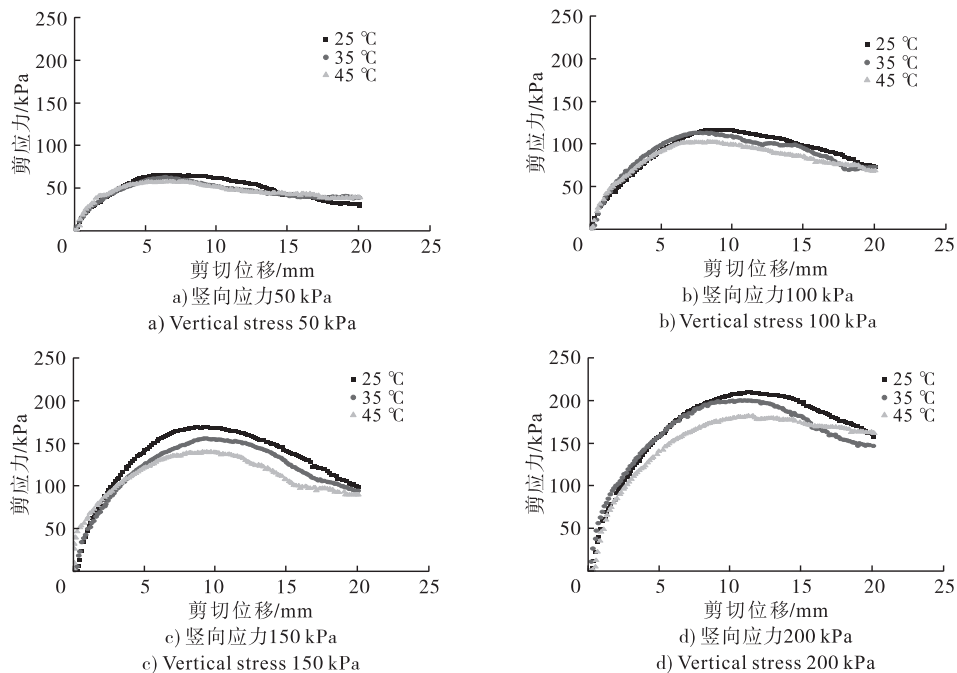


图3 不同温度条件下含水率 8.99% 大豆籽粒群剪应力变化曲线
Fig. 3 Variation curve of shear stress of soybean grain group with a moisture content of 8.99% under different temperature conditions

并且在装样完成后恒温静置 15 min 以消除装样过程中温度损失带来的误差。静置完成后,按照位移控制下的常规固结快剪展开试验,具体试验方案见表 1。本文共计 3 个试验分组,每组 12 个试验,因试验方案中的核心变量为温度条件,受环境影响的可能性较大,试验计划均紧凑安排在每天的同一时段,以削弱试验环境因素的影响。试验记录剪应力和体积应变随剪切位移的变化曲线。

表1 大豆籽粒直剪试验方案

Table 1 Direct shear test scheme for soybean grain

| 试验分组 | 温度/含水率/ ℃ % | 竖向应力/kPa | 剪切速率/ (mm/min) | 剪切位 移幅值/ mm |
|-------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| T25-1 | 8.99 | 50、100、150、200 | | |
| T25-2 | 25 12.24 | 50、100、150、200 | 2.4 | 20 |
| T25-3 | 15.12 | 50、100、150、200 | | |
| T35-1 | 8.99 | 50、100、150、200 | | |
| T35-2 | 35 12.24 | 50、100、150、200 | 2.4 | 20 |
| T35-3 | 15.12 | 50、100、150、200 | | |
| T45-1 | 8.99 | 50、100、150、200 | | |
| T45-2 | 45 12.24 | 50、100、150、200 | 2.4 | 20 |
| T45-3 | 15.12 | 50、100、150、200 | | |

2 结果与分析

2.1 温度效应下大豆籽粒群抗剪强度特性分析

图 3 ~ 图 5 为不同温度条件下不同含水率大豆籽粒群剪应力变化曲线。为便于表述,将剪应力最大值定义为峰值抗剪强度,将剪切结束时对应的剪应力定义为残余抗剪强度。

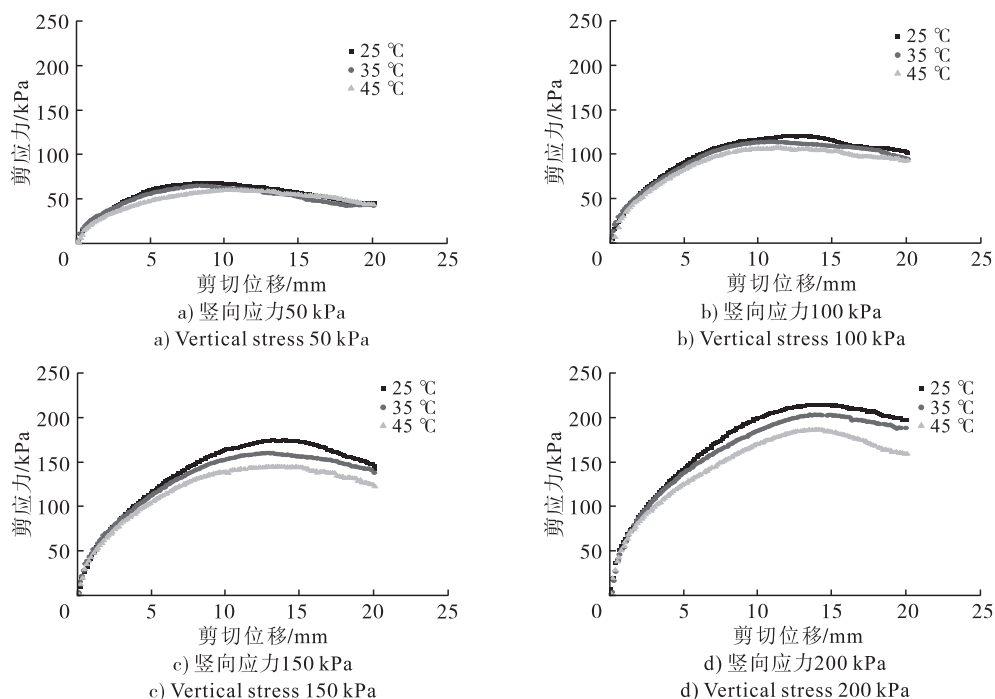


图4 不同温度条件下含水率12.24%大豆籽粒群剪应力变化曲线
Fig.4 Variation curve of shear stress of soybean grain group with a moisture content of 12.24% under different temperature conditions

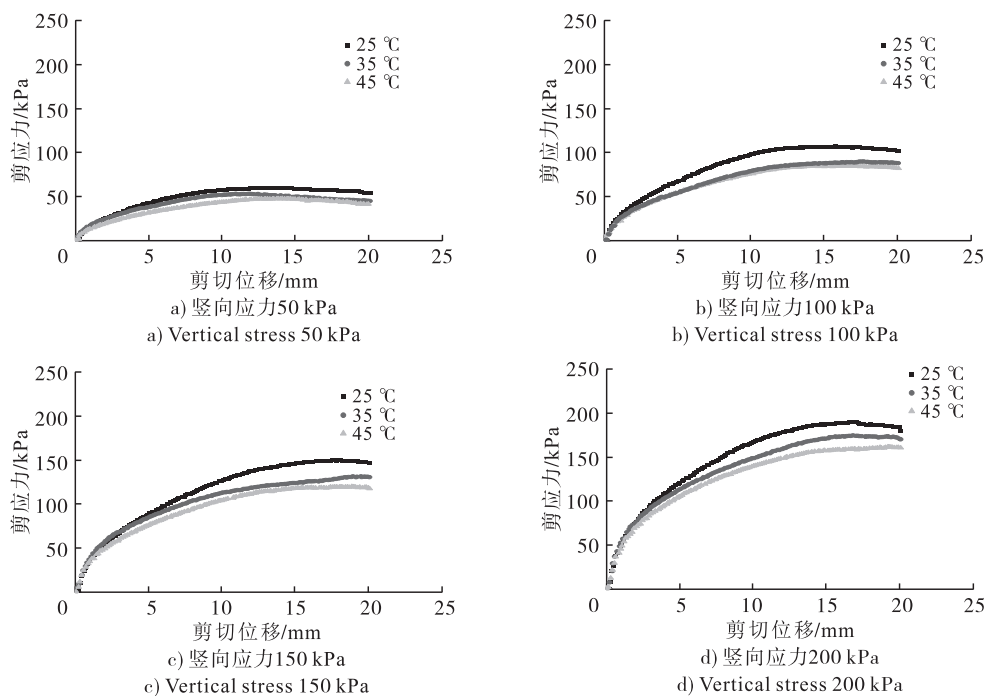


图5 不同温度条件下含水率15.12%大豆籽粒群剪应力变化曲线
Fig.5 Variation curve of shear stress of soybean grain group with a moisture content of 15.12% under different temperature conditions

由图3~图5可见,大豆籽粒群的剪应力-剪切位移曲线呈现相似的规律,即随着剪切位移的增加,剪应力先经历快速增长阶段,在达到峰值抗剪强度后逐渐降低,并最终达到其残余抗剪强度,大豆籽粒群整体上表现出剪切软化现象。不同条件下,大豆籽粒群达到峰值抗剪强度所需的剪切位移值(μ_c)不同,在剪切位移达到 μ_c 前,大豆籽粒群的剪

应力逐步趋于峰值抗剪强度,籽粒群骨架存在一定的弹性变形,而在剪切位移达到 μ_c 后,籽粒发生屈服,籽粒群骨架彻底进入塑性变形阶段^[17]。在本文控制条件下,竖向应力越大, μ_c 越大;不同温度下, μ_c 差别不明显,温度的影响没有竖向应力的影响显著。

以温度为横坐标,峰值抗剪强度为纵坐标,绘制不同含水率大豆籽粒的拟合曲线,结果如图6所示。

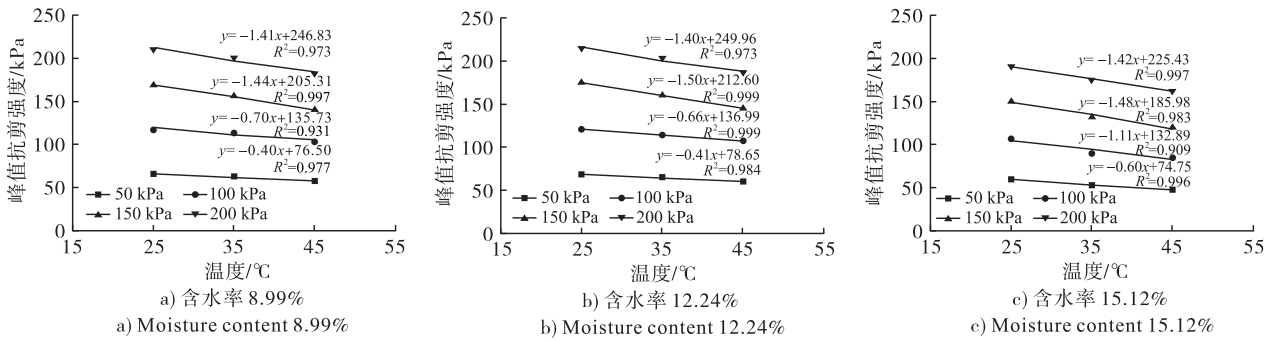


图6 不同含水率大豆籽粒的温度-峰值抗剪强度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of temperature - peak shear strength for soybean grain with different moisture contents

由图6可知,峰值抗剪强度随着温度的升高呈线性降低的规律。不同竖向应力下,拟合曲线的斜率(k)不同,当竖向应力小于150 kPa时, k 受温度影响显著,当竖向应力高于150 kPa时, k 受温度影响不显著,表明大规模储粮时,越靠近粮仓底部的大豆籽粒群峰值抗剪强度受温度影响越大,但达到一定储粮深度后,温度对大豆籽粒群峰值抗剪强度的影响不再继续增加。研究表明,在较低竖向应力(100 kPa及以下)下,竖向应力对大豆籽粒群峰值抗剪强度的影响程度大于温度的影响(k_p 的绝对值大于 k_T 的),而在较高竖向应力(超过100 kPa)下,温度的

影响程度占据更高地位。这说明在实际储粮条件下,从储粮物料的抗剪强度特性考虑,储粮高度越大的储粮仓,越应当留意温度的影响,特别是在仓体的下部。

2.2 温度效应下大豆籽粒群体积应变特性分析

根据体积应变(ϵ_v)的定义,体积应变为体积变化量(ΔV)与原始体积(V_0)的比值,本研究中剪切盒内部为直径(d)与高(h)均为100 mm的圆柱体,内壁为刚性边界,面积恒定不变,故本文中的 ϵ_v 在数值上等于竖向位移变化量(ϵ_z),依据仪器采集的竖向位移变化数据即可计算体积应变。图7~图9为不同温度条件下不同含水率大豆籽粒群的体积应变变化曲线。

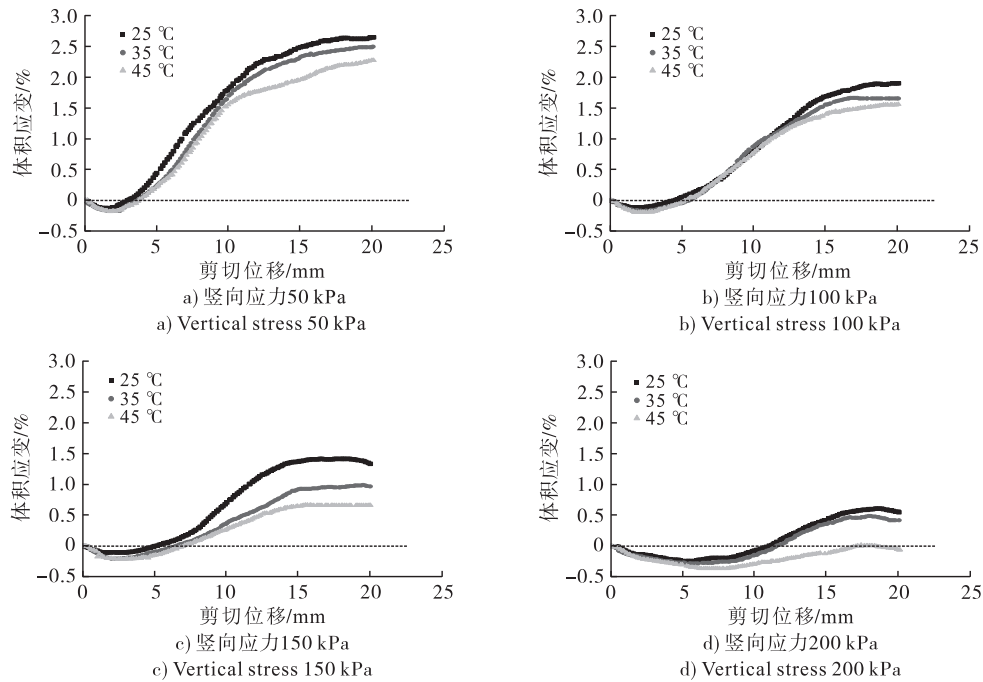


图7 不同温度条件下含水率8.99%大豆籽粒群体积应变变化曲线

Fig. 7 Variation curve of volume strain of soybean grain group with a moisture content of 8.99% under different temperature conditions

由图7~图9可知,在一定条件下大豆籽粒群的体积应变呈现正负两种情况,在宏观上分别表现为体积增大(剪胀)与体积减小(剪缩)的现象。在剪切试验开始阶段,大豆籽粒间相互挤压,孔隙体积减小,试样呈现剪缩,说明本文选取的平均初始孔隙

率36%大于大豆籽粒群的临界孔隙率;随着剪切位移继续增加,大豆籽粒群的孔隙率持续减小,当达到临界孔隙率后,试样总体积不降反增,这是因为剪切面附近的大豆籽粒发生了翻越现象,越过前方籽粒,位置重新排列,导致上方大豆籽粒抬升,抵消了籽粒

群压缩导致的体积减小,宏观上表现为剪胀现象。而反映在实际工程中,仓内储粮籽粒重新排列产生

的剪胀现象会引起仓壁侧压力的动态增加^[18],从而影响仓体结构设计中仓壁侧压力的选取。

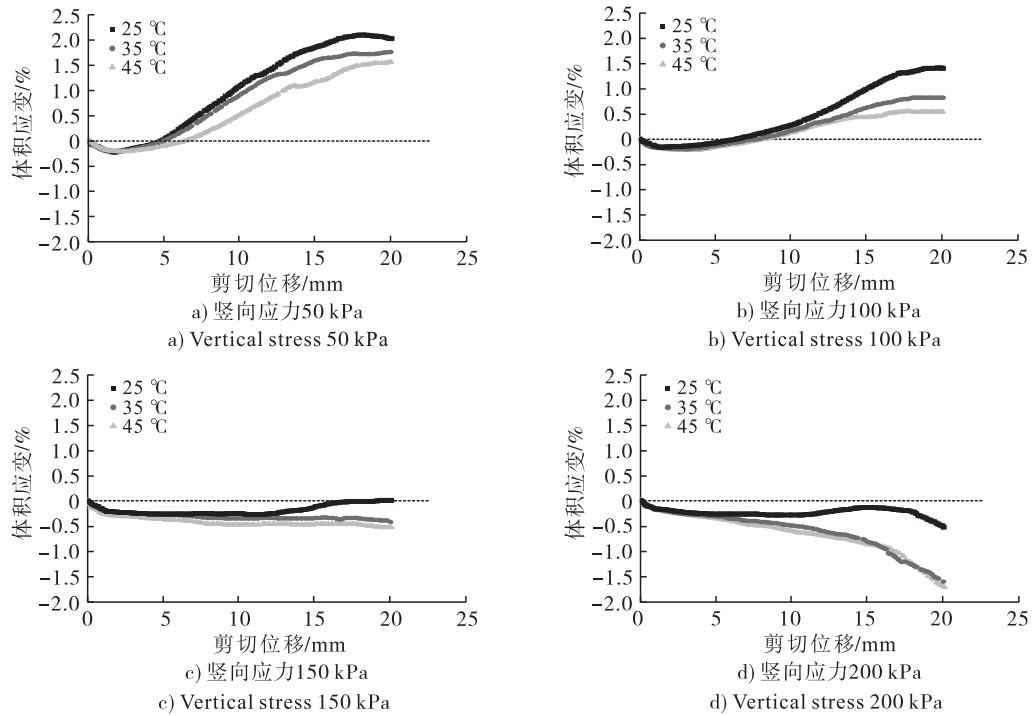


图8 不同温度条件下含水率12.24%大豆籽粒群体积应变曲线

Fig.8 Variation curve of volume strain of soybean grain group with a moisture content of 12.24% under different temperature conditions

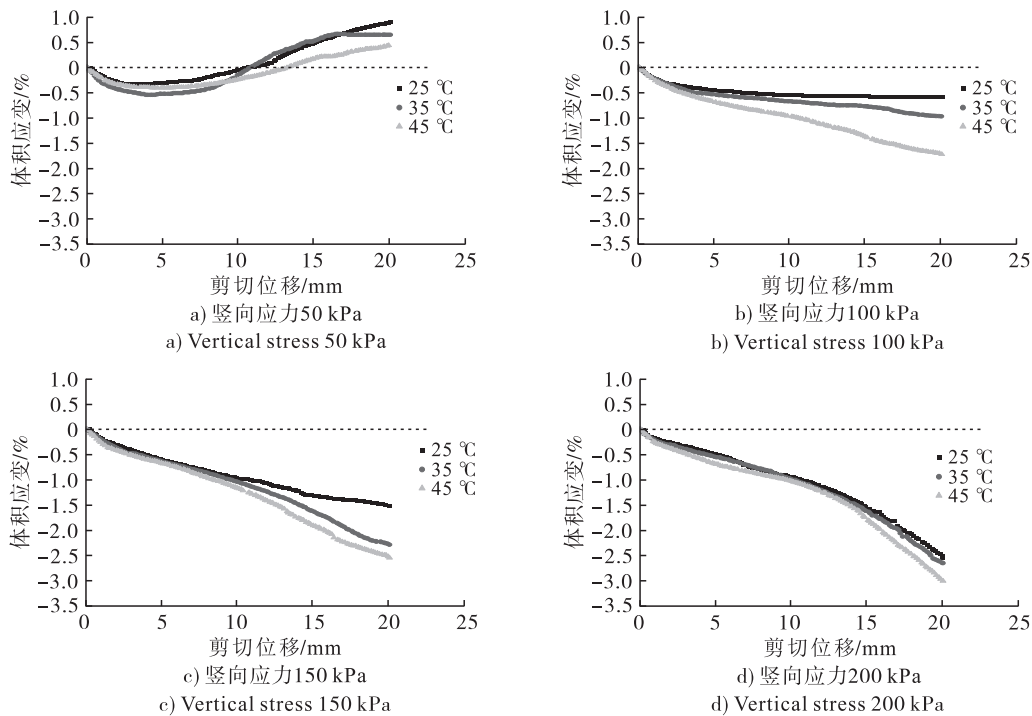


图9 不同温度条件下含水率15.12%大豆籽粒群体积应变曲线

Fig.9 Variation curve of volume strain of soybean grain group with a moisture content of 15.12% under different temperature conditions

由图7~图9还可知,随着温度升高,大豆籽粒群的最大剪缩体积应变逐步增加,而最大剪胀体积应变逐步减小。说明温度升高削弱了大豆籽粒群的

剪胀性,增加了剪缩趋势。而大豆籽粒群的剪缩趋势程度越大,籽粒间的挤压作用越明显,更易形成类似土拱效应的“粮拱效应”^[19],“粮拱效应”会改变

局部大豆籽粒群的应力传递,使竖向应力减小而水平向应力增大,进而导致仓壁侧压力局部增大^[20],是仓体结构设计中应当注意的风险点。

2.3 温度效应下大豆籽粒群抗剪强度参数变化特性分析

根据图 6 可知,大豆籽粒群的峰值抗剪强度随竖向应力改变拟合度较高,其抗剪强度符合莫尔库伦强度准则($\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 式中: τ 为抗剪强度; c 为咬合应力; σ 为竖向应力; φ 为内摩擦角)。根据本文试验

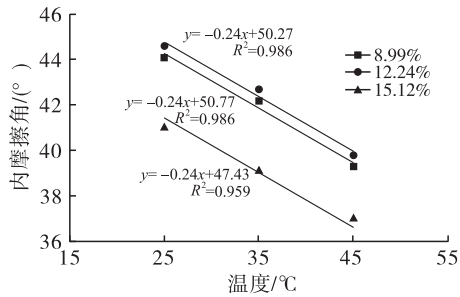


图 10 不同温度条件下不同含水率大豆籽粒群抗剪强度参数变化

Fig. 10 Variation in parameters related to shear strength of soybean grain group with different moisture contents under different temperature conditions

由图 10 还可知,咬合应力随含水率的变化趋势与内摩擦角一样,而与其不同的是,含水率 8.99% 与 12.24% 下的咬合应力受温度影响较小,含水率 15.12% 才表现出明显的热软化现象。笔者认为出现界限含水率的原因是温度升高会导致大豆籽粒间水分迁移变化,影响大豆籽粒间的实际接触面积,进

表 2 大豆籽粒群内摩擦角和咬合应力对比

Table 2 Comparison of internal friction angle and occlusal stress of soybean grain group

| 来源 | 基本条件 | | | | | 内摩擦角范围/(°) | 咬合应力范围/kPa |
|--------|----------|---------------|---------|---------------|---------|-------------|-------------|
| | 竖向应力/kPa | 含水率/% | 孔隙率/% | 剪切速率/(mm/min) | 温度/°C | | |
| 本文 | 50 ~ 200 | 8.99 ~ 15.12 | 36 | 2.4 | 25 ~ 45 | 37.1 ~ 44.6 | 9.6 ~ 21.2 |
| 文献[23] | 50 ~ 200 | 10.2 | 38 ~ 42 | 3.5 | / | 36.6 ~ 38.7 | 11.9 ~ 18.0 |
| 文献[24] | 25 ~ 100 | 12.11 ~ 18.02 | / | 1.33 ~ 4.33 | / | 32.5 ~ 42.6 | / |
| 文献[25] | 25 ~ 150 | 8.50 | / | 0.6 ~ 1.2 | / | 36.9 ~ 38.4 | 6.1 ~ 9.7 |
| 文献[26] | 50 ~ 200 | 12 ~ 21 | / | 0.78 ~ 2.33 | / | 26.9 ~ 32.5 | 6.1 ~ 11.0 |

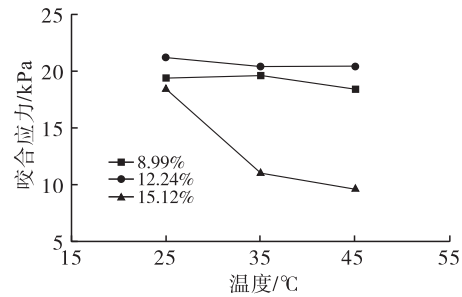
注:未控制或未计算的参数以"/"标识,内摩擦角和咬合应力均保留一位小数

Note: Uncontrolled or uncalculated parameters are marked with "/", and both the internal friction angle and the occlusal stress are retained to one decimal place

由表 2 可知,各文献所得数据不尽相同但范围接近(因基本条件控制及所用大豆品种及品相略有差别),内摩擦角的范围为 26.9° ~ 42.6°,咬合应力的范围为 6.1 ~ 18.0 kPa。本文所得内摩擦角范围为 37.1° ~ 44.6°,咬合应力范围为 9.6 ~ 21.2 kPa,与文献值差异不大,表明本文温控直剪仪测试结果准确可靠。

结果计算峰值抗剪强度下的 c, φ , 结果如图 10 所示。

由图 10 可知,大豆籽粒群内摩擦角随温度升高近似呈现线性减小的趋势,在含水率 8.99%、12.24% 及 15.12% 条件下其变化速率均为 -0.24 (°)/°C。相同温度下大豆籽粒群内摩擦角随含水率增加呈现先增后减的变化趋势,这一结果与刘志云等^[21]研究糙米籽粒群内摩擦角的结果相似,即存在某界限含水率使粮堆内摩擦角变化趋势发生改变。



而导致大豆籽粒间接触应力的变化,同时由于剪切带附近水的黏滞性产生的摩擦阻力随温度的升高而减小^[22],使大豆籽粒群的抗剪强度在较高含水率下表现出明显的随温度升高而减小的趋势。

表 2 对比了本文与文献中大豆籽粒群内摩擦角和咬合应力。

对表现出剪胀的试验组,采用剪胀角来描述试样的剪胀特性,本文所计算的剪胀角均为最大剪胀角(Φ),采用 μ_c 所对应竖向位移 - 剪切位移曲线斜率 (dy/dx) 位置处的反三角函数 [$\Phi = \arctan(dy/dx)$] 表示。需要说明的是,在部分未表现出剪胀趋势的试验组,所计算的剪胀角为负值,即发生剪缩现象。不同温度不同含水率大豆籽粒群剪胀角如图 11 所示。

由图 11 可知,随温度升高剪胀角均呈减小的趋势,说明大豆籽粒群的剪胀性随温度的升高而降低,减缩趋势反而愈发明显。这与文献[27]中大豆籽

粒群的压实系数随温度的升高而增大的结论一致,其本质仍为大豆籽粒吸热膨胀后硬度减小,抵抗变形的能力减弱。

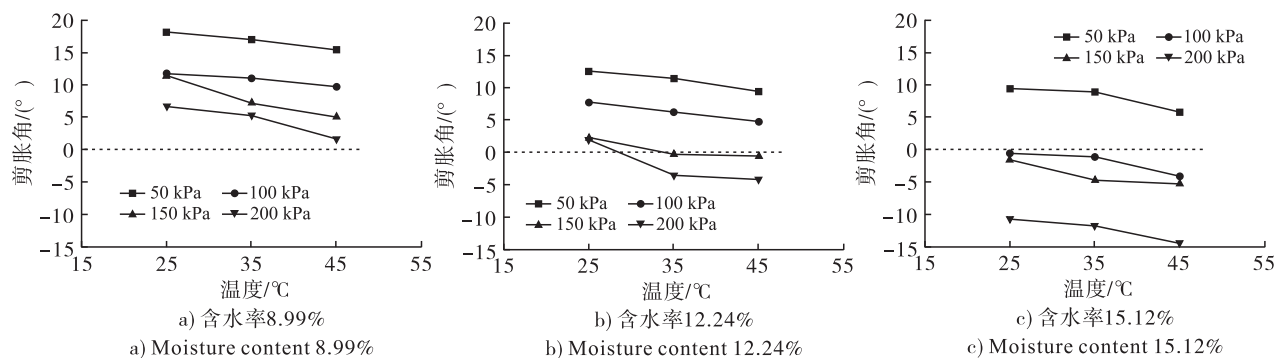


图 11 不同温度条件下大豆籽粒群剪胀角变化

Fig. 11 Variation in the shear expansion angle of soybean grain group under different temperature conditions

3 结论

(1)加装的智能温控系统升温速度快,温度监测即时高效,保温剪切盒保温效果理想,温度控制稳定,改进后的粮食温控直剪仪的功能得到较大提升,适用于各种粮食的温控直剪试验。该设备可为学生研究性试验提供设备支持,为学生科研、科技创新、工程应用等提供有力的支撑。

(2)改进后的粮食温控直剪仪可以满足不同温度条件下的粮食直剪试验需求。大豆籽粒群的内摩擦角与温度近似成反比关系,变化速率为 $-0.24 (^{\circ})/^{\circ}\text{C}$ 。内摩擦角范围为 $37.1^{\circ} \sim 44.6^{\circ}$ 。咬合应力在不同含水率条件下表现不同,其范围为 $9.6 \sim 21.2 \text{ kPa}$ 。

(3)温度升高会显著降低大豆籽粒群的剪胀性,进而直接影响仓壁侧压力的分布并增加大豆籽粒群结拱的可能性。同时温度升高亦会改变大豆籽粒群的强度特性,峰值抗剪强度、内摩擦角及咬合应力均出现了不同程度的降低,其中竖向应力越大,峰值抗剪强度受温度的影响越显著。

参考文献:

[1] MATIASKOVA L, BILCIK J, SOLTESZ J. Failure analysis of reinforced concrete walls of cylindrical silos under elevated temperatures [J/OL]. Eng Fail Anal, 2019, 109(1): 104281 [2023-07-17]. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104281>.

[2] MAJ M. Some causes of reinforced concrete silos failure [J]. Procedia Eng, 2017, 172: 685-691.

[3] 孙燕飞, 孙嘉麟. 基于美国规范的灰库温度应力有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(S1): 85-87.

[4] 李彦辉, 郭治, 安国旗, 等. 某原料筒仓框架柱裂缝原因分析[J]. 特种结构, 2020, 37(6): 42-47.

[5] 刘红波, 张智升, 陈志华, 等. 太阳辐射下钢板筒仓温

度场与温度效应研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 151-157.

[6] 马越, 杨红霞, 李盛斌, 等. 温度作用下大直径筒仓热力耦合屈曲分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(5): 37-44.

[7] 马越, 杨红霞, 李盛斌, 等. 大直径筒仓在高温贮料作用下的结构响应分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2332-2340.

[8] 马越, 杨红霞, 郭生栋, 等. 复杂温度场对筒仓静态侧压力影响的研究[J]. 空间结构, 2020, 26(3): 90-96.

[9] 杨丽平, 杨红霞, 马越. 温度附加压力下筒仓柱壳结构温度效应分析研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 110-113, 117.

[10] ZENG C N, LI X T, WANG Y K. Behaviour of the interface between stored wheat and a steel silo under static and cyclic loading conditions [J]. Biosyst Eng, 2020, 190: 87-96.

[11] ZENG C N, WANG Y K. Shear behavior of wheat-concrete interface during monotonic and cyclic loading [J/OL]. Complexity, 2019, 2019: 6792650 [2023-07-17]. <https://doi.org/10.1155/2019/6792650>.

[12] 王萌, 曾长女, 周飞, 等. 静动荷载作用下小麦剪切特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 273-280.

[13] 曾长女, 王萌, 许启铿, 等. 粮食直剪仪的改进与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 105-110.

[14] 农业农村部印发《“十四五”全国种植业发展规划》[J]. 种子科技, 2022, 40(2): 3.

[15] 何潮洪, 冯霄. 化工原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[16] 王岩, 李俊飞. 进口储备大豆安全储藏技术探析[J]. 粮油仓储科技通讯, 2022, 38(1): 45-47.

(下转第 152 页)

操作的便利,将其修正为螺杆转速 128 r/min、收敛比 6.6、分割棱厚度 3.1 mm,在此工艺条件下花生蛋白的理论平均应变速率为 50.945 s^{-1} 。

5 结论

(1)新型混炼单螺杆挤出机在混炼元件分流作用下产生了压力降,降低了螺杆的建压性能,产生一定的回流,从而延长了物料的停留时间,且此处的背压也有利于物料的压延。

(2)新型混炼元件的流场符合拉伸流变学理论中的双轴拉伸流场,因此相较于普通螺纹元件的剪切流场性能更优,分散混合性能更好。

(3)新型混炼单螺杆挤出机相较于传统单螺杆挤出机对花生蛋白的平均应变速率提高了 16.5%,说明新型混炼单螺杆挤出机在植物蛋白等相关食品加工领域中更具有优势。

(4)通过响应面试验分析,得出新型混炼单螺杆挤出机的最佳工艺参数为螺杆转速 128 r/min、收敛比 6.6、分割棱厚度 3.1 mm,在此条件下花生蛋白理论平均应变速率为 50.945 s^{-1} ,此时花生蛋白的挤出品质最佳。

参考文献:

- [1] 李振,相海,赵有斌,等. 植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(9): 67-74.
- [2] 李振,相海,任嘉嘉,等. 同向全啮合双螺杆植物蛋白挤出机不同螺杆元件的仿真分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 147-152.
- [3] 林祥,任冬云,王奎升. 基于拉伸破碎原理的单螺杆拉伸混炼元件的研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(12): 90-94.
- [4] 高岗,谢林生,马玉录,等. 不同结构单螺杆屏障混炼元件混合特性研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(9): 85-91.
- [5] 徐百平,瞿金平. 双螺杆螺棱侧间隙纯拉伸力场效应研究[J]. 现代塑料加工应用, 2005, 17(4): 48-51.
- [6] 徐文华,杨智韬,殷小春,等. 拉伸形变作用下 PLA/PBS 增韧共混物力学性能研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(1): 34-38.
- [7] 郭树国,张召,王丽艳. 基于 ANSYS 的豆粕双螺杆膨化机的三维流场分析[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 213-216, 240.
- [8] 杨威. 液滴破碎动力学特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [9] 黄磊,欧相麟,吴世见. 拉伸流场对聚合物填充体系的分散混合作用[J]. 中国塑料, 2006, 20(9): 53-58.
- [10] 郎珊珊. 双螺杆构型及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [11] 武建堂,董海洲,刘传富,等. 挤压膨化对脱脂花生粕组织化度的影响[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(8): 91-94.
- [12] 陶璵,闫宝瑞,信春玲,等. 三螺杆挤出机的建压能力与功耗特性[J]. 塑料, 2016, 45(3): 45-49.
- [13] BIRD R B, ARMSTRONG R C, HASSAGER O. Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1. Fluid mechanics [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1987.
- [14] 刘双,黄茜,陈全,等. 流变技术在高分子表征中的应用: 拉伸流变测试[J]. 高分子学报, 2023, 54(2): 286-302.
- [15] 耿孝正. 双螺杆挤出机原理及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.
- [16] 张洪才. ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] 余东泉. 三螺杆挤出机混炼性能评价及剪切-拉伸交变流场作用机制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [18] 张一惟,黄志刚,商嘉玮,等. 啮合异向双螺杆挤出机中螺杆端面结构参数对聚乳酸流场的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 71-76, 88.
- [19] 张克平,黄建龙,杨敏,等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 352-356.
- [20] 曾长女,田彦歌,宋飞如. 不同剪切速率下储仓内小麦剪胀特性的三轴实验研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 131-136.
- [21] 冯永,李萌. 改进颗粒组构力学模型模拟筒仓卸粮成拱细观机理[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 286-293.
- [22] 邵玉娴,施斌,高磊,等. 温度对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 213-217.
- [23] 李腾龙,曾长女,郭呈周. 大豆静力与动力剪切特性的试验研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 132-136.
- [24] 程绪铎,陆琳琳,石翠霞,等. 大豆内摩擦角的测定与实验研究[J]. 粮食储藏, 2010, 39(5): 12-15.
- [25] 静行,杨鹏飞,张楠,等. 大豆粮堆力学特性的直剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8): 189-193.
- [26] 张丰尧,刘克瑾,王世豪. 基于离散单元法的大豆力学特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 94-99.
- [27] 周星,王若兰,黄亚伟,等. 粮层压力对大豆堆压程度的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 1-6.

(上接第 145 页)