

温度效应下大豆动力剪切特性的试验研究

曾长女¹,周君杰¹,罗晋¹,王明轩²

(1.河南工业大学 土木工程学院,郑州 450001; 2.中建八局第三建设有限公司,南京 320100)

摘要:为了获取温度效应下大豆籽粒群的动力剪切特性,为粮仓结构设计提供理论依据,采用粮食温控静动直剪仪对大豆籽粒群进行循环剪切试验,研究温度(25、35、45℃)与初始含水率(8.99%、12.24%、15.12%)对大豆动力剪切强度特性的影响,并对大豆籽粒群循环剪切动力参数进行分析。结果表明:在初始含水率8.99%条件下,当大豆籽粒群温度由25℃升高至35、45℃时,完成循环剪切时对应的峰值剪应力分别降低2.28%、5.28%;在45℃条件下,当大豆籽粒群的初始含水率由8.89%升至12.24%、15.12%时,完成循环剪切时对应的峰值剪应力上升幅度分别为8.44%、-22.91%;随着温度升高和初始含水率增加,大豆籽粒群的剪缩现象加剧;随着初始含水率的增加,大豆籽粒群剪切刚度呈先上升后下降的变化趋势,而升高温度则使大豆籽粒群的剪切刚度单调下降;随着初始含水率的增加和温度的升高,大豆籽粒群的阻尼比总体呈降低趋势。综上,在储存大豆时,可通过控制储存环境的温湿度来保护大豆籽粒的完整性。

关键词:温控直剪仪;大豆籽粒群;循环剪切;温度;初始含水率

中图分类号:TS222+.1;TS221 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2025)04-0147-06

Experimental study on dynamic shear characteristics of soybean under temperature effect

ZENG Changnv¹, ZHOU Junjie¹, LUO Jin¹, WANG Mingxuan²

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Nanjing 320100, China)

Abstract: To obtain the dynamic shear characteristics of soybean grain group under temperature effect and provide theoretical basis for the structural design of granary, the cyclic shear test of soybean grain group was carried out by using grain temperature - controlled static and dynamic direct shear apparatus. The effects of temperature (25, 35, 45℃) and initial moisture content (8.99%, 12.24%, 15.12%) on the dynamic shear strength characteristics of soybean were studied, and the cyclic shear dynamic parameters of soybean grain group were analyzed. The results showed that under the condition of initial moisture content of 8.99%, when the temperature of soybean grain group increased from 25℃ to 35℃ and 45℃, the peak shear stress corresponding to the completion of cyclic shear decreased by 2.28% and 5.28%, respectively. At 45℃, when the initial moisture content of soybean grain group increased from

8.89% to 12.24% and 15.12%, the corresponding peak shear stress increased by 8.44% and -22.91%, respectively. With the increase of temperature and initial moisture content, the shear shrinkage of soybean grain group increased. With the increase of initial moisture content, the shear stiffness of soybean grain group increased first and then decreased, while the shear stiffness of soybean grain group decreased monotonously with the

收稿日期:2024-02-25;修回日期:2024-12-05

基金项目: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(2022ZKJCJ07);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)

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)zengcnv@126.com。

increase of temperature. With the increase of initial moisture content and temperature, the damping ratio of soybean grain group showed a decreasing trend. In summary, when storing soybean seeds, the integrity of the seeds can be protected by controlling the temperature and humidity of the storage environment.

Key words: temperature – controlled direct shear apparatus; soybean grain group; cyclic shearing; temperature; initial moisture content

粮食是人类生活不可或缺的重要物质^[1-2],由于其颗粒具有较为明显的散体结构特征^[3],专家学者通过粮食专用直剪仪开展粮食直剪试验^[4],研究粮堆的力学强度特性与内摩擦特性^[5],为粮食散料与仓储设施的相互作用数值模拟分析提供了参考^[5-8]。然而,在长期储藏过程中,粮食物料不仅受到静、动荷载交替变化的影响^[9-10],也受环境温度及自身含水率等因素的影响^[11-12],最终造成粮食强度与变形特性发生变化。针对现有粮食直剪试验无法加载循环荷载的缺陷,本课题组完成了粮食直剪仪的改进,并开展了动力加载剪切试验,对比了不同的竖向压力与孔隙率条件下大豆籽粒群力学强度特性^[13-15],同时也开展了大豆籽粒群的温控静力剪切试验^[16-17],为粮仓相关设计提供了试验参数。

目前,对于储粮过程中不利温度影响带来的温度应力与应力分布,现有研究多从仓体结构角度着手,较少考虑对仓内储粮强度变形等力学参数的影响^[18-19]。含水率和温度是影响大豆籽粒群储藏过程中力学特性的重要因素,了解这两个因素对大豆籽粒群力学特性的影响,有助于制定合理的储藏条件,保障大豆籽粒群的储存质量和储存稳定性。因此,本课题组采用自主研发的粮食温控静动直剪仪,开展了温度效应下不同初始含水率大豆籽粒群的动力剪切试验,研究了不同初始条件下大豆籽粒群的剪切强度及变形特性,旨在为粮仓结构设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黑龙江产黄大豆,籽粒饱满无霉变,初始含水率为 8.99% (GB 5009.3—2016 测得)。

粮食温控静动直剪仪(具体结构见文献[16])。

1.2 试验方法

1.2.1 动力剪切试验

在温控单调剪切试验中,大豆(含水率 8.99%)籽粒群达到峰值剪应力时的剪切峰值位移为 7 mm 左右^[18],为避免大豆试样被剪切破坏,本研究选取大豆籽粒群循环剪切位移幅值为 5 mm。循环剪切试验采用固结快剪的方式,剪切速率为 2.4 mm/min,

循环剪切次数为 10 次^[20],单次循环周期位移式循环剪切试验加载方式如图 1 所示。

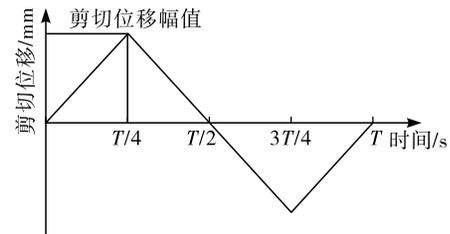


图 1 位移式循环剪切试验加载方式

Fig. 1 Loading method of displacement cyclic shear test

试验开始前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%,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,开展循环剪切试验。本研究共设计 9 个试验,将试验中大豆籽粒群的温度、初始含水率作为变化条件,设定竖向压力(100 kPa)、恒定剪切速率(2.4 mm/min)与位移幅值(5 mm),选取 25、35、45 °C 3 个温度模拟大豆在储藏、运输过程中的储粮温度^[18],具体试验方案如表 1 所示。

表 1 大豆籽粒群循环剪切试验方案

Table 1 Cyclic shear test scheme for soybean grain group

温度/°C	初始含水率/%
25	8.99、12.24、15.12
35	8.99、12.24、15.12
45	8.99、12.24、15.12

1.2.2 大豆籽粒群循环剪切的动力参数分析

通过绘制循环剪切滞回圈动力参数计算示意图(如图 2 所示),并结合动荷载下的粮食剪切刚度(G)与阻尼比(D)的计算公式,研究循环剪切时粮食抵抗变形能力与能量耗散快慢变化规律。

剪切刚度(G)的计算公式见式(1)。

$$G = \frac{G_1 + G_2}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\Delta a} \quad (1)$$

式中: G_1 与 G_2 分别为正、负剪切方向上的剪切刚度,kPa/mm; τ_1 与 τ_2 分别为正、负剪切方向上的峰值强度,kPa; Δa 为循环剪切位移幅值,mm。

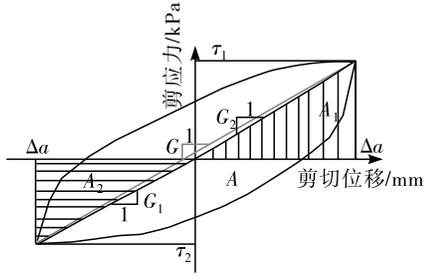


图 2 循环剪切滞回圈动力参数计算示意图

Fig. 2 Calculation diagram of dynamic parameters of cyclic shear hysteresis loop

阻尼比(D)计算公式见式(2)。

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{4\pi A_1} + \frac{A}{4\pi A_2} \right) = \frac{A}{4\pi \Delta a} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad (2)$$

式中: D_1 与 D_2 分别为正、负剪切方向上的阻尼比; A 为整个滞回圈的面积; A_1 与 A_2 分别为正、负剪切方向上阴影部分的面积。

2 结果与分析

2.1 大豆籽粒群循环剪切强度特性分析

2.1.1 剪应力曲线

不同温度、不同初始含水率条件下大豆籽粒群的剪应力曲线如图 3 ~ 图 5 所示。

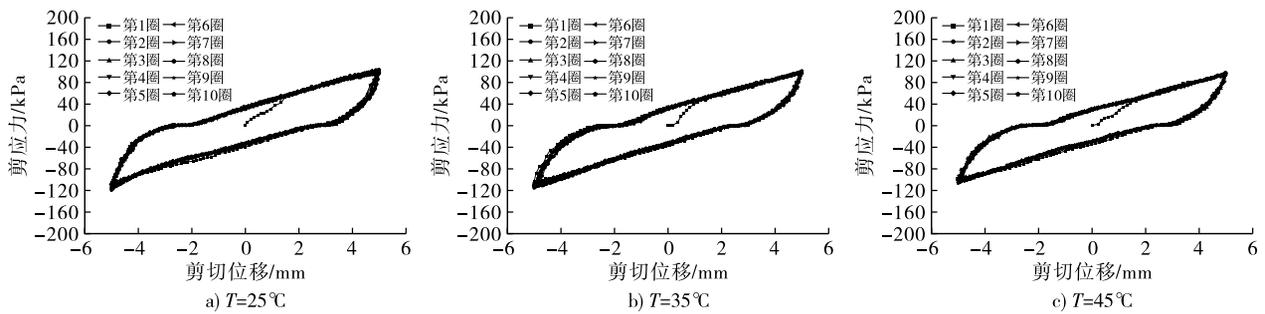


图 3 初始含水率 8.99%条件下大豆籽粒群剪应力曲线

Fig. 3 The shear stress curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 8.99%

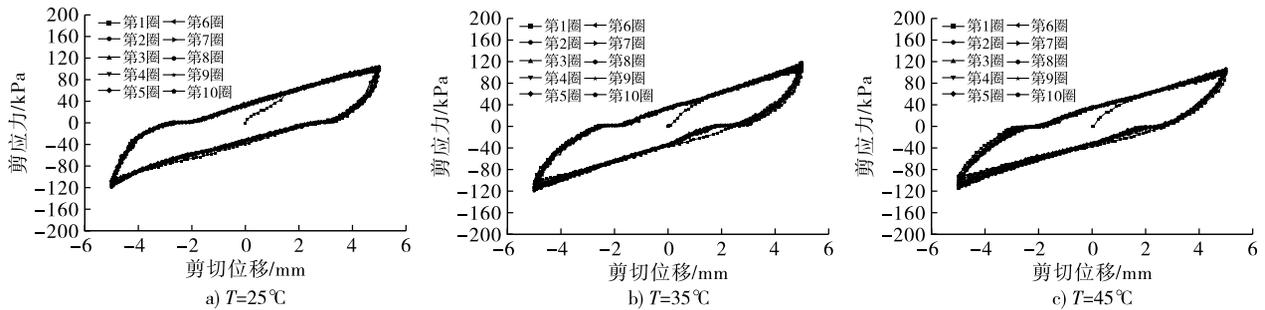


图 4 初始含水率 12.24%条件下大豆籽粒群剪应力曲线

Fig. 4 The shear stress curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 12.24%

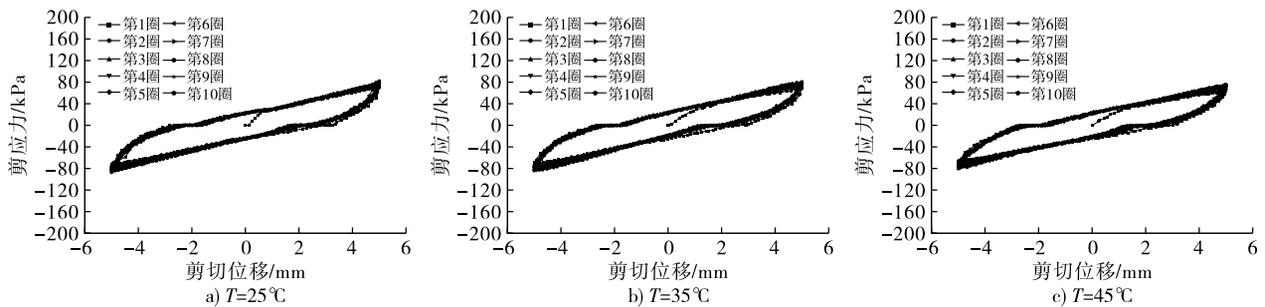


图 5 初始含水率 15.12%条件下大豆籽粒群剪应力曲线

Fig. 5 The shear stress curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 15.12%

由图 3 ~ 图 5 可看出,在同一竖向压力等级下,大豆籽粒群的剪应力曲线均呈现出良好的对称性“梭形”特征。此外,随着循环剪切次数的增加,大

豆籽粒群的剪应力 - 剪切位移滞回曲线呈现出剪应力变化幅值增加的趋势,每次循环的峰值剪应力逐渐增加。随着初始含水率的增加,滞回圈的形态由

外向内收缩的趋势逐渐明显,循环剪切过程中的峰值剪应力曲线斜率下降,由初始含水率 8.99% 到 15.12% 呈现明显的往复剪切软化现象。

为定量分析位于同一竖向压力等级下不同温度与初始含水率对大豆籽粒群剪应力的影响,绘制循环峰值剪应力与循环剪切次数曲线,如图 6 所示。

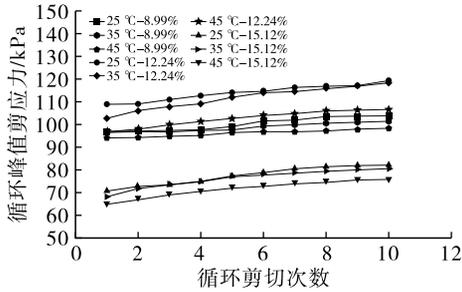


图 6 不同温度和初始含水率条件下大豆籽粒群正方向峰值剪应力曲线

Fig. 6 The positive peak shear stress curve of soybean grain group under different temperature and initial moisture content conditions

由图 6 可知:大豆籽粒群的峰值剪应力曲线在循环剪切 8 次后均趋于稳定;在大豆初始含水率相同、循环剪切 10 次时,随温度升高,大豆籽粒群循环峰值剪应力逐渐降低;在 25 °C 条件下,初始含水率 8.99%、12.24%、15.12% 的大豆籽粒群完成循环剪切时的峰值剪应力分别为 103.79、119.30、83.09 kPa,说明在同一温度下存在某一界限含水率,当大

豆籽粒群超越这一界限含水率时剪切强度骤降。本研究设定对比试验方案时,参考了王岩等^[21]提出的呼吸强度骤增的临界含水率 14%,而入仓后通常将大豆含水率维持在 13% 以内,本次循环剪切试验也验证了大豆籽粒群含水率保持在 13% 以内可提升峰值剪切强度。当温度由 25 °C 升至 35 °C 时,初始含水率 8.99%、12.24%、15.12% 的大豆籽粒群完成循环剪切时的峰值剪应力分别为 101.42、118.33、80.54 kPa,减小幅度分别为 2.28%、0.81%、3.07%;当温度由 25 °C 升至 45 °C 时,上述 3 种初始含水率的大豆籽粒群完成循环剪切时的峰值剪应力分别为 98.31、106.61、75.79 kPa,减小幅度分别为 5.28%、10.64%、8.79%。试验结果显示,温度升高时,不同初始含水率的大豆籽粒群的剪切强度均呈下降趋势,在大豆籽粒群温度从 25 °C 升至 35 °C 时剪切强度降幅较小,而升至 45 °C 时剪切强度降幅显著。综上,在本试验条件下,温度升高会带来大豆籽粒群剪应力峰值的降低,而初始含水率的升高会使大豆籽粒群剪切强度呈先增后减的规律,在储粮过程中,在荷载作用下温度与含水率均会带来一定程度的不利影响。

2.1.2 竖向位移曲线

不同温度、不同初始含水率条件下大豆籽粒群的竖向位移曲线如图 7 ~ 图 9 所示。

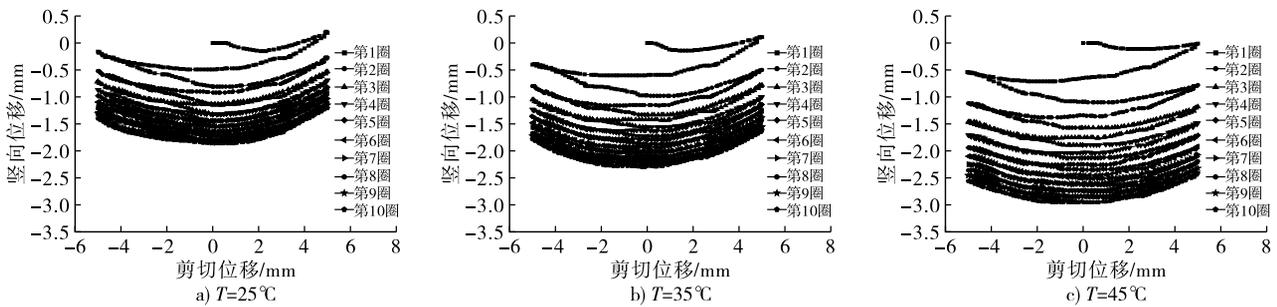


图 7 初始含水率 8.99% 条件下大豆籽粒群竖向位移曲线

Fig. 7 The vertical displacement curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 8.99%

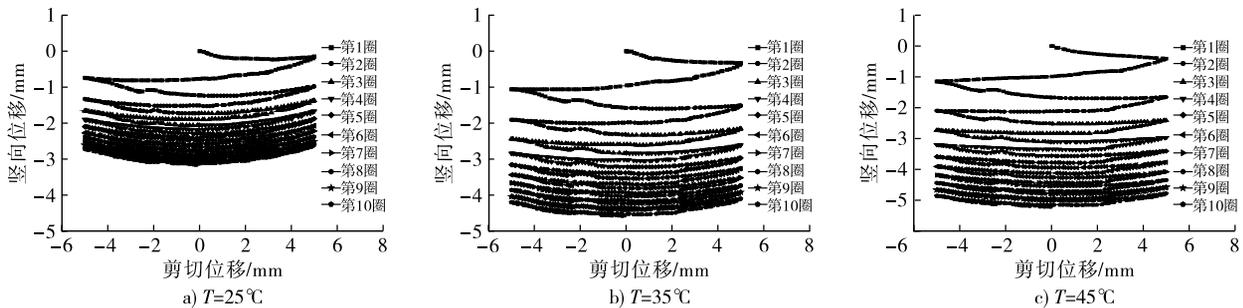


图 8 初始含水率 12.24% 条件下大豆籽粒群竖向位移曲线

Fig. 8 The vertical displacement curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 12.24%

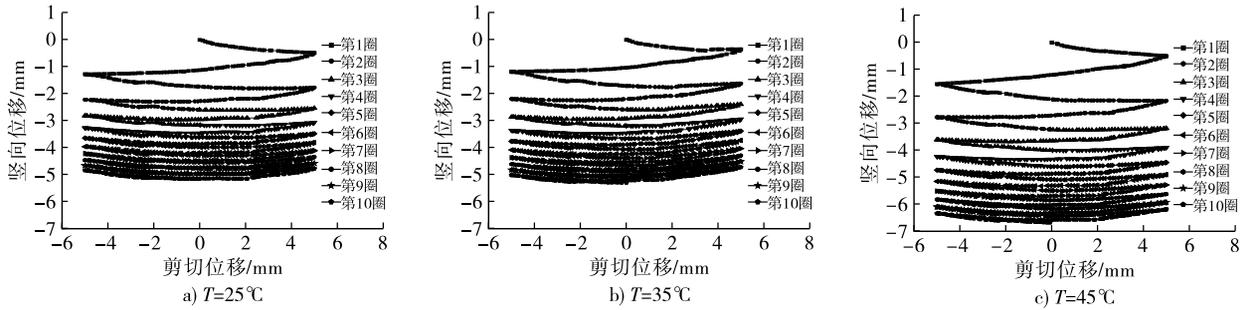


图 9 初始含水率 15.12% 条件下大豆籽粒群竖向位移曲线

Fig. 9 The vertical displacement curve of soybean grain group under the condition of initial moisture content 15.12%

由图 7 ~ 图 9 可知,大豆籽粒群在循环剪切试验中受竖向压力作用出现负的竖向位移,试样整体趋势呈现为剪缩性,在相同初始含水率下,在循环剪切初期大豆籽粒群的竖向位移随温度的升高呈现负向位移增加的趋势,即温度升高削弱了大豆籽粒群的剪胀性,加速剪缩现象的出现。在每次循环剪切过程中不同温度与初始含水率条件下的大豆籽粒群均出现先剪胀后剪缩的交替变化现象,并随着温度升高和初始含水率的增加,交替变化现象逐渐减小。同一温度与初始含水率条件下,循环剪切时大豆籽粒群剪应力由摩擦力提供,随着剪切位移的增加,大豆籽粒群颗粒受上部竖向压力作用由杂乱状态逐渐形成有序排列,大豆籽粒群表现为剪缩性。

分析图 7 ~ 图 9 试验中大豆籽粒群竖向位移 - 循环剪切次数的试验数据,绘制大豆籽粒群最终竖向位移与循环次数曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,在 45 °C 时,初始含水率 8.99%、12.24%、15.12% 的大豆籽粒群的最终竖向位移分别为 -2.95、-5.21、-6.68 mm,较 25 °C 时相同初始含水率的分别减小 1.09、2.05、1.52 mm。表明温

度升高与初始含水率增加均会加剧大豆循环剪切时的剪缩现象,且在较高初始含水率下受温度影响更为明显。

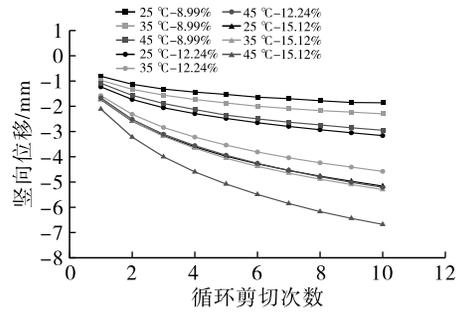


图 10 不同温度和初始含水率下大豆籽粒群正方向最终竖向位移曲线

Fig. 10 The final vertical displacement curve of soybean grain group in the positive direction under different temperature and initial moisture content conditions

2.2 大豆籽粒群循环剪切的动力参数分析

按 1.2.2 方法计算不同温度和初始含水率条件下大豆籽粒群的剪切刚度 (G) 与阻尼比 (D),并绘制大豆籽粒群动力参数 - 循环剪切次数曲线,结果如图 11 所示。

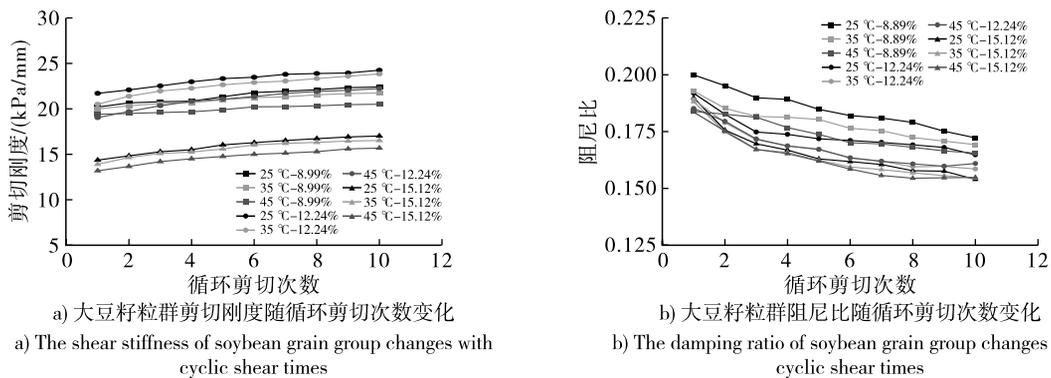


图 11 不同温度和初始含水率条件下大豆籽粒群动力参数 - 循环剪切次数曲线

Fig. 11 Curves of dynamic parameters - cyclic shear times of soybean grain group under different temperature and initial moisture content conditions

由图 11a 可知,在循环剪切过程中,大豆籽粒群的剪切刚度与循环剪切次数呈正相关,在相同温度

与循环剪切次数条件下,随着初始含水率的增加,大豆籽粒群剪切刚度呈先上升后下降的趋势,说明大

豆籽粒群抵抗变形能力随着初始含水率的增加呈先增加后减小的趋势,而在相同初始含水率和循环剪切次数条件下,升高温度则使大豆籽粒群剪切刚度单调下降,表明在循环剪切过程中大豆籽粒群抵抗大豆籽粒群变形能力随温度升高而降低,因此低温储藏与保持合适的初始含水率可提升大豆籽粒群的动力参数。

由图 11b 可知,随着循环剪切次数的增加,不同温度与初始含水率条件下大豆籽粒群的阻尼比总体表现出相同的变化趋势,即随着循环剪切次数的增加阻尼比(阻尼比小说明能量耗散慢)下降,并趋于稳定。在相同初始含水率与循环剪切次数条件下,大豆籽粒群阻尼比总体上与温度成反比;在相同温度和循环剪切次数条件下,大豆籽粒群阻尼比随着初始含水率的增加而降低。在不同初始含水率(8.99%、12.24%、15.12%)条件下,分别对应温度效应大豆阻尼比变化范围为 0.166~0.203、0.159~0.192、0.154~0.190,说明随着初始含水率的增加,能量耗散速度随大豆籽粒群温度升高而减缓。

3 结 论

(1) 利用粮食温控静动直剪仪开展的循环剪切试验中,大豆籽粒群剪应力-剪切位移滞回曲线对称性良好,峰值剪应力与循环剪切次数呈正相关并在第 8 次循环剪切后趋于稳定,随着初始含水率的增加,滞回圈形态由外向内收缩的趋势逐渐明显,峰值剪应力先升高后降低。

(2) 当温度由 25℃ 升至 35℃ 时,初始含水率 8.99%、12.24%、15.12% 的大豆籽粒群对应的峰值剪应力分别为 101.42、118.33、80.54 kPa,减小幅度分别为 2.28%、0.81%、3.07%,温度由 25℃ 升至 45℃ 时对应的峰值剪应力降幅分别为 5.28%、10.64%、8.79%。随着温度升高,大豆籽粒群抗剪切强度均呈单调下降趋势。

(3) 在 45℃ 条件下,初始含水率 8.99%、12.24%、15.12% 对应的最终竖向位移分别为 -2.95、-5.21、-6.68 mm,温度升高会削弱大豆籽粒的剪胀性,其原因为温度升高会导致大豆籽粒间的水分迁移变化,进而影响大豆籽粒间接触应力的变化,因而在较高含水率时大豆籽粒群表现出较为明显的剪缩特性。

参考文献:

[1] 郑有涛,曾剑豪,孙玉萍,等. 进口大豆储存期间品质变化研究[J/OL]. 中国油脂, 2023;1-12[2024-02-25]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230397>.

[2] 王晓东,孙凤阳,王朝辉. 储藏方式对东北地区大豆储藏品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(4): 60-64.

[3] 陈家豪,韩阳,任杰,等. 小麦堆压缩模量的三轴试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 23-28.

[4] 许启铿,王录民,王雨坤. 粮食专用直剪仪的研制[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(12): 62-64.

[5] 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.

[6] 段永辉,金南南,静行. 基于直剪试验的稻谷粮堆力学性质研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 141-147.

[7] RAMÍREZ A, MOYA M, AYUGA F. Determination of the mechanical properties of powdered agricultural products and sugar[J]. Part Part Syst Charact, 2009, 26(4): 220-230.

[8] FIGUEROA J D C, HERNÁNDEZ Z J E, VÉLES M J J, et al. Evaluation of degree of elasticity and other mechanical properties of wheat kernels[J]. Cereal Chem, 2011, 88(1): 12-18.

[9] 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.

[10] 蒋敏敏,郭祝辉. 竖向压力和剪切速率对小麦直剪强度及剪胀特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 275-280.

[11] SHI Q S. Green granary temperature control system modeling and simulation[J]. Phys Procedia, 2012, 25: 2263-2267.

[12] 王远成,余海,杨开敏,等. 仓储稻谷热湿耦合传递及黄变的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 297-307.

[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] 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.

[15] 郭呈周,周飞,曾长女. 混凝土粮仓-粮食颗粒界面静动力特性直剪试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 111-117.

[16] 曾长女,王少华,谷贺. 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[J]. 中国油脂, 2024, 49(11): 138-145,152.

[17] 王明轩. 温度效应下大豆及其与仓壁界面的静动力特性试验研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2023.

[18] 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.

[19] ZENG C N, WANG Y K. Shear behavior of wheat-concrete interface during monotonic and cyclic loading[J/OL]. Complexity, 2019, 2019: e6792650[2024-02-25]. <https://doi.org/10.1155/2019/6792650>.

[20] 刘博,李海波,朱小明. 循环剪切荷载作用下岩石节理强度劣化规律试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2033-2039.

[21] 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.