

袋装成品粮集装箱自动装卸装备末端落袋位姿仿真分析

李颖鹏, 徐雪萌*, 徐永森, 王博士, 贾世豪, 刘权
(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 解决袋装成品粮集装箱内码垛时落袋不规则、落袋点模糊影响码垛位置精度的问题。**方法** 本文采用 ANSYS/LS-DYNA 对袋装成品粮落袋过程进行仿真分析, 并搭建袋装成品粮落袋试验平台进行试验, 使用高速摄像机观察袋装成品粮落袋过程, 分析袋装成品粮输送速度、落袋高度在落袋过程中的应力分布及落袋机理, 确定最大等效应力出现的区域以及最佳落袋参数组合, 验证仿真研究的准确性。**结果** 仿真结果表明, 袋装成品粮在离地 600 mm 跌落后水平位移相对较少, 且输送速度越小成品粮跌落后的水平位移越小。成品粮跌落冲击地面时, 所受冲击应力集中在下层中部。**结论** 堆垛码垛系统水平运输, 输送速度为 0.7~1.0 m/s、输送高度为 200 mm 时袋装成品粮能够被水平推送出输送带末端, 输送速度为 0.3 m/s、输送高度为 600 mm 时袋装成品粮翻转落袋到地面姿态最佳, 且在水平方向上的平均位移最小, 满足袋装成品粮集装箱自动装卸装备的末端落袋工作要求。有限元模型与实际落袋位姿情况基本符合, 对袋装成品粮集装箱自动装卸装备的末端落袋位姿分析具有一定的参考。

关键词: 袋装成品粮; 码垛; 有限元; ANSYS/LS-DYNA; 位姿分析

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0256-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.025

Simulation Analysis of Bag Drop Positions at the End of Automatic Loading and Unloading Equipment for Bagged Finished Grain Containers

LI Yingpeng, XU Xuemeng*, XU Yongsen, WANG Boshi, JIA Shihao, LIU Quan

(School of Electromechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of irregular bag drop and fuzzy bag drop point affecting the accuracy of palletising position during palletising of bagged finished grain containers. ANSYS/LS-DYNA was adopted to simulate and analyse the bagging process of bagged grains and set up a bagged grain bagging test platform for testing. A high-speed camera was employed to observe the bagging process of bagged grains, analyse the distribution of stress and bagging mechanism of bagged grains, conveying speed and bagging height in the process of bagging, and determine the region where the maximum equivalent force occurred, as well as the optimal combination of bagging parameters. Then, the accuracy of the simulation was verified. According to the simulation results, the horizontal displacement of the bagged grains was relatively less when it fell 600 mm from the ground, and the smaller the conveying speed was, the smaller the horizontal displacement of the grains after falling was. When the finished grains fell to the ground, the impact stress was concentrated in the middle of the lower layer. When the stacking and palletising system adopts horizontal transport, the bagged grains can be pushed out of the end of the conveyor belt horizontally when the conveying speed is 0.7~1.0 m/s and the conveying height is 200 mm, and the bagged grains can be turned over and dropped to the ground when the conveying

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 国家十四五重点研发计划“粮食物流多式联运高效衔接装备研发与示范”(2022YFD2100200)

*通信作者

speed is 0.3 m/s and the conveying height is 600 mm, which is the best dropping position, and the average displacement is the smallest in the horizontal direction, meeting the requirements of the end-drop bag work for the automatic loading and unloading equipment of bagged grain container. The finite element model is basically consistent with the actual bag drop position, which is a reference for the analysis of the end bag drop position of automatic loading and unloading equipment for the bagged grain container.

KEY WORDS: bagged finished grain; palletising; finite element; ANSYS/LS-DYNA; position analysis

推动粮食物流发展对保障国家粮食安全、加快粮食产业高质量发展具有重要的引领和支撑作用^[1-3]。集装箱装卸是成品粮物流链的关键环节,高效的码放装卸技术及装备将会提升粮食物流总体水平^[4-5]。目前国内成品粮集装箱车内码放装卸大多依靠人工,存在码放效率低、成本高、劳动强度大等问题^[6-7]。随着粮食物流装备智能化、信息化的推进,成品粮智能码放装卸装备的研发与推广对粮食跨储粮生态区长运距多式联运高效衔接技术提升具有重要意义^[8-10]。

码垛位置精准化控制是成品粮装车拆垛关键技术之一。本文以我校团队开发的袋装成品粮集装箱智能装卸装备中堆码拆垛装置为研究对象,研究成品粮在输送带末端堆码落袋的位置精度。堆码位置精度可能由多种因素决定,如输送带运行速度、输送带与车厢底部的距离等,这些问题不仅影响装备的正常工作进程,还可能导致码垛过程中码垛失败、袋子的破损和物料的泄漏^[11]等严重后果,给企业带来诸多不便与损失。因此,解决袋装成品粮集装箱智能装卸装备在输送带末端落袋中的不规则落袋问题,对于提高袋装成品粮集装箱智能装卸装备的码垛稳定性和效率,以及保障码垛质量和安全具有重要意义。

本文对落袋姿态这一问题进行深入分析,确定袋装成品粮输送抛落过程中出现落袋不规则现象的影响因素以及最佳落袋姿态参数。对于袋装成品粮在输送末端的跌落情况,利用 ANSYS Workbench 进行仿真分析,以模拟实际运输过程中可能出现的工况^[12]。本文根据输送带输送袋装成品粮自由落袋的特征,以市场上最常见的 25 kg/袋的袋装成品粮为实验研究对象,对袋装成品粮落袋过程建立有限元模型,并通过试验验证模型的准确性,使用高速摄像机观察袋装成品粮落袋过程,分析袋装成品粮输送速度、落袋高度在落袋过程中的应力分布及落袋机理,确定最大等效应力出现的区域以及最佳落袋参数组合,以实现快速装车,提高装车运输效率、减少装卸过程中破袋等现象^[13-14],并进行试验以及方差分析,获得影响因素对袋装成品粮输送抛出时落地不规则现象的影响显著性和影响规律,以及最优作业参数组合;提出相应的解决方案和改进建议,旨在为袋装成品粮集装箱智能装卸装备提供参考,推动袋装成品粮集装箱智能装卸装备的持续发展。

1 袋装成品粮集装箱智能装卸装备及工作原理

1.1 袋装成品粮集装箱智能装卸装备工作原理与落袋分析

1.1.1 袋装成品粮集装箱智能装卸装备工作原理

袋装成品粮集装箱自动装卸装备基于模块化设计理念^[15],大致将整机分为智能行走系统、输送系统和堆码拆垛系统 3 大部分。如图 1 所示,智能行走系统包括车架,用于袋装成品粮集装箱自动装卸装备的智能移动。输送系统包括旋转移送装置以及设于旋转移送装置上的前伸缩输送装置,用于驱动伸缩输送装置升降和横移;旋转装置以及设于旋转装置上的后伸缩输送装置设于车架上。旋转装置连接前伸缩输送装置、后伸缩输送装置 2 节伸缩输送机构。

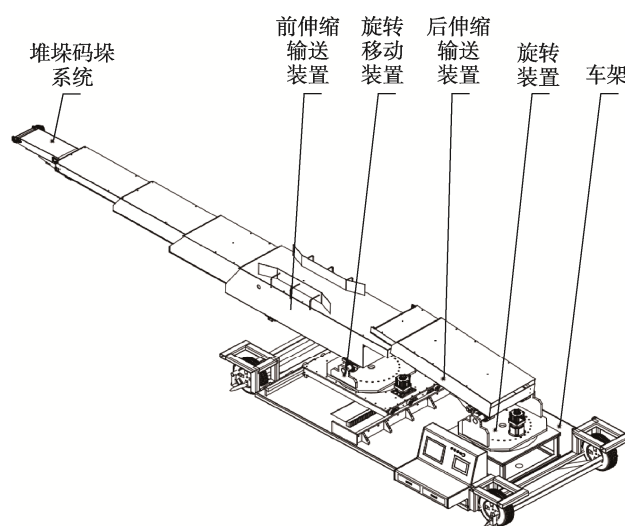


图 1 袋装成品粮集装箱自动装卸装备
Fig.1 Automatic loading and unloading equipment for bagged finished grain containers

装货时, 2 节伸缩输送机构的输出端可伸展到伸缩输送机构的输入端上方, 通过 2 节伸缩输送机构上的袋装输送件放置于伸缩输送机构的输入端上完成输送作业, 当袋装成品粮到达堆码码垛系统时进行落袋码垛操作。

本文主要研究的是堆码拆垛系统的落袋情况。堆

垛码垛系统是袋装成品粮集装箱智能装卸装备实现袋装成品粮落袋码垛的机构,主要由前后驱动组件、输送带、左右摆架、与装备连接的安装架组成,整体结构如图2所示,在工作过程中,袋装成品粮集装箱智能装卸装备的袋装成品粮输送到堆垛码垛系统后,堆垛码垛系统经过左右摆架与上下液压支架调节机构,使得袋装成品粮在水平状态下通过皮带传送和前后驱动组件以不同速度实现袋装成品粮的输送抛落,无需人工码放。

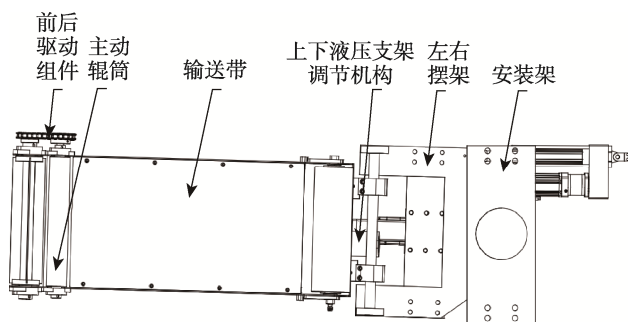


图2 堆垛码垛系统的结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of stacking and palletising system structure

1.1.2 输送过程中袋装成品粮的力学分析

袋装成品粮通过袋装成品粮集装箱自动装卸装备末端输送进入堆垛码垛系统后,在移动输送机构上的传送带上匀速运输,此时袋装成品粮处于平衡状态,只受到自身重力 G 与支持力 F_N 作用,不受传送带带来的摩擦力作用。袋装成品粮沿着输送带进行相对匀速运动,到达移动输送机构末端后,会在惯性力的作用下进行抛袋动作。此时空中的袋装成品粮只受到自身重力作用自由下落,袋装成品粮在不同时刻的受力分析如图3所示。

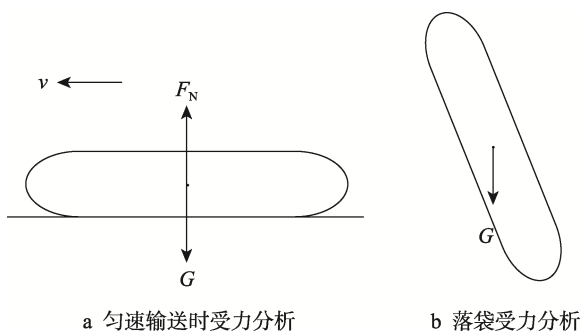


图3 袋装成品粮在不同时刻的受力分析
Fig.3 Analysis of stress on bagged finished grains at different moments

1.2 袋装成品粮输送落袋过程动力学仿真及模态分析

1.2.1 袋装成品粮形态及袋装成品粮动力学特性

为了研究袋装成品粮在输送末端抛出后落袋过程中的应力和变形,本文基于 ANSYS Workbench/LS-DYNA

对袋装成品粮在输送末端的抛出落袋过程进行显式动力学仿真分析。本研究所使用的袋装成品粮样品为五得利生产的25 kg袋装成品粮小麦粉,如图4所示,随机选取5袋袋装成品粮进行形态数据测量。



图4 25 kg袋装成品粮实物图
Fig.4 Physical drawing of 25 kg bagged finished grains

1.2.2 袋装成品粮柔性体建模

根据袋装成品粮形态数据,在 SolidWorks 建立三维模型,袋装成品粮尺寸为750 mm×450 mm×120 mm。集装箱智能码垛机构输送末端1次只能抛送1件25 kg规格袋装成品粮。整个袋装成品粮三维模型及尺寸如图5所示。将 SolidWorks 建立的三维模型以(.x_t)格式保存,并导入 ANSYS Workbench/LS-DYNA。

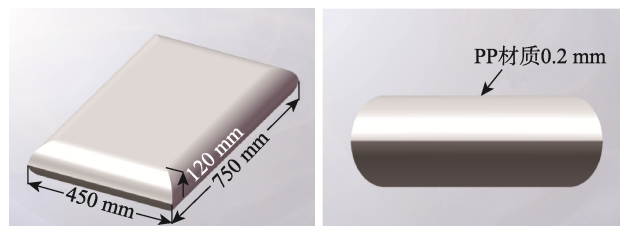


图5 单个袋装成品粮三维模型及尺寸
Fig.5 3D model and dimension of bagged finished grains

为了最大程度上接近袋装成品粮从输送机上抛落的真实效果,需要对袋装成品粮、集装箱底面设置准确的模型材料密度、弹性模量、泊松比等材料力学特性参数,依次定义材料的密度、弹性模量、泊松比等参数。查阅相关资料,袋装成品粮的塑料编织袋选用聚丙烯(PP)材质,其具有强度高、弹性好、耐磨、耐腐蚀等特点。结合文献[16]对粉体颗粒仿真参数的设置,本研究中各仿真参数的变化范围如表1所示。结合粉体仿真相关文献[17],模拟所需小麦粉本征参数设定为:泊松比0.25、小麦粉剪切模量 4.0×10^7 Pa。面粉经过压实后,面粉的密度会增加,一般可以达到 $0.6 \sim 0.8$ g/m³。经测量,25 kg的袋装成品粮小麦粉密度值为690 kg/m³。

袋装成品粮的包装塑料编织袋使用的PP材料的材料属性在Workbench中用Workbench材料库里的材料来定义,其密度为903.4 kg/m³。由于码垛场景在集装箱内,所以跌落面采用默认结构钢。结构钢材料属性直接从ANSYS材料库中选取。

表 1 袋装成品粮整袋材料属性
Tab.1 Material properties of whole bags of bagged finished grains

仿真参数	数值
小麦粉密度/(kg·m ⁻³)	690
小麦粉泊松比	0.2~0.4
小麦粉剪切模量/Pa	1.1×10 ⁷ ~6.0×10 ⁷
聚丙烯密度/(kg·m ⁻³)	903.4
聚丙烯泊松比	0.407 8
聚丙烯杨氏模量/Pa	1.461×10 ⁹
结构钢密度/(kg·m ⁻³)	7 850
结构钢泊松比	0.3
结构钢杨氏模量/Pa	2.0×10 ¹¹
聚丙烯薄膜袋-刚体静摩擦系数	0.2~0.6

有限元分析的精确性、收敛性及高效性与网格划分质量息息相关，因此需要严格控制网格划分质量。对袋装成品粮进行网格划分，在 DM 中对袋装成品粮弯曲抛送部分进行切片处理并将切片后的各部分放入同一 Part 中，以使划分后的网格在各部分连接处能够保证共节点。为了保证仿真结果的精度并减少仿真计算时间，在网格划分时，采用拉格朗日-欧拉耦合算法计算袋装成品粮在冲击地面时的变形过程，袋装成品粮采用自动网格划分方法进行网格划分，因为中间部位为受力变形区，所以进行加密处理；划分结果如图 6 所示。刚体部分网格仅有显示作用，不参与计算，划分结果共有 24 097 个网格节点，93 655 个网格单元，网格平均质量 0.861 11，网格质量较好，满足计算需求。

1.2.3 添加约束

在袋装成品粮运输过程中，其前进速度与输送机构速度一致，输送过程可视为袋装成品粮在输送机构中由一侧运动至另一侧，之后被抛出输送带跌落地面，选用仿真软件的显式动力学模块对袋装成品粮进行落袋模拟及分析。主要从袋装成品粮抛送不同姿态开始，到袋装成品粮在不同高度、不同初速度下抛出进行仿真，对比观察落袋过程中应力-应变情况，找到袋装成品粮跌落的最佳姿态部位，并检验袋

装成品粮跌落的可靠性。考虑袋装成品粮抛出时的运动状态，对袋装成品粮抛出前与输送带接触的袋身施加水平的惯性速度，对袋装成品粮施加自身重力加速度，添加接触特性，将自动接触定义为全面接触。

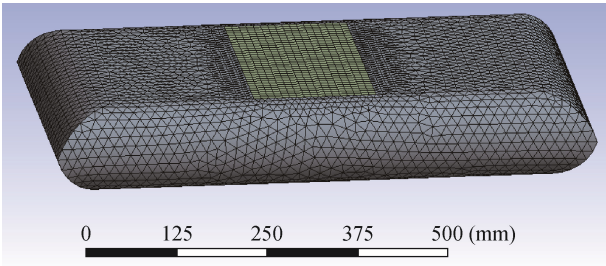


图 6 袋装成品粮网格划分
Fig.6 Grid division of bagged finished grains

2 落袋仿真试验

2.1 落袋仿真设计

使用高速摄像机分别对输送带在 0.3、0.5、0.7、1.0 m/s 输送速度下袋装成品粮的跌落姿态进行拍摄，获取不同输送速度下的跌落平均角度，袋装成品粮落袋前的姿态如图 7a 所示，经测量，在 0.3 m/s 输送时袋装成品粮以 78.56°跌落、在 0.5 m/s 输送时袋装成品粮以 72.66°跌落、在 0.7 m/s 输送时袋装成品粮以 66.72°跌落、在 1.0 m/s 输送时袋装成品粮以 63°跌落。袋装成品粮落袋中的姿态如图 7b 所示，经测量，在 0.3 m/s 输送时袋装成品粮以 54°跌落、在 0.5 m/s 输送时袋装成品粮以 64°跌落、在 0.7 m/s 输送时袋装成品粮以 69°跌落、在 1.0 m/s 输送时袋装成品粮以 75°跌落。

分别对高度为 600 和 800 mm 情况下的袋装成品粮进行落袋仿真，仿真时间为 0.5 s。通过后处理模块 LS-PREPOST 观察整个模型的落袋过程，提取相关结果信息，分析落袋数据及袋装模型随时间变化的位移分布情况，并输出相应曲线。

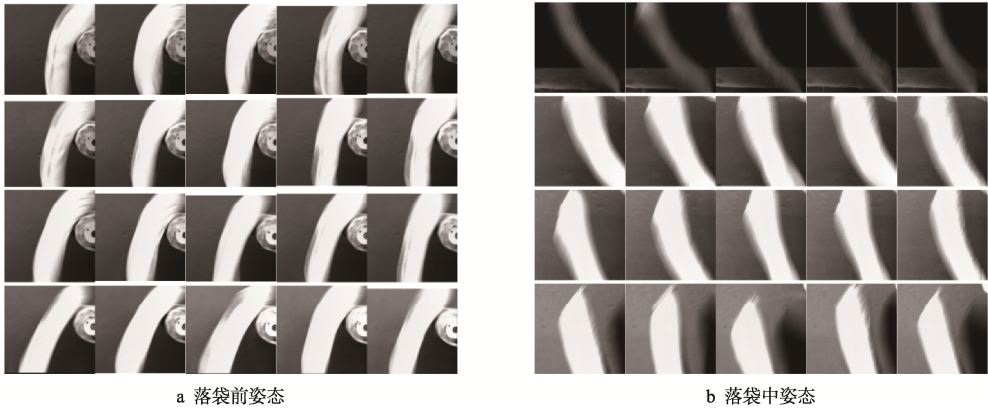


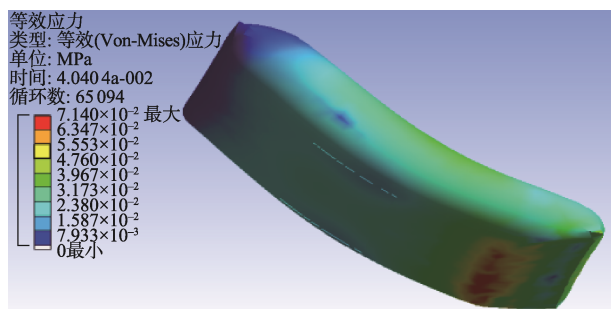
图 7 不同输送速度下的落袋角度
Fig.7 Bag drop angle at different conveying speed

2.2 落袋仿真结果分析

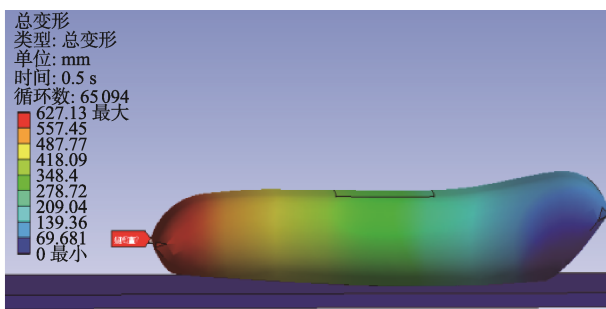
跌落过程中设定物体从一定的高度自由下落,此设定可以模拟袋装成品粮在输送末端时的下降速度,本模型袋装成品粮在离地 600 mm 时初始下落速度为 3.43 m/s, 800 mm 时初始下落速度为 3.96 m/s; 袋装成品粮袋子与小麦粉之间的接触设置为摩擦接触 (Friction), 接触面为非线性实体接触; 接触面均采用主-从面接触。整个有限元仿真采用 ANSYS 软件中

的 LS-DYNA 模块进行。

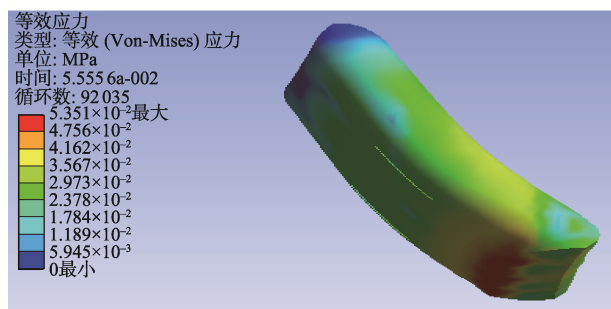
假设袋装成品粮在跌落过程中受到输送带推出的惯性力影响,施加一个水平方向的力。受到重力因素的影响,等效于自由落体运动。为提高计算效率,可以采用等效高度为 600 mm,等效初速度为 3 430.4 mm/s,以不同跌落角度向集装箱面向下掉落。在重力作用下,施加的重力加速度为 $9\,806.6\text{ mm/s}^2$ 。对地面施加固定约束,求解时间设置为 5 ms。求解后查看袋装成品粮的等效应力和总变形量,如图 8a~8d 所示。



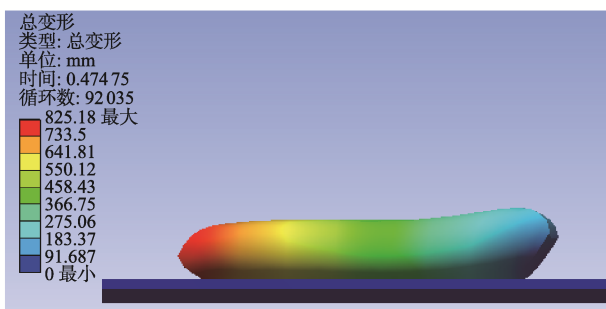
a1 54° 600 mm 等效应力云图



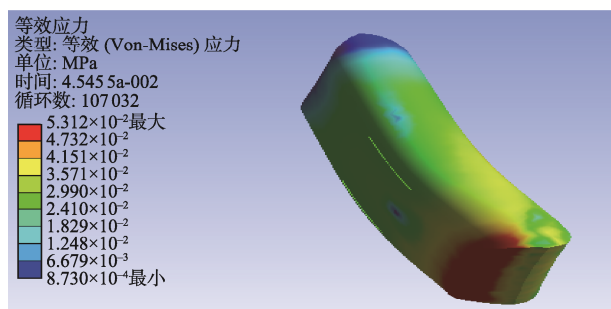
a2 54° 600 mm 总变形量云图



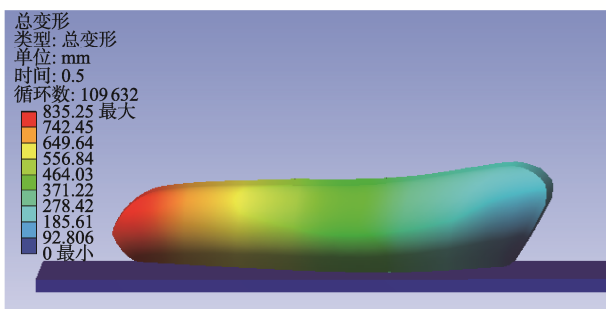
b1 64° 600 mm 等效应力云图



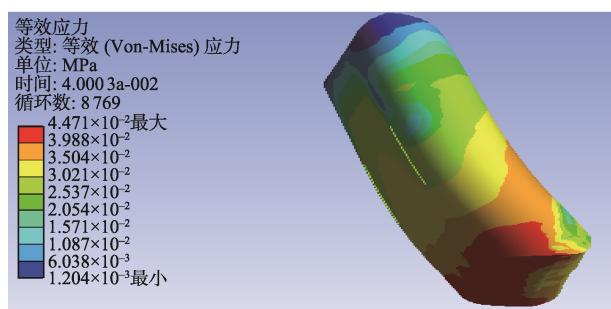
b2 64° 600 mm 总变形量云图



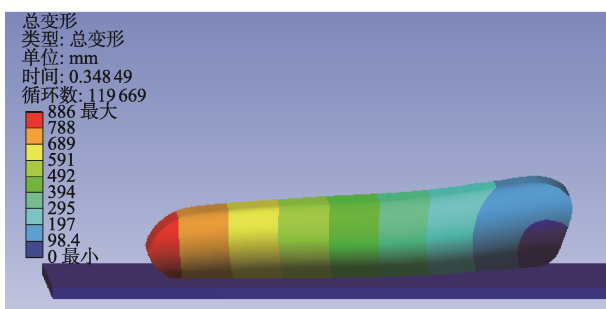
c1 69° 600 mm 等效应力云图



c2 69° 600 mm 总变形量云图



d1 75° 600 mm 等效应力云图



d2 75° 600 mm 总变形量云图

图 8 袋装成品粮离地 600 mm 时不同角度跌落仿真分析结果

Fig.8 Simulation analysis results of bagged finished grains falling from 600 mm at different angles

袋装成品粮离地 600 mm 以不同角度跌落仿真分析结果显示,产生等效应力最大值的点位于袋装成品粮落地先接触地面位置,最大等效应力值在 54°跌落时,为 0.071 40 MPa。当袋装成品粮在离地 600 mm 以 54°跌落时,也就是输送带以 0.3 m/s 的惯性速度抛出袋装成品粮落后水平位移量最小,当输送带以 1.0 m/s 的惯性速度抛出袋装成品粮以 75°落后水平位移量最大,并且落袋后的惯性力并未消失,如图 9 所示。

当袋装成品粮从 800 mm 处跌落时,等效初速度为 3 961.1 mm/s,以不同跌落角度向集装箱面向下掉落。在重力作用下,施加的重力加速度为 9 806.6 mm/s²。对地面施加固定约束,求解时间设置为 5 ms。求解后查看袋装成品粮的等效应力和总变形量,如图 10a~10d 所示。

袋装成品粮离地 800 mm 以不同角度跌落仿真分析结果显示,产生等效应力最大值的点位于袋装成品粮落地先接触地面位置,最大等效应力值在 54°跌落时,

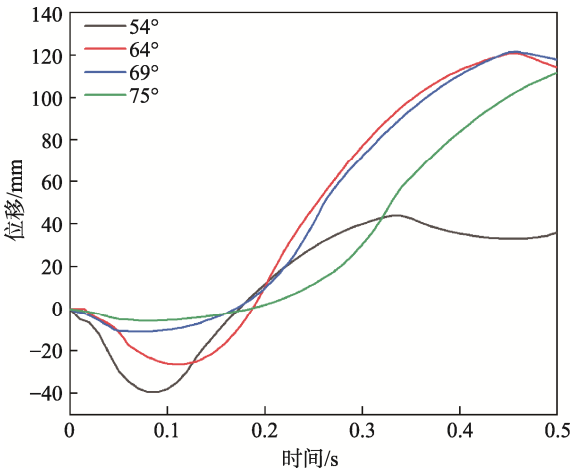


图 9 袋装成品粮离地 600 mm 以不同角度跌落后袋装成品粮水平位移

Fig.9 Horizontal displacement of bagged finished grains falling from 600 mm at different angles

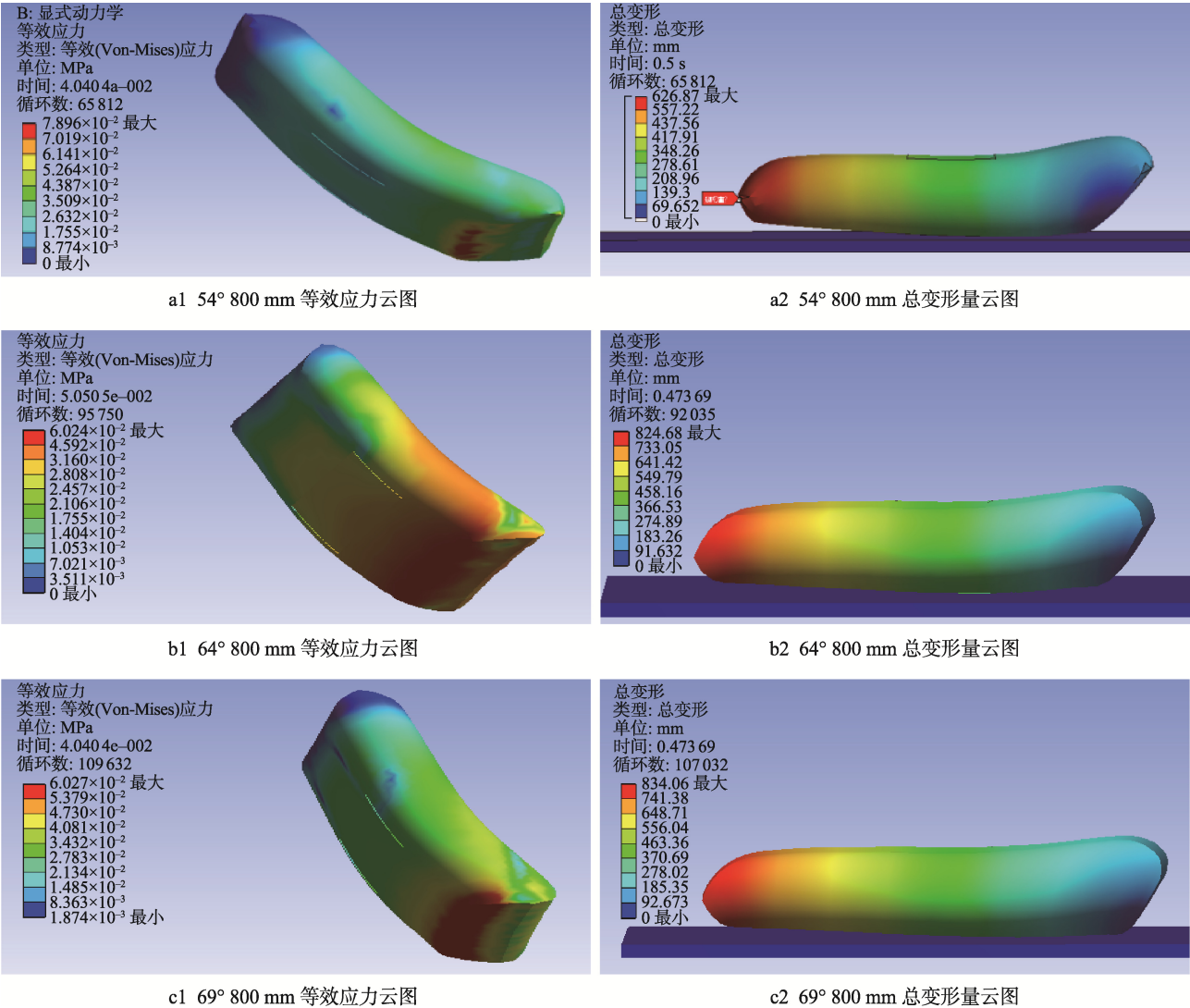
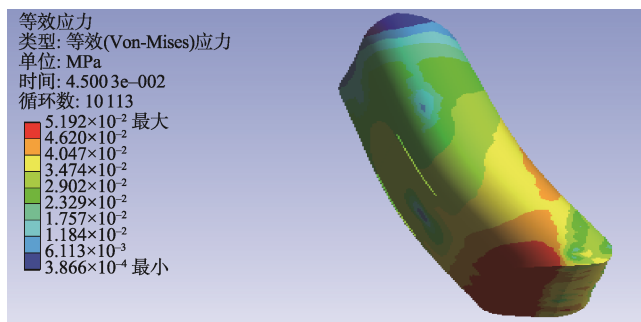
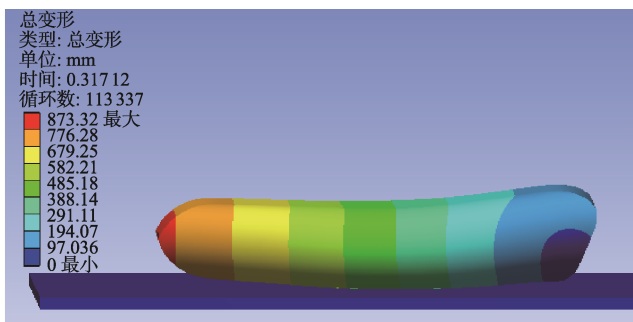


图 10 袋装成品粮离地 800 mm 时不同角度跌落仿真分析结果
Fig.10 Simulation analysis results of bagged finished grains falling from 800 mm at different angles



d1 75° 800 mm 等效应力云图



d2 75° 800 mm 总变形量云图

图 10 (续) 袋装成品粮离地 800 mm 时不同角度跌落仿真分析结果

Fig.10 Simulation analysis results of bagged finished grains falling from 800 mm at different angles

为 0.078 96 MPa。当袋装成品粮在离地 800 mm 以 54° 跌落时, 也就是输送带以 0.3 m/s 的惯性速度抛出袋装成品粮, 跌落落后水平位移量最小, 当输送带以 1.0 m/s 的惯性速度抛出袋装成品粮以 75° 跌落落后水平位移量最大, 并且落袋后的惯性力并未消失, 如图 11 所示。

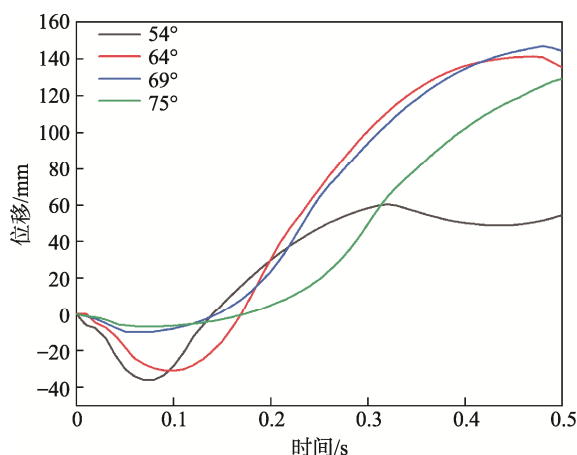


图 11 袋装成品粮离地 800 mm 以不同角度跌落后水平位移

Fig.11 Horizontal displacement of bagged finished grains falling from 800 mm at different angles

高度下袋装成品粮包装袋具有良好的防护性能, 满足码垛要求。



图 12 变频输送机

Fig.12 Inverter conveyor



图 13 高速摄像机

Fig.13 High speed camera

3 试验方案设计与结果分析

3.1 方案设计

根据实际生产情况下袋装成品粮抛送后的跌落要求, 选用变频输送机进行袋装成品粮的跌落测试, 高速摄像机用来收集分析输送机末端落袋数据。高速摄像机能够在产品跌落过程中捕捉到产品落袋的瞬间变化, 以便后期对产品受力情况进行分析, 试验所用装备如图 12、图 13 所示。试验开始前需根据跌落工况选择并调整输送机离地高度; 试验结束后利用数据处理软件选取合适时间阶段得到的落袋姿态, 并与仿真数据进行对比分析。若未发生破损, 则证明在此

3.2 结果分析

由图 14 可以看出, 试验和仿真图片的落地姿态变化趋势一致, 且不同跌落工况下的最大变形均小于试验结果。仿真得到的时间—位移图与试验得到变形图基本一致, 满足落袋参考需求。试验和仿真所得的跌落姿态变形未完全重合, 在允许范围之内, 说明仿真具有可靠性。袋装成品粮在高处落袋的试验方案及结果如图 14 与表 2 所示。可以看出: 在袋装成



图 14 输送机离地 200、400、600、800 mm 时
不同输送速度的落袋状况
Fig.14 Bag drop condition at different conveying
speed when the conveyor is 200, 400,
600 and 800 mm from the ground

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Experimental scheme and results

输送速度/(m·s ⁻¹)	离地高度/mm	落袋情况	落袋后位移/mm
0.3	200	水平推送	-20
0.5	200	水平推送	-5
0.7	200	水平推送	0
1.0	200	水平推送	0
0.3	400	翻袋成功	100
0.5	400	翻袋成功	160
0.7	400	翻袋失败	208
1.0	400	翻袋失败	240
0.3	600	翻袋成功	9
0.5	600	翻袋成功	57
0.7	600	翻袋成功	188
1.0	600	翻袋成功	300
0.3	800	翻袋成功	23
0.5	800	翻袋成功	93
0.7	800	翻袋成功	163
1.0	800	翻袋成功	286

品粮离地 200 mm 高度时以不同输送速度送袋的过程中, 袋装成品粮会被水平推出, 适合平稳推送码垛; 在袋装成品粮离地 400 mm 高度时以不同输送速度送袋的过程中, 袋装成品粮会出现袋装成品粮翻袋进行一半或翻袋失败的情况, 严重影响后续码垛工艺; 在袋装成品粮离地 600、800 mm 高度时以不同输送速度送袋的过程中, 袋装成品粮会完美翻袋落到地面, 翻袋最为成功。

4 结语

本文针对袋装成品粮在输送机上输送作业时产生跌落姿态这一问题, 利用仿真分析与试验相结合, 以减小输送跌落过程中袋装成品粮所受最大碰撞接触力, 得出落袋最优参数组合。首先应用 SolidWorks 和 ANSYS 建立袋装成品粮仿真模型。采用有限元仿真分析, 主要模拟袋装成品粮在输送机末端的抛袋跌落, 可能出现因输送机输送参数问题引起的袋装成品粮跌落姿态不规则的现象。分析结果表明: 1) 袋装成品粮离地 200 mm 高度下输送速度越快, 袋装成品粮的卸料成功率越高, 当速度>0.7 m/s 时落袋姿态最优。2) 袋装成品粮离地 400 mm 高度下, 袋装成品粮的卸料成功率为 0, 会发生卡袋、翻袋未完全等情况。3) 袋装成品粮离地 600、800 mm 高度下, 输送速度越小, 袋装成品粮成功实现翻袋并且翻袋后水平位移最低, 当速度<0.5 m/s 时落袋姿态最优且不会发生包装袋损坏, 包装具有很好的防护效果。

参考文献:

[1] 吴志华, 任星宇. 中国粮食物流 2022 年回顾与 2023 年展望[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(3): 63-67.
WU Z H, REN X Y. 2022 Review and 2023 Prospect of China's Grain Logistics[J]. Food Science and Technology and Economy, 2023, 48(3): 63-67.

[2] 吴志华, 王国祥. 近十年中国粮食物流发展回顾[J]. 中国粮食经济, 2023(5): 47-51.
WU Z H, WANG G X. Review of the Development of Grain Logistics in China in the Past Ten Years[J]. China Grain Economy, 2023(5): 47-51.

[3] 李伟. 关于打造“齐鲁粮油”公共品牌引领山东粮油产业高质量发展的路径研究[J]. 中国粮食经济, 2020(4): 13-14.
LI W. Study on the Path of Creating "Qilu Cereals and Oils" Public Brand to Lead the High-quality Development of Shandong Cereals and Oils Industry[J]. China Grain Economy, 2020(4): 13-14.

[4] 陈来柏, 曹宝明, 高兰. 中国粮食物流发展现状及存在问题分析[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(2): 11-14.
CHEN L B, CAO B M, GAO L. The Development and Problems of China's Grain Logistics[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2016, 41(2): 11-14.

[5] 冯春, 周浩, 向长琼, 等. “北粮南运”散粮集装箱质量安全运输优化研究[J]. 粮食储藏, 2021, 50(2): 10-16.
FENG C, ZHOU H, XIANG C Q, et al. Optimization of Quality and Safety Transport of Bulk Grain Containers in "North Grain South Transport"[J]. Grain Storage,

- 2021, 50(2): 10-16.
- [6] 王春红. 基于流通市场化视角的粮食运输问题及解决措施分析[J]. 现代食品, 2022, 28(19): 1-3.
WANG C H. Analysis of Grain Transportation Problems and Solution Measures Based on the Perspective of Marketization of Distribution[J]. Modern Food, 2022, 28(19): 1-3.
- [7] 李继春, 邢虎松. 我国内贸集装箱多式联运创新发展对策研究[J]. 中国经贸导刊, 2022(6): 42-44.
LI J C, XING H S. Research on Innovative Development Countermeasures of China's Domestic Trade Container Multimodal Transport[J]. China Economic & Trade Herald, 2022(6): 42-44.
- [8] 段天卓. 高速装车机的设计与优化[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021: 10-14.
DUAN T Z. High-speed Loading Machine Design and Optimization[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021: 10-14.
- [9] 黄朋, 邓援超. 饲料自动装车机方案设计及应用[J]. 饲料工业, 2015, 36(13): 10-12.
HUANG P, DENG Y C. Design and Application of Automatic Feed Loading Machine Scheme[J]. Feed Industry, 2015, 36(13): 10-12.
- [10] 于娟. 促进我国铁路集装箱多式联运发展的政策建议[J]. 中国物价, 2022(10): 121-123.
YU J. Policy Suggestion for Promoting the Development of Chinese Railway Container Intermodal Transportation[J]. China Price, 2022(10): 121-123.
- [11] 王浩. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 中国新技术新产品, 2018(3): 109-110.
WANG H. Industrial Robot Technology Development and Application of Review [J]. New Technology & New Products of China, 2018(3): 109-110.
- [12] 朱景山, 习赵军, 吴仲达, 等. 水囊组合件空投跌落冲击仿真及优化设计[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 307-313.
ZHU J S, XI Z J, WU Z D, et al. Airdrop Impact Simulation and Optimization Design of Water Sac Assembly[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 307-313.
- [13] 中国工业机器人行业市场需求现状分析[J]. 电器工业, 2021(6): 44-47.
Market Demand Analysis of China's Industrial Robot Industry[J]. China Electrical Equipment Industry, 2021(6): 44-47.
- [14] HOSKE M T. Industrial Robot Trends and Types[J]. Control Engineering, 2015, 62(7): 30-31.
- [15] KUBOTA F I, CAUCHICK-MIGUEL P A, HSUAN J, et al. Modularity in Design and Production Relationships: A Field Study in Two Automakers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(5): 1589-1606.
- [16] 吴国荣. 我国粮食包装的历史、现状及发展[J]. 塑料包装, 1999, 9(4): 11-15.
WU G R. History, Current Situation and Development of Grain Packaging in China[J]. Plastics Packaging, 1999, 9(4): 11-15.
- [17] 王依, 李永祥, 徐雪萌. 小麦粉螺旋输送荷电特性数值分析[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 51-56.
WANG Y, LI Y X, XU X M. Numerical Analysis of Charged Characteristics of Wheat Flour in Spiral Transport[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(5): 51-56.