

中文引用格式:崔鹏程,何晓伟,陈鑫,等. 平房仓粮堆埋入事故人体受力仿真分析[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7):151-158.

英文引用格式:CUI Pengcheng, HE Xiaowei, CHEN Xin, et al. Simulation analysis of human pressure during accident of people entrapped in warehouse grain mass[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 151-158.

平房仓粮堆埋入事故人体受力仿真分析*

崔鹏程^{1,2}助理研究员,何晓伟³高级工程师,陈鑫^{1,2}助理研究员,

张涛^{1,2}副研究员,张晋宁¹助理研究员,佟瑞鹏^{**4}教授

(1 国家粮食和物资储备局科学研究院,北京 100037;2 粮食储运国家工程研究中心,

北京 100037;3 国家粮食和物资储备局储备安全和应急物资保障中心,北京 100834;

4 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083)

中图分类号:X954

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0145

资助项目:国家粮食和物资储备局科学研究院结余课题经费项目(JY2305)。

【摘要】 为预防平房仓粮堆埋入事故的发生,保护作业人员生命安全,采用工程离散元法(EDM)仿真模拟人体压力分布。首先,选取软球颗粒模型和基础颗粒接触模型 Hertz-Mindlin(无滑动)构建小麦、玉米和稻谷籽粒模型,并耦合多体动力学与 EDM 软件构建人体多部位受力模型;其次,综合事故发生场景和计算量等因素构建事故区域模型,设定模拟参数;最后,完成颗粒运动过程模拟和人体表面压力分析,并开发粮堆埋入事故的人体受力分布测量装置。结果表明:不同粮种作业人员被埋的时间略有差异,由小到大依次为小麦<玉米<稻谷;人体表面压力最大值可达 1.4×10^6 Pa,各部位表面最大压力波动剧烈;小麦仓加权求和最大压力平均值为 9 864 Pa,玉米仓为 8 255 Pa,稻谷仓为 7 283 Pa。压力分布数据可为事故预防和安全培训提供参考,也为防护装置的研发提供思路。

【关键词】 平房仓; 粮堆埋入事故; 人体受力; 离散元法(EDM); 颗粒模型

Simulation analysis of human pressure during accident of people entrapped in warehouse grain mass

CUI Pengcheng^{1,2}, HE Xiaowei³, CHEN Xin^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2},

ZHANG Jinning¹, TONG Ruipeng⁴

(1 Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;

2 National Engineering Research Centre of Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China;

3 National Food and Strategic Reserves Administration Reserve Security and Emergency

Strategic Support Center, Beijing 100834, China; 4 School of Emergency Management and

Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to prevent the accident of people entrapped in the grain mass of warehouse and protect the life safety of workers, the discrete element engineering EDM(EDM) method was proposed to simulate the distribution of human body pressure. Firstly, the soft sphere particle model and the basic particle contact model Hertz-Mindlin (no slip) were selected to construct the wheat, corn and rice grain particle models, and the multi-body pressure model of the human body was constructed by coupling multi-

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0151-08; 收稿日期:2025-03-10; 修稿日期:2025-05-20

** 通信作者:佟瑞鹏(1977—),男,黑龙江穆棱人,博士,教授,主要从事行为安全管理、职业心理健康、环境风险评估等方面的研究。

E-mail:tongrp@cumt.edu.cn.

body dynamics and EDEM. Secondly, the accident area model was constructed and the simulation parameters were set considering the factors such as accident scene and calculation amount. Finally, the simulation of particle motion process and the analysis of human body surface pressure were completed, and the human body force distribution measuring device of people entrapped in the grain mass was developed. The results show that the buried time of different grains is slightly different, with wheat being less than corn and less than rice. The maximum pressure on the surface of the human body can reach 1.4×10^6 Pa which fluctuates violently. The average maximum pressure of the weighted sum of the wheat warehouse is 9 864 Pa, that of corn warehouse is 8 255 Pa, and that of rice warehouse is 7 283 Pa. The pressure distribution data provides a reference for accident prevention and related safety training, and provides ideas for the development of protective devices.

Keywords: warehouse; accident of people entrapped in grain mass; human pressure; discrete element method (DEM); granular model

0 引言

习总书记强调“国家粮食安全这根弦什么时候都要绷紧,一刻也不能放松”^[1]。粮食作为关系国计民生的重要物资,具有特殊战略意义。我国各类粮食产量稳步增长,谷物供应基本自给。同时,现代化仓储设施不断完善,机械化作业水平大幅提高,粮食储备能力显著增强^[2]。粮食平房仓作为储存粮食的单层房屋建筑^[3],因其投资造价低、使用灵活、清扫翻倒粮堆方便等优点^[4]得到广泛应用,总量占全国粮食仓储设施的78%左右^[5]。但近年来,在粮食出入平房仓过程中,粮堆埋人发生率较高^[6],因此,研究平房仓粮堆埋人事故人体受力情况,对于提高粮库保管员安全意识、预防事故发生和研发防护救援装备具有重要意义。

粮堆埋人事故指粮库保管员因违规作业或仓储设施突然崩塌导致的陷落、滑落、坠落至粮堆内部的伤亡事故,持续时间短、人员生还率低^[7]。张涛等^[8]从物的不安全状态、人的不安全行为和组织行为3个方面分析事故原因。范华胜^[9]发现,仓房出粮时形成的粮坑和作业人员违规作业是发生粮堆埋人的主要原因,并提出从管理和现场作业2个角度开展预防;吴少堂等^[10]分析得到事故原因主要包括人员违章和仓房结构垮塌。杨振和等^[11]通过作业条件危险性分析法(Likelihood-Exposure-Consequence Method, LEC)法分析了粮堆埋人事故的危险程度,并从粮仓设计、安全防护用品、人员培训等方面提出预防措施。国外相关学者也分析并测试了粮堆埋人的救援策略和所用救援装备的安全性能等^[12-13]。1971年,CUNDALL提出离散元法(Discrete Element Method, DEM)的概念^[14]后,颗粒流理论已经广泛应用于地震滑坡^[15]、机械设计^[16]、

岩石力学特性^[17]等方面。粮食流动既区别于连续介质的流动,也无法还原为单个籽粒的固有属性,因此,可看做颗粒流问题。MARKAUSKAS等^[18]利用基于GPU矩阵运算的快速离散元法(Fast GPU Matrix Computing of Discrete Element Method, MaTDEM)构建了多种玉米籽粒模型并分析了模型在筒仓内滚动时的压力分布情况。CHEN Zhengpu等^[19]结合直接测量和校准测试确定了玉米和小麦粒的DEM模拟材料和相互作用特性;PETINGCO等^[20]确定了颗粒形状和接触参数对模拟小麦堆积密度的影响,开发了有效的可用于离散元模拟的小麦颗粒模型。目前,离散元模拟多采用颗粒流程序(Particle Flow Code, PFC)系列软件和工程DEM(Engineering DEM, EDEM)分析软件。EDEM相较于PFC,支持多种三维建模软件,更简单的操作界面兼顾更多的模拟颗粒数。刘强等^[21]利用EDEM软件模拟探究了粮食立筒仓卸料的侧压力分布规律和筒仓的成拱机制。游礼国^[22]通过比较EDEM模拟和相关实验结果,验证了圆台深仓侧压力的计算公式,提出了深浅仓的划分标准。

综上,以往的研究多为定性分析事故原因、特点和预防措施,缺乏定量分析事故过程中人体所受的的压力,无法明确致死原因。为此,鉴于DEM在粮食仓储籽粒构建和压力分布模拟中的优势,应用EDEM软件,建立不同粮种出仓模型,模拟平房仓粮堆埋人事故发生过程,探究人体受力规律,为防护装置的研发提供思路,以期降低平房仓粮堆埋人事故的发生概率,保护作业人员生命安全。

1 DEM

1.1 基本原理

DEM最早应用于岩土力学,是一种计算非连续

流体介质系统的力学行为数值仿真方法,基本思想是跟踪计算和不断迭代若干满足力学和运动方程,且具有一定质量刚性颗粒的运动状况,从而求解颗粒加速度、速度、位移和受力等,进而得到物体的运动形态^[23]。

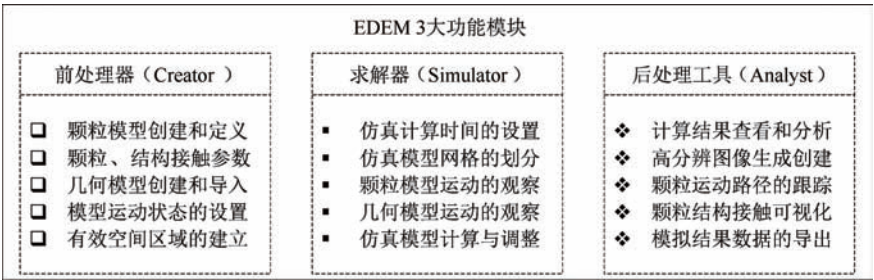


图 1 EDEM 的 3 大功能模块

Fig. 1 EDEM three functional modules

1.3 接触模型

颗粒有 2 种主要的接触模型,分别为硬球模型^[24]和软球模型,其中硬球模型适用于稀疏颗粒间的瞬时碰撞。所采用的粮食颗粒符合软球模型特征,因此,采用 EDEM 软件默认软球模型中的基础颗粒接触模型 Hertz-Mindlin (无滑动),用于粮食颗粒接触设置,此模型将颗粒间接触力分为法向力和切向力。具体公式如下:

$$F_n = \frac{4}{3}E\sqrt{R}\sqrt{\delta_n^3}$$
$$F_t = -8G\sqrt{R\delta_n}\delta_t$$
$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}\sqrt{S_n m}v_n^{rel}$$
$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}\sqrt{S_t m}v_t^{rel}$$

(1)

式中: F_n 为法向力,N; E 为等效弹性模量,Pa; R 为等效粒子半径,m; δ_n 和 δ_t 分别为法向重叠量和切向重叠量,m; F_t 为切向力,N; G 为等效剪切模量,Pa; F_n^d 和 F_t^d 分别为法向阻尼力和切向阻尼力,N; e 为常数,其值为 2.718 28; S_n 和 S_t 分别为法向刚度和切向刚度,N/m; m 为等效质量,kg; v_n^{rel} 和 v_t^{rel} 分别为相对速度的法向分量值和切向分量值,m/s。

2 离散元模型的构建

2.1 平房仓事故区域模型的构建

《粮食平房仓设计规范》^[3]规定,平房仓跨度不宜小于 18 m,廐间长度不宜小于 18 m,散粮平堆高

1.2 EDEM 软件

EDEM 是由英国 DEM-Solutions 公司研发的离散元分析软件,为粒子流的运动、热量和能量传递等问题提供有效解决途径,其主要的 3 个功能模块如图 1 所示。

度不宜小于 6 m。鉴于平房仓粮堆埋入事故多发生在出粮口上方粮堆附近,且考虑到颗粒数量和计算能力等因素,笔者仅模拟事故发生区域内的粮堆流动情况,去除多余存粮区域,构建的平房仓事故区域如图 2 所示,模型几何参数见表 1。



图 2 平房仓事故区域构建

Fig. 2 Construction of warehouse accident area

表 1 平房仓事故区域模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of warehouse accident area model

accident area model					m
模型高度	模型长度	模型宽度	出粮口长度	出粮口宽度	
3	4	2.5	0.4	0.3	

2.2 粮食颗粒模型的构建

在考虑单球模型和多球模型对模拟效果的影响后,选取小麦、玉米、稻谷颗粒分别 150 粒,根据粮食颗粒的形状、体积和长短轴等参数,分别构建多球组合颗粒模型,并完成颗粒的粗化。小麦、玉米、稻谷颗粒模型见表 2。

2.3 人体受力模型的构建

构建的人体模型身高 1.75 m,体质量 80 kg,将人体表面划分成众多刻面网格(图 3),计算人体表

面与颗粒间接触压力,各部位质量见表 3。

表 2 小麦、玉米、稻谷颗粒模型

Table 2 Wheat, corn and rice particle model					
粮食种类	形状	大小/mm	颗粒数量/个	颗粒组合	粗化倍数
小麦	椭球型	长轴:6.5; 短轴:3.5	3		5
玉米	类马齿型	长:14.2; 宽:9.7; 高:4.2	5		2.5
稻谷	椭球型	长轴:7.2; 短轴:3.1	3		10

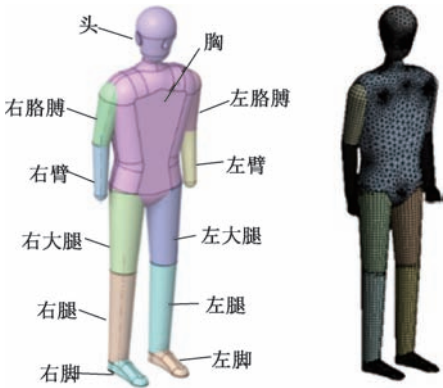


图 3 人体模型构建和网格划分

Fig.3 Human body model construction and grid division

表 3 人体各部位质量

Table 3 Weight of each part of human body					
序号	部位	质量/kg	序号	部位	质量/kg
1	头	3.52	7	左大腿	8.72
2	左大臂	2.12	8	右大腿	8.72
3	右大臂	2.12	9	左小腿	4.28
4	左小臂	1.2	10	右小腿	4.28
5	右小臂	1.2	11	左脚	1.52
6	胸	40.8	12	右脚	1.52
合计		80 kg			

人体在平房仓中埋入时,受重力、颗粒阻力和压力等合力作用,呈现多体动力学运动特征,因此,需构建人体多体动力学模型,如图 4 所示。

EDEM-机械系统动力学自动分析 (Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems, ADAMS) 耦合原理如图 5 所示,运用 ADAMS 软件,提取人体质心处的 x 、 y 、 z 方向上的平移位移和转动位移, EDEM 计算颗粒和人体力与力矩,由此实现离散元-多体的耦合过程。

2.4 仿真参数的设定

仿真过程中,忽略粮食品种间的各项参数数值

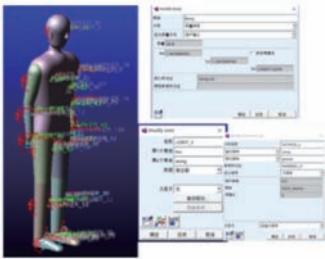


图 4 人体多体动力学模型构建(部分设置)

Fig.4 Construction of human multi-body dynamics model (partial settings)

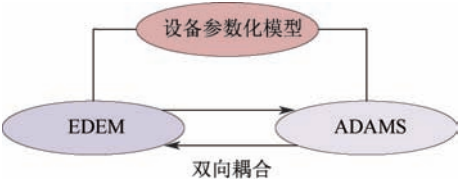


图 5 EDEM-ADAMS 耦合原理

Fig.5 EDEM-ADMAS coupling principle

差异、颗粒间的变形和表面黏结力,以及杂质和水分对流动状态模拟的影响,选用 Hertz-Mindlin (无滑动) 接触模型,重力加速度为 9.81 m/s^2 。其他仿真参数参考相关文献^[25-27],见表 4。

表 4 模拟参数设置

Table 4 Simulation parameter settings				
粮食种类	小麦	玉米	稻谷	粮仓
泊松比	0.25	0.23	0.4	0.33
弹性模量/MPa	600	298	110	3 000
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 460	1 140	970	2 600
颗粒间恢复系数	0.5	0.56	0.6	—
颗粒与仓壁间恢复系数	0.6	0.66	0.6	—
颗粒间静摩擦因数	0.33	0.31	0.5	—
颗粒与仓壁间静摩擦因数	0.4	0.4	0.3	—
颗粒间滚动摩擦因数	0.05	0.38	0.16	—
颗粒与仓壁间滚动摩擦因数	0.03	0.22	0.01	—

3 人体受力仿真分析

3.1 颗粒运动过程

在模拟中,为更清晰地反映作业人员陷入粮堆的整个过程和所受压力大小,设置出粮口出粮速度为 20 t/h ,模拟过程如图 6 所示。多次模拟仿真分析可知:平房仓粮库作业人员因违章作业坠入动态粮堆时,随着出粮口持续出粮,小麦、玉米、稻谷逐步呈锥形下沉,作业人员被动态粮堆吞噬,身体迅速被

埋入粮堆内部。不同粮种作业人员被埋的时间略有差异,小麦平均 55 s、玉米 62 s,稻谷 100 s 时,作业人员脚底到达模拟事故区域的底部并几乎完全被掩埋。这种差异主要源于不同粮种颗粒之间、颗粒与筒仓之间的摩擦因数不同。

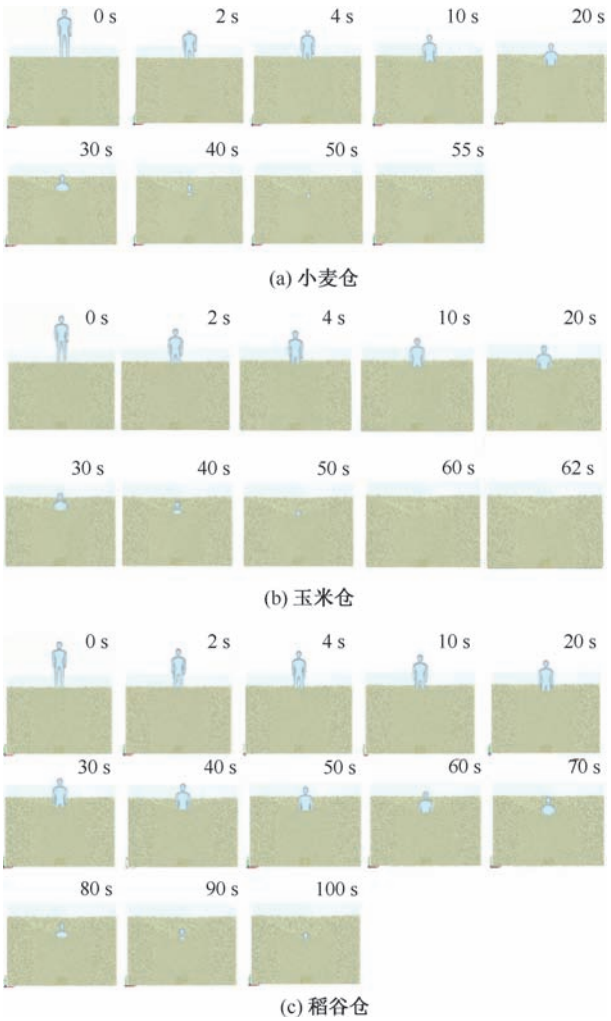


图 6 平房仓粮堆埋人事故模拟过程

Fig. 6 Simulation process of people entrapped in grain mass of warehouse

3.2 人体表面压力分析

从仿真模拟结果中提取人体被埋入过程中各部位表面的最大压力,即仓内粮食颗粒对人体形成的侧压力的大小,并绘制表面最大压力-时间曲线,如图 7 所示。由图 7 可知:表面压力最大值可达 1.4×10^6 Pa,且各部位表面最大压力呈现剧烈波动。这主要是因为粮食颗粒与均匀流体不同,颗粒之间存在较大的缝隙,作用力非连续,与人体表面的接触是非均匀的,因此,可能导致某一位置压力较大,进而作用于人体表面网格。

计算人体各部位加权求和压力,公式如下:

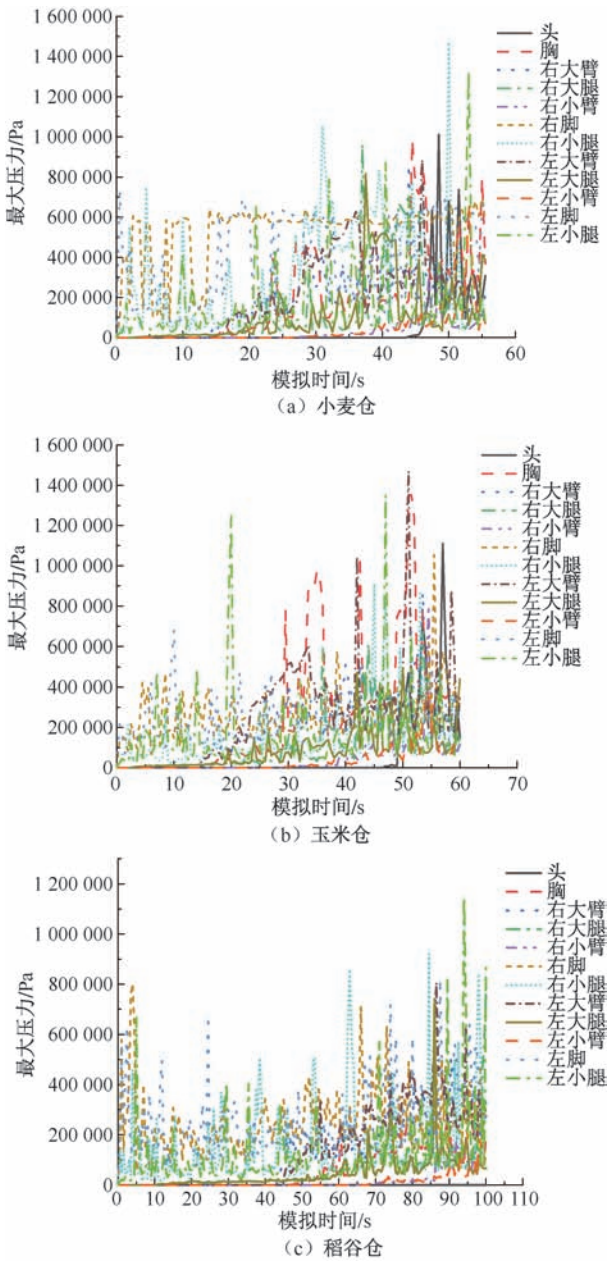


图 7 埋人事故人体各部位最大压力历程

Fig. 7 Maximum pressure time history of each part of human body in entrapped accident

$$P = \sum \frac{P_i \times A_i}{A} \tag{2}$$

式中: P 为加权求和压力; i 为不同部位; P_i 为人体表面不同剖面网格上所受到的压力; A_i 为剖面面积; A 为部位总面积。

根据公式计算形成压力-时间曲线,如图 8 所示,由图 8 可知:3 个粮种的仓发生粮堆埋人事故后,同一时刻人体各部位的加权求和压力由大到小为脚部>小腿>大腿>手臂≈胸>头部,这主要与人体埋入粮堆的深度有关;另外,随着时间推进,各部分

随着被埋入粮堆的高度压力逐渐增大。

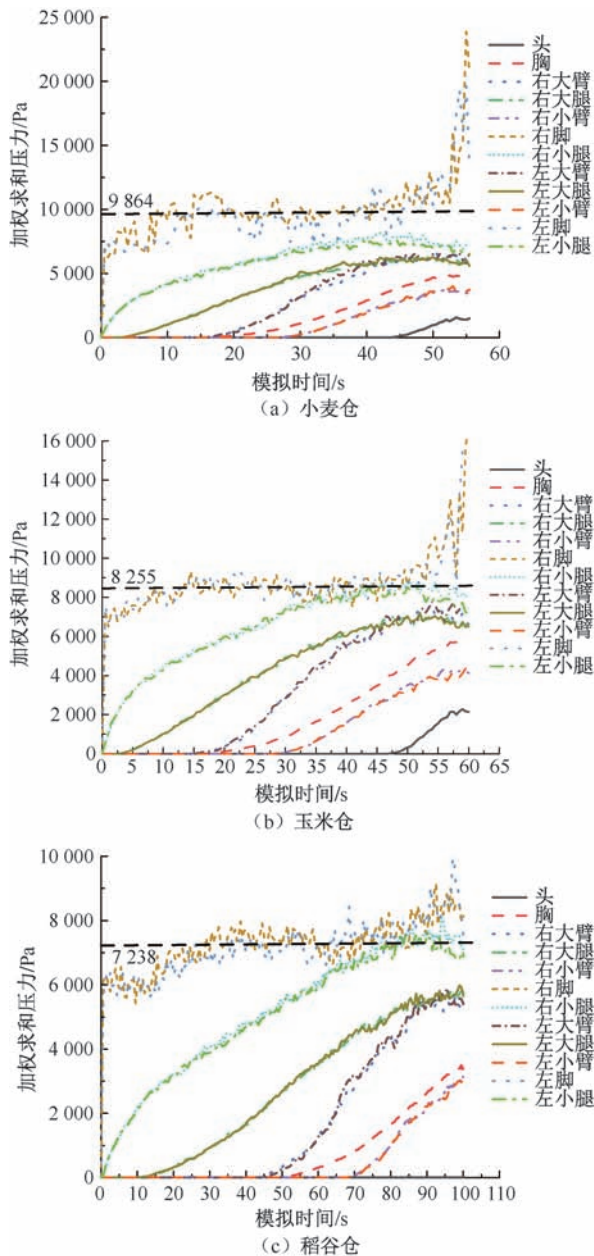


图8 埋入事故人体各部位压力-时间曲线

Fig.8 Pressure-time curves of each part of human body in entrapment accident

小麦仓加权求和最大压力平均值为 9 864 Pa,玉米仓为 8 255 Pa,稻谷仓为 7 283 Pa。这是因为在模拟接触参数设定时,小麦的密度大于玉米,玉米的密度大于稻谷。

同时,不同仓的压力数据在后期有明显增高,这主要是因为此时人体脚部已经到达所构建事故区域模型的底部。

3.3 实仓验证

为实仓测试平房仓出粮过程中粮堆埋人时人体

作用力的分布规律,开发了模拟粮堆埋入事故的人体受力分布测量装置,其原理结构和装置如图 9 所示。



图9 人体受力分布测量装置

Fig.9 Human body force distribution measurement device

设备由模拟假人①、压力传感②-⑦、电缆⑧和数据接收器⑨组成。模拟假人按成年男性标准设置;压力传感器采集粮堆对假人的压力数据;电缆负责为压力传感器供电和传输信号;数据接收器包含电路主板、供电模块、存储模块、接线端子和扩展接口等。电路主板配备定时发射器,定期向压力传感器发送信号;传感器采集数据后,经电缆传输至存储模块,存储模块可储存测试数据,并可通过接线端子将数据传输至扩展模块;供电模块为各模块提供电能。

选取江苏省某粮库 42 号小麦仓进行装置测试,如图 10 所示。分析采集到的数据,结果与模拟数据基本一致,验证了装置的实用性和模拟数据的可靠性和有效性。



图10 实仓测试

Fig.10 Full-scale warehouse test

4 结 论

1) 仿真模拟结果显示,出粮过程中,粮食呈锥形下沉,作业人员被吞噬。不同粮种仓房作业人员被埋的时间略有差异,埋入过程中人体表面压力最大值可达 1.4×10^6 Pa。

2) 文中所提出的各部位加权求和压力的方法,

能够解决模拟中压力剧烈波动问题,得出小麦仓加权求和压力平均值为 9 864 Pa,玉米仓为 8 255 Pa,稻谷仓为 7 283 Pa。

3) 开发的模拟粮堆埋人事故的人体受力分布测量装置,以江苏某粮库为例验证,结果证明该模拟装置具有一定的可靠性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 中共中央党史和文献研究院. 习近平关于国家粮食安全论述摘编[M]. 北京: 中央文献出版社, 2023: 11.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的粮食安全[EB/OL]. (2022-07-04). http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2019n/202207/t20220704_130643.html.
- [3] GB 50320—2014, 粮食平房仓设计规范[S].
GB 50320-2014, Code for design of grain storehouses[S].
- [4] 陈峰, 梁晓华. 粮食平房仓仓型的研究分析[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(5): 66-69.
CHEN Feng, LIANG Xiaohua. Analysis and research on the type of grain storehouse[J]. Cereal & Food Industry, 2017, 24(5): 66-69.
- [5] 马爱平. 全国粮食标准仓房完好仓容超 7 亿吨[N]. 科技日报, 2024-5-31(5).
- [6] 吴子丹, 何毅. 粮油仓储企业安全生产事故案例分析与防范[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 1-2.
- [7] 任丽辉, 林琳, 王赫, 等. 基于工业工程方法的粮堆埋人事故的风险识别与分析[J]. 粮食加工, 2020, 45(6): 77-80.
REN Lihui, LIN Lin, WANG He, et al. Risk identification and analysis of grain burying accidents based on industrial engineering method[J]. Grain Processing, 2020, 45(6): 77-80.
- [8] 张涛, 李娜, 杨振和, 等. 粮堆坍塌事故安全隐患分析与防范管理[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(1): 88-91.
ZHANG Tao, LI Na, YANG Zhenhe, et al. Analysis of potential hazard and precaution on grain pile collapse[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(1): 88-91.
- [9] 范华胜. 粮食储藏过程中危险因素及安全防护措施[J]. 粮食储藏, 2012, 41(2): 13-16.
FAN Huasheng. Dangerous and harmful factors and safety protection measures in grain storage[J]. Grain Storage, 2012, 41(2): 13-16.
- [10] 吴少堂, 胡小中, 刘继辉. 粮食仓储行业安全生产现状及对策分析[J]. 粮食问题研究, 2018(5): 12-16.
WU Shaotang, HU Xiaozhong, LIU Jihui. Analysis on the status and countermeasures of safe production in grain storage industry[J]. Grain Issues Research, 2018(5): 12-16.
- [11] 杨振和, 苏振华, 王东. 粮库进出粮人员伤害事故风险分析及防范研究[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(4): 10-15.
YANG Zhenhe, SU Zhenhua, WANG Dong. Risk analysis and prevention of personnel injury accidents for grains get in and out of grain depots[J]. Food Science and Technology and Economy, 2017, 42(4): 10-15.
- [12] ISSA S F, CHENG Y H, FIELD W E. Summary of agricultural confined-space related cases: 1964-2013[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2016, 22(1): 33-45.
- [13] ROBERTS M, FIELD W, MAIER W, et al. Determination of entrapment victim extrication force with and without use of a grain rescue tube[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2015, 21: 71-83.
- [14] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 1: 47-65.
- [15] 贾唯龙, 常晁瑜, 李佩茹, 等. 基于颗粒流方法的黄土地震滑坡数值模拟[J]. 地震学报, 2022, 44(4): 677-687.
JIA Weilong, CHANG Chaoyu, LI Peiru, et al. Numerical simulation of earthquake-induced loess landslides based on particle flow method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(4): 677-687.
- [16] 宋阳, 王泽河, 弋景刚. 基于 EDEM 的固态有机肥运施肥机装撒肥装置的设计与仿真分析[J]. 机械设计, 2024, 41(9): 34-40.
SONG Yang, WANG Zehe, YI Jinggang. Design and simulation analysis of solid organic fertilizer applicator equipped with fertilizer loading and spreading device based on EDEM[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(9): 34-40.

- [17] 李传明, 刘万荣. 节理岩体巷道围岩稳定性的颗粒离散元分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(4): 133-138.
LI Chuanming, LIU Wanrong. Particle discrete element method based analysis of stability of roadway surrounding joint rock mass[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(4): 133-138.
- [18] MARKAUSKAS D, RAMIREZ-GOMEZ Á, KACIANAUSKAS R, et al. Maize grain shape approaches for DEM modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 247-258.
- [19] CHEN Zhengpu, WASSGREN C, VEIKLE E, et al. Determination of material and interaction properties of maize and wheat kernels for DEM simulation[J]. Biosystems Engineering, 2020, 195: 208-226.
- [20] PETINGCO M C, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Influence of particle shape and contact parameters on DEM-simulated bulk density of wheat[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(6): 1 657-1 672.
- [21] 刘强, 张茜茜, 刘涛, 等. 基于 EDEM 的粮食立筒仓卸料动态侧压力研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13927-13933.
LIU Qiang, ZHANG Qianqian, LIU Tao, et al. Dynamic lateral pressure of grain silo discharge based on EDEM[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(32): 13927-13933.
- [22] 游礼国. 圆台状筒仓储料卸料荷载分布研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
YOU Ligu. Research on unloading and storage load distribution in frustum-shaped silo[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [23] 孙启帅. 立筒仓粮食散体卸料时动态侧压力及影响因素分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
SUN Qishuai. Analysis of dynamic lateral pressure and influencing factors during unloading of grain bulk in vertical silos[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [24] ALBERTO D R, FRANCESCO P D M. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(3): 525-541.
- [25] 刘立意, 郝世杨, 张萌, 等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27-32, 158.
LIU Liyi, HAO Shiyang, ZHANG Meng, et al. Numerical simulation and experiment on paddy ventilation resistance based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27-32, 158.
- [26] 张伟健, 江善晨, 孔宪锐, 等. 基于离散元法的粉碎机筛网冲击特性与粉碎颗粒接触参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 501-511.
ZHANG Weijian, JIANG Shanchen, KONG Xianrui, et al. Analysis of impact characteristics of hammermill screen based on discrete element method and calibration of contact parameters of crushed particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 501-511.
- [27] 王超. 卸粮速率对筒仓卸粮成拱应力影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
WANG Chao. Influence of grain discharging rate on arching stress of discharging grain in silos[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.



作者简介: 崔鹏程 (1993—), 男, 河南济源人, 硕士, 助理研究员, 主要从事粮食和物资储备安全生产技术方面的研究。E-mail: cpc@ags. ac. cn。