

不同高径比下筒仓内壁法向应力及超压系数的测量研究

王冠, 周彬, 高秀敏, 华云松

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月27日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

当前针对筒仓卸料过程中超压现象的研究中, 受限于实验测量手段或模拟假设条件, 尚缺乏对不同高径比条件下超压分布规律的系统实验验证。为此, 本文针对现有实验方法的不足, 设计了一种改进的筒仓内壁法向应力测量系统, 搭建半圆锥形筒仓模型, 测量粒径为1.29 mm的玻璃珠在静态堆积和卸料过程中的壁面法向应力, 并计算卸料过程中最大动态应力与静态应力的比值(即超压系数)。实验设置了不同填充高度, 分别代表浅仓与深仓工况, 系统分析了卸料过程中超压系数的时空分布特征。结果表明: 静态阶段颗粒发生沉降与重排, 使应力逐渐趋于稳定; 卸料阶段动态应力显著增加, 并在 $H = 135\text{ mm}$ 处达到峰值。不同填充高度下, 最大超压系数位置略有差异, 但均集中于圆柱形中下部, 最大值达到3.31。漏斗段尤其靠近卸料口区域的超压现象相对较弱。本研究揭示了高径比对筒仓内壁应力与超压分布的影响, 为筒仓结构与卸料安全提供了可靠实验依据。

关键词

筒仓, 法向应力, 静态应力, 动态应力, 超压系数

Experimental Study on Wall-Normal Pressure and Overpressure Coefficient in Silos with Different Height-to-Diameter Ratios

Guan Wang, Bin Zhou, Xiumin Gao, Yunsong Hua

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

文章引用: 王冠, 周彬, 高秀敏, 华云松. 不同高径比下筒仓内壁法向应力及超压系数的测量研究[J]. 应用物理, 2025, 15(5): 424-434. DOI: 10.12677/app.2025.155048

Abstract

Current studies on overpressure phenomena during silo discharge are often limited by experimental constraints or simplified simulation assumptions, and lack systematic experimental validation under varying height-to-diameter (H/D) ratios. To address this gap, an improved wall normal pressure measurement system was developed in this study. A semi-conical silo model was constructed to measure the wall normal stress of 1.29 mm glass beads during static packing and discharge. The overpressure coefficient—defined as the ratio of the maximum dynamic pressure during discharge to the corresponding static pressure—was calculated. The experiments were conducted at different filling heights, representing both shallow and deep silo conditions, to analyze the spatiotemporal distribution of overpressure coefficients. Results show that during the static phase, particle rearrangement and settling lead to pressure stabilization; in the discharge phase, dynamic pressure significantly increases and reaches its peak at $H = 135$ mm. Although the position of the maximum overpressure coefficient varies slightly with filling height, it consistently appears in the mid-lower region of the cylindrical section, with a maximum value of 3.31. In contrast, the overpressure effect is notably weaker in the hopper section, especially near the outlet. This study reveals the influence of height-to-diameter ratio on the wall pressure and overpressure distribution in silos and provides reliable experimental evidence for structural design and safe discharge operations.

Keywords

Silo, Normal Pressure, Static Pressure, Dynamic Pressure, Overpressure Coefficient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颗粒物质广泛存在于自然界、日常生活、农业生产和工业加工等诸多领域[1] [2], 而筒仓作为存储、运输与卸载固体颗粒的关键设备, 在现代工程中具有重要应用价值[3]。我国作为工农业大国, 筒仓结构设计的合理性和经济性对工业发展与粮食安全具有重要意义。

在筒仓卸料过程中, 颗粒材料经历复杂的力学状态演变, 包括局部应变、结构失稳与颗粒流动等过程[4]。大量研究表明, 卸料阶段颗粒对筒仓壁面的作用力可能引发应力集中、结构破坏甚至筒仓失效。因此, 深入研究卸料过程中颗粒对筒仓壁面所施加的应力特性及其影响因素, 对于优化筒仓结构设计、提高运行安全性具有重要意义[5] [6]。

在卸料过程中, 筒仓内壁的法向应力通常会出现明显增加, 即出现“超压”现象, 卸料阶段的最大动态应力与储料阶段的静态应力之比被定义为超压系数[7]。《GB 50077-2017 钢筋混凝土筒仓设计标准》依据筒仓的高径比(H/D)将圆形筒仓划分为浅仓($H/D \leq 1.0$)、深仓($H/D \geq 1.5$)以及中间可选设计区间($1.0 < H/D < 1.5$), 并在设计规范中明确提出应考虑卸料过程中的超压现象[8]。已有诸多学者围绕超压系数进行了实验与模拟研究, 屠居贤[9]在高径比为 2 的有机玻璃筒仓中观察到距筒仓底部约 1/3 高度处的超压现象最为显著, 孙启帅[10]、曾丁[11]、原方[12]、陈长冰[13]等人的研究结果也对此予以印证。

An 等[14]在筒仓侧壁开孔,将压力传感器嵌入其中以直接接触颗粒并测量壁面应力,发现筒仓圆柱段与漏斗段交界处的超压现象尤为明显。Gandia [15][16]则通过改变填充高度,在深仓中观察到超压系数的最大值出现在几何转变处与筒仓中部。而 Zhang 等[17]采用直接测量法发现,除几何转变处外,圆柱段其余位置也普遍存在不同程度的超压现象。相对地,周长明[18]采用 PFC 数值模拟,发现无论填充高度如何,卸料过程中应力增幅最明显的位置均集中在圆柱段底部上方约 0.2~0.3 m 区域。Feng 等[19]进一步指出,随着筒仓深度增加,超压系数亦呈增长趋势。

虽然上述研究对卸料过程中的应力特征及超压现象进行了深入探讨,但仍存在以下问题:一方面,实验中受限于传感器厚度、壁面布置与颗粒摩擦等因素,测量数据可能存在误差;另一方面,数值模拟结果高度依赖模型选取与参数设定,计算结果存在不确定性。因此,不同研究中超压现象出现的位置并不一致。同时,现有研究大多聚焦于单一高径比或局部区域,尚缺乏对深仓、浅仓及漏斗段超压现象的系统性对比分析。

为进一步准确研究卸料过程中的超压行为,本文设计了一种可直接测量筒仓壁面法向应力的实验装置,改进了传统测量方法中存在的不足。通过实验测量不同填充高度(1D~3D)下颗粒对筒仓壁面的静态与动态法向应力,计算各检测点的超压系数,系统分析高径比对超压现象的影响,并对浅仓与深仓的应力增幅规律进行了对比,为筒仓结构设计与运行安全提供了可靠的实验依据。

2. 实验装置系统和测量方法

2.1. 颗粒材料

本实验选用均值粒径为 1.29 mm 的无色透明玻璃珠作为颗粒材料。玻璃珠的主要优势在于其高度一致的球形形状,这有助于减少颗粒形状对实验结果的干扰,从而提升实验的可控性和重复性,使测量的应力数据更加稳定。此外,玻璃珠具有较高的强度和硬度,在实验过程中不易破碎或变形,这一特性确保了颗粒材料在长时间、多次实验中的稳定性,从而保证实验数据的一致性和可靠性。为了提高实验精度,在实验前使用孔径为 1.18 mm 和 1.40 mm 的两层筛网对颗粒材料进行了筛选,以减小粒径分布范围,减少颗粒尺寸差异对实验数据的影响。

2.2. 测量装置

图 1 是筒仓内壁法向应力测量系统的示意图,由三维半圆锥形筒仓、应力传感器、多路数据采集装置和控制主机组成。实验筒仓由圆柱形容器和漏斗容器两部分组成。筒仓壁面高度为 600 mm,内径为 200 mm,外径为 220 mm,壁厚为 10 mm。漏斗容器锥角为 60°,开口直径为 16 mm。应力传感器采用电阻应变片应力传感器,其指标参数由表 1 所示。应力传感器的布置方式经过优化,在筒仓壁面设置 10.2 mm × 10.2 mm 的凹槽,并用尺寸为 10 mm × 10 mm 的同材料矩形块进行封堵,使传感器的检测端与矩形块固定。这种设计既能防止了颗粒从缝隙中漏出,又能减少卸料过程中筒仓振动和摩擦对测量精度的影响。整个筒仓设置了 13 个传感器,从上至下依次编号 S1 至 S13。多路采集模块的内部采样频率设置为 10 Hz,用于实时采集传感器检测的应力数据并将其传输至控制主机。

在实验过程中,将传感器的激励线和信号线连接至多路采集模块,进行应力数据的采集,通过 RS485 接口将多路采集模块采集的数据传输至控制主机,由控制主机将应力数据保存用于后续的分析。在实验开始前,我们使用软橡胶塞堵住开口,使用均匀分散填充方式将颗粒从顶部填充。如图 1 中红色虚线所示,为了研究不同的填充高度(高径比)对超压现象的影响,我们在实验过程中选择了 4 个填充高度:200 mm (1D)、300 mm (1.5D)、400 mm (2D)和 600 mm (3D),其中 1D 对应筒仓设计规范中的浅仓,1.5D、2D

和 3D 对应深仓，以研究不同高径比下的超压现象。

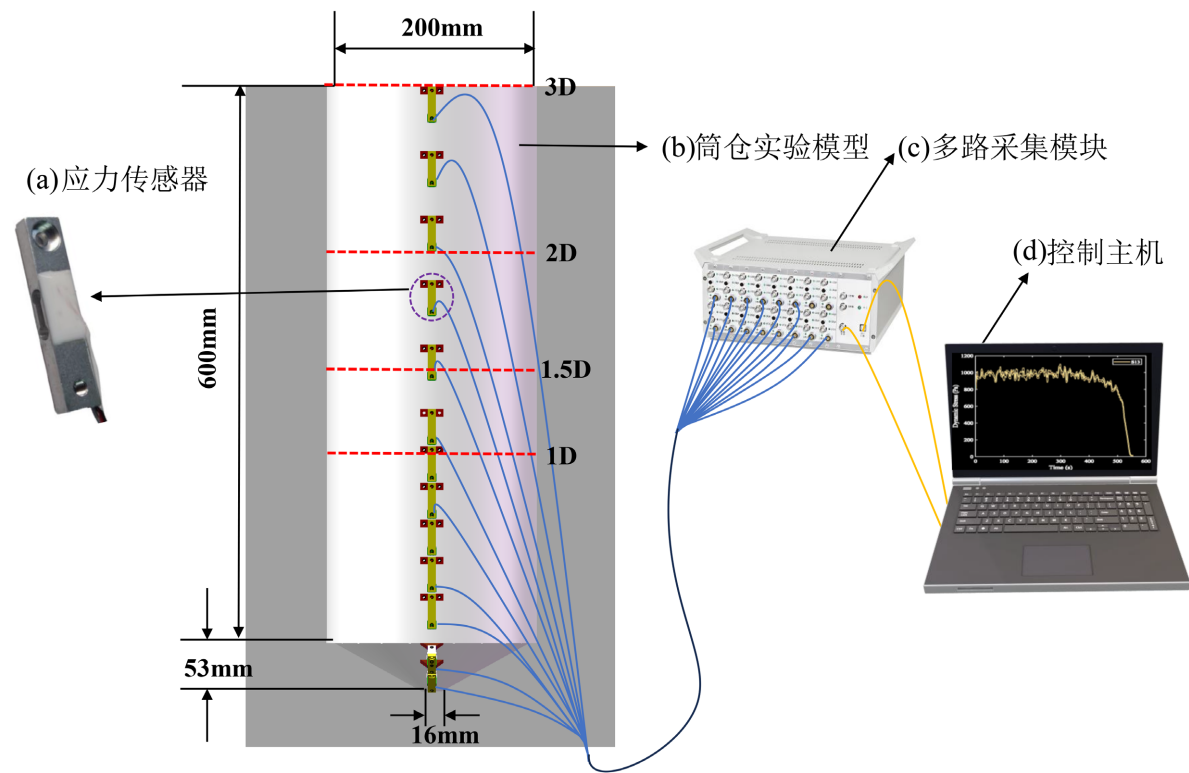


Figure 1. Silo wall normal stress measurement system
图 1. 筒仓内壁法向应力测量系统

Table 1. Basic parameters of the sensor
表 1. 传感器的指标参数

参数名称	参数数值
量程	0~98 KPa
准确度	0.5%
系统误差	±10 Pa
超载能力	150%

2.3. 应力测量系统装置标定

为建立传感器输出电压与实际载荷之间的对应关系，并验证测量系统的准确性与可靠性，本研究分别对单个传感器与整体测量系统进行了多次标定。具体的标定方法、各传感器的输出数据、标准差、误差分析及变异系数等详细信息可参见文献[20]。

图 2 显示了 S6 号传感器的标定结果。通过线性拟合分析，获得其输出电压与加载重量之间的转换系数为 18.60，最大标准差为 0.32，表明该传感器具备良好的线性响应特性及重复性。图 3 为测量系统的整体标定结果，采用静水压加载实验对系统进行验证。实验测量值与静水压力理论值的最大误差为 1.08%，且各测点数据重复性良好，充分证明了该应力测量系统的稳定性与可靠性。

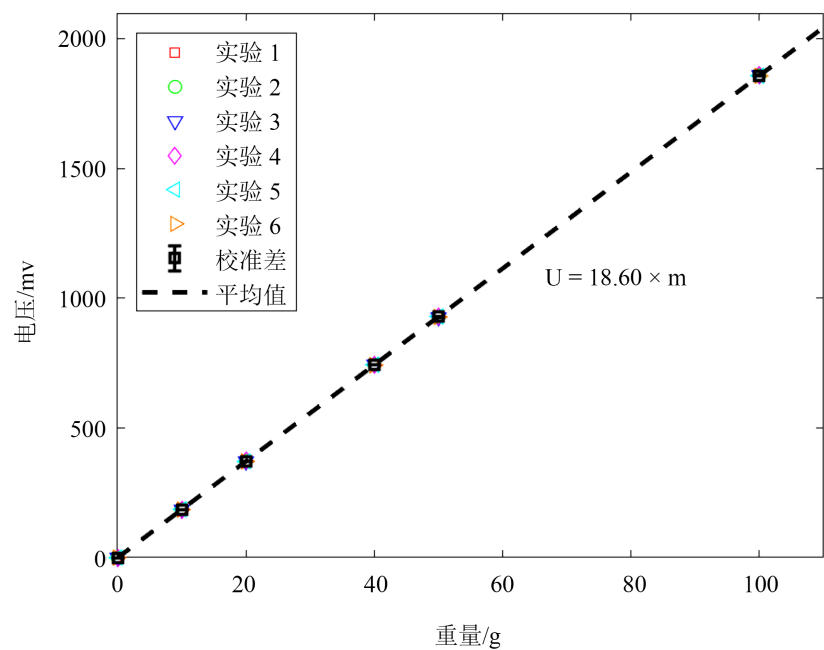


Figure 2. Calibration results of sensor S6

图 2. S6 号传感器标定结果

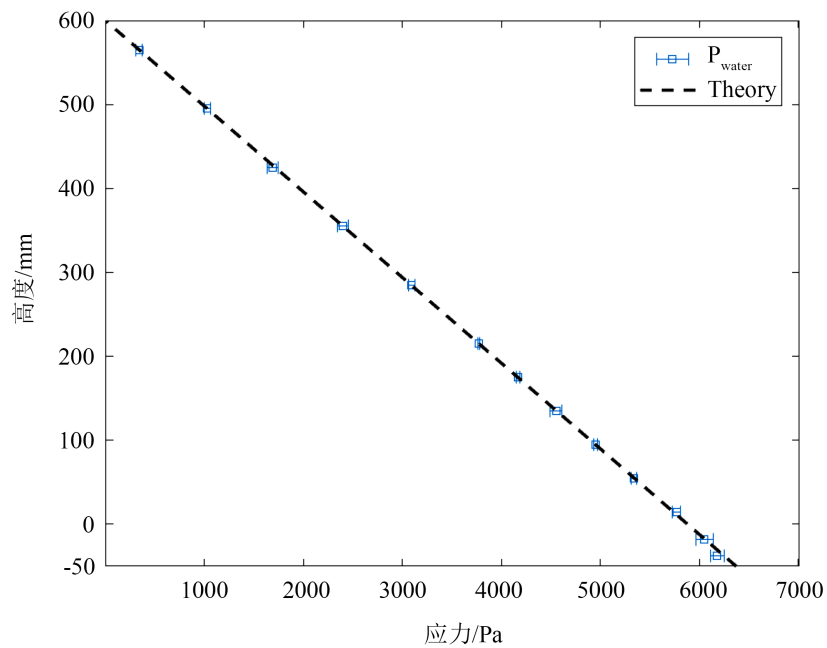


Figure 3. System calibration measurement results

图 3. 系统标定测量结果与理论值

3. 实验与结果讨论

3.1. 静态应力

图 4 是在填充完成后一个传感器在两次实验中采集的静态应力数据 $P_{w,s1}$ 和 $P_{w,s2}$ 随时间的变化图。可

以看出, $P_{w,s1}$ 在 0 至 2680 s 范围内呈不断下降的变化趋势。造成该现象的原因是填充玻璃珠后, 筒仓内离散颗粒的堆积结构是不稳定的; 在经过一段时间后, 由于重力作用筒仓内离散颗粒发生了重排和沉降现象, 形成了更为紧密的堆积结构; 紧密的颗粒堆积结构使得筒仓内颗粒在纵向上获得更大的支撑力, 从而减小了颗粒对壁面的法向作用力[21]。当离散颗粒的重排和沉降运动结束后(即 $t_c = 2680$ s), $P_{w,s1}$ 的值稳定在 768 ± 5 Pa, 如图 4 中插图(b)所示, 应力稳定不变的区域称为稳定区域。另一方面, 两次实验中筒仓内壁静态应力达到稳定的时刻是不相同的, 这是因为形成紧密的颗粒堆积结构所需要的时间与颗粒堆积的历史是相关的。在经过颗粒重排和沉降后, $P_{w,s1}$ 与 $P_{w,s2}$ 在稳定区域内的平均值是一致的。综上, 在后续的分析中取稳定区域范围内的应力平均值进行超压系数的计算与分析。

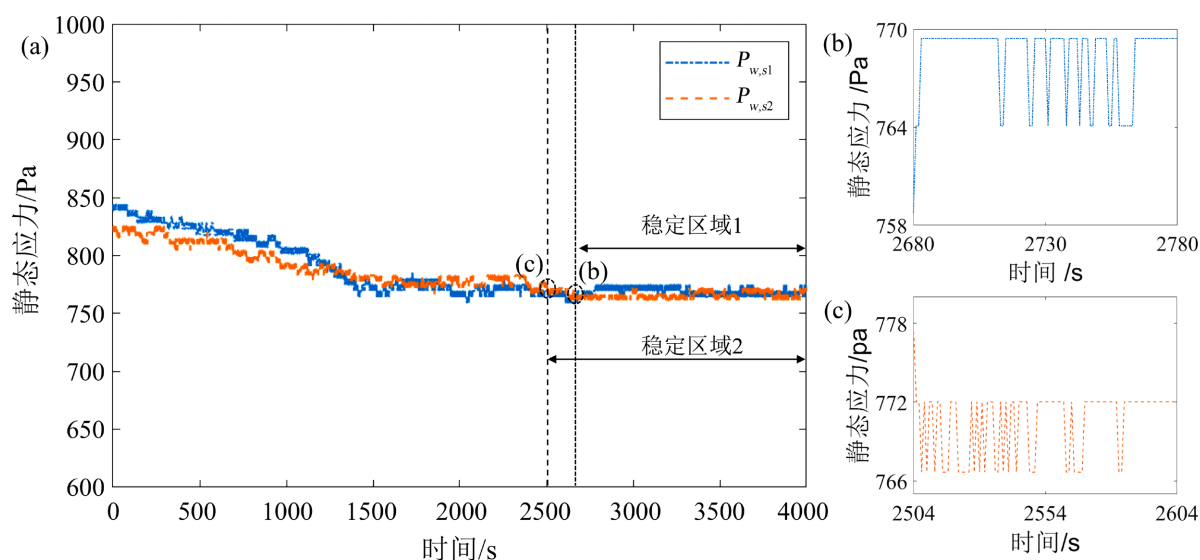


Figure 4. Static normal stress of the silo wall after filling

图 4. 填充完成后仓壁静态法向应力

3.2. 动态应力

图 5 是卸料过程中 6 号传感器测量的内壁法向应力 $P_{w,d}$ 随时间的变化图。为减少测量信号中的瞬态噪声和高频干扰, 在动态应力数据处理过程中, 采用中值滤波对信号进行平滑处理。中值滤波能够有效抑制检测过程中的瞬时尖峰噪声, 确保数据的平稳性和准确性[22]。可以看出, 在筒仓孔口打开后 $P_{w,d}$ 的值迅速上升。这是因为孔口打开后, 颗粒在竖直方向的支撑力迅速减小, 从而增强了作用在筒仓内壁的法向应力。当应力不再出现激增时, 测量值出现了波动现象, 这可能是由于离散颗粒之间动态应力拱的不断断裂和形成所造成的[23]。在卸料过程中, 颗粒之间的力链网络不断重组和断裂, 当 $t_p = 101.6$ s 时, 由于最强力链的形成, 颗粒间的应力沿力链路径集中传递至筒仓内壁, 使得法向应力达到峰值[24] [25], 即 $P_{w,d}$ 达到最大值为 2359.33 Pa。随着卸料的进行, 传感器的应力值呈减小变化趋势, 最终在 340.4 s 后, 应力降至 0, 表明该传感器测量点的物料已经排空。

表 2 统计了 6 号传感器在 10 次实验中测得的最大动态应力值 $P_{w,d \max}$ 及其出现时刻。可以看出, 卸料过程中的应力峰值并不是出现卸料瞬间, 而是出现在卸料一段时间后。通过数据统计可以看到各组实验中动态应力最大值出现的时间与数值大小均不同, 这是由卸料过程中颗粒运动的随机性造成的。综上, 在后续的分析中选取每次实验中的动态应力最大值 $P_{w,d \max}$ 计算超压系数并分析超压现象。

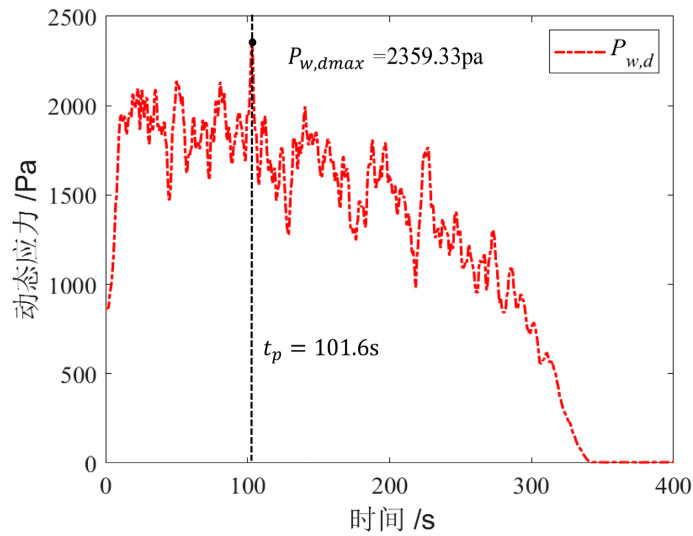


Figure 5. Dynamic normal stress of silo wall during unloading
图 5. 卸料过程中仓壁动态法向应力

Table 2. Time and magnitude of maximum dynamic stress
表 2. 动态应力最大值的出现时间与大小

实验组别	时间/s	$P_{w,d \max}$ /Pa
Group1	101.6	2359.95
Group2	100.7	2346.25
Group3	111.9	2483.71
Group4	104.3	2430.00
Group5	105.6	2249.13
Group6	98.6	2632.69
Group7	110.3	2265.29
Group8	106.3	2554.64
Group9	115.9	2360.32
Group10	103.3	2298.09
平均值	105.8	2398.01
标准差	5.1	119.70

3.3. 不同填充高径比下的超压现象

图 6 展示了四种不同填充高度(1D、1.5D、2D 和 3D)条件下,卸料过程中筒仓不同位置的超压系数空间分布情况,图(a)至图(d)依次对应填充高度 1D 至 3D。结果表明,不论填充高度如何,筒仓壁面各高度处的超压系数均大于 1,表明卸料过程中筒仓内壁普遍存在超压现象;这是因为在颗粒卸料过程中,颗粒内部会形成非均匀的力链网络,当筒仓内颗粒结构由静止转向流动时,竖直支撑力发生改变,部分应力沿力链集中传递至侧壁,进而造成局部应力激增。由图 6(a)和图 6(b)可知,当高径比为 1D 和 1.5D 时,最大超压系数均出现在 $H=15\text{ mm}$ 处,最大值分别为 3.15 和 3.31。当 $H>15\text{ mm}$ 时,超压系数的均值随着高度的升高逐渐减小。结合表 3 和表 4 中多组实验所得的超压系数及其标准差可以发现, $H\in[15\text{ mm}, 135\text{ mm}]$ 区域的超压系数整体较大,说明在卸料过程中该区域是应力增幅最显著的区域。

由图 6(c)和图 6(d)可知,当填充高径比为 2D 和 3D 时,最大超压系数分别出现在了 $H = 135\text{ mm}$ 与 $H = 215\text{ mm}$ 处,最大值分别为 3.09 和 3.28。在这两组工况下,超压系数均随着筒仓高度的降低呈现出先增大后减小的趋势,在 Wang [26]等人的 DEM 仿真中观察到了相同的现象。通过表 5 和表 6 汇总的实验数据可以发现, $H \in [15\text{ mm}, 285\text{ mm}]$ 区域的超压系数显著较大,表明在卸料过程中该区域是应力增幅最显著的区域。

总体而言,在四种不同的填充高度下,最大超压系数均出现在圆柱形(Bin)部分。当高径比为 1D 和 1.5D 时,最大超压系数位置更靠近筒仓的几何转变处;当高径比为 2D 和 3D 时,最大超压系数均出现在距离筒仓几何转变处约 1/3 高度位置。在每一种填充高度下,在漏斗部分的超压系数始终是较小的,特别是靠近卸料口的检测点,其超压系数最小。这是因为在靠近卸料口的位置,颗粒的流动性增强,使得颗粒堆积较为稀疏,导致该区域的应力增幅较小。综上所述,不同高径比对超压现象的空间分布具有显著影响,圆柱形中下部为卸料过程中超压现象的主要集中区域。

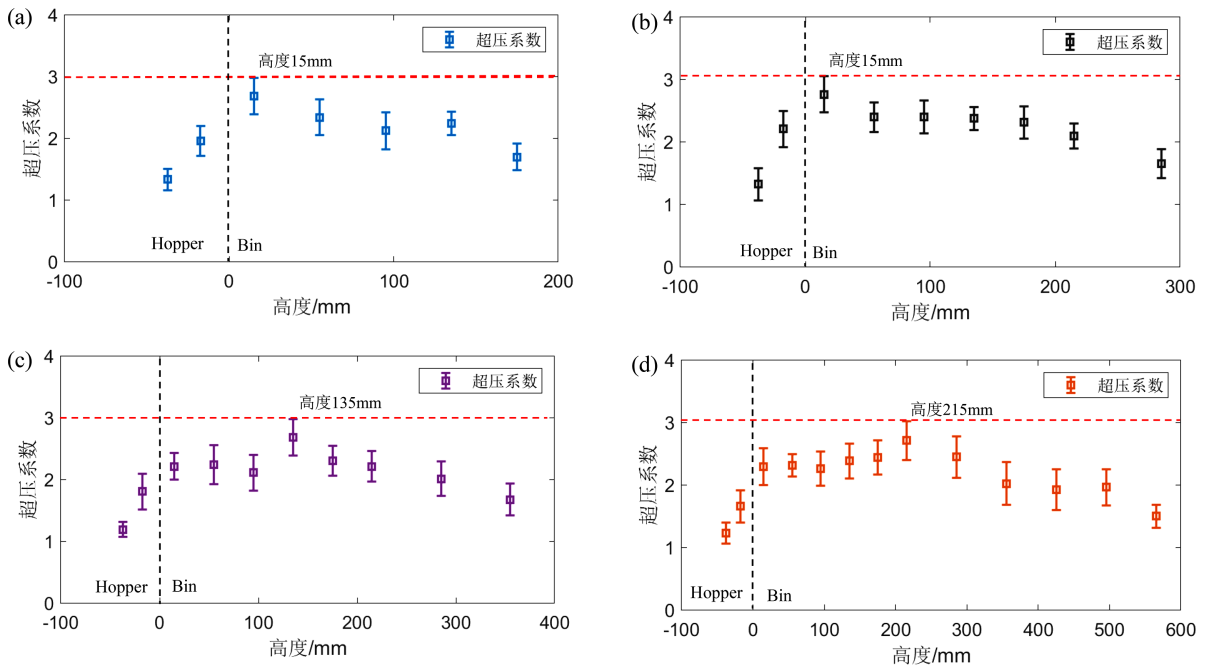


Figure 6. Distribution of overpressure coefficient of the inner wall of the silo during unloading

图 6. 卸料过程中筒仓内壁的超压系数分布

Table 3. Overpressure coefficients on silo wall with height-to-diameter ratio of 1D

表 3. 高径比为 1D 时筒仓内壁超压系数

高度(mm)		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组	平均值	标准差
175	S7	1.93	1.81	1.86	1.66	1.66	1.44	2.05	1.33	1.60	1.66	1.70	0.21
135	S8	2.26	2.52	2.01	1.95	2.54	2.21	2.18	2.29	2.34	2.15	2.25	0.18
95	S9	1.90	2.57	2.19	2.26	1.69	1.91	2.3	1.72	2.25	2.44	2.12	0.29
55	S10	2.76	2.46	2.74	2.53	2.06	2.02	2.43	1.97	2.12	2.33	2.34	0.28
15	S11	3.15	2.72	2.47	2.74	2.70	2.23	2.54	2.34	2.97	2.98	2.68	0.28
-17.5	S12	1.82	2.01	1.85	1.97	1.87	2.11	2.44	2.20	1.62	1.71	1.96	0.23
-37.5	S13	1.26	1.53	1.39	1.47	1.23	1.06	1.41	1.14	1.60	1.25	1.33	0.17

Table 4. Overpressure coefficients on silo wall with height-to-diameter ratio of 1.5D
表 4. 高径比为 1.5D 时筒仓内壁超压系数

高度(mm)		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组	平均值	标准差
285	S5	1.55	1.39	1.48	1.44	1.58	1.92	2.01	1.97	1.48	1.71	1.65	0.22
215	S6	1.94	1.74	2.17	1.91	2.22	2.42	1.96	2.23	2.19	2.18	2.10	0.19
175	S7	2.23	2.02	2.43	2.38	2.13	2.95	2.21	2.40	2.18	2.20	2.31	0.24
135	S8	2.28	2.18	2.48	2.57	2.37	2.57	2.39	2.59	2.07	2.24	2.37	0.17
95	S9	2.45	2.52	2.92	2.21	1.91	2.41	2.53	2.48	2.2	2.35	2.40	0.25
55	S10	2.16	2.73	2.37	2.42	2.26	2.40	2.89	2.32	2.25	2.17	2.40	0.23
15	S11	2.55	3.31	2.84	2.74	2.57	3.11	2.86	2.78	2.36	2.48	2.76	0.28
-17.5	S12	2.04	2.01	2.19	2.36	2.10	2.18	2.86	2.37	1.76	2.20	2.21	0.27
-37.5	S13	1.20	1.41	1.82	1.69	1.09	1.42	1.28	1.10	1.15	1.09	1.33	0.25

Table 5. Overpressure coefficients on silo wall with height-to-diameter ratio of 2D
表 5. 高径比为 2D 时筒仓内壁超压系数

高度(mm)		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组	平均值	标准差
355	S4	1.82	1.88	1.42	1.31	1.93	1.32	1.65	2.04	1.81	1.6	1.68	0.25
285	S5	2.11	2.36	2.15	1.88	2.46	1.72	1.97	2.06	1.55	1.87	2.01	0.26
215	S6	2.36	2.49	1.96	2.47	2.31	1.79	1.92	2.41	2.19	2.25	2.22	0.23
175	S7	2.42	2.67	2.21	2.28	2.58	1.85	2.17	2.48	2.27	2.09	2.30	0.23
135	S8	2.62	2.87	3.09	2.92	2.57	2.59	2.12	2.35	2.76	2.93	2.68	0.28
95	S9	2.55	2.38	1.74	2.27	2.49	2.02	1.76	1.92	1.96	2.02	2.11	0.28
55	S10	2.93	1.96	1.94	2.47	2.12	2.25	1.92	2.06	2.29	2.50	2.24	0.30
15	S11	2.47	2.38	1.98	2.22	2.16	2.35	2.37	2.02	2.37	1.83	2.22	0.20
-17.5	S12	1.93	2.28	1.71	1.93	2.11	1.39	2.01	1.62	1.47	1.62	1.81	0.27
-37.5	S13	1.41	1.23	1.12	1.25	1.33	1.18	1.04	1.00	1.16	1.21	1.19	0.12

Table 6. Overpressure coefficients on silo wall with height-to-diameter ratio of 3D
表 6. 高径比为 3D 时筒仓内壁超压系数

高度(mm)		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组	平均值	标准差
565	S1	1.52	1.71	1.62	1.30	1.47	1.25	1.66	1.35	1.37	1.76	1.51	0.17
495	S2	1.86	2.28	2.1	1.89	1.98	2.21	1.56	2.01	1.45	2.3	1.96	0.27
425	S3	2.11	2.06	1.84	1.94	1.46	2.38	1.96	2.34	1.40	1.74	1.92	0.31
355	S4	1.90	2.07	1.58	2.16	1.71	2.06	2.86	2.07	1.9	1.94	2.02	0.33
285	S5	2.14	2.82	2.68	2.21	2.58	3.05	2.31	2.48	2.25	1.99	2.45	0.32
215	S6	2.73	3.28	2.29	2.78	2.53	2.46	2.87	2.40	3.11	2.67	2.71	0.29
175	S7	2.40	2.70	2.09	2.75	2.38	2.74	2.37	2.63	1.95	2.39	2.44	0.25
135	S8	2.19	2.60	2.30	2.36	2.59	2.91	2.01	2.21	2.10	2.58	2.39	0.26
95	S9	2.37	2.51	1.98	2.21	2.49	2.33	2.15	2.16	1.74	2.67	2.26	0.26
55	S10	2.24	2.28	2.12	2.17	2.41	2.49	2.02	2.43	2.4	2.6	3.03	0.52
15	S11	1.96	2.26	2.42	2.41	2.30	2.94	2.22	1.83	2.38	2.26	2.32	0.17
-17.5	S12	1.60	1.80	2.52	1.77	1.94	1.57	1.88	1.51	1.91	1.09	1.66	0.24
-37.5	S13	1.36	1.39	1.05	1.21	1.45	1.46	1.07	1.01	1.13	1.19	1.23	0.16

4. 总结

本研究基于改进的筒仓应力测量实验装置,测量了不同填充高度下,颗粒在存储与卸料过程中对筒仓内壁的法向应力,并计算了相应的超压系数。在静态应力测量中,首次从力学角度观察到了颗粒的沉降与重排行为,这是因为颗粒在重力作用下会逐渐形成稳定的堆积结构,导致静态应力在初始阶段出现减小现象,然后趋于稳定。动态应力测量结果显示,在卸料开始后,内壁动态应力显著增加,并且达到峰值后出现波动现象并最终逐渐减小。

本研究进一步计算并比较了不同填充高度下的超压系数分布规律,结果表明:当填充高度为 1D 和 1.5D 时,最大超压系数出现在 $H = 15\text{ mm}$,靠近筒仓几何转变处;当填充高度为 2D 和 3D 时最大超压系数出现在距离筒仓圆柱形底部约 1/3 高度处。在所有填充高度下,漏斗部分的超压系数相对较小,尤其是靠近卸料口的超压系数最小。研究结果揭示了筒仓在颗粒存储与卸料过程中的应力演化特征,展示了填充高度(高径比)对超压系数空间分布的显著影响,为不同工况下的浅仓与深仓结构优化设计提供了实验依据。特别是在应力增幅显著区域的识别与结构安全评估方面,本研究具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物质(上) [J]. 物理, 2004, 33(9): 629-635.
- [2] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物质(下) [J]. 物理, 2004(10): 713-721.
- [3] Couto, A., Ruiz, A. and Aguado, P.J. (2013) Experimental Study of the Pressures Exerted by Wheat Stored in Slender Cylindrical Silos, Varying the Flow Rate of Material during Discharge. Comparison with Eurocode 1 Part 4. *Powder Technology*, **237**, 450-467. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.030>
- [4] Saleh, K., Golshan, S. and Zarghami, R. (2018) A Review on Gravity Flow of Free-Flowing Granular Solids in Silos – Basics and Practical Aspects. *Chemical Engineering Science*, **192**, 1011-1035. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>
- [5] Khalil, M., Ruggieri, S. and Uva, G. (2022) Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-Of-The-Art and Recent Research Trends. *Applied Sciences*, **12**, Article 3006. <https://doi.org/10.3390/app12063006>
- [6] 段君峰, 韩阳, 李东桥, 等. 中欧美钢筋混凝土筒仓规范对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 108-112.
- [7] Jing, H., Wang, X., Yang, J. and Chen, H. (2022) Static and Seismic Pressure of Cylindrical Steel Silo Model with Granular Materials. *Journal of Constructional Steel Research*, **198**, Article ID: 107515. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107515>
- [8] 祝振兴, 朱建平, 曹勇, 等. 中欧钢筋混凝土筒仓设计规范比较[J]. 水泥工程, 2013(3): 14-16, 26.
- [9] 屠居贤, 杨建斌. 模型筒仓卸料试验和仓壁压力计算[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1998(3): 212-217.
- [10] 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]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [11] 曾丁, 黄文彬, 华云龙. 筒仓壁压的有限元分析[J]. 农业工程学报, 1998(2): 50-54.
- [12] 原方, 刘海林, 程远浩, 杜乾. 深浅仓卸料压力离散元数值模拟研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 117-123.
- [13] 陈长冰, 梁醒培. 筒仓卸料过程的离散元模拟分析[J]. 粮油食品科技, 2008(1): 11-13.
- [14] An, H., Wang, X., Fang, X., Liu, Z. and Liang, C. (2021) Wall Normal Stress Characteristics in an Experimental Coal Silo. *Powder Technology*, **377**, 657-665. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.016>
- [15] Gandia, R.M., Gomes, F.C., Paula, W.C.D., Oliveira Junior, E.A.D. and Aguado Rodriguez, P.J. (2021) Static and Dynamic Pressure Measurements of Maize Grain in Silos under Different Conditions. *Biosystems Engineering*, **209**, 180-199. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.001>
- [16] Gandia, R.M., Gomes, F.C., Paula, W.C.D. and Aguado Rodriguez, P.J. (2021) Evaluation of Pressures in Slender Silos Varying Hopper Angle and Silo Slenderness. *Powder Technology*, **394**, 478-495. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.087>
- [17] Zhang, D., Xu, Q., Wang, S., et al. (2017) Simulation and Experimental Validation of Silo Wall Pressure during Discharging. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **33**, 272-278.

-
- [18] 周长明. 筒仓卸料流态及仓壁侧压力的试验与模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- [19] Feng, Y. and Liu, J. (2019) Dynamic Simulation Analysis of Elastic Overpressure Fluctuation on Silo Wall for the Arch Action. *Journal of Vibroengineering*, **21**, 1045-1057. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20493>
- [20] 王冠, 赵登鲁, 华云松. 筒仓内壁静态与动态法向应力的测量与分析[J]. 物理化学进展, 2025, 14(1): 48-58.
- [21] Schulze, D. (2014) *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow* Schulze, Dietmar. Springer.
- [22] Shah, A., Bangash, J.I., Khan, A.W., Ahmed, I., Khan, A., Khan, A., *et al.* (2022) Comparative Analysis of Median Filter and Its Variants for Removal of Impulse Noise from Gray Scale Images. *Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences*, **34**, 505-519. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.03.007>
- [23] Wang, X., Liang, C., Guo, X., Chen, Y., Liu, D., Ma, J., *et al.* (2020) Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Wall Normal Stresses during Silo Discharge. *Powder Technology*, **363**, 509-518. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.023>
- [24] Wang, M.M., Wang, J.-., Pang, W.D. and Liang, C. (2016) Photoelastic Experiments on Force Chain Evolution in Granular Materials under Bilateral Flowing Conditions. In: Li, X., Feng, Y. and Mustoe, G., Eds., *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods*, Springer, 1411-1417. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_145
- [25] Wang, M., Zheng, J. and Xue, S. (2024) Mechanics and Stability of Force Chain Arch in Excavated Granular Material. *Applied Sciences*, **14**, Article 2485. <https://doi.org/10.3390/app14062485>
- [26] Wang, X., Li, B., Xia, R. and Ma, H. (2020) Stress Analysis of Silos Using Dem. In: Wang, X., Li, B., Xia, R. and Ma, H., Eds., *Engineering Applications of Computational Methods*, Springer, 123-138. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7977-6_7