

初始几何缺陷对含粮食钢筒仓的屈曲影响

白方威, 蒋敏敏, 郭茹芳, 王 地
(河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:大型钢筒仓作为典型的薄壁结构,被广泛应用于工农业中储存大量颗粒状固体物料。为了明确钢筒仓在卸料作用下对其稳定性的影响,基于欧洲钢筒仓设计规范,利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,将完善钢筒仓一阶特征值屈曲模态作为初始几何缺陷,研究其在卸料作用下的变形特征、屈曲模态和径向位移。结果表明:钢筒仓在卸料过程中受复杂侧压力和摩擦力的作用会引起仓壁失稳破坏;初始几何缺陷的存在进一步降低了钢筒仓的抗屈曲能力。本文研究结果可为钢筒仓储料发展提供一定的工程实用价值。

关键词:钢筒仓; 初始几何缺陷; 屈曲模态; 径向位移

中图分类号:TU391

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)05-0026-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.05.059

Effect of initial geometric defects on buckling of grain storage steel silos

BAI Fangwei, JIANG Minmin, GUO Rufang, WANG Di
(School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: As a typical thin-walled structure, large steel silos are widely used in industry and agriculture to store a large number of granular solid materials. In order to clarify the influence of steel silos on their stability under the action of discharge, the finite element software ABAQUS is used to carry out numerical simulations based on the European steel silo design code, and the first-order eigenvalue buckling mode of the improved steel silo is taken as the initial geometric defect, and its deformation characteristics, buckling modes and radial displacement under the action of unloading are studied. The results show that the steel silo is affected by complex side pressure and friction during the unloading process, which will cause the instability and failure of the silo wall, and the existence of initial geometric defects further reduces the buckling resistance of the steel silo. The results can provide some practical engineering value for the development of steel silo storage materials.

Key words: steel silo; initial geometric defects; buckling mode; radial dispersion

随着我国工农业的发展,各行业对仓储结构的存储要求越来越高,仓储结构安全问题更是受到了人们重视。钢筒仓具有容量大、耗材少、工期短等优点,据统计,近年来新建的各种散料储存筒仓中,钢筒仓正逐渐取代混凝土筒仓。但现有的筒仓设计理论多基于混凝土筒仓,而大型钢筒仓受力和变形与混凝土筒仓有显著差异,从一

定程度上限制了钢筒仓的推广与应用。同时,由于我国钢筒仓结构的应用较晚,缺少必要的研究和指导,钢筒仓事故时有发生。因此,开展钢筒仓的设计理论研究不仅有利于提高钢筒仓结构的安全性,对促进钢筒仓的推广与应用也有很大的现实意义。

钢筒仓的破坏形式多为屈曲破坏,且其达到

收稿日期:2023-10-13

作者简介:白方威(1998—),男,硕士研究生,从事仓储结构安全的研究。

通信作者:蒋敏敏(1981—),男,副教授,从事粮食仓储结构安全及减灾防灾等方面的研究工作。

极限承载力能力后所产生屈曲破坏过程较为瞬时, 且危害较大。因而, 钢筒仓的屈曲性能分析是提高钢筒仓结构安全性的关键。近年来, 一些学者对钢筒仓卸料屈曲进行了研究。如: 张翀等^[1]进行了详细的有限元分析, 研究了在轴压和均匀内压作用下, 钢筒仓仓壁的弹性和弹塑性屈曲承载力, 并引入了 4 种常见的初始缺陷模式进行参数化, 探讨了各种缺陷模式对仓壁屈曲承载力的影响, 以及均匀内压对仓壁弹塑性屈曲承载力的提高程度; 陈新杰等^[2]在钢板筒仓结构稳定承载力研究中总结了筒仓初始缺陷的敏感性, 对中、欧规范中的筒仓稳定承载力计算进行了对比; TENG 等^[3]假定带状荷载作用于壳体上边缘, 考虑分析多种几何缺陷对圆柱壳屈曲性能的影响, 发现相比均匀轴压作用, 宽幅带状荷载作用下的圆柱壳屈曲强度更低; ROTTER 等^[4]通过数值分析研究了焊接引起的周向缺陷, 提出了轴对称焊接凹陷的缺陷模型; 舒赣平等^[5]对钢筒仓进行了弹塑性屈曲应力非线性分析, 结合 4 种初始几何缺陷, 拟合出筒仓弹塑性临界屈曲应力计算公式以及折减系数。

本文基于欧洲规范, 利用有限元软件 ABAQUS 模拟钢筒仓卸料, 将钢筒仓一阶特征值屈曲模态作为初始几何缺陷引入到完善钢筒仓中, 研究含初始几何缺陷的钢筒仓在卸料作用下的变形特征、屈曲模态和径向位移, 以期为我国钢筒仓的安全建设提供一定的借鉴与参考。

1 有限元模型

1.1 模型几何参数确定

采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟, 主要分为模型建立、网格划分并添加边界条件、分析和计算 3 个步骤。钢筒仓模型高度为 9 m, 直径为 6 m, 高径比为 1.5, 厚度为 5 mm。根据《粮食钢板筒仓设计规范》(GB 50322—2011)^[6]的规定, 仓顶坡度范围取 1:5~1:2, 不小于 1:10。利用 shell 单元获得高为 1.7 m 的仓顶。仓体采用 S4 壳单元, 由于实际筒仓工程中落地式钢筒仓的底部与仓壁一般使用刚性连接, 因此模型中的边界条件使用约束位移与转角的固定约束。考虑到仓

顶对仓壁顶部位移的约束以及模型的简化, 仓顶采用位移约束。由于, 网格大小影响模型计算的精度, 因此, 根据经典网格尺寸公式, 取 $\lambda_{cl}/4$ 为网格种子数(λ_{cl} 为非线性屈曲半波长, mm), 网格属性选择 S4R、轴对称性网格, 模型如图 1 所示。

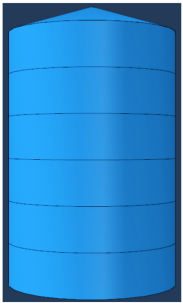


图 1 中心卸料钢筒仓模型

数值建模需要考虑两种材料的相关参数: 薄壁钢板筒仓所用钢材以及仓内粮食储料(小麦)。钢材依据按格式写出来^[7]选择 Q345 钢材, 质量密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $2.10 \times 10^5\text{ GPa}$, 泊松比为 0.3。结合我国钢筒仓工程制造施工实际情况, 确定筒仓模型的材料等级属性, 如表 1 所示。

表 1 钢筒仓材料等级属性

行动评估等级	建造质量等级	仓壁表面等级	安全等级	作用评估等级
3 级	良好, 建造质量公差为 25	光滑, 中等摩擦板壁	1 级	3 级

1.2 仓壁散料压力及储料类型

钢筒仓模型上施加的荷载主要为中心卸料荷载, 取值参考按格式写出来^[8]规定, 其分布形式如图 2、3 所示。其中: P_A 、 P_B 分别为等效面和垂直壁面的压力, kPa; P_{hf} 为填充后的水平侧压力, kPa; P_{wf} 为填充后板壁摩擦力, kPa; P_{vf} 为填充后的垂直应力, kPa; d_c 为筒仓直径, m; z 为等效面深度, m; h_c 为垂直壁段的高度, m; z_i 为与板壁相切时的等效面深度, m。

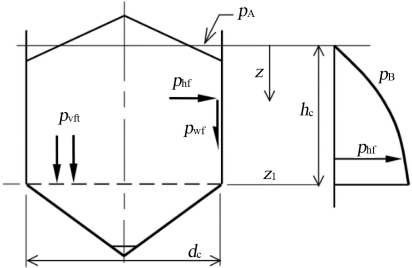


图 2 筒仓垂直段的轴对称压力



图 3 模型荷载分布形式

根据欧洲规范确定在钢筒仓模型上施加的荷载, 荷载主要为中心卸料荷载, 计算公式如下。

$$P_{hf} = P_{ho} Y_J \quad (1)$$

$$P_{wf} = \mu P_{ho} Y_J \quad (2)$$

$$P_{ho} = \gamma K z_0 \quad (3)$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (4)$$

$$Y_J = 1 - e^{-z/z_0} \quad (5)$$

$$P_{he} = C_h P_{hf} \quad (6)$$

$$P_{we} = C_w P_{wf} \quad (7)$$

式中: P_{ho} 为储存固体下位移深度处的渐近水平压力, kPa; Y_J 为 Janssen 压力深度变化函数; μ 为壁面摩擦系数; γ 为单位密度特征值; K 为侧压力系数; z_0 为 Janssen 特征深度, m; A 为筒仓横截面面积, m^2 ; U 为筒仓横截面的内部周长, m; P_{he} 为卸料下的水平压力, kPa; C_h 为水平侧压力卸料系数, 取 1.15; P_{we} 为卸料下的壁面摩擦力, kPa; C_w 为壁摩擦卸料系数, 取 1.10。

我国小麦产量位居第一, 年产量高达 13 425 万吨, 占全世界总产量的六分之一^[9]。结合欧洲规范^[8]与三轴试验^[10]得到其物理力学特性, 如表 2 所示, 为了使模拟薄壳结构产生最为不利的作用结果, 重力密度取上限值 9 kN/m^3 。

表 2 小麦计算参数

重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦 角/($^\circ$)	仓壁摩 擦系数	侧压力 系数	局部荷载 参照系数
9	30	0.3	0.599	0.5

2 钢筒仓的初始几何缺陷

2.1 初始几何缺陷的形成过程

钢筒仓在制造过程中由于受技术手段与施工工艺等因素的影响, 仓壁上会出现焊缝等缺陷。

仓壁施工时, 首先将钢板进行弯曲形成曲面, 然后利用焊接机将曲面钢板焊接在一起, 此时在每一个曲面接头处会产生许多的竖向焊缝及圆周向的焊缝, 分别称为壳箍以及周向焊接缺陷。缺陷是由于焊接过程中产生的塑性变形, 或焊接完成后接缝处温度降低而出现的向内收缩的现象^[3]。最终形成的缺陷焊缝呈轴对称形式, 如图 4 所示。

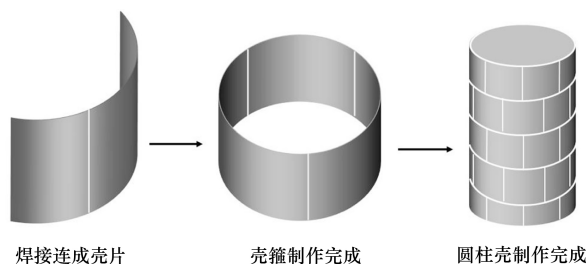
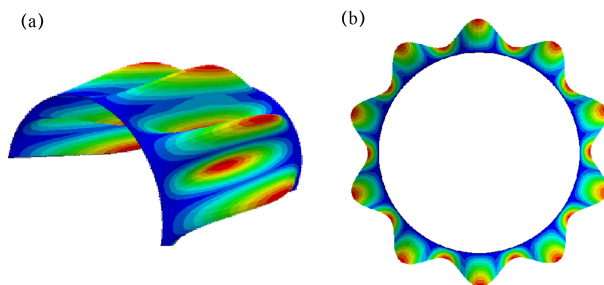


图 4 筒仓仓壁拼接过程

2.2 初始几何缺陷的引入

薄壁壳体结构通常对特征值缺陷较为敏感。当真实结构缺乏实际缺陷相关资料, 无法确定缺陷合理性时, 根据欧洲规范^[11], 初始几何缺陷可由线性分叉分析得到完善钢筒仓一阶特征值屈曲模态, 如图 5 所示。而屈曲分析则采用 Riks 弧长法, 将时间增量步用弧长代替, 得到一阶特征值屈曲模态, 再使用 ABAQUS 中的 INP 文件关键字进行相应修改, 使用 * IMPERFECTION 语句, 引入到钢筒仓模型中进行屈曲分析, 从而得到钢筒仓卸料的屈曲模态。



(a) 切面侧视; (b) 俯视

图 5 钢筒仓一阶特征值屈曲模态

2.3 分析方法

为验算屈曲极限状态, 本文主要采用 3 种分析方法: 1) LBA: 考虑线性分叉的完善钢筒仓分析; 2) GNIA: 考虑几何非线性的含缺陷钢筒仓分析; 3) GMNIA: 考虑几何和材料双非线性的含缺陷钢筒仓的分析。

3 屈曲模态及位移分析

3.1 考虑缺陷的几何非线性分析

通过 GNIA 分析预测的含初始几何缺陷筒仓模型的屈曲变形如图 6 所示。由图 6 可知: 钢筒仓结构变形主要表现为整体结构高度上显示出多个凹凸变形, 在轴向方向展现出屈曲半波长, 模态变形位置处于钢筒仓的中部及下部。考虑特征值缺陷的非完善钢筒仓发生屈曲变形时与完善钢筒仓屈曲变形之间存在明显差别, 因此, 是否具有缺陷也是设计钢筒仓时考虑的主要影响因素之一。

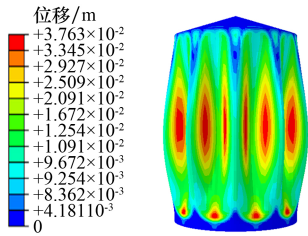


图 6 GNIA 一阶屈曲模态

3.2 考虑缺陷的材料与几何双非线性分析

钢板材料屈服关系根据不同的分析步类型分为弹性本构与塑性本构。通过对弹性本构关系进行线性分析, 得到线性状态下的屈曲承载力; 塑性本构用于进行塑性非线性分析。与 GNIA 分析步不同的是, 在 GMNIA 分析步中的材料赋予阶段, 需将应力应变转化为真实的应力应变才可以使用。转化公式如下。

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (8)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (9)$$

式中: σ 为真实应力, MPa; ε 为真实应变, MPa; σ_{nom} 为名义应力, MPa; ε_{nom} 为名义应变, MPa。

根据上述计算公式对应力应变进行相关计算, 得到应力应变输入数据值, 如图 7 所示。

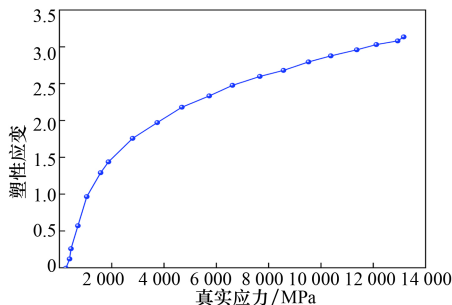


图 7 材料应力-应变曲线

通过 GMNIA 分析预测的含初始几何缺陷的筒

仓模型的屈曲变形如图 8 所示。由图 8 可知: 钢筒仓的屈曲模态在整体结构上呈现多个凹凸变形, 且在轴向方向展现出屈曲半波长, 最大变形量处于钢筒仓中部及下部。在钢筒仓的高度方向出现波纹, 呈现出类似正弦曲线起伏交替的现象, 在钢筒仓的圆周方向出现不同数目的凸起波纹数。考虑特征值缺陷的钢筒仓发生屈曲变形时与完善钢筒仓的屈曲变形之间存在明显差别, 因此缺陷对钢筒仓结构的承载力具有一定的影响。

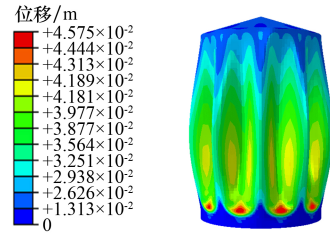


图 8 GMNIA 一阶屈曲模态

3.3 GNIA 和 GMNIA 分析下钢筒仓径向位移分析

图 9 为高度为 9 m, 直径为 6 m, 厚度为 5 mm 的钢筒仓的不同分析步下的径向位移-高度曲线。由图 9 可知: 仓壁位移最大值发生在钢筒仓下部和中部。仓壁受到的水平侧压力随着钢筒仓深度逐渐积累, 造成钢筒仓底部位移量发生明显的增加。对比 GNIA 与 GMNIA 可以明显看出, 径向位移由 0.040 m 增加到 0.045 m, 材料塑性的引入降低了筒仓抵抗变形的能力; 同时, 又因加入了特征值缺陷, 进一步降低了钢筒仓抵抗能力。综上, 钢筒仓对几何缺陷非常敏感, 若想提高钢筒仓的抗屈曲性, 建议在制作钢筒仓时尽量减少几何缺陷的出现。

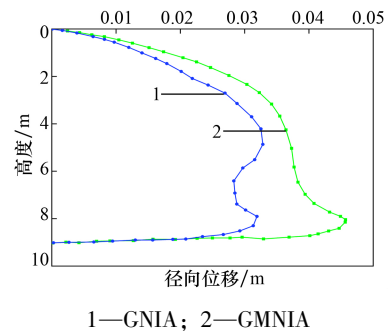


图 9 不同分析步下径向位移-高度曲线

4 结论

本文利用 ABAQUS 对落地式钢筒仓中心动态

卸料过程中的稳定性进行分析,得到以下结论。

(1) 初始几何缺陷的存在进一步降低了筒仓的抵抗能力,径向位移量增加了 0.039 m。因此,开展钢筒仓设计时,应该选择屈服强度高的材料,以减少缺陷的出现。

(2) 钢筒仓的变形位置多位于中部及下部,应考虑加强其中下位置的强度,在条件许可的情况下,在钢筒仓底部或中部设置加肋钢筋进行加固。考虑几何和材料双非线性分析下的缺陷钢筒仓对实际工程的建设有重要参考意义。

(3) 钢筒仓稳定性设计中的不利因素主要为材料非线性与初始缺陷敏感性,前者对高径比小的钢筒仓影响大,后者对高径比大的钢筒仓影响大。因此,在壳体结构设计中,经济条件允许的情况下,优先选择高强度钢材。随着高径比的增加,钢筒仓的容耗率增大,说明随着高径比的增加,钢筒仓的经济性逐渐增加。因此,在设计钢筒仓时,应该采用高径比较大的结构。

参考文献:

- [1] 张翀,舒赣平. 轴压和均匀内压下钢筒仓圆柱壳屈曲承载力研究[J]. 特种结构,2015(4):7.
- [2] 陈新杰,赖海斌,王习国. 钢板筒仓结构稳定承载力研究现状[J]. 江苏建筑,2011(05):37-40.
- [3] TENG J G, SONG C Y, ROTTER J M, Imperfection-sensitivity analysis of shells subject to partial axial compression International Journal of Solids and Structures, 2004,41(24-25):7155-7180.
- [4] ROTTER J M, TENG J G. Elastic stability of cylindrical shells with weld depressions[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115(5):1244-1263.
- [5] 舒赣平,张翀. 轴压和均匀内压共同作用下钢筒仓圆柱壳弹性临界屈曲应力的分析与研究[C]//中国钢协结构稳定与疲劳分会第12届(ASSF-2010)学术交流会暨教学研讨会论文集. 宁波:中国钢结构协会,2010.
- [6] 粮食钢板筒仓设计规范:GB50322—2011[S]. 北京:中国计划出版,2011.
- [7] Eurocode 3: Design of steel structures; DD ENV 1993-1-1:1992[S]. CEN: European Committee for Standardization, 1992.
- [8] Eurocode 1: Actions on structures; BS EN 1991-4:2006[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2006.
- [9] 陈桂香,刘超赛,蒋敏敏,等. 储料竖向压力对粮仓中小麦粮堆湿热传递的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(8):246-253;325.
- [10] 程绪铎,安蓉蓉,曹阳,等. 小麦、稻谷及玉米内摩擦角的测定与比较研究[J]. 食品科学,2009,30(15):86-89.
- [11] Eurocode 3: Design of steel structures; BSEN1993-1-6-2007[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2007.
- [12] 吴霄,肖汝诚. 基于遗传算法的大跨度混合梁斜拉桥索力优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2014,35(6):722-726.
- [13] ZHANG T, BAI H F. Analysis of cable stayed bridge for APDL-based optimization[J]. Advanced Materials Research, 2011(243):1567-1572.
- [14] 余洋. 双环独塔斜拉桥施工控制与索力研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [15] 胡媛媛. 斜拉桥线形与索力非线性算法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

(上接第 25 页)

斜拉索合理初始张拉力分析[J]. 世界桥梁,2021,49(2):78-83.

- [9] WANG L, XIAO Z, LI M. Cable force optimization of cable-stayed bridge based on multiobjective particle swarm optimization algorithm with mutation operation and the influence matrix[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4):2611.
- [10] 孙全胜,孟安鑫. 基于影响矩阵法的非对称独塔斜拉桥索力优化[J]. 中外公路,2016,36(3):85-88.
- [11] 郑一峰,毛健,尹笑,等. 基于影响矩阵的双塔斜拉桥合理成桥状态研究[J]. 公路,2017,62(2):82-85.