

新型开口环梁支承式钢仓结构分析与应用

盛诗景, 彭 潇

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 为了对钢仓结构进行优化设计, 确保其结构安全性和经济合理性, 了解钢仓在贮料荷载下的受力特征至关重要。文章以实际工程中的圆形配料钢仓为研究对象, 运用 ABAQUS 有限元软件分析建立三维有限元模型, 模拟钢仓在典型工况下的实际承载状态。通过系统静力分析, 获得了钢仓壁板、加劲环肋等关键部位的应力分布与变形情况; 揭示了钢仓在贮料压力作用下的真实应力状态和变形特征。有限元模拟与试验验证结果表明: 开口型环梁的承载力和刚度均满足规范要求, 荷载传递路径准确, 并为后续研究提供了数据支撑; 优化后的开口型环梁可降低钢材用量约 20%, 经济效益显著, 同时改善了密闭作业难题, 提升了施工可操作性。本文结果可为相关工程设计提供参考。

关键词: 钢仓; ABAQUS; 应力分析; 贮料荷载

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)04-0075-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.04.045

Structural analysis and application of a steel silo supported by a new open-section ring beam

SHENG Shijing, PENG Xiao

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: To optimize the structural design of steel silos and ensure structural safety and economic efficiency, it is essential to understand the mechanical characteristics of steel silos under storage loads. This study analyzes a circular steel silo for ingredient mixing in an actual industrial project. A precise 3D finite element model was developed using ABAQUS to simulate the structure's bearing behavior under typical operating conditions. Systematic static analysis determined stress distributions and deformations in critical components, including wall plates and stiffening ribs. These outcomes directly identify structural weaknesses and potential risk areas, providing reliable theoretical support and data for design optimization. Based on this analysis, targeted optimizations were applied to wall thickness distribution and stiffener arrangement. The goal is to effectively control material usage, reduce manufacturing costs, and simplify on-site construction while ensuring structural safety and reliability. This approach achieves significant project cost reduction and streamlined construction. The results can provide references for relevant engineering design.

Key words: steel silo; ABAQUS; stress analysis; storage load

钢仓结构被广泛应用于冶金、粮食和水泥等行业, 是一种储存物料的结构形式^[1]。与混凝土筒仓相比, 钢仓的自重更小, 施工时间更短, 钢结构的施工受季节和天气情况影响小; 同时, 钢

结构能够回收利用, 具有良好的社会效应和经济效益^[2]。对于钢仓结构的研究, 主要通过试验和数值分析等方法进行。滕锦光等^[3]给出了锥形漏斗薄膜屈服破坏的计算公式。ZHAO 等^[4]对多种

收稿日期: 2025-09-02

作者简介: 盛诗景(1995—), 女, 工程师, 从事结构设计工作。

转折连接形式的钢仓进行了试验研究,试验结果表明,屈服不代表结构失去承载力,结构的安全、合理可以屈服荷载为指标。李勇^[5]对规则钢煤斗进行了数值计算,结果表明,因支座处约束的不连续导致应力集中,支座处添加加劲肋可以提高结构的稳定性。

在烧结项目中,钢仓是配料室厂房的重要组成部分之一,胶带机将各种原料运送至相应的筒仓内,然后按照设定的比例经称量后混合运出。本文以某工程项目配料室的混匀矿槽为例,结合《钢筒仓技术规范》(GB 50884—2013)(以下简称《规范》),运用 ABAQUS 对钢仓进行有限元整体分析,优化传统环梁和支座设计,并对钢仓壁厚的选取提出建议。

1 工程概况

现有对于钢仓的研究主要是针对仓壁直接放置在结构柱上的柱撑式钢仓[图 1(a)]或者仓壁直接落地的落地式钢仓[图 1(b)],对于仓壁上设钢环梁,支座支撑在环梁下的环梁支撑式钢仓[图 1(c)]的研究和优化则较少。配料室钢仓通常为环梁支撑式的称量钢仓,因此选取湖南某烧结厂配料室混匀料圆形钢仓作为研究对象。该仓有效容积为 441 m³,仓内贮料容重为 23 kN/m³,内摩擦角为 30°。钢仓结构示意图如图 2 所示。上部为直筒仓壁,内径 d_n 为 7.4 m,高度为 7.130 m。下部为锥形漏斗,上口内径为 7.4 m,下口内径为

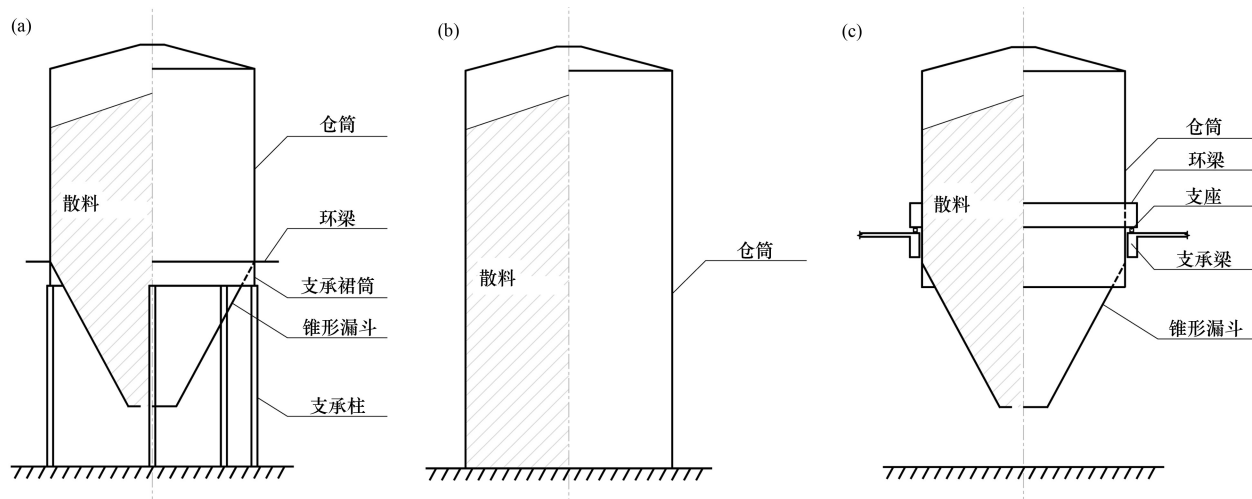
3.127 m,高度 h_n 为 5.870 m,斜壁倾角 α 为 70°。仓壁采用分段不同厚度设计。

筒仓计算半径 $R=3.7$ m,贮料计算高度 $h_n=7.13$ m。依据《规范》($h_n/d_n < 1.5$),可判定该仓为浅仓,忽略贮料与仓壁摩擦力。贮料压力示意如图 3 所示。其中: s 为计算深度,mm; P_{vk} 为主要承受贮料竖向压力,MPa; P_{hk} 仓壁水平压力,MPa; P_{nk} 为漏斗壁法向压力,MPa; P_{tk} 为漏斗壁切向拉力,MPa。分析重点为满仓静态贮存工况下各结构构件的应力、变形及稳定性。

钢仓采用环梁支撑式,直筒段中部设连续支承环梁,环梁上均布 4 个支座,支承于下部钢筋混凝土梁上。仓顶通过厚橡胶带与混凝土平台封闭,在靠近仓顶的仓壁外侧设置 L90×8 角钢环梁增强刚度。支承环梁为关键传力构件,传统做法采用箱型封闭截面环梁(图 4),通过传统力学计算方法设计,具备刚度大、稳定性好的优势。然而,其制造工艺复杂、箱型焊缝质量难控制;同时材料用量多,经济性欠佳。因此,需在保证结构安全前提下,优化支承环梁,寻求一种制造更简便、质量更可控、材料更节省、经济性更优的替代方案。

2 优化设计

针对上述封闭箱型环梁的不足,采用新型开口型环梁的优化方案,示意图如图 5 所示。该设计大幅简化了制造工艺,焊缝均位于开放空间,施焊便利,焊缝质量易检查与控制。同时,在严



(a) 柱撑式钢仓; (b) 落地式钢仓; (c) 环梁支撑式钢仓

图 1 钢仓的支承形式

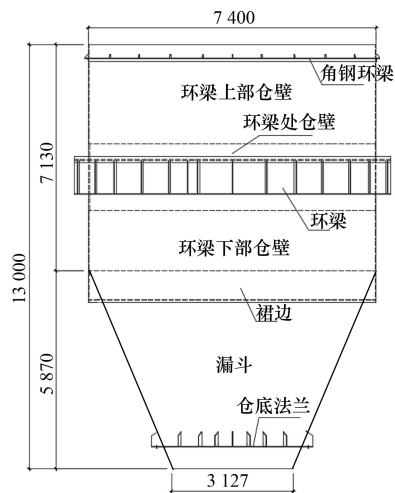


图 2 筒壁立面示意

mm

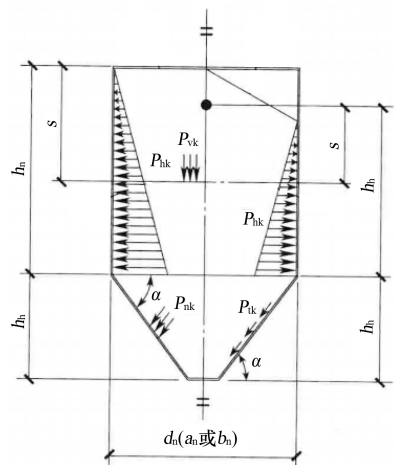
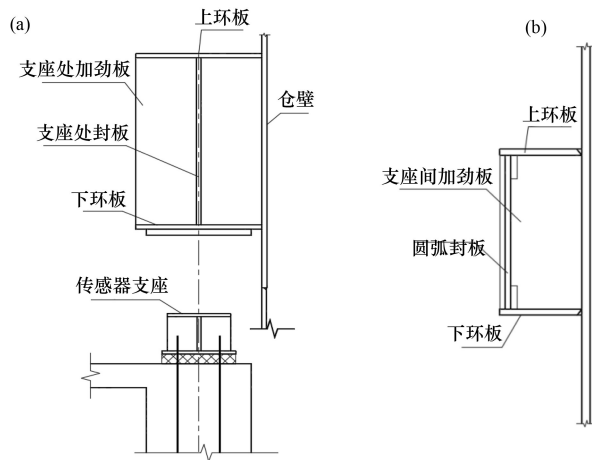


图 3 贮料压力示意

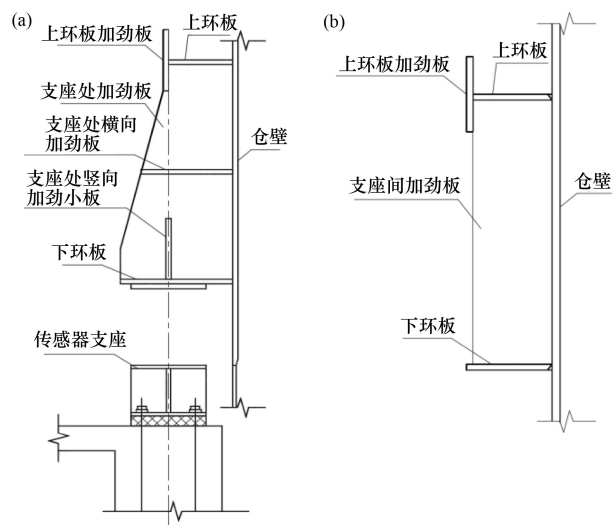
mm



(a) 支座处示意；(b) 支座间示意

图 4 箱型封闭环梁示意

格满足规范承载力和稳定性要求的前提下，优化了截面尺寸，消除了不必要的强度冗余。预期效果：在确保结构安全可靠的基础上，该优化方案



(a) 支座处示意；(b) 支座间示意

图 5 开口环梁示意

可显著降低制造难度与质量控制风险，节省材料成本，并提升施工便捷性，实现安全、经济与可建造性的优化平衡。

3 有限元分析

3.1 基本参数

钢仓在贮料荷载的作用下，筒壁会受到法向压力，且漏斗部分会作用有切向拉力。钢仓位于厂房内部，因此不需考虑风荷载和雪荷载。钢仓贮料参数如表 1 所示。

表 1 贮料参数

容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	侧压力系数 k	法向压力系数 ξ
23	30	$\tan^2(45 - \varphi/2) = 0.33$	$\cos^2\alpha + k\sin^2\alpha = 0.41$

3.2 荷载计算

参考《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)和《钢筒仓技术规范》(GB 50884—2013),恒载分项系数 γ_G 取 1.3,贮料活载分项系数 γ_Q 取 1.4;根据《钢筒仓技术规范》,结构荷载如下:

贮料的顶面以下 s 米处,贮料作用于仓底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力标准值:

$$P_{vk} = \gamma_s \tag{1}$$

贮料的顶面以下 s 米处,贮料作用于仓壁单元面积上的水平压力标准值:

$$P_{hk} = kP_{vk} \tag{2}$$

作用于漏斗壁单位面积上的法向压力标准值:

$$P_{nk} = P_{vk} (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha) \quad (3)$$

作用于漏斗壁单位面积上的切向拉力标准值:

$$P_{tk} = P_{vk} (1 - k) \cos \alpha \sin \alpha \quad (4)$$

式中: k 为侧压力系数; α 为斜壁倾角, ($^\circ$)。

同时, 计算分析支座受力情况时, 需考虑满仓料重和仓体自重, 因此计算支座时, 需在模型中补充筒仓漏斗下口对应料柱料重为 2 295 kN, 如图 6 所示。

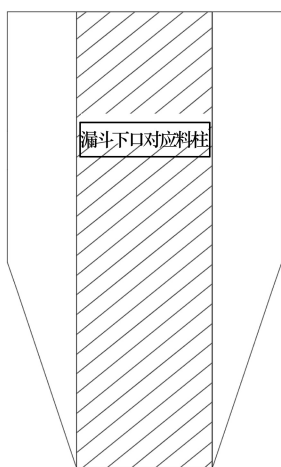


图 6 漏斗下口对应料柱示意

3.3 模型建立

钢仓模型采用壳体单元, 网格属性采用 S4R。各构件之间均采用焊接连接, 因此建模选用的接触方式为绑定约束 Tie, 模拟焊接连接的刚性连接特性。为提高建模和计算效率, 模型简化省略了上部角钢环梁和下料口法兰盘, 有限元模型示意图如图 7、8 所示。

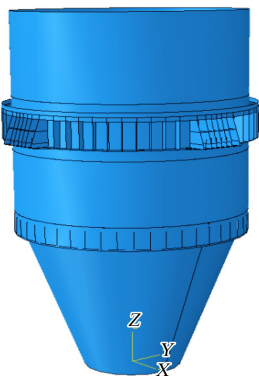


图 7 有限元整体模型示意

3.4 模型验证

在正常使用极限状态下, 有限元所得的支座反力总和为 7 860 kN, 整个筒仓自重为 43.8 t。有

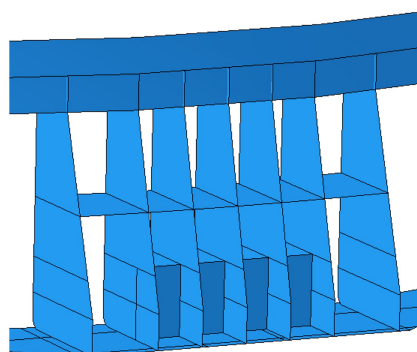


图 8 有限元支座处模型示意

有限元计算得到扣除自重后料重: $8\,289.4 - 43.8 \times 10 = 7\,851.4$ kN。

通过理论计算得到料重为 10 143 kN, 漏斗下口对应料柱料重为 2 295 kN。可得: $10\,143 - 2\,295 = 7\,848$ kN。

有限元计算结果与理论计算值差距约为 0.33‰。因此, 有限元计算结果与理论计算值基本一致。

3.5 后处理分析

有限元计算结果显示, 筒仓整体应力分布具有显著的区域特征。在满仓静态工况下, 钢仓整体最大等效应力如图 9 所示, 仓壁各部位应力如表 2 所示, 仓壁最高应力区域主要集中于以下区域。

(1) 直筒段和漏斗段过渡区: 该区域由于几何形状突变以及环向约束增强, 出现了明显的应力集中, 最大应力值为 129.6 MPa, 应力云图如图 10 所示。

(2) 支座处对应的直筒段区域: 该区域受力复杂, 应力集中出现在支座下边缘对应位置, 为 215 MPa, 应力云图如图 11 所示。

从应力数据可知, 环梁上部仓壁的应力为 29.2 MPa, 为钢材抗拉强度设计值 f_y 的 13.58%; 漏斗壁的应力 98.9 MPa, 为设计值 f_y 的 46%。因此, 设计中可对上述区段壁厚进行减薄优化, 降低不必要的强度冗余, 减少用钢量。

对于钢仓而言, 环梁区域的应力状态直接决定结构整体安全性。其关键部件应力如表 3 所示。支座间加劲板的应力水平仅为 24.9 MPa, 其核心功能为将上下环板联结成一个整体共同工作, 抑制上下环板的面外失稳。当前低应力状态表明该部件存在厚度优化空间; 支座处横向加劲板通过约束支座加劲板的宽厚比防止屈曲, 而支座加劲

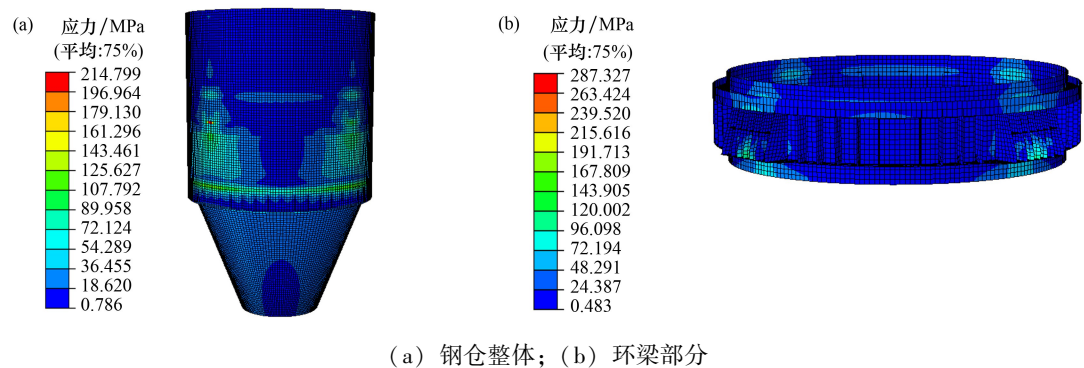


图 9 最大等效应力

表 2 各部分仓壁最大应力值

仓壁位置	壁厚/mm	高度/mm	最大等效应力/MPa	设计值 f_y /MPa
环梁上部仓壁	12	3 000	29.2	215
环梁处仓壁	22	1 900	214.8	295
环梁下部仓壁	14	3 030	166.4	215
漏斗	14	5 870	98.9	215

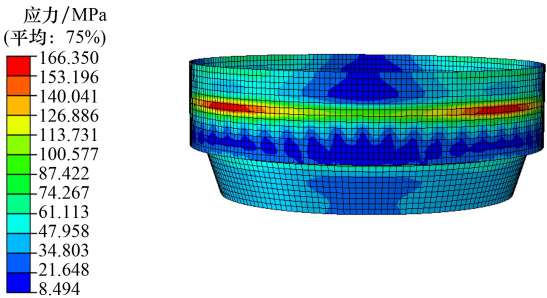


图 10 直筒段和漏斗段过渡区应力云图

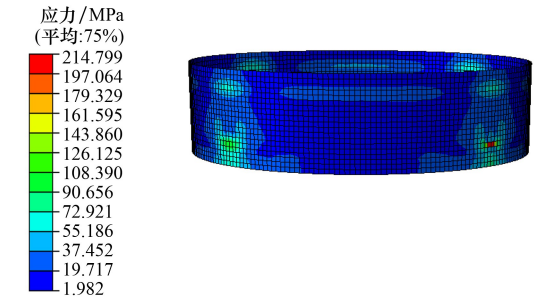


图 11 支座处对应的直筒段区域应力云图

表 3 支座环梁区域各部件最大应力值

部件名称	厚度/mm	宽度/mm	最大等效应力/MPa	设计值 f_y /MPa
上环板	25	300	61.4	295
下环板	25	325	207.5	295
上环板加劲板	25	300	102.7	295
支座间加劲板	16	300	24.9	305
支座处加劲板	25	300 ~ 525	287.3	295
支座处竖向加劲小板	25	200	109.3	295
支座处横向加劲板	22、25	430	50.7	295

板作为反力直接承载体，应力峰值达 287.3 MPa，可通过增加板件厚度的方式，有效降低应力峰值至设计强度之下。

4 与传统做法对比分析

4.1 经济性分析对比

针对环梁这一关键构件，选取采用传统封闭型环梁设计的两个典型实际工程项目进行对比分析，表 4 详细列出了不同方案的钢材用量数据。

分析结果表明：在确保钢仓容积与贮料总重相近的条件下，采用新型开口型环梁设计方案，其用钢量相较于采用传统力学计算方法设计的封闭型环梁明显降低。由表 4 可知，开口型方案的环梁钢材用量降幅约为 20%，充分证明该新型方案在有效控制结构功能指标的前提下，优化效果显著。

表 4 不同项目环梁部分用钢量对比

项目	容积/m ³	料重/t	环梁部分用钢量/t	用钢量降幅/%
本文混匀仓	441	1 015	9.39	—
项目 A(封闭环梁)	465	1 023	12.46	24.64
项目 B(封闭环梁)	449	988	11.71	19.81

4.2 施工效率分析对比

除经济性优势外，优化方案在施工可实施性方面亦显著提升。传统封闭箱型环梁因构造特性存在固有局限：弧形外板需分段组焊，施工精度控制难度大，工序繁琐。封闭结构内部作业状态无法实时观测，质量问题难以及时发现。开口型环梁的开放截面使所有焊缝位于外部可视区域，避免了密闭空间作业的盲区问题。外露节点便于全过程质量检查，降低隐蔽缺陷风险。将特殊构造转化为常规钢结构施工模式，大幅降低技术难度与安全风险。

5 试验分析

5.1 试验目的

通过在钢仓关键部位布置应变测点，实时监测并记录结构在实际工作载荷下的应变响应。验证有限元模型在静态满仓工况下的计算准确性，重点评估仓壁应力分布规律，为结构优化与模型

修正提供数据支撑。

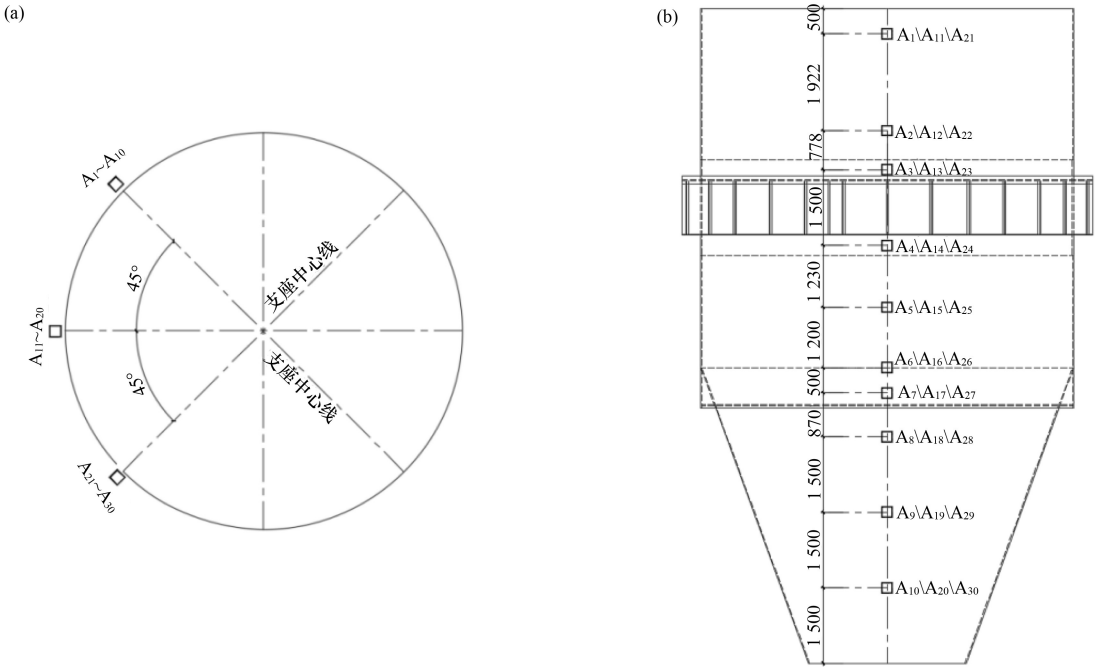
5.2 试验概述

为了验证有限元模型的准确性，选取前文所述湖南某烧结厂配料室混匀料圆形钢仓为试验对象，开展足尺试验。试验通过分级加载至设计料重，模拟满仓静态工况。筒身测点布置如图 12 所示，筒身上一共布置 30 个测点，其中有效测量点为 27 个。测点 A₁~A₃、A₁₁~A₁₃、A₂₁~A₂₃采用单向应变片，其余测点采用三向应变花。试验现场实拍图如图 13 所示。

5.3 试验数据分析

对比直筒段仓壁在支座中心和支座 45°环向偏移位置的环向应力试验值与有限元分析值(图 14)，结果显示，试验结果和有限元模拟结果分布趋势基本一致，相比于支座中心对应结果，支座 45°环向偏移位置结果吻合度更高，验证了荷载传递路径的准确性。

对比漏斗段仓壁在支座中心和支座 45°环向



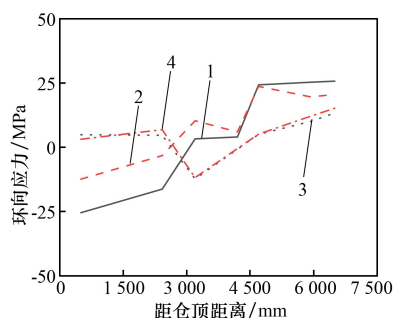
(a) 俯视图；(b) 正视图

图 12 筒身测点布置

mm



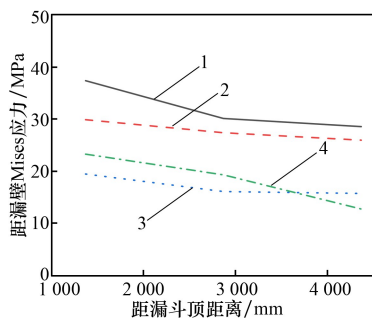
图 13 试验现场实拍



1—支座对应处试验结果; 2—支座对应处有限元结果;
3—支座 45°处试验结果; 3—支座 45°处有限元结果。

图 14 直筒段仓壁环向应力对比

偏移位置的 Mises 应力试验值与有限元值(图 15), 结果显示, 支座中心对应位置的试验所测应力均大于有限元计算结果, 支座 45°环向偏移位置的有限元应力基本高于试验所测应力。与直筒段相比, 尽管荷载传递路径的整体趋势合理, 但受应变片施工质量、筒体制造误差、加载的准确性等因素影响, 漏斗段局部区域应力值的吻合度有一定降低。



1—支座对应处试验结果; 2—支座对应处有限元结果;
3—支座 45°处试验结果; 4—支座 45°处有限元结果。

图 15 漏斗段仓壁 Mises 应力对比

基于上述对比分析结果, 在仓壁厚度设计中,

建议直筒段以支座中心对应区域的应力值作为关键依据; 同时, 针对漏斗段, 建议对仓壁进行加厚处理。

6 结论与展望

(1) 通过精细化有限元模拟与足尺加载试验的系统验证, 证实开口型环梁在极限承载力和刚度等关键指标上均满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)和《钢筒仓技术规范》(GB 50884—2013)要求, 具备替代传统封闭箱型环梁的完整技术可行性, 为新型结构应用提供理论支撑与实证依据。

(2) 经截面优化设计, 开口型环梁实现钢材用量约 20% 的显著降低, 在保障结构安全的前提下, 可获得明显的经济效益。

(3) 开口型环梁改善了封闭箱型环梁的密闭作业难题, 施工可操作性与质量可控性显著提升。

(4) 后续可基于现有应力分析和试验成果, 进一步优化支座加劲板、仓壁等关键部件的厚度设计, 持续提升用钢效率。

(5) 试验结果和有限元模拟结果分布趋势基本一致, 验证了荷载传递路径的准确性。仓壁厚度设计应以支座中心对应的主应力为依据; 漏斗段需预留充分安全裕度。

参考文献:

- [1] 陈辉. 圆形水泥钢筒仓有限元分析及其在工程中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [2] 徐欣, 吴晓龙. 某钢仓结构有限元分析与优化[J]. 山西建筑, 2021(5): 48-53.
- [3] 滕锦光, 赵阳. 大型钢筒仓的结构行为与设计[J]. 土木工程学报, 2001(4): 46-55.
- [4] ZHAO Y, TENG J G. Buckling experiments on cone-cylinder intersections under internal pressure [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(12): 1231-1239.
- [5] 李勇. 钢筒仓结构受力行为分析与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.