

大型钢筒仓有限元分析及结构优化设计

姚新顺¹ 曹王鹏² 李建涛² 张朋朋²

(1 中电建路桥集团有限公司 北京 100160; 2 中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710065)

摘要:大型钢筒仓的风荷载及储料荷载对其结构的影响较大。本文以大型柱支承式钢筒仓为研究对象,利用 ANSYS 有限元分析软件建立模型,然后利用我国规范对风荷载进行计算,研究空仓时在风荷载下钢筒仓应力应变情况,建立参数化的储料模型,让储料直接作用于钢筒仓,通过偏心距改变储料偏心程度、改变储料及储料锥体部分的高度来改变偏心储料体积,从而改变偏心程度。通过分析风荷载+空仓、轴对称储料荷载、不同深度以及不同偏心程度装料和卸料荷载的应力应变,对其最大应力和位移进行优化分析,优化后的应力从 0.120×10^9 减小到 0.107×10^9 ,最大应力明显减小,最大位移量减少 0.001546m,同时钢筒仓质量减少 13%,经济性更好。

关键词:钢筒仓;有限元分析;储料荷载;优化设计

0 引言

钢筒仓最先在国外的应用较为广泛,自 1990 年左右我国钢筒仓开始大力发展。近年来,众多学者对于钢筒仓结构稳定性设计、储料荷载、抗震等问题进行了大量研究,已有了较为全面的认识^[1,2]。如张德玉等^[3]使用 ANSYS 对混凝土浅筒仓进行有限元分析,提出了一维杆系的简化模型;程瑜^[4]使用 MADIS 软件对柱承式和筒承式钢筋混凝土单仓和群仓进行有限元分析,得出群仓的抗震性能优于单仓更好,筒承式筒仓抗震性能优于柱承式。刘冲冲等^[5]用 Abaqus 对受损的混凝土钢筒仓进行结构分析,研究了满仓和空仓两种工况。姜学佳等^[6]用 PFC3D 软件结合实仓试验研究双侧卸料筒仓在不同高径比下的静、动态侧压力大小和超压系数。结果表明,与深仓相比,浅仓仓壁的动态侧压力变化较缓和,安全性较好,整体流持时较短,可加入改流体、减压管等改善流态,降低结拱概率。段君峰等^[7]总结了筒仓一贮料结构抗震研究历史和现状,认为合理准确地确定贮料参与地震有效质量是筒仓抗震研究的关键。但在满足钢筒仓在满仓工况下强度要求的同时,为有效减少其自重,仍需进一步研究。

本文根据 GB 50048-2013 钢筒仓技术规范^[8],通过 ANSYS 进行有限元分析对钢筒仓结构做出优化设计,在满足强度要求的前提下,钢材总质量由 $1.6514\times 10^6\text{kg}$ 变为 $1.4657\times 10^6\text{kg}$,质量减少 13%。

1 钢筒仓参数

该大型钢筒仓容量为 10000t,储存的是轻骨料,其密度为 1000kg/m^3 ,储料与仓壁的摩擦系数 $\mu=0.2$ 。钢筒仓的钢板之间、钢板和槽钢之间以及支撑柱和仓体之间采用焊接的方式连接。钢筒仓模型和主要参数如表 1 所示。

表 1 钢筒仓主要尺寸参数

名称	尺寸/m 数量/个 坡度/(°)
筒仓单段高度	CS10=3.5
筒仓外直径	CS1=20
筒仓节段数量	CSN2=13
筒仓总高度	CS3=CSN2×CS10
筒仓壁厚	CS4=32×1E-3
筒仓环向支撑分布数量	CSN5=18
仓底坡度	CS11=45
仓顶坡度	CS12=30
仓底水平段半径	CS13=800×1E-3
仓顶水平段半径	CS14=800×1E-3
仓底距离结构最底部的距离	CS21=5
仓底斜坡对应外壁的竖向长度	CS22=(CS1/2-CS13) ×TAN(CS11)
仓壁顶部与最底部的竖向距离	CS23=CS21+CS22+CS3
仓顶斜坡对应外壁的竖向长度	CS24=(CS1/2-CS14) ×TAN(CS12)
仓顶竖向高度(从竖向支撑最底部至仓顶)	CS25=CS23+CS24

2 载荷计算

本文主要考虑重力荷载、轴对称储料荷载。

2.1 重力荷载

重力荷载主要包括仓体自重、支撑体自重等，重力计算在 ANSYS 中直接可以施加，本文的重力加速度设置为 $g=9.8\text{m/s}^{2[9]}$ 。施加重力荷载如图 1 所示。

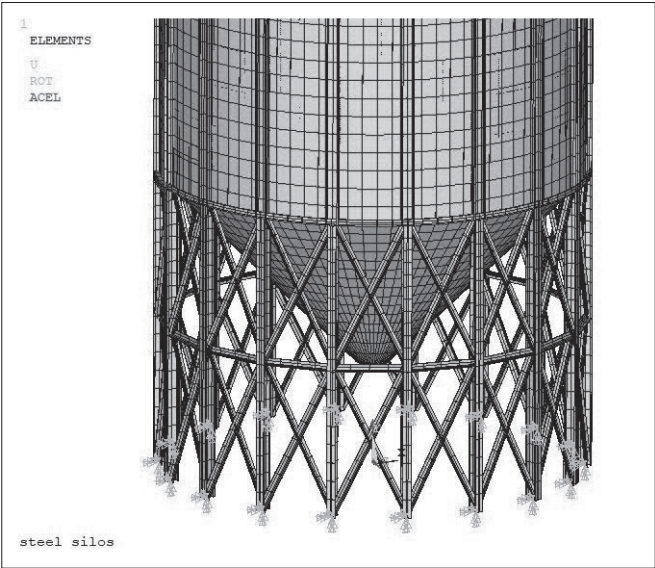


图 1 施加重力荷载

2.2 轴对称荷载

本文储料为骨料，弹性模量设置为 1000×10^6 ，泊松比为 0.1，密度为 1500kg/m^3 。不同于一般钢筒仓储料荷载研究方式，本文直接建立了骨料的参数化模型，储料直接作用于钢筒仓，而不是编写储料荷载程序再施加荷载作用于钢筒仓。该方法的优点就是可以更加形象地表现储料对钢筒仓的作用效果，但是该方法忽视了储料和储料之间的相互摩擦作用。为了方便研究，将储料的状态参数化。储料状态参数如表 2 所示。

表 2 储料状态参数

名称	参数表示
储料偏心距 /m	$CS31=CS1/2 \times x$
储料高度 /m	$CS32=CS3 \times h$
储料锥度对应竖向高度 /m	$CS33=CS24 \times 1.0$

本文储料荷载的施加是通过在钢筒仓内建立储料模型，直接对钢筒仓施加由储料引起的竖直和水平压力。在实际工况中，储料并不会完全装满钢筒仓（即 $h \neq 1$ ），且当 $h=1$ 时，该储料模型和钢筒仓仓顶会合并在一起，从而影响分析。为了保证钢筒仓在

尽量装满情况下的稳定性，本文满仓时取 $h=0.9$ （储料高度为钢筒仓竖直壁高度的 0.9 倍）分析。储料中心部位的椎体模型和储料的整体模型分别如图 2、图 3 所示。

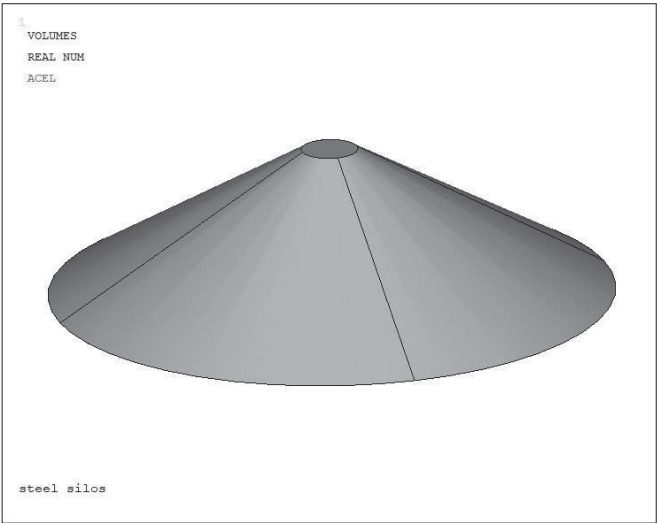


图 2 储料锥体模型

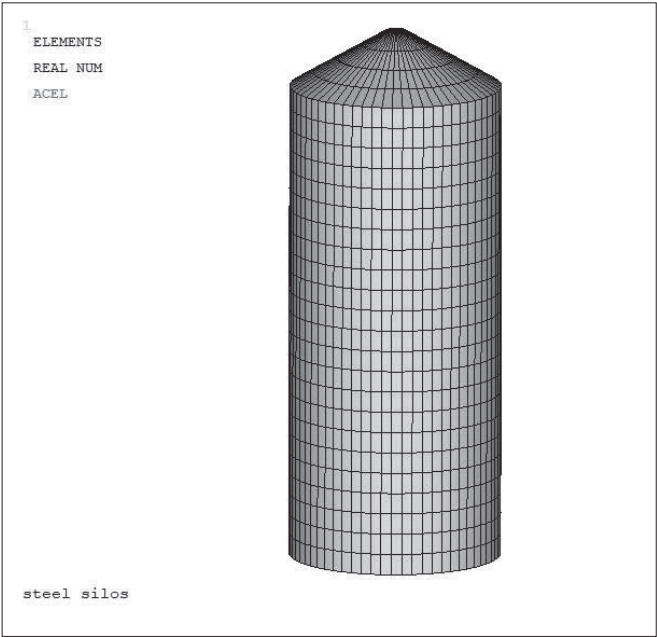


图 3 储料整体模型

3 钢筒仓有限元模型

3.1 材料属性

钢筒仓采用 Q235 钢，密度为 7850kg/m^3 ，弹性模量为 $E=206\text{GPa}$ ，泊松比为 0.27，许用应力 $[\sigma]=156.7\text{MPa}$ 。

3.2 约束条件

根据钢筒仓实际情况，钢筒仓底部支撑部分与地

面固结，所以需要 对 每一根支撑柱与地面接触点进行约束，并且约束 6 个自由度。优化前钢筒仓模型如图 4 所示。

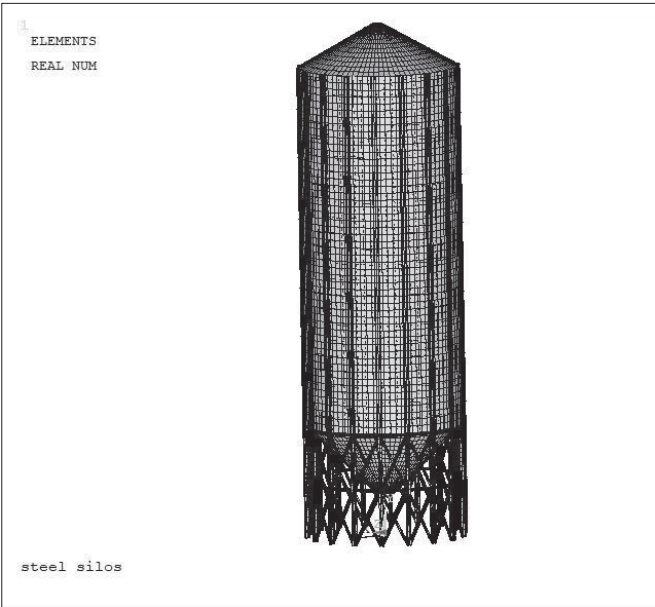


图 4 优化前钢筒仓模型

4 施加荷载及优化分析

由于储料荷载以及钢筒仓自重的影响，仓底锥体与竖直仓壁接触位置的应力和应变最大，且最大应力为 $0.120 \times 10^9 \text{Pa}$ ，实际最大位移为 0.011129m。在同一水平位置，储料与钢筒仓接触的位置应力大小和位移量基本一致，这是因为轴对称储料荷载储料顶端锥形部分以及储料圆柱体部分的压力一样，导致同一水平位置钢筒仓壁的压力基本一致。原应力力图如图 5、图 6 所示。

在上述分析中发现，主要荷载施加在仓壁底部与支撑体连接部分，提出加强强度的方案，同时竖直仓壁上部分远超许用应力。为了降低成本，所以对仓壁进行以下优化：

- (1) 仓壁底部一段槽钢，再增加一段；
- (2) 仓壁顶往下数第 0、2、4、6 段仓壁增加几个小界面槽钢；
- (3) 仓壁底部两圈槽钢的厚度增加到 80mm，筒仓底部的支撑工字钢截面厚度增加到 100mm ；
- (4) 改变不同段仓壁的厚度，总共研究表 3 中的 8 组数据，并求得每组的应力应变，如表 4 所示。

Q235 的许用应力为 135MPa，表 3 所示工况储料高度为竖直仓壁的 0.7 倍，为了保证在基本满仓情况下仍然可以安全工作，取 G4、G5、G6 三种壁厚分析

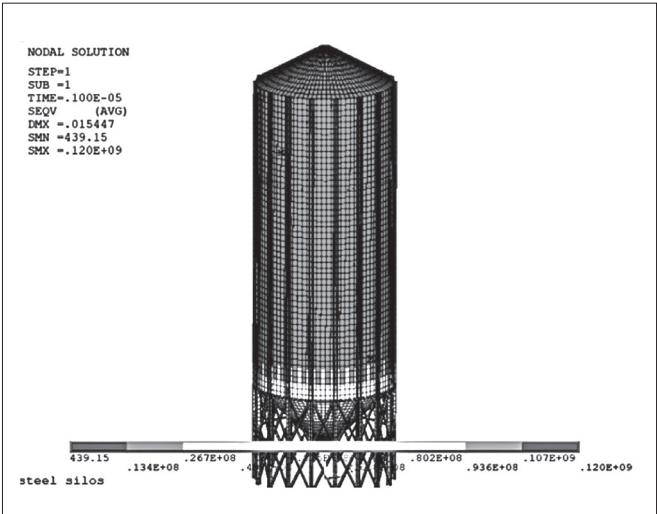


图 5 原应力图

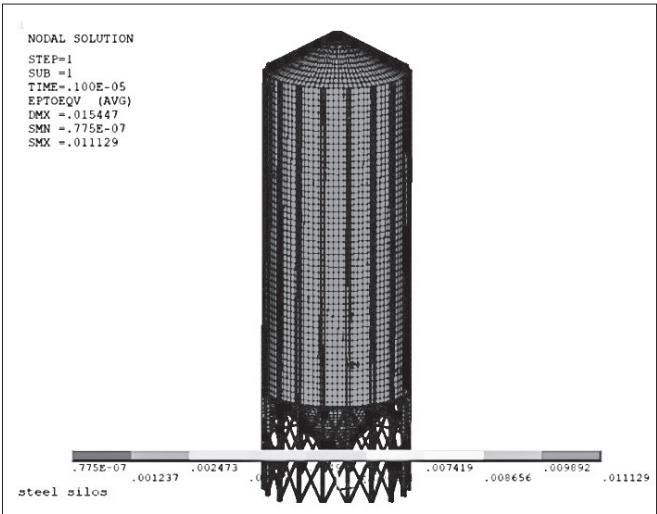


图 6 原应力图

表 3 钢筒仓壁厚

编号	高度 / mm					
	1 ~ 2	3 ~ 4	5 ~ 6	7 ~ 8	9 ~ 10	11 ~ 13
G1	16	12	10	8	6	6
G2	18	14	10	8	6	6
G3	20	16	12	10	8	6
G4	22	18	14	10	8	6
G5	24	20	16	12	8	6
G6	26	22	18	14	10	6
G7	28	24	20	16	12	8
G8	30	26	22	18	14	10

储料在 0.9 倍竖直仓壁下的应力应变。经分析得出：在 G5 壁厚下，最大应力恰好达到了 $0.133 \times 10^9 \text{Pa}$ ，位移为 0.011900m，故该壁厚满足要求，且经济性最好。

表 4 每组对应的应力位移值

编号	名称	
	应力 /Pa	位移 /m
G1	0.140×10^9	0.010165
G2	0.129×10^9	0.009992
G3	0.120×10^9	0.009842
G4	0.113×10^9	0.009706
G5	0.107×10^9	0.009583
G6	0.103×10^9	0.009468
G7	0.986×10^8	0.009360
G8	0.953×10^9	0.009258

优化后的模型如图 7 所示。优化后的应力应变如图 8、图 9 所示。

通过对比，优化后的应力从 0.120×10^9 减小到 0.107×10^9 ，最大应力明显减小，而且位移减少 0.001546m，优化前钢材总质量： $1.6514 \times 10^6\text{kg}$ ，即 1651.4t，优化后钢材总质量： $1.4657 \times 10^6\text{kg}$ ，即 1465.7t，质量减少 13%，更加经济性。

5 结语

本文通过对几种载荷的分析，提出了增加强度的方法：仓壁底部一段槽钢，再增加一段；仓壁顶往下数第 0、2、4、6 段仓壁增加几个小界面槽钢；仓壁底部两圈槽钢的厚度增加到 80mm；筒仓底部的支撑工字钢截面厚度增加到 100mm；对仓壁进行优化。

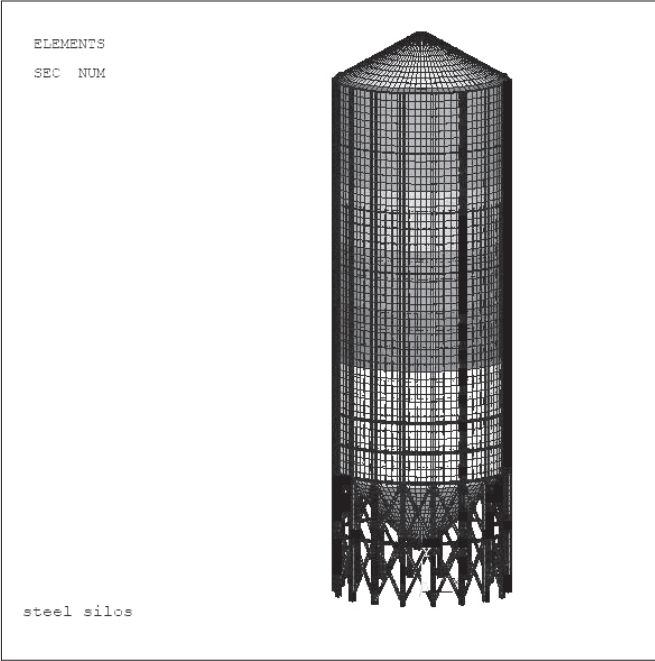


图 7 优化后钢筒仓模型

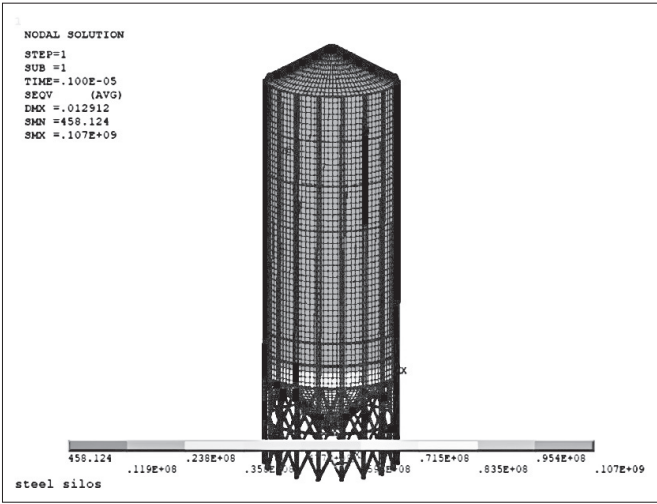


图 8 优化后应力图

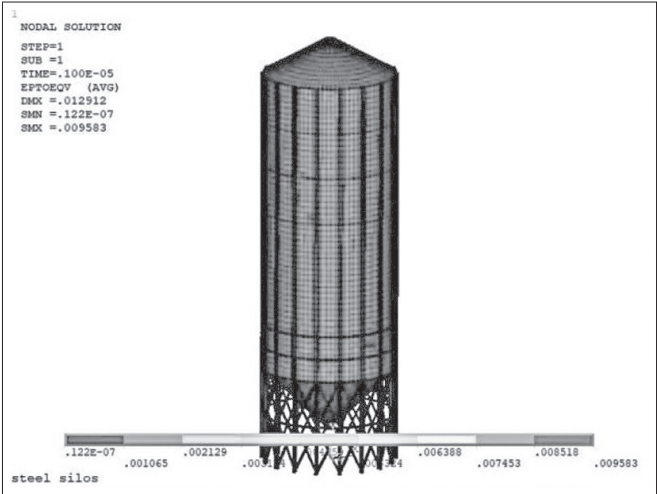


图 9 优化后位移图

优化后的最大应力从 0.120×10^9 减小到 0.107×10^9 ，最大应力明显减小，而且最大位移减少 0.001546m，优化前钢材总质量为 $1.6514 \times 10^6\text{kg}$ ，优化后钢材总质量： $1.4657 \times 10^6\text{kg}$ ，质量减少近 13%，更加经济。

参考文献：

[1] 康伟楠. 圆形钢筒仓结构设计探讨 [J]. 福建建材, 2022(07):42-45.

[2] 姜东, 李红星, 赵晴, 等. 大直径贮煤钢筒仓结构设计 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2021, 54 (S2):91-95.

[3] 张德玉. 大直径预应力混凝土浅筒仓抗震计算及模型简化分析 [D]. 合肥: 安徽建筑工业学院, 2010.

[4] 程瑜. 钢筋混凝土立筒仓结构抗震分析 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2010.

[5] 刘冲冲. 钢筒仓下内框架支承结构有限元分析 [D]. 济南:

山东建筑大学, 2018.

[6] 原方, 姜学佳, 张健, 等. 高径比不同的双侧壁卸料筒仓卸料压力对比研究 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2019, 40(03): 108-113.

[7] 段君峰, 韩阳, 李东桥, 等. 筒仓-散体结构体系动力特性研究现状及发展趋势 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(06): 2143-2149.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢筒仓技术规范: GB 50884-2013[S]

北京: 中国计划出版社, 2013.

[9] 曹庆帅. 大型钢筒仓在储料荷载及风荷载作用下的稳定性 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

作者简介: 姚新顺 (1975.01-), 男, 汉族, 陕西渭南人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机械工程、建筑施工技术。

通讯作者: 曹王鹏 (1984.04-), 男, 汉族, 陕西渭南人, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程、建筑施工技术。

(上接第 28 页)

最小值 $C_{\min}$ 时, 可求解出蒸汽喷射压缩机可达到的最大压缩压力 p_c 。

参考文献:

[1] 季建刚, 王如竹, 黎立新. 蒸汽喷射压缩机特性计算与分

析 [J]. 船舶工程, 2006(05): 46-49.

[2] 索科洛夫, 津格尔. 喷射器 [M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977: 17-36.

作者简介: 黄溥 (1989.11-), 男, 汉族, 黑龙江牡丹江人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程技术、机械设计与制造。