

温度荷载对钢筒仓应力影响的研究

黄宝昌

东北大学设计研究院（有限公司）

摘要：本文根据伊朗某港口大型钢筒仓的工程实例，采用国际通用有限元分析软件SAP2000建立钢筒仓计算模型，分析了温度荷载对钢筒仓应力分布的影响，总结了空仓状态和满仓状态下温度荷载对仓壁环向应力和竖向应力的影响规律，为相关研究及工程设计提供参考依据。

关键词：温度荷载；钢筒仓；有限元；应力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2021.24.086

引言：钢筒仓因具有轻质高强、占地面积小、建造周期短等优点，现已在工业、农业、电力等行业中应用地越来越广泛。钢筒仓是一种荷载大、重心高的薄壳结构^[1]，且受力状态复杂，在一些温差较大的地区建设钢筒仓，温度荷载引起的仓壁应力是不可忽略的，此应力往往远大于储料荷载作用产生的仓壁应力，很有可能导致钢筒仓破坏甚至垮塌事故的发生，因此研究温度荷载对仓壁应力分布的影响是至关重要的，本文采用有限元分析软件SAP2000进行计算，总结了空仓状态和满仓状态下温度荷载对仓壁环向应力和竖向应力的影响规律。

一、SAP2000有限元分析模型

计算模型如图1所示，模型板单元数目共26128个，钢筒仓直径为36m，高度为41m，下部为钢筋混凝土环墙式基础。仓壁采用厚度为16mm~28mm的钢板焊接而成，环向加劲肋焊接于仓壁外侧，截面采用H型钢，间距1.5m~3.0m，以约束仓壁的环向变形；纵向加劲肋焊接于仓壁内侧，截面采用H型钢，间距1.5m，以传递仓顶及仓壁所承受的竖向力。环向加劲肋、竖向加劲肋与仓壁构成协同受力体系，可大大提高钢筒仓的承载力。仓顶支撑钢梁采用放射型布置，放射梁截面采用HN700×300×13×24，数量为18根且沿圆周均匀布置，跨度为14.4m，环向设置若干次梁以拉结放射梁，仓顶部环梁直径为9m，截面采用HN700×300×13×24。SAP2000软件建模采用母线旋转法，确定关键点后绕全局坐标系Z轴旋转120份（即圆周角为3度），为使计算结果更为精确，将仓壁单元划分为高宽比接近于1的矩形形状。仓壁板、钢梁及加劲肋材质采用Q355B，材料屈服强度 $f_y=310\text{N/mm}^2$ ，弹性模量 $E_s=2.06\times 10^5\text{N/mm}^2$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，密度 $\rho=7.85\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，热力学膨胀系数 $=1.2\times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}$ 。

二、荷载计算

仓内储料容重 $\rho=11\text{kN/m}^3$ ，储料内摩擦角 $=30^\circ$ ，储料对仓壁的摩擦系数 $\mu=0.4$ 。本文算例为大跨空间结构模型^[2]，采用特征向量法（兰佐斯法）很难得到有效振型参与质量的模态分析，故计算时采用多重利兹向量法，此方法考虑了荷载分布状态及动力贡献，与实际情况更为接近。

采用承载力极限状态进行荷载效应组合，对最不利

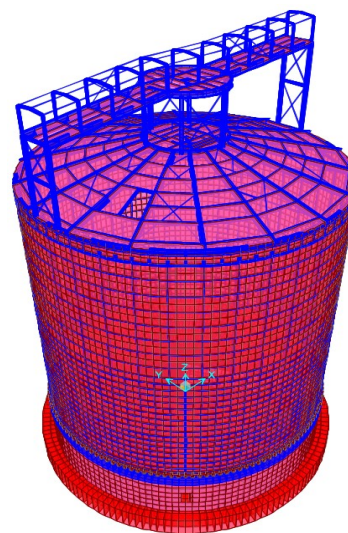


图1 SAP2000计算模型

组合进行分析计算，根据本文采用工程实例的实际情况，最终确定的荷载效应组合如下：

- 1.3恒荷载+1.5活荷载+1.5温度荷载
- 1.3恒荷载+1.3储料荷载+1.5活荷载
- 1.3恒荷载+1.3储料荷载+1.5×0.6（活荷载+风荷载）
- 1.3恒荷载+1.3储料荷载+1.5活荷载+1.5温度荷载

根据《钢筒仓技术规范》^[3]（GB50884-2013）相关规定， $41\text{m}/36\text{m}=1.14<1.5$ ，储料荷载按浅仓计算，计算公式如下：

$$P_{hk}=\max(\gamma \cdot \rho(1-e^{-\mu ks/\rho})/\mu, k \cdot \gamma \cdot s) \quad (1)$$

$$P_{fk}=\mu \cdot k \cdot \gamma \cdot s \quad (2)$$

$$P_{vk}=\gamma \cdot s \quad (3)$$

式中： P_{hk} —作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值；

P_{fk} —作用于仓壁单位面积上的竖向摩擦力标准值；

P_{vk} —单位面积上的竖向压力标准值；

s —储料顶面至所计算截面处的距离。

本文温度荷载考虑升温荷载和降温荷载，对应每个有温度荷载的工况组合均考虑升温效应的荷载组合和降温效应的荷载组合，并结合空仓和满仓状态分别计算。根据项目所在地的气候条件，模型计算时参考温度取为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，升温荷载工况 $\Delta T_k=35\text{ }^\circ\text{C}$ ，降温荷载工况 $\Delta T_k=-25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

建模过程中，SAP2000软件中采用节点样式的方法对仓壁施加沿高度方向变化的储料荷载，对仓壁板单元施加水平和竖向储料荷载时，需要注意参考高度及荷载作用方向的选取，以此保证储料荷载的正确施加。

三、计算结果与分析

本文计算温度荷载作用对仓壁应力的影响时，结合了空仓和满仓两种工况分别计算，下图中 σ_x 为仓壁单元环向应力， σ_y 为仓壁单元竖向应力。

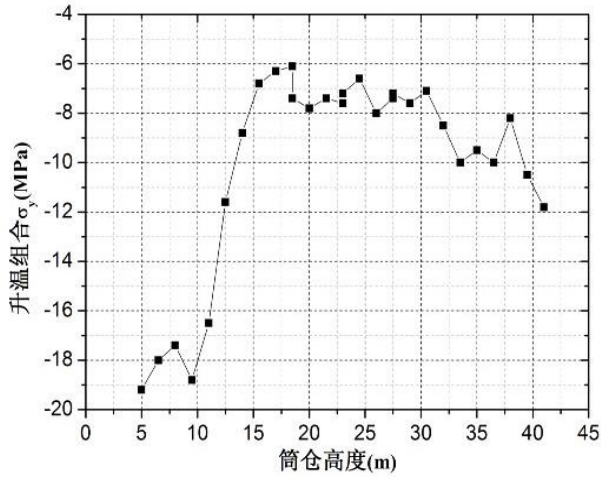


图2 空仓状态下升温组合 σ_y 随高度分布情况

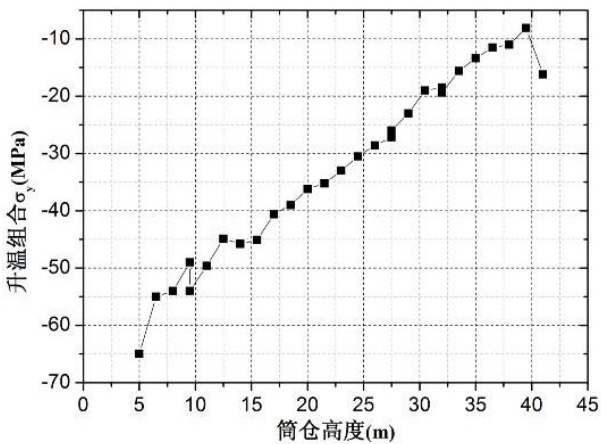


图3 满仓状态下升温组合 σ_y 随高度分布情况

由图2可知，在空仓状态下，升温荷载对仓壁竖向应力 σ_y 的影响主要在仓底和仓顶区域，仓壁竖向应力 σ_y 为压应力（负），仓底因受到下部混凝土基础的约束，在升温荷载作用下膨胀变形不能自由发展导致其竖向应力 σ_y 在底部区域突变。仓顶由于受到仓顶支撑梁的约束，同样竖向应力 σ_y 出现突变现象。仓壁中部所受约束较小，因此仓壁中部竖向应力 σ_y 较小。由图3可知，在满仓状态下，仓壁竖向应力 σ_y 为温度荷载和储料荷载所引起的应力叠加值，仓壁竖向应力 σ_y 的主要影响区域在仓顶和仓底，与空仓状态下应力分布趋势基本一致。

由图4可知，在空仓状态下，降温荷载对仓壁环向应力 σ_x 的影响主要在仓底和仓顶区域，仓壁环向应力 σ_x 为拉应力（正），仓壁中部环向应力 σ_x 受降温荷载影响很小。由图5可知，在满仓状态下，仓壁环向应力 σ_x 为温度荷载和储料荷载所引起的应力叠加值，不同于空仓状态下环向应力 σ_x 分布，满仓时仓壁中下部区域环

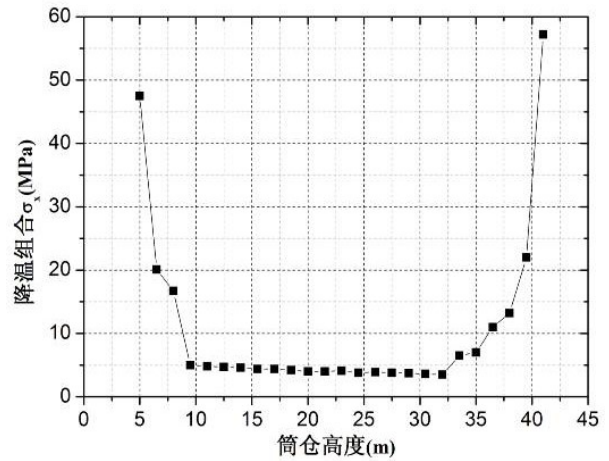


图4 空仓状态下降温组合 σ_x 随高度分布情况

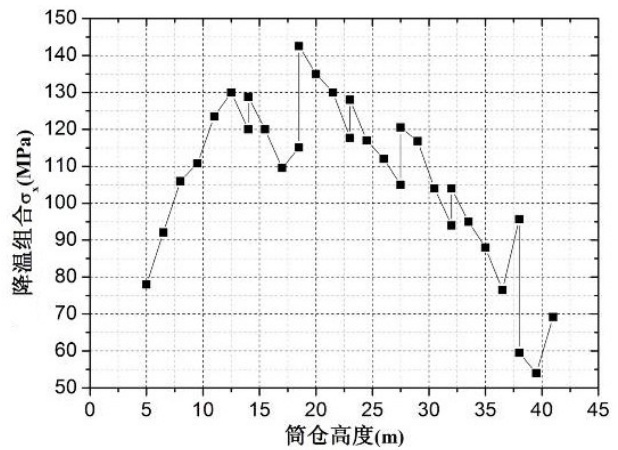


图5 满仓状态下降温组合 σ_x 随高度分布情况

向应力要大于仓底和仓顶区域，其最大数值为144MPa。

结束语

在季节温差较大的地区，温度荷载引起的仓壁应力是不可忽略的，此应力往往远大于储料荷载引起的仓壁应力，很有可能导致钢筒仓破坏甚至垮塌事故的发生，出于安全原则，工程设计时应全面考虑温度作用，其不利组合分项系数可按1.5考虑。

仓底、仓壁中下部及仓顶区域是应力较大且出现突变的区域，结合稳定性计算，加劲肋应重点布置在仓底、仓壁中下部及仓顶区域，其他区域为构造加强。此外，钢筒仓在使用期间，在升温荷载和降温荷载长期交替作用下，应定期观测有无脱焊现象发生，应及时发现并采取相应措施以防止局部变形或应力集中等情况发生。

参考文献

- [1] 李其廉, 张国良, 薛荣刚. 竖向加劲肋对钢板筒仓环向应力影响的研究[J]. 山西建筑, 2013, 39 (29): 39-41.
- [2] 侯晓武. midas Gen 常见问题解答[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] GB50884-2013, 钢筒仓技术规范[S].