



港口直径 40 m 混凝土储煤筒仓温度应力分析

曲军彪

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 通过工程实例, 对港口直径 40 m 混凝土筒仓在季节温差和内外温差作用下的温度应力进行计算, 分析不同温差作用下筒仓壁的内力分布规律, 并将内外温差作用下的温度应力转换为筒仓壁的环拉力, 分析不同内外温差作用下, 温度作用产生的环拉力与贮料荷载产生的环拉力的比值。得出的结论有助于结构设计人员正确把握温度作用对筒仓壁内力的影响, 加强结构措施, 确保结构安全。

关键词: 筒仓; 大直径; 温差; 温度应力

中图分类号: U 653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0058-06

Research on temperature stress of 40 m diameter concrete silo in port

QU Jun-biao

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the practical project, the author calculates the temperature stress of the 40 m diameter concrete silo in port due to season variation and in-and-out temperature difference, analyses the inner force distribution of the silo wall due to different temperature actions, and converts the temperature stress into the circular force of silo wall, and analyses the ratio of the circular force in silo wall generated by the temperature stress and stored material pressure. The results are useful for designers to correctly grasp the temperature influence on the internal force of silo wall, strengthen the structure measures and ensure the structural safety.

Key words: silo; large diameter; temperature difference; temperature stress

随着国家经济实力的提高, 我国越来越重视节能与环境保护, 在此背景下, 煤炭港口企业提出建设环保、绿色型港口的口号, 并付诸实践, 将传统的露天储煤堆场改变为封闭的筒仓堆场, 成为新型环保节能的典范。由于港口煤运吞吐量, 需要建设大容量的筒仓, 因此港口筒仓的直径达到了 40 m。对于 40 m 直径筒仓, 筒仓壁周长为 120 m 以上, 温度作用效应明显, 因此, 研究温度作用下的筒仓壁内力分布规律对指导结构设计具有重要意义。《钢筋混凝土筒仓设计规范》^[1]第 4.1.1 条提出, 无实践经验时, 环境温度作用按永久荷载计算, 直径 21 ~ 30 m 的筒仓可按其最

大环拉力的 6% 计算, 直径大于 30 m 的筒仓可按其最大环拉力的 8% 计算。但对于直径 40 m 的筒仓, 环拉力按 8% 设计是否安全可靠, 仅按环拉力的 8% 考虑是否全面反映了温度作用对筒仓壁设计的影响。本文正是以工程实例为背景, 对此问题进行了专门研究。

1 工程概况

本工程位于黄骅港, 共 48 座单仓容量 3 万 t 的筒仓, 筒仓内径 40 m, 高 43 m, 壁厚 500 mm, 仓底板与筒壁为非整体连接方式, 采用大尺度吊挂混凝土锥形漏斗, 支撑墙支撑, 基础为桩筏基础, 采

收稿日期: 2013-11-28

作者简介: 曲军彪 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事建筑结构设计与研究。

用后注浆钻孔灌注桩。筒仓计算模型见图1。筒仓壁在贮料荷载作用下的环向轴力图见图2。

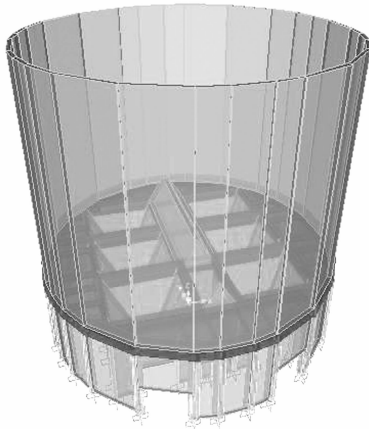


图1 筒仓主体结构计算模型

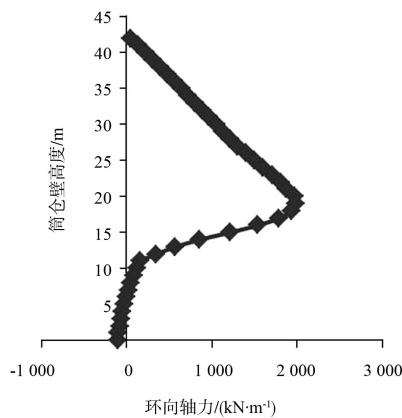


图2 贮料荷载作用下环向轴力

2 季节温差、内外温差取值

2.1 季节温差取值

根据《建筑结构荷载规范》^[2]（简称《荷载规范》）附录E.4表E.5全国各城市的雪压、风压和基本气温，黄骅的月平均最低气温 $T_{\min} = -13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，月平均最高气温 $T_{\max} = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

《荷载规范》9.3.2条文说明，对暴露于环境气温下的室外结构，结构最高平均温度和最低平均温度一般可依据基本气温 T_{\max} 和 T_{\min} 确定，取 $T_{S,\max} = T_{\max}$ ， $T_{S,\min} = T_{\min}$ 。《荷载规范》9.3.3结构的最高初始平均温度 $T_{O,\max}$ 和最低初始平均温度 $T_{O,\min}$ 应根据结构的合拢或形成约束的时间确定，或根据施工时结构可能出现的温度按不利情况确

定。当无法确定时，可根据不同的结构工况近似取 $T_{O,\max} = 0.3T_{\min} + 0.7T_{\max} = 21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； $T_{O,\min} = 0.7T_{\min} + 0.3T_{\max} = 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

《荷载规范》9.3.1对结构最大升温工况，均匀温度作用标准值按下式计算： $\Delta T_k = T_{S,\max} - T_{O,\min} = 34.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

对结构最大降温工况，温度作用标准值按下式计算： $\Delta T_k = T_{S,\min} - T_{O,\max} = -34.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 内外温差取值

根据观察测试和理论分析，筒仓内煤的温度并不均匀，靠近仓壁的煤温度和中心处的煤温度相比不一致，其温度随装料速度、煤入仓时的温度、卸料速度、贮存时间、温度传导系数、昼夜温差与季节温差等因数而变^[3]。因此，对结构有直接影响的内外温差应更为准确地称为内外表面温差。如用仓内温度和仓外温度的直接差来代入，则忽略了“热工原理”，从而造成计算失误或得出不够正确的结论^[4]。根据文献[4]，仓内贮满煤时，总热阻为：

$$R_o = (1/\alpha_y) + (\delta/\lambda_1) + (\delta/\lambda_c) + (1/\alpha_k) \quad (1)$$

式中： R_o 为总传热阻（ $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$ ），所代表的物理意义为：仓壁内外空气温差为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，使 1 kcal 热量通过 1 m^2 钢筋混凝土筒仓壁表面积所需要的时间。 α_k 和 α_y 为仓壁和隔热层内外表面吸热系数和放热系数（ $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ），所代表的物理意义是：在稳定热流作用下， 1 h 内当表面与介质的温度差为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，每平方米表面与相邻空气介质间所交换的热量。当介质温度大于表面温度时称为吸热系数，当介质温度小于表面温度时称为放热系数。取 $\alpha_k = \alpha_y = 20$ 。 δ 为结构层厚度（ m ）。 λ_1 和 λ_c 为导热系数（ $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ），所代表的物理意义为：当物体厚度为 1 m ，而表面温度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时， 1 h 通过 1 m^2 维护结构表面积的热量。经查《传热学》后面的附表，钢筋混凝土仓壁： $\lambda_c = 1.13$ ，贮煤（与仓壁等厚的隔热层）： $\lambda_1 = 1$ 。

$$\text{此时的热流量为：} q = (t_y - t_k) / R_o \quad (2)$$

温度差可以计算为以下 4 段：

第 1 段：仓内到仓内隔热层表面

$$t_y - t_1 = q(1/\alpha_y) \quad (3)$$

第 2 段：仓内隔热层由内到外

$$t_1 - t_2 = q(\delta/\lambda_1) \quad (4)$$

第 3 段：仓壁由内到外

$$t_2 - t_3 = q(\delta/\lambda_c) \quad (5)$$

第 4 段：仓壁外表面

$$t_3 - t_k = q(1/\alpha_k) \quad (6)$$

计算关心的是 $\Delta T = t_2 - t_3$ 。将仓中心煤温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ，仓外冬季最低气温 $t_k = -13\text{ }^\circ\text{C}$ 代入上式，计算得出仓壁内外表面温差： $\Delta T = t_2 - t_3 = 27\text{ }^\circ\text{C}$ (图 3)。

通过以上计算，可得出筒仓中心煤温度达到不同数值时仓壁内外的温差值 (表 1)。

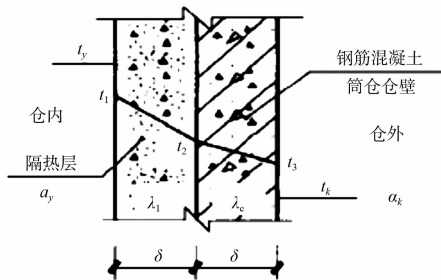


图 3 稳定热传导计算

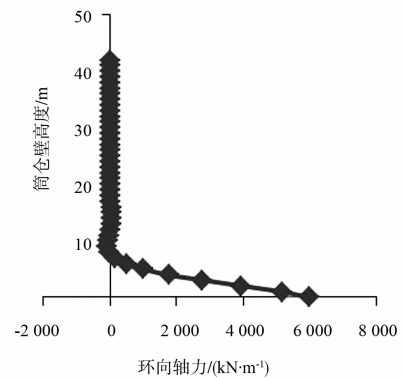
表 1 由中心煤温度计算得到的仓壁内外温差 $^\circ\text{C}$

仓中心煤温度	仓外大气温度	仓壁内外温差
10	-13	10
20	-13	14
30	-13	18
40	-13	22
50	-13	27
60	-13	31
70	-13	35

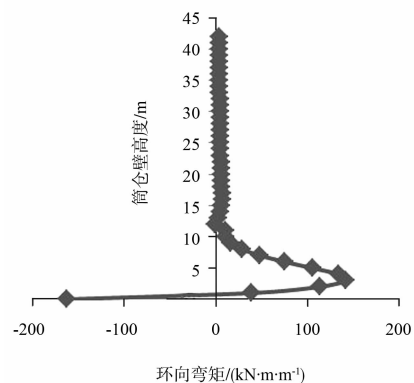
3 季节温差作用下的筒仓壁内力分析

根据 2.1 节计算的筒仓壁季节温差取值，采用 SAP2000 有限元软件建模计算分析，将温度作用施加于全部结构，得出季节温差为 $-35\text{ }^\circ\text{C}$ (降温) 和 $+35\text{ }^\circ\text{C}$ (升温) 时，筒仓壁内力的分布特征 (图 4, 5)。

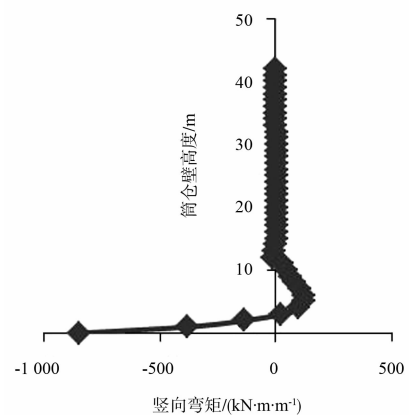
从图 4 和图 5 可以看出，季节温差 ($-35\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $35\text{ }^\circ\text{C}$) 作用下，筒仓壁环向轴力、环向弯矩和竖向弯矩大小相等但方向相反。筒仓壁最大环向轴力、环向弯矩和竖向弯矩均出现在仓底 0 m 处，在 0 ~ 10 m 范围内逐渐减小，而 10 m 以上环向轴力、环向弯矩和竖向弯矩均较小，可以忽略。原因是 0 m 高度处为筒仓壁的约束端，越靠近约束端，温度应力越大。



a) 环向轴力



b) 环向弯矩



c) 竖向弯矩

图 4 季节温差 ($-35\text{ }^\circ\text{C}$) 作用下筒仓壁内力

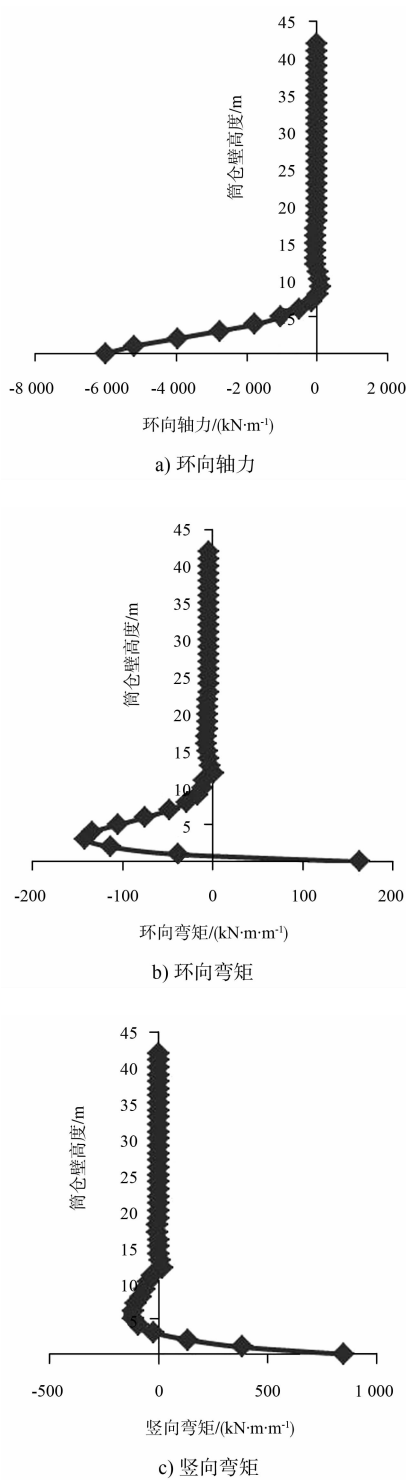


图 5 季节温差 (35 °C) 作用下筒仓壁内力

从图 4 a) 可以看出, 在降温工况下, 环向轴力为拉力且数值较大, 约为贮料荷载作用下环向轴力 (图 2) 的 3 倍, 在设计中不可忽视。但需要指出的是, 上述分析均按弹性计算, 实际上考虑到混凝土徐变的影响, 在实际配筋设计时, 温度作用效应可乘以 0.3 的折减系数^[3]。

4 内外温差作用下的筒仓壁内力分析

根据 2.2 节计算得出的筒仓壁内外温差取值, 采用 SAP2000 有限元软件建模计算分析, 将温度作用施加于 10 m 以上贮煤的位置, 得出内外温差为 27 °C 时, 筒仓壁内力的分布特征。

4.1 内外温差作用下筒壁内力分布规律

从图 6 a) 可以看出, 在内外温差作用下, 在仓顶出现了较大的环向拉力, 大小为 300 kN, 设计时应予以考虑, 其他部位环向轴力为压力, 可以忽略不计。

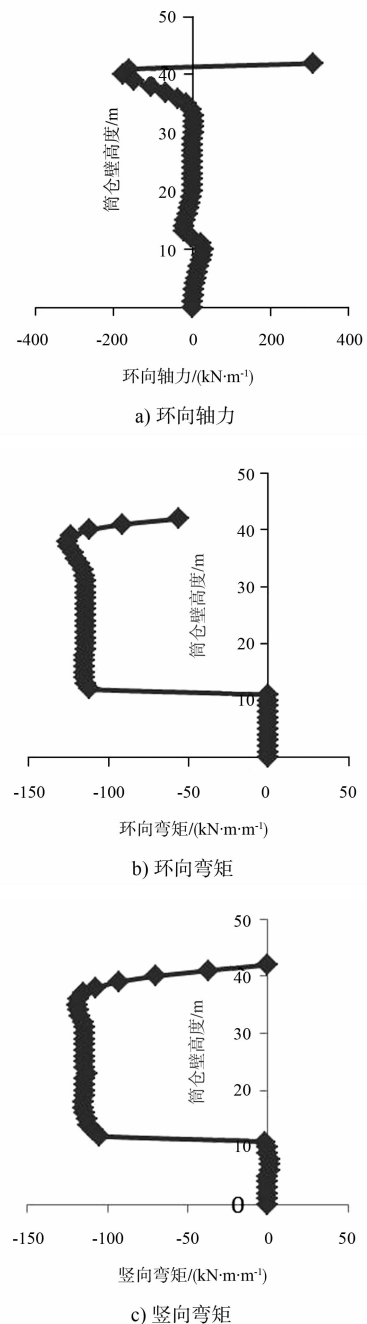


图 6 内外温差 (27 °C) 作用下筒仓壁内力

从图 6 b) 和 c) 可以看出, 在高度 10 ~ 35 m 范围内, 环向弯矩和竖向弯矩均较大, 35 m 以上逐渐衰减。0 ~ 10 m 范围内未储煤, 无内外温差作用, 因此, 内力很小。

由图 2 可知, 在高度 15 ~ 20 m 范围内, 贮料荷载作用下的环拉力最大, 而在这个区域, 内外温差作用下的环向弯矩也很大, 二者叠加后, 对仓壁的配筋设计起到控制作用。

4.2 内外温差作用与贮料荷载作用下筒仓壁环拉力的比值 m

由 4.1 节分析可知, 在内外温差作用下, 仓壁主要产生环向弯矩和竖向弯矩, 而环向弯矩与贮料荷载作用下产生的环拉力叠加, 对仓壁的配筋设计起控制作用。为了直观地比较内外温差产生的环向弯矩对仓壁配筋的影响与贮料荷载作用下环拉力对仓壁配筋的影响, 将环向弯矩等效为环拉力 (图 7)。

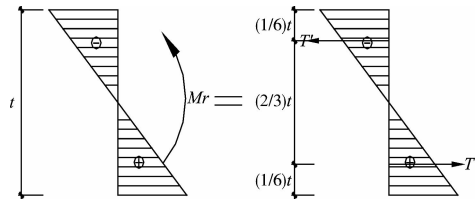


图 7 环向弯矩等效为环拉力图解

根据截面上应力相等的原则, 得出:

$$M_r = \frac{2}{3} T t \quad (7)$$

则:
$$T = \frac{3 M_r}{2 t} \quad (8)$$

式中: M_r 为环向弯矩, T 为合力, t 为壁厚。

考虑混凝土徐变的影响, 引入折减系数 $k_d = 0.65^{[3]}$ 则:

$$T = k_d \frac{3 M_r}{2 t} \quad (9)$$

将不同内外温差作用下引起的环向弯矩等效为环拉力并与贮料荷载引起的环拉力比较 (表 2, 图 8)。

表 2 内外温差与贮料荷载作用下筒壁环拉力的比值 m

仓中心煤温度/ ℃	内外壁面温差/ ℃	最大环向弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	温度作用下的最大环拉力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	最大环拉力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	比值 $m/\%$
10	10	43	84	2 039	4
20	14	60	117	2 039	6
30	18	77	150	2 039	7
40	22	94	183	2 039	9
50	27	115	224	2 039	11
60	31	132	257	2 039	13
70	35	149	291	2 039	14

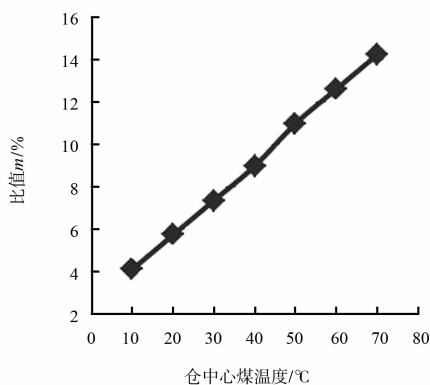


图 8 内外温差与贮料荷载作用下仓壁最大环拉力的比值

从表 2 及图 8 可以看出, 随着筒仓中心煤温度的升高, 温度作用下产生的最大环拉力与贮料荷载产生的最大环拉力的比值 m 线性增大。当筒仓中心温度达到 50 °C 时, 比值 m 为 11%, 大于筒仓规范的 8%。

4.3 内外温差与贮料荷载作用下筒仓壁环拉力比值沿高度的变化

从图 9 和 10 可以看出, 内外温差引起的环拉力沿仓壁高度基本不变, 而贮料荷载引起的环拉力沿仓壁高度由小变最大再变小, 因此, 比值 m 的

变化是由大变最小再变大，尤其是距仓顶越近，比值 m 越大，最大值达到了 200%，设计中应充分考虑到这一点。

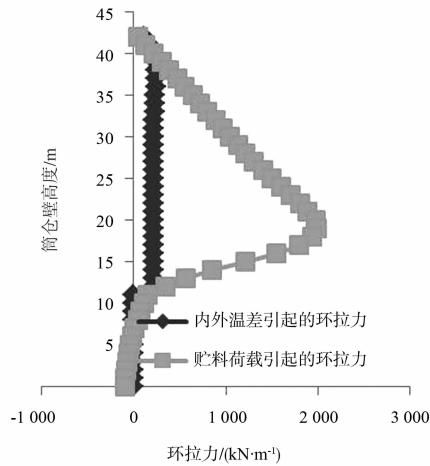


图9 内外温差与贮料荷载引起的环拉力

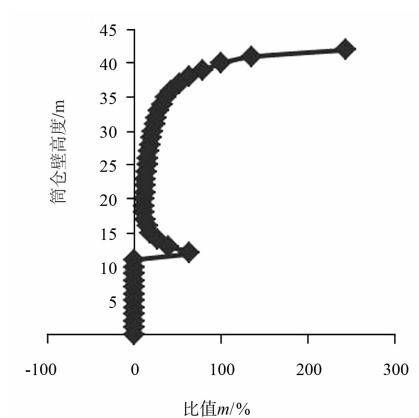


图10 内外温差与贮料荷载引起的环拉力比值 m 沿筒仓壁高度的变化

5 结论

1) 季节温差分为升温和降温两种工况。两种工况作用下，筒仓壁环向轴力、环向弯矩、竖向弯

矩的数值大小相等，方向相反，筒仓壁最大环向轴力、环向弯矩和竖向弯矩均出现在仓底，而距仓底 10 m 以上，环向轴力、竖向弯矩和环向弯矩均较小，可以忽略。升温工况产生的环向轴力为压力，对筒仓壁设计不起控制作用；降温工况产生的环向轴力为拉力且数值较大，在设计中不可忽视。因此在筒仓壁设计中应重点核算降温工况下仓底 0 ~ 10 m 范围内的筒仓壁的承载力及裂缝宽度。

2) 内外温差作用下，筒仓壁主要产生环向弯矩和竖向弯矩。将环向弯矩等效为环拉力并与贮料荷载作用下产生的环拉力进行比较，得出的结论是：内外温差作用与贮料荷载作用下仓壁最大环拉力的比值随仓内煤中心温度的升高而增大。当仓内煤中心温度达到 50 ℃ 时，内外温差作用与贮料荷载作用下仓壁最大环拉力的比值将达到 11%，大于筒仓设计规范中的 8%。

3) 内外温差作用下产生的环拉力与贮料荷载产生的环拉力的比值沿筒仓壁高度是变化的，位置越高比值越大，在设计中应引起重视。

4) 本文的研究结论有助于结构设计人员全面考虑温度作用对筒仓壁设计的影响。

参考文献：

- [1] GB 50077—2003 钢筋混凝土筒仓设计规范[S].
- [2] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
- [3] 孔德润, 蒲维民. 直径 40 m 圆筒煤仓的温度作用研究[J]. 特种结构, 1998, 15(2): 32-38.
- [4] 方鸿强, 蒲维民. 巨型钢筋混凝土圆筒仓的温度应力分析和计算[J]. 特种结构, 2011, 28(5): 40-41.

(本文编辑 郭雪珍)