

太阳辐射作用下钢筒仓结构温度场分析研究

杨应华, 马 越

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安, 710055)

摘要: 研究了大直径落地式平底钢筒仓在太阳辐射下仓壁的温度场。太阳辐射计算理论基于 ASHRAE 辐射模型和瞬态热传导有限元理论。通过 ANSYS-APDL 语言编写程序, 以某实际工程钢筒仓为算例, 计算出太阳辐射下仓壁的温度场分布。最后进行参数分析, 研究了不同壁厚、太阳辐射吸收系数及季节对仓壁温度场分布的影响规律。

关键词: 钢筒仓; 太阳辐射; 温度场; 瞬态热分析

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0052-06

A study on the temperature field of steel silos under solar radiation

YANG Yinghua, MA Yue

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055, China)

Abstract: The paper studied the temperature field of the large ground-supported flat-bottomed cylindrical steel silos under solar radiation. The analysis was based on the ASHRAE solar radiation model and the transient heat transfer theory. The steel silo model was on the basis of a practical engineering example. The temperature field of the steel silo under solar radiation was calculated through algorithms programmed with ANSYS-APDL language. Finally the thickness of the wall, the absorption coefficient of solar radiation and the season effect on the temperature field of the steel silo were analyzed.

Key words: steel silo; solar radiation; temperature field; transient thermal analysis

筒仓结构通常建造于露天环境, 暴露于外部的薄壳结构直接经受着太阳的辐射。研究表明不均匀温度场会对筒仓的结构性能产生一定程度的影响^[1-2], 要准确研究不均匀温度场对筒仓结构性能产生的影响, 首先应探讨筒仓在太阳辐射下仓壁温度场的分布规律。目前有较多文献研究太阳辐射对桥梁和建筑结构的影响, 但对筒仓等构筑物在太阳辐射作用下的温度场研究较少。

太阳辐射作用对结构影响研究的一个重要方向集中于桥梁结构。Kehibeck F^[3]较早就对太阳辐射对桥梁结构温度场进行了系统的研究和实测。彭友松等^[4]对哑铃形钢管混凝土拱进行了太阳辐射下温度场的分析。任志刚等^[5]研究了不同辐射模型对钢管混凝土柱墩温度场分布的影响。随着建筑结构体型的复杂化, 太阳辐射对钢结构设计和施工的影响变得日益突出。李鸿猷^[6]较早就对日照温度对高层建筑结构的影响做过研究。范重等^[7]对国家体育场大跨度钢结构在太阳辐射下的温度场进行计算并对其合拢温度进行研究。金晓飞等^[8]研究了山西三馆在太阳辐射下产生的非均匀温度场。陈志华等^[9-12]对太阳辐射下管结构的温度场分布进行了理论和试验研究。王元清等^[13]对钢构件在太阳辐射下的

温度场进行了实测。宋靖^[14]仅对太阳辐射下夏季等壁厚筒仓的温度场进行了分析研究。

基于 ASHRAE^[15]晴空模型对某大直径落地式钢筒仓在太阳辐射作用下的温度场进行数值模拟。对仓壁厚度、太阳辐射吸收系数和季节因素对仓壁温度场的影响进行分析研究, 为钢筒仓仓壁在太阳辐射下温度场的取值提供参考借鉴, 并为后续研究建立基础。

1 热交换类型及热传导原理

钢筒仓在太阳辐射作用下与外界热交换的类型共有三类^[15]:

1.1 太阳辐射(短波辐射)

太阳辐射有多种计算模型, 不同计算模型有其各自的优缺点。文献[5]就对不同辐射模型下钢管混凝土柱的温度场分布进行比较。当太阳辐射有长期、代表性的观测数据时 ASHRAE 模型较为实用。本文中的算例均采用 ASHRAE 模型。

ASHRAE 模型中垂直表面太阳总辐射强度计算公式为:

$$G_t = \xi[\max(\cos \theta, 0) + \frac{G_{dv}}{G_{dh}} C + \rho_g F_{wg} (\sin \beta + C)] G_{ND} \quad (1)$$

$$G_{ND} = \left[\frac{A}{\exp(B / \sin \beta)} \right] C_N \quad (2)$$

$$\frac{G_{dV}}{G_{dH}} = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad (3)$$

式中: A 为大气质量为零时的太阳辐射强度; B 为大气的消光系数; C 为散射辐射系数; β 为太阳高度角; C_N 为大气清洁度。 θ 为太阳光线入射角; 其中 $\cos \theta > -0.2$, 否则, $G_{dV} / G_{dH} = 0.45$ 。 ρ_g 为地面的反射率, F_{wg} 为表面对地面的角系数 $F_{wg} = (1 - \cos \alpha) / 2$, 其中 α 为入射面与水平面的倾角, ξ 为太阳辐射吸收系数。

1.2 对流换热

结构表面的对流换热是由于表面温度与周围环境温度差值所引起的。

按牛顿冷却定律计算:

$$q_c = h_c (T_a - T) \quad (4)$$

式中: T_a 为气温; T 为结构外表面温度; h_c 为对流换热系数, v 为风速。

$$h_c = 2.6 (\sqrt{|T_a - T|} + 1.54v) \quad (5)$$

室外气温变化按公式(6)计算:

$$T_a(t) = \frac{1}{2} (T_{a\max} - T_{a\min}) \sin \frac{(t-9)\pi}{12} + \frac{1}{2} (T_{a\max} + T_{a\min}) \quad (6)$$

1.3 辐射换热(长波辐射)

辐射换热的热流密度按 Stefan-Boltzmann 定律计算:

$$q_r = \varepsilon C_s [T^4 - T_a^4] \quad (7)$$

式中: ε 为结构表面辐射率; C_s 为 Stefan-Boltzmann 常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

1.4 瞬态热平衡方程

由能量守恒原理可得出瞬态热平衡微分方程为^[17]:

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (8)$$

式中: $[C]$ 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加; $[K]$ 为传导矩阵, 包括热传导系数、对流系数、辐射率等; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的倒数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量。

2 有限元模型的建立

以某存储氧化铝的大直径落地式平底圆柱钢板筒仓为背景建立有限元模型并进行分析计算。筒仓直径 $D=28 \text{ m}$, 净高度 $H=29 \text{ m}$ 。钢材采用 Q235-B, 弹性模量 $E=206 \times 10^3 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3, 密度 7850 kg/m^3 , 线膨胀系数 $12 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$, 导热率 $49.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 比热容 $465 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ^[17]。运用 ANSYS

程序建立有限元模型^[1], 仓壁选用 Shell131 热分析单元。

以西北某地(地理纬度为 34°)为例进行计算分析。夏至时日气温变化范围: $28 \sim 40^\circ\text{C}$; 太阳赤纬角 23.45° 。系数 A 、 B 、 C 的取值按参考文献[16]推荐的数值取值, 即 $A=1324$ 、 $B=0.42$ 、 $C=0.187$, 取大气清洁度 $C_N=1.0$ 。

3 太阳辐射下钢筒仓温度场分布

3.1 等壁厚钢筒仓仓壁温度

对等壁厚钢筒仓进行瞬态热分析, 模拟夏至日 24 h 内钢筒仓的温度场分布及变化规律。钢筒仓壁厚取 $t=28 \text{ mm}$, 仓壁表面的太阳辐射吸收系数取 0.55。得出筒仓温度随时间变化曲线(图 1)及最高温度时(17 时)仓壁温度场云图(图 2)。

从图 1 可以看出: 筒仓的最高温度 T_{\max} 在 5 时达到最小值 31.5°C 后迅速上升。由于筒仓为直立的圆柱壳结构, 在太阳辐射作用下随着太阳光线入射角的变化, 筒仓最高温度在 11、17 时达到极值, 最高温度分别为 62.6°C 、 69.5°C 。与最高温度变化不同, 筒仓的最低温度 T_{\min} 在 6 时达到最小值 31.2°C , 在 15 时达到最大值 49.7°C 。筒仓最高温度与最低温度的差值在 17 时最大, 温差: $T_{\max 17} - T_{\min 17} = 21.0^\circ\text{C}$ 。

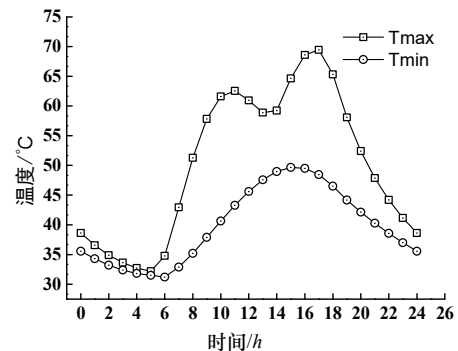


图 1 筒仓温度日变化过程

Fig.1 Temperature variation of the silo

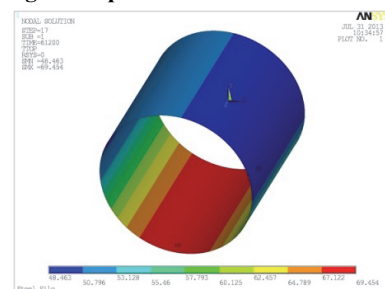


图 2 17 时筒仓温度场云图

Fig.2 Temperature contour of the silo at 17

3.2 等壁厚钢筒仓仓壁周向温度场分布

图 3、4 为 8~19 时仓壁周向温度分布。仓壁周

向温度分布沿筒仓高度方向为常量. 从图 3、4 可以看出: 8~12 时间段内, 仓壁接受太阳辐射面的温度曲线与三角函数曲线相似; 而未直接接受太阳辐射的仓壁, 周向温度曲线基本呈直线. 随着时间的增加, 直线段的范围在减小. 由于太阳方位角和入射角的变化, 从 13 时开始, 仓壁的周向温度不再呈单峰值; 14 时两个极值温度的差别最小. 随着时间的增加, 直接接受太阳辐射的仓壁最高温度继续升高, 在 17 时达到最大值, 未直接接受太阳辐射的仓壁温度逐渐降低.

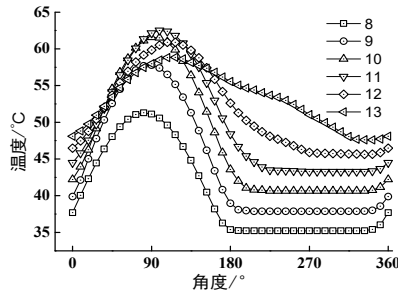


图 3 8~13 时仓壁周向温度场
Fig.3 Hoop temperature field from 8 to 13

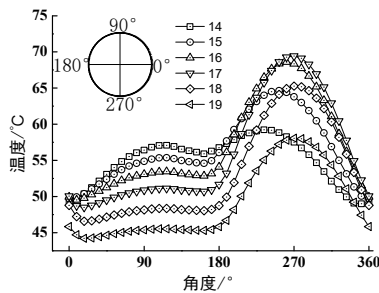


图 4 14~19 时仓壁周向温度场
Fig.4 Hoop temperature field from 14 to 19

3.3 变壁厚钢筒仓仓壁温度

在实际工程中, 由于储料荷载从筒仓的顶部到底部逐渐增大, 所以钢筒仓的仓壁往往设计为变壁厚. 表 1 为某实际工程钢筒仓的壁厚沿高度变化表.

表 1 仓壁截面厚度表

Tab.1 Wall thickness variations of the silo

高度 /m	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-16	16-18	18-22	22-26	26-29
壁厚 /mm	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8

与 3.1 节太阳辐射的计算参数相同, 图 5 为仓壁中最高温度 T_{\max} 和最低温度 T_{\min} 随时间变化图. 对比图 1、5, T_{\max} 、 T_{\min} 随时间变化曲线相似, 差别仅为最大值的不同. 变壁厚筒仓仓壁最高温度 T_{\max} 在 10、16 时达到极值, 最高温度值分别为 72.4 °C、78.8 °C, 比等壁厚钢筒仓的最高温度 T_{\max} 分别高 9.8 °C、9.3 °C. T_{\min} 最高温度与最低温度的差值在 9、16 时较大, 温差分别为 33.8 °C、

29.4 °C.

从仓壁中最高温度 T_{\max} 最大时(16 时)的温度场云图(图 6)可以看出: 筒仓顶部壁厚最薄处的仓壁温度最高; 随着壁厚的增大, 筒仓仓壁温度逐渐降低.

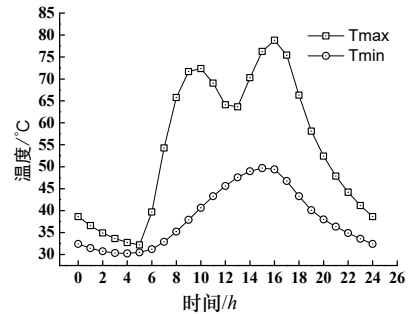


图 5 筒仓温度日变化过程
Fig.5 Temperature variation of the silo

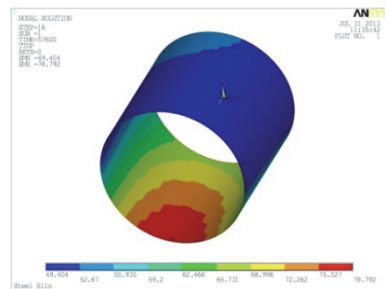


图 6 16 时筒仓温度场云图
Fig.6 Temperature contour of the silo at 16

3.4 变壁厚钢筒仓仓壁周向、竖向温度场分布

图 7、8 为变壁厚钢筒仓仓壁周向温度分布图. 图中的周向温度值为最高温度 T_{\max} 所在高度处仓壁的周向温度. 变壁厚与等壁厚钢筒仓的仓壁周向温度分布基本相似.

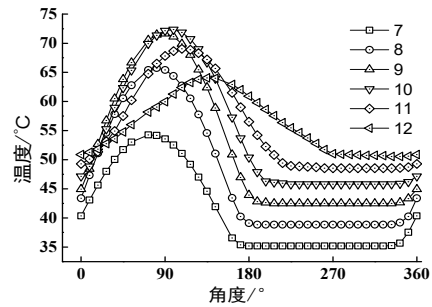


图 7 7~12 时仓壁周向温度场
Fig.7 Hoop temperature field from 7 to 12

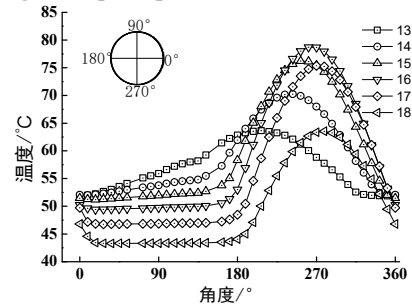


图 8 13~18 时仓壁周向温度场
Fig.8 Hoop temperature field from 13 to 18

图 9、10 为仓壁温度沿竖向的分布(仓壁竖向温度为最高温度 T_{\max} 所处角度处的温度值沿高度的分布)。从图中可以看出, 在 18 时以前, 壁厚较薄处的温度高于壁厚较厚处的温度、18 时以后壁厚较厚处的温度将高于壁厚较薄处的温度。

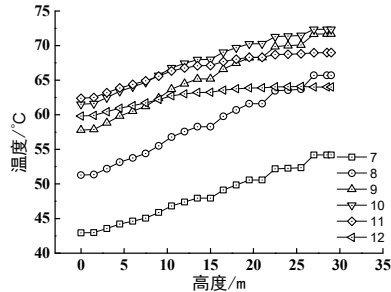


图 9 7~12 时仓壁轴向温度场
Fig.9 Axial temperature field from 7 to 12

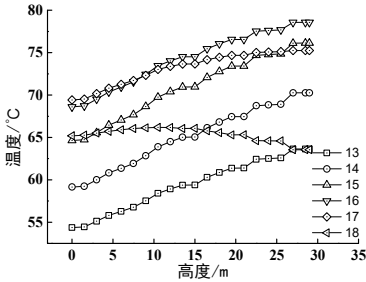


图 10 13~18 时仓壁轴向温度场
Fig.10 Axial temperature field from 13 to 18

表 2 给出了仓壁周向、竖向最高温度 T_{\max} 与最低温度 T_{\min} 的差值。等壁厚、变壁厚筒仓同一高度处周向最大温差($\Delta T=T_{\max}-T_{\min}$)分别为 20.99℃、29.3℃; 变壁厚筒仓同一角度处竖向最大温差为 14.42℃。

表 2 仓壁中最大温差/℃

Tab. 2 The temperature difference of the silo/℃

时刻	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
等壁厚筒仓周向温差	10.05	16.08	19.93	20.96	19.26	15.34	11.3	10.28	14.98	19.1	20.99	18.79	13.90
变壁厚筒仓周向温差	19.07	26.89	29.17	26.54	20.49	13.5	11.82	18.16	25.01	29.3	28.61	20.27	13.80
变壁厚筒仓竖向温差	11.27	14.42	13.89	10.84	6.59	4.21	9.25	11.1	11.48	9.97	5.82	-1.65	-8.5

4 参数分析

4.1 仓壁厚度

仓壁的厚度是影响筒仓在太阳辐射下仓壁温度的一个重要因素。计算模型仍以 $D=28\text{ m}$, $H=29\text{ m}$ 的等壁厚钢筒仓为基本模型, 通过改变筒仓的壁厚分析其对仓壁温度的影响。图 11 为不同壁厚钢筒仓在最高温度时刻的温度值。从图 11 中可得, 仓壁的最高温度 T_{\max} 与壁厚近似呈线性关系; 最高温度 T_{\max} 随着壁厚的增大而降低。 $t=8\text{ mm}$ 与 $t=48\text{ mm}$ 最高温度差值为 15.96℃。仓壁中的最低温度 T_{\min} 随壁厚变化较小。

4.2 太阳辐射吸收系数

太阳辐射吸收系数是指材料吸收太阳辐射的性能^[15]。由于钢筒仓表面的油漆颜色不同, 太阳辐射吸收系数会随着油漆颜色的不同而变化, 太阳辐射吸收系数随着颜色的加深而增大, 这将会使仓壁的温度产生变化。表 3 为不同颜色太阳辐射的吸收系数^[15]。

表 3 太阳辐射吸收系数

Tab.3 Absorption coefficient of solar radiation

颜色	白色	金属浅银灰	铝灰色	银白色	新镀锌金属	无涂层钢材
太阳辐射吸收系数	0.29	0.34	0.47	0.55	0.65	0.75~0.89

本节对不同太阳辐射吸收系数下等壁厚钢筒仓进行计算, 以 $D=28\text{ m}$, $H=29\text{ m}$, 壁厚 $t=28\text{ mm}$ 的等壁厚钢筒仓为算例, 得出太阳辐射吸收系数对仓壁温度的影响。

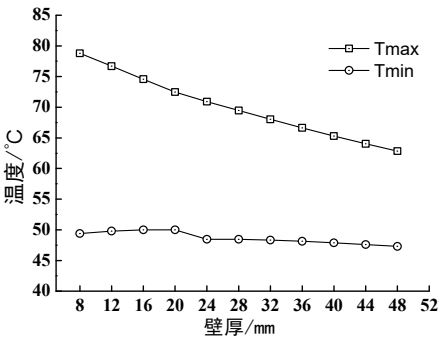


图 11 不同壁厚时仓壁温度
Fig.11 The temperature of different thickness silos

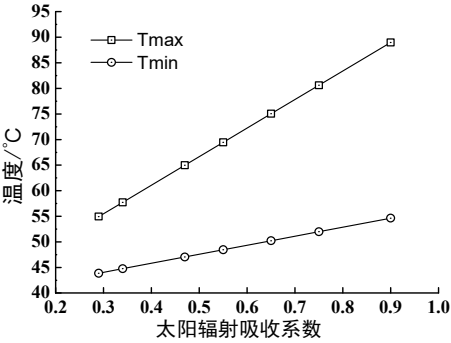


图 12 不同辐射吸收系数下仓壁温度
Fig.12 The temperature of different absorption coefficient

图 12 为仓壁温度与太阳辐射吸收系数的关

系.从图中可得出,仓壁的最高温度 T_{\max} 与最低温度 T_{\min} 与太阳辐射吸收系数均呈正比关系.太阳辐射吸收系数每增加0.1;仓壁最高温度 T_{\max} 升高 5.6°C ,仓壁中对应最低温度 T_{\min} 升高 1.8°C .

4.3 季节变化

仍以西北某地区冬季(气温变化范围: -8°C ~ 4°C)为例,分析 $D=28\text{ m}$ 、 $H=29\text{ m}$ 、壁厚 $t=28\text{ mm}$ 等壁厚钢筒仓在冬季太阳辐射下钢筒仓温度场分布.太阳赤纬角为 -23.45° .系数 A 、 B 、 C 仍按参考文献[16]推荐的公式计算,取 $A=1\ 415$ 、 $B=0.22$ 、 $C=0.079$.

图13为仓壁温度随时间变化曲线,仓壁最高温度 T_{\max} 的最大值出现在14时.与夏季仓壁最高温度 T_{\max} 随时间变化(图1)不同,冬季的仓壁最高温度 T_{\max} 仅在14时出现一个极值.图14为不同时刻仓壁的周向温度分布.周向温差最大值出现在14时,温差为 34.86°C .

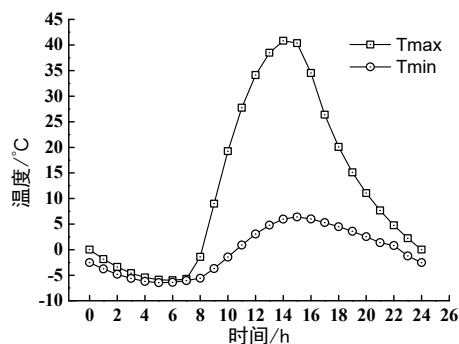


图13 冬季筒仓温度日变化过程

Fig.13 Temperature variation of the silo in winter

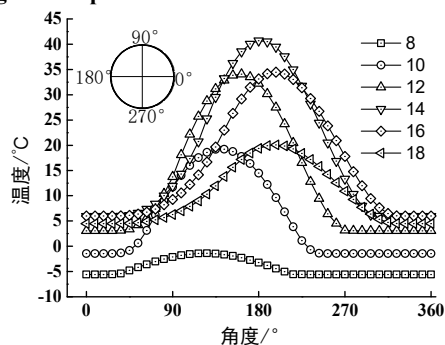


图14 8~18时仓壁周向温度场

Fig.14 Hoop temperature field from 8 to 18

5 结论

以某实际钢筒仓为算例对其在太阳辐射下的温度场进行了瞬态热分析,太阳辐射模型为ASHRAE晴空模型,通过对等壁厚、变壁厚钢筒仓在太阳辐射下仓壁温度的对比,及对仓壁厚度、太阳辐射吸收系数和季节影响的研究,得出以下结论:

(1) 就所考虑的地区,在夏季,太阳辐射下等

壁厚钢筒仓仓壁中的最高温度 T_{\max} 分别在11、17时达到极值;仓壁的最低温度 T_{\min} 在5时达到最小值.在冬季,仓壁中的最高温度 T_{\max} 在14时达到最大值;仓壁的最低温度 T_{\min} 在6时达到最小值.

(2) 太阳辐射下仓壁的周向温度曲线在接受太阳辐射面与三角函数型曲线相似,在背面近似呈直线分布.就所讨论的地区,等壁厚钢筒仓仓壁最大周向温差约为 20°C ;变壁厚钢筒仓仓壁最大周向温差约为 29°C ,竖向最大温差约为 14°C .

(3) 仓壁厚度对仓壁的最高温度 T_{\max} 有一定程度的影响,即随着壁厚的增大,仓壁的最高温度 T_{\max} 将会降低,降幅约为 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.太阳辐射吸收系数(仓壁颜色)对仓壁的最高温度 T_{\max} 影响较大,仓壁的最高温度 T_{\max} 随着太阳辐射吸收系数的增大而增大,太阳辐射吸收系数每增加0.1;仓壁最高温度 T_{\max} 将升高 5.6°C .

参考文献 References

- [1] 马越.日照作用对大直径落地式钢筒仓结构性能影响分析[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
MA Yue. Solar radiation effects on the structural behavior of large flat-bottom squat steel silos [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [2] 杨应华, 马越.日照作用下大直径氧化铝钢筒仓应力分析[J].建筑结构,2014,44(12):104-109.
YANG Yinghua, MA Yue. Solar radiation effects on stresses of a large flat-bottom squat steel silos for alumina [J]. Building Structure, 2014, 44(12): 104-109.
- [3] 凯尔别克 F. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法,译.北京:中国铁道出版社,1981.
KEHIBECK F. Effect of solar radiation on bridge structure [M]. LIU Xingfa, Translated. Beijing: Chinese Railway Publisher, 1981.
- [4] 彭友松, 强士中, 李松.哑铃形钢管混凝土拱日照温度分布研究[J].中国铁道科学,2006(5):71-75.
PENG Yousong, QIANG Shizhong, LI Song. Temperature Distributions in Dumbbell Cross Section Concrete-Filled Steel Tube Arches Due to Solar Radiation [J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 71-75.
- [5] 任志刚, 胡曙光, 丁庆军. 太阳辐射模型对钢管混凝土墩柱温度场的影响研究[J].工程力学,2010(4):246-250.
REN Zhigang, HU Shuguang, DING Qingjun. Research on the effect of solar radiation model on temperature field of concrete-filled steel tube pier [J]. Engineering Mechanics, 2010(4): 246-250.
- [6] 李鸿猷. 高层建筑结构日照影响的探讨[J].建筑结构学报,1989(3):52-68.
LI Hongyou. Investigation of the solar radiation effect on tall building [J]. Journal of Building Structures, 1989 (3): 52-68.
- [7] 范重, 王喆, 唐杰. 国家体育场大跨度钢结构温度场分析与合拢温度研究[J].建筑结构学报,2007,28(2): 32-40.
FAN Zhong, WANG Zhe, TANG Jie. Analysis on

- temperature field and determination of temperature upon healing of large-span steel structure of the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007,28(2): 32-40.
- [8] 金晓飞, 范峰, 李景芳. 山西三馆日照非均匀温度作用分析[J]. 空间结构, 2012,18(3):80-85.
JIN Xiaofei, FAN Feng, LI Jingfang. Study on the non-uniform temperature load by sunshine of Shanxi three Gymnasiums[J]. Spatial Structures, 2012,18(3):80-85.
- [9] 刘红波, 陈志华, 周婷. 太阳辐射作用下钢管温度场分析[J]. 空间结构, 2011,17(2): 65-71.
LIU Hongbo, CHEN Zhihua, ZHOU Ting. Research on temperature field of steel tube under solar radiation [J]. Spatial Structures, 2011,17(2): 65-71.
- [10] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, ZHOU Ting. Theoretical and experimental study on the temperature distribution of H-shaped steel members under solar radiation [J]. Applied Thermal Engineering, 2012,37 (2):342-354
- [11] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, CHEN Binbin, et al. Studies on the temperature distribution of steel plates with different paints under solar radiation[J]. Applied Thermal Engineering, 2014,71(1):342-354
- [12] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, HAN Qinghua, et al. Study on the thermal behavior of aluminum reticulated shell structures considering solar radiation [J]. Thin-Walled Structures, 2014,85 (85):342-354
- [13] 王元清, 林错错, 石永久. 露天日照条件下钢结构构件温度的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010(S1): 140-147.
WANG Yuanqing, LIN Cuocuo, SHI Yongjiu. Experimental study on the temperature of steel members in sunshine[J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 140-147.
- [14] 宋靖. 大型高温贮料筒仓受力性能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
SONG Jing. Mechanical behavior analysis of large silos storage for high temperature stored materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [15] 麦奎斯顿 F C, 帕克 J D, 斯皮特勒 J D. 供暖、通风及空气调节[M]. 第6版. 俞炳丰, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005
MCQUISTON F C, PARKER J D, SPITLER J D. Heating, ventilating, and air conditioning analysis and design [M]. 6th ed. YU Bingfeng, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [16] 李锦萍, 宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与ASHRAE模型的比较[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 1998, 19(1):35-38.
LI Jinping, SONG Aiguo. Compare of clear-day solar radiation model of Beijing and ASHRAE [J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition), 1998, 19(1): 35-38.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第4版 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(编辑 吴海西)

(上接第51页)

- [5] 蔡雪峰, 庄金平, 周继忠. 直角扣件钢管节点抗扭性能试验[J]. 工程力学, 2012,29(2):107-112.
CAI Xuefeng, ZHUANG Jinping, ZHOU Jizhong. Experimental research on torsional performance of Right-angle coupled steel pipe joints [J]. Engineering Mechanics, 2012,29(2): 107-112.
- [6] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding [J]. Engineering Structures, 2001,23(6):592-599.
- [7] 胡长明. 扣件式高大模板支架空间结构体系失效机理及其安全性控制理论研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
HU Changming. Research on the spatial structure system failure mechanism and security control theory of fastener-style steel tubular high formwork-support [M]. Beijing: Science press, 2014.
- [8] 宋玉宝. 半刚接钢框架柱的计算长度系数[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
SONG Yubao. Effective length factor of semi-rigid connected steel frames [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.

(编辑 吴海西)