



重载作用下港口煤筒仓 仓顶钢廊道变形分析

田磊¹, 曲军彪¹, 张小安¹, 蔺雪峰¹, 崔元瑞²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中煤国际工程设计研究总院, 北京 100011)

摘要: 通过工程实例, 对筒仓顶输煤廊道横向钢梁分别采用实腹式工字钢梁、异形截面梁、桁架梁、平面张弦梁结构方案时, 进行重载作用下的变形分析, 同时对用钢量进行比较, 得出的结论有助于工艺和结构设计整体控制重载作用下钢廊道的竖向变形。

关键词: 钢廊道; 重载; 变形分析

中图分类号: U 653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0082-05

Deformation of steel corridor at top of pre-reinforced concrete coal silo in port under heavy loading

TIAN Lei¹, QU Jun-biao¹, ZHANG Xiao-an¹, LIN Xue-feng¹, CUI Yuan-ru²

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

2. China Coal International Engineering Design and Research Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: Based on the practical project, we carry out the deformation analysis of the steel corridor at the top of a pre-reinforced concrete coal silo under heavy loading and make a comparison of the structural steel weight with each other when the transverse beam at the bottom of the silo top house adopts solid web steel I-beam, irregular cross-section steel beam, truss and plane beam string structure respectively.

Keywords: steel corridor; heavy loading; deformation analysis

近年来, 封闭储煤筒仓作为一种环保结构形式, 已在国内诸多煤炭港区得到广泛应用^[1-3]。筒仓顶部输煤廊道结构形式也随着筒仓规模的增大, 由混凝土结构转变为钢结构形式。虽然钢结构比较适用于大、中跨度的结构, 具有质量小、制造简单、易于采用工业化生产、施工安装周期短等优点。但是, 由于筒仓顶部输煤廊道内卸料小车提升能力也随着筒仓高度的增加而不断增大, 卸料小车运行活荷载, 检修、维护活荷载均在不断增大, 所以, 工艺专业为进一步改善卸料

小车运营环境, 要求小车运行时钢廊道最大变形尽可能接近零(文中按5 mm控制)。为此, 本文进行了重载作用下筒仓顶输煤钢廊道的变形分析研究。

1 工程概况

某工程单个筒仓高43 m, 内径40 m(图1)。筒仓仓顶房主体输煤钢廊道采用空间桁架结构形式, 跨度38.13 m, 净宽13 m, 檐口相对于筒仓顶钢廊道底部的高度为12 m。钢廊道底部通过4个

收稿日期: 2014-10-14

作者简介: 田磊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事建筑结构设计与研究。

GPZ (II) 型盆式橡胶支座与筒仓顶部环梁连接, 一端设置 2 个固定支座, 另一端设 2 个定向滑动支座。屋面、墙面维护结构为彩色压型钢板, 钢廊道外侧仓顶屋面维护结构采用彩色压型钢板, 局部为组合楼板, 筒仓仓顶房底部构件布置如图 2 所示。

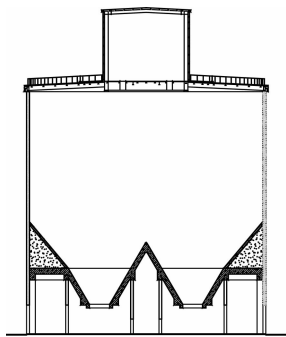


图 1 筒仓剖面

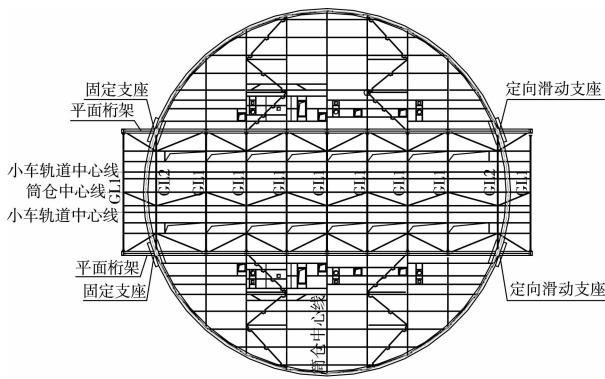


图 2 筒仓仓顶房底部构件布置

输煤钢廊道内卸料小车及其轮子布置如图 3 所示, 卸料小车总质量 151 t, 车轮共 16 个, 每条轨道上 8 个, 最大轮载标准值如图 4 所示。重载作用下, 按照 (GB 50017—2003) 《钢结构设计规范》^[4], 轨道梁、横向钢梁和纵向平面桁架最大变形限值见表 1。

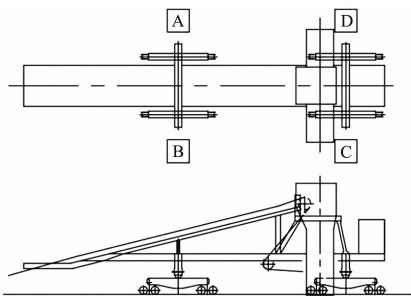


图 3 卸料小车

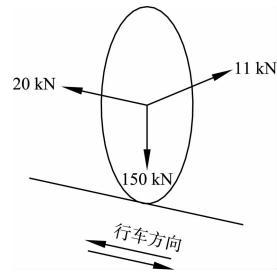


图 4 卸料小车轮载标准值

表 1 轨道梁和平面桁架最大变形限值

构件类别	最大变形限值	
	恒 + 活	活
卸料小车轨道梁	$L/600$	
纵向平面桁架、横向主梁	$L/400$	$L/500$

注: L 为受弯构件的跨度。

2 钢廊道变形研究对象

根据钢廊道结构布置特点, 卸料小车运行至筒仓中心附近时, 钢廊道竖向变形最大。钢廊道最大竖向变形 f 由平面桁架竖向变形 f_1 和横向钢梁 GL1 相对于平面桁架的竖向变形 f_2 两部分组成。对于普通钢结构形式, 恒荷载作用下由于钢廊道底部不存在过大的集中荷载, 定性分析平面桁架的最大变形 f_1 与 GL1 的最大变形应较为接近。但是, 由于恒荷载作用下平面桁架的变形无法避免, 因此, 钢廊道最大变形分析主要是采取有效措施来控制卸料小车活荷载作用下钢廊道最大变形。

卸料小车活荷载作用下, 平面桁架的最大变形 f_1 主要由桁架的高跨比决定, 受桁架本身构件截面尺寸变化的影响较小。对于本工程, 平面桁架高度由卸料小车正常运营与检修需要所决定, 在此基础上, 通过增加平面桁架高度的办法, 势必会大幅增加工程总投资。因此, 从实用性和经济性角度, 通过增大平面桁架高度来减小桁架变形是不合适的。







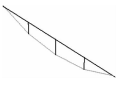
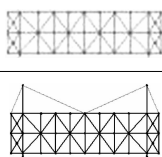
综合以上分析结果, 减小小车活荷载作用下钢廊道变形的关键为减小横向钢梁 GL1 相对于平面桁架的变形 f_2 。

3 结构方案

卸料小车工艺活荷载作用下, 横向钢梁 GL1 相对于平面桁架的变形主要与其抗弯刚度和跨度

有关, GL1 跨度由工艺专业的设备安装、维护、检修和地面清扫空间等因素决定, 因此, 钢廊道变形控制的关键在于横向钢梁 GL1 应采用刚度合理的截面形式, 以较少的用钢量达到较好控制横向钢梁相对于平面桁架变形 f_2 的目的。为控制该变形, 可考虑采用实腹式工字钢梁截面、异形截面, 或采取桁架梁、平面张悬梁等其他结构形式, 方案如表 2 所示。

表 2 结构方案

设计 方案	横向钢梁		平面桁架
	截面形式	示意图	
方案 1	H1600 × 400 × 16 × 40		
方案 2	异形截面		
方案 3	桁架梁(高 2.0 m)		
方案 4	平面张悬梁 (垂度 2.0 m, 矢高 0 m)		

注: 未标单位处均为 mm, 下同。

1) 方案 1: 实腹式工字钢梁。

横向钢梁 GL1 采用实腹式焊接工字钢梁 H1600 × 400 × 16 × 40, 与平面桁架竖腹杆连接为刚性连接。

2) 方案 2: 异形截面。

横向钢梁 GL1 采用异形截面 (图 5), 与平面桁架竖腹杆连接为刚性连接。

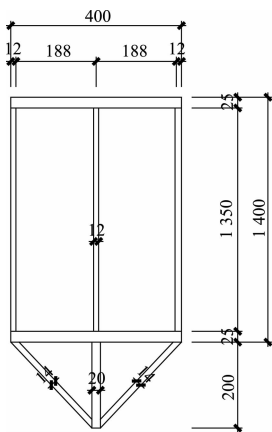


图 5 异形截面梁 (单位: mm)

3) 方案 3: 桁架梁。

桁架梁高度取 2.0 m, 桁架梁下弦设置水平支撑, 在端跨和中跨设置竖向交叉支撑,

以防止桁架梁平面外失稳。桁架上下弦杆与纵向平面桁架竖腹杆连接为铰接。

4) 方案 4: 平面张悬梁。

张弦梁垂度取 2.0 m, 矢高取 0 m, 上弦采用实腹式焊接工字钢梁 H600 × 400 × 12 × 20, 与平面桁架竖腹杆连接为刚性连接, 竖向压杆采用无缝钢管 $\phi 180 \times 8$, 下弦采用消除预应力钢丝束 $\phi 7 \times 397$, 等效直径为 136 mm。当纵向平面桁架顶部不设斜拉索时, 对下弦施加预拉力 120 kN; 当纵向平面桁架顶部设置斜拉索时, 桁架顶部算起塔高取 8.5 m, 斜拉杆采用消除预应力钢丝束 $\phi 7 \times 397$, 等效直径为 136 mm, 对横向平面张弦梁下弦施加预拉力 100 kN, 对纵向平面桁架顶部较长斜拉索施加预拉力 900 kN, 较短斜拉索施加预拉力 475 kN。方案 4 中采用了消除预应力钢丝, 为便于比较经济指标, 根据现行市场询价, 消除预应力钢丝每吨价格约为普通钢材的 2 倍, 因此, 消除预应力钢丝用钢量折合为普通钢材用钢量约为 2 倍。

4 结构设计与变形分析

4.1 主要设计参数

筒仓顶输煤钢廊道结构安全等级为二级, 抗震设防类别为丙类, 结构重要性系数 1.0。钢廊道设计时, 考虑了恒荷载、活荷载、风荷载、卸料小车运行活荷载、设备检修活荷载、地震作用及温度变化等荷载作用及各种可能的组合。

屋面恒荷载标准值为 0.5 kN/m^2 , 活荷载标准值为 0.5 kN/m^2 , 基本风压为 0.4 kN/m^2 , 地面粗糙度类别 A 类。建设场地抗震设防烈度为 6 度, 设计地震分组第三组, 设计地震加速度为 $0.05g$, 场地类别为四类。根据 GB 50009—2012 《建筑结构荷载规范》^[5], 并考虑主体结构施工周期的季节跨越, 主体结构设计计算温差取 $-28 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $+28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.2 结构设计与变形分析

筒仓顶输煤钢廊道采用 SAP2000 进行结构建模及设计计算, 结构前三阶阵型自振周期, 各种荷载作用下结构位移、变形如表 3~5 所示, 计算应力比如表 6 所示。

计算结果表明横向钢梁采用实腹式工字钢梁、异形截面梁和桁架梁结构形式时主体钢廊道结构自振周期较为接近, 小于采用张悬梁结构形式。风荷载和地震荷载作用下钢廊道顶部水平位移均满足相应规范设计要求。恒荷载与卸料小车工艺活荷载作用下, 方案 1~方案 4 的钢廊道最大变形如表 7 所示, 均小于规范规定值。钢廊道杆件计算应力比最大值为 0.9, 小于 1.0。总的说来, 荷载作用下, 钢廊道水平和竖向变形均满足规范要求, 计算应力比最大值均小于 1, 当采用不同横向钢梁结构方案时, 结构均是安全的。

表 3 前三阶阵型自振周期

设计方案	自振周期		
	T_1	T_2	T_3
方案 1	0.551	0.249	0.246
方案 2	0.550	0.247	0.246
方案 3	0.590	0.290	0.264
方案 4	不设拉索	0.859	0.752
	设斜拉索	0.859	0.627

表 4 横向 (Y 向) 最大水平位移

设计方案	水平位移	
	风荷载作用	地震作用
方案 1	25.5	19.2
方案 2	25.4	19.1
方案 3	29.9	23.1
方案 4	不设拉索	30.7
	设斜拉索	27.1
允许值	83.0	50.0

表 5 钢廊道最大竖向变形和钢材用量比较

设计方案	恒荷载作用变形/mm			卸料小车活荷载作用变形/mm			用钢量/t	
	f_1	f_2	$f=f_1+f_2$	f_1	f_2	$f=f_1+f_2$		
方案 1	7.5	1.0	8.5	6.9	7.0	13.9	347	
方案 2	7.8	1.2	9.0	6.9	6.8	13.7	375	
方案 3	7.4	1.1	8.5	7.0	8.8	15.8	335	
方案 4	不设拉索	6.8	-6.9	-0.1*	6.9	1.3	8.2	340
	设斜拉索	2.2	-5.7	-3.5**	2.6	2.4	5.0	357

注: “-”表示起拱,*表示纵向平面桁架变形最大位置处张弦梁上弦跨中反拱值,变化范围为-0.1~-3.7 mm,**表示纵向平面桁架变形最大位置处张弦梁上弦跨中反拱值,变化范围为-3.3~-4.3 mm。

表 6 最大应力比

设计方案	最大应力比		
	纵向平面桁架	横向钢梁	主体钢廊道
方案 1	0.867	0.625	0.867
方案 2	0.875	0.643	0.875
方案 3	0.900	0.783	0.900
方案 4	不设拉索	0.844	0.622
	设斜拉索	0.706	0.611

表 7 钢廊道最大竖向变形

荷载工况	最大竖向变形/mm			
	纵向平面桁架		横向钢梁	
	计算值	允许值	计算值	允许值
恒荷载+卸料小车活荷载	14.7	95	9.9	34
卸料小车活荷载	7.0	76	8.8	27

由表 5 可以看出, 卸料小车活荷载作用下, 横向钢梁 GL1 采用焊接实腹式工字钢梁、异形截面梁、桁架梁 3 种方案计算的竖向变形比较接近时, 采用桁架梁情况下结构用钢量较少, 异形截面梁最多, 实腹式工字钢梁次之。方案 4 不设拉索对变形的控制效果不如设置斜拉索, 但比采用实腹式工字钢梁、异形截面梁和桁架梁方案变形控制效果好。但是, 用钢量比设置斜拉索的张弦梁方案、采用实腹式工字钢梁和异形截面梁方案少, 比采用桁架梁方案多。

综合比较可知, 理论上, 横向钢梁采用平面

张弦梁结构形式对横向钢梁相对于纵向平面桁架的竖向变形控制效果比普通钢结构截面形式（如实腹式工字钢梁、异形截面梁和桁架梁）好，在此基础上，通过采用平面桁架顶部增设斜拉索的结构形式来减小纵向平面桁架的变形也可达到较好的效果，满足工艺所要求的小车运行时钢廊道最大变形不超过 5 mm 的要求。横向钢梁采用普通钢结构截面形式时，在竖向变形近似相同的情况下，桁架梁经济性比实腹式工字钢梁、异形截面梁好。但是，横向钢梁采用平面张悬梁和桁架梁时，由于筒仓容量为 3 万 t，在直径一定的情况下，筒仓顶部高程即为定值，若由于横向钢梁采用这两种截面较高的形式，而涉及钢廊道底面高程的提升，进而造成工艺专业皮带机高度提升和相关转接机房高度的变化，是结构专业无法控制的；而采用实腹式工字钢梁对工艺专业影响较小。

5 结论

在保证重载作用下筒仓顶输煤廊道结构设计安全的前提下，当横向钢梁分别采用实腹式焊接工字钢、异形截面梁、桁架梁和张悬梁结构形式时，对钢廊道竖向变形进行分析得出如下结论：

1) 理论上，横向钢梁采用平面张弦梁时钢廊道竖向变形控制效果比普通钢结构截面形式（如实腹式工字钢梁、异形截面梁、桁架梁）好，在

此基础上设斜拉索可将重载作用下钢廊道竖向变形最大控制在 5 mm 以内。

2) 考虑卸料小车振动作用，为控制重载作用下钢廊道竖向变形，横向钢梁采用桁架梁时经济性比实腹式焊接工字钢梁、异形截面梁好。

3) 在满足工艺变形要求的前提下，横向钢梁采用张悬梁和桁架梁时对筒仓和钢廊道之间空间距离要求较高，实腹式焊接工字钢梁对该距离要求较低，对工艺专业影响较小。

4) 在满足卸料小车正常运行的前提下，本文为工艺专业制定钢廊道变形控制条件提供参考依据。

5) 为满足工艺专业对卸料小车运行时的钢廊道变形要求，本文为结构方案选取提供参考。

参考文献：

- [1] 曹玉忠, 卢泽生, 李晨光, 等. 大型储煤筒仓的结构分析[J]. 建筑结构: 2001, 31(2): 34-35.
- [2] 黄小玲, 陈明祥, 汪碧飞, 等. 大型整体式浅圆贮煤筒仓局部堆煤作用有限元分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(S7): 236-241.
- [3] 汪碧飞, 陈明祥, 汤正俊, 等. 大型整体式贮煤筒仓基础有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1 983-1 988.
- [4] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S].
- [5] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

勘 误

应闵朝斌作者请求，对 2015 年第 4 期第 141 页右栏第 3~4 行做以下更正：

- 1) “487 亿 t/km” 改为 “487 亿 t·km”；
- 2) “35 亿 t” 改为 “0.35 亿 t”。

《水运工程》编辑部