

直径70m熟料库屋盖网架结构设计

郭云

(天津水泥工业设计研究院有限公司, 天津 300400)

[摘要] 某直径70m水泥熟料库下部为钢筋混凝土筒仓,库顶截锥体屋盖采用双层螺栓球节点网架结构。介绍了该网架的结构选型、荷载、材料、设计参数,探讨了拉链机头轮水平荷载、熟料温度、振动疲劳等问题对库顶屋盖网架设计的影响。对该网架进行了静力分析和动力特性分析,总结了网架的受力特点,并提出在设计、加工、安装及使用阶段的注意事项。

[关键词] 熟料库屋盖; 拉链机头轮荷载; 熟料温度; 设备振动; 疲劳

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0436-05

Structure design of a 70m diameter spatial grid as the clinker silo roof

Guo Yun

(Tianjin Cement Industry Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

Abstract: A cement clinker storage with diameter 70 meters adopts reinforced concrete silo structure and the truncated cone-shaped roof adopts double-layer spatial grid structure with bolt-sphere joints. The system selection, loads, material and design parameters were introduced and several key issues such as the horizontal load of clinker drag chain conveyor, clinker temperature, fatigue caused by vibration were discussed. The static analysis and dynamic characteristics analysis were conducted to obtain the mechanical characteristics of the large diameter silo roof structure. Points for attention in the phases of design, manufacture, installation and use were proposed.

Keywords: clinker silo roof; horizontal load of clinker drag chain conveyor; clinker temperature; equipment vibration; fatigue

0 引言

熟料库是水泥生产过程中用来储存水泥熟料的构筑物,主要由库顶房、库顶屋盖、库壁、库底、基础、卸料地沟等组成。水泥原料经过烧成系统煅烧形成熟料后,经篦冷机冷却降温,由熟料拉链机送上熟料库顶,从库顶下料口落入库中储存,最终经库底输送地沟输出。库顶屋盖除了作为围护结构保护水泥熟料之外,还承受库顶拉链机头部传动装置荷载、库顶其他设备荷载以及设备的振动,因此库顶屋盖受力复杂,不同于一般意义的屋盖。

1 结构选型

1.1 车间概况

本熟料库储量16万t,库体内径70m,库壁高23.725m,地下设4条卸料地沟,库顶平台直径13.7m,标高45m,该熟料库结构形式为:预应力混凝土筒仓+库顶钢屋盖+钢结构库顶房,见图1。库顶平台上布置有一线、二线熟料拉链机头轮(两线中心线夹角90°)、收尘器和风机、检修桁架等。

1.2 结构形式

传统的熟料库库顶屋盖由若干榀钢梁或钢桁架组成,其用钢量大、施工吊装难度大。本项目库顶采

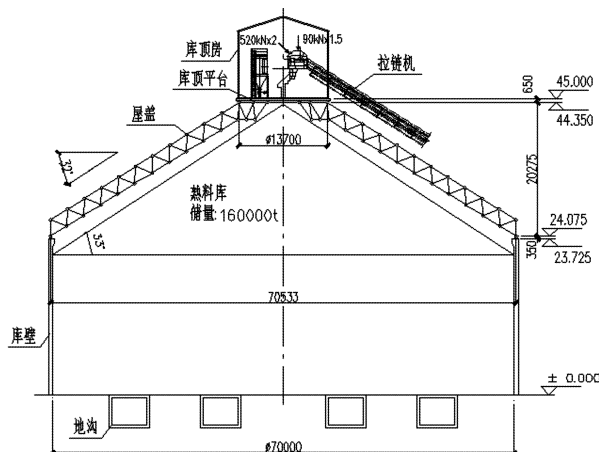


图1 直径70m熟料库立面图

用双层螺栓球空间网架结构,其优势在于结构自重轻、刚度大、施工不用在库中心搭设脚手架,不需要大吨位起重机械,能节省施工费用及工期。屋面网架为截锥体,截锥底面直径70.533m,顶面直径13.700m,锥台高度20.275m,屋面角度32°。网架厚度2.1m,沿混凝土筒仓顶部环梁设置36个支座,支座间弧长6.152m,三维模型见图2。库顶钢平台标高45.000m,

作者简介:郭云,硕士,高级工程师,Email:guoyun@sinoma-tianjin.cn。

由H型钢梁组成,下设32个支点支承于屋面网架上,见图3。网架施工过程中见图4和图5。

2 设计条件

2.1 荷载

(1)恒荷载:主要包括网架及库顶房自重、网架锥面恒荷载、库顶平台恒荷载、库顶风机及收尘器恒荷载、拉链机输送廊道桁架及检修桁架恒荷载。

(2)活荷载:主要包括网架锥面、库顶平台及库顶

房屋面均布活荷载、锥顶风机及收尘器活荷载、一线、二线拉链机头轮斜向力、拉链机头轮竖向力、库顶房单轨吊集中荷载、拉链机输送廊道桁架及检修桁架活荷载。

(3)雪荷载:基本雪压 0.8kN/m^2 ,按屋面坡度折减并考虑库顶与网架屋面高低跨处的堆积雪荷载。

(4)风荷载:基本风压 0.7kN/m^2 ,地面粗糙度B类。

(5)温差: $+150^\circ\text{C}$, -60°C 。

(6)地震:抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度 $0.20g$,地震分组第二组,特征周期 0.40s 。

2.2 荷载组合

根据荷载规范^[1]、抗震规范^[2]进行荷载组合,温差按照无温差、正温差和负温差三种情况分别与其他荷载组合;积灰荷载与屋面均布活荷载和雪荷载中的较大值组合,屋面均布活荷载不与雪荷载和风荷载同时组合;地震按水平和竖向作用同时考虑;模态计算提取结构前30阶振型,地震作用方向按最不利情况取为与一、二线拉链机水平力合力方向一致;荷载组合中应包含恒载、拉链机水平荷载、风荷载同时组合的工况,以考虑风与拉链机水平力同时同向作用的最不利情况。

2.3 材料

(1)网架钢管、锥头、封板、套筒材质:Q235B。

(2)库顶平台材质:主梁 Q345B,次梁 Q235B。

(3)螺栓球材质:选用 GB699 中的 45 号钢。

(4)高强螺栓材质:选用 GB3077 中的 40Cr 或 20MnTiB,等级符合 GB/T1639, M16-M36 为 10.9S, M39-M64 为 9.8S。

2.4 设计参数

网架设计参数依据网架规程^[3]和抗震规范^[2]中大跨屋盖相关章节确定如下:

(1)长细比:一般位置处压杆长细比限值为150,关键位置处压杆120,拉杆长细比限值为200。关键位置是指支座及其周边2个网格内的单元格。

(2)应力比:一般杆件应力比控制在0.9,根据抗震规范^[2]8度地区关键杆件地震组合内力值应乘以增大系数1.15,在程序中通过控制杆件地震组合应力比不大于0.8来实现。

(3)高强度螺栓:根据抗震规范^[2]8度地区的地震作用效应组合设计值应乘以1.2的增大系数,由于网架计算程序按实际内力配置高强度螺栓,程序无自动调整功能,故需要人工调整螺栓直径。

(4)挠度限值:为满足屋面上工艺设备运行要求,网架挠度限值为 $1/400$ 跨度。

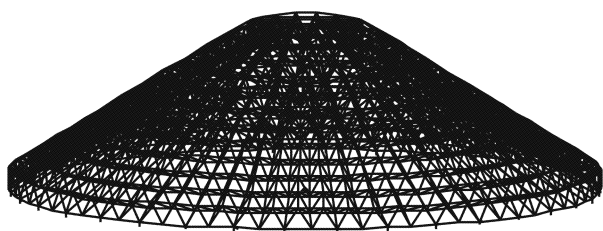


图2 熟料库屋盖网架三维模型

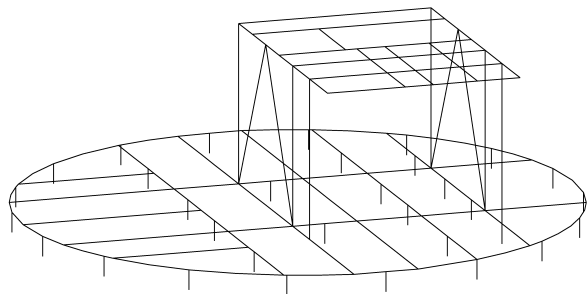


图3 熟料库库顶钢平台



图4 熟料库网架杆件安装



图5 熟料库网架屋面板安装

3 设计中的几个关键问题

3.1 拉链机荷载的传递

库顶网架不仅作为混凝土筒仓的屋盖以承受屋面各种荷载,还是一线、二线熟料拉链机传动装置、收尘装置及库顶房的支承结构。一线拉链机从窑头篦冷机出来直接到熟料库库顶,倾斜角度为 25° , 拉链机头轮沿输送方向拉力达到 $520 \times 2 = 1040 \text{ kN}$, 计算水平分力达到 943 kN , 如此大的水平力如果直接由库顶网架承担, 则网架设计难度大, 存在安全隐患, 也会增大用钢量。因此采用了由拉链机桁架承担头轮水平力的方案, 将拉链机平台设置在拉链机桁架上, 桁架与库顶平台通过设置滑动支座, 保证水平方向自由变形, 这样水平力由拉链机桁架承担并传至窑头卸料地沟, 库顶网架只承担拉链机头轮竖向力和桁架与库顶平台之间的摩擦力。二线熟料拉链机头轮轴向拉力为 $90 \times 2 = 180 \text{ kN}$, 荷载不大, 直接由网架承担。

3.2 熟料温度作用

熟料入库温度设计值为环境温度 $+65^\circ\text{C}$, 但由于篦冷机运转不正常、冷却能力不足等原因易造成熟料冷却不充分, 温度过高 (180°C 左右), 甚至出现红料现象。高温熟料引起屋盖网架内产生温度应力, 为了减小温度应力, 屋盖网架支座采用径向自由滑动的形式, 通过支座的径向变形来释放温度应力, 也可以避免屋盖钢结构与下部混凝土筒仓因热膨胀系数不同而产生温度变形不一致的问题; 同时考虑到网架还要承担拉链机头轮、风、地震作用下的水平力, 故网架支座沿环向约束, 支座详图见图 6。支座径向滑动主要靠设置在支座底板和混凝土柱顶预埋钢板之间的聚四氟乙烯板实现, 钢板与聚四氟乙烯板之间的摩擦系数很小 (约为 0.04); 支座环向约束靠支座两侧的限位板实现。不推荐使用橡胶支座, 原因是熟料温度较高, 高温作用会加速橡胶的老化, 而聚四氟乙烯具有优良的化学稳定性和抗老化能力, 能在 $+250^\circ\text{C}$ 至 -180°C 的温度下长期工作。

3.3 设备振动引起的疲劳问题

熟料库顶作用有拉链机头轮传动、收尘器、风机等设备, 设备正常运行和启动过程中都会产生振动, 振动会引起库顶网架构件及连接的疲劳问题。熟料库顶振动属多源振动, 振动频率高、振幅小、持续时间长, 属于超高次疲劳问题。我国现行钢结构规范对于超高次疲劳问题尚无明确规定。借鉴机械行业的无限寿命设计法, 将振动测试结果作为结构振动边界条件, 对熟料库网架进行动力分析, 得出结构在正常使用状态下最大内力变化, 进行疲劳验算, 保证网架各构件及连接 (焊缝、螺栓) 在设备正常运行时循环应力

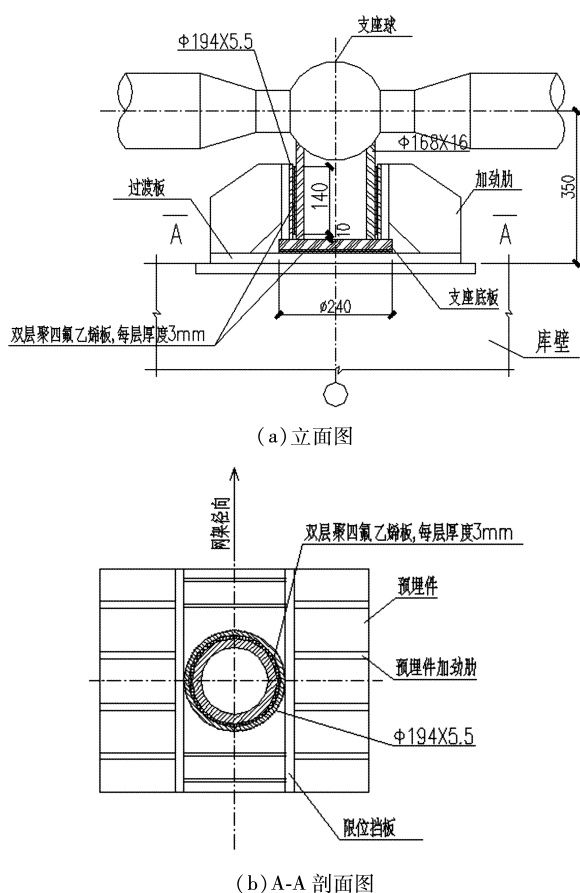


图 6 网架支座详图

幅值低于其疲劳极限。文献 [4], [5] 对水泥厂熟料库现场动力测试和分析表明, 动力作用产生的内力幅值较小, 疲劳应力幅均小于疲劳极限, 结构安全性满足要求。

除了完善的理论分析, 增大库顶钢平台刚度也会利于减小设备振动对网架的影响。由于库顶设备直接与库顶钢平台连接, 钢平台再与锥顶网架球节点连接, 所以库顶钢平台作为一个整体能够起到对设备振动的缓冲过渡作用及设备荷载均匀传递作用, 故钢梁平台刚度宜做大, 保证平台的整体性。

4 设计结果

4.1 静力分析

(1) 构件规格: 采用空间网格结构设计软件 MSGS 进行网架静力计算, 计算得杆件规格 $\phi 60 \times 3.5 \sim \phi 219 \times 12$, 螺栓 M20 ~ M64, 螺栓球节点 $\phi 100 \sim \phi 360$ 。

(2) 用钢量: 用钢量统计见表 1, 主结构用钢量为 63.2 kg/m^2 , 而采用钢梁形式用钢量约为 80 kg/m^2 , 可见网架可节省钢材约 21%, 经济优势明显。

(3) 位移、挠度: 网架最大水平位移 0.0821 m , 发生在支座处; 最大竖向位移 -0.0715 m , 位于网架库顶平台中心, 挠跨比 $1/979 < 1/400$, 挠度满足设计要求。

(4) 支座反力:36 个支座的 X, Y 向支座水平反力最大值为 $R_x = 93.625\text{kN}$, $R_y = 88.206\text{kN}$, 竖向反力最大值 $R_z = -460.971\text{kN}$ (压力)。

熟料库网架用钢量统计表 表 1

用钢量明细/t				总用钢量/t	用钢量/(kg/m ²)
杆件	螺栓球	螺栓/螺母	封板/锥头		
159.012	27.726	15.575	40.933	243.25	63.2

4.2 动力特性

对网架进行模态分析,提取结构的前 30 阶振型,得到水平两个方向的质量参与系数均大于 90%,满足抗震规范^[2]要求。前 9 阶振型见图 7。由模态分析可见,网架第一周期仅 0.457s,周期较短,表明结构刚度较大,且结构频率比较密集,前两阶振型以水平平动为主,第三阶振型以竖向平动为主。

4.3 受力特点

(1) 拉链机头轮荷载是影响库顶屋盖设计的最主要荷载。如果工艺布置有黄料库,则建议黄料库放置在窑头和熟料库之间,熟料拉链机先到黄料库,再到熟料库,这样能有效减小熟料库顶拉链机头轮荷载。

(2) 在竖向荷载作用下,网架支座位移沿径向向外,网架最外圈环向杆件拉力最大,环向拉力由外圈向内圈递减并逐渐过渡到内部各环受压。通过人为加大下弦最外几圈环向杆件截面,共同分担最外环拉力,能明显改善最外环杆件的受力状态,降低其内力,同时能减小支座位移和跨中竖向挠度。

(3) 由于支座沿径向可以自由滑动,所以网架在正负温差作用下支座沿径向均匀扩展或收缩,杆件内无温度应力,温度作用只影响支座位移量和跨中挠度。

(4) 地震力对杆件内力影响小,不起控制作用。

(5) 支座个数分别按 18 个和 36 个计算,虽然总体用钢量差别不明显,但支座数量多能显著减小支座反力且支座受力更加均匀,减小了支座下混凝土环梁局部压应力,所以最终选用 36 个支座方案。

5 各阶段注意事项

5.1 设计阶段

(1) 库顶网架建模的关键是合理确定截锥底部最外圈环向网格数 n 和合理布置锥顶网格。 n 的大小取决于支座个数、锥顶网架最外环网格数量、网格合并次数, n 是支座数的倍数, n 经过若干次网格合并后与锥顶最外圈网格数相同。锥顶平台网格分格数不宜过多,否则汇交于中心的杆件数过多,造成杆件夹角过小,球节点直径太大;同时,锥顶网架作为库顶平台钢梁的支承点,其网格布置与平台钢梁的布置应相协调;库顶工艺洞口多,如下料口、收尘器孔、量仓孔等,杆件及球节点按实际尺寸放样后不能与孔洞相碰;锥顶网架厚度要距料堆最高点保持一定的净空,避免高温熟料冲入网架内。

(2) 网架支座径向可自由变形,在正温差和竖向荷载作用下,网架支座向外扩展,位移值较大,注意按实际尺寸放样验算网架变形后不与设置在混凝土筒

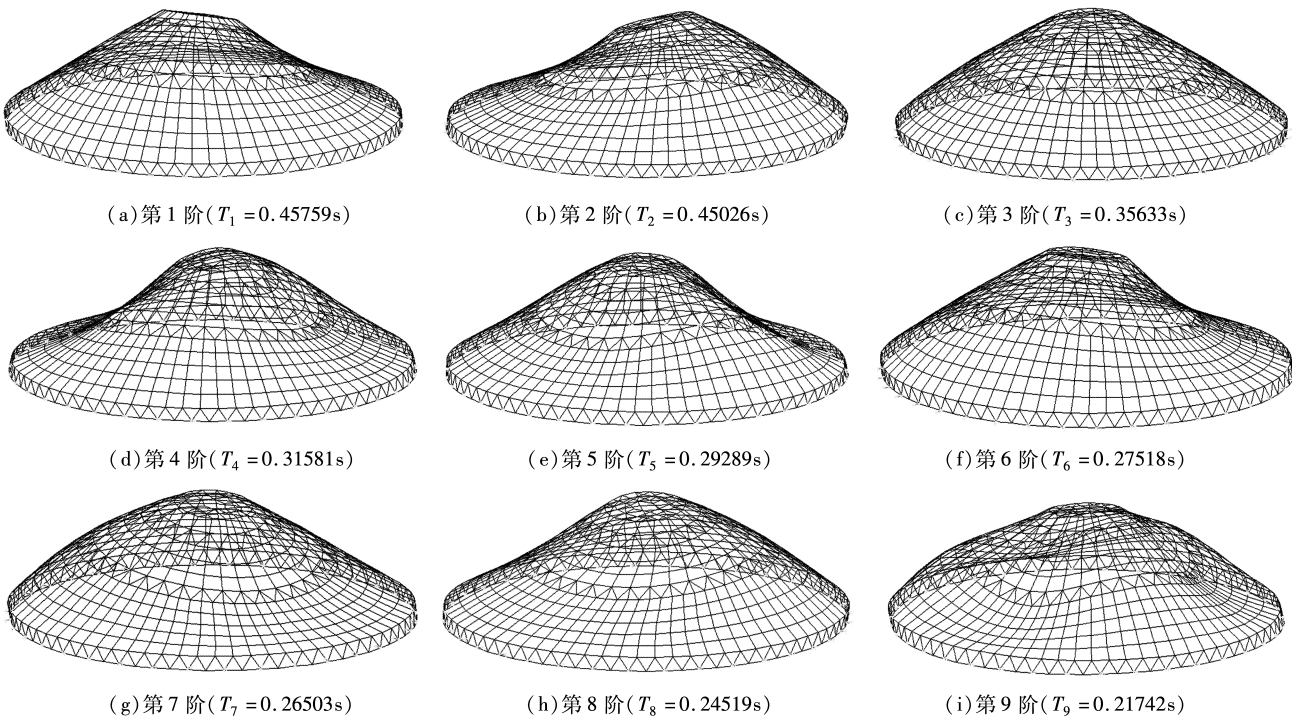


图 7 网架前 9 阶振型图

仓顶部环梁上的拉链机桁架及检修桁架支座相碰。

(3)杆件的局部调整:在满足设计要求的基础上,适当调大网架支座附近及锥顶附近杆件,调大库顶平台钢梁截面,以保证网架及平台的整体刚度,从而缓冲振动、均匀传递荷载。

5.2 加工、安装阶段

熟料库屋盖网架不仅是围护结构,还是库顶设备的支承结构,并直接承受设备振动的影响,故网架的加工、安装应严格执行相关规范,设计应做好技术交底,注意检查高强螺栓的拧紧程度,要求套筒与球体切削面和杆端封头件平面之间无缝隙,无松动,杜绝螺栓“假拧紧”现象。

5.3 使用阶段

使用阶段应定期检查屋盖网架是否出现螺栓松动、杆件脱落、杆件锈蚀、下料口附近杆件受冲击变形

等问题,生产中避免熟料堆料超过设计高度,以防止网架温度过高及熟料对杆件的直接冲击。

参 考 文 献

- [1] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 李家发,马明,郝成新,等. 空间结构在水泥熟料库结构中的应用[C]//第十二届空间结构学术会议. 2008:521-525.
- [5] 马明,周贤葆,郝成新,等. 新型无中心支撑水泥熟料库屋盖结构体系研究[J]. 工业建筑,2011,41(3): 68-72.