



港口工程散货堆场防风抑尘网结构设计

岳霖, 岳田, 杜振辉

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对防风抑尘网结构设计的参数取值问题, 以已建防风抑尘网工程为实例, 采用风洞试验与规范规定相结合的方式, 论述了散货堆场防风抑尘网的结构设计方法, 集中分析了风荷载体形系数、风振系数等的取值方法。结果表明: 防风抑尘网作为港口工程散货(煤炭、矿石)堆场的重要防风抑尘措施, 具有受力明确、荷载传递路径清晰、施工便捷等特点。以《建筑结构荷载规范》的风荷载计算公式为基础, 合理选取风振系数、体型系数等设计参数, 能够保证结构的安全、稳定、经济、合理。

关键词: 防风抑尘网; 风致振动; 体型系数

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0109-06

Structural design of wind and dust suppression nets for bulk cargo yards in port engineering

YUE Lin, YUE Tian, DU Zhen-hui

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

Abstract: In this paper, the existing wind and dust suppression net projects are taken as an example to address the value problem of parameters in the structural design of wind and dust suppression nets. Specifically, by combining wind tunnel tests and specifications, the structural design method of wind and dust suppression nets in bulk cargo yards is discussed, and then we focus on analyzing the method of determining the values of parameters such as the structural shape factor of wind loads and the wind vibration coefficient. The results reveal that the wind and dust suppression nets, as an important wind and dust suppression measure for bulk cargo (coal and ore) yards in port engineering, are characterized by clear force, clear load transfer paths, and convenient construction. On the basis of the wind load calculation formula in *Load Code for the Design of Building Structures*, reasonable selection of design parameters such as the wind vibration coefficient and structural shape factor can ensure the safety, stability, economy, and reasonableness of structure.

Keywords: wind and dust suppression nets; wind-induced vibration; structural shape factor

随着国家环保要求的提高, 港口工程散货(煤炭、矿石)堆场均需要设置防风抑尘网, 现有的已建散货堆场也陆续要求增设防风抑尘网。大量工程实例证明, 防风抑尘网可有效降低堆场内风场的强度, 进而减少起尘量, 达到防风抑尘的效果。试验证明, 防风抑尘网能起到较为明显的防风作

用, 建设防风抑尘网总体来说可使料场内部风速降低 50%左右, 从而减轻空气污染和原料损失^[1]。

比较封闭大棚、筒仓等其他防风抑尘措施, 防风抑尘网工程的经济性更优、施工难度较低, 在散货堆场中发展非常快速, 已经成为散货堆场建设中最主要的防风抑尘措施。

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 岳霖(1982—), 男, 高级工程师, 从事工程结构设计。

近年来,我国防风抑尘网工程取得长足发展,在防风抑尘网的防风抑尘原理、风致振动对主体结构影响等方面均有较多共识^[2-3],但涉及到工程设计

实操的内容较少。笔者从工程设计实操出发,结合防风抑尘网工程案例(表1),着重介绍防风抑尘网结构设计主要计算思路和相关参数的取值方法。

表 1 已建防风抑尘网工程

项目名称	堆场平面/(m×m)	防风抑尘网高度/m	堆垛高度/m
黄骅港(煤炭港区)四期工程	1 533×256	23	17
福州港罗源湾港区将军帽作业区一期工程	516×345	23	15
钦州港国投煤炭码头工程	1 100×370	21	16
天津港南疆港区 26 号铁矿石码头料场挡风抑尘墙工程	1 276×403	20	-
徐州港徐州港区顺堤河作业区煤炭码头一期工程	1 081×715	19	14
罗源湾港区碧里作业区 4#泊位	772×200	15	12
连云港港徐圩港区一港池二期工程	412×214	12	6
连云港港徐圩港区一港池三期工程	412×550	12	6
大连港太平湾港区通用码头工程(104#~108#泊位)	640×350	9	6

1 防风抑尘网确定

1.1 高度

防风抑尘网高度宜取 1.1~1.5 倍堆垛高度,且高出堆垛部分不应小于 1 m^[4]。常见的防风抑尘网高度有 9~25 m 不等,一般不会超过 30 m。通用堆场的堆垛较低,防风抑尘网也较低;专用堆场的堆垛高度受专用堆料设备的影响,堆高较高,所以防风抑尘网相对更高,见表 1。

1.2 平面布置

为保证效果,防风抑尘网一般布置在堆场四周。当堆场面积较大、风向变化频繁时,需要在堆场内部增设防风抑尘网,根据堆场堆取料作业的需要,经常将堆场分割为“日”形或“目”形;堆取料作业不受影响时,也可将堆场分割为“田”形。

1.3 开孔率

防风抑尘网通过降低风场强度使堆垛中堆料达不到最小起尘风速的机理达到防风抑尘效果,即堆场内风场的风速低于最小起尘风速,这就为网片开孔提供了可能。网片开孔可以有效减小挡风系数、降低主体结构的工程造价。

网片开孔形状一般为圆形,堆场的迎风向和背风向的开孔率略有差别,推荐的开孔率宜取 30%~40%。为保证足够的抗风强度,有时采用刚性网片,会折成波峰高度 70~80 mm 的波纹板,以增加抵抗矩,见图 1。

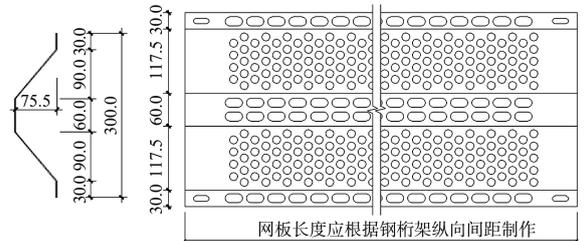


图 1 黄骅港(煤炭港区)四期工程网片选型(单位: mm)

2 结构构件选型

防风抑尘网主要由上部结构和基础两部分组成。上部结构由钢桁架(GJ-1)和桁架间连接杆件(XG1、ZC)相互连接而成,见图 2。钢桁架的间距取值受防风抑尘网高度、风荷载强度、连接系杆长细比、网片抵抗矩等因素影响,钢桁架的间距越大、钢桁架数量越少、单个桁架用钢量越多、连接系杆的用钢量越多、网片用钢量越多。钢桁架的间距建议取值为 4~7 m,防风抑尘网越高,风荷载越大、间距取值越小。

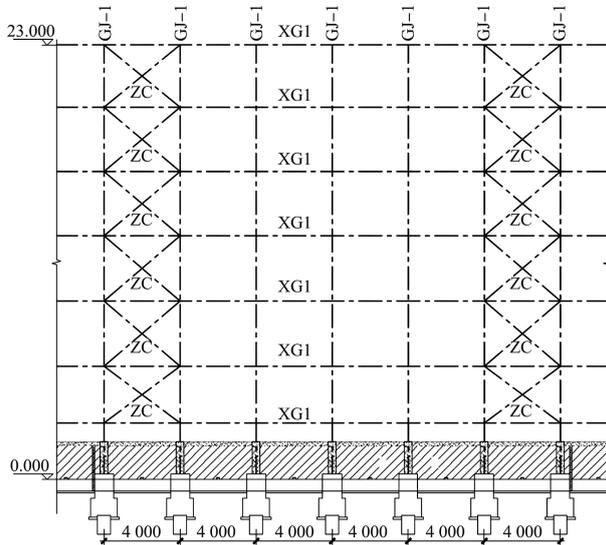


图2 黄骅港(煤炭港区)四期工程防风抑尘网立面布置
(高程: m; 尺寸: mm)

2.1 钢桁架

钢桁架的前肢(网片连接肢)一般采用工字钢截面,其翼缘与网片连接简单、稳定性好。钢桁架的后肢采用倾斜布置时受力更合理^[5],可采用钢管或者工字钢。因风荷载既有作用在网片正面的工况也有作用在网片背面的工况,桁架前后肢的轴向受力相差不大,所以前后肢型钢的截面积相差也不大。前后肢之间腹杆采用钢管与前后肢相焊接。前后肢柱脚间距在 1.5~3 m,防风抑尘网高度越高,前后肢柱脚间距也越大。钢桁架立面布置见图 3。

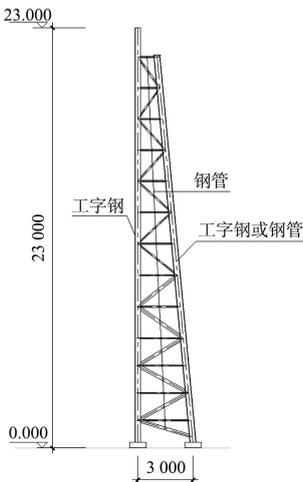


图3 黄骅港(煤炭港区)四期工程防风抑尘网
钢桁架立面(高程: m; 尺寸: mm)

2.2 桁架间连接杆件

为保证防风抑尘网结构整体受力,应将各榀钢桁架在沿网片布置的水平方向用刚性系杆连接。该方向仅承受桁架本身作为迎风面传递的风荷载,该风荷载较小,刚性系杆的截面一般由杆件长细比控制。

另外,港口工程散货堆场的场地由吹填形成,土质较差,经地基处理后,个别场地仍存在固结不完全的情况。防风抑尘网围绕堆场四周布置,长度一般在几百米甚至几公里,为降低不均匀沉降的影响,宜将防风抑尘网分段设置,每个分段的长度在 50~60 m,每个结构段内设置 1~2 道水平支撑(ZC)。各结构段之间基础连梁断开,刚性系杆与桁架采用长圆孔连接。

2.3 网片选型及安装

网片可选用柔性聚乙烯阻燃防尘网(称柔性网)或刚性镀铝锌钢板(称刚性网)。柔性网造价低、易安装,但是耐久性较差;刚性网更加美观、牢固、防腐蚀性能强,后期维护工作量较少,但是造价较高。综合考虑港口工程风荷载较大、盐雾环境较差等因素,实际工程中,采用镀铝锌钢板作为围护材料较为普遍。

镀铝锌钢板通常选用波纹板,波纹板的选型主要受风荷载大小、钢桁架间距影响。较为常见的波纹板选型为板厚 0.8~1.5 mm、峰高 70~80 mm,板材的屈服强度不低于 310 MPa,开孔率 30%~40%。经计算,在板跨不超过 5 m 的情况下,这种板型一般能满足承载力的要求;当板跨超过 5 m 时,应在钢桁架之间布置次级钢架或水平桁架以减小板跨。在防风抑尘网进出车辆位置,这种情况较为常见。

在使用过程中,防风抑尘网受风荷载反复作用,连接螺栓可能出现松动,如果维护不善容易造成脱落。将网片安装在前肢工字钢翼缘的内侧,可以有效减小脱落网片的掉落半径,见图 4。安装时需要注意将刚性系杆向后肢方向偏移,预留不小于 80 mm 的网片安装空间,见图 5。

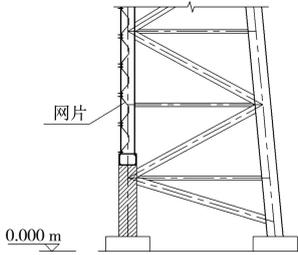


图4 防风抑尘网网片安装立面

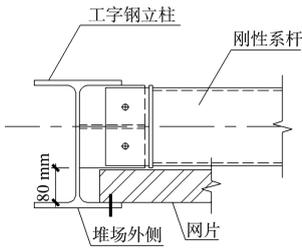


图5 防风抑尘网网片安装俯视图

3 上部钢结构设计

3.1 荷载组合

防风抑尘网除了结构本身自重外，主要承受水平向风荷载。在主受力平面内承受正反两个方向的风荷载作用。

承载能力极限状态的组合工况为 $1.3 \times \text{恒荷载} \pm 1.5 \times \text{风荷载}$ ， $1.0 \times \text{恒荷载} \pm 1.5 \times \text{风荷载}$ ；正常使用极限状态的组合工况为 $1.0 \times \text{恒荷载} \pm 1.0 \times \text{风荷载}$ 。本文主要论述风荷载各参数的取值方法或推荐数值。

3.2 风荷载主要参数取值

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[6]，风荷载标准值 w_k 计算公式为：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中： β_z 为高度 z 处的风振系数； μ_s 为风荷载体型系数； μ_z 为风压高度变化系数； w_0 为基本风压。

防风抑尘网为对风荷载敏感的构筑物，风振系数和体型系数对结构影响较大，基本风压和风压高度变化系数按《建筑结构荷载规范》取值即可。

3.2.1 风振系数取值

防风抑尘网是对风荷载非常敏感的竖向悬臂型结构，近年发表的防风抑尘网相关文献均未对防风抑尘网的风振系数给出明确推荐数值或计算公式。笔者结合已建工程经验，梳理了风振系数

取值思路。《建筑结构荷载规范》8.4.1 条规定：基本自振周期 $T_1 > 0.25$ s 的各种高耸结构，应考虑风压脉动对结构产生顺风向风振的影响。根据工程经验，防风抑尘网结构的基本自振周期 T_1 一般在 0.15~0.30 s。防风抑尘网高度越高、型钢截面越小，自振周期就越长。当防风抑尘网的高度超过 15 m 时，自振周期接近 0.25 s，建议适当考虑风振影响。根据《建筑结构荷载规范》8.4 节，计算得风振系数在结构顶部最大，约 2.2；结构底部最小，接近 1.0。《工程结构通用规范》^[7] 4.6.5 条规定，风振系数不应小于 1.2。所以，防风抑尘网的风振系数取值随结构高度变化，由低到高在 1.2~2.2。综合考虑结构重要性、风荷载敏感性等因素，当防风抑尘网高度超过 15 m 时，为简化计算，在初选钢桁架型钢截面时，风振系数可取 1.4~1.5。

3.2.2 体型系数取值

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》，独立墙壁及围墙的风荷载体型系数为 1.3。按照 30%~40% 的开孔率折算，风荷载体型系数在 0.78~0.91。

京唐港 3 000 万 t 煤炭泊位 (32#~34#) 堆场工程风洞试验表明，开孔率 26%~40% 对应的风阻系数为 0.87~1.03^[8]，略大于荷载规范的计算值；开孔率为 0 的风阻取 1.26，与荷载规范基本相当。

考虑风荷载方向的不确定性，初选钢桁架型钢截面时，推荐风荷载体型系数可取 1.00~1.05，必要时也可通过风洞试验或数值模拟试验确定风荷载体型系数。

3.3 钢结构防腐

钢结构防腐设计需要综合考虑空气湿度、环境温度、堆存介质等因素的影响。港口工程盐雾腐蚀严重、湿度较大，煤炭中有大量的硫元素随着空气飘散，对钢结构的防腐耐久性是很大的考验。根据 JGJ/T 251—2011《建筑钢结构防腐蚀技术规程》^[9] 第 3.1.2 条和 3.3.5 条，当大气环境的腐蚀性等级为 V 级和 VI 级时，防腐设计使用年限在 10~15 a，漆膜总厚度在 260~280 μm 。当建设地点在内河港口或者内陆环境时，可根据防腐

蚀等级适当减少漆膜厚度。

3.4 主要计算结果控制指标

根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[10] 和 GB 51022—2015《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》^[11], 钢桁架水平挠度限值取 $l/400$ (l 取结构高度的 2 倍)。桁架肢杆、腹杆长细比容许值取 150, 刚性系杆长细比容许值取 180。以福州港罗源湾港区将军帽作业区一期工程防风抑尘网为例, 主要计算结果见图 6、7。

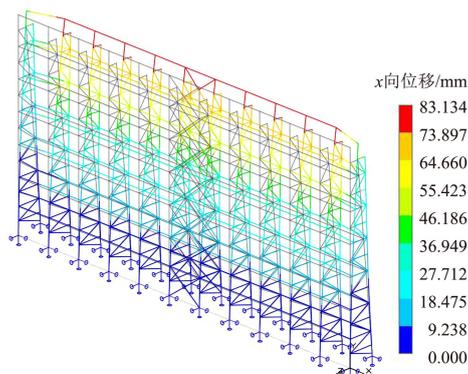


图 6 福州港罗源湾港区将军帽作业区一期工程钢桁架水平位移

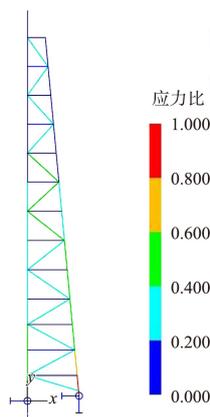


图 7 福州港罗源湾港区将军帽作业区一期工程钢桁架强度应力比

4 基础设计

4.1 基础选型

根据工程地质特点, 防风抑尘网基础可采用桩基础, 也可采用双柱独立基础。

受水平荷载影响, 如果选用双柱独立基础, 通常会造基底偏心距 $e > b/6$ 。为了保证基底零应力区^[12]的尺寸满足规范要求, 会进一步增大基

础底面积, 从而对基础周边的管沟布置造成一定影响。可以通过增加基础埋深、优化基础长宽比例等方式避让管沟。

当选用桩基础时, 桩位布置在桁架柱肢的正下方可以减少基础承台的附加弯矩。桩基础按抗拔桩设计, 同时要考虑桩基抗水平力的影响。

4.2 浅基础计算要点

因为上部结构传递来的荷载主要为水平向的风荷载, 根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011^[13], 基底弯矩对应的偏心距 e 一般超过 $b/6$ (b 为弯矩作用方向的基础底面边长), 计算 p_{kmax} (相应于作用的标准组合时, 基础底面边缘的最大压力值) 时应按公式 5.2.2-4 执行, 且应注意基础底面与地基土之间脱离区 (零应力区) 面积不应超过基础底面面积的 15%^[11], 同时应对基础进行抗倾覆和抗滑移验算。

4.3 桩基础计算要点

当选用桩基础时, 基础自重有可能不足以抵抗水平向的风荷载在基底产生的弯矩。此时, 桩基础按抗拔桩设计, 同时还需要进行桩基水平承载力验算。承台的平面尺寸较小, 承台构造配筋即可满足使用要求。设计时应要求勘察单位提供桩基抗拔、水平承载力计算相关地质参数。

4.4 沉降计算

防风抑尘网结构本身自质量小, 基底附加应力很小。无论采用桩基础还是浅基础, 一般不需要进行沉降计算。但是防风抑尘网沿堆场四周布置, 总长度较长, 建设场地本身的固结沉降会造成防风抑尘网基础的不均匀沉降, 当建设场地土的覆盖层厚度变化较大时尤为明显, 应给予足够的重视。可通过合理设置结构段长度、合理设计结构段之间连接法、合理选取基础类型等手段对防风抑尘网基础进行优化设计。

5 结语

1) 大量的工程实例证明, 防风抑尘网作为港口工程散货 (煤炭、矿石) 堆场的重要防风抑尘措施, 具有受力明确、荷载传递路径清晰、施工便

捷等特点, 便于推广使用。

2) 以《建筑结构荷载规范》的风荷载计算公式为基础, 选择适合的结构类型和基础形式, 合理选取风振系数、体型系数等设计参数, 能够保证结构的安全稳定和经济合理。

3) 防风抑尘网通过风洞试验确定的体型系数比规范规定偏大, 计算时应给予充分重视, 必要时通过风洞试验或数字模拟试验确定体型系数。

4) 《工程结构通用规范》4.6.5 条规定风荷载放大系数不应小于 1.2, 设计中应充分考虑。

参考文献:

[1] 陈凯, 朱凤荣, 钮珍南. 防风网作用效果的风洞实验评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006(5): 636-640.

[2] 王元战, 孙熙平, 詹水芬, 等. 防风网结构设计研究综述[J]. 港工技术, 2008, 45(3): 16-19.

[3] 孙熙平, 王元战. 防风网结构风振疲劳特性研究[J]. 港工技术, 2009, 46(2): 30-33.

[4] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程环境保护设计规范: JTS 149—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[5] 陈廷国, 王泽涛. 防风网体型系数风洞试验研究[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(9): 28-29, 40.

[6] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[7] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 工程结构通用规范: GB 55001—2021[S]. 北京: 中国建筑出版传媒有限公司, 2021.

[8] 段振亚, 黄文博, 傅进. 防风网支撑钢构架结构设计与力学特性分析[J]. 石油化工设备, 2013, 42(4): 27-30.

[9] 同济大学. 建筑钢结构防腐技术规程: JGJ/T 251—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[10] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[11] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范: GB51022—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[13] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 83 页)

[3] 巫志鹏. 油码头、液体化学品码头安全风险问题的探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(5): 169-172.

[4] 李荣平. 福建炼油乙烯项目成品油码头改扩建工程消防系统布置设计优化[J]. 水运工程, 2011(S1): 106-108.

[5] 周松飞, 苗建敏. 港口危化品装卸过程安全管理[J]. 港口科技, 2016, (11): 50-52.

[6] 韩刚, 龚庆文, 赵秀慧等. 港口危险化学品项目安全设施设计专篇编制要点分析[J]. 中国港湾建设, 2014(9): 72-75.

[7] 黄树忠, 罗明, 李春来等. 危险化学品码头工程安全设施设计编制方法[J]. 西部交通科技, 2017(4): 115-117, 122.

[8] 朱正宏. 液体化学品码头建设中的几个问题[J]. 辽宁

化工, 2019, 48(5): 426-427, 430.

[9] 国家安监总局办公厅. 关于印发危险化学品建设项目安全设施设计专篇编制导则的通知[Z]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2013.

[10] 王艳平. 《危险化学品建设项目安全设施设计专篇编制导则》在实际工作中的应用[J]. 广东化工, 2015, 42(1): 70-71.

[11] 郜胜. 化工企业建设项目安全设施设计专篇编制过程的分析与讨论[J]. 中国洗涤用品工业, 2019(10): 74-78.

[12] 交通运输部水运科学研究所. 危险货物港口建设项目安全设施设计专篇编制规范: JTS/T 108-3—2019[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2019.

(本文编辑 王传瑜)