

空气支承式膜结构储煤场技术的应用研究

张全斌¹, 周琼芳², 杨建国³

- (1. 浙江省能源集团有限公司, 浙江 杭州 311121;
2. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012;
3. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 随着国家大气污染治理标准的不断提高, 燃煤电厂露天条形储煤场的封闭化治理势在必行。与传统钢结构相比, 封闭式储煤场采用空气支承式膜结构具有抑尘效果好、自重轻、地质条件适用性好、透光性好、耐腐蚀、耐候性强、自洁性能好, 施工工期短且造价低等优点。通过工作原理分析, 从膜结构的使用寿命、防火、防爆、安全性能以及工程造价等方面进行研究、论证, 空气支承式膜结构能满足工程环保治理的要求。经工程实践验证, 空气支承式膜结构储煤场满足技术要求, 结果符合预期, 具有工程推广价值。

关键词: 储煤场; 空气支承式; 膜结构; 全封闭; 抑尘

中图分类号: X513; TM621

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.02.022

Application Study on Air-Supported Membrane Structure Technology in Coal Storage Yard

ZHANG Quanbin¹, ZHOU Qiongfang², YANG Jianguo³

- (1. Zhejiang Provincial Energy Group Company Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Company Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the continuous improvement of the the national air pollution control standards, enclosed management was necessary for outdoor strip-shape coal storage yard in coal-fired power plants. Compared with the traditional steel structure, the air-supported membrane structure used by the enclosed coal storage yard had the advantages of good dust suppression effect, light weight, good adaptability on geological conditions, good light-transmittance, corrosion resistance, good weather-resistance, good self-cleaning performance, short construction period and low cost. Through the analysis of operation principle, this paper studied and demonstrated the service life, fire prevention, explosion proof, safety performance and engineering cost of membrane structure, and concluded that the air-supported membrane structure could meet the requirements of the environmental protection. It had been verified by engineering practice that the air-supported membrane structure in the coal storage yard could meet the technical requirements, and as expected, it had the promotion value in the engineering application.

Keywords: Coal Storage Yard; Air-supported; Membrane Structure; Fully Closure; Dust Suppression

CLC number: X513; TM621

露天储煤场装卸作业过程中产生的煤粉扬尘是燃煤电厂最主要的大气颗粒物面源污染源。目前, 储煤场抑尘多采用喷淋增湿、设置防风抑尘墙等技术措施, 这类措施能够有效改善煤尘污染, 但无法从源头上根治储煤场的煤尘污染。

随着国家对大气污染治理标准的不断提高, 发电厂环保监管日趋严格。《中华人民共和国大气污染防治法》第七十二条明确规定储存煤炭应

当密闭。2018年6月, 国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 行动计划要求强化火电行业物料运输、装卸、储存、转移和工艺过程的粉尘面源污染的深度治理。鉴于日益严格的环保要求, 露天条形煤场的喷淋增湿、防风抑尘墙等技术已不能满足相关环保要求, 燃煤电厂的储煤场环保治理势在必行, 封闭式条形储煤场能从根本上解决储煤场的面源污染问题。

收稿日期: 2019-07-23

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY15E060002)

作者简介: 张全斌(1974-), 男, 硕士、教授级高级工程师。研究方向: 热力发电环保技术。E-mail: zqb0111@163.com

引用格式: 张全斌, 周琼芳, 杨建国. 空气支承式膜结构储煤场技术的应用研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 113-116.

1 封闭式储煤场结构形式

目前,国内大跨度封闭式条形储煤场主要有 2 种形式:钢结构储煤场和膜结构储煤场^[1]。钢结构一般有网架结构、钢桁架结构等形式。膜结构储煤场为近几年发展起来的储煤场封闭形式,参照《膜结构技术规程:CECS 158—2015》^[2],大跨度建(构)筑物的膜结构一般采用骨架支承式与空气支承式等结构形式,见图 1。

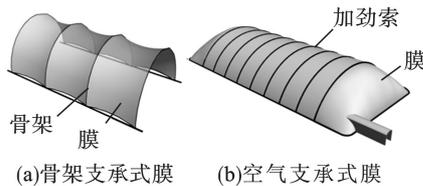


图 1 大跨度建(构)筑物膜结构形式

4 种形式的储煤场结构形式的技术经济比较见表 1,其中膜结构具有造价低、施工工期短和使用年限适中等特点,由于骨架支承式膜结构密封性较差,发电厂储煤场封闭常采用空气支承式膜结构。

表 1 各种储煤场封闭结构形式技术经济比较表

结构类型	造价	工期/d	设计年限/a	运行维护费用
钢桁架	高	240	30	外护板维护,费用较高
钢网架	较高	180	30	外护板维护,费用较高
空气支承式膜	低	60	15~20	充气设备运行费用较低
骨架支承式膜	较低	90	15~20	低

2 空气支承式膜结构技术

空气支承式膜结构是一种建筑结构形式,其在北美、日本和欧洲已有 40 多年的发展历史,1974 年建造的英国多普勒雷达穹顶是世界上第 1 个空气支承式膜结构。我国 1980 年建成的上海工业展览馆也采用了空气支承式膜结构^[3-4]。

空气支承式膜结构以优质膜材为载体,利用内外气压差保持膜材张力,形成具有一定刚度、张力,能够覆盖大跨度空间的结构体系,工作原理示意图见图 2。空气支承式膜结构储煤场利用充气风机向封闭式储煤场充气,保持储煤场内外 250~500 Pa 的气压差,使膜体受到上浮力并产生预张应力。

空气支承式膜结构储煤场是一种新型的全封闭结构的储煤场,国内已建成投运的空气支承式膜结构储煤场有邢台国泰发电有限责任公司、神华巴

彦淖尔能源有限责任公司、神华宁夏煤业集团有限责任公司的太西、大武口洗煤厂^[5]。

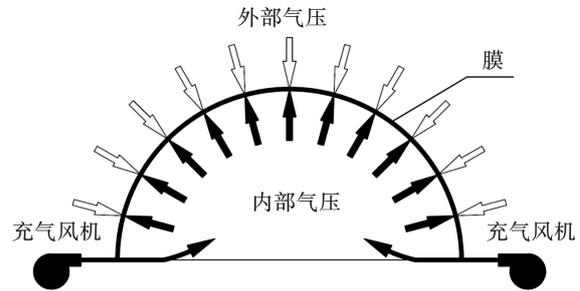


图 2 空气支承式膜结构工作原理示意图

与传统的钢结构储煤场相比,空气支承式膜结构具有显著优势:①密封性好、环保指标高。封闭式膜结构采用有组织的通风系统,可有效防止煤场堆取料设备作业产生的扬尘向外扩散;②质量轻,力学性能优异,适应性好。膜结构重量仅为常规钢网架的 4%~5%,特别适合地基承载力较差的建设场地。膜结构属于柔性结构,对基础沉降不均匀、地震等适应性有一定优势;③膜材透光性好,减少了室内照明的能量消耗^[6];自洁能力强,耐酸碱腐蚀,耐老化,节省后期运行维护成本^[7];④施工周期短。膜结构加工制作一般在工厂完成,现场进行拼接安装作业,膜结构整个施工周期 2~3 个月;⑤工程造价低。膜结构造价较常规钢结构降低 60%~70%^[4-5,7]。

空气支承式膜结构的膜材由高强度纤维基布和聚合物涂层组成,基布是受力构件,起承受并传递荷载的作用,主要有聚酯纤维、玻璃纤维等;涂层具有保护基布、防潮、耐火等作用,涂层材料主要有聚氯乙烯(PVC)、聚四氟乙烯(PTFE)和硅酮等^[4,8]。

按照《膜结构用涂层织物:GB/T 30161—2013》的规定,膜结构用涂层织物分为 G、P 和 E 等 3 类膜材。玻璃纤维基布表面涂覆聚合物连续层的涂层织物为 G 类,如聚四氟乙烯(PTFE);聚酯纤维基布表面涂覆聚合物连续层(PVC)并附加面层的涂层织物为 P 类,如聚氟乙烯(PVF)、聚偏氟乙烯(PVDF)和二氧化钛(TiO₂)等;由乙烯和四氟乙烯共聚物制成的 ETFE 薄膜为 E 类。

PVC、PVDF 膜材为软质膜材,适用于空气支承式膜结构。

3 空气支承式膜结构储煤场技术研究

封闭式储煤场储存的介质为易燃易爆的煤炭,膜结构除了环保性能,还应具备足够的防火、防爆和安全性能,确保封闭式储煤场长期稳定的运行。

同时,膜结构设计应秉承技术领先、成熟可靠和经济合理的原则,保证 15 a 以上的免维护使用寿命。

3.1 膜结构使用寿命

膜结构的使用寿命是由膜材决定的。膜材一般采用有机材料,如 PVC、PVDF 膜材均存在逐步老化的过程,较传统的钢结构相比,其寿命是有限的。同时,不同膜材的耐久性存在较大差异,膜材耐久性指标可按照《膜结构用涂层织物:GB/T 30161—2013》的规定进行检验。

PVC 膜材的耐候性较差,易老化,使用寿命 3~7 a,在 PVC 涂层上涂覆 PVDF 提高其抗老化能力,可增加使用寿命至 15 a 以上^[4]。

3.2 膜结构防火性能

目前,膜结构建(构)筑物相关的消防设计、施工安装和验收等方面尚无针对性的国家和行业标准,规范,膜结构建(构)筑物的消防验收制度尚不健全。

膜材的防火性能按照《建筑材料及制品燃烧性能分级:GB 8624—2012》的规定进行测试并确定等级。对于空气支承式膜结构储煤场常用的 PVC、PVDF 膜材,PVC 膜材以聚酯纤维为基材,涂敷聚氯乙烯树脂而成,该类材料为阻燃材料,熔后收缩但无滴落物,耐火等级 B1 级^[9]。为了解决 PVC 膜材的自洁性问题,通常在 PVC 涂层上再涂覆聚偏氟乙酸树脂(PVDF),加涂 PVDF 材料的 PVC 膜材具有极好的耐高温性能,离开明火后 0.3 s 内自熄^[3]。

通过 PVC 膜材燃烧实验^[10-11],膜材样品 260 ℃ 开始融化,膜材表面收缩拉紧变薄,365.5~437.6 ℃ 达到裂解燃烧临界温度,膜材开始燃烧,出现破洞现象并伴有黑烟,开放洞口的大小保持到火焰熄灭。实验过程中没有产生能形成二次引火源的熔滴。离开火源,膜材停止燃烧,熄灭火焰后,燃烧产物呈黏稠态。

通过燃烧实验,PVC 膜材具有阻燃性能,火源与膜材不直接接触,膜材不会发生燃烧,去除火源后,膜材能够快速自行熄灭,PVC 膜材具有良好的防火性能。针对空气支承式膜结构储煤场的特点和各种风险因素及可能发生的火灾事故,制定科学、合理、详实的应急防火措施,配合消防通风设施,能够严防储煤场火灾事故的发生,确保生命和财产安全。

3.3 膜结构防爆性能

煤炭堆场易起尘、自燃,封闭式储煤场的防爆性能至关重要,因此,煤场的粉尘和瓦斯的浓度控制十分关键。

由于储煤场内部为正压状态,煤场外部的自然风对煤堆无影响,储煤场粉尘主要是堆取料设备作业产生的扬尘以及充气风机送风引起的二次扬尘,堆取料设备作业时间段开启喷雾抑尘和通排风系统防止粉尘浓度超标。对于二次扬尘,储煤场充气风机送风口设置导风装置,风向避开煤堆方向,避免煤堆产生二次扬尘。针对充气风机送风量、风向,通过数值模拟分析,采用导风装置能有效防止二次扬尘,模拟结果显示煤堆表面风速为 0.2~0.4 m/s,小于煤堆静态粉尘起动风速,从而有效避免煤堆起尘^[12]。另外,膜材表面光滑且无任何结构件,煤尘无法沉积,配合喷雾抑尘系统,能够有效降低粉尘爆炸危险^[6]。

封闭式储煤场的瓦斯控制一般采用通风系统,将瓦斯有组织地排到外部环境。标准状态下,瓦斯密度为 0.716 kg/m³,小于空气密度 1.293 kg/m³,储煤场内的瓦斯会积聚在顶棚最高处。根据瓦斯聚集特点,储煤场顶部设置多个常开式排风口,利用储煤场的正压系统将瓦斯排出,同时在瓦斯聚集点设置监测和自动报警装置。当瓦斯浓度超过安全值自动报警,连锁通风系统转入事故状态运行,开启排风风机将瓦斯排出^[12]。

根据在线监测数据,堆取料设备作业时段,神华巴彦淖尔能源有限责任公司封闭式储煤场粉尘浓度 100~130 mg/m³,开启通排风系统和喷雾降尘设施,粉尘浓度降至 8 mg/m³,瓦斯浓度<0.1%^[5],封闭式储煤场的粉尘和瓦斯浓度低于《爆炸危险环境电力装置设计规范:GB 50058—2014》规定的限定值^[13]。

3.4 膜结构安全性能

空气支承式膜结构整体刚度小,属于大变形结构体系,其在风雪荷载作用下,结构变形较大,极端天气情况下变形量可达 1~2 m。同时,膜材容易被尖锐物体破坏,膜材破损后漏气会造成膜结构塌落或部分塌落。

针对空气支承式膜结构,进行了全尺寸膜材损伤塌落实验。实验基于封闭式膜结构的所有出入口全部打开,膜结构从正常运行的状态塌落至离地面 2 m 高度的时间约 10 h^[3],实验结果表明,膜结构塌落时间足够长以保证封闭式储煤场内部人员逃离事故现场,实验很好地验证了膜结构的安全性。

在实际运行过程中,若膜材出现局部损坏,储煤场 PLC 智能控制系统会自动调节送风量,进行大风量气压补偿,保证储煤场主体结构安全。另外,

空气支承式膜结构的自重仅为 $1 \sim 2 \text{ kg/m}^2$, 其极轻的自重保证了封闭式储煤场的安全, 即使出现塌落事故也不会对储煤场的生产设备造成破坏。

3.5 工程经济分析

以某发电厂 $2 \times 660 \text{ MW}$ 项目为例, 条形封闭式储煤场占地 $310 \text{ m} \times 120 \text{ m}$, 空气支承式膜结构封闭式储煤场投资概算 6 600 万元, 钢网架结构封闭式储煤场投资概算 10 200 万元。

空气支承式膜结构与钢网架结构的年费用比较情况, 见表 2。

表 2 空气支承式膜结构与钢网架结构的年费用比较表

结构	投资费用	运行费用	维护费用	总费用
空气支承式膜结构	220	24.8	98	342.8
钢网架结构	340	—	36	376

注: 2018年10月价格。

表 2 可知, 投资年费用按电厂设计寿命 30 a 分摊, 不考虑时间成本; 空气支承式膜结构采用 PVDF 膜材, 充气风机等设备的年运行电耗按 $96 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 厂用电电价 $0.258 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$, 年运行费用 24.8 万元计列; 膜材设计寿命 15 a, 钢网架设计寿命 30 a, 电厂寿命期内更换 1 次膜材, 费用 2 940 万元, 年费用分摊 98 万元, 网架结构每 7 年进行刷漆防腐维护, 电厂寿命期内维护 4 次, 费用 1 080 万元, 年费用分摊 36 万元。综上所述, 空气支承式膜结构储煤场具有环保性好、年费用低和施工工期短等优点, 通过技术和管理手段, 储煤场消防、防爆和安全性能满足工程要求。

4 空气支承式膜结构储煤场的工程应用实践

某发电厂建设 $2 \times 660 \text{ MW}$ 燃煤发电机组, 配套 1 座条形封闭式储煤场, 煤场宽度 109 m, 长度 300 m。经过研究、论证, 封闭式储煤场采用空气支承式膜结构, 膜材采用 PVDF, 膜结构长度 310 m, 宽度 120 m, 膜结构投影面积 $37\,200 \text{ m}^2$ 。

煤场配套防爆型电控消防炮灭火系统, 设置 28 套 PSKD30 型防爆型自动消防炮和 24 套防爆图像火灾探测器; 同时配套 20 套充气风机和 16 套排风设施, 维持膜结构内、外压差 $250 \sim 500 \text{ Pa}$ 的要求; 封闭式储煤场采用 AB 双回路供电, 并设 1 套保安电源。

封闭式储煤场工程采用 EPC 模式, 施工工期 70 d, 建设总费用 5 980 万元。2019 年 3 月, 封闭式储煤场施工安装完成, 同年 5 月储煤场投入使用。

通过工程实践, 空气支承式膜结构储煤场满足各项技术要求, 结果符合预期。

5 结论

1) 空气支承式膜结构具有抑尘效果好、自重轻、地质条件适应性好、透光性好、耐腐蚀、耐候性强、自洁性能好, 施工工期短且造价低等优点, 具备工程应用推广价值。

2) 空气支承式膜结构储煤场是新型环保型封闭结构形式, 尚无针对性的消防验收标准。空气支承式膜结构储煤场一般认定为环保防尘设施, 属构筑物的范畴, 建议消防验收采用专家评审方式进行。

3) 目前, 空气支承式膜结构储煤场仍处于研究与探索应用阶段, 储煤场的膜材投资成本较高且运行费用较大, 同时国产膜材在耐久、耐火、自洁、透光和隔热等方面性能与国外膜材存在一定差距。如何整合现有技术, 实现核心技术国产化, 降低建设和运营维护成本将是今后空气支承式膜结构储煤场技术研究的重点。

参考文献

- [1] 潘万伟. 大型露天储煤场全封闭改造设计选型分析[J]. 中国煤炭, 2018, 44(8): 158 - 162.
- [2] 中国工程建设标准化协会. 膜结构技术规程: CECS 158—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [3] 肖龙, 郭建斌, 肖亚成. 气承式充气膜煤棚的优点和应用前景[J]. 煤炭工程, 2012(10): 65 - 66.
- [4] 孙琳璘, 杨斌. 谈气膜建筑的应用与前景[J]. 山西建筑, 2016, 42(8): 20 - 21.
- [5] 周曼毅. 气膜式煤棚在火电厂贮煤场的应用[J]. 电力勘测设计, 2016(增 2): 268 - 272.
- [6] 许建军, 赵丽娟, 王艳生. 封闭储煤设施评述与对比[J]. 煤质技术, 2014(5): 40 - 44.
- [7] 袁伯文, 王兴兴, 汪春笋, 等. 全封闭气膜式储煤棚在神华巴彦淖尔能源有限责任公司选煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2014(4): 82 - 84.
- [8] 庞崇安. 膜材料、膜结构及膜结构工程[J]. 中国高新技术企业, 2009(16): 195 - 196.
- [9] 李阳, 张其林. 建筑膜材性能及试验研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(2): 53 - 56.
- [10] 周洋, 孙卓尔, 钱毓. 建筑膜材及气膜结构性能特点与应用现状[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(8): 96 - 99.
- [11] 张媛媛, 朱国庆, 韩如适. 气承膜建筑材料燃烧特性试验[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(4): 360 - 363.
- [12] 祝燕云, 赵保华, 王剑利, 等. 气膜储煤棚通风系统设计探讨[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 89 - 92.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 爆炸危险环境电力装置设计规范: GB 50058—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.