大跨度环保封闭料场的特点及应用

康兴东[1]，邱 实[1]，陈铁军[2]，王 帅[1]，冯 杨[1]
（1. 中冶东方工程技术有限公司，山东 青岛 266555；2. 武汉科技大学，湖北 武汉 430081）

摘 要：回顾了智能环保封闭料场的发展，重点介绍了大跨度环保封闭料棚的特点、投资及应用现状，以及BIM技术优势及在料棚设计和施工中的应用，在阐述大跨度环保封闭料棚实施效果的前提下，提出了其发展方向。未来大跨度料棚将成为建设主流，其中轻量化骨架膜结构解决方案将成为重点发展趋势。

关键词：料场；大跨度；环保；封闭；BIM技术
中图分类号：TF086 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2020)01－0050－05
doi：10.13403/j.sjqt.2020.01.010

Characteristics and application of large-span environmental enclosed material stockyard

Kang Xingdong[1], Qiu Shi[1], Chen Tiejun[2], Wang Shuai[1], Feng Yang[1]
(1. *MCC Beris Engineering and Research Corporation, Qingdao* 266555, *Shandong*; 2. *Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei*)

Abstract This paper reviews the development of intelligent environmental enclosed material stockyard, and the characteristics, investment and application status of large-span environmental enclosed material stockyard, as well as the advantages of BIM technology and its application in the design and construction of the material shed are introduced emphatically. Based on the description of implementation effect of the large-span enclosed material shed, its development direction is put forward. In the future, the large-span material stockyard will become the mainstream of construction, in which the solution of lightweight skeleton membrane structure will become the key development trend.

Key words material stockyard; large span; environmental protection; enclosure; BIM technology

随着国家大力提倡和推进绿色钢厂、智慧钢厂，建设现代化智能环保封闭料场已成为行业共识[1]。其中，大跨度环保封闭料棚成为其最大亮点[2]，也是露天料场环保封闭绿色升级的重大核心工程，其应用也随之飞跃式发展，相应料场的跨度连年实现较大突破。因此，大跨度环保封闭料棚取得空前快速发展，其对料棚大跨度关键技术提出了更高的要求，尤其是大跨度空间结构工程复杂性促使设计和施工技术必须不断创新。未来矿石港口、码头以及钢铁厂、电厂的露天堆场实施环保封闭也势在必行。本文从大跨度环保封闭料棚的分类、结构形式、投资、应用现状、实施效果等方面进行阐述，展望了大跨度环保封闭料场的发展方向并对BIM技术在大跨度环保封闭料棚设计施工中的应用进行了分析。

1 大跨度环保封闭料棚的特点

1.1 料棚分类及特点

考虑多种因素影响主次关系及环保、消防要求，大环保封闭料棚分类划分及特点见表1。

通常在工程设计中借鉴表1，结合用户需求及现场条件综合考虑选型。一般大跨度网壳围护材料推荐选择彩钢板，屋顶压型钢板厚度0.8 mm，墙面压型钢板厚度0.6 mm；也可选择膜材料，充气膜1.3 mm，张拉膜厚度1.1 mm；对腐蚀性严重的环境，由于其对耐酸耐碱的要

收稿日期：2019－05－28
作者简介：康兴东(1980—)，男，高级工程师，从事原料准备、环保及资源综合利用等方面设计与管理工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　大跨度环保封闭料棚分类及特点

分类依据	类别	特点	备注
人员参与情况	构筑物类封闭料棚	智能化程度高，无人或很少有人员参与现场生产	需考虑料棚室内温度、粉尘、照明、消防等因素，以及环保、人文、智慧工厂等要求，无人或很少有人员参与现场生产的智能化料场成为主流
	建筑物类封闭料棚	智能化程度低，生产区域均有人员参与现场生产	
工艺用途	储矿棚	火灾危险类别：丁戊类；耐火等级二级厂房	按《建筑设计防火规范》单层厂房考虑，每个防火分区允许最大建筑面积不限；也可按照火灾危险类别为戊类的单层仓库考虑
	储煤棚	火灾危险类别：丙类；耐火等级二级厂房	按《建筑设计防火规范》单层厂房考虑，每个防火分区最大建筑面积≤12 000 m^2
		火灾危险类别：丙类；耐火等级一级厂房	按《建筑设计防火规范》，单层厂房考虑，每个防火分区允许最大建筑面积不限
跨度	一般跨度封闭料棚	$L<60$ m，门式刚架结构	单跨门式刚架结构最大跨度≤65 m
	大跨度封闭料棚	60 m≤$L<120$ m，网壳结构、张弦桁架结构	网壳结构施工方便，张弦桁架结构施工难度大
	超大跨度封闭料棚	$L\geqslant120$ m，张弦桁架结构	施工难度大，优选滑移法
围护材料	彩钢板封闭料棚	以镀锌板和氟碳板为主	彩钢板无回收价值
	复合材料封闭料棚	耐酸耐碱材料	主要为铝镁锰板，具备较高回收价值
	膜结构封闭料棚	充气膜结构	靠室内不断充气，使室内外产生一定压力差（一般在 10～30 mm 水柱之间），使屋盖膜布受到一定的向上浮力，从而实现较大的跨度，不适合于大跨度及超大跨度料棚应用
		张拉膜结构	通过柱及钢架支承或钢索张拉成型，适合于大跨度及超大跨度料棚应用

求高，围护推荐选用铝镁锰板复合材料，厚度 0.9～1.0 mm；超大跨度推荐选择彩板，厚度 0.6～0.8 mm，或选用张拉膜结构，膜厚度 1.1～1.3 mm。

另外，随着膜材料技术的进展，截至目前已投入应用的一种张拉膜——NEUI-PE 轻量化骨架膜，属于一种性能优越的新型进口聚乙烯（PE）膜材：PE 膜材中间部分为高强度经纬线织物，双面涂覆抗腐蚀、阻燃材料，整体厚度约 0.5 mm；膜材透光率 10%，白天无需照明，自然采光，膜材对光的漫反射特性降低了夜间照明强度，节能效果较好；膜材不易积灰，有良好的自洁净功能；膜材热工性能良好，导热系数为 0.42 W/（m·K），有一定的温度自调节功能。该膜材对自然光的反射率达到 78.3%，对紫外线的阻挡率为 95% 以上，因此在北美地区的应用跨越了魁北克的高寒地带（飓风肆虐，冬季平均温度 −25 ℃，平均降雪 405 mm，当室外温度为 −25 ℃时，膜建筑室内为 −（12±2）℃）到加利福尼亚的炎热地区（室外为 37 ℃时，膜建筑室内为（25±2）℃），且使用寿命达到 20 a 以上。

1.2　料棚结构形式及特点

大跨度环保封闭料棚网架分为网壳结构、张弦桁架结构，超大跨度环保封闭料棚网架一般为张弦桁架结构；两者围护结构一般为彩钢板或膜结构。采用膜结构可以节省檩条钢结构，同时其质量较轻，网壳的用钢量也会降低，从而降低了基础的推力。但由于膜材较贵，因此对料棚造价影响较大。随着膜材料技术的进步，性能优异的新型进口 NEUI-PE 轻量化骨架膜的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应用，投资与传统彩钢板封闭建筑相比，可相应降低10%~15%。另外，随着使用环境耐酸碱要求的提高，部分料棚围护材料采用复合材料，如采用铝镁锰板材料(图1)。

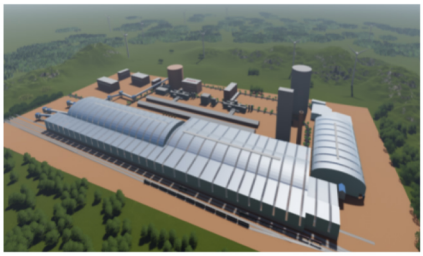


图1 铝镁锰板料棚围护材料封闭料场

此外，还有极少一些煤场采用充气膜料棚，其应用跨度在100 m以内，最大一般不超过150 m，仅在电力和煤炭行业有少量应用。如图2中的气膜煤棚，长149 m、宽110 m、高35.5 m，总封闭面积为16 390 m^2。该形式料棚虽然总投资相对较低，但在其周边需采用风机鼓风撑起充气膜以保持整体相对密闭状态，虽也有一定应用，但存在作业环境较差，运行费用高，料场内部不适合人员作业等问题。



图2 气膜煤仓

2 大跨度环保封闭料棚投资及应用现状

2.1 料棚投资

料棚造价取决于抗震设防烈度、风荷载、雪荷载、围护结构及自身的结构体系。相对而言，由于料棚采用钢结构，自重较轻，因此抗震设防烈度的影响在这几个因素中最小。由于一般料棚属于大跨度或超大跨度结构，这类结构对于风荷载尤为敏感，结构的基频与风荷载较接近，因此风导致的振动不容忽略。

跨度≤150 m的料棚，一般采用三心圆网壳结构。由于网架实现机械化加工和现场拼装性能，因此经济性比张弦结构优越。超大跨度(>150 m)网架结构，由于结构内应力大，构件尺寸大，螺栓球网架跨度适用性较差，无法完全选取到可匹配的螺栓球节点，因此采用网壳结构并不适合。虽然理论上可通过采用增加网架层数减少构件及螺栓球尺寸，但网架厚度相应增加，施工难度及投资相应增大。而由管桁架与拉索组合成的张弦结构通过科学合理地引入自平衡的预应力构件，可以充分发挥材料的力学性能，创建出在结构力学上高效、安全、经济、造型美观的现代建筑结构体系，最大跨度可达到250 m以上。

结合料场工程，不同跨度其不含基础及地基处理费用的造价估算指标见表2。

表2 环保封闭料棚造价估算

结构跨度/m	结构形式	网架用钢量/(kg·m^{-2})	造价/(元·m^{-2})	围护材料/(元·m^{-2})	檩条/(元·m^{-2})
60~90	网壳	28~45	800~1 000	100	90
90~120	网壳	40~65	950~1 200	100	90
120~150	网壳	45~75	1 200~1 450	110	90
150~180	张弦桁架结构	—	1 450~1 600	115	90
180~230	张弦桁架结构	—	1 600~2 000	120	90

注：表中网架用钢量基于围护结构为彩钢板；由于网架对风荷载敏感，应根据当地风压计算确定，表中仅为经验值；网架用钢量不含檩条及支托板，不含地基处理等。

2.2 料棚应用现状

随着环保要求的日益提高，露天煤场、矿石堆场以及其它各类散状物料堆场都将面临强制封闭棚化的改造，如果不采取有效治理措施，将面临被关停甚至被拆除的风险。在尽可能保持工艺流程和功能性的前提下，对露天料场实

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

施环保封闭迎来机遇期。截止目前，冶金企业 80% 的露天料场基本完成环保封闭，其中以条形环保封闭料棚应用为主，圆形环保封闭料棚相对应用较少[3-7]。

(1) 条形料场：网架最大跨度达到 226.8 m，如德龙钢铁建成最大跨度条形料场封闭储料棚，其也是世界最大跨度采用单体异形 PE 膜结构的封闭料场。该封闭料场南北向跨度为 226.8 m，东西向长度为 423.6 m，封闭面积达 87 400 m^2，相当于 2008 年采用膜结构的国家游泳中心——水立方面积的 2.8 倍(图 3)。图 4 为青钢建成的的跨度分别为 77、82、100 m 的三连跨封闭料棚，属行业内第一个三连跨封闭料棚[6,7]；安钢第二原料场建成业内第一个两连跨封闭料棚，跨度 212.5 m，直段高度达到 21 m，创行业之最(图 5)[8]；日钢控股焦化厂跨度为 198 m 的煤棚，属于行业内少有的超大跨度煤棚之一；图 6 是山东铁雄新沙能源集团有限公司建成的行业内最大封闭煤棚，其封闭面积 103 000 m^2，最大跨度 143.5 m。

(2) 圆形料场：网架最大直径达到 141 m，如新疆八钢建成最大跨度圆形料场封闭储料棚，共 8 座，每座网架直径 141 m，网壳高度 50 m，支承面高19 m，顶高69 m，栈桥穿过网架将原料输送到棚内堆放。每座最大储料容量 20 万 t，是亚洲圆形料场单体直径最大的储料棚(图 7)。



图 3　最大跨度条形料场封闭储料棚



图 4　青钢三连跨封闭料棚



图 5　安钢两连跨封闭料棚

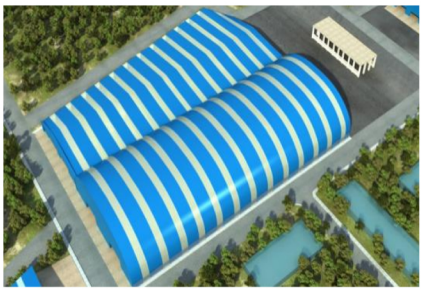


图 6　行业内最大封闭煤棚



图 7　大跨度圆形封闭储料棚

3　BIM 技术及其在料棚设计施工中的应用

BIM 技术作为国家建筑信息化推广的重点，具有可视化、协调性、模拟性、优化性、造价精确与可控性等优势[9]，随着其协同应用价值的发挥，其功能应用、项目级应用及企业级应用在大跨度环保封闭料棚设计、施工、项目管理，甚至后续生产维保等全过程中得到应用，具有广阔应用空间。主要体现在以下 6 个方面。

(1) 设计深化及图纸审核：结合 BIM 三维建模过程进行设计、校核和深化；对工艺、建筑、结构、机电等各专业图纸进行碰撞审核，从而在施工前解决图纸的错漏问题；进行管线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

综合设计，保证精准的管线综合布置；再结合三维碰撞检查，实现零碰撞(图 8)。

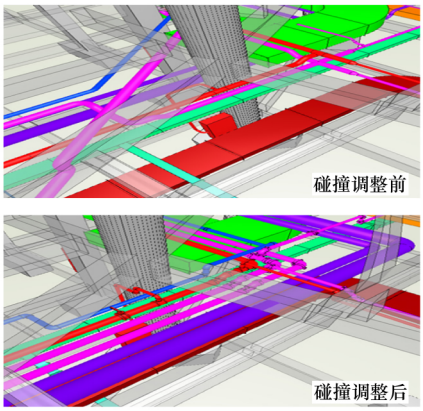


图 8 设计及图审阶段管线综合

(2) 制定施工策划及总平面布置：在施工前，通过 BIM 技术进行三维现场综合平面布置，三维模型结合施工现场实际尺寸，立体展现施工现场布置情况，合理进行施工平面布置和施工交通组织，避免现场混乱；同时为高空安全吊装提供数据。图 9 为结构阶段施工平面布置。



图 9 结构阶段施工平面布置

(3) 施工进度管理：结合 BIM 在模型量化的基础上，将三维模型与施工进度计划连接，将空间信息与时间信息反映到模型中，实现对施工进度计划的管控；管理人员可通过划分已完成工程量，输出施工进度，进行实际施工进度与计划施工进度的对比；可以直接对现场进度情况进行分析诊断，更直观、可视、清晰，改变了传统的施工进度管理模式，确保了进度计划的合理和可行。

(4) 数字化加工应用：利用 BIM 模型的各项数据信息，对安装构件快速放样，实现工厂预制，将模型应用到现场放线控制中，满足施工精度要求；通过模型与现场实物对比，采用数字化验收，实现施工质量的事后控制。

(5) 装配式结构应用：装配式结构结合 BIM 技术，安装方便快捷；基于模块化设计，结构体系现场安装可完全实现装配式施工，这种“搭积木”式的施工安装方式，结合 BIM 技术模拟整个施工过程，可科学合理安排施工进度和调度施工作业，大大缩短了施工周期。

(6) 在项目管理中的应用：通过 BIM 的建模(包括模型维护)、实施、战略规划，在项目管理中主要应用在冲突检测、进度管理、成本管理、质量管理、变更和索赔管理、安全管理、供应链管理及运营维护管理等方面。

4 结语与展望

实施料棚大跨度环保封闭，主要效益体现在：解决露天贮料场粉尘无组织排放问题，避免雨水和大风造成的物料流失，区域扬尘减少 95% 以上。另外，还可减少料堆表面洒水量 80% 以上，有效降低由粉尘引起的空气、水资源和土壤污染 95% 以上。其能有效地改善周围环境，区域颗粒污染物排放 $<10\ mg/m^3$，年节约物料量达到料场储运总量的 0.5%～1%，总体实现环保达标，经济价值可观。

结合国家环保政策及国内外发展现状，以及冶金企业建设规模的合理性和经济性，千万吨级钢铁企业所对应的料场，单个封闭料棚长度通常不大于 800 m，跨度不大于 200 m，且 80% 已完成环保封闭，今后需全部按照环保封闭模式建设。目前，随着港口、码头矿石堆场，以及矿业、煤炭堆场等逐步纳入环保封闭范围，大跨度环保封闭技术前景广阔。此外，比较而言，类似跨度 200 m 左右封闭料棚关键技术，完全可应用于民建、市政等大跨度设施，如各类大型体育场馆、影剧院、博物馆、展览馆等，市场前景乐观。

参考文献

[1] 陈明. 智能化系统在钢铁企业原料场中的应用研究[J]. 工程技术研究,2019,4(1):6-8.

(下转第 72 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

至41.94 mg/m^3，阻力由275 Pa增大为283 Pa。通过实验结果可以发现，粒径为30 mm、表观密度为0.224 g/cm^{3}的空心小球作为除雾介质，在流化风速为5.7～7.5 m/s时，具有良好的除雾性能。分析其原因，主要是由于除雾介质粒径越小，除雾介质在堆积状态下空隙率越小，而当流化风速一定时即风量一定，空隙率越小，其空隙内的风速越大，导致除雾介质运动更加剧烈甚至不稳定，并且由于除雾器壳体采用特殊的变径设计，粒径较小时，其侧壁的除雾介质运动效果较差，进一步导致中心区域风量变大，因此除雾介质粒径越小，除雾效果较差甚至完全无法满足除雾需要。另外，由于空隙间风速过大导致除雾介质捕集的雾滴无法及时排出而出现液泛现象，在空隙之间积液，导致部分雾滴被气流“二次夹带”，造成除雾效率下降。

4 结 论

(1) 流化除雾器除雾机理主要是惯性碰撞和拦截效应。

(2) 对不同粒径、堆积厚度及表观密度的除雾介质在不同进口雾滴质量浓度和不同流化风速情况下的除雾性能综合分析表明：流化除雾器排放质量浓度随着流化风速和进口雾滴质量浓度的增大而增大，随着除雾介质粒径和表观密度的增大而降低。此外，除雾介质宜选用粒径大于20 mm的空心小球，且选用粒径为25 mm除雾介质时其表观密度应大于0.235 g/cm^3。

(3) 当除雾介质粒径为30 mm，堆积厚度为16 cm，进口雾滴质量浓度为90 g/m^3，流化风速由5.7 m/s增大至7.5 m/s时，排放质量浓度由4.17 mg/m^{3}增大至41.94 mg/m^3，除雾效率均高达99.95%以上，阻力均在210 Pa左右，表明流化除雾器具有高效、低阻的优点，同时由于除雾介质处于流化状态，相互摩擦碰撞有利于去除表面污染物，从而具备自清洗功能，不易发生因除雾介质表面不洁净而发生粘结导致除雾器堵塞现象。且流化除雾器结构简单，运行可靠，成本低，因此具有广阔的工业应用前景。

参考文献

[1] 张兴胜，张军红，何志军，等. 熔剂添加对烧结过程中有害气体排放规律影响的研究[J]. 烧结球团，2012，37(6)：66－69.

[2] 郝素菊，乐天勤，蒋武锋，等. 烧结固硫的热力学研究[J]. 烧结球团，2009，34(2)：1－4.

[3] 朱凯，袁竹林. 一种涡流除雾器的实验与数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2018，49(1)：22－30.

[4] 张长伟. 湿法FGD装置除雾器塌陷原因分析与处理[J]. 电力科学与技术学报，2008，23(4)：93－96.

[5] 李壮，胡妲，朱跃. 双塔双循环脱硫除雾器故障分析及对策研究[J]. 中国电力，2019，52(2)：177－182.

[6] 陆文峰. 纤维栅除雾效果实验研究[D]. 沈阳：东北大学，2014.

[7] 蒯继玺. 脱硫塔高效除雾技术的研究[D]. 北京：华北电力大学，2014.

[8] Banitabaei S A，Rahimzadeh H，Rafee R. Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave－plate mist eliminator[J]. Asia－Pacific Journal of Chemical Engineering，2012，7(4)：590－597.

[9] 兰茂森. 如何选好用好纤维除雾器[J]. 硫酸工业，2004(1)：45－47.

[10] 孔庆森. 折流板除雾器力学性能研究[D]. 天津：天津大学，2013.

(上接第54页)

[2] 康兴东，王东. 现代综合原料场新技术应用实践[J]. 烧结球团，2017，42(4)：57－61.

[3] 仇晓磊. 宝钢原料场降低降尘量的生产实践[J]. 内蒙古煤炭经济，2018(7)：44－46.

[4] 陶伟平. 宝钢环保封闭料场选型及特点分析[J]. 环境与发展，2018，30(4)：258－259.

[5] 康兴东，邱实，朱佳星. 山钢综合原料场功能设计及特点[J]. 烧结球团，2019，44(4)：50－55.

[6] 崔永新，康兴东，朱佳星. 综合原料场环保节能技术应用探讨[J]. 工程建设，2017，49(6)：92－94.

[7] 陈铁军，周仙霖，罗艳红，等. 现代烧结造块理论与工艺[M]. 北京：冶金工业出版社，2018：149－153.

[8] 康兴东，邱实，郭鹏. 智能环保原料场设计[J]. 工程建设，2019，51(6)：4－6.

[9] 林逸，汪杰，但伟. 应用BIM技术实现大跨度原料大棚的设计施工一体化[J]. 钢结构，2017，32(224)：113－117.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net