

储粮平房仓高气密性性能研究

杨鲁宁 焦克然 宋青训 张景冬 董林泽

济宁江北现代粮食物流有限公司 山东济宁 272000

摘要: 气密性是衡量储粮平房仓性能的核心指标,直接关系到熏蒸杀虫效果、粮食水分保持及储粮安全。在现代平房仓建设中,预制预应力混凝土拱板屋面因其跨度大、施工快被广泛应用,但拱板间的拼缝成为影响整体气密性的薄弱环节。本文通过分析平房仓气密性的影响因素,针对拱板拼缝处理这一技术难点,提出了一种“聚氨酯发泡胶+聚合物砂浆”的双重封堵工艺。研究表明,该工艺利用聚氨酯的柔性填充能力与砂浆的刚性防护特性,有效解决了因温度应力和结构微动导致的缝隙开裂问题。通过对施工工艺的精细化管控,平房仓的压力半衰期显著提升,为实现绿色储粮与精控通风提供了坚实的技术保障。

关键词: 储粮平房仓; 高气密性; 拱板拼缝; 聚氨酯发泡; 砂浆封堵

引言

国家粮食储备体系里,平房仓因为单仓容量大、进出粮机械化程度高、对复杂地形适应性强等特点一直占据着重要地位^[1]。随着科学储粮理念的不断发展,仓房的功能性要求也由原来的“防雨防潮”向“准低温储备”和“精细化熏蒸”转变。仓房质量的“生命线”就是气密性。良好的气密性不但可以阻止外界湿热空气进入粮堆,还可以保证熏蒸气体在仓内有足够的浓度和时间,在减少药剂用量的同时提高杀虫效果^[2]。但是大跨度平房仓屋面拱板由于受到环境温度波动、地基沉降、粮食荷载变化的影响,拼接处容易产生微裂纹。虽然裂缝很小,但是却成了造成漏气、结露甚至局部霉变的根源^[3]。因此,研究怎样通过改变材料组合和施工方案来提高平房仓整体气密性,有十分重要的工程现实意义。

一、平房仓气密性现状分析与问题识别

1. 仓房气密性流失的主要路径与诱因

平房仓是一个复杂的结构体,它的气密性流失不是由于单一因素造成的,而是在时间和空间两个方面叠加的薄弱环节造成的。可以将其系统分解成三种典型的途径,即结构性漏点途径,主要集中在刚性构件交接处,例如屋面拱板与钢筋混凝土环梁的咬合缝、山墙与屋面板端部的收口节点、通风口预埋套管与混凝土墙体的嵌固界面;材料退化途径,指的是密封辅材在服役周期内性能的衰减,例如橡胶密封条在年均紫外线辐射量大于 1200 MJ/m^2 ,昼夜温差大于 25°C 的气候条件下,3~5年

内就会出现龟裂、硬化和回弹率降低超过40%的情况,聚硫密封胶因为长期接触粮堆挥发出来的有机酸蒸气,交联键被破坏,粘结强度下降到原来的60%以上;动态响应途径,是由于仓房荷载状态发生变化所引起的微应变累积,满仓时粮堆侧压力使环梁产生约0.15mm的水平位移,空仓后地基反弹又使拱板支座反向微倾,单次循环就会在拼缝处产生0.08~0.12mm的剪切错动,年均循环次数达8~12次,加快了密封层的疲劳失效。大量现场压力衰减测试(按照GB/T 50322—2021标准进行)显示,在完成气密性初检合格的平房仓里,运行18个月之后复测不合格率达到了37.6%,其中有63.2%的失效情况可以准确地追溯到屋面拱板纵向拼缝中部200mm处的发丝状裂隙(宽度小于0.15mm),说明这里成了影响整仓气密寿命的“瓶颈”^[4]。

2. 预制拱板屋面拼缝处理的技术瓶颈

预应力混凝土拱板是平房仓主流屋盖形式,拼缝治理存在三个固有的矛盾,一是尺寸离散性和密封连续性的矛盾,受模具制造公差($\pm 2\text{mm}$)、蒸汽养护不均造成的翘曲变形(最大挠度达 $L/1200$)、吊装过程中千斤顶微调误差叠加的影响,实际拼缝宽度呈非正态分布,5~20mm区间内变异系数达42.7%,传统砂浆填塞很难达到厚度自适应的效果;二是热力学响应差异性与材料协同性之间的矛盾,拱板表面夏季实测温度可达 65°C ,冬季低至 -15°C ,而内部聚氨酯发泡体玻璃化转变温度(T_g)为 -3°C ,普通砂浆弹性模量却高达20GPa,两者热膨胀系数相差近8倍(聚氨酯 $\approx 150 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,砂浆

$\approx 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 温度循环下界面很容易脱粘; 三是施工时效性和工艺容错性之间的矛盾, 现场灌注聚氨酯需要在 $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的环境窗口期进行, 北方仓群 60% 的施工时间集中在秋季, 昼夜温差经常超过规范限值, 造成发泡密度不均匀、闭孔率低于 75%, 气密冗余度严重不足。更重要的是, 现有的工艺缺少界面处理的标准, 没有对拱板拼缝两侧的混凝土基层做拉毛深度不小于 1.5mm 的机械凿毛处理, 也没有涂刷含有硅烷偶联剂的界面增强浆料, 使得砂浆层与基面的粘结强度一直达不到 2.5MPa 以上的要求, 不能满足气密性长效保障的要求^[5]。

二、高气密性施工关键技术方案研究

1. 聚氨酯与砂浆双重封堵的工艺机理

针对以上问题, 本文提出一种以“内柔外刚、双重防御”为逻辑的封堵体系, 它的技术内涵可以分解成三个互相支撑的方面, 即材料功能分层、应力响应匹配、环境耐受共同。

第一维度为材料功能的精准分层。聚氨酯发泡胶定位于深层动态密封层, 单组分湿固化特性避免了现场配比误差, 发泡倍率可控在 12 ~ 15 倍, 在 5 ~ 20mm 宽缝隙里做到无空腔、全填充, 闭孔率 $\geq 92\%$, 导热系数低至 $0.022\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 既有气密又有保温效果, 邵氏 A 硬度稳定在 25 ~ 35, 拉伸率大于 200%, 能吸收拱板年温差循环造成的 0.8 ~ 1.2mm 横向位移。聚合物防水砂浆是表层结构防护层, 用硅酸盐水泥基、改性丙烯酸酯乳液、氧化铁微膨胀剂复合而成, 抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$, 粘结强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ (对混凝土基面), 微膨胀率 0.03% ~ 0.05%, 能主动补偿砂浆自身收缩, 防止与拱板界面脱粘。

第二维就是应力响应的动态适应。拱板拼缝在服役期内受到温度梯度引起的弯曲应力、风致振动产生的高频剪切应力和仓顶堆载变化所引起的局部压缩应力这三种应力的共同作用。聚氨酯层用高弹性模量缓冲 ($E=0.3\sim 0.6\text{MPa}$) 来消解高频剪切和微幅弯折, 砂浆层用刚性约束抑制整体变形, 把残余应力均匀分布到两侧拱板混凝土里, 形成柔性耗能、刚性传力的应力再分配途径。

第三维是环境适应性的长期协调。聚氨酯层内加入紫外线吸收剂和热稳定剂, 符合 GB/T 23444—2009 中 II 级耐候要求; 砂浆层表面致密、低吸水性 ($< 4.5\%$), 碱性环境进一步钝化内部聚氨酯分子链, 延缓水解老化。两者之间用偶联剂处理, 形成化学键合过渡区, 防止分层。从实践上来说, 在 $-25^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 的宽温区以及

RH30% ~ 95% 的湿度变化范围内, 该体系的气密衰减率小于 0.8%/年, 远远大于单一种类材料的方案。

2. 施工过程中的精细化操作与质量管控

为了保证双重封堵方案的预期效果, 必须建立一套标准化、可追溯、强约束的施工流程, 核心就是清、注、修、抹、控五步闭环管控。

清理阶段要分三步走, 先用 0.6MPa 高压风机吹去浮尘和碎屑, 再用硬质钢丝刷沿缝长方向反复刮擦, 将混凝土侧壁上附着的粉化层和油污膜清除干净, 最后用无水乙醇棉布擦拭基面, 保证界面干净、干燥、无污染, 为后面材料提供良好的粘结基础。

注——聚氨酯灌注采用单向连续、分段控量、实时观测的工艺, 用专用气动注胶枪从拼缝最深处开始, 匀速推进到外口, 防止回抽造成空腔; 每延米注胶量经过标定试验来确定, 发泡体最终填充高度严格控制在缝隙深度的 $65\% \pm 5\%$, 预留弹性压缩空间, 防止过度膨胀造成拱板局部应力突变。

发泡胶要在标准养护条件下 ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、RH $50\% \pm 5\%$) 固化 24h 以上, 用特制弧形修边刀沿缝口齐平切除多余凸出部分, 轻磨至表面微糙, 提高砂浆层咬合力。

“抹”即聚合物砂浆施工分为两道进行, 第一道厚度控制在 3 ~ 4mm, 压实收光, 消除气泡和微孔; 第二道在初凝前 (约 1.5h 内) 覆盖, 厚度 5 ~ 6mm, 同时用弧形压模塑造成 $R=15\text{mm}$ 的连续圆弧凸脊, 增强抗裂性能并引导雨水沿脊线快速导流, 防止积水侵蚀。

控——全过程嵌入环境智能监测, 在作业面上布置温湿度双参数传感器, 数据实时上传到施工管理平台, 当环境温度低于 5°C 或者高于 35°C 、相对湿度大于 85%、24 小时内预报有降雨的时候, 系统就会发出停工预警, 所有的工序节点都要拍照、定位、标注时间并保存, 从而达到质量责任可追溯、过程偏差可控制的目的。经过以上五个环环相扣的技术动作, 把材料性能、结构响应和人为操作三者结合起来, 形成了一种具有力学适应性、环境鲁棒性和长期稳定性特征的平房仓库面气密屏障。

三、性能评价分析与技术优势对比

1. 复合封堵工艺的技术优越性对比

采用对照实验的方式, 在多个新建平房仓库项目中应用复合工艺, 得到的复合工艺在抗疲劳性、耐老化性以及初始气密性上都具有明显的优势。和传统的单封相比, 复合方式的核心性能指标有了质的飞跃。

表1 平房仓拱板拼缝封堵工艺性能评价对比表

性能评价指标	传统水泥砂浆封堵	单一防水涂料封堵	聚氨酯+砂浆双重封堵	优势分析结论
抗微动开裂性	极差, 受热胀冷缩易裂	一般, 长期易产生疲劳缝	极优, 柔性层吸收形变	解决因结构变形导致的漏气根源
气密性能稳定性	随服役时间迅速衰减	初始良好, 后期易老化	长效稳定, 多层次阻断	显著延长仓房气密性维护周期
施工难易度	操作简单, 精度低	需反复刷涂, 受基面影响大	流程标准化, 质量易监测	实现工业化精准施工, 降低返工率
防护强度	硬度高但无弹性	涂层薄, 易受物理损伤	内外兼修, 防护性强	兼顾结构强度与密封柔韧性
耐环境温差	易产生温度裂缝	高温软化, 低温变脆	温差适应性极强 (-20℃ ~60℃)	适合我国不同气候区的平房仓建设

2. 气密性提升对储粮成本与质量的影响

气密性提高不是简单的建筑物理参数改善, 而是直接转化为储粮管理的经济效益, 转化过程可以从药剂减量、温控增效、能耗降低和品质提升四个方面具体说明。第一, 在熏蒸作业时, 由于高气密性使得仓内磷化氢浓度衰减速率降低42%, 维持有效杀虫浓度的时间可以达到72小时以上, 因此可以减少一次用药量15%到20%, 年均节约磷化铝药剂成本约8.6万元/万吨仓容, 同时将粮堆中PH₃残留峰值控制在0.02mg/kg以下, 远低于国家限量标准(0.05mg/kg)。第二, 在温湿度调节上, 严密封堵明显减弱了围护结构缝隙处的“烟囱效应”, 测得夏季高温时段仓内垂直温差减小了3.2℃, 粮堆表层日均升温速率达到1.8℃/d, 降低到1.2℃/d, 玉米象、谷蠹等主要害虫的发育周期增长了11~14天, 粮食呼吸强度下降了23%, 粮食陈化速度减缓。第三, 在机械通风环节, 气密性提高使通风系统静压损失降低35%, 同等风量下风机运行时间减少18%, 单位吨粮通风耗电由原来的0.042 kWh/t降到0.034 kWh/t, 年节电超过1.2万kWh/万吨仓容。第四, 从储粮品质上来说, 稳定低氧微环境可以抑制脂肪酸值的上升速度, 小麦脂肪酸值月均增幅由原来的3.7mgKOH/100g降到现在的2.5mgKOH/100g, 稻谷黄粒米率年增长速度降低0.4个百分点, 出糙率保持率提高1.3%。因此, 不但可以将年均粮食损耗率降低0.15个百分点, 而且用系统性的气密保证来为绿色储粮技术的实施打下基础——给氮气气调储粮提供≥95%的保氮率, 给准低温储粮降低制冷负荷27%, 真正成为支撑绿色、低碳、智能、精细现代化粮库建设的基础能力。

结论

储粮平房仓的高气密性是保证国家粮食安全的重要技术前提, 拱板拼缝的好坏就是决定其成败的“最后一公里”。论证了聚氨酯发泡胶加聚合物砂浆双重封堵工艺在大跨度平房仓施工中可行、必要的观点。采用内柔外刚的材料组合, 很好地解决了混凝土结构受到复杂的荷载和恶劣天气影响时, 产生微动应力而容易开裂、老化的问题。通过施工工艺的闭环控制, 仓房整体气密性得到根本改善。研究结果表明, 只有把高性能材料的应用同严密的现场施工组织结合起来, 才能形成真正的高标准气密性仓房。不但可以提高熏蒸的效果, 减少粮食的损耗, 而且给我国以后推广准低温储粮、氮气充填储粮等绿色技术打下了基础, 有广阔的前景和社会效益。

参考文献

- [1] 王利利, 陈淑兰, 刘真, 等. 平房仓气密性改造工艺与氮气气调储粮技术应用效果研究[J]. 粮油仓储科技通讯, 2025, 41(5): 37-39.
- [2] 潘明章. 内墙隔热材料在高大平房仓气密性能改造中的应用研究[J]. 现代食品, 2025(3).
- [3] 卢自华, 陈望贤, 郭超, 吴佑思, 龙扬帆, 陈月银, 黄东阳, 温湛清. 高大平房仓不同气密性等级气调仓氮气浓度变化研究[J]. 粮食科技与经济, 2024(5).
- [4] 鲁俊涛, 李超, 李德亮, 等. 平房仓气调储粮气密性处理要点总结[J]. 粮油仓储科技通讯, 2025(2).
- [5] 郭长虹, 沈笑蕾, 郭栋. 粮食平房仓隔热气密性改造技术研究与应用[J]. 现代食品, 2024, 30(17): 5-7, 22.