烟草仓储建筑屋顶光伏改造的防水与承重适配研究

庄海军　夏昕睿　曾　凡

湖南中烟工业有限责任公司常德卷烟厂　湖南　常德　415000

摘　要：烟草仓储建筑具有大跨度、大面积、高防火等级及恒温恒湿要求等特殊属性，屋顶光伏改造面临防水层破坏与结构超载双重风险。本文在分析烟草仓库建筑特征与光伏改造适配需求的基础上，梳理了屋顶光伏安装对防水体系和承重体系的影响机理，探讨了支架基础与防水层界面处理、轻质化组件选型与结构验算方法，以及施工期防火安全管控等关键技术。研究表明，采用化学锚栓与预埋件相结合的固定方式、设置卷材穿出节点密封构造、选用轻质高效组件，可在不破坏防水功能和不超出承载限值的前提下实现光伏系统有效安装，为同类工业建筑改造提供参考。

关键词：烟草仓储；屋顶光伏；防水适配；承重验算；工业建筑改造

引言：烟草仓储建筑具备单层大跨度、屋面面积广阔、用电负荷稳定的特点，适宜建设分布式光伏。在“双碳”目标驱动下，利用仓库屋顶建设光伏已成为烟草行业节能减排的重要举措。然而，该类建筑对室内温湿度有严格管控要求，屋面防水等级高、结构荷载预留有限，支架基础施工易刺穿防水层，组件及支架增加的荷载可能超出原设计承载力，一旦渗漏或结构损伤将直接威胁烟叶质量安全。当前针对烟草类特殊工业建筑光伏改造的防水与承重适配研究尚不充分，缺乏系统性技术方案。本文聚焦上述矛盾，从防水保护与结构安全两个维度开展适配研究，以期为同类改造提供技术支撑。

1 烟草仓储建筑特征与光伏改造适配需求分析

1.1 烟草仓储建筑的结构与功能特征

烟草仓储建筑在设计和使用上具有区别于一般工业厂房的显著特征。结构方面，为满足烟叶堆码和机械化作业的空间需求，仓库通常采用大跨度门式刚架或排架结构，单层高度在 8—12 米之间，单栋建筑面积可达数千至数万平方米，屋面多为压型钢板或钢筋混凝土现浇板。功能方面，烟叶醇化仓库对温湿度有严格要求——温度控制在 20—35℃、相对湿度 60%—70%，这一环境参数需靠空调系统全年连续运行维持，用电负荷稳定且集中在白天生产时段，与光伏发电的出力曲线高度吻合。防护方面，烟草属于易燃物资，仓库防火等级为一级或二级，屋面保温层和防水层材料均须满足相应防火要求，改造施工中对动火作业有严格限制。上述特征决定了光伏改造既要充分利用大面积屋面的资源优势，又必须严格规避对原有功能体系的损伤[1]。

1.2 光伏改造对屋面的基本要求

分布式光伏电站对既有建筑屋面的基本要求涵盖三个方面。一是面积与朝向，光伏组件需布置在无遮挡、朝向合理的屋面区域，烟草仓库大面积平整屋面完全满足这一条件。二是结构承载力，光伏系统（含组件、支架、电缆及安装附件）增加的荷载通常为 0.15—0.35kN/m²，设计阶段需逐一校核原结构各受力构件的承载能力。三是防水完整性，光伏支架基础施工不可避免地在屋面进行钻孔、植筋或锚固作业，这些操作对原有防水层构成直接威胁，若处理不当将形成贯穿性渗漏通道。对于烟叶仓库而言，一旦屋面渗漏，湿气侵入将导致烟叶霉变，造成的经济损失远超光伏发电收益，因此防水安全是改造决策的首要约束条件。

1.3 防水与承重两类矛盾的关联机制

防水与承重问题在光伏改造中并非孤立存在，而是通过“支架基础”这一界面相互关联。支架基础需要与屋面结构形成可靠连接以抵抗风荷载，但连接节点的设置方式直接决定防水层是否被破坏——穿透式连接（如化学锚栓植筋）须贯穿防水层和结构层，若密封处理不到位即形成渗漏通道；非穿透式连接（如配重基础）虽不破坏防水层，但显著增加屋面荷载，大跨度轻钢结构往往难以承受。这一矛盾要求改造方案必须在两者之间寻求精准平衡，即通过构造措施将防水破坏控制在可修复范围内，同时将荷载增量控制在结构冗余度以内。两类矛盾的协同解决是实现光伏改造安全落地的技术核心。

2 光伏支架基础与屋面防水体系的适配技术

2.1 既有屋面防水体系现状评估

实施光伏改造前，必须对既有屋面防水体系进行全面检测评估，这是确定适配方案的基础。评估内容包括

防水层类型及完好性（沥青卷材、高分子卷材或涂料型防水层）、保温层含水率（含水率过高将影响锚固力且增加荷载）、屋面坡度与排水路径（确保光伏布置不影响雨水排放）、现有渗漏历史记录及修补情况。检测方法可采用红外热成像技术对屋面进行全覆盖扫描，识别含水率和粘结空鼓区域，配合现场取样进行剥离强度验证和厚度测量。对于防水层已接近设计使用年限或存在大面积空鼓、开裂的屋面，不宜直接进行光伏改造，应先实施屋面翻新再做光伏安装，或采用不破坏防水层的压载式支架方案。

2.2 支架基础选型对防水层的影响比较

光伏支架基础主要有三种形式，其对防水层的影响各异，选型时需结合屋面结构类型和防水层现状综合判断。穿透式基础采用化学锚栓或膨胀螺栓将支架直接锚固于屋面结构层，连接可靠、抗风能力强，适用于风荷载较大区域，但须穿透防水层及保温层，每个锚固点都是一个潜在的渗漏隐患点，需逐个进行精细密封处理，施工质量要求极高且后期维护难度较大。压载式基础利用混凝土块或预制压重件将支架固定在屋面表面，完全不破坏防水层，施工简便快捷，对原有防水体系零损伤，但自重较大，对结构承载力要求高，且在大风区存在倾覆和滑移风险，需进行抗滑移和抗倾覆验算[2]。复合式基础在穿透锚固的基础上增加防水盖片和密封胶双重防护，并在锚固点周围设置排水坡度，综合了两者的优点但成本较高，是安全性较高的折中方案。对于烟草仓库，推荐优先采用复合式基础方案，在控制锚固点数量的前提下确保防水密封的可靠性，实现安全与经济的统一。

2.3 防水层穿越节点的密封构造设计

穿越节点的密封构造是防水适配技术的核心环节，其设计质量直接决定光伏改造后屋面防水体系的完整性和长期耐久性。标准的穿透式节点构造应由内向外依次设置：结构层钻孔内壁涂刷界面剂并灌注专用植筋胶，确保锚栓与结构之间的水密性，同时提高锚固力；锚栓穿出部位安装防水密封套筒，套筒底部与防水层搭接宽度不小于 100mm，采用热风焊接或专用胶粘剂固定，确保搭接处无气泡和空隙；套筒顶部设置不锈钢压盖，与锚栓之间填充耐候密封胶，形成三级密封屏障。具体施工中还应考虑以下要点：锚固点位置应避开原有卷材搭接缝和已修补区域，锚固点间距不小于 500mm，避免过度集中破坏防水层；每个锚固点施工完成后应进行 24 小时局部蓄水试验，确认无渗漏后方可进入下一工序；在锚固点周围增设排水坡度，避免积水长期浸泡密封节点。对于高分子防水卷材屋面，宜采用预制防水套件——在工厂预制成型的带法兰盘密封套件，现场只需将套件焊接于大面卷材上，可大幅降低现场施工质量风险，确保密封效果的稳定性和一致性。

3 光伏系统荷载特性与仓储结构承重验算

3.1 光伏系统附加荷载的组成与分布

光伏系统施加于屋面结构的荷载主要包括组件自重、支架自重、电缆及桥架自重、风荷载和雪荷载。组件自重与所选光伏板类型直接相关——单晶硅组件常规重量为 0.12—0.18kN/m²（约 12—18kg/m²），薄膜组件可轻至 0.06—0.10kN/m²。支架及连接件自重约 0.03—0.08kN/m²。风荷载是控制性荷载，根据《建筑结构荷载规范》（GB50009），基本风压取值须考虑当地 50 年一遇基本风压乘以高度系数和体型系数，光伏阵列的体型系数因倾角和布置方式而异，通常取 1.2—1.5。雪荷载按当地基本雪压乘以积雪分布系数确定。总附加荷载通常在 0.30—0.55kN/m² 之间，约为不上人屋面活荷载（0.5kN/m²）的 60%—110%。这一量级的荷载增量对于大多数钢筋混凝土结构仓库尚在可承受范围内，但对于大跨度轻钢结构仓库则可能接近甚至超过设计冗余度。

3.2 既有结构承载力的验算方法

对既有仓库屋面进行承载力的精准验算是决策是否可实施光伏改造的科学依据。验算应遵循以下步骤：第一步，收集原结构设计图纸，查明屋面结构形式、构件截面尺寸、材料强度等级和原设计荷载取值，重点核实原设计是否预留了附加荷载（部分工业建筑在设计时已考虑屋面设备荷载，这一冗余度可被光伏改造利用）。第二步，根据现场检测结果确定实际材料强度和构件有效截面，对钢结构还应检测涂层厚度和锈蚀程度，混凝土结构应检测碳化深度和钢筋保护层厚度，据此修正计算参数[3]。第三步，按照现行规范重新核算主要受力构件（钢梁/钢架、檩条、连接节点）在新增荷载组合下的内力响应和变形，承载力校核指标包括强度应力比和稳定应力比是否大于 1.0、挠度是否超出允许值。对于不满足验算要求的构件，应优先考虑通过结构加固（如增大截面、粘贴钢板、增设支撑）提升承载力，或通过优化光伏布置减少荷载增量。

3.3 轻质化组件选型与减荷策略

在结构承载力有限的情况下，通过组件选型和布局优化减少荷载增量是解决问题的有效路径。组件选型方面，轻质化光伏组件近年来发展迅速，主要包括两类：一是超薄双玻组件，采用 2.0mm 半钢化玻璃替代常规

3.2mm 玻璃，重量降低约 20%—30%；二是柔性薄膜组件，采用不锈钢或聚合物基板代替玻璃，重量仅为常规组件的 30%—50%，且可弯曲适应曲面安装。减荷策略方面，可从以下环节入手：优化支架排布方案，在满足发电效率的前提下尽可能减少支架用钢量；采用铝合金支架替代热镀锌钢支架，重量降低约 40%但成本相应增加；将常规的倾角安装改为平铺安装，一方面降低风荷载体型系数，另一方面减少支架高度和用钢量。采取上述措施后，总附加荷载可控制在 0.20—0.30kN/m²，显著降低对原结构承载力的要求[4]。

4 施工期防水保护与防火安全管控

4.1 施工过程中防水层的保护措施

光伏改造施工是对屋面防水体系冲击最大的阶段，施工期间的临时保护措施与最终节点的永久密封同等重要。施工前应对屋面防水层进行全面普查，对已有破损部位先期修复，划定施工通道和材料堆放区域，上述区域铺设临时保护垫层（如胶合板或橡胶垫），防止人员踩踏和材料刮伤。锚固钻孔作业前，应在钻孔位置预先裁切防水卷材形成“窗口”，窗口尺寸略大于锚固件外径，裁切边缘使用密封胶进行临时封闭，待锚固安装完成后再按前述构造进行永久密封。每日收工前应对当日施工的锚固点进行逐个检查，重点检查密封胶固化情况和盖片固定牢固度。遇降雨天气应立即停工，对已完成但未完全密封的锚固点进行紧急覆盖保护。施工期间应建立防水巡查记录台账，对每个锚固点的施工时间、操作人员、密封材料和检查结果进行记录，实现质量可追溯。

4.2 防火安全专项管控措施

烟草仓库的高防火等级对光伏改造施工安全提出严格要求。材料选用环节，屋面防水卷材应选用燃烧性能 B1 级及以上产品，保温材料应为 A 级不燃材料，密封胶和粘结剂应具有阻燃特性。施工动火管理方面，涉及焊接、切割等明火作业前，必须办理动火审批手续，清理作业区域周围 10 米范围内的可燃物，配备不少于 2 具灭火器材并安排专人监护。焊接作业时应在下方铺设防火毯，防止火花溅落到屋面保温层或仓库内部[5]。电气安装方面，光伏直流侧电缆应选用阻燃型号（燃烧性能不低于 C 级），所有连接器应选用具有 UL 或 TÜV 认证的防水防尘型快速接插件，避免在屋面现场制作电缆接头。施工过程中严禁将光伏组件、电缆等包装材料堆放在屋面通道或消防设施周围，施工产生的废弃物应每日清运，不在屋面过夜存放。

结束语

“双碳”目标下，既有工业建筑的光伏化改造是建筑节能降碳的重要方向。烟草仓储建筑以其独特的屋面资源和用电特性，在光伏改造方面具有天然优势，但高标准的防水等级和防火要求也构成了刚性约束。本文从防水与承重适配的视角出发，系统探讨了支架基础选型、节点密封构造、结构验算方法和施工管控措施，为烟草行业仓储建筑的光伏改造提供成套技术方案。随着轻质高效光伏组件技术的持续进步和既有建筑检测评估手段的不断完善，光伏改造的安全适应边界将逐步拓宽，为更多类型特殊工业建筑的绿色低碳转型创造可能。希望本文的研究成果能为同类工程实践提供有益的技术参考。

参考文献

[1] 荆晓峰, 王功政, 谢修波. 轻型门式刚架屋顶增加分布式光伏系统的加固设计研究 [J]. 产品设计,2026(3):132-135.

[2] 李姚伟. 某屋顶资源光伏建筑一体化改造实施分析 [J]. 电力设备管理，2022(5)：162-164.

[3] 刘冰, 刘孝海, 朱丽, 等. 多层次灰色体系下光伏建筑改造项目评价研究 [J]. 太阳能学报,2025,46(6):478-485.

[4] 谢清华, 刘专. 改造型屋顶光伏建筑一体化项目设计要点浅析 [J]. 江西电力,2023,47(6):33-35.

[5] 田甲丰. 光伏建筑一体化中屋顶防水构造节点优化研究 [J]. 建筑与施工，2026,5(16):45-46.