

倒置式屋面构造与施工技术研究进展与展望

李媛媛, 杨康, 常韶悦, 张梦喆, 隋登继

辽宁科技学院资源与土木工程学院, 辽宁 本溪

收稿日期: 2026年6月20日; 录用日期: 2026年7月11日; 发布日期: 2026年7月22日

摘要

倒置式屋面作为一种优化的建筑屋面构造体系, 通过将保温层置于防水层上方, 有效改善了传统正置式屋面防水层易老化、渗漏问题突出、维护成本偏高的技术短板。本文以倒置式屋面为研究对象, 系统梳理其结构组成与工作原理, 详细阐述施工工艺要点及关键质量控制措施, 结合国内典型工程案例分析其技术优势与实际应用效果, 深入剖析当前应用过程中存在的材料相容性、施工精度控制等技术难题及其底层技术、管理、经济诱因, 并结合行业发展趋势探讨未来改进方向与研究重点。研究表明, 倒置式屋面在提升防水层耐久性、简化构造层次、降低能耗及维修成本等方面具有显著优势, 其应用符合绿色建筑发展需求。本文研究内容可为建筑屋面工程的设计、施工及研究提供基础理论参考, 也为相关领域的学生学习与实践提供借鉴。

关键词

倒置式屋面, 防水构造, 施工技术, 节能性能, 研究进展

Research Progress and Prospects of Structure and Construction Technologies for Inverted Roofs

Yuanyuan Li, Kang Yang, Mingyue Chang, Mengzhe Zhang, Dengji Sui

School of Resources and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

Received: June 20, 2026; accepted: July 11, 2026; published: July 22, 2026

Abstract

As an optimized structural system for building roofs, the inverted roof places the thermal insulation layer above the waterproof layer, which effectively addresses the technical drawbacks of conventional positive roofs, including premature aging of waterproof layers, frequent leakage risks and high

文章引用: 李媛媛, 杨康, 常韶悦, 张梦喆, 隋登继. 倒置式屋面构造与施工技术研究进展与展望[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 95-102. DOI: 10.12677/hjce.2026.157182

maintenance costs. Taking inverted roofs as the research subject, this paper systematically sorts out their structural composition and working principles, elaborates on key construction procedures and critical quality control measures, analyzes their technical merits and practical application performance based on typical domestic engineering cases, and thoroughly dissects prevailing technical bottlenecks in field application such as material compatibility and construction precision control, along with their underlying technical, managerial and economic driving factors. In combination with industry development trends, this paper further discusses prospective improvement approaches and core research priorities. The study demonstrates that inverted roofs deliver prominent advantages in extending the service life of waterproof layers, simplifying structural layers, cutting energy consumption and lowering maintenance costs, and their application aligns with the development demands of green buildings. The research findings of this paper can provide fundamental theoretical references for the design, construction and research of building roof projects, as well as practical references for students majoring in related disciplines.

Keywords

Inverted Roof, Waterproof Structure, Construction Technology, Energy-Saving Performance, Research Progress

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

1.1. 研究背景与研究现状

传统正置式屋面采用“保温层在下、防水层在上”的构造形式，由于防水层直接暴露于外界紫外线照射、温度应力变化及机械损伤等环境中，易出现老化开裂、渗漏等质量问题，严重影响屋面使用寿命与使用功能。马广生等[1]通过长期现场监测与试验数据证实，正置式屋面防水层平均使用寿命仅 8~10 年；据行业经验估计，传统屋面维修时需凿开表面保护层，施工难度较大，维修成本可达初期造价的 5~10 倍，但该倍数仅来源于工程现场统计汇总，尚未形成统一标准化试验数据支撑，存在地域、建筑类型差异局限性。此外，正置式屋面需设置隔汽层、排汽孔等复杂构造，GB 50345-2012 规范条文 4.4.5 明确规定屋面面积每 36 m² 宜设置 1 个排汽孔[2]，排汽孔易因防雨盖脱落、密封失效形成新的渗漏点，进一步增加屋面维护压力与成本。

倒置式屋面的保温层应采用吸水率低、密度和导热系数小，并有一定抗压强度的保温材料，该要求出自《屋面工程技术规范》(GB 50345-2012) 4.4.6 强制性条文[2]，采用“保温层在上、防水层在下”的逆向设计，利用憎水性保温材料对防水层形成物理屏蔽，构建“保温防护 - 防水阻隔 - 结构承重”的完整体系。该构造形式的核心优势在于，可有效隔绝外界环境对防水层的直接作用，显著提升防水层耐久性；同时简化屋面构造层次，省去隔汽层与排汽系统，降低施工复杂度与工程造价；此外，保温材料的热惰性可有效减少室内温度波动，提升建筑节能效率[3]。

从研究现状来看，现阶段国内针对倒置式屋面的研究多集中于施工工艺优化、新型保温防水材料选型、现场质量控制及工程应用效果分析等方面。国内现行规范《屋面工程技术规范》(GB 50345-2012) 已对倒置式屋面的材料选用、构造做法及施工要求作出明确规定，为工程应用提供了规范依据。目前，倒置式屋面凭借优良的防水耐久与节能优势，已广泛应用于工业厂房、商业综合体、医院等各类民用与工业建筑中，技术体系日趋成熟。

1.2. 研究目的

本文旨在系统梳理倒置式屋面的结构组成、施工工艺及技术特点，结合国内典型工程案例分析其应用效果，深入探讨当前应用过程中存在的技术难题与研究不足，提出合理的改进建议与未来发展方向。通过本文研究，为建筑屋面工程的设计、施工提供基础理论支撑，同时为相关专业学生的学习与实践提供参考，助力倒置式屋面技术在我国建筑领域的进一步推广与应用。

2. 倒置式屋面的结构组成与原理

2.1. 结构层次

倒置式屋面自下而上依次由结构层、找坡层、找平层、防水层、保温层、保护层组成，见图 1。各层次功能明确、协同工作，确保屋面的承载、防水、保温性能。

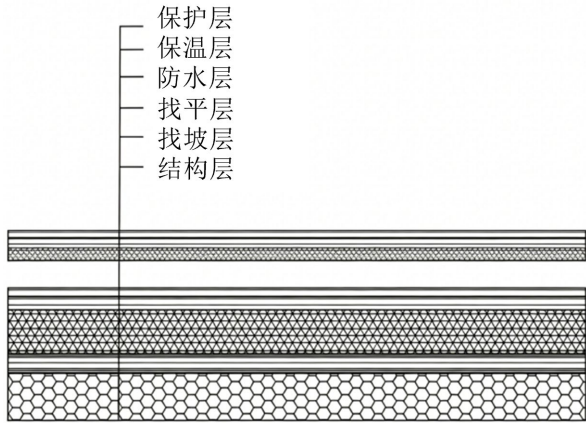


Figure 1. Structural composition of inverted roof

图 1. 倒置式屋面结构

1) 结构层：作为屋面的承重基础，多采用钢筋混凝土屋面板，需满足抗裂、抗渗设计要求，确保能够承受屋面自重、风雪荷载及施工荷载。

2) 找坡层：主要作用是引导屋面排水，优先采用结构找坡形式，GB 50345-2012 第 4.4.6 条规定倒置式屋面适宜坡度不小于 3%，可有效减少材料找坡带来的荷载增加；仲金荣、肖本凤现场施工统计数据显示坡度误差需控制在 1% 以内[4]。

3) 找平层：采用 1:3 水泥砂浆抹平压实，施工验收规范 GB 50207 要求 2 m 靠尺检测表面平整度误差不大于 5 mm，表面无起砂、裂缝等缺陷，屋面阴阳角需做成半径不小于 50 mm 的圆弧角，为防水层施工提供平整、坚实的基层[5]。

4) 防水层：作为屋面防水的核心层次，优先采用耐候性优良的防水卷材(如 TPO、PVC 卷材)或改性沥青卷材，施工时需保证卷材连续无渗漏，搭接宽度不小于 100 mm，节点部位需进行加强处理[6]。

5) 保温层：采用憎水性保温材料，常用类型包括 XPS 挤塑板、聚氨酯泡沫等，规范要求保温层厚度需在热工计算值基础上增加 25%，且不小于 25 mm [2]，以补偿材料吸水导致的保温性能下降；挤塑板各项性能指标执行 GB/T 10801.2-2018 标准要求[7]。

6) 保护层：主要用于保护保温层与防水层，防止人员踩踏、重物堆放等造成的机械损伤，可采用细石混凝土(配置 $\Phi 4@200$ 双向钢筋网)、水泥砖或卵石层(粒径 20~40 mm) [8] [9]。

2.2. 与传统屋面对比

传统正置式屋面需设置隔汽层及排汽系统，通常每 36 m² 设置 1 个排汽孔，构造复杂且排汽孔易成为渗漏隐患；倒置式屋面通过保温层对防水层的保护作用，可有效减少温度应力影响，马广生等[1]实测数据显示年温差可降低 40%，防水层使用寿命可延长至 20 年以上，且无需设置排汽系统，工程统计数据表明渗漏风险降低 80%以上，但该数值为多项目汇总统计，受地域气候、施工水平影响存在浮动[1] [3]，同时简化了施工流程、缩短了工期，见表 1。

Table 1. Comparison table of structural configurations and performance between conventional roofs and inverted roofs
表 1. 正置式与倒置式屋面构造及性能对比表

对比项目	传统正置式屋面	倒置式屋面
隔汽层	必须设置	无需设置
排汽系统	需布设，每 36 m ² 设 1 个排汽孔 (GB 50345-2012 [2])	无需设置
温度应力影响	受温差影响大	年温差降幅约 40%，应力影响小[1]
防水层使用寿命	年限较短	可达 20 年以上
渗漏隐患	排汽孔易渗水，风险偏高	渗漏风险降低 80%以上 (工程统计，存在地域浮动[1] [3])
施工复杂度	构造层次多，工序繁琐	构造精简，施工简便
施工工期	耗时较长	有效缩短工期

3. 倒置式屋面的施工工艺与技术要点

3.1. 施工流程

倒置式屋面施工需遵循“基层处理→找坡层施工→找平层施工→防水层施工→节点加强处理→闭水试验→保温层施工→保护层施工→竣工验收”的流程，各工序衔接有序，确保施工质量：

- 1) 基层处理：对钢筋混凝土结构层进行检查，若存在宽度不小于 0.3 mm 的裂缝，采用水泥基渗透结晶聚合物进行封闭处理；雨落管、管道根部等节点部位，采用高强度微膨胀混凝土填补密实，表面铺设宽度不小于 300 mm 的防水加强层，防止节点渗漏。
- 2) 找坡与找平层施工：找坡层施工需严格控制坡度，误差不大于 1%，施工完成后进行压实处理；找平层采用 1:3 水泥砂浆抹压密实，表面无浮浆、裂缝，施工完成后需养护至规定强度，含水率控制在 9% 以内(简易测试方法：将防水卷材平铺于基层表面，12 h 无结露即为合格)。
- 3) 防水层施工：采用热熔法铺贴防水卷材，火焰加热器距卷材底面 300~500 mm，待卷材表面熔融发亮后，迅速滚铺并压实，确保卷材与基层、卷材与卷材之间粘结牢固，无空鼓、翘边等缺陷。
- 4) 节点处理：女儿墙、管道根部、屋面转角等节点部位，增设宽度不小于 500 mm 的防水附加层，卷材收口处采用铝合金压条固定，并用密封胶密封严密，防止节点渗漏。
- 5) 闭水试验：防水层施工完成后，进行蓄水闭水试验，蓄水深度 20~30 mm，持续 48 小时为 GB 50207 强制验收要求，无渗漏后方可进行下一道工序施工[5]。
- 6) 保温层安装：采用 XPS 板进行错缝铺贴，板间缝隙不大于 5 mm，缝隙采用聚氨酯发泡胶填充密实；若屋面坡度大于 25°，采用 Φ6 钢筋钉固定 XPS 板，固定间距 500 mm × 500 mm，防止保温层滑落。

7) 保护层施工: 若采用细石混凝土保护层, 需设置分格缝, GB 50345-2012 规定分格缝间距不大于 6 m, 缝宽 20 mm, 采用沥青砂浆灌缝; 若采用卵石、水泥砖等块材保护层, 水泥砂浆结合层厚度控制在 30~50 mm, 块材铺贴后及时擦缝, 确保表面密实。

8) 竣工验收: 屋面施工全部完成后, 对各层次质量进行全面检查, 重点检查防水层完整性、保温层铺设质量、节点密封情况等, 验收合格后投入使用。

3.2. 关键技术控制

1) 材料选型控制: 保温材料需满足相关标准要求, 其中 XPS 板导热系数不大于 0.030 W/(m·K), 吸水率不大于 1% (符合《绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料》GB/T 10801.2 要求); 聚氨酯泡沫密度不小于 35 kg/m³, 闭孔率不小于 90%, 防水材料选用耐候性优良的产品, TPO 卷材耐候温度范围为-40℃至 85℃, 拉伸强度不小于 12 N/mm; 聚氨酯涂料固含量不小于 98%, 延伸率不小于 450% [7]。

2) 施工环境控制: 防水层施工温度不低于 5℃, 相对湿度不大于 85%, 风力不大于 3 级, 避免因环境因素导致卷材翘边、粘结不牢固; 保温层施工时, 空气湿度需小于 85%, 防止保温材料吸湿, 影响保温性能[10]。

3) 施工精度控制: 找坡层坡度误差严格控制在 1%以内, 避免排水不畅导致屋面积水; 找平层平整度误差不大于 5 mm, 确保防水层铺贴平整; 保温层铺贴缝隙不大于 5 mm, 填充密实, 防止雨水渗入缝隙损坏防水层[4]。

4) 成品保护控制: 防水层验收合格后, 严禁踩踏或堆放施工材料、设备等重物; 保温层施工完成后, 及时覆盖防雨布, 设置“禁止踩踏”等警示标识, 防止材料损坏[9]。

4. 倒置式屋面的技术优势与应用案例

4.1. 核心优势

1) 提升防水层耐久性: 保温层对防水层形成有效物理屏蔽, 减少紫外线照射、温度应力等外界因素的影响, 可使防水层老化速度降低 60%以上。

2) 简化构造与缩短工期: 倒置式屋面省去了隔汽层与排汽系统, 构造层次简化, 施工流程更为简便, 可使工期缩短 20%~30%。

3) 节能增效效果显著: 保温层的合理设置可有效减少室内外热量传递, 降低建筑供暖、制冷负荷, 室内温度波动明显减小, 数值模拟计算显示供暖负荷可降低 15%~20%。

4) 维修便捷且成本较低: 倒置式屋面渗漏点定位准确, 可通过闭水试验快速找到渗漏位置, 局部修复无需凿开整个屋面保护层, 修复成本仅为传统正置式屋面的 1/5。

4.2. 应用案例

倒置式屋面凭借其显著的技术优势, 在国内工业建筑、公共建筑等领域得到广泛应用, 以下选取 2 个典型案例, 概括其应用特点与效果, 为同类工程提供参考:

1) 中国铁建东来尚城二期项目: 该倒置式屋面将保温层设于防水层上方, 以非固化沥青 + SBS 卷材复合防水, 保温层加厚 25%, 配套完善细部附加防水与刚性保护层。可隔绝温差保护防水层、取消排气管, 减少渗漏节点, 受雨季施工制约小。相较传统正置屋面, 防水耐久、后期维修少, 适合多雨湿润地区高层住宅屋面工程[6]。

2) 安义县人民医院项目: 针对传统屋面易开裂、渗漏的问题, 该项目采用倒置式单向异形钢骨架轻型屋面, 通过优化节点漏嵌缝(采用硅酮密封胶)和洞口封堵(采用防水砂浆)工艺, 有效解决了屋面开裂

问题,使用期间屋面裂缝宽度控制在 0.2 mm 以内,防水效果良好[11]。

5. 技术挑战与发展趋势

5.1. 现存技术难题与研究不足

尽管倒置式屋面在工程应用中表现出显著优势,但当前在技术应用与研究领域仍存在问题,主要集中在以下几个方面:

1) 材料相容性研究不足

XPS 板与改性沥青卷材易出现粘结分解、界面剥离问题,各类保温与防水材料组合的相容机理研究较为薄弱[1]。

根源深度剖析

① 技术根源: XPS 板残留发泡剂、增塑剂会与沥青组分发生化学反应,破坏粘结界面;现有国标仅作宏观相容要求,无材料组合分级检测与老化试验标准;

② 管理根源:进场验收仅核查单一材料性能,未强制开展配套相容性复试,施工常混用不同厂家材料;

③ 经济根源:专用相容粘结材料成本更高,中小施工企业为控造价简化施工工序,加剧粘结失效风险。

2) 施工精度控制难度较大

找坡坡度偏差超 1%易引发屋面积水、防水层破损,异形节点施工精度不足也是渗漏核心诱因,且缺乏高效精度管控手段[4]。

根源深度剖析

① 技术根源:传统人工找坡、手工裁剪节点卷材,测量与施工误差大,无标准化预制构件辅助施工;

② 管理根源:劳务班组流动性强、专业度不足,施工无全过程精度管控,仅完工验收,误差整改难度大;

③ 经济根源:激光找平设备、预制构件成本较高,中小型项目普遍沿用低成本人工施工模式。

3) 极端工况下长期耐久性数据匮乏

高温高湿、高寒冻融等极端气候下,XPS 板吸水率显著上升、保温性能衰减,目前缺乏长期服役数据与量化寿命预测模型[8]。

根源深度剖析

① 技术根源:现有老化试验时长有限,无法模拟数十年极端工况,多因素耦合老化机理尚不明确;

② 管理根源:设计、施工、运维数据割裂,无统一的屋面长期监测数据库;

③ 经济根源:长期现场监测投入大、周期长,科研与企业均缺乏持续监测的经济动力。

5.2. 发展趋势

结合当前建筑行业绿色化、智能化发展趋势,针对倒置式屋面现存技术难题,未来其发展方向主要集中在以下几个方面:

1) 高性能复合防水材料创新

新型气凝胶保温板与聚脲自修复涂料是倒置式屋面材料升级的重要方向[8]。技术优势方面,气凝胶导热系数极低,可减小保温层厚度、降低屋面荷载;聚脲涂料能够自主修复微裂缝,有效提升防水耐久性。应用壁垒方面,气凝胶板材力学性能弱、造价高,产业化应用受限;聚脲涂料对施工环境要求严苛,低温工况适配性差。未来应重点研发复合增强型气凝胶板材,优化生产工艺降低成本,开发低温适配改性聚脲材料,配套专项施工标准,依托 JGJ 230 规程指导超低能耗建筑试点逐步推广[12]。

2) BIM + 智能巡检工艺升级

BIM 技术与无人机热成像巡检是屋面智能建造与运维的核心手段[8]。技术上, BIM 可实现屋面节点精细化预设计, 规避施工碰撞、减少人为误差; 智能巡检可快速定位渗漏、受潮病害, 大幅降低运维成本。目前存在构件库缺失、热成像识别易受环境干扰、行业数据不互通等壁垒。后续应搭建屋面专用 BIM 构件库, 搭载 AI 识别算法消除检测误差, 推动屋面 BIM 深化设计纳入公建审查规范, 打通设计、施工、运维数据链路, 实现全过程智能化管控。

3) BIPV 一体化与绿色再生材料应用

BIPV 一体化与再生 XPS 材料是屋面绿色低碳发展的主要趋势[3]。BIPV 可利用屋面空间光伏发电, 配合倒置保温层提升发电效率; 再生保温材料可减少固废与碳排放。现阶段存在屋面荷载增加、光伏基座易引发节点渗漏、行业标准不统一、再生材料性能不稳定等问题。未来需区分新旧建筑工况, 采用轻质光伏与一体化防水基座优化节点构造, 完善 BIPV 屋面专项规程[13], 建立再生 XPS 分级回收与应用标准, 平衡节能效益与工程质量。

4) 基础理论与标准体系完善

完善基础研究与行业标准是倒置式屋面技术迭代的根本支撑。开展多材料、多工况耦合老化研究, 可建立屋面寿命预测模型, 推动设计由经验化向精准化转型。当前存在极端气候长期监测不足、试验平台稀缺、科研与工程数据割裂、规范更新滞后等问题。后续需联合校企与工程单位搭建服役监测数据库和老化试验平台, 系统研究极端工况耐久机理, 建立科学的寿命评价体系, 构建规范动态修订机制, 加快科研成果落地应用。

6. 结论与展望

倒置式屋面通过“保温层保护防水层”的构造优化, 有效解决了传统正置式屋面的诸多技术短板, 在提升防水层耐久性、简化构造层次、降低能耗及维修成本等方面具有显著优势, 是符合绿色建筑发展需求的屋面构造形式, 在工业建筑、公共建筑等领域具有广阔的应用前景。

倒置式屋面的成功应用, 依赖于严格的材料选型(如 XPS 板吸水率不大于 1%, GB/T 10801.2)、规范的施工流程及精准的质量控制(如找坡层坡度误差不大于 1%)。结合当前技术应用现状, 未来需加强基础研究, 解决材料相容性、长期耐久性等核心技术难题; 推广智能化施工与运维技术, 降低人为误差; 研发高性能、绿色环保的复合材料, 推动倒置式屋面技术向绿色化、一体化、智能化方向发展。

对于建筑相关专业学生而言, 倒置式屋面技术是理论与实践结合的重要载体, 本文的研究内容可为学生学习提供参考, 也希望更多学生关注屋面工程技术的发展, 参与相关技术创新, 为建筑行业的可持续发展贡献力量。

基金项目

2026 辽宁科技学院大学生创新创业训练计划, 项目编号: 202611430069。

辽宁省教育厅基本科研项目: “可更换受损部件的装配式混凝土柱蜂窝梁抗震性能研究”(JYTQN2023449)。

参考文献

- [1] 马广生, 杨涛, 齐长喜, 等. 正置式屋面与倒置式屋面所用保温层材料的选择[J]. 安徽建筑, 2021, 28(1): 118-120.
- [2] 住房和城乡建设部. GB 50345-2012 屋面工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 王耀萱. 基于绿色建筑技术的公共建筑节能改造研究[J]. 广东建材, 2025, 41(1): 106-109.

- [4] 仲金荣, 肖本凤. 倒置式屋面施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 990-992.
- [5] 住房和城乡建设部. GB 50207-2012 屋面工程质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] 王永莉. 倒置式屋面的施工技术研究[J]. 居舍, 2022(16): 91-94.
- [7] 中国轻工业联合会. GB/T 10801.2-2018 绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [8] 俞明贤, 马泽琛, 郑如意, 等. 亚热带区域建筑倒置式屋面防刚性层开裂脱落技术研究[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(10): 94-96.
- [9] 陈盖, 贺波, 刘贤梁, 等. 夏热冬冷地区倒置式屋面保护层施工技术分析[J]. 工程建设标准化, 2025(13): 163-165.
- [10] 吴华希. 倒置式保温防水在斜屋面施工中的应用[J]. 江西建材, 2019(12): 197-198.
- [11] 胡宇琛. 倒置式单向异形钢骨架轻型屋面应用研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(13): 51-53.
- [12] 住房和城乡建设部. JGJ 230-2010 倒置式屋面工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部与国家市场监督管理总局. GB 55030-2022 建筑与市政工程防水通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.