

低温辐射采暖系统设计与工程应用研究

王艳超

广东纽恩泰新能源科技股份有限公司 广东 广州 51000

【摘要】：低温辐射采暖依托低温柔性辐射换热实现室内均匀供热，具备舒适性高、能耗低优势，是住宅低碳采暖主流技术。本文梳理低温水辐射、电热辐射两类系统传热机理，明确辐射板面温度、埋管间距、热媒温度三大核心设计参数取值区间，建立辐射采暖热负荷专项计算方法。结合多栋住宅、公共建筑实际工程案例，分析地面、墙面、顶面辐射采暖不同敷设方案施工要点，解决回填层开裂、散热不均等工程常见病害。通过实测对比辐射采暖与传统暖气片采暖能耗差异，验证低温辐射采暖综合节能优势，为同类工程标准化设计与施工提供参考。

【关键词】：低温辐射采暖；系统设计；工程施工

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.027

引言

建筑采暖低碳转型背景下，高温对流暖气片采暖存在室温梯度大、局部燥热、能耗偏高缺陷，低温辐射采暖依靠辐射换热降低室内空气温差，降低采暖设计热负荷，应用规模持续扩大。目前工程设计中存在参数取值随意、敷设构造不合理、施工管控缺失等问题，容易造成采暖不达标、地面开裂等质量通病。本文以低温辐射采暖传热理论为依据，对系统化设计计算流程进行完善，根据住宅、公建等不同工程实例总结出标准化施工工艺，分析系统运行能耗特点，形成一套完整的低温辐射采暖设计及工程应用技术体系。

1 低温辐射采暖换热机理与系统分类

1.1 辐射换热传热基本机理

低温辐射采暖以辐射板为换热载体，低温热媒流通管路加热辐射板面，以辐射换热为主、自然对流为辅向室内传递热量，换热公式如下：

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

式中： Q 为辐射换热量； ε 为辐射面发射率； σ 为黑体辐射常数； A 辐射换热面积； T_1 辐射板面热力学温度； T_2 室内围护表面平均温度。

辐射换热无强制空气对流，室内垂直温差 $\leq 2^\circ\text{C}$ ，人体体感舒适度显著优于对流采暖；辐射板面温度控制在 $25\sim 32^\circ\text{C}$ 低温区间，换热温差小，热源输送损耗更低，天然具备节能特性。

1.2 低温辐射采暖系统主流分类

1.2.1 低温水辐射采暖系统

以低温热水（ $35\sim 50^\circ\text{C}$ ）为换热介质，塑料管埋设于地面、墙面、吊顶内部，依靠分集水器实现管路流量分配，热源可匹配市政低温热力、空气源热泵、燃气壁挂炉，适配绝大多数住宅与公共建筑，是当前应用最广泛的辐射采暖形式。依据敷设位置分为地面低温辐射、墙面辐射、顶面辐射三类，地面辐射工程应用占比超90%。

1.2.2 电热低温辐射采暖系统

以电热膜、发热电缆为发热元件，铺设于装饰层下方，通电后板面低温辐射散热，无需水系统管网，安装简便，适合小户型、间歇采暖建筑；运行能耗直接来源于电能，运行成本高于水辐射系统，多用于无集中热源的零散住宅、临时建筑。

1.3 两类系统适用场景对比

低温水辐射采暖适合长期连续采暖、大面积建筑，热源适配性强，长期运行综合能耗更低，但前期管路施工工序复杂；电热辐射采暖施工周期短、分户独立调控便捷，适合间歇使用、小型分户建筑，电能消耗限制其大规模严寒地区推广。工程设计要根据建筑热源条件、使用模式合理选择。

2 低温辐射采暖标准化设计计算体系

2.1 辐射采暖热负荷修正计算

传统的对流采暖热负荷计算直接套用围护传热损耗，低温辐射采暖由于换热形式的改变，需要增加辐射换热修正系数。基础建筑热负荷计算之后乘以 $0.8\sim 0.9$ 的辐射采暖修正系数，降低单位面积的设计热指标。

地面辐射采暖有效散热面积扣除家具固定的遮挡部分，只考虑裸露的可辐射地面面积，防止过多的管路铺设造成资源浪费以及局部过热。严寒地区、围护保温较差建筑取高修正系数，保温优良新建住宅取低值。

2.2 核心设计参数限值与取值规范

2.2.1 热媒供水温度

低温水辐射采暖供水温度严格控制 $35\sim 50^\circ\text{C}$ ，地面辐射不宜超过 45°C ；墙面、顶面辐射散热面积有限，供水温度上限 50°C ，超温会造成板面过热、地面回填层开裂，同时增大热源输送能耗。

2.2.2 埋管间距设计

住宅地面辐射常用埋管间距 $150\backslash 250\text{mm}$ ；建筑外窗、外墙等散热薄弱区域加密至 150mm 以内，室内中部区域采用

200\250mm; 间距过小会增加管材用量、局部过热, 间距过大产生冷热分区, 室温均匀性下降。

2.2.3 辐射板面温度控制

地面辐射板面温度规范限值为 24~30℃, 人员长期停留区域不超过 28℃; 墙面辐射最高 32℃, 顶面辐射 33℃, 超温易引起人体燥热不适, 同时加快地面水泥砂浆回填层老化开裂。

2.3 分集水器与管路系统设计

按照单回路管路长度不超过 120m 的原则来划分辐射回路, 各回路长度差值控制在 10m 之内, 保证水力平衡, 防止单回路流量失衡造成散热不均。分集水器配套恒温混水阀, 把高温热源供水降至辐射采暖标准低温区, 设电动温控执行器联动室内温控器, 完成分室独立控温。

管路采用耐热 PE-RT 地暖专用塑料管, 管路转弯处采用大曲率圆弧弯, 不得直角硬折, 减小管路水流阻力。

2.4 保温与边界膨胀构造设计

辐射板下方铺设聚苯乙烯挤塑保温板, 楼板上下层均敷设辐射采暖时保温层厚度 $\geq 30\text{mm}$; 外墙、窗边管路侧边加装边界保温条, 隔断热量向墙体、楼板向下传导, 减少无效向下热损耗。

回填层内设伸缩缝, 大面积房间间距 6m 设竖向伸缩缝, 防止温度应力引起地面开裂, 是设计阶段预防工程病害的重要构造措施。

3 低温辐射采暖工程施工工艺与质量管控

3.1 地面低温辐射标准化施工流程

基层清理→铺设下层保温板→敷设边界保温条→布置 PE-RT 辐射管路→管路固定卡钉绑扎→水压试压检测→浇筑细石混凝土回填层→养护干燥→地面装饰面层施工。

管路铺设完成后必须进行 0.6MPa 水压保压 24h 试压, 降压 $\leq 0.03\text{MPa}$ 为合格, 试压不合格严禁进入回填工序, 杜绝后期管路渗漏隐蔽病害。

3.2 墙面、顶面辐射差异化施工要点

墙面辐射管路固定在墙面保温层内侧, 外侧覆盖水泥砂浆保护层, 不得直接贴瓷砖面层; 顶面辐射受吊顶荷载影响, 用薄型辐射板模块化安装, 管路集成到预制辐射板内部, 现场只做拼接固定, 施工效率高。

墙面、顶面辐射散热面积小, 只起地面辐射的辅助作用, 不能独立使用做主体采暖系统。

3.3 工程常见病害及防控措施

3.3.1 地面回填层开裂

诱因有未设伸缩缝、边界保温条缺、回填砂浆水灰比不妥、养护时长不够。防控: 严格按规范设置伸缩缝, 采用抗裂细石

混凝土回填, 养护周期不少于 7 天, 养护期间禁止踩踏、重压。

3.3.2 室内散热不均、局部不热

诱因是回路长度差值太大、埋管间距设计不合理、管路堵塞水力失衡。防控上设计时把回路长度均匀分布到各个部位, 外墙部位加强管路加密, 分集水器加装小型平衡阀, 定时冲洗管道防止堵塞。

3.3.3 管路渗漏

原因有管材弯折破损、施工尖锐硬物刮擦、试压过程中缺少。防控: 管材选用合格的 PEX 或 PERT 塑料管, 符合国家相关要求, 具有较好的耐热性、耐压性和长期稳定性, 是保证系统安全可靠运行的基础。施工过程中, 管材、管件及已敷设的管路应做好成品保护, 防止后续交叉作业、搬运材料、踩踏等造成管体弯折、划伤、破损。同时要严格水压试验验收程序, 在管道安装完毕、隐蔽前, 按规范要求分等级升压、保压, 仔细检查所有的接口、弯头和管身有无渗漏点, 详细记录试压数据, 保证系统交付使用前具有足够的密封性、承压能力, 从源头上杜绝施工质量缺陷引起的渗漏隐患。

4 低温辐射采暖工程应用与性能实测

4.1 住宅低温水辐射采暖工程案例

华北某多层新建住宅, 总建筑面积为 8600 m², 项目以低碳采暖设计理念为基础, 用空气源热泵作为配套热源, 配合低温水地面辐射采暖系统使用, 适合北方地区住宅采暖负荷特点。工程设计供水温度恒定为 42℃, 室内标准区域埋管间距统一设为 200mm, 对外墙、外窗等散热大的围护薄弱部位, 将管路间距加密到 150mm, 全屋配备分户智能分时温控装置, 根据住户作息时间变化调节室内温度。经过完整的采暖季连续实测可知, 该建筑单位建筑面积采暖能耗为 21.4kWh/m², 比同区位、同户型传统暖气片对流采暖模式节能 22.1%, 室内垂直温差 $\leq 1.5^\circ\text{C}$, 避免了传统采暖上热下冷、局部燥热的问题, 室内整体热舒适度大大提高, 具有较好的住宅推广适用性。

4.2 公建墙面+地面复合辐射应用案例

选择城市社区综合服务公共建筑为研究对象, 建筑大厅大空间部分用纯地面低温辐射采暖方式, 走廊狭窄处和封闭式办公区加装墙面辐射采暖设备作为辅助供热, 构成地面和墙面复合辐射采暖系统, 热源从市政低温热水管网接入, 热源温度稳定, 供热连续。系统配置分区、分时智能温控管理方式, 按照公共建筑间歇性、时段性使用特点调节各个区域的供热状况。实测数据表明, 本复合辐射采暖系统在间歇运行工况下, 比传统的纯空气对流采暖方式节能 17.8%, 完全克服了大空间建筑边角区冷热不均、采暖死角等缺陷, 室内温度场分布均匀性明显改善, 适应公共建筑人流波动、分区使用的特点, 适用于各类大中型公共建筑采暖工程。

4.3 电热辐射小户型分户应用案例

以城郊无市政热力管网配套的小户型独栋住宅为应用案例,该建筑没有接入集中热水采暖的条件,所以采用发热电缆低温电热辐射采暖系统,依靠电能转化为低温辐射热能进行室内供热,全屋采用分室独立温控设计,可以单独控制各个房间的采暖启停和设定温度,满足住户间歇性采暖的需求。系统只在人员居住活动的时间段内开启供暖设备,在闲置时段关闭供暖,间歇使用时室温能保持在规定的舒适范围内,采暖舒适度完全符合居住使用需求。但是长期实测表明,该系统如果采用24小时连续运行的方式,电能消耗比低温水辐射采暖系统要高很多,运行经济性较差,只适合于没有热源配套、采暖频次低、使用时间短的零散小型建筑和分户住宅。

4.4 不同采暖系统性能对比分析

将住宅、公建、小户型分户建筑各类工程实测数据加以整合,就三种主要采暖系统能耗性能、舒适性能以及场景适配性展开综合比较分析。结果表明,低温水辐射采暖系统依托低温

换热、均匀散热的技术优势,综合节能效果最为突出,室内温度梯度小、无对流扬尘问题,热舒适性能最优,热源适配范围广,可适配绝大多数住宅与公共建筑,工程应用通用性最强。电热辐射采暖系统施工简便、安装灵活、分户调节能力强,但是运行能耗大、使用成本高,只适合于没有集中供热的小型建筑。传统的暖气片高温对流采暖能耗最高,室内温差大、燥热感强,综合性能差,因此工程设计选型应优先推广低温水地面辐射采暖系统。

5 结论

本文系统阐述低温辐射采暖辐射换热机理,建立完整热负荷计算、核心参数取值、管路构造标准化设计体系,区分地面、墙面、顶面辐射采暖差异化施工工艺,梳理开裂、渗漏、散热不均等工程病害防控方案。工程实测表明,低温水地面辐射采暖比传统的对流采暖节能20%以上,室内热舒适性更好。该套设计及施工技术体系可以直接应用于住宅、中小型公建低温辐射采暖工程的设计和现场管理,之后可以再加入光伏、热泵多能耦合系统,进一步挖掘低温辐射采暖低碳运行的潜力。

参考文献:

- [1] 李世露.低温地板辐射采暖系统典型用户温度监测点优化研究[D].沈阳建筑大学,2025.
- [2] 李翠环. 基于新风系统低温辐射采暖的创新研究与实践[J].产品可靠性报告,2023, (11):117-119.
- [3] 李翠环. 低温地板辐射采暖系统的新型控制策略[J].科技创新与应用,2022,12 (18):134-137.
- [4] 鲍新明. 低温地板辐射采暖施工中常见的问题及对策研究[J].中国高新科技,2022, (8):52-54.
- [5] 薛磊. 浅析低温热水地板辐射采暖系统在暖通工程中的应用[J].居舍,2020, (8):99.