

复杂热环境下辐射板供暖传热机制与应用综述

宋恒赛, 赵春雨*, 付 旭

北华航天工业学院建筑工程学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年7月11日; 录用日期: 2026年8月3日; 发布日期: 2026年8月12日

摘 要

近年来, 辐射板供暖作为一种高效、节能且安全环保的供暖方式备受瞩目, 通过辐射板将热量均匀的散发到空间, 有效提升了供暖舒适度和能源利用效率。在复杂的热环境中有更好的应用潜力。本研究系统分析了辐射板供暖的基本传热机理以及在大跨度工业厂房、高速列车车厢、医院隔离空间等环境中的应用研究。重点分析了辐射板在降低垂直温度分层, 提高局部辐射舒适, 优化空气组织等优点。研究进一步提出辐射板技术在浴室这种短时高湿的环境场景中的拓展方案, 通过热效率优化与安全性设计提升空间舒适度与环境质量。本研究为辐射板供暖在多元化复杂场景的规模化应用提供了理论与实践支持。

关键词

复杂热环境, 辐射板供暖, 传热机制, 热舒适

Review of Heat Transfer Mechanisms and Applications of Radiant Panel Heating in Complex Thermal Environments

Hengsai Song, Chunyu Zhao*, Xu Fu

School of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang Hebei

Received: July 11, 2026; accepted: August 3, 2026; published: August 12, 2026

Abstract

In recent years, radiant panel heating has gained significant attention as an efficient, energy-saving, and environmentally friendly heating method. By distributing heat evenly throughout a space, radiant panels effectively enhance heating comfort and energy efficiency. They show particular

*通讯作者。

potential in complex thermal environments. This study comprehensively analyzes the fundamental heat transfer mechanisms of radiant panel heating, as well as its applications in various scenarios such as large-span industrial facilities, high-speed train carriages, and hospital isolation areas. The study highlights how radiant panels help reduce vertical temperature gradients, improve local thermal comfort, and optimize air circulation. Additionally, the study proposes innovative applications for radiant panels in bathrooms, where high humidity and short-duration heat exposure are common. By optimizing thermal efficiency and safety features, these applications can enhance overall comfort and environmental quality. This research provides both theoretical and practical support for the widespread use of radiant panel heating in various complex applications.

Keywords

Complex Thermal Environments, Radiant Panel Heating, Heat Transfer Mechanisms, Thermal Comfort

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. 引言

随着社会的快速发展,我国的建筑能耗需求不断地提高,节能环保压力日益凸显[1]。在此背景下,节能减排与建筑能效标准不断提升,推动绿色供暖技术发展[2]。辐射板作为一种环保高效的供暖方式,凭借着独特的传热机制与节能优势,展现出了广泛的应用潜力[3]。

和传统的供暖方式不同,辐射供暖主要依赖供热部件与建筑物内部围护结构表面之间进行辐射-对流耦合换热机制向房间提供热量[4]。在传热过程中,热表面会向周围的围护结构内表面以及室内设施释放热量[5]。这些热量以辐射的形式传播时,部分热量直接吸收,另一部分被反射回热表面产生二次辐射,最后也会被围护结构和室内物体吸收[6]。辐射供暖的方式显著提高了辐射换热量在整体传热过程中的比例,这个比例通常超过 50% [7]。

目前,关于辐射供暖的研究主要集中在住宅、办公建筑等一些常规场景,针对复杂热环境场景的研究相对较少。复杂热环境情形主要包括:空间大,热浮力明显的高大工业空间;局部辐射不对称的交通工具内部空间;对空气环境和热舒适要求极高的医疗隔离空间以及存在明显的蒸发传质的室内环境。和常规建筑相比,这些场景的热环境调控与供暖效率、流场稳定性、局部舒适性等多方面有关。本研究从辐射板采暖的传热原理出发,对其在典型复杂热环境中的应用研究进行综述,并结合浴室等短时高湿微环境讨论其进一步拓展应用的可能性,以期对相关系统设计与工程应用提供参考。

本文采用中英文数据库联合检索与人工筛选相结合的方法进行文献调研。中文文献主要检索中国知网,英文文献主要检索 Web of Science Core Collection 和 Scopus 等数据库,检索关键词包括“辐射板供暖”、“辐射采暖”、“复杂热环境应用”、“热舒适”、“顶棚辐射”、“地板辐射”、“墙面辐射”、“热湿耦合”等及其对应的英文表述,并采用“辐射供暖 + 应用场景”“辐射供暖 + 热环境特征”的组词组方式进行检索。文献筛选按照相关性、可靠性和代表性原则,重点选择与辐射板供暖传热机理、热舒适、复杂热环境应用场所等相关的文献,剔除与主题关联度较低、研究方法或结论不明确的文献。在此基础上,本文对不同复杂热环境中的主要热环境问题、辐射板供暖作用机制及应用效果进行归纳分析。

2. 辐射板供暖的传热机理

2.1. 基本传热机理

辐射板供暖是以辐射换热为主、自然对流为辅的供暖方式[8]。系统运行时，热量由顶棚、墙面或地面辐射板向室内围护结构、设备表面及人体进行传递，同时在板面附近形成局部自然对流[9]-[10]。因此，辐射板采暖并不是单一的辐射传热过程，而是辐射与对流共同作用的结果，其总热流密度可表示为

$$q = q_r + q_c \tag{1}$$

式中： q 为总热流密度， W/m^2 ； q_r 为辐射热流密度， W/m^2 ； q_c 为对流热流密度， W/m^2 。

辐射板与周围环境之间的净辐射换热可表示为：

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \tag{2}$$

式中： ε 为表面发射率； σ 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数； T_s 为辐射板表面绝对温度， K ； T_{sur} 为周围环境等效表面绝对温度， K 。

板面与室内空气之间的对流换热可近似写为：

$$q_c = h_c (T_s - T_a) \tag{3}$$

式中： h_c 为对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； T_a 为空气温度， K 。

与传统热风供暖相比，辐射供暖的主要特点不在于显著提高室内空气温度，而在于提升平均辐射温度，改善人体与环境之间的热交换条件[11]。当室内平均辐射温度提高时，即使空气温度相对较低，人员仍可能获得可接受的热舒适水平。这也是辐射供暖能够减少“先加热空气、再由空气间接作用于人体”这一传热路径的重要原因。

2.2. 辐射板不同布置形式的作用特征

按照辐射板的安装位置不同，可以分为顶棚辐射供暖、地板辐射供暖和墙面辐射供暖如图 1。不同的安装位置在热量散发，使用场景也有不同。顶棚辐射板通常安装在高处，主要适用于高大建筑中下面空间为工作区的供暖场景，热量能够覆盖较大区域。这种形式能够使热量直接传递到人员活动及地面表面，降低热空气在上部空间大量聚集所造成的热损失。地板辐射在住宅方面应用更为广泛，有利于形成均匀的温度场改善脚部热感觉降低垂直温差。墙面辐射更适用于局部补热需要快速补充热量的场景，辐射面积范围更广针对性补偿更加精确。

但是，三种辐射板安装形式并不存在绝对优劣，而是各自有各自的适用场所，如表 1 所示。对于复杂热环境来说，更需要根据热边界条件和局部舒适需求进行针对性的布置。

Table 1. Functional characteristics and applicable scenarios of different radiant panel layout schemes

表 1. 不同辐射板布置方式的作用特点及适用场景

布置方式	主要传热特征	优势	局限性	使用场景
顶棚辐射板	以上向下辐射为主，伴随局部自然对流	覆盖范围大，适合高大空间，减弱上部热损失	安装高度较大时对局部响应可能受限	工业厂房、装配车间、半开放空间
地板辐射板	自下而上供热，地表温度较均匀	热舒适稳定，垂直温差小，足部舒适性好	热惯性较大，响应速度较慢	住宅、游泳馆、分娩猪舍
墙面辐射板	面向人员和围护结构定向辐射	响应较快，适合局部补热	布置位置需结合家具和设备	列车车厢、小空间局部供暖

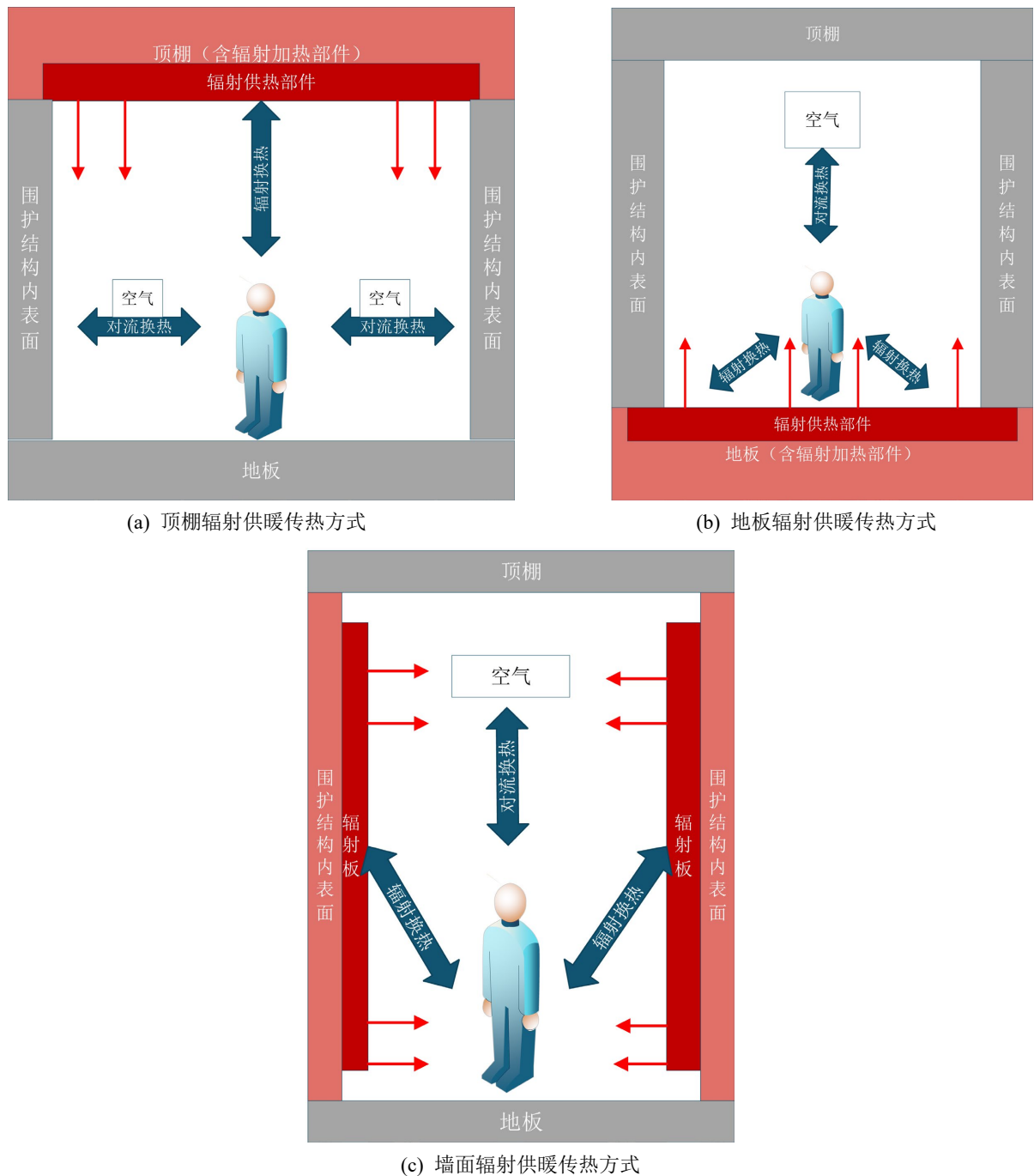


Figure 1. Schematic diagram of radiation-convection coupled heat transfer mechanism with different radiation source installation positions

图 1. 不同辐射源安装位置的辐射 - 对流耦合传热机理示意图

3. 复杂热环境中的辐射供暖应用

3.1. 大跨度工业厂房中的应用

大跨度的工业厂房以及高大空间建筑具有围护结构面积大，层高大，人员活动主要在下方区域等特性。使用传统供暖方式时，热空气由于浮力的作用容易快速上升并且聚集在顶部，造成工作区温度不足

和明显的垂直温度分层[12]。大大降低了热量的利用效率，也加剧了空间上方围护结构的传热损失。

相比之下，辐射板采暖可以将热量更直接地传递到地面、设备和人员活动区，减少热量随空气上浮而造成的无效损失。Ahmed 等[13]对大型工业建筑中辐射板供暖与空气供暖的性能进行了比较，结果表明，辐射供暖能够有效降低工作区的垂直温度梯度，改善热环境均匀性，并具有一定节能优势。李金桃等[14]在煤矿副斜井井口房(如图 2 所示)供暖改造中的研究也表明，在冷空气侵入频繁的半开放空间中，顶棚辐射系统能够直接作用于下部地面和设备区域，改善局部供暖效果，避免传统对流供暖中常见的底部区域供热不足甚至地面结冰问题。

从机理上看，辐射供暖在高大空间中的优势主要为：通过提高下部活动区及其周围表面的平均辐射温度，使人员在较低空气温度下仍能获得可接受的热感觉；减少对大风量高温送风的依赖，从而减弱热空气上浮引起的无效热损失。因此，对于人员活动高度明确、上部空间利用较少且热浮力效应显著的工业建筑，辐射板采暖具有较好的适用性。

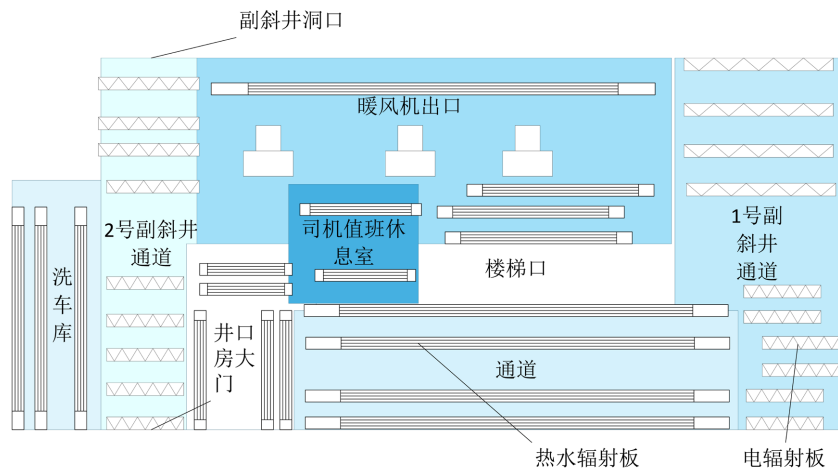


Figure 2. Radiant plane layout of large-span semi-open industrial space (coal mine shaft house) [14]

图 2. 大跨度半开放式工业空间的辐射平面布局(煤矿井口房) [14]

3.2. 高速列车车厢中的应用

高速列车车厢属于狭长型的空间，车厢内的热环境主要是由车速、外界天气、太阳辐射以及围护结构热工性能决定的，具有明显的动态特征[15]-[17]。在冬天运行时，车窗内表面温度较低，靠窗乘客会受到冷辐射的影响，因此会产生局部热不舒适感。这类问题通过提高车厢内整体的温度并不一定会得到解决，因此对局部热环境的调控提出了更高要求。

辐射板采暖在该场景中的优点主要体现在能够改善局部辐射环境温度。通过在窗下设置辐射加热板，能够降低冷窗表面造成的不利辐射影响，从而降低乘客感觉到的辐射温差，成功缓解局部冷感。孔祥强等[18]通过数值模拟发现，采用电辐射板供暖后，车厢内部温度分布和乘员热舒适水平均有所改善，并表现出一定的节能优势。Lim 等[19]进一步提出，将热电辐射板与独立新风系统结合如图 3 所示，可实现显热负荷与通风负荷分担，既能够提高供暖效率，也有助于降低系统总能耗。

辐射板采暖适用于围护结构温差大、局部冷辐射显著且热环境波动较快的列车车厢。但与建筑空间相比，高速列车车厢的边界条件变化更快，运行工况更复杂，乘客分布和开门换气等扰动因素也更显著。现有研究多基于特定工况或模拟条件展开，关于不同运行速度、客座率和外界气候共同作用下的系统适

用性，仍有进一步深入的必要。

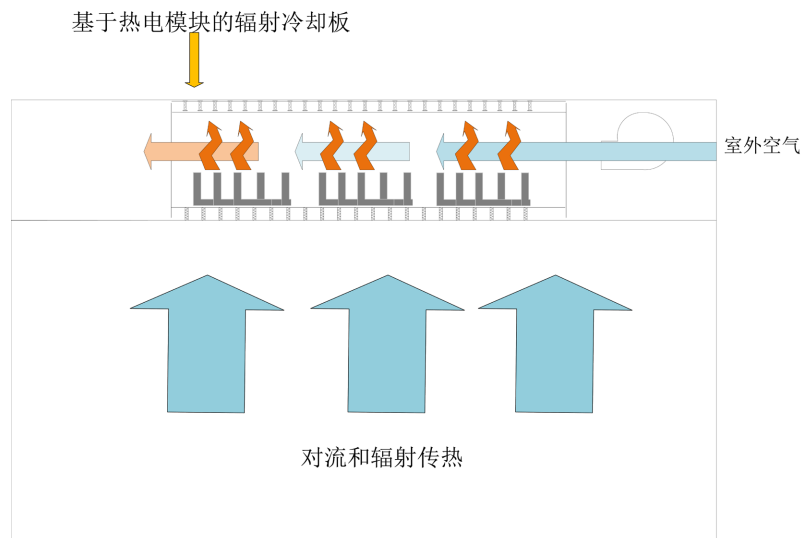


Figure 3. Schematic diagram of thermal environment regulation for high-speed train carriages using thermoelectric radiant panels and independent fresh air system [19]

图 3. 使用热电辐射板和独立新风系统的高速列车车厢热环境调控示意图[19]

3.3. 医疗隔离空间中的应用

医疗隔离病房、ICU、高风险洁净空间，除了要满足热舒适方面的要求之外，还得同时兼顾空气组织、污染物控制。传统的全空气系统一般是借助较大的送风量来承担显热负荷，这样做虽说能够满足温度控制的需求，但容易让室内空气混合加剧，使得气溶胶在空间里的扩散风险增加。

辐射板采暖在这类空间里，不光体现在供热这方面，更关键的是能够减轻空气系统承担显热负荷的压力，为低扰动送风营造条件。当辐射系统承担了主要的显热负荷之后，送风系统就能够更多地用于新风供应、污染物控制，从而降低室内不必要的湍流混合。Li 等[20]、Nielsen 等[21]还有 Tang 等[22]都指出，通风方式对空气传播型感染控制有着重要影响。Melikov [23]等认为降低无效空气混合并形成更有序的局部气流组织，是改善室内空气品质、降低交叉感染风险的重要途径。

Choi 等[24]研究在病房中采用辐射系统与置换通风相结合的方式，能够形成稳定均匀的温度层，减弱污染物在室内的扩散。Villafruela 等[25]进一步指出，辐射板和不同的通风方式进行组合对病房中的交叉感染风险有明显的影响。所以在医疗隔离病房中采用辐射板采暖既能改善热舒适又会与空气组织共同作用于室内环境控制，具有明显的综合性。

3.4. 热湿耦合室内环境中的应用

热湿耦合室内环境主要包括室内游泳池及分娩猪舍。这类空间空气湿度高、潜热负荷大，环境控制通常同时涉及供暖、除湿和防冷凝等多种要求。如果采用传统方式供暖，空气流速会增强湿润表面与空气之间的传质作用，促进蒸发过程，从而增加除湿负荷和系统运行能耗，并且会降低舒适性。

湿润表面的蒸发质量传递速率可表示为：

$$\dot{m} = h_m A (\rho_s - \rho_a) \quad (4)$$

式中： $\dot{m}$ 为蒸发质量传递速率，kg/s； h_m 为质量传递系数； A 为蒸发表面积； ρ_s 为饱和表面水蒸气密度；

ρ_a 为空气中水蒸气密度。

由式(4)可知，空气流速增大通常会提高质量传递系数，进而强化蒸发。辐射板采暖由于主要通过辐射方式向人体和表面供热，对空气流动的直接扰动较小，因此在理论上更有利于抑制蒸发强化效应。张云斌[26]通过数值模拟发现，游泳馆采用地板辐射供暖可使室内温度场与速度场分布更加均匀，室内气流扰动小，在保障人员热舒适的同时能够实现一定的节能效果。Damasceno 等[27]在分娩猪舍中验证了局部辐射供暖方式的可行性，刘营芳等[28]提出的基于辐射加热和个性化送风的环境保障方法，也说明了辐射方式在分娩猪舍局部热需求差异明显的场景中具有较好的应用前景如图 4 所示。

热湿耦合环境中使用辐射供暖并不说明空气系统不再重要。对于游泳馆和分娩猪舍等空间，除湿、排湿、污染物控制和防结露仍然需要通风系统处理。辐射板采暖的关键在于能够减少单纯依赖热风供暖所造成的气流扰动，从而在供热与除湿之间取得更合理的平衡。所以在这类场景中，更合理的就是辐射供暖与空气处理协同优化。

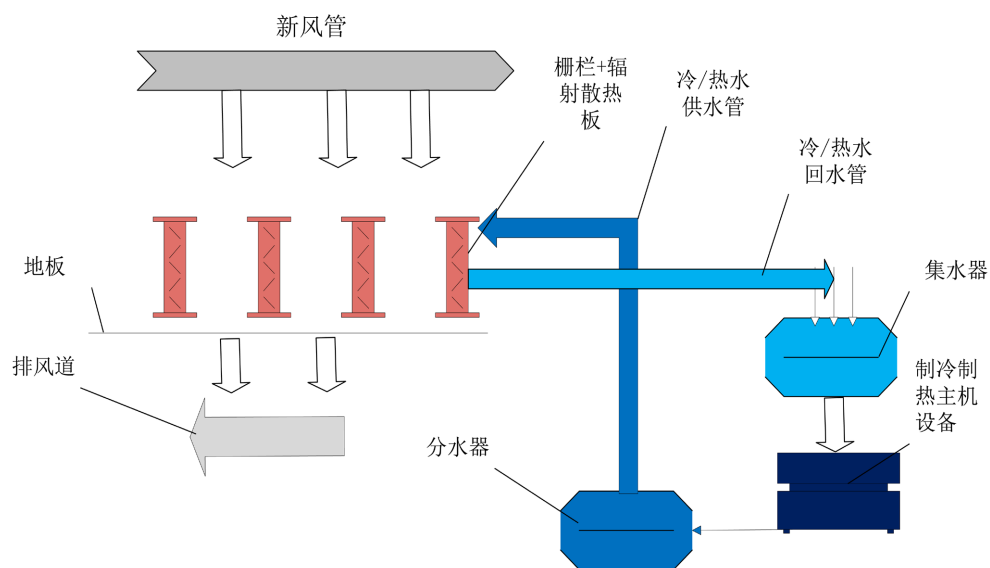


Figure 4. Local radiant heating and gas-liquid phase change decoupling control system in farrowing houses [28]

图 4. 分娩猪舍中的局部辐射加热和气液相变解耦控制系统[28]

Table 2. Comparison of main application characteristics of radiant panel heating in complex thermal environments
表 2. 复杂热环境中辐射板供暖的主要应用特点比较

应用场景	主要热环境问题	传统空气供暖局限	辐射板采暖主要机制	典型效果
大跨度工业厂房	垂直温度分层明显，上部热积聚严重	热空气上浮导致下部供暖不足、能耗较高	直接加热工作区及周围表面，提高下部平均辐射温度	减弱温度分层，改善工作区热舒适，降低无效热损失
高速列车车厢	冷窗导致局部非对称辐射不适	提高空气温度难以消除局部冷感	补偿冷窗造成的辐射热损失，改善局部辐射环境	缓解靠窗乘客冷不适，提升局部舒适性
医疗隔离空间	需兼顾热舒适、空气组织与感染控制	大风量送风易增强空气混合	分担显热负荷，减少空气系统热负担，支持低扰动送风	优化气流组织，降低污染物横向扩散风险
热湿耦合环境	蒸发强、潜热负荷大、湿度高	高风速强化蒸发，增加除湿负荷	低扰动供热，减弱蒸发传质强化	改善热环境稳定性，降低潜热处理压力

Table 3. Summary of typical research literatures
表 3. 典型研究文献归纳

文献	研究对象	研究方法	主要结论
Ahmed 等[13]	大型工业建筑	性能比较	辐射板供暖可降低垂直温度梯度，并具有节能优势
李金桃等[14]	煤矿副斜井井口房	工程应用研究	顶棚辐射系统可改善半开放空间下部供暖效果，减少结冰问题
孔祥强等[18]	列车车厢	数值模拟	电辐射板可改善车厢温度分布和热舒适
Lim 等[19]	高速列车车厢	系统分析	热电辐射板与独立新风系统结合具有节能潜力
Choi 等[24]	医院隔离病房	测试与预测	辐射系统结合置换通风有助于形成稳定分层并降低污染物扩散
Villafruela 等[25]	医院隔离房间	风险评估	通风与辐射系统组合方式会显著影响交叉感染风险
张云斌等[26]	游泳馆	系统特性研究	地板辐射供暖可改善温度场和速度场分布，并有节能效果
Damasceno 等[27]	分娩猪舍	CFD 验证	局部辐射供暖方式具有可行性
刘营芳等[28]	分娩猪舍	系统设计研究	辐射加热与个性化送风结合具有较好应用前景

4. 高湿瞬态微环境中的拓展应用

在现有研究基础上，通过对复杂热环境中辐射板供暖的主要应用特点进行了比较，并对各部分相关典型文献进行了归纳，具体见表 2、表 3。此外，辐射板供暖在浴室等短时高湿微环境中的应用值得进一步关注。与游泳池和农业建筑相比，浴室空间更小、使用时间更短，但其热环境变化更快，人体热感觉也更敏感。冬季洗浴过程中，人体皮肤表面有水珠，此时若采用热风取暖，虽然空气温度升高，但高速气流会加快皮肤表面水分蒸发，带走大量潜热，反而可能使人体产生明显冷感。

辐射供暖的优势在于能够在较低空气流速条件下提供热量补偿，减少由强制对流引起的蒸发增强。同时，电辐射板具有热惯性小、响应快的特点，更适合浴室这种短时间使用、即时加热需求要求的空间 [29] [30]。通过在墙面布置辐射板，降低了空气流动致使的室内微粒悬浮物扩散途径，降低室内污染源浓度，减少对人体健康之潜在危害，有利于维护室内空气质量与健康环境。浴室墙板辐射供暖系统示意如图 5。目前关于浴室辐射供暖的研究仍较少，特别是在辐射板开启温度、人体湿皮肤热平衡和局部热舒适评价方面，还需要开展更加全面的实验和模拟研究。因此，将辐射板采暖拓展至浴室微环境，既具有现实需求，也具有一定的研究价值。



Figure 5. Schematic diagram of wall radiant heating system in bathroom
图 5. 浴室墙板辐射供暖系统示意图

5. 结论

本研究针对复杂热环境下辐射供暖的传热机制和应用进行整理论述。辐射板供暖以其高效、舒适、节能的特点,解决了许多传统供暖方式无法克服的问题,如受热不均匀、环境污染、交叉传染等,在复杂热边界条件下具有改善热环境和降低无效热损失的潜力。在大跨度工业空间中,辐射采暖有助于减弱热浮力引起的垂直温度分层;在高速列车车厢中,能够降低冷窗引起的局部温度低造成不适;在医疗隔离空间中,与通风相结合能够优化空气组织并降低污染物扩散风险;在热湿耦合环境中,对抑制蒸发传质和降低潜热负荷具有一定优势。基于此,本文进一步提出将辐射板供暖应用于浴室空间的构想,即通过将辐射板安装在浴室内墙面上,实现冬季浴室的快速供暖和局部热环境优化。这种方式不仅有助于提高浴室使用舒适度,还具有节省空间、安全美观、便于布置等优点。随着人们对居住环境舒适性和健康性的要求不断提高,辐射板在浴室供暖中的应用具有较好的发展前景,未来还可以结合更加智能的技术进一步提升其运行效率和使用体验。总体而言,辐射板供暖在特殊空间中的应用潜力较大,值得继续开展研究和推广。

基金项目

北华航天工业学院博士科研启动基金项目(BKY201710);北华航天工业学院研究生创新资助项目(YKY202552)。

参考文献

- [1] 崔国游,李莹莹,负清华,等.超低能耗建筑和绿色建筑的融合发展[J].工程管理学报,2024,38(5):27-31.
- [2] 王蕾.节能减排理念在建筑暖通空调设计中的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(24):79-81.
- [3] 高井刚,王伟,方修睦.辐射供暖技术的发展与研究[J].煤气与热力,2007(11):72-75.
- [4] 桑雨晨.辐射采暖与建筑节能[J].内蒙古石油化工,2019,45(9):39-40.
- [5] Bojić, M., Cvetković, D., Miletić, M., Malešević, J. and Boyer, H. (2012) Energy, Cost, and CO₂ Emission Comparison between Radiant Wall Panel Systems and Radiator Systems. *Energy and Buildings*, **54**, 496-502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.024>
- [6] Koca, A., Acikgoz, O., Çebi, A., Çetin, G., Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. (2018) An Experimental Investigation Devoted to Determine Heat Transfer Characteristics in a Radiant Ceiling Heating System. *Heat and Mass Transfer*, **54**, 363-375. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2119-z>
- [7] 陆亚俊,主编,马最良,邹平华,编著.暖通空调[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [8] 王梅杰,陈园园,胡良博.地板辐射供暖房间内表面温度和节能率的影响因素分析[J].制冷与空调,2019,19(10):55-60,70.
- [9] Rahimi, M. and Sabernaeemi, A. (2010) Experimental Study of Radiation and Free Convection in an Enclosure with a Radiant Ceiling Heating System. *Energy and Buildings*, **42**, 2077-2082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.017>
- [10] Causone, F., Corngati, S.P., Filippi, M. and Olesen, B.W. (2009) Experimental Evaluation of Heat Transfer Coefficients between Radiant Ceiling and Room. *Energy and Buildings*, **41**, 622-628. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.004>
- [11] 杨进,等.辐射采暖实现人工环境的热舒适性[J].制冷与空调(四川),2006(4):91-93,84.
- [12] Wang, L.L. and Li, W. (2017) A Study of Thermal Destratification for Large Warehouse Energy Savings. *Energy and Buildings*, **153**, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.070>
- [13] Ahmed, K., Sistonen, E., Simson, R., Kurnitski, J., Kesti, J. and Lautso, P. (2018) Radiant Panel and Air Heating Performance in Large Industrial Buildings. *Building Simulation*, **11**, 293-303. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0414-8>
- [14] 李金桃,樊越胜,张科利,等.吊顶辐射采暖在煤矿副斜井井口房采暖改造中的应用[J].煤炭工程,2012(12):21-23.
- [15] Alinot, C. and Masson, C. (2005) K - E Model for the Atmospheric Boundary Layer under Various Thermal Stratifications. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, 438-443. <https://doi.org/10.1115/1.2035704>
- [16] Ahmad, M.J. and Tiwari, G.N. (2011) Solar Radiation Models: A Review. *International Journal of Energy Research*,

- 35, 271-290. <https://doi.org/10.1002/er.1690>
- [17] 赵明明, 孙丽颖, 贺征, 等. 应用辐射供暖的列车车厢气流组织研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 196-203.
- [18] 孔祥强, 王如竹, 李瑛, 等. 列车客车用低温电地板辐射供暖传热模拟[J]. 工程热物理学报, 2003(2): 316-318.
- [19] LLim, H., Kang, Y. and Jeong, J. (2018) Thermoelectric Radiant Cooling Panel Design: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Applied Thermal Engineering*, **144**, 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.065>
- [20] Li, Y., Leung, G.M., Tang, J.W., Yang, X., Chao, C.Y.H., Lin, J.Z., *et al.* (2007) Role of Ventilation in Airborne Transmission of Infectious Agents in the Built Environment? A Multidisciplinary Systematic Review. *Indoor Air*, **17**, 2-18. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>
- [21] Nielsen, P.V. (2009) Control of Airborne Infectious Diseases in Ventilated Spaces. *Journal of the Royal Society Interface*, **6**, S747-S755. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0228.focus>
- [22] Tang, J.W., Li, Y., Eames, I., Chan, P.K.S. and Ridgway, G.L. (2006) Factors Involved in the Aerosol Transmission of Infection and Control of Ventilation in Healthcare Premises. *Journal of Hospital Infection*, **64**, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2006.05.022>
- [23] Melikov, A.K. (2004) Personalized Ventilation. *Indoor Air*, **14**, 157-167. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00284.x>
- [24] Choi, N., Yamanaka, T., Sagara, K., Momoi, Y. and Suzuki, T. (2019) Displacement Ventilation with Radiant Panel for Hospital Wards: Measurement and Prediction of the Temperature and Contaminant Concentration Profiles. *Building and Environment*, **160**, Article ID: 106197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106197>
- [25] Villafruela, J.M., Olmedo, I., Berlanga, F.A. and Ruiz de Adana, M. (2019) Assessment of Displacement Ventilation Systems in Airborne Infection Risk in Hospital Rooms. *PLOS ONE*, **14**, e0211390. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211390>
- [26] 张云斌. 游泳馆用地板辐射供暖系统的特性研究[J]. 建筑热能通风空调, 2013, 32(5): 80-82.
- [27] Damasceno, F.A., Oliveira, C.E.A., Saraz, J.A.O., Schiassi, L. and Oliveira, J.L.D. (2018) Validation of a Heating System in the Farrowing House Using a CFD Approach. *Engenharia Agrícola*, **38**, 471-477. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p471-477/2018>
- [28] 刘营芳, 黄子硕. 基于辐射供热和个性化送风的分娩猪舍环境保障系统[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 260-268.
- [29] Cvetković, D. and Nešović, A. (2021) Impact of Heat Source at Radiant Electric Heating Panel. *Energy and Buildings*, **239**, Article ID: 110843. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110843>
- [30] Ferrarini, G., Fortuna, S., Bortolin, A., Cadelano, G., Bison, P., Peron, F., *et al.* (2018) Numerical Model and Experimental Analysis of the Thermal Behavior of Electric Radiant Heating Panels. *Applied Sciences*, **8**, Article 206. <https://doi.org/10.3390/app8020206>