



中国建筑工业出版社
学术著作出版基金项目

辐射供冷

Radiant Cooling

刘晓华 张涛 周翔 唐海达 著

中国建筑工业出版社

辐 射 供 冷

Radiant Cooling

刘晓华 张 涛 周 翔 唐海达 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

辐射供冷/刘晓华等著. —北京:中国建筑工业出版社, 2019. 4

ISBN 978-7-112-23346-5

I. ①辐… II. ①刘… III. ①辐射-制冷系统
IV. ①TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 032974 号

责任编辑: 张文胜

责任设计: 李志立

责任校对: 王 瑞

辐射供冷

Radiant Cooling

刘晓华 张 涛 周 翔 唐海达 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 410 千字

2019 年 4 月第一版 2019 年 4 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-23346-5

(33629)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

室内热环境工程的中心任务是营造满足各种人类活动需要的室内热环境，其最主要的实施途径就是通过末端装置与室内进行热交换。通过向房间释放热量或导出热量以建立室内所需要的热环境；通过补充房间失掉的热量或吸收房间内释放出的和导入的热量，以维持室内的热环境。从这个角度看，设置在房间的末端装置是营造建筑室内热环境的核心设备，它与室内环境的热交换过程就是营造室内热环境的过程。末端装置与室内的换热、室内环境与外界的换热以及各类室内热源热量的释放，这三个过程之间的平衡决定了室内热环境状态；末端装置对冷热循环介质的温度品位及循环量的需求，又成为供暖空调系统必须满足的要求；而末端装置与室内人员之间的换热过程，则决定了室内人员的热感觉，也就是热舒适。末端装置还是室内人员所看得见的唯一的供暖空调装置，既是面向使用者的暖通空调系统的代表，又直接影响室内装修效果。因此，末端装置就是使用者眼睛中的空调，而它的运行状态又直接决定供暖空调的舒适性与运行能耗。

室内末端装置的发展，从某种意义上看就是室内热环境工程的发展。末端方式的发展与创新代表了室内热环境工程的发展与创新。冬季室内供暖是人类最早开始的室内热环境营造。我国最早开始的土炕，韩国的地暖（温突），欧洲的壁炉，这些早期的室内供暖方式都是以辐射方式为主，热源通过辐射方式向人体以及周边表面传递热量，使室内人员获得热舒适。以后开始有了热水或蒸汽循环的供暖系统，最初用于这些系统中的散热器也主要是通过辐射方式释放热量，以后才陆续增加了散热器的对流散热成分，直到后来才发展出以自然对流为主的散热器和风机驱动的热风机，使热量释放过程从以向其他表面的辐射为主转为通过空气循环进行换热。

与室内供暖不同，室内冷却（或称空调）则从一开始就是通过空气的循环来采集室内热量，通过末端装置实现空调系统与室内环境之间的热量交换。末端方式的技术发展从一个侧面反映出空调工程的创新和发展。早期的全空气系统通过射流方式，使人员所在的工作区处于大量空气混合的回流区，从而实现工作区温度的均匀并避免过高风速的不适，此时实现的是整个室内空间的整体降温和空调，甚至于上部空间射流区温度较低、下部空间混合区温度较高。以后发展的各类散流器，则进一步试图直接向工作区送风而又不造成吹风感、不丧失均匀性，上下空间温度均匀。三十年前开始逐渐发展起来的置换送风方式，则进一步通过下送风直接营造下部工作区的热环境，而使无人存在的上部区域处于温度较高的热状态。

为什么历史上供热和供冷是分别从辐射和对流（空气循环）这两种不同形式发展起来的呢？以前的一些传热学教材中还曾经有这样一道习题：可以用室内散热器在夏季通入冷水循环进行空调吗？答案中要有两个要点：第一，供暖热源要比室温高 $20\sim 50\text{K}$ （室温 20°C ，供暖热水温度 $40\sim 70^{\circ}\text{C}$ ），而空调冷源仅比室温低 $13\sim 18\text{K}$ （室温 25°C ，空调冷水温度 $7\sim 12^{\circ}\text{C}$ ），但夏季的瞬时冷负荷要远大于冬季，因此对换热面积要求的差别太大；第二，夏季不仅要降温、排走室内的热量，还要除湿、排走室内的余湿，辐射方式无法除

湿，冷源温度太低辐射表面就会凝水，引起诸多不适。然而，技术发展变化已经使这两点所依据的条件出现了变化：低温供暖的热水温度在 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，与室温间的温差也降低到 $10\sim 15\text{K}$ ，与空调冷却成为同一量级；温湿度独立控制的空调系统理念通过制备低湿度的新风送入房间除湿，而显热末端不再承担除湿的功能，通过提高冷源介质温度，要求的是干工况，从而也就有可能避免结露凝水。于是，用辐射方式作为空调末端向室内供冷、排出显热，就又回到工程方案的考虑中。

那么，为什么要用辐射作为空调供冷的末端呢？这主要是基于如下考虑：

(1) 可以直接收取辐射热源表面释放的热量。如果不考虑新风负荷（这将单独处理），夏季室内冷负荷的 70% 以上最终都是以某个表面的辐射的形式释放出来（除人的呼吸、电脑等冷却设备的散热排风外）。这导致室内各个表面温度很不均匀，一些释放热量的热源表面甚至可以高出室温 10K 。通过面向这些表面的冷辐射方式直接收取这些热量，可以用相对较高的冷源温度高效地收取这些热量。

(2) 与冷风末端不同，冷辐射末端可具有较大的蓄热能力，这样就可能用其直接接收或吸收短时间内出现的高密度热量，而不会造成对冷源的瞬态冲击。这对于应对透过玻璃幕墙的太阳辐射尤为重要。一两个小时内对一个冷辐射表面的高强度照射，可以使这个冷辐射表面有效接收这些辐射热，使自身温度缓慢升高，而保持对冷源释放基本恒定的热量。这就使得冷辐射表面（例如冷辐射地板）成为应对透过玻璃幕墙太阳辐射的最佳方式。

(3) 与送风方式相比，更有可能营造局部的冷环境，避免高耗能的全空间空调冷却。这就可以使得无人区域维持自然的高温状况，而仅营造人员活动区域的热环境。这对几十米高的高大空间环境的空调冷却节能尤为重要。

(4) 避免吹风感造成的不适。

(5) 有可能用统一的末端方式实现冬季供暖和夏季供冷。以往是冬季向夏季靠近，都通过空气循环的方式来供热供冷；现在就有可能夏季向冬季靠近，都靠辐射方式完成。对于新疆、青海、甘肃、宁夏等地区，夏季空气干燥，无除湿要求，冬夏都采用辐射方式（如地板辐射）应该是室内热环境营造的最合适的末端方式。

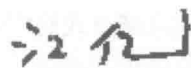
正是出于这些原因，自 20 世纪 80 年代，辐射供冷方式就开始在欧洲一些办公建筑中出现。20 世纪 90 年代进入北美，并写入 ASHARE 手册。到 20 世纪 90 年代末开始有大型机场高大空间的地板冷辐射工程出现。在我国，进入 21 世纪以来，随着地板供暖日益普及，地板辐射供冷也开始在办公建筑、医院、机场、车站等公共场所中应用，并取得很好的效果。采用毛细管的冷辐射屋顶则是另一种在住宅和办公建筑中大量应用的冷辐射方式。这就使得我国应用各类冷辐射空调方式的建筑远多于北美和欧洲，很可能目前世界上有一半以上的冷辐射方式的空调都运行在中国。

然而，对辐射末端方式至今还没有系统的研究，更缺少科学的设计与运行规范。与对流末端相比，辐射末端有很多特殊性问题：室内空间各个表面热源与辐射末端之间的直接换热关系，这是辐射末端的基础，也是其有别于对流末端的最主要特点；冷辐射表面可能出现的冷凝结露现象和防范措施，这是影响冷辐射末端应用的最主要障碍，是辐射末端空调需要应对的主要问题；辐射末端装置本身的热惯性，其对室内空间的换热表面与其接收冷热源冷热量的表面之间热量差异的变化，这一性能使辐射末端可解决工程中不少棘手问

题,是一些工程中采用辐射末端的主要原因。在这些机理性问题的基础上,还有系列的工程问题需要研究和创新,例如怎样用好辐射末端在大空间内营造小微气候环境;怎样利用冷辐射末端有效消除短期内透过外窗的太阳辐射的影响;如何使辐射末端同时满足冬夏季不同负荷的要求,等等。本书就是针对上述基础科学问题和工程实际需求,试图系统地阐述辐射末端相关问题的著作。近十几年来,本书的作者们持续对一些辐射末端工程深入调查测试,力图揭示实际工程中出现的各种现象,并从工程现象出发,深入挖掘其背后的科学问题,从典型现象中找出一般的科学规律,并努力进一步得到普适性结果和系统的处理方法。围绕这一对象,十几年来先后有赵康、唐海达以此作为博士研究专题,还有高志宏、张伦、吴明洋、项翔坚、李凌杉、蔺文钰等也投入了大量的研究工作,更有同济大学周翔团队利用他们的辐射末端实验台开展大量的人体热舒适研究。本书是对这些年来相关工作的系统总结,也是第一次尝试系统地理清辐射末端的相关基础理论问题和工程问题,为更好地用好、用巧辐射末端,用其恰当地解决一些工程问题,做出有意义的探索。

这本书的一个突出特点是“顶天立地”,所谓“顶天”,就是科学上的探索,追寻其基本规律。只有揭示其本质,并找到有效的定量描述方法,才能真正理解,具体应用。所谓“立地”,则是不悬在空中,孤芳自赏,而是密切联系工程实际,从工程中发现现象,靠科学解释现象和找到规律,在对客观现象深入理解的基础上找到问题的解,甚至产生技术的创新,最终在工程实际中应用和检验。这可能应作为工程类研究的路径,这也是“把论文写在祖国大地上”,通过科学研究促进工程技术的发展所该走的路径。

希望这本书能作为一个好的开端,推动辐射末端在空调领域更广泛的应用,为供暖空调事业的发展做出贡献。



清华大学节能楼

2019 年春

前言

室内末端方式是建筑热湿环境营造过程（供暖空调系统）的最基本环节，承担着排除室内多余热量、水分（或补充一定的热量、水分）来调节室内热湿环境的重要任务，以其为基础方可与输送环节、冷热源设备等共同构成整个热湿环境营造系统。末端方式对供暖空调系统的性能有及其重要的影响，在满足室内调节需求的基础上更高效地构建室内热湿环境营造系统是末端方式发展的重要方向。

辐射末端是一种近年来蓬勃发展的新兴末端方式，辐射供冷/供热成为供暖空调系统末端方式的重要选择。由于其在更好地保障室内热舒适性、降低风机输送能耗等方面具有显著优势，这一末端方式受到越来越多的关注，也随着高温供冷、低温供热方式的发展而在越来越多的场合得到了快速应用。与发展相对成熟的辐射末端供热相比，辐射供冷从基本理论到工程实践的各方面还处于起步阶段，迫切需要相应的理论支撑，以便为日益增长的应用需求提供切实指导。

与传统的对流末端供冷方式相比，辐射供冷在基本传热方式、室内舒适性保障、理论分析方法、工程设计应用等方面存在诸多特殊性。本书以辐射供冷的理论分析方法及工程应用为主题，从基本物理过程出发，系统阐述辐射末端换热过程的基本规律及关键影响因素，定量阐明不同类型辐射末端的供冷性能，从热舒适性、结露风险及应对措施等方面深入刻画辐射末端供冷过程的特殊性，系统建立辐射末端方式的工程应用方法，以期为该新型末端方式的实际应用提供理论指导。本书是对空调系统末端方式研究的阶段性工作和当前认识的总结，也是开展更深入研究和更系统认识的开始，很多方面还有待更进一步深入阐释或系统性论述。全书共分为8章，主要内容包括：辐射末端的基本换热过程及关键换热参数、典型辐射末端换热性能、辐射末端的热舒适性、辐射供冷结露特性及相应调控方法、辐射末端设计应用方法以及基于辐射末端的空调系统等，其中第3章辐射末端的热舒适性及第4章辐射顶板与侧板换热性能的第4.2和4.3节内容来自同济大学周翔老师团队的研究成果，其余内容主要由清华大学刘晓华、张涛、唐海达等所在的研究团队完成（部分研究内容来自自己已经毕业或在读博士生，包括张伦、赵康、李凌杉、蒯文钰等）。相关研究工作受到国家自然科学基金、国家重点研发计划项目等的支持，特致谢意。

囿于作者水平和现阶段的认识，书中难免存在可商榷或欠妥之处，恳请广大读者批评指正，以便进一步提高我们对空调末端方式的深入认识。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空调末端方式与发展	1
1.2 辐射供热/供冷的发展历程	2
1.2.1 辐射供热的发展历程	2
1.2.2 辐射供冷的发展历程	5
1.3 国内外研究现状	8
1.4 本书主要内容与框架	12
第 2 章 辐射末端与周围环境换热过程	14
2.1 辐射换热过程及室内热环境	14
2.1.1 辐射换热过程	14
2.1.2 室内热源的温度水平	17
2.2 辐射末端类型及基本换热过程	17
2.2.1 辐射末端的主要类型	17
2.2.2 辐射末端换热特点	19
2.3 辐射末端换热过程的关键参数	20
2.3.1 长波辐射换热系数和 $AUST$	20
2.3.2 对流换热系数	23
2.3.3 辐射板热阻	25
2.3.4 表面温度均匀性指标	29
2.3.5 辐射板时间常数	31
2.4 常见辐射板的换热性能	32
2.4.1 金属辐射板	32
2.4.2 毛细管型辐射板	33
2.4.3 混凝土型辐射板	34
2.4.4 典型类型辐射板的性能汇总	35
第 3 章 辐射末端的热舒适性	37
3.1 辐射末端环境热舒适相关表征参数	37
3.1.1 平均辐射温度和操作温度	37
3.1.2 不对称辐射温度和表面温度	41
3.1.3 不同末端方式的纵向温度梯度	43
3.2 非对称辐射环境下的人体热舒适实验	45
3.2.1 实验设计与整体热感受	45
3.2.2 人体局部感受	47
3.2.3 整体热感觉与局部热感觉的关系	51

3.3 辐射供冷的现场热舒适调研	52
3.3.1 办公场合的辐射供冷调研	52
3.3.2 长时间暴露下的人体热反应对比	53
3.4 环境舱人体热反应实验	56
3.4.1 实验设计	56
3.4.2 热反应变化规律	56
3.4.3 长时间暴露下的人体热反应对比	58
3.5 辐射末端舒适性设计限值	62
3.5.1 不对称辐射的热舒适设计标准探讨	62
3.5.2 辐射供冷表面温度设计限值的探讨	63
3.5.3 基于热舒适需求的辐射末端设计应用指导	65
第4章 辐射顶板与侧板的换热性能	67
4.1 换热过程的主要性能参数	67
4.2 换热性能的实验测试方法	68
4.2.1 各国辐射板测试标准比较	68
4.2.2 实验台搭建与控制难点	70
4.2.3 内热源法与外热源法结合的实验台	71
4.3 典型辐射顶板换热性能	73
4.3.1 金属平顶辐射板	75
4.3.2 毛细管抹灰辐射板	76
4.3.3 辐射板表面换热系数	78
4.3.4 辐射板自身热阻	81
4.3.5 辐射板换热性能的计算	82
4.4 对流强化型金属辐射顶板换热性能	83
4.4.1 测试原理及方法	84
4.4.2 换热性能测试结果	86
4.5 其他形式的辐射板及适宜应用场景	87
4.5.1 其他形式的辐射板	87
4.5.2 适宜的应用场景	90
第5章 辐射地板的换热性能	92
5.1 辐射板供冷性能分析	92
5.2 太阳辐射的影响及处理方法	94
5.2.1 太阳辐射在建筑室内的分布规律	94
5.2.2 太阳光斑位置与照射时间	100
5.2.3 太阳辐射动态影响下辐射地板性能	104
5.2.4 太阳辐射影响下辐射地板与普通地板的比较	110
5.3 遮挡等因素的影响	115
5.4 适宜的应用场景	118
5.5 小结	121

第6章 辐射板结露特性与防结露分析	123
6.1 结露现象及影响	123
6.2 辐射顶板结露的三个过程	126
6.2.1 液滴形成与脱落	126
6.2.2 液滴下落过程再蒸发分析	135
6.2.3 液滴被人体感知	139
6.3 辐射顶板表面持液量与结露时间特征	139
6.3.1 预测脱落时间的理论模型	139
6.3.2 理论模型的实验验证	143
6.4 辐射顶板在办公建筑应用中防结露分析	147
6.4.1 典型办公建筑辐射空调系统	147
6.4.2 基于吊顶表面凝露脱落时间的防结露策略研究	152
6.5 辐射地板在高大空间建筑应用中防结露分析	156
6.5.1 渗风影响范围与辐射地板敷设位置	157
6.5.2 间歇运行模式启动策略研究	161
6.6 小结	163
第7章 辐射板设计应用方法	164
7.1 负荷计算方法	164
7.1.1 辐射与对流方式房间负荷的差异	164
7.1.2 负荷计算	167
7.1.3 计算案例	171
7.2 冬夏选型	174
7.3 控制调节与热惯性	180
7.3.1 常用调节方式	180
7.3.2 不同调节方式的性能对比	181
7.3.3 不同末端方式的启动过程	186
7.4 末端阻力损失情况	190
7.4.1 辐射板冷/热媒管路布置与流动阻力	191
7.4.2 对流末端方式的流动阻力	194
第8章 基于辐射末端的空调系统	196
8.1 基于辐射末端的空调系统方案	196
8.2 辐射板国内外应用情况	199
8.2.1 国内外应用情况概述	199
8.2.2 辐射顶板在建筑中的应用	202
8.2.3 辐射地板在建筑中的应用	207
8.3 应用案例：基于金属辐射顶板的办公建筑	211
8.3.1 建筑及空调系统概况	211
8.3.2 空调系统运行实测	213
8.3.3 小结	216

8.4 应用案例：基于混凝土辐射地板的机场航站楼高大空间建筑 216

8.4.1 建筑及空调系统概况..... 216

8.4.2 辐射地板供冷供热性能 218

8.4.3 与传统空调系统性能对比 221

8.4.4 小结 225

8.5 辐射与对流末端的对比分析 225

附录 A 人员对液滴的感知实验 232

附录 B 辐射地板动态换热模型 237

参考文献 243

第 1 章 绪 论

1.1 空调末端方式与发展

建筑热湿环境营造的基本目的是满足室内适宜环境参数及调控需求，其核心任务是将室内多余的热量和水分搬运到室外环境的过程^[1,2]。而室内空间的热湿采集过程，即通过空调末端带走室内产热、产湿的过程，是建筑热湿环境营造系统的最基本环节^[3,4]，由此出发方可构建整个热湿环境营造系统。室内末端方式是空调系统的重要环节，合理的室内末端方式对满足室内热湿环境参数需求、降低建筑热湿环境营造过程的冷热源品位需求、改善系统性能等起着重要作用。

空调系统的末端热湿环境控制过程如图 1-1 所示，室内末端方式是建筑热湿环境营造过程的最基本环节，与输送环节、冷热源设备等共同构成整个热湿环境营造系统。末端设备通常为各类换热装置，冷水、制冷剂等冷媒输送到末端换热装置后与室内空气、壁面等通过对流、辐射方式进行换热，也可将处理后的空气经由风口等送入室内，实现对室内温度、湿度参数的调节控制。以夏季空调过程为例，其室内末端方式的基本任务就是利用末端设备将建筑室内多余的热量、水分等“收集”，并将其传递给空调系统的冷水等媒介，此过程中不同热源的热量通过对流换热、辐射换热等方式传递至空调系统的末端设备，从而满足室内排热、排湿需求。



图 1-1 空调系统的末端方式

室内末端方式的主要任务是排除不同热源产生的多余热量、水分（供冷）或向室内补充热量（供热）等^[1]，可采取的末端形式包括送风末端、辐射末端（如辐射吊顶）等。对流末端方式是一种常见的空调系统末端方式，各类风机盘管、空气处理机组（空调箱）、送回风风口（散流器、喷口）等均是常见的对流末端设备，如图 1-2 所示。以风机盘管为例，冷热源设备制取的冷/热水输送至风机盘管，室内回风在盘管内与冷/热水换热，经过

末端装置处理后的空气再送回室内，实现对室内环境参数的调控。对流末端方式通常利用空气作为冷热量输送的媒介，常见换热过程为强制对流换热，需要风机驱动空气完成强制对流换热过程，最终实现冷热量的输送；近年来也出现了依靠自然对流方式的诱导式冷梁等对流末端方式，通过自然对流换热的方式完成冷量输送。



图 1-2 常见的对流末端方式

对流末端方式是最常见、应用最广泛的空调末端方式，采用送风方式满足冷热量的输送和末端温湿度环境参数的调控。在对流末端方式应用中，相关的理论分析方法、设计计算方法等均较为成熟，根据设计负荷、送回风温差等可选取合理的送风风量、末端盘管等设备参数。对流末端送回风方式也是对流末端方式应用中需要重点考虑的问题，根据不同场合、空间特点等可以设置上送、侧送、底送等多种方案，送回风形式对室内气流组织状况、热湿环境营造效果等会产生重要影响，不同的风口设置、布局也会对室内流场、温湿度场的均匀状况等产生决定性作用。针对对流末端方式的优化或改进一直是本领域研究者关注的重要问题，并已逐渐发展出喷口送风、置换送风、孔板送风、碰撞射流送风等多种对流末端送风方式，以便满足不同场合室内环境的营造需求。

辐射末端方式是另一种常见的末端方式，包含辐射吊顶、辐射地板等多种形式。由于在室内热舒适性、节能性等方面具有突出优势，辐射末端相关的设计、应用正得到飞速发展。与对流末端相比，辐射末端的换热方式、热量传递特性及设计应用方法等均存在显著差异。辐射末端方式可以通过辐射换热、自然对流换热等方式实现热量传递，不需要借助空气的强制对流方式实现换热过程。辐射末端方式可应用于供冷、供热过程，对人体热感觉的影响或作用规律也明显区别于对流送风方式。需要指出的是，辐射末端方式通常仅作为室内温度控制的一种末端方式，需要与其他末端方式配合（如湿度控制送风末端），共同完成建筑热湿环境的调节控制任务。

1.2 辐射供热/供冷的发展历程

人类文明的发展史与合理使用各种热量传递手段息息相关，如何更好地利用热量也是推动人类社会不断进步的重要动力。辐射换热方式是热量传递的三种基本方式之一，利用辐射末端实现热量传递，满足人类生产生活的各种需求，也具有深远悠久的历史。

1.2.1 辐射供热的发展历程

从辐射末端方式的发展历程来看，人类文明早期已经学会利用烤火等方式取暖，利用

辐射换热方式满足了基本的生存需求^[5-7]。利用辐射方式供热的历史可以追溯到非常久远的时期,考古发现表明辐射供热起源于亚洲。早在公元前 5000 年,在我国北部就已经出现了用火烤热土地来取暖的方式,这种方式逐渐发展成了传统的炕。据史料记载,从夏朝开始,古代中国就开始使用炕来取暖,而考古发现的最早的炕出现在汉代。炕由火炉、烟道、泥质或是砖制的床面组成,末端外观呈 U 字形或是长方形。木炭、木头等燃料在火炉里燃烧,产生高温的烟气,通过床面下的烟道,经由烟囱排出,起到在寒冷冬季取暖的效果,如图 1-3 所示^[8]。至今,在我国北方的农村火炕依然非常常见。从火炕的基本传热方式来看,其采用燃料的燃烧来将热量传递给炕的顶面(床面),而火炕作为室内的供热末端装置,通过辐射换热、自然对流等方式将热量传递给室内,是一种有效的辐射供热末端方式。

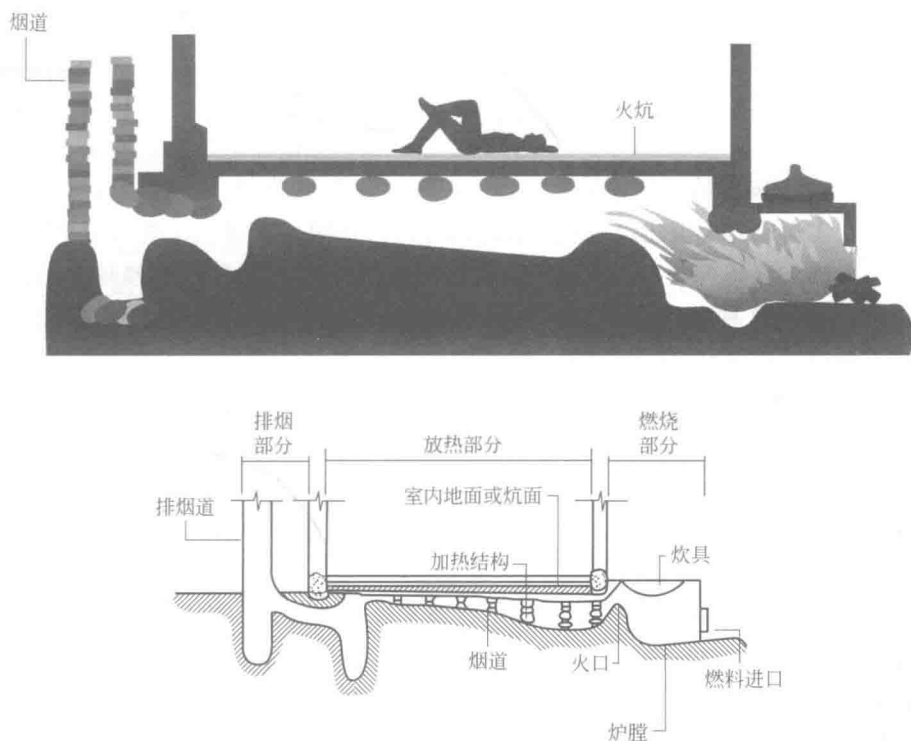


图 1-3 火炕/温突的工作原理示意图

在与我国大陆相邻的朝鲜半岛,采用温突(类似火炕)的辐射供热方式。根据考古发现以及史料记载,温突早在高句丽王朝时就出现了^[9]。在公元 1000~1200 年间,为了改善室内环境质量,人们将为温突提供烟气的火炉移到室外,同时室内的发热末端发展成了整块地板,这也使得当地的人们养成了进门脱鞋的习惯。

辐射供热在西方的起源要晚得多^[10]。公元前三世纪,古欧洲出现了一种叫作“hypocaustum”的取暖系统。人们将火炉中排出的高温烟气通过架空的地板以及含有空腔的壁面,从而实现对室内的加热,参见图 1-4 (a)。地板多由碎石混凝土构造,上铺一层水泥或黏土,再加上大理石镶嵌装饰,碎石混凝土下面是支撑平板,由间隔约 0.3m、高约 0.5m 的砖柱支撑。通过地板后,烟气进入墙面的空腔中,最终通过屋顶上的洞口排出。供给房间的热量需要通过人工调整火炉中的燃料量来进行调节。这种辐射供热的方式大多

出现在古罗马的公共浴室以及其他公共建筑中。欧洲常见的壁炉供热方式，也是一种综合利用辐射换热、对流换热等方式的供热末端，参见图 1-4 (b)。

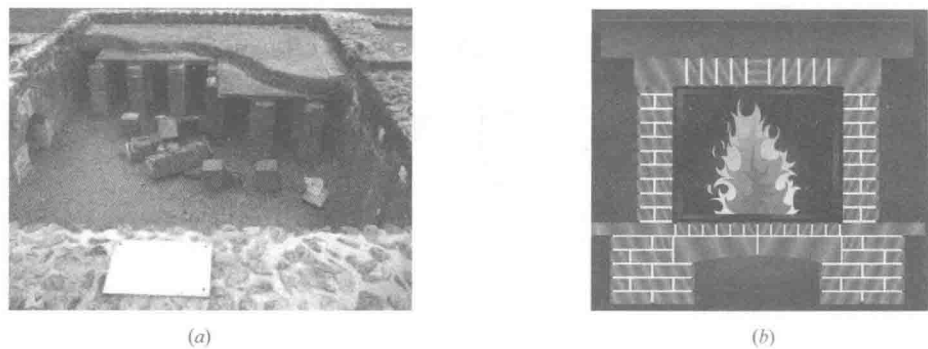


图 1-4 欧洲部分辐射供热末端方式
(a) 类似火炕的方式；(b) 壁炉方式

18 世纪，西方国家的主流还是通过火炉来取暖。从 17 世纪到 19 世纪，热空气集中供热发展迅速，逐渐成为小型建筑供热最普遍的方式。在同一时期，以蒸汽为介质的辐射供热也在稳步发展。1745 年，William Cook 提出了将锅炉产生的蒸汽在楼层中通过管道循环来供热的方式。这种理论最早由 Matthew Boulton 和 James Watt 在 18 世纪末进行了实践，他们后来在英国索尔福德的一座磨坊合作创造了最早的大型蒸汽供热的工程之一。虽然他们并没有留下文字的描述，但是他们的设计应当与苏格兰人 Neil Snodgrass 在 19 世纪初提出的体系相类似。Snodgrass 在苏格兰北部多诺赫的一座磨坊实践了这种蒸汽辐射供热系统。锅炉放置在主磨坊外，产生的蒸汽由管道输送到室内，再由贴着墙壁的竖直管道往上输送，在输送的过程中，蒸汽传递热量给管壁，再由管壁向室内对流、辐射传热。

19 世纪 30 年代，以蒸汽为介质的辐射供热系统飞速发展，很快就代替热空气系统成为大型建筑集中供热的最普遍方式。在之后的很长一段时间里，供热方式的变化都只限于锅炉、管道、发热表面的设计与优化。18 世纪 70 年代，法国人 Bonnemain 首次在鸡蛋孵化室内应用了以水为媒介的供热系统，但是这种方式并没有得到广泛的应用，甚至在当时集中供热的相关文献中都鲜有记载。直到 1836 年新一版的《Principles of Warming and Ventilating》中，Tredgold 才补充了关于热水供热系统的描述。在以水为媒介的供热系统为大众所认知后，便开始蓬勃发展起来。美国工程师 Jacob Perkins 和 Angier March Perkins 发明了高压热水系统，自此只需要相对细的管道配合输送，管道也因此更加容易被隐藏起来。1837 年，Charles Richardson 出版了一本关于高压热水供热的著作《Practical Treatise of the Warming and Ventilation of Buildings》，高压热水供热逐渐被广泛使用。

19 世纪辐射供热系统的发展伴随着人们对材料的热导率、比热以及表面发射率/反射率的研究。John Leslie 在 1801 年发现 James Watts1784 年生产的锡板蒸汽散热器的散热量下降与其发射率有关，发现金属表面的一层颜料可大大提高其散热量。1907 年，英国教授 Arthur H. Barker 发现嵌有细水管的石膏板或者水泥板通热水能够组成高效的供热系统，自此欧洲现代辐射供热演变开始了。1930 年，英国工程师 Osacr Faber 在混凝土土地

板和石膏顶棚中镶嵌铜管，在冬季通热水用于加热，在夏季通冷水用于冷却。1933 年，Gibson 和 Fawcett 在英国的 ICI 实验室意外发现了聚乙烯，促进了 PEX 管的发展，进而解决了早期辐射系统管道的一些挑战，推进了辐射系统的发展。1945 年美国房地产开发商 William Levitt 采取混凝土内埋铜水管的方式，大规模建造了利用辐射供热的住宅建筑。

与此同时，辐射供热方式也成为越来越多建筑中供热末端的重要手段^[11-14]。在我国，随着城镇集中供热的发展，散热器末端方式、地板供热末端等是当前住宅等场所供热的主要末端设备形式。在实际室内热环境保障效果层面，采用辐射供热末端方式通常比送热风的对流末端方式具有显著优势，而且随着低温供热方式的发展，辐射地板等供热方式已普遍成为被人们广为接受的适宜供热末端解决方案，得到越来越广泛的应用。

1.2.2 辐射供冷的发展历程

与供热相比，人类对供冷的需求一开始并没有上升到基本生存需求的必需高度。从 1904 年开利博士发明现代空调系统算起，人类对供冷需求的科学应对措施才发展了 110 多年，远远低于各种供热方式发展的历史。供冷并没有一开始就成为人类生存或发展中的必需环节，而是人类社会文明发展到一定阶段后才出现的更高级别的需求。因此，辐射供冷方式的发展历程也相对较短^[15-16]。

人类对供冷的需求，可追溯至我国古代采用冰块降温的方式，我国历史上诸多朝代均设有专门存储冰块的机构，储藏冰块的冰室被称为凌阴、冰窖、冰井等（见图 1-5），能够将冰块保存至夏季。炎热的夏季将冰块放置在室内，利用冰块的蒸发过程吸热来实现一定

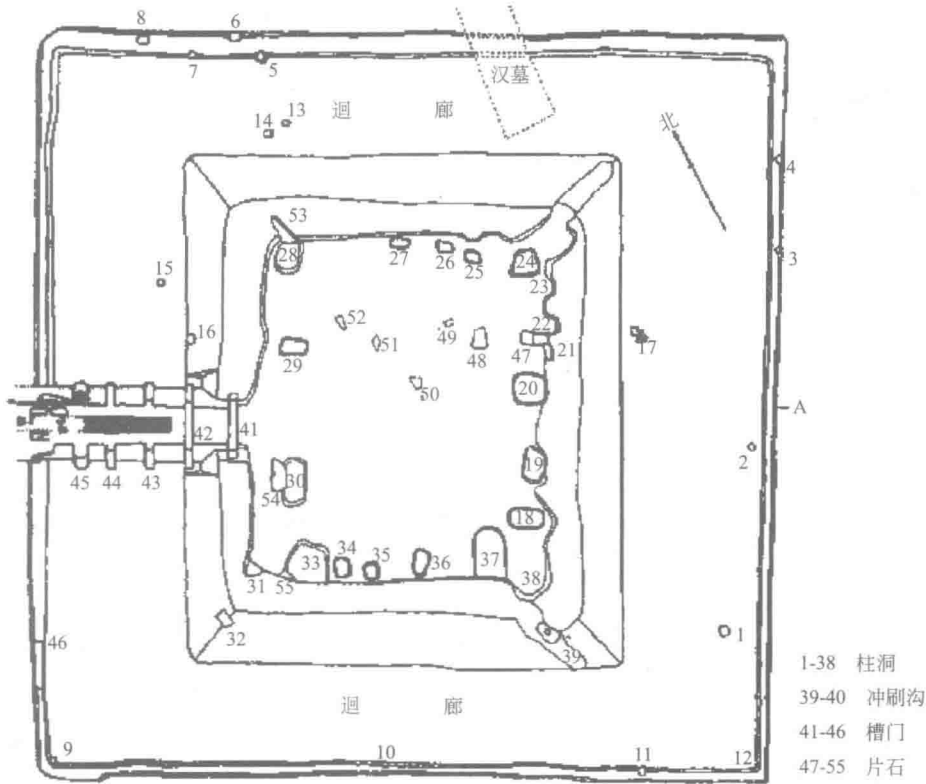


图 1-5 我国古代存储冰块的凌阴遗址^[17]

的降温效果,而且冰块与周围人体、壁面之间的辐射换热也可起到一定的冷却效果,这也可以视作是辐射供冷方式的最早期利用实例。有传闻说早在公元八世纪,在美索不达米亚平原,有利用堆积的雪墙进行辐射供冷的例子。在两千多年前,土耳其当地人引出冰凉的河水到住宅墙壁或是地板上的缝隙中循环,来实现对房间的降温。在我国古代人民的生产生活中,在窖藏农产品时,利用天空背景辐射制冷的实际应用则是一种利用辐射换热方式蓄存冷量的案例。

现代的辐射供冷方式出现是随着空调系统的发展而逐步出现的^[18]。辐射供热装置通过辐射板运行冷水,很容易转换成辐射供冷装置。在20世纪30年代,绝大多数冷却辐射吊顶的研发都失败了,这是因为辐射板表面温度较低,冷凝现象时常发生。随后,人们发现将冷却辐射系统与单独的新风系统结合,处理后的干燥新风降低了室内的露点,可以很好地解决上述问题。从20世纪50年代到80年代中期,辐射供冷系统基本上被大众遗忘了。这大致是因为空调的发展开始于炎热而潮湿的美国南部,与辐射冷却系统搭配使用的小型新风系统不足以达到足够舒适的除湿效果。到了20世纪80年代,随着新的通风形式——置换通风等的出现,它与辐射供冷系统结合效果非常好,为辐射供冷方式的应用提供了辅助技术保障。

从全球范围来看,现代辐射供冷的应用最早在欧洲得到快速发展。1980年,欧洲制定了第一套辐射地板供热标准。1985年地板供热成为欧洲中部和北欧国家住宅建筑的普遍供热系统,在非住宅建筑中的应用也越来越多。随着辐射供热末端的应用,将冷水通入辐射末端,利用辐射末端实现夏季降温/供冷功能,也成为一种可能选择。在北欧一些国家,其优势在于室外气候比较干燥,夏季室外空气的含湿量较低,辐射供冷的结露风险得到了有效控制,这些地区在应用辐射供冷方式时便具有得天独厚的优势。利用辐射供冷的末端装置,可以对室内温度进行有效控制,是北欧一些地区夏季炎热干燥的气候条件下非常可行的供冷方案,并可实现较高的室内舒适性。1995年,地板冷却和TABs (Thermal Active Buildings) 开始逐渐引入住宅和公共建筑市场^[19-21]。很多研究者也将如何将辐射供冷末端与有效的通风措施相结合等作为辐射供冷系统的研究方向,并提出了多种的末端辐射供冷装置。2000年,欧洲中部地区采用嵌入式辐射冷却系统,世界许多地区采用了以辐射末端为基础的空调系统作为室内热湿环境营造的有效手段,以此为基础发展出多种形式的辐射供冷末端装置及辐射供冷空调系统方式,在越来越多的建筑中得到实际应用(见图1-6)。

21世纪以来,随着人类对节能减排目标的日益关注和暖通空调系统相关技术的飞速发展,辐射供冷的空调方式也越来越受到重视。“高温供冷、低温供热”的系统形式在降低冷热源温度品位需求方面具有显著优势(见图1-7),也为辐射末端的进一步推广应用创造了有利条件。这一室内热湿环境营造过程的基本理念也对空调系统的末端方式产生了深刻影响,传统的散热器、对流末端方式逐渐发展为基于辐射换热方式的供冷供热末端方式,为各类辐射板的设计应用提供了极大便利。从室内热舒适保障效果、能源利用品位、运行能耗等方面来看,辐射供冷方式及其所构建的“高温供冷”系统均具有显著优势,这也使得辐射供冷相关的一系列产品得到设计、开发,并在越来越多的实际建筑中得到很好的应用,为营造更好的室内环境、降低实际供冷系统的运行能耗提供切实可行的技术路径。对于这种日益发展的新型供冷技术方案,其与传统的对流空调末端方式在基本传热环