

浅析地板辐射采暖技术及发展趋势

天津市东丽区供热站 苏悦

摘要：主要介绍了地板辐射采暖技术的历史、优缺点和设计上的几个注意点。

关键词：地板辐射采暖、优缺点、设计问题

一、地板辐射供暖应用情况

1、国外住宅

韩国占 80%以上。加拿大西部 65%。瑞士 48%。德国 41%。奥地利 25%。法国 20%。

2、我国应用情况

早期主要作为辅助供暖手段，应用于不大适合单一散热器供暖的高大建筑空间，以及有特殊需要的场合，例如：候车大厅、公共建筑大堂和游泳池等。

随着住宅建设标准和居住者对热舒适度要求的提高，在住宅中的应用逐年增加，尤其是在东北和西北地区。

3、目前状况和制定规程的迫切性

基本上停留于照搬国外样本或资料模式。

对原理的研究上并未取得明显的进步，性质上有所认识，但量的概念仍不足。

材料上有较大的选择余地，对材料的性质加深了认识，但受商业因素影响和误导较多。

设计上存在一定的随意性和盲目性，对一些构造的作用，停留在“想当然”的阶段。

各施工承包企业在实践中得到许多经验和教训，各有一套自己的章法。

二、地板辐射供暖的利弊得失

地板辐射供暖，无疑是热舒适度最好的一种供暖方式。但不一定能成为住宅供暖方式的首先选择，更不是唯一选择。这是因为任何一种供暖方式，都会有其特定的优势和弊病，应根据具体工程条件，将所采用供暖方式的优势充分加以发挥，尽可能减少其弊病。

地板辐射供暖大致有以下的主要优点：

1、与其它供暖方式相比有较高的舒适度

(1) 垂直温度场分布比较均匀。

(距地 0.1m 与 1.7m 的温差，即 $t_{1.7} - t_{0.1}$)

地暖 $-0.1 \sim 0.1^{\circ}\text{C}$ (平均 0°C)、顶暖 $0.2 \sim 2.1^{\circ}\text{C}$ (平均 1.1°C)、散热器 $0 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$ (平均 0.5°C)、热风 $0.2 \sim 2.7^{\circ}\text{C}$ (平均 1.1°C)。

(2) 在室温相同的条件下，距地面 0.05-0.15m (人体对冷暖的敏感部位) 高度的温度，较对流供暖方式约高 $8-10^{\circ}\text{C}$ ，对人体生理有益。

(3) 与对流供暖方式相比，空气对流减弱，有较好的空气洁净度。

空气尘埃中的 70% (按重量计)，为粒径小于 10μ 的固态或液态的微粒，以气溶胶的形态存在，称为大气尘，或称为飘尘，可吸入肺内危及人体健康。《公共场所卫生标准》(GB9663-9673-83) 称之为“可吸入颗粒物”(IP)。

(4) 房间热惰性较好。

(5) 平均辐射温度适当,可减少人体辐射散热。(各表面平均温度与空气温度差,即 $t_B - t_N$)

地暖 0.3-1.6℃ (平均 0.6℃)、电热膜顶暖 0.5-4.3℃ (平均 1.9℃)、散热器 0.8-0.6℃ (平均-0.2℃)、热风 0-1.4℃ (平均-0.5℃)。

2、与其它供暖方式相比较为节能和可使用低品位热媒

(1) 由于垂直温度分布的差别,有效区域内相同温度时,平均温度最低。

(2) 由于可减少人体辐射散热,与对流供暖方式相比,可取得 2-3℃的等效舒适温度。

(2) 以上两项因素综合,节能幅度约为 10-20%。对于住宅,主要是等效舒适温度,节能幅度约为 10%。

3、有利于建筑装饰。

4、有利于实施分户热计量。

5、有利于隔声和降低楼板撞击声。

《住宅设计规范》规定:空气计权隔声量,应 ≥ 40 dB;楼板的计权标准化撞击声压级,宜 ≤ 75 dB。

6、有利于扩大应用塑料类管材。

塑料类管材与金属管道相比,由于其生产过程的低能耗和低污染、便于施工安装、价格有较大下降空间,以及在质量能确保和应用得当的条件下有较长使用寿命等优点,将会作为一个发展方向,得到广泛的应用。1999年十二月,建设部、国家经贸委、质量技术监督局和建材局,联合下达了《关于在住宅建设中淘汰落后产品的通知》,其中就要求逐步以塑料类管材替代金属管材。

7、经济比较并不占劣势

由于塑料类管材生产的发展和市场竞争,地暖的造价已呈大幅度降的趋势,已从按建筑面积计的 100 元/m²,下降到 60-70 元/m² 左右。

目前,以森德为代表的一批钢制散热器的价格约为 0.8-1 元/W,按分户热计量后考虑户间传热因素,设计耗热量指标 70-80W/m² 计算,约折合 60-80 元/m²,加上调节阀门、配件和管道,按建筑面积计的造价,已经不低于地暖了。

地板辐射供暖大致有以下的主要弊病:

1、仅适合于建筑热工条件较佳的节能住宅。不节能住宅地面温度超标,降低舒适度。

2、需占用空间高度至少 80mm,与不设置辐射供暖的室内其它空间形成一定高差,需增加地面荷载约 120kg/m²。

3、地面二次装修时,易被损坏。装修宜一次到位。

4、因对热媒温度和流量的要求不同,需设置单独热源系统。

5、因热媒温差较小,相应流量较大,热媒输送管道断面和输送能耗较散热器供暖系统,约增大一倍。

6 材料和施工市场状况堪忧,施工、调试和验收程序方面困难较多。不要片面追求低价位。近期审批施工资质。长远应向由正规施工企业统一施工方向发展。材料的随机抽样送检。

7、技术原理和设计基础资料环节,仍处在认识过程中,滞后于应用。

三、塑料类管材及其正确应用

1、建筑用塑料类管材、适合于地板辐射供暖的塑料类管材及其正确命名

PVC 聚氯乙烯管、PVC-C 聚氯乙烯耐热管、PE 聚乙烯管、LDPE 低密度聚乙烯管、MDPE 中密度聚乙烯管、HDPE 高密度聚乙烯管、PP 聚丙烯管。

适合于地板辐射供暖的塑料类管材

- (1) 交联铝塑复合 (XPAP) 管
- (2) 聚丁烯 (PB) 管
- (3) 交联聚乙烯 (PE-X) 管
- (4) 无规共聚聚丙烯 (PP-R) 管

2、管道强度计算各要素的函数关系及设计计算

管道在内压作用下，管壁任意一点将产生三个方向的应力，即：轴向应力、径向应力和环向应力，其中环向应力为最大。故以最不利条件即按环向应力加以分析。

管材的力学特性，即管壁厚、管径、可承受压力和许用应力之间的关系，无论是金属管材还是塑料类管材，都可用下式表示：

$$\sigma = P \times D / 2e \quad (1)$$

上式中： σ —管材环向应力 (MPa)； P —管内压力 (MPa)； D —管径 (mm)； e —管壁厚 (mm)

管材的许用设计应力 σ_D 应不小于管材环向应力，即： $\sigma_D \geq \sigma$

上式说明：

1、许用应力与管内压力成正比，即许用应力越大可承压越大；反之，管内压力越大要求许用应力越大。

2、许用应力与管径成正比，即许用应力越大可对应的管径越大；反之，管径越大要求许用应力越大。

3、许用应力与管壁厚成反比，即许用环向应力越大可对应的管壁厚越小；反之，管壁厚越小要求许用应力越大。

用以确定管壁厚度，可转换成以下形式：

$$e = P \times D / 2 \sigma \quad (2)$$

钢管等金属管道的使用寿命主要取决于腐蚀速度，使用温度对许用应力影响不大，例如：10 号钢的钢管许用应力，在较大的温度幅度范围内变化不大，温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ 时为 110.85MPa；温度 $= 150^\circ\text{C}$ 时为 109.87MPa；温度 $= 200^\circ\text{C}$ 时为 103.99MPa。但钢管等金属管道计算时，要考虑焊缝因素和腐蚀裕量，故公式成为：

$$e = (P \times D_N / 2 \sigma \times \Phi) + C \quad (3)$$

上式中： D_N 管内径 (mm)

3、塑料类管道与金属管道强度计算的主要区别是热媒的热作用和管材的蠕变特性

塑料类管材，同钢管等金属管道力学特性的区别，主要是应力的变化规律不同。在常用温度范围内，金属管的许用应力 σ 变化不大，温度对塑料类管材的许用应力 σ 则影响极大，冷态下的承压能力不能用以判断在长期使用条件下的耐久性。其使用寿命主要取决于不同使用温度对管材的累积破坏作用，概略地说，温度每提高 10°C ，使用寿命约缩短 2.5 倍，热作用使环应力逐步下降即发生管材的“蠕变”，以至不能满足使用压力而破坏。

塑料类管材在不同温度下的等应变蠕变特性曲线，可见北京市标准《低温热水地板辐射供暖应用技术规程》的附录。

从环应力特性曲线图可见，每一种塑料管材的许用应力，都会随时间的推移而下降，特别是随作用温度的升高而急剧下降。显然，应按使用温度确定许用应力，据以计算所需壁厚。同时，不能沿用钢管以公称直径标记设计管径的方法，应以“外径×壁厚”标记，并且考虑壁厚的显著差异选择管径。

塑料类管道不需考虑焊缝因素和腐蚀裕量，故仍采用式（1）和式（2）。

塑料类管道强度计算式形式常用：

$$\sigma/P = DZ/2e = (D - e)/2e = S \quad (4)$$

从式（4）可见，S 值是管材环应力与承压的比值，同时，它又只与管道尺寸有关。因此，在许用设计应力和系统工作压力既定的条件下，可以通过计算 S 值，便捷地确定不同管径对应的壁厚。附录中，给出了不同管材的 SCALC. MAX 值，根据 S 值应小于 SCALC. MAX 的原则，选择所选管材 S 系列。

塑料类管道的 S 值，是直径对壁厚的比值，由此可见：在管材许用应力确定后，S 值越小承压越高。

塑料类管道划分为 2, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0, 6.3, 8.0 和 10 共 8 个系列。每一种材质的塑料管一般只有中间的几个系列产品，S2 和 S10 系列一般不生产。

用于冷介质的管道，一般可直接选 S6.3 系列。

铝塑复合管只有对应于管径的一种壁厚。如：1014, 1216, 1620, 2025, 2632, 3240, 4150, 5163, 6075. 可根据其壁厚，判断其能否满足工程要求。

还有一种塑料类管道划分系列的方法，即所谓标准尺寸比 SDR.

$$SDR = 2S + 1 \cong (D - e) / e$$

4、塑料类管材的使用条件分级

由于管材在其全部使用期内，不可能始终是处在同一温度作用条件下，必然存在不同温度的时间分布。例如：供暖系统管材在非供暖期内的温度会近似于室温，即使在供暖期内也会因进行质调节而受不同温度作用。因此，上述各种塑料类管材对应于不同温度的等应变蠕变特性曲线，显然不能直接作为设计选用的依据，需要先按不同使用条件的温度作用频率，确定使用条件分级。

注：1—5 级是根据国际标准 ISO/10508:1995 推荐的方法，按欧洲奥、德、法地区典型使用条件的分级，3 级已一般不被采用。5A 级为北京市建筑设计研究院根据北京地区气象资料，针对热媒设计供水温度 95℃ 的系统，提出的一组数据，

根据上表各使用条件分级不同温度的综合热作用，可按 ISO13760 推荐的 Miner, s 规则，计算出各种塑料类管材确保 50 年使用寿命的许用应力，其数值如下表。

管材的许用设计应力 σ_D (MPa)

使用条件分级	1	2	4	5	5A	20℃/50 年	PB 管	5.18	5.04	5.46	4.31	3.39
10.92	PE-X 管	3.85	3.54	4.00	3.24	2.94	7.60	PP-R 管	3.09	2.13	3.30	
1.90	1.45	6.93	PVC-C	4.38	4.10		10					

注：

1. 上表系按 ISO13760 推荐的 Miner, s 准则, 计算出的确保 50 年使用寿命的管材许用设计应力, 其中 20℃/50 年的许用设计应力, 安全系数取 1.5, 只适合输送冷介质时采用。

2. 在以下最小壁厚选择表中, 当 SCALC. MAX 的计算值大于 10 时, 则直接取 20℃/50 年的许用设计应力作为 SCALC. MAX 值。即: 最小壁厚应不小于在常温条件下、系统工作压力 1MPa、使用寿命 50 年的壁厚。

3. 在以下最小壁厚选择表中, 提供了工作压力为 0.4、0.6、0.8 和 1.0 MPa 的数值, 当实际工作压力与此不同时, 宜进行计算选择。

4. 交联铝塑复合 (XPAP) 管的许用设计应力与 PB 管相近, 但由于尚未有国际标准, 为安全起见, 宜采用 PE-X 管的数值。

当然, 使用条件分级并不是硬性规定, 是按特定地区气候和典型使用条件计算所得的推荐性标准, 因此, 应按实际要求的使用寿命年限, 并根据使用情况, 分析使用寿命年限内不同温度的频率, 合理确定使用条件分级。

例如: 对于北京地区一般低温热水地板辐射供暖工程, 如按上述标准的 4 级选用管材和确定管壁厚, 即在共 50 年的总使用周期中, 运行温度 20℃共历时 2.5 年, 40℃共历时 20 年, 60℃共历时 25 年, 70℃共历时 2.5 年, 100℃的意外运行条件不超过共 100 小时, 显然是十分安全可靠的。

5 散热器供暖系统使用条件分级的合理确定散热器供暖系统的运行水温高于地板辐射供暖, 分户热计量户内系统将管道埋设在地面垫层内时, 由于缺乏适宜的标准, 北京市《集中供暖住宅分户热计量设计技术规程》中, 只能提出对管材的性能指标要求和选择计算, 应按不低于“使用条件分级”的 5 级。所谓 5 级是指: 在 50 年的总使用寿命周期内, 运行温度 20℃共历时 14 年, 60℃共历时 25 年, 80℃共历时 10 年, 最高运行温度 90℃共历时 1 年 (平均每年仅约 7 天), 100℃的意外运行条件不超过共 100 小时。这种使用条件级别, 反映了欧洲供暖期长和热媒温度低的特点, 适合于热媒温度 60-80℃、不高于 90℃的运行工况。我国的具体条件与此有较大差异, 对于通常热媒设计供水温度 95℃的系统显然并不适合。“使用条件分级”的 5 级, 约只适合北京地区热媒设计温度 85/60℃的系统。因此, 认为只要采用塑料类管材就可万无一失的认识是盲目的, 在多种技术条件不能确保时, 会留有許多隐患。

北京市建筑设计研究院根据北京地区的气象资料, 针对热媒设计供水温度 95℃的系统, 提出了“使用条件分级”5A 级的一组数据, 较“使用条件分级”的 5 级, 由于降低了各类塑料类管材的许用应力, 在相同管径和压力下较需选用较大壁厚, 按此计算, 有些管材在较高压力的系统中, 因无较大壁厚而不能采用。

由于采暖期的长短不同, 各地区会有较大的差别, 不同的地区应经深入计算论证, 提出当地的设计选用数据。为确保安全, 在认真进行强度验算的基础上, 要留有适度裕量。

在确定当地设计选用数据时, 还宜考虑以下有利和不利因素:

有利因素是: 由于各种原因系统实际配置的散热面积, 均不同程度地偏大于理论所需散热面积, 因此实际运行水温, 均可低于设计水温。例如: 对于设计水温 95/70℃的系统, 当偏大 10% 时, 运行水温约可为 90/65℃, 当偏大 20% 时, 运行水温约可为 85/60℃, 当偏大

30%时,运行水温约可为 82.5/57.5℃,当偏大 40%时,运行水温约可为 80/55℃。这是经理论推算和运行实践所证明的。一般系统的散热面积置,均会偏大 20%-30%。

不利因素是,目前的供暖期标准明显偏低,逐步延长供暖期,会是必然趋势,因此应考虑要能适应今后较长供暖期的热作用。

6、各种塑料类管材的比较可从以下几个方面进行各类管材的比较。

(1) 许用应力排序。在相同的使用条件分级和有效使用寿命条件下,各类管材的许用应力,大致为以下排列顺序:交联铝塑复合管,聚丁烯管,交联聚乙烯管,无规共聚聚丙烯管。

(2) 按市场价格的高低排列,正好大体上也是上述顺序。并非一定要选用许用应力高的管材,例如:实际使用寿命不需 50 年、或使用温度较低、或工作压力较低,就有可能选择许用设计应力较小的管材。

(3) 关键还是各类管材的有效质量控制。据塑料工业业内人士分析,聚丁烯管和无规共聚聚丙烯管的质量,主要通过原料的成份和品质控制。而交联聚乙烯管和交联铝塑复合管,除原料成份和品质外,其交联工艺对质量控制至关重要,正是交联工艺这一重要环节,使许多该类管材的质量失控。(PB 管——壳牌,PP-R 管——北欧化工。)

(4) 聚丁烯管和无规共聚聚丙烯管,是可以再生的材料,对环保较为有利。这两种管材还可采用热熔接的连接工艺,节省昂贵的连接配件。

(5) 管材的氧渗透的问题,也应有所考虑,与其它采暖系统共用同一集中热源水系统、且其它供暖系统采用钢制散热器等易腐蚀构件时,聚丁烯管、交联聚乙烯管和无规共聚聚丙烯管,宜有阻氧层,以有效防止渗入氧而加速对系统的氧化腐蚀。而交联铝塑复合管的中间层为增强铝管,可有效阻隔氧的渗透。

(6) 管材的纵向线膨胀问题,对于热管道应予以注意。钢管的线膨胀系数为 0.012 mm/m.K,塑料类管材线膨胀系数的概略值,按从小到大排列如下:

交联铝塑复合管 0.025

聚丁烯管 0.130

无规共聚聚丙烯管 0.180

交联聚乙烯管 0.200

由于较大的纵向膨胀,使管道受热后变形严重,因此不适合于明装。而埋设于混凝土垫层内的管道纵向膨胀受限,会转化为内应力,故在强度计算时需有适量安全系数。

管道受热后纵向膨胀形成的膨胀力,是伸长量、管材的弹性模量和管道截面积的乘积。

钢管的线膨胀系数是 0.012 (mm/m.K),而塑料类管材线膨胀系数的概略值,按从小到大排列如下:XPAP 管为 0.025;PB 管为 0.130;PP-R 管为 0.180;PE-X 管为 0.200。

当然,线膨胀系数大的管材受热作用后会有较大的热胀量。但塑料类管材的弹性模量远小于钢管,钢管的弹性模量为 $20.6 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2$,而例如 PP-R 管,在 20℃ 时仅为 80 kN/cm^2 ,95℃ 时又降低为 25 kN/cm^2 。因此,在管道截面积相同时,塑料类管材的膨胀力会远小于钢管。

塑料类管材的纵向膨胀特性,则应在敷设方式上有所考虑。塑料类管材在地面内埋设时纵向膨胀受限,会转化为内应力,在管道强度计算的安全系数中可以消纳,而明装时则会发

生较大的弯曲变形，且易受划伤而影响使用寿命。根据实际工程的问题和经验，北京市分户热计量试用图集中，只推荐在直埋（包括地面内或嵌墙敷设）时采用，非直埋的所有管道（包括明装或管道井内安装），仍推荐采用热镀锌钢管和螺纹连接，是很有必要的。

（7）耐低温性能问题，无规共聚聚丙烯管在 -10°C 环境条件下，会发生低温脆化，易在运输过程中损坏，而其它管材的脆化温度，可低 -70°C 。

因此，应根据工程的耐用年限要求、使用条件等级、热媒温度和工作压力、系统水质要求、材料供应条件、施工技术条件和投资费用等因素，经综合比较合理选择采用管材。

四、地板辐射供暖的系统构成和基本构造热源、室外系统和热媒控制装置（4.2.1-4.2.3条）

户内系统的热媒集配装置和分室温度控制（4.3.1条）

辐射供暖地板各构造层

基底

防潮层

绝热层

必要性 减少无效热损失

双向供暖问题 对结构的影响

材料及各项要求（3.4.1条） 密度 导热性能 吸湿性厚度 防火性能

热反射问题

加热管

布置方式

连接（能否有接头）

固定填充层作用 保护加热管和使地面温度均匀

厚度 管上皮 $\geq 30\text{mm}$

要求 粒径 标号 地面加固

防水层 防止地面水进入填充层和绝热层 防水层

寿命短于管道

五、对设计认识的误区和正确设计程序的一些问题

目前，地板辐射供暖工程的设计，几乎都是由专业从事地板辐射供暖的工程承包单位全权负责，这些单位并不具备合法的设计资格，其实际设计水平差距较大。而如前所论及，地板辐射供暖的技术原理和设计基础资料环节，大多套用不同途径的国外资料，与实际应用条件有较大差异，许多深层次问题，仍处在认识过程中。一般设计单位只是应开发建设单位的要求，提供按对流采暖方式的热负荷计算结果，对设计结果不负整体技术责任。因而，设计上存在许多问题，急待加以规范。

以下是应解决好的必要设计程序中的一些问题：

1 设计室温和计算室温和确定。

考虑等效舒适温度，按设计室温降低 2°C 作为计算室温。

2 按常规对流供暖方式进行负荷计算及其修正。

按计算室温计算负荷，不计算设有辐射供暖地板地面的传热量。

4 地面覆盖物的遮挡因素和房间地面有效散热面积。

参考文献：

[1]陆亚俊、马最良、邹严华.暖通空调.北京:中国建筑工业出版社,2002

[2]宗立华,塑料埋管地板辐射供暖的热性能分析,暖通空调,2000,30(1):6~8

[3]石兆玉。供热系统运行调节与控制。北京：清华大学出版社，1998.

[4]地暖通风及空气调节设计规范（2001年版、修订版）。

[5]实用供热设计手册。

[5]民用建筑节能设计规范。

作者简介：苏悦，男，1978年3月7日出生，工作单位：天津市东丽区供热站，籍贯：天津，1997年12月参加工作，2007年7月取得中央广播电视大学土木工程（管理）大学本科学历。联系方式：13902082873

天津市东丽区建设管理委员会财务科苏悦收

天津市东丽区利津路114号