

大体积辐射屏蔽混凝土施工技术研究

樊星宇

上海建工五建集团有限公司, 上海 200062

[摘要]辐射屏蔽是医疗建筑中的关键问题,因为辐射具有潜在的生物危害。本研究以工程实例为例,探讨了大体积辐射屏蔽混凝土的施工方法。主要方法包括材料优化、冷却水管系统和综合养护策略,以解决超厚混凝土墙体的温度控制和防裂问题。结果表明,通过优化混凝土配合比、即时防护覆盖和系统冷却,可显著减少温度裂缝,同时保持结构完整性。本研究实现了优异的温度控制,最大温差为 38.4℃,表面与内部温差为 8℃,均在规范允许范围内。三种方法被证明适用于类似的辐射屏蔽混凝土结构。可以为未来类似项目提供参考实例。

[关键词]辐射屏蔽混凝土;大体积混凝土;混凝土裂缝控制

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19187

中图分类号: TU528.35

文献标识码: A

Research on Construction Technology of Large Volume Radiation Shielding Concrete

FAN Xingyu

Shanghai Construction No. 5 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200062, China

Abstract: Radiation shielding is a key issue in medical buildings because radiation has potential biological hazards. This study takes engineering examples as an example to explore the construction method of large volume radiation shielding concrete. The main methods include material optimization, cooling water pipe system, and comprehensive maintenance strategy to solve the temperature control and crack prevention problems of ultra thick concrete walls. The results indicate that by optimizing the concrete mix ratio, immediate protective coverage, and system cooling, temperature cracks can be significantly reduced while maintaining structural integrity. This study achieved excellent temperature control, with a maximum temperature difference of 38.4 °C and a surface to internal temperature difference of 8 °C, both within the allowable range of the specifications. Three methods have been proven to be applicable to similar radiation shielding concrete structures, which can provide reference examples for similar projects in the future.

Keywords: radiation shielding concrete; large volume concrete; concrete crack control

引言

随着肿瘤发病率持续攀升及精准医疗技术的快速发展,放射治疗已成为恶性肿瘤核心治疗手段之一。医用直线加速器、质子重离子治疗系统等大型放疗设备的广泛应用,在显著提升治疗效果的同时,也带来了严峻的辐射防护挑战。X射线、 γ 射线及中子射线等电离辐射若屏蔽不当,将对医护人员、患者及周边环境构成潜在生物危害。因此,医疗建筑中放疗机房、核医学科室等关键区域的辐射安全设计,已成为医院建设过程中的核心议题。

当前,混凝土因其材料成本可控、施工工艺成熟、结构整体性好等优势,仍是最主要的实体辐射屏蔽形式。超厚墙体与大体量浇筑带来的水化热聚集,若温控不当则易引发温度裂缝,进而形成辐射泄漏通道,直接威胁屏蔽效能。此外,穿墙管线、模板拉杆等细部构造若处理失当,同样可能成为射线“逃逸”的薄弱环节。本文以上海市沪东区域医疗中心新建工程项目为背景,聚焦医院大体积防辐射混凝土施工技术,探讨穿墙节点等细部构造的防辐射处理方法,结合原材料特性与配合比设计,分析超厚墙体施工中的温度控制策略与裂缝防治措施;通过梳理现有工程经验与技术研究成果,旨在为医疗建筑辐射屏蔽结构的

精益化施工提供系统参考。

1 工程概况

沪东区域医疗中心新建工程位于沪东社区 Y000804 编制单元 11-04 地块,东至长岛路,西至浦东大道,南至马家浜及防护绿地,北至博兴路。用地面积 31485.6m²,总建筑面积 169800m²,其中地上建筑面积 114800m²,地下建筑面积约 55000m²。建设内容为,一栋医疗综合楼及其附属建筑。

具有结构屏蔽要求的结构占地面积约 740m²,其底板厚 1000mm 标高-9.3m、顶板板厚 2500mm、局部 2100mm,顶板面标高-0.75m;层高 7.150m;墙厚为 700mm、1000mm、1300mm、1700mm、1800mm、局部 3000mm,如图 1 所示。

2 施工要求

2.1 技术要求

直线加速器区域混凝土浇筑成型后,不得留有空洞、蜂窝,严禁产生贯穿裂缝。

2.2 材料要求

早期图纸要求使用重晶石混凝土,得益于建设单位设备选型,施工前变更为常规 C35 混凝土。正式施工前进行试配,确定混凝土参数如下表 1。

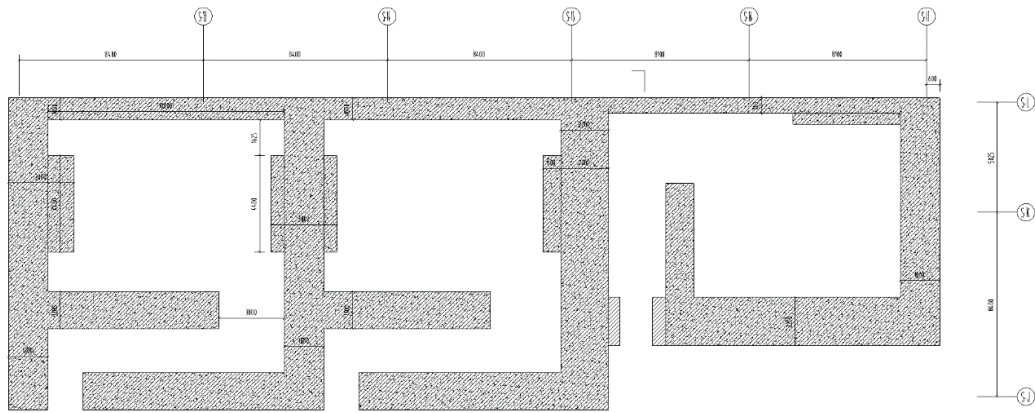


图1 直线加速器区域平面图

表1 混凝土参数表

材料名称	水泥 (P·042.5)	砂 (人工砂)	石 (碎石 5~25mm)	水 (自来水)	外加剂 (8322 高性能减水剂)	粉煤灰 (II级)	矿粉 (S95)
每方砼用量/kg	230	65	1020	165	3.85	85	70
重量比	1.00	3.33	4.43	0.72	0.017	0.37	0.7
坍落度/mm	150±30			砂率	43%		

3 施工工艺

3.1 模板工程

基于工程施工要求，本工程模板系统全部采用 915mm×1830mm×18mm 优质胶合板，厚度均匀、表面平整，可有效保证成型后混凝土表面观感质量及几何尺寸精度。次龙骨体系选用 40mm×90mm 规格方木，主龙骨采用 Φ48.3×3.6mm 双钢管并排设置，通过高强对拉螺栓与模板系统形成整体约束，确保在重质混凝土超高侧压力作用下模板体系不发生位移或变形。

模板支撑系统选用 B 型盘扣式钢管支架，承载力高、搭拆便捷。其中立杆采用 Φ48.3×3.2 钢管；水平杆及水平斜杆采用 Φ48.3×2.7 钢管，通过楔形销盘扣连接，确保水平刚度及整体稳定性；竖向斜杆选用 Φ42.4×2.5 钢管，沿支架外围及核心区域设置，以增强支撑体系的抗侧移能力。整套支撑系统经计算，具备足够的强度、刚度及稳定性，可满足本工程大体积混凝土浇筑工况下的承载要求，避免不均匀沉降，确保成型质量与施工安全。



图2 定制止水拉杆

在施工过程中，为确保屏蔽性能不受影响，传统施工中常见的孔洞必须杜绝。本工程墙体模板加固全部采用定制的一次性防辐射止水拉杆。允许在拆模时直接切断拉杆，确保其永久嵌入混凝土结构中，避免孔洞形成，同时有效维护结构的整体性和防辐射功能。

3.2 穿墙管线预埋

穿墙管线由屏蔽专业单位进行深化设计，遵循辐射防护最优化原则，管段多采用 U 型或斜向布置，避免直线穿越防护墙体以减少辐射泄露。所有穿墙管均须精准定位、与结构钢筋有效固定，并在混凝土浇筑前预埋到位，严禁事后开凿。预留洞口周边按设计要求加强封堵，确保屏蔽体连续完整。



图3 典型穿过防护墙预埋图

3.3 降温管、测温点布置、通水要求

大体积防辐射混凝土施工中，裂缝控制居于核心地位。为抑制水化热积聚导致的内表温差超限裂缝，采用预埋冷却水管循环降温技术。

冷却水管按矩形布置，选用 DN25 镀锌钢管，接头采用专用配套件连接并以水胶带密封止水。剪力墙部分设置三条回路，墙厚≤1.8m 居中设置，竖向间距 1.5m。墙厚

>1.8m 设置两层降温管，两层降温管均匀布置在剪力墙内，竖向间距 1.5m。混凝土浇筑 12h 后通入常温循环水，进出水口每 6h 交替换向，持续通水降温不少于 7d。专人负责水温监测，当进出水温差过大或水温与混凝土内部温差超过 25℃时，应提高进水温度或暂停供水。

测温时采用电子测温，将电子测温线固定在钢筋立柱上，分上中下预埋并标记好在混凝土中位置。

在水平方向上，测温点布置于混凝土的边缘、角部、中部，测点水平间距控制在 5m~10m，具体位置根据结构平面尺寸调整，且不少于 4 个断面。在墙体立面上，测点水平间距同样为 5m~10m，垂直方向间距控制在 3m~5m。

沿混凝土浇筑体厚度方向，每个测点至少布置表层、底层及中心温度测点。表层测点位于混凝土表面以内 50mm~100mm 处，底层测点位于浇筑体底面以上 50mm~100mm 处，中间测点间距不宜大于 500mm。

测温线埋设前做好保护，外露部分在混凝土浇筑前采用胶带包裹防护，测温期间注意避免扰动，确保数据连续准确，如图 4 所示。

3.4 混凝土浇筑

混凝土浇筑时严格控制施工连续性、均匀性与温升效应。浇筑前必须完成模板、钢筋及预埋件隐蔽验收，清除模板内杂物并充分湿润。采用分层分段连续浇筑，每层厚度控制在 300~500mm，确保上层混凝土在下层初凝前覆盖，避免形成冷缝。振捣应快插慢拔，移动间距不超过振捣作用半径的 1.5 倍，重点控制墙柱根部、预埋件及洞口周边密实度，防止骨料下沉或漏振。

由于泵送混凝土表层水泥浆较厚，浇筑后易产生塑性收缩裂缝，因此需在混凝土初凝前采用刮尺抹平、木抹子搓压，促使表层骨料均匀下沉，提高密实度，减少塑性变形与水分蒸发，有效闭合收水裂缝，并为后期养护创造条件。待混凝土终凝前，进行不少于三遍的搓压处理，

最后一遍抹压时机以终凝前为准（可通过手压法判断），确保表面平整密实，消除收缩微裂纹，提升混凝土早期抗裂性能。

3.5 混凝土养护及降温管封堵

浇筑后立即覆盖塑料薄膜与保温被，减少内外温差；加强洒水保湿，剪力墙等竖向结构进行带模养护，养护期不少于 14d；同步开展温度监测，动态调整保温措施，确保里表温差≤25℃，防止温度裂缝。

当混凝土内部与表面温差<25℃、且表面与大气温差≤20℃时，即终止通水。随即对冷却管进行压浆填充，浆液采用强度等级不低于 42.5 的普通硅酸盐水泥，水胶比≤0.3，流动度 30~50s，体积收缩率<1%。压浆应连续饱满，出浆端检测合格后及时封堵，防止管道后期锈蚀，保障结构整体质量。

4 测温数据统计分析

为实时掌握混凝土内部温度发展规律并指导养护措施，开展了连续温度监测。监测期间的环境条件为：浇筑当日室外气温介于 5℃至 10℃之间，混凝土入模温度严格控制在 25±3℃范围内，以保证施工一致性。

测点布置遵循空间均匀性与厚度方向代表性的原则，在结构板不同区域选取 18 个特征位置，每个位置于表面（距顶面约 5cm）、中层（1/2 厚度处）及内部（距底面约 5cm）分别埋设温度传感器，共计 54 个测点。在结构墙中设置 13 个特征位置，每个位置于左（距左侧墙面约 5cm）、中层（1/2 厚度处）及右（距右侧墙面约 5cm）分别埋设温度传感器，共计 39 个测点。墙板合计 93 个测点。数据采集自混凝土浇筑完成即刻开始：前 5d（升温及降温初期）以 4h 为间隔连续记录；待观测到温度变化趋于平缓后（约第 5d 起），将采样间隔延长至 8h，直至浇筑后 156h（即 7d）监测结束。累计获得有效温度数据 3093 组，完整覆盖了整个水化热升温——平稳降温周期。

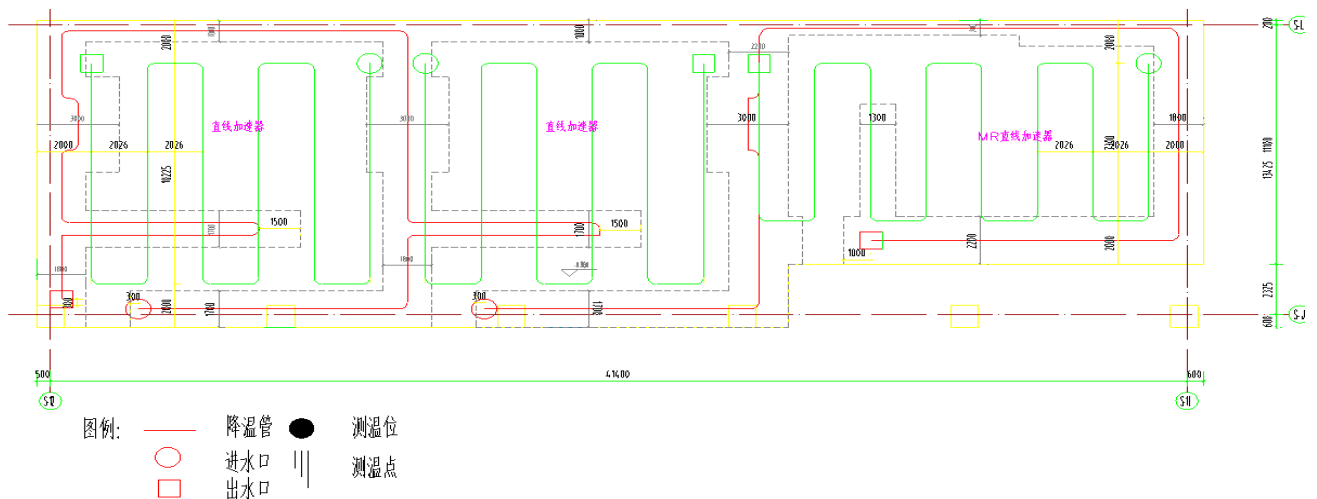


图 4 降温管、测温点平面布置图

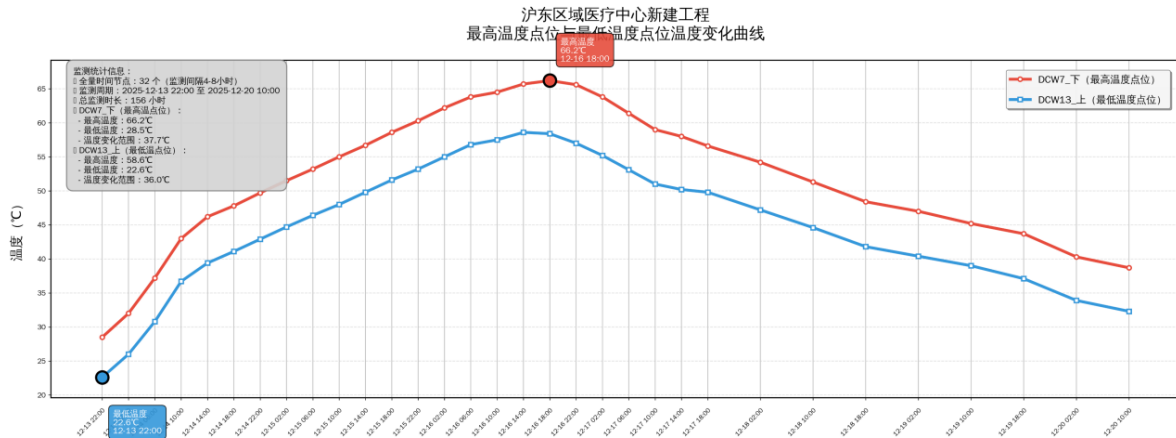


图5 特征点温度变化曲线

为揭示温度变化的极值特征，从全部 93 个测点中筛选出平均温度最高与最低的两个代表性点位，对其温度时序数据进行深入分析，以期为同类工程提供参考依据，如图 5 所示。

测温曲线呈现先快速升温、达到峰值后缓慢降温的典型大体积混凝土温度变化规律：

监测结果表明，混凝土浇筑后进入显著升温阶段（12月13日至12月16日）。浇筑完成 12h 内温度上升最为迅速，升幅约 18℃；之后升温速率逐渐减缓，于浇筑完成后 68h 达到最高温度 66.2℃。全过程最大温度变化幅度为 38.4℃，满足相关规范对温升控制的要求。

降温阶段（12月16日至12月20日）各测点温度均呈现缓慢下降趋势，在此过程中，混凝土内部与表面最大温差约 8℃，亦符合规范对里表温差的控制标准。

5 结论

通过对沪东区域医疗中心新建工程加速器顶板大体积混凝土浇筑后 156h 内的连续温度监测，系统分析了混凝土水化热温度的发展规律与温控效果。监测结果表明，混凝土浇筑后温度场演化呈现典型的“快速升温-缓慢降温”双阶段特征。加速器区域测温曲线表明对于该区域大体积混凝土浇筑的温度控制基本满足规范要求，取得的较好的效果。

上述良好温控效果的取得，主要归因于以下综合措施：一是优化混凝土配合比设计，通过掺加矿物掺合料降低水水泥水化热总量，同时严格控制入模温度在 25±3℃区间；二是强化养护管理，浇筑后立即覆盖保温保湿材料，有效降低内外温差与表面失水速率；三是布设冷却水管系统进

行循环降温，使水化热得以有序释放，避免温度应力集中。三者协同作用，显著降低了温度裂缝风险。

本文通过实例验证了“配合比优化+保温保湿养护+通风冷却”三位一体温控体系在大体积混凝土工程中的适用性与有效性，可为同类医疗辐射屏蔽结构或大体积混凝土工程的施工提供实践参考。建议后续工程中进一步结合数值模拟手段，优化冷却水管的布置参数与通水时机，以提升温控效率与经济性。

[参考文献]

- [1]李国耀,王腾.基于形态学处理与特征分析的混凝土裂缝检测研究[J].建筑结构,2020(2):78.
 - [2]沈笑笑,胡家兵,张金龙,等.大体积混凝土温度裂缝成因分析及控制方法[J].广州建筑,2024(9):66.
 - [3]程鹏.大体积混凝土水化热分析及施工控制[J].城市建设理论研究(电子版),2024(34):56.
 - [4]中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土施工标准:GB 50496-2018[S].北京:中国计划出版社,2018:2-3.
 - [5]朱伯芳著.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
 - [6]Zhang, G., Cao, F., Li, T., et al.State of the art on prevention and control measures of thermal cracks in mass concrete[J].Sustainability,2025,17(24):113.
- 作者简介：樊星宇（1993.4—），毕业院校：格拉斯哥大学（University of Glasgow），所学专业：土木工程，当前就职单位：上海建工五建集团有限公司，职务：项目技术负责人，职称级别：工程师。