

医用直线加速器治疗室大体积混凝土裂缝控制技术研究

高斯佳

北京大学第三医院秦皇岛医院, 河北 秦皇岛 066000

DOI:10.61369/ETQM.2026030031

摘 要： 医用直线加速器治疗室因屏蔽需求需采用大体积混凝土结构，其内部水化热与收缩应力往往导致裂缝产生，从而影响辐射屏蔽效果与结构耐久性。本研究围绕裂缝控制这一关键技术，分析大体积混凝土的温度场特征与应力演化规律，构建适用于治疗室结构的裂缝预测与调控方法。通过材料优化、浇筑工艺改进及温控措施协同应用，形成一套保障结构完整性的综合控制技术，为医疗场所的大体积混凝土工程提供可实施的技术路径。

关 键 词： 大体积混凝土；裂缝控制；医用直线加速器；治疗室；温度应力

Research on Crack Control Technology of Large Volume Concrete in Medical Linear Accelerator Treatment Room

Gao Sijia

Peking University Third Hospital Qinhuangdao Hospital, Qinhuangdao, Hebei 066000

Abstract： Medical linear accelerator treatment rooms need to adopt large-volume concrete structures due to shielding requirements. The internal hydration heat and shrinkage stress often lead to cracks, thereby affecting the radiation shielding effect and structural durability. This study focuses on the key technology of crack control, analyzes the temperature field characteristics and stress evolution laws of mass concrete, and constructs a crack prediction and regulation method suitable for treatment room structures. Through the coordinated application of material optimization, pouring process improvement and temperature control measures, a comprehensive control technology for ensuring structural integrity has been formed, providing an implementer technical path for large-volume concrete projects in medical facilities.

Keywords： mass concrete; crack control; medical linear accelerator; treatment room; thermal stress

引言

医用直线加速器治疗室在建设中对辐射屏蔽的要求极为严格，大体积混凝土成为主要结构材料。随着水化反应的持续推进，内部温度不断升高并产生显著梯度，使结构处于复杂的应力环境中。一旦出现裂缝，将削弱屏蔽性能并影响结构的长期稳定，因此裂缝控制成为工程设计与施工中的关键环节。近年来，大体积混凝土温控技术和施工方法不断发展，为治疗室结构提供了新的优化手段。围绕裂缝形成机理、应力调控策略与可实施技术路径的研究，将为此类医疗建筑的安全构建提供更可靠的科学依据。

一、大体积混凝土裂缝形成的关键影响因素

大体积混凝土在医用直线加速器治疗室中承担着屏蔽与承载双重要求，结构尺寸巨大、浇筑厚度高，使其在凝结硬化过程中易形成温度梯度和体积变形差异。混凝土内部因水化反应释放大热量，中心温度持续升高，而外层受环境散热影响温升受限，温差扩大导致拉应力集中^[1]。治疗室屏蔽墙体往往厚度超过常规建筑数倍，水化热的累积效应更为明显，若温控措施不足，易在早龄期形成微裂纹并逐步扩展。混凝土材料配比高水胶比、不合理的骨料级配或高热水泥的使用，会加剧水化峰值温度，使内部

温度场变化更加剧烈，从而提升裂缝产生概率。

治疗室结构的施工特征同样影响裂缝的形成。浇筑区域封闭性强，施工空间有限，散热路径受墙体厚度和室内环境条件限制，使温度释放速度偏慢。由此引发的持续高温状态会在混凝土内部形成复杂的温度应力分布，外部降温后产生体积收缩，与内部尚处于膨胀状态的区域形成应变差异。此外，由于辐射屏蔽要求严苛，墙体通常采用高密度混凝土，其导热性能与普通混凝土存在差异，热量在结构内部存留时间更长，温度梯度更难平衡。施工过程中若出现浇筑间歇、保温层铺设不均或模板刚度不足，也可能导致局部温差集中，使裂缝产生位置具有随机性和隐蔽性。

个人简介：高斯佳（1984.07—），女，汉族，河北承德人，本科，高级工程师。15年专注于建筑设计与工程管理领域，深耕三甲医院及专项医疗设施建设，精通净化工程、防辐射工程、医疗气体系统等特殊工艺，在装配式建筑设计施工、BIM全周期应用等方面实践经验丰富。长期推动绿色智慧医院建设。

材料收缩与外界条件变化亦加剧裂缝的发展趋势。混凝土干缩、化学收缩、温度收缩在不同阶段叠加，使结构在硬化后期仍处于持续变形状态。治疗室作为医疗建筑，其内部湿度、通风条件及长期运行的空调系统都会影响混凝土水分蒸发速率，若环境控制不稳定，将导致表层干缩速率加快，形成贯穿性裂纹风险。钢筋分布在屏蔽墙体中较为特殊，因需满足屏蔽设计和受力要求，钢筋构造布置密度较大，若混凝土浇筑及振捣不充分，会造成局部骨料堆积或空隙，使收缩变形分布不均，进一步削弱结构抵抗裂缝的能力。多种因素叠加，使大体积混凝土在治疗室工程中面临更复杂的裂缝形成机制。

二、治疗室结构温度场与应力变化特征分析

治疗室大体积混凝土在硬化过程中形成的温度场具有显著的时空不均性，水化热累积使核心区温度不断升高，而外层在环境冷却作用下温度变化缓慢，呈现出明显的梯度分布。温度峰值出现的时间、峰值幅度以及降温速率受混凝土厚度、配伍材料特性及施工环境条件共同影响。当核心区与表层的温差超过材料的临界允许范围时，结构内部会出现拉应力集中，使潜在裂缝萌生点逐渐形成^[9]。在治疗室这种厚壁封闭结构中，散热受限导致温度下降过程延长，热量滞留使混凝土长期处于高温状态，温度场的演变更加复杂，对后期结构稳定性构成挑战。

温度场变化引起的应力分布也是治疗室大体积混凝土裂缝风险的重要来源。随着混凝土降温，体积出现收缩趋势，而内部区域仍保持较高温度并呈现膨胀态，使两者之间产生反向变形约束，导致拉压应力交替分布。若结构外侧降温速度远大于内部区域，应力集中现象会更加突出，特别是在厚度突变部位、门洞周边、钢筋密集区易形成应力峰值。治疗室隔间、机房墙体以及转角区域通常几何形态复杂，导致应力路径呈现多向性，复杂应力叠加使裂缝走向难以预测。高密度混凝土因其导热系数与弹性模量均高于普通混凝土，使应力响应更加敏感，在温度场变化过程中内部约束能力增强，应力峰值出现频率更高。

施工过程亦影响温度场与应力的演化。浇筑顺序、分层厚度、模板保温性能以及温控措施的执行水平都会改变温度场传播方向和热量积累模式。治疗室内部施工环境封闭度较高，通风条件有限，温度释放路径受结构边界条件强烈控制，形成具有方向性的热流分布。当外界环境温度差较大或浇筑过程中存在时间间隔，混凝土早龄期的应力状态会形成阶段性变化，使不同浇筑体之间产生界面温差和附加应力。若保温保湿措施配置不合理，表层降温速度过快，应力将集中在浅层区域，使表面微裂纹在短期内不断扩展。温度场演化与应力变化相互影响，构成治疗室大体积混凝土裂缝形成的重要动力机制，也为后续的控制技术提供了关键分析依据。

三、大体积混凝土裂缝风险的预测与评估方法

大体积混凝土裂缝风险的预测与评估依赖对温度场、材料性

能和结构约束条件的综合分析，通过量化手段判断裂缝产生的可能性与发展趋势。水化热释放过程是影响早龄期温度变化的核心因素，预测模型通常基于水泥水化动力学与热传导方程，构建三维温度场模拟，用以推测不同龄期的温度峰值和温差分布^[9]。治疗室高密度混凝土因掺入重骨料，其比热容与导热系数与普通配合比存在差异，在模型中需进行参数修正，以确保预测结果的准确性。通过计算温度演化曲线，可识别潜在的温差敏感区，为后续风险评估提供基础数据，使裂缝风险在硬化早期即可被识别。

裂缝预测不仅关注温度变化，还需评估温度应力与收缩应力的耦合作用。采用有限元方法模拟结构在降温阶段的应力分布，通过对比混凝土抗拉强度与计算得到的拉应力，判断是否存在超过材料极限的区域。治疗室墙体厚度大、边界约束强，局部构造复杂，使应力集中现象更具隐蔽性，因此模型中需考虑施工缝、洞口边缘及钢筋布置对应力路径的影响。早龄期混凝土的弹性模量、抗拉强度和徐变特性均处于动态变化状态，评估时需采用龄期相关参数，以体现材料性能随时间的演化。通过建立裂缝敏感系数，可将结构各区域的风险等级可视化，为关键部位预防措施的布置提供依据。

基于监测数据的实时评估亦是治疗室大体积混凝土裂缝风险管理的重要组成部分。温度计埋设、混凝土应变计和表面位移监测系统能够持续记录内部温度与应变变化，通过与预测模型进行比对，修正计算误差，使风险评估更加贴合实际情况。当监测数据出现异常梯度或应变突变时，表明结构内部存在潜在裂缝萌生趋势，可结合统计模型或神经网络算法进行裂缝概率分析，形成动态预警机制。此外，通过对早龄期施工过程、保温措施及湿度控制的记录数据进行分析，可进一步评估外部条件对裂缝风险的影响程度，使预测结果涵盖更多实际变量。预测与评估体系的构建，使大体积混凝土裂缝控制由经验判断转向量化分析，为治疗室结构的安全性提供可靠依据。

四、适用于治疗室的大体积混凝土裂缝控制技术策略

治疗室大体积混凝土的裂缝控制依赖材料设计、浇筑工艺与温控措施的协同配置，通过改善水化热释放行为和降低早龄期拉应力来稳定结构整体性能。为削弱水化热峰值，可优先采用低水化热水泥、掺入矿物掺合料并优化骨料级配，使材料体系形成较缓的放热过程，减少内部温度骤升带来的应力集中^[10]。高密度混凝土因屏蔽需求而使用重骨料，其导热性能与普通骨料不同，在配合比设计中需严格控制胶凝材料用量与水胶比，使材料的热 - 力性能更加稳定。通过加入减缩剂、膨胀组分或纤维，可提升混凝土内部的微观约束能力，使裂缝萌生阶段的应变得以分散，降低宏观裂缝形成概率。

在浇筑与成型阶段，合理的工艺控制能显著调节温度场与应力分布。连续浇筑方式能够减少施工缝产生的界面温差，使结构整体受热更加均匀；分层厚度和浇筑速度的控制可限制内部水化热的累积速度，使降温过程趋于平缓。针对治疗室封闭空间散热

受限的特点，可在模板外侧配置保温层，延缓表层迅速降温导致的拉应力集中，同时在必要时对混凝土进行内部冷却，通过埋设冷却管或循环冷水降低核心区温度峰值，使温度梯度保持在允许范围内。振捣、收面及早期表面覆盖材料的使用，也能改善表层水分蒸发条件，使干缩引起的表裂倾向得到有效抑制。

温控与后期养护措施在裂缝控制体系中具有关键作用，通过对温度变化和湿度条件的调节，使结构应力状态保持稳定。治疗室厚壁结构应在浇筑后持续进行保温保湿，使降温速率与内部温度衰减曲线保持一致，以减少外层与内层的收缩差异。自动化监测系统可实时记录温度场与应变变化，当监测曲线显示异常趋势时，可及时调整降温速度、加密保温层或延长湿养时间，使裂缝萌生条件被削弱。对于应力集中的特殊区域，可配置附加钢筋或设置柔性缓冲层，使局部变形受力重新分配，从而提升整体抗裂性能。通过多项技术策略的耦合应用，使治疗室大体积混凝土在硬化过程中的温度波动和应力效应得到有效控制，为裂缝的预防奠定可靠基础。

五、裂缝控制技术应用成效与体系完善路径

大体积混凝土裂缝控制技术在治疗室工程中的应用，使早期温度峰值明显下降，结构内部温差得到有效缓解，裂缝敏感区域的应力水平呈现可控状态。通过优化配合比与调整水化热释放曲线，材料体系的热稳定性增强，使核心区温度上升更加平缓，外层降温速度也因保温措施的介入而得到调节^[1]。监测数据显示，温度梯度的变化趋势趋于线性化，局部应变突变现象减少，表层微裂纹的产生频率显著降低。高密度混凝土在控制技术作用下表现出更均匀的温度场分布，使屏蔽墙体的整体性得以维持，为治疗室辐射防护提供更加可靠的结构基础。

裂缝控制措施的组合使用，使治疗室结构的变形协调性得到

提升。通过连续浇筑、合理分层和保温体系的构建，施工阶段产生的界面温差被压制，厚壁结构内部应力分布更加均衡。内置冷却系统在降温高峰期发挥作用，使热量向外传导路径得到优化，从而避免核心区长期处于高温状态。后期湿养措施进一步削弱干缩效应，表层水分蒸发速率降低，使浅层裂缝的发展趋势得到抑制。在应力集中的转角、洞口及钢筋密集区，通过局部强化配筋或采用柔性缓冲材料，使变形吸收能力提高，结构整体抗裂性能表现更加稳定。多点监测数据的比对结果显示，应力峰值位置向深层区域转移，浅层结构的裂缝产生条件被削弱。

裂缝控制体系的完善路径依托监测反馈与技术迭代，通过不断修正参数模型与施工策略，使控制效果具备持续优化的可能。温度场与应力场的实时数据为技术体系的修订提供依据，可根据监测曲线调整保温时长、冷却流量、施工节奏和养护程序，使不同施工季节的风险差异得到补偿。材料性能数据库的建立，使配合比选择与添加剂使用更加精准，结构模型中的热 - 力参数得以动态更新。施工过程记录的工况参数、环境条件与结构响应之间的关联性，通过算法分析后可形成新的控制逻辑，推动裂缝控制体系向智能化方向发展，使治疗室大体积混凝土在复杂条件下仍能保持稳定的组织结构与可靠的屏蔽性能。

六、结语

大体积混凝土在医用直线加速器治疗室中的应用凸显了裂缝控制的重要性，从温度场演化到应力分布再到施工技术的协同优化，各环节形成了系统化的控制逻辑。材料设计、温控措施与监测手段的综合运用，使结构在早期期的风险得到有效抑制，厚壁屏蔽体系的完整性与稳定性得以保障。随着控制策略的不断深化，治疗室大体积混凝土的安全可靠性逐渐提升，为辐射防护基础设施的建设提供了坚实支撑。

参考文献

[1] 周建文. 防潮海堤挡浪墙大体积混凝土温度裂缝控制研究 [J]. 工程建设与设计, 2025, (22): 133-135.
[2] 苏佩, 刘虹延. 大体积混凝土结构水化热影响因素及施工应用研究 [J]. 内江科技, 2025, 46(11): 57-58.
[3] 李春雷, 梅强. 水库大坝设计中大体积混凝土裂缝诱因及防控措施 [J]. 中国水运, 2025, (22): 91-93.
[4] 周星宇, 杜红秀, 武麒麟, 等. 大体积自密实混凝土钢管柱变形性能研究 [J/OL]. 太原理工大学学报, 1-7[2025-12-13].
[5] 卢常达. 超高层建筑大体积混凝土裂缝智能监测技术应用分析 [J]. 山西建筑, 2025, 51(23): 103-107.