

科研装置辐射防护的建筑设计关键技术研究

The Key Technologies Research of Architectural Radiation Protection in Scientific Research Facility

撰文 潘嘉凝 上海建筑设计研究院有限公司

摘要 随着国家综合科技实力的提升,我国自主设计、建造大型科学装置类研究平台的能力也在不断加强,并逐步被国际所认可。在这类项目的建筑设计中,辐射防护技术是非常基础和重要的内容。结合对我国重大科学工程上海光源工程以及近年来一些类似项目的辐射防护建筑设计关键技术研究,阐述科研装置建筑辐射防护的设计要点,以供类似项目的建设借鉴参考。

关键词 辐射防护 建筑技术 人员安全

1 前言

上海光源同步辐射装置是我国迄今为止建成的规模最大的科学装置和多学科研究平台,项目自2009年5月投入使用以来,促进了我国多个学科快速发展,亦使我国的结构生物学研究步入世界研究的前列。

设计、建造此类科研建筑,必须有相应的辐射防护技术作为安全保障。从衡量辐射防护等级的职业照射标准(对工作人员所受职业照射上限值的控制指标)来看,我国上世纪50年代的国家标准150毫希弗/年(150mSv/y)几乎是现今此类科研装置的30倍,这一演变充分体现了伴随着社会进步、技术进步及经济发展,人们的自身安全意识、环境意识都大幅提升,对辐射防护技术的精细化发展也提出了更高的要求。

2 辐射防护设计原则

ALARA原则(As Low As Reasonably Achievable)是国际上辐射防护设计的最基本原则,要求辐射类项目对人员的照射应做到合理可行、尽可能低。这条原则中的合理(Reasonably)可以理解为符合国际或国家的标准,“可行(Achievable)、尽可能低(Low)”即根据各国、各地具体的经济、技术等综合实力和水平来为“安全”投资。这条原则看似灵活,但实际对执行者具有非常高的要求,考验决策者对“度”的把握能力,不仅要有合理的科学定位(安全且不浪费),同时还必须包含一定的前瞻性和公众性视角。

在辐射防护环节,建筑师真正参与的部分主要是整体屏蔽系统的平面形式优化,人行迷宫、货物进出通道以及屏蔽墙贯穿部位的平面

布局及构造做法等。虽然不直接参与确定设计标准和具体屏蔽墙厚度的计算,但如何在充分理解工艺要求及原则的基础上,体现建筑技术与艺术水平,是建筑师的责任。“正确的辐射屏蔽理论,只能也只有通过建筑形式(如构造设计)和材料(如使用的混凝土成分)以及施工工艺体现出来。”上海光源工程辐射防护专家曾这样对我们说。

科研装置类项目的建筑设计往往会遇到一系列非常庞杂、繁复的工艺要求,其中的很多内容需要与工艺专家充分沟通的基础上,由建筑师自己来挖掘和体悟。从某种意义上说,好的建筑师就是一位好的“翻译家”,用最合理贴切的建筑语汇来诠释、回应工艺需求。

3 科研装置项目特点和社会意义

上海光源工程是我们设计的第一个此类科研建筑。项目位于上海浦东张江高科园区内,从前期建筑设计介入到建成出光历时近5年时间。主体建筑占地35500m²,为环形建筑。实验装置部分由100MeV电子直线加速器隧道、3.5GeV增强器隧道、3.5GeV储存环隧道组成,涉及大量辐射防护的设计内容。装置建成4年多来,上海光源以安全的运行、优异的性能获得国内外同行的广泛认可,成为国际上性能指标领先的中能第三代同步辐射光源之一。

我国一系列大型科研装置类建筑的陆续立项和建设,意味着此类建筑在国家科技实力提升方面将起到越来越广泛的作用。此类科研装置一般都由一个或数个加速器隧道组成,隧道内的装置设备承担从光束线注入、加速、调节到出光的全过程运行。几乎所有的辐射防护技术都围绕隧道区域部署,主要科研装置所处的“隧道”其实就是装置的整体屏蔽“壳”。

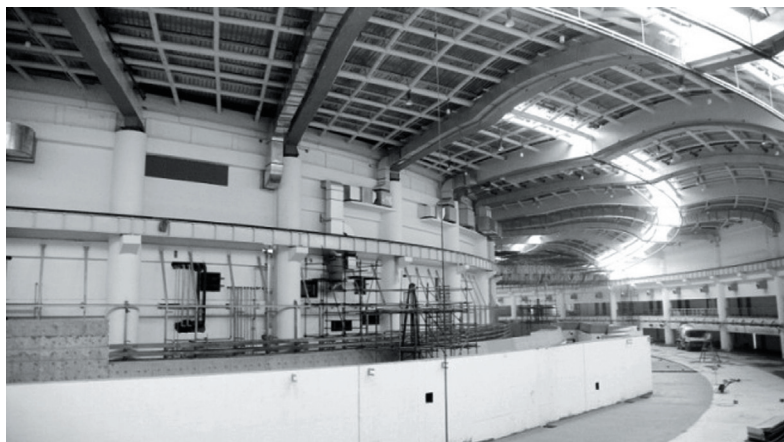


图1 建设中的上海光源主体建筑储存环隧道



图2 建成后的上海光源主体建筑实验大厅

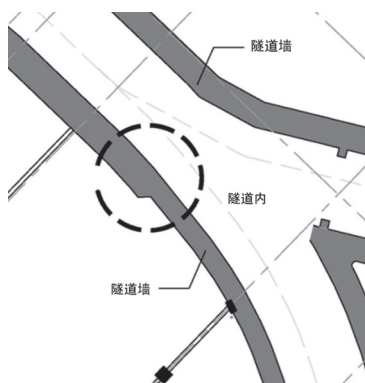


图3 隧道墙内平

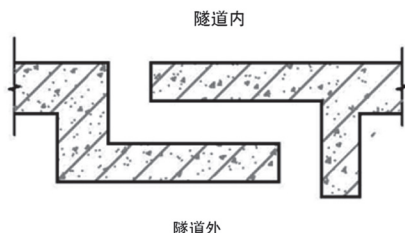


图5 人行迷宫平面

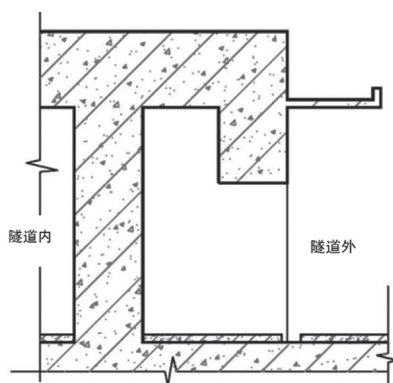


图6 人行迷宫剖面

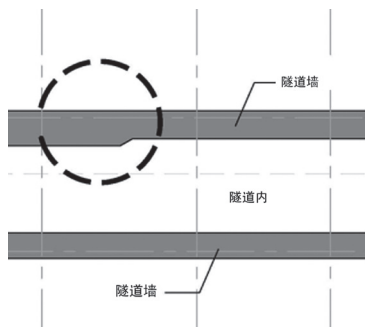


图4 隧道墙外平

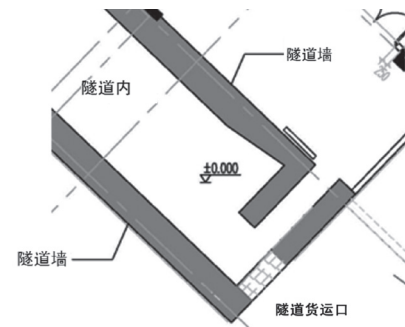
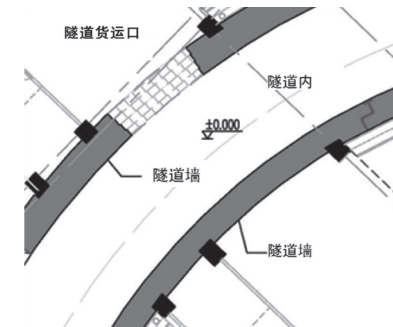


图7 隧道墙上的货物进出通道——可拆卸的屏蔽墙（环形、末端）



4 整体屏蔽与局部屏蔽

隧道墙的混凝土密度略高于普通混凝土墙体，并在局部使用重晶石混凝土块和少量铅砖预埋加强。隧道墙（含顶面）的厚度计算一般由辐射防护专家计算确定，辐射强度是决定隧道墙厚度的主要因素，不同项目、不同隧道在隧道墙的厚度上都会存在差异。从经济、科学的角度在整体屏蔽的关键部位使用一些局部屏蔽，可以避免加大整个屏蔽墙的厚度，不仅造价经济，还节约了项目占地。项目中同一隧道、同一侧隧道墙厚度有差异是局部屏蔽加强的缘故。

从建筑设计的角度回应这一墙体厚度的改变，就会产生“隧道墙内平”或“隧道墙外平”两种方案。这两种方案比较直观的差异在于“内平”有利于内部大量设计管线的敷设，而“外平”可以使外墙的保温、立面设计少受制约（由于隧道内温度控制要求严苛，隧道墙保温常采用砌双墙，两墙之间设空气夹层的做法）。

从目前实际项目的设计经验来看，“隧道墙内平”的布局方式适用于建筑面积紧张、隧道内管线数量多的项目。隧道墙的局部加强一般在 100~500mm 不等。由于隧道的总体长度一般都在百米以上，所以采用严格按照隧道所需宽度叠加相应隧道墙厚度的做法，可以实现建筑面积的节约，当隧道墙的外侧还有其他功能用房时，建议优先选择此方案。

从辐射防护的效率来说，项目后期的局部屏蔽加强宜做在隧道内侧。因此对于未来有装置改造要求的项目，“隧道墙外平”可以尽最大可能为隧道内部留有余地，为未来变化提供转换空间。当隧道墙直接担当建筑外墙时，此方案有利于外墙保温措施的选择和落实。

在隧道内部一般设置单侧的排水地沟，这是为了满足隧道内应急排水的需要。但隧道内冷却水系统的事故排水往往含有活化颗粒（即含辐射成分），必须设独立系统，将含辐射的工艺废水统一排入衰减池，经检测达标后才能正常排放。排水沟的设置应综合考虑穿越隧道内外

的各类设备管沟，以及衰减池的设置区域。隧道墙局部屏蔽加强的区段要减少各类管线的穿越，衰减池也尽量避开此区域设置。

5 人流、物流通道的辐射防护

一个好的整体屏蔽设计只有同局部屏蔽设计以及人流、物流通道、贯穿孔道的细部屏蔽设计相结合，才能达到整体辐射安全的目的。处理屏蔽墙上贯穿通道、孔洞辐射防护的根本思想是：通过屏蔽设计使得由于贯穿通道而被削弱的辐射防护条件重新得到恢复甚至加强。

此类科研装置项目隧道部分的人行通道一般都采用迷宫的方式，包括国外类似案例也是如此。虽然迷宫式人行通道占地较大，但从实施难易程度、经济性、安全可靠等角度还是有着明显的优势的。隧道迷宫开口方向应与束流入射朝向相反，不能让直接辐射达到迷宫的内表面。迷宫墙的厚度设计则必须做到使迷宫的任何一面或两面墙的厚度之和不小于此迷宫相邻的屏蔽墙厚度。

在项目人行迷宫位置和数量的设计中，除了考虑工艺及辐射防护要求外，还要考虑检修期隧道内工作人员的疏散安全问题，并在平面布局中结合隧道周边的辅助设备、建筑柱网、人行区域、实验线站分布等进行综合全面的考虑。

每个隧道一般至少设有一处可供货物进出的通道，考虑货物的体量较大，最常见的做法是选择隧道内辐射量小的部位设置一段可拆卸的屏蔽墙，待隧道内设备安装完毕后实施封堵。直线形隧道的货物通道一般设置在隧道的末端处，环形（闭合）隧道的货物通道一般利用某段侧墙设置。可拆卸的屏蔽墙段还能满足未来装置设备大修或部件替换等的运输要求。

上海光源工程的储存环隧道受平面布局限制，采用了局部顶板可拆卸的方案，按隧道顶板的计算厚度，设置两层混凝土块板，每块混凝土板的体积都经过计算并有相应编号，以保证隧道顶部打开时，隧道顶板的堆放不会对建筑或装置造成不利影响。上下层板块必须错缝

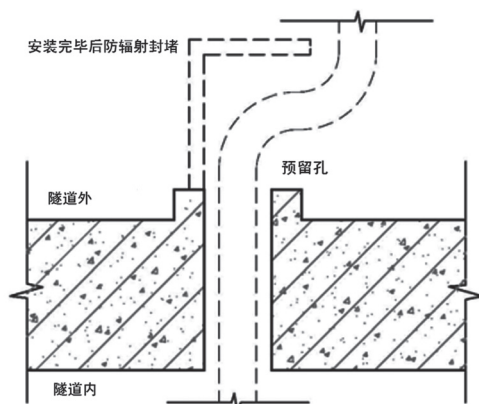


图8 预留孔洞的管线穿越方式

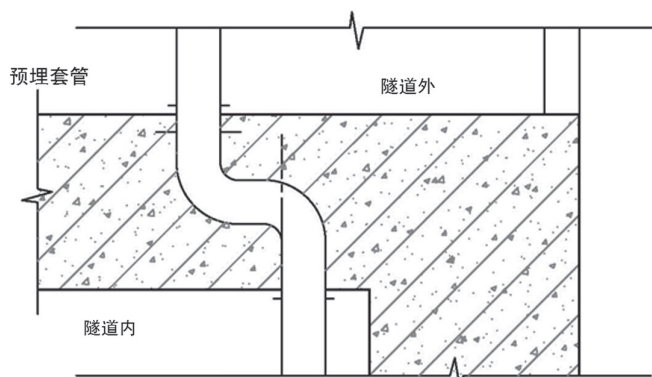


图9 预埋套管的管线穿越方式

搭接，以确保块板之间、块板与隧道墙之间均没有贯穿缝。这一方案虽然很好地解决了有限空间的设备运输、维护、替换等问题，取得了较好的实践效果，但在设计阶段，给隧道可开启部分顶板的规格设计、辐射防护构造细节的处理、隧道上部空间利用及后期维护方案制定等都带来了很大的难度和挑战。

6 其他贯穿孔道的辐射防护

除了人员、物流通道外，隧道墙常见的贯通孔洞还有水管、电缆、实验装备、风管等设备管线的穿越孔。其中风管的截面积最大，借鉴人行迷宫的原理，可设置垂直向弯折的风管迷宫，我们简称“风迷宫”。

此类孔洞的数量众多，分散实施辐射防护措施对建筑室内环境的破坏较大，且不能实现高效、节约、美观的设计目标。因此，在主隧道的上方设置管线夹层是最为经济、实用的解决方案，管线在夹层将大量需要近距离服务隧道的管线组成规整、统一的设备管线服务廊，紧紧依附在隧道上方，采用在隧道顶板中预埋套管或预留孔洞的方式实现垂直穿越。这一做法的关键是隧道上方的管线夹层必须提前进行管线综合布局设计，按就近原则合理规划、布置管线，节约材料，减少能源损耗，同时也可以避免管线在夹层内交叉，为运营维护埋下隐患。

除了管线夹层，还会有一定数量的管线需要通过在地下以屏蔽墙的方式进入隧道区域。比如上海光源工程的储存环隧道，因设置了部分可开启顶板，只能采用地下管沟的穿越方案。与管线夹层的设计原理相似，地下管沟需要有全局规划，依靠精细化的设计来实现。工艺方、辐射防护专家、各设计专业的工程师都要参与，并制定出最为经济合理的方案。

在考察日本同类建筑时，我们曾就此类管线穿越隧道墙的辐射防护问题与日本专家讨论，他们认为主要辐射源的高度（真空管）一般在离地 1m 处，因此在高于 2m 的隧道墙上开孔时，考虑到高差与墙

体自身厚度（1.5~2m）其实已经形成“迷宫”，故不必做特别构造处理。我们觉得这一做法上的差异可能是基于综合技术能力、紧急事故应对能力等方面的差距，但这种“被动式”的辐射防护理念与技术无疑是值得研究和实践的。

当然，完整的辐射防护体系还包含人身安全联锁系统、环境监测系统等，建筑设计团队与辐射防护专家的全方位沟通、交流、商讨，是实现一个安全、优秀建筑作品的基础保障。

7 结语

近年来，最为人们关注的绿色建筑、可持续建筑，其共同的基本核心之一就是人员安全、环境安全。21 世纪的今天，随着核医学的发展，用于科研的小型加速器装置正越来越多地被应用于放射医疗类的诊疗技术，如上海质子重离子医院等。事实上，有数据显示医用辐射已经成为全球最大的人工辐射源，“辐射防护”技术的应用范围正在日渐拓展和延伸，提炼细化核心的建筑防护技术，是对这一建设发展需求的最好回应。AT

参考文献

- [1] 方克明, 许浚江, 徐加强, 等. 上海光源同步辐射装置辐射屏蔽工程工艺设计. SSRF-SPC-RP-P.V.2.0, 2005.
- [2] Xu Xj, Cai Jh, Fang Km, Lu Xf ,et al. Radiation Protection Design for the SSRF. 3rd International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, 2005.
- [3] Fang Km, Xu Xj, Cai Jh, et al. Shielding Design for the SSRF. 3rd International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, 2005.
- [4] Cai Jh, Xu Xj, Fang Km, et al. Special Shielding Problems in Engineering of SSRF. 3rd International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, 2005.



作者简介

潘嘉凝, 上海建筑设计研究院有限公司技术发展部副主任, 高级工程师, LEED AP, 毕业于上海城市建设学院建筑学专业, 多次获得国家级、省部级以及上海市优秀设计类奖项、科技进步类奖项。主要完成的项目: 上海平和国际实验学校、江苏东航综合食品楼、863 技术中心楼、通用技术大厦改建、上海光源工程、国际汽车城大厦等。