

涉氟建筑氟防护体系与建筑专项设计技术

刘伟娜

中核第七研究设计院有限公司 山西太原 030000

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21125

[摘要] 针对当前涉氟建筑氟防护设计缺乏体系化专项技术指引的现状,结合氟的强渗透特性与内照射危害特征,基于纵深防御原则构建涵盖四道屏障与六大功能模块的氟防护体系,从建筑布局、围护密封、通风净化、表面防护等维度梳理专项设计的核心技术要点,并结合实际工程案例验证体系的运行效果。研究表明,通过建筑构造密封与气流组织管控的协同作用,可有效将室内氟浓度控制在安全限值范围内,大幅降低人员受照剂量与环境排放风险。研究成果可为各类涉氟厂房、实验室的建筑设计提供工程层面的参考依据。

[关键词] 涉氟建筑; 氟防护体系; 建筑专项设计; 密封围护; 辐射防护

引言:

随着我国开展核聚变能的进一步研究,对 EAST 等装置的氟操作需求量逐渐增大以及核医学同位素生产、工业示踪等领域对氟的应用量逐渐增多。作为各种与氟有关的操作空间场所即涉氟建筑来说,对其合理有效的防护设计就决定了辐射安全。不同于其他大多固态放射性核素,氟在气态或液态时扩散、渗透能力极大,会沿着建筑材料的孔隙等微观通道或建筑构造缝等各种途径向外迁移,不仅给建筑物结构带来永久性的污染,还可能通过地下水或者大气等形式影响周围环境。

一、氟的辐射特性与涉氟建筑防护核心需求

(一) 氟的物化特性与辐射危害机制

氟作为氢的放射性同位素,半衰期约 12.3 年,衰变释放的 β 粒子最大能量仅 18.6keV,在空气中的最大射程不足 6 毫米,无法穿透人体皮肤表层,因此外照射风险基本可以忽略,其辐射危害全部来自内照射途径。日常氟操作中,氟主要以单质氟气、氟水蒸汽两种形态存在,其中氟水可通过皮肤黏膜直接渗透进入人体,这一特性使得氟的防护不能仅依赖呼吸道防护,还必须严格控制体表与污染表面的接触^[1]。

对于建筑设计而言,更值得关注的是氟的材料渗透特性。氢原子的直径远小于普通建筑材料的微观孔隙尺寸,在浓度差的作用下,氟会持续向混凝土、砖体等多孔材料内部扩散,形成难以清除的结构本底污染。这种污染具有滞后性与长期性,即便设施停止运行,吸附在材料内部的氟仍会缓慢释放,给运维与退役工作带来极大难度。液态氟水还可通过建筑地

面的裂缝、管线穿墙缝隙等缺陷向下渗透,进入土壤与地下水系统,造成隐蔽性的环境影响,这也是涉氟建筑地面防渗设计必须高于普通放射性建筑的核心原因。

(二) 涉氟建筑的分类与防护层级划分

根据日操作氟活度与污染风险的不同,可将涉氟场所划分为不同防护等级。通常日操作活度大于 10^{12} Bq 的场所属于高风险等级,典型如聚变堆氟处理厂房、氟量产车间,这类场所氟操作压力高、存量较大,一旦发生泄漏会造成严重污染后果,需要最高等级的密封与净化措施;日操作活度在 $10^9 \sim 10^{12}$ Bq 之间的为中风险等级,多为氟标记实验室、分装车间,以手套箱密闭操作为主,防护重点在于房间负压管控与表面去污;日操作活度低于 10^9 Bq 的为低风险等级,如分析检测实验室、样品储存间,仅需基础的通风与监测措施即可满足安全要求^[2]。

无论建筑的保护等级高低,设计时均应兼顾以下三个方面:即确保职业人员的受照剂量不大于国家标准,并尽可能的减少;尽量减少氟的无组织排放,向环境中的总排放量满足标准要求;以及在经济和便于运行维护的基础上考虑适当的安全防护等级。不应一味追求高的安全防护等级而造成投资和运行费用增加。

二、涉氟建筑专项设计关键技术

(一) 建筑总平面与空间布局设计技术

涉氟建筑的选址需要结合厂区整体规划与气象条件综合确定,通常布置在厂区全年最小频率风向的上风侧,这样事故工况下泄漏的氟经大气扩散后,对厂区内人员密集的办公、

生活区影响最小。选址还应避开地下水水位较高的区域,减少氙水渗漏污染地下水的风险,同时周边需具备足够的应急疏散与救援空间。建筑与厂区外的居民区、公共设施之间的距离,需要根据最大可能释放量的大气扩散计算结果确定,确保极端事故下公众受照剂量不超过国家标准限值^[3]。

建筑内部采用三区制的分区布局模式,按照污染程度从低到高依次为清洁区、监督区与控制区。清洁区主要布置办公、值班、人员更衣等功能,监督区作为过渡区域,布置设备辅助间、样品暂存等功能,控制区则集中布置所有涉氙操作房间。平面布局上,控制区通常布置在建筑的内部核心区域,四周由监督区与辅助用房环绕,不直接与建筑外墙相邻,这样既可以减少外墙渗透带来的环境风险,也可以利用周边房间形成缓冲。

人流与物流必须分开设置独立路径,工作人员从清洁区进入控制区必须经过卫生通过间,依次完成更衣、换鞋、体表污染检测等流程,离开时同样需要经过检测与淋浴,避免将污染带出控制区。物料则通过专用的传递窗或物料通道进出,传递窗设置双门连锁与消毒功能,防止开门过程中污染空气的串流。对于有大型工艺设备的房间,需要设置专用的设备吊装口,吊装口平时采用密封盖板封闭,设备安装与更换时开启,吊装口周边设置密封围挡,避免吊装过程中污染扩散。

(二) 围护结构密封与抗渗设计技术

围护结构的密封性能是决定房间防护效果的核心因素,墙体优先采用整体现浇钢筋混凝土结构,相比砌体结构,现浇混凝土的孔隙率更低,整体密封性更好,且结构强度更高。混凝土的抗渗等级不应低于 P8,对于高风险等级的房间,可进一步提升至 P10,同时在混凝土配比中掺入适量的粉煤灰与减水剂,提升混凝土的密实度,降低孔隙率。仅靠混凝土自身的密实度仍不足以完全阻挡氙的渗透,高风险房间的混凝土内表面需要涂刷专用的气密涂料,涂料应具备耐辐照、低吸附、与混凝土附着力强的特点,能够有效封堵混凝土表面的毛细孔隙,将墙体的氙渗透系数降低一个数量级以上。

门窗是围护结构密封的薄弱环节,涉氙房间的门窗应采用双层密封结构,窗框与墙体之间的缝隙采用耐辐照的硅酮密封胶或丁基密封胶填充密实,密封胶条选用三元乙丙橡胶材质,具备良好的弹性与耐老化性能,长期使用下不易出现硬化、开裂等问题。门的开启方向应顺应负压方向,利用室

内负压提升门的密封压紧力,同时设置闭门器,保证门处于常闭状态。观察窗采用双层中空玻璃,玻璃与窗框之间打胶密封,避免缝隙渗漏^[4]。

地面设计需要同时满足抗渗与易去污两项要求,采用多层复合构造。基层为钢筋混凝土结构,设置一道柔性防水层,防止氙水向下渗透;面层采用整体无缝的环氧树脂自流平或聚脲涂层,厚度不小于 2 毫米,表面光滑致密,氙吸附量低,且能够耐受常用去污剂的腐蚀。地面设置不小于 1%的坡度,坡向专用地漏,地漏设置水封与防反溢装置,所有地面冲洗水与可能的氙水全部收集到放射性废水处理系统,严禁接入普通市政排水管网。地面与墙面、立柱的交接处做成半径 50 毫米以上的圆弧角,避免直角死角积留污染物,便于日常擦拭去污。对于高风险等级的房间,可设置双层防渗地面,两层之间设置渗漏监测层,安装渗漏检测传感器,一旦面层发生破损渗漏,能够及时发出警报,避免污染持续扩散。

各类管线穿越围护墙体的部位是密封的薄弱点,设计中应尽量减少管线穿越围护结构的数量,同类管线尽量集中布置。所有穿越部位均设置钢制密封套管,套管与墙体混凝土浇筑为一体,管线穿过套管后,中间的环形间隙采用柔性密封材料填充封堵,封堵材料需具备耐辐照与一定的变形能力,适应管线的热胀冷缩。所有管线优先采用明装方式敷设,沿墙面或吊顶下布置,便于日常巡检与泄漏点排查,尽量避免管线暗埋在墙体或地面内,防止暗埋管线发生渗漏后无法及时发现与维修。

(三) 室内气流组织与通风净化设计技术

通风系统是控制室内氙浓度的核心手段,其设计的关键在于建立稳定合理的负压梯度与气流组织。涉氙建筑的各个区域需保持逐级递减的压力梯度,清洁区压力最高,监督区次之,控制区压力最低,确保气流始终从清洁区域流向污染区域,防止氙的逆向扩散。通常控制区与监督区之间的压差不应小于 10Pa,监督区与清洁区之间的压差不应小于 5Pa,高风险操作房间可根据需要进一步提高负压值。压差的稳定需要送排风系统的精准控制,送风与排风均设置变频调节装置,配合压差传感器实现自动稳压,避免因门的开启等因素造成压差波动。

气流组织形式采用上送下排的方式,新鲜空气从房间上部的送风口送入,经过人员工作区域后,从房间下部靠近地

面的排风口排出。之所以采用下排方式,是因为氙水蒸汽的密度略大于空气,且液态氙蒸发后多在近地面区域扩散,下排风口能够更高效地排出污染空气,降低人员呼吸带的氙浓度。送排风口的布置需要均匀,避免室内出现气流死角,导致局部氙浓度积聚。通风量的确定需要结合房间的氙释放速率与导出空气浓度限值计算,正常工况下控制区房间的换气次数不应低于6次/小时,高风险操作房间不应低于12次/小时,确保室内氙浓度远低于国家标准规定的导出空气浓度。

排出的污染空气不能直接排放,必须经过氙净化装置处理达标后才能排放。目前主流的氙净化工艺为催化氧化加分子筛吸附组合工艺,先通过催化氧化床将空气中的单质氙催化氧化为氙水,再通过分子筛吸附柱吸附氙水,净化后的空气经过在线监测合格后,通过高空排气筒排放。排风系统设置备用风机与应急电源,确保主风机故障或突发停电时,仍能维持房间的基本负压,防止污染空气向外扩散。发生大量氙泄漏的事故工况时,系统可自动切换至事故排风模式,增大排风量,同时强化净化处理能力,快速降低室内氙浓度,为人员疏散与事故处置创造条件^[5]。

(四) 内表面防护与监测应急设计技术

氙具有较强的表面吸附特性,多孔粗糙的表面会吸附大量氙,形成难以清除的固定污染,因此涉氙房间的内表面处理是防护设计中不可忽视的环节。所有内表面饰面材料都应选择低吸附、易去污、耐辐照的材质,优先选用不锈钢板、环氧树脂涂层、硬质PVC板材等,严禁使用乳胶漆、普通水泥砂浆、石膏板等多孔易吸附的材料。操作台面可铺设不锈钢或聚四氟乙烯衬垫,日常操作产生的少量污染可直接更换衬垫,大幅降低去污的工作量与难度。房间内所有的阴阳角都应做成圆弧过渡,避免形成卫生死角,减少污染物积聚的可能。表面防护材料需要具备足够的耐辐照性能与机械强度,能够承受长期的低剂量辐照与日常擦拭去污,不出现开裂、脱落、降解等问题,保证长期使用的可靠性。

完善的监测体系是防护体系有效运行的重要保障,需要在建筑内布设多层次的监测点位。各涉氙操作房间内设置固定式氙浓度监测仪,实时监测室内空气中的氙浓度,数据接入厂区辐射监测系统,当浓度超过预警阈值时,自动发出声光报警,同时联动通风系统加大排风量。排风总管上安装在氙浓度监测装置,连续监测排放口的氙浓度,确保排放浓

度与排放总量满足国家标准要求。卫生通过间设置全身表面污染监测仪,工作人员离开控制区时必须进行全身污染检测,确认体表无污染后方可进入清洁区。除了固定式监测设备,还应配备便携式氙监测仪与表面污染监测仪,供运维人员日常巡检与事故处置时使用。

应急设计需要覆盖突发泄漏事故的全处置流程,高污染风险的房间设置快速隔离风门,发生大量泄漏时可远程关闭,将污染严格封闭在房间内部,防止扩散到其他区域。建筑内设置专用的应急洗消间,配备全身洗消设备与专用的氙去污药剂,发生人员体表污染时可及时开展洗消处置,减少氙的体内摄入。控制区内设置应急防护用品储存柜,配备正压呼吸器、防护服等应急防护装备,供事故处置人员使用。建筑内设置清晰的应急疏散标识与疏散路线,确保事故情况下人员能够快速有序撤离到安全区域。

三、结论

涉氙建筑的氙防护是一个涉及辐射防护、建筑设计、暖通工程等多个专业的交叉课题,氙自身的强渗透特性决定了其防护不能依靠单一的技术措施,必须构建体系化的纵深防御格局。本文提出的多重屏障防护体系,从工艺设备到厂区环境层层设防,配合空间布局、围护密封、通风净化等多个专项设计技术,能够从静态物理隔离与动态气流管控两个维度有效阻断氙的扩散路径。经过工程实践验证,该技术体系能够有效管控涉氙建筑的辐射风险,保障工作人员与周边环境的安全,具备良好的工程应用价值。

[参考文献]

- [1] 刘佳成,常树全,王凯凯,等. 针对氙防护聚合物基复合材料研究现状[J]. 山东化工, 2024, 53(14): 112-115+121.
- [2] 尤慕远. 氙防护材料的研究进展[J]. 广州化工, 2022, 50(8): 27-29+44.
- [3] 刘凯凯. 绿色建筑节能设计与应用研究[J]. 中华建设, 2026, (7): 105-107.
- [4] 韩明. 基于低碳理念的城市建筑设计模式探索[J]. 中华建设, 2026, (7): 84-86.
- [5] 张汝英. 清水混凝土在低碳建筑中的应用与推广研究[J]. 陶瓷, 2026, (6): 153-155.

作者信息: 刘伟娜, 女, (1980.11—), 汉族, 籍贯河南省长垣市, 本科, 研究方向: 建筑设计。