高放地下实验室紧急避险系统设计研究

段晓恒，孙永强，王合祥

（中核第四研究设计工程有限公司，河北 石家庄 050021）

摘要：高放地下实验室既是用来了解深部地质环境和地应力状况、获取深部岩石和水样品、在真实深部地质环境中验证工程屏障长期性能的试验设施，也是开发和验证处置库施工、建造、回填和封闭技术的重要手段，是高水平放射性废物处置工艺技术研发必不可少的关键平台。针对地下实验室可能存在的安全风险，开展了紧急避险系统建设原则、避险系统布置方案研究，旨在为地下实验室的安全运行提供可靠保障。

关键词：高放废物；地下实验室；紧急避险；逃生线路；废物处置

中图分类号：TL949 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0088-05

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.02.09

安全性问题是高放废物处置的根本问题，国际上公认的高放废物处置方案是地下工程处置[1]。目前国外相继建设了 20 多座地下实验室，并在地下实验室内开展了相关的研究和开发工作，这些实验室的建设极大地推动了高放废物地质处置技术研究，为高放废物地质处置积累了丰富的经验。中国高放废物地质处置始于 20 世纪 80 年代，经过 30 多年的研究，目前第一座高放废物地下实验室已经开始建设。

地下实验室承担着场址特征表征、地质环境工程屏障分析、处置工艺研究等功能[2-4]，其安全运行的意义重大。由于各国地下实验室的地质条件、主体结构形式、功能需求千差万别，审管机构对地下实验室的管理要求也各不相同，因此国外地下实验室的紧急避险系统只能作为参考，不能盲目套用。

基于地下实验室主体结构设计研究的成果，高放地下实验室建设地下两层试验平台。由于地下工程具有可变因素多、不确定性风险大、随机事故概率高的特点，为了应对地下实验室存在的安全风险，笔者开展了高放地下实验室紧急避险系统设计研究，确定了地下实验室的紧急避险设施、紧急避险逃生线路以及应急救援方案，旨在为地下实验室的安全运行提供可靠保障[5]。

1 高放地下实验室建设概况

1.1 高放地下实验室空间架构

北山地下实验室（URL）为“特定场区地下实验室”，基于国外地下实验室科研项目研发规划和在现场试验方面所积累的相关成果及经验，以“安全驱动”为理念，紧密结合高放废物地下实验室的功能和定位，建立完整的处置库工业化建设理论和技术体系[6-7]。

地下实验室采用“螺旋斜坡道＋三竖井＋两层平巷”的主体架构建设方案，最大埋深 560 m。主体工程包含 1 条螺旋斜坡道、1 条人员竖井、2 条通风井、－560 m 主试验水平、－280 m 辅助试验水平（图 1），以及试验硐室、辅助硐室等配套设施[8]。人员竖井作为地下实验室主出入通道，在－280 m，－560 m 试验水平通过联络巷与斜坡道相连，在运输能力和功能上与斜坡道实现互补。

1.2 高放地下实验室主要试验内容

科研工作贯穿地下实验室建设过程，利用地下实验室主体工程开展地质调查、岩石力学，以及地球化学试验等现场试验。

1.2.1 斜坡道主要试验内容

斜坡道作为主要的地质调查场所，可以在较大空间范围内进行地质编录，揭露岩体地质条件、

收稿日期：2023-02-28

第一作者简介：段晓恒（1978—），男，河北石家庄人，硕士，高级工程师，主要从事铀矿冶研究设计工作。

工程地质条件、地球化学和水文地质条件。斜坡道从地表直至地下－560 m 主试验水平，期间设置了坑内钻孔勘查试验、地球物理探测、含水构造水文地质现场试验、超前探测试验、围岩微震动态监测，以及其他试验。在斜坡道开挖过程中，可根据地质等条件变化情况，随时在不同地点灵活布置所需的试验工程，完成不同的试验内容，实现试验目的。

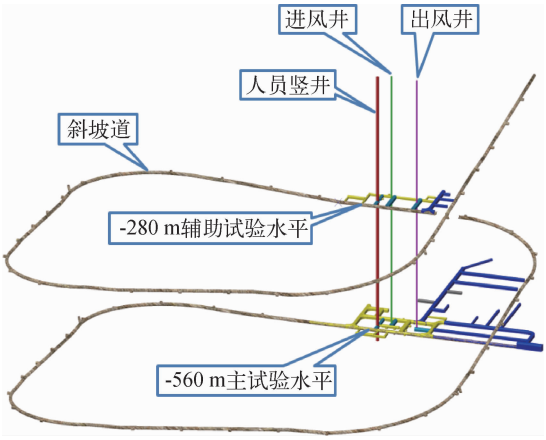


图 1　地下实验室主体结构

Fig. 1　The main structure of URL

1.2.2　人员竖井主要试验内容

竖井也是主要的地质调查场所，可以完成不同深度的地质编录，用以揭露同一地点在不同深度上的岩体地质条件、工程地质条件和水文地质条件的变化情况，揭示地质变化规律，并用以验证地质钻探成果的可靠性。

1.2.3　试验水平主要试验内容

主试验水平设在－560 m 处的地质还原环境中，主要开展处置库深部地质环境调查，并开展岩石力学、地球物理探测、地球化学试验、EDZ 专项试验、施工技术研究、核素迁移试验、示范处置工艺等研究。

辅助试验水平主要开展中等深度条件下的地质环境调查，提前开展缓冲材料原位试验安装技术研究，处置坑开挖试验和损伤区测试以及其他有关的岩石力学、地球化学试验等研究。

1.3　高放地下实验室工程特点

地下实验室施工具有工作环境复杂、安全风险多、工程难度大等特点，还具有运行周期长、边试验边施工、管理复杂的特殊性。因此，为避免安全事故而采取工业安全监测技术尤为重要[9-10]。

1.4　高放地下实验室定员及人员分布

地下实验室正常运行时，实验人员主要在现场开展地质调查、岩石力学，以及地球化学试验等相关研究[11]。地下实验室实验人员作业地点主要有－560 m 主试验水平、－280 m 辅助试验水平和斜坡道。

为了保障地下实验室工作人员的安全，根据试验内容和研究的需要，确定－560 m 主试验水平定员 50 人，－280 m 辅助试验水平定员 10 人，－280 m 以上斜坡道定员 10 人，－280～－560 m 斜坡道定员 10 人；同时在地下实验室的总人数不超过 50 人。

2　高放地下实验室紧急避险系统

井下紧急避险系统是指在地下实验室发生紧急情况时，为遇险人员紧急避险提供生命保障的设施、设备、措施所组成的有机整体。紧急避险系统建设包括为地下实验室人员提供自救器、合理设置避灾路线、建设井下紧急避险设施、科学制定应急预案等内容[12]。

2.1　自救器

自救器是一种小型的供地下作业场所人员随身携带的防毒呼吸器具，在地下实验室发生有毒气体污染及缺氧窒息性灾害时，现场人员及时佩戴自救器，保证人员正常呼吸并逃离灾区。为地下实验室的所有人员配备自救器，防止有毒有害气体中毒和窒息事故的发生。自救器的额定防护时间不小于 30 min，以保证遇险人员从危险区域撤到安全地带。

2.2　紧急避险设施

地下实验室的避险设施是在发生灾变情况下，为避灾人员等待救援提供生命保障的密闭空间，主要包括救援硐室和救生舱。

地下实验室在－560 m 主试验水平设置 1 个救援硐室，可容纳 50 人；在－280 m 辅助试验水平设置 1 个移动式救生舱，可容纳 10 人；在－560 m主试验水平试验区远端分别设置 3 个移动式救生舱，单舱可容纳 10 人；另在斜坡道内设 2 个移动式救生舱，单舱可容纳 10 人。地下实验室救援硐室和救生舱额定避灾人员不小于每个试验水平同时工作人员的总数。

2.2.1 安全出口

地下实验室主体架构采用“螺旋斜坡道＋三竖井＋两层平巷”方案，斜坡道和三竖井直通地表，其中斜坡道和人员竖井作为通地表的 2 个安全出口。

斜坡道为非行人斜坡道，施工和试验期间会在个别区域有掘进作业和试验施工人员。为了保证人员的安全，根据试验人员出入频繁程度，在斜坡道路径上设置了 2 个移动式救生舱，施工期间救生舱位置可视工作面推进而调整。在斜坡道入口处设有人员出入口闸机，用于管理人流并规范行人出入。通过下井人员人脸信息和门禁卡双重认证实现对下井人员的管理。

地下实验室的人员竖井设在 BS32 号孔东北方向 18 m 处，人员竖井采用圆形断面，净直径 6.0 m，深度 590 m(其中 30 m 为井底水窝)。人员竖井作为地下实验室主出入通道和安全出口，联通－280 m、－560 m 试验水平，并通过联络巷与斜坡道相连。人员竖井井筒内布置 2 套提升系统，装有 2 部在动力上互不依赖的罐笼设备，2 套提升系统互为备用。除提升人员及小型设备外，提升系统还负责井筒设施检修的任务。

2.2.2 救援硐室

救援硐室既是地下实验室日常工作的休息生活区域，同时也是地下实验室发生紧急情况的救援室，以及无法疏散情况下的等待场所和地下主要运行系统的次级控制中心，设置了不同的功能区域，并采取一定措施保证紧急情况下救援硐室的运行[13]。

在－560 m 主试验水平人员提升竖井旁设置救援硐室，定员 50 人，防护时间 48 h。救援硐室设 2 道防火墙和防火门，救援硐室紧邻进风井，保证硐室正压，以及管路安全；同时救援硐室按 50 人规模、防护时间 48 h 配置食品、饮用水(桶装水)、备用电源、供氧以及必要药品、急救包、矿用自救器、矿灯，以及气体检测仪等设备。在日常运行期间，救援硐室也作为工作人员休息间，卫生间设置洗漱台、水盆、水龙头、烘手机、免冲水机械打包座便器，茶水间配置饮水机、咖啡机、微波炉、面包机、冰箱。救援硐室设置矿用温湿度计及空盒气压表，在休息区设置箱式座椅、舒适沙发椅、参访讲解用电视、电脑。

救援硐室断面尺寸：6.0 m(宽)×3.0 m(墙高)，总高 5.0 m，净断面面积 30.47 m^2；救援硐室长41.0 m。救援硐室设置 2 个出口分别与人员竖井区和停车场区域连接，通道内设置 2 道防火门。救援硐室内引入双路电源供电、内部备用电源和应急照明，通讯设备直接与地表运行控制中心连接。

2.2.3 移动式救生舱

地下实验室共设置 6 个移动式救生舱，当地下实验室发生火灾、坍塌等事故导致巷道堵塞或动力电源断电时，井下遇险人员不能立即升井逃生脱险，可就近快速进入救生舱内等待救援。

移动式救生舱可以在中段巷道中和各中段间灵活移动，可以根据地下实验室的需要，将救生舱移动到需要的试验场所，试验完成后再运输至下一个试验场所。

地下实验室分别在－560 m 主试验水平设 3 个、在－280 m 辅助试验水平设 1 个、在斜坡道内设 2 个移动式救生舱。移动式救生舱为密闭舱，救生舱内设有适宜人生存的空气循环系统、供氧系统、环境监测系统(含舱内监测、舱外监测)、动力保障系统和生存设施等[14]。

2.3 紧急避险系统设计

紧急避险系统的设置应充分考虑矿井的实际情况，建立合理的紧急避险有机整体。总体上应执行“一人一位、就近避难、多点布置”原则，这就要求管理人员必须清楚矿井人员的分布情况[15]。

2.3.1 紧急避险逃生线路

紧急避险线路根据地下实验室试验方案以及试验巷道延伸情况及时调整，确保避灾路线适应避灾需要，选择最佳的避灾路线是在充分考虑不同避险逃生线路的通行难易度情况下，求解安全最短撤退时间。在巷道交叉口及沿途应设置醒目的避灾路线标识，并随巷道延伸或封闭及时更新。逃生路线指示牌亮处吸光、暗处发光，具有良好的抗老化性、耐腐蚀性、耐热性，具有一定的阻燃性及抗划伤性。地下实验室各个场所设置清晰、醒目的标识牌，明确标注救援硐室或救生舱的位置、距离等信息[16]。

地下实验室紧急避险设施主要包括救援硐室和移动式救生舱。根据地下实验室空间架构以及人员的分布情况，确定在－560 m 主试验水平人员提升竖井旁设置救援硐室，保证地下实验室作业人员在危险情况下的生命安全；临时避难硐室

和移动式救生舱主要服务于现场试验及附近区域，随着现场试验工作的移动而移动。根据地下实验室人员分布情况，确定地下实验室采用 1 个救援硐室＋6 台移动式救生舱方案，紧急避险逃生线路见图 2。

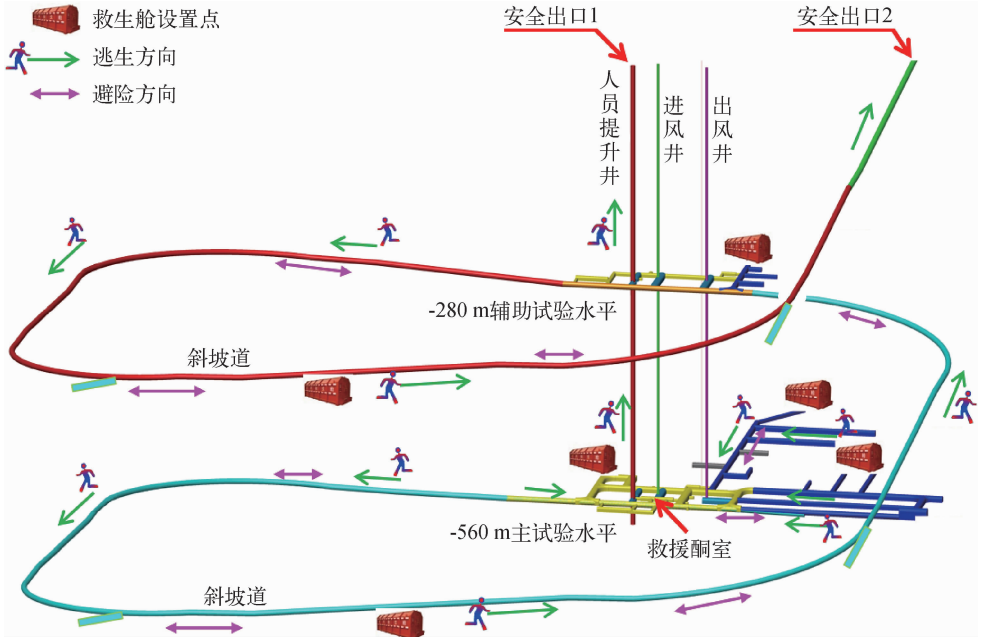


图 2　地下实验室紧急避险逃生线路

Fig. 2　The emergency escape route for URL

2.3.2　应急救援

2.3.2.1　地下实验室应急组织机构

地下试验室项目管理部设立现场应急指挥领导小组和若干应急处置专业组。应急救援队伍由项目部各部门指派的人员以及现场聘用人员组成，分为治安引导组、救援处置组、信息通信组、后期保障组等。

2.3.2.2　专项应急预案与现场处置方案

地下实验室建立健全生产安全事故应急预案体系，包括专项应急预案和现场处置方案。地下实验室每年组织 1 次专项应急预案演练和 2 次现场处置演练，每次演练要编制演练方案，内容包括时间、地点、参加人员、预定演练过程、预期目的等；采取现场模拟演练为主，针对可能存在的突发事件，通过演练使参加人员学会报警、人员急救、应急处理、现场恢复等。演练结束后，对演练组织情况和预案的合理性进行评价，对发现的问题制订纠正措施予以完善。

2.3.2.3　应急响应

当地下实验室出现灾害情况时立即启动应急响应，应急救援队伍在指挥部的统一指挥下，开展相应应急救援工作。地下实验室人员，先按避灾线路及时撤离危险区域，而后可按照应急预案在人员定位系统、视频监控系统以及紧急电话广播系统引导下，首选通过人员竖井和斜坡道逃生至地表；在无法迅速升井时，就近进入救援硐室或移动式救生舱内避险。

3　结论

根据地下实验室的空间架构和现场试验情况，在分析地下实验室的紧急避险需求的基础上，采用救援硐室和移动救生舱相结合的避险设施，能够满足地下实验室初期紧急避险的需求，可为地下实验室人员提供了安全的避险场所。

通过建立健全地下实验室生产安全事故应急预案体系，定期进行应急预案演练，提高地下实验室的应急处置能力。在灾变的情况下，首选通过人员竖井和斜坡道逃生至地表，在无法迅速升井时进入救援硐室或移动式救生舱内避险，降低了地下实验室的运行风险。

参考文献：

[1] 徐国庆.对我国高放废物地质处置研发工作的几点建议[J].世界核地质科学,2012,29(4):227-231.

[2] 潘自强,钱七虎.高放废物地质处置战略研究[M].北京:原子能出版社,2009.

[3] 王驹,范显华,徐国庆,等.中国高放废物地质处置十年进展[M].北京:原子能出版社,2004.

[4] 王驹,苏锐,陈亮,等.中国高放废物地质处置地下实验室场址筛选[J].世界核地质科学,2022,39(1):1-13.

[5] 王驹.高放废物地质处置:进展与挑战[J].中国工程科学,2008,10(3):58-65.

[6] 段先哲,王灿州,唐振平,等.高放废物地质处置安全评价研究[J].南华大学学报(自然科学版),2020,34(2):42-49.

[7] 荣峰.瑞典 Aspo 地下实验室设计与建造[J].世界核地质科学,2007,34(4):238-243.

[8] 荣峰,王合祥,孙永强,等.高放废物处置地下实验室主体结构设计研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):893-899.

[9] 王驹.高放废物深地质处置:回顾与展望[J].铀矿地质,2009,25(2):71-77.

[10] 荣峰,孙永强,王合祥,等.地下实验室主体结构方案设计影响因素分析[J].世界核地质科学,2007,34(3):174-179.

[11] WETHERSPOON P A.世界放射性废物地质处置[M].王驹,张铁岭,郑华铃,等译.北京:原子能出版社,2004.

[12] 盛武,高明中,杨力,等.煤矿紧急避险体系构建与应急救援模型研究[J].中国安全科学学报,2011,21(4):171-176.

[13] 高明中,盛武.产煤发达国家煤矿紧急避险体系建设研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2011,31(3):13-16.

[14] 杨大明,武越.中美两国煤矿井下紧急避险相关规定对比分析[J].煤炭科学技术,2012,40(2):40-44.

[15] 薛淑杰.紧急避险系统在某矿井的建设及应用[J].矿业装备,2022(1):248-249.

[16] 孙继平.煤矿井下安全避险“六大系统”的作用和配置方案[J].工矿自动化,2010,36(11):1-4.

Design and Research of Emergency Refuge System for High-level Radioactive Underground Research Laboratory

DUAN Xiaoheng, SUN Yongqiang, WANG Hexiang

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The high-level underground research laboratory(URL) is not only a test facility used to understand the deep geological environment and crustal stress, obtain deep rock and water samples, and verify the long-term performance of engineering barriers in the real deep geological environment, but also an important means to develop and verify the construction, backfilling and sealing technologies of the repository. It is an essential platform for the research and development of high-level radioactive waste disposal technology. In order to reduce safety risks in the operation of URL, by analyzing factors such as the engineering characteristics, spatial structure, and personnel distribution of URL, and in response to potential safety risks in URL, a study was conducted on the design of emergency evacuation facilities for URL. Through research, rescue chambers were identified the location of the mobile rescue capsule and the disaster avoidance route of the URL have been developed, and emergency plans have been developed for the safe operation of the URL under disaster conditions.

Key words: high-level radioactive waste; underground research laboratory; emergency refuge; escape route; waste disposal