

杨明庆, 张健, 徐梓航, 等. 锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱建造技术与应用 [J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 197-209. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.015

YANG Mingqing, ZHANG Jian, XU Zihang, et al. Construction technology and application of large polyethylene shielded cabin in China Jinping Underground Laboratory [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 197-209. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.015

锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱建造技术与应用

杨明庆^{1,2,3}, 张健^{1,2}, 徐梓航^{1,2}, 申满斌^{1,2}, 杨进忠^{1,2}, 李宏璧^{1,2}

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 2. 锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 四川 凉山 615000; 3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 【目的】地下实验室是开展前沿物理研究的重要基础设施, 为开展极低辐射本底前沿物理实验, 服务暗物质探测、中微子实验等国家重大科技创新, 中国锦屏地下实验室二期建造了世界最大的聚乙烯屏蔽舱。【方法】系统阐述了中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱建造关键技术, 提出了在地下有限空间中建造大型聚乙烯屏蔽舱的设计思路, 创新了聚乙烯屏蔽舱各部位定制化无通缝设计, 基于有限元仿真分析评价了屏蔽舱聚乙烯板材的变形和强度特征, 并论述了有限空间下聚乙烯屏蔽舱拼装施工工艺等关键点。【结果】结果显示: 在自重应力影响下, 聚乙烯板材变形小于加工允差, 屏蔽舱墙体高度方向的累积收缩变形约 3 mm, 聚乙烯单板的最大应力为 87.20kPa, 在变形和强度方面满足稳定性及拼装误差要求; 工程竣工后该大型聚乙烯屏蔽舱环境伽马本底测量结果相比屏蔽舱外降低了约 97%, 且远远低于国外顶尖地下实验室。【结论】中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱拼装结构设计科学合理、聚乙烯拼装板材力学状态稳定、施工质量把控良好、射线屏蔽效果达到世界一流水平。研究成果可为低辐射本底环境构建和有限空间下大型拼装式工程建造提供有益参考。

关键词: 中国锦屏地下实验室; 大型聚乙烯屏蔽舱; 拼装式; 应力应变仿真; 施工工艺; 影响因素; 变形; 低辐射本底环境

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.015

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU28

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0197-13



听语音
聊科研

Construction technology and application of large polyethylene shielded cabin in China Jinping Underground Laboratory

YANG Mingqing^{1,2,3}, ZHANG Jian^{1,2}, XU Zihang^{1,2}, SHEN Manbin^{1,2}, YANG Jinzhong^{1,2}, LI Hongbi^{1,2}

(1. Yalong River Hydropower Development Company Limited, Chengdu 610051, Sichuan, China; 2. Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, Liangshan 615000, Sichuan, China;

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-03-16; 录用日期: 2025-03-17; 网络出版日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B20146)

作者简介: 杨明庆(1996—), 男, 博士, 主要从事水工岩土工程研究和深地实验室建设管理。E-mail: yangmingqing@sdic.com.cn

通信作者: 张健(1987—), 男, 高级工程师, 雅砻江流域水电开发有限公司锦屏地下实验室地管局工程部主任, 学士, 主要从事水工结构研究和深地实验室建设管理。E-mail: zhang_jian@ylhdc.com.cn

杨进忠(1982—), 男, 高级工程师, 雅砻江流域水电开发有限公司锦屏地下实验室地管局工程部主任, 硕士, 主要从事水利水电工程和深地实验室建设管理。E-mail: yangjinzhong@ylhdc.com.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract [Objective] Underground laboratories are recognized as critical infrastructure for cutting-edge physical research. To support ultra-low radiation background experiments required for national strategic scientific programs including dark matter detection and neutrino studies, the world's largest polyethylene shielding cabin has been successfully constructed in the China Jinping Underground Laboratory Phase II. [Methods] Key construction technologies are systematically elaborated, with a novel design methodology being proposed for large-scale polyethylene shielding cabins under spatially constrained underground conditions. Customized seamless joint configurations are innovatively developed for critical cabin components, while deformation and strength characteristics of polyethylene plates are quantitatively evaluated through finite element simulations. Modular assembly protocols optimized for confined construction spaces are comprehensively documented. [Results] Experimental results indicate that polyethylene plate deformations induced by self-weight stress are controlled within machining tolerances, with cumulative vertical shrinkage deformation measured at 3.0 mm. Maximum stress values in individual polyethylene plates are determined as 87.20 kPa, satisfying both structural stability criteria and assembly precision requirements. Post-construction radiation monitoring reveals the gamma background within the shielded zone is reduced by a factor of 31 compared to external levels, outperforming shielding efficiencies reported from leading international underground facilities. [Conclusion] The assembly structure design of the large polyethylene shielding cabin is scientifically reasonable, the mechanical state of the polyethylene assembly board is stable, the construction quality is well controlled, and the radiation shielding effect has reached world-class level. This technological achievement provides methodological references for ultra-low radiation environment construction and modular engineering implementation in geologically constrained underground spaces.

Keywords: China Jinping Underground Laboratory; large polyethylene shielded cabin; assembled type; stress strain simulation; construction technology; influencing factors; deformation; low radiation background environment

0 引言

地下实验室是开展暗物质探测、中微子实验等前沿物理研究的重要实验平台^[1-2]。在国际上,意大利 Gran Sasso 实验室^[3]、加拿大 SNOLAB 实验室^[4]、法国 Modane 实验室^[5]、日本 Kamioka 实验室^[6]等均是依托大埋深的地下实验室开展前沿物理研究,并取得了丰硕的科学成果^[7-11]。锦屏极深地下极低辐射本地前沿物理设施(锦屏大设施)项目是国家重大科技基础设施建设项目,项目位于四川省凉山彝族自治州锦屏二级水电站锦屏山引水隧道群中,利用锦屏二级水电站约 2 400 m 极深岩石覆盖的有利条件,在 17.5 km 长的锦屏山隧道中部建成了世界上埋深最深、空间最大、宇宙线通量最少、运输最便利、综合保障条件最好的中国锦屏地下实验室(CJPL, China Jinping Underground Laboratory),其中,中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II)包括 8 个实验主厅,空间容积达 30 万 m³,极大拓展了宝贵的极深地下实验空间,为开展低辐射本底前沿物理研究创造了极佳试验平台^[12-14]。

地下实验室可为暗物质直接探测实验、无中微子双贝塔衰变试验、核天体物理试验等科学研究提供低宇宙线本底的环境^[15-17],但是对于试验室环境中的

天然放射性核素产生的本底,还需要提供额外的屏蔽装置。因此,在地下实验室的前沿物理实验中,通常会采用铅、聚乙烯以及高纯无氧铜等屏蔽材料组成复合屏蔽结构,形成一个组合式辐射屏蔽装置^[18-20],为实验提供一个符合要求的低本底环境。例如,意大利 Gran Sasso 地下实验室暗物质探测实验 XENON 的屏蔽体结构从内向外依次为高纯无氧铜、聚乙烯、铅和 水体,美国 Soudan 地下实验室暗物质探测试验 CoGENT 的屏蔽体结构从内向外依次为高纯无氧铜、铅和聚乙烯。此类常用的辐射屏蔽装置,屏蔽设计结构比较相似,空间体积较小,通常围绕特定的试验目的搭建定制化的试验屏蔽,无法满足不同种类实验探测的需求。在此背景下,为创建可提供不同尺寸可组合的大型屏蔽空间,锦屏大设施项目在中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II) C2 厅建造了目前世界最大的聚乙烯屏蔽舱(见图 1),以大型聚乙烯屏蔽舱为基础,根据不同试验需求,可组合搭建高纯无氧铜和低本底铅等屏蔽材料,为前沿物理试验提供不同尺寸可组合的屏蔽装置,为暗物质探测、中微子试验、低本底检测和运行提供宝贵的实验平台,助力我国在核物理、深地医学、先进仪器研发等多学科领域的发展进步。

如前所述,国际上地下实验室的聚乙烯屏蔽结构体积规模较小,常规搭装即可完成聚乙烯屏蔽结构

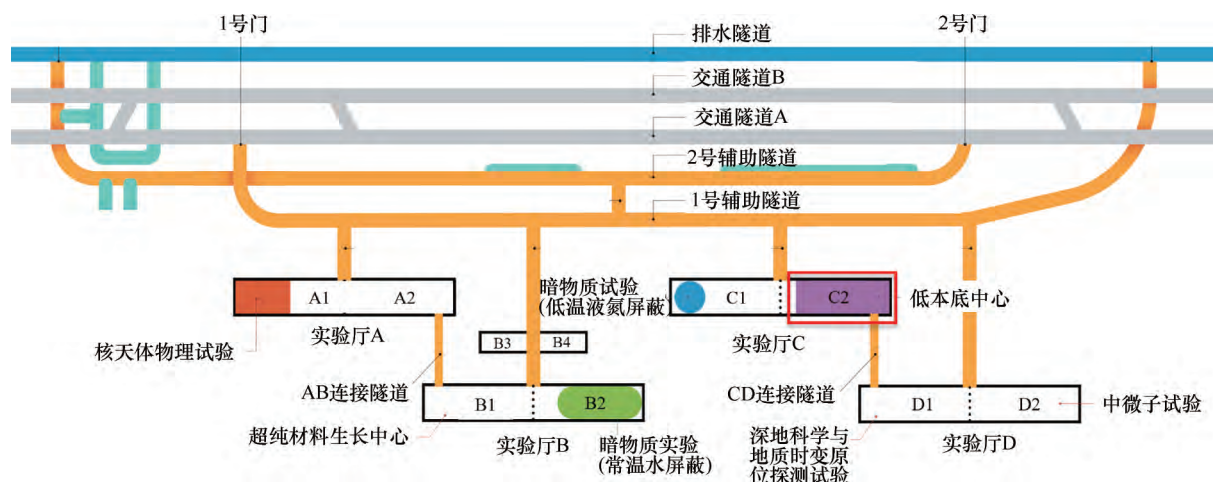
图1 中国锦屏地下实验室二期布局示意^[25]

Fig. 1 Layout diagram of underground laboratory in Jinping II

层的建设,而在极深地下洞室中建造大体积空间的聚乙烯屏蔽舱在国际上尚属首次,存在系列建造难题。首先,为实现极低辐射本地环境的实验空间,本工程中屏蔽舱主要由聚乙烯板材采用装配式建造,装配式建筑在工程建设领域的相关技术较为成熟,特别是在混凝土和钢结构方面具有成熟建造经验^[21-22],然而常规装配式建筑无需考虑结构中的贯通直缝导致的外部射线射入,目前Soudan等国际地下实验室采用的简单堆叠方式搭建聚乙烯屏蔽层,产生的贯通直缝给实验空间射线屏蔽造成了一定的隐患。因此,大型聚乙烯屏蔽舱建造面临的首要问题是创新实现底板、墙体、顶板等各部位的无通缝设计,以确保聚乙烯屏蔽舱的屏蔽效果;其次,聚乙烯材料质地相对较软,其强度、弹性模量等力学性能远低于常规的混凝土结构^[23-24],因此在大型聚乙烯屏蔽舱建造中必须校核聚乙烯板材的力学状态,避免因变形过大、强度失稳导致屏蔽舱结构失效;最后,本工程处于2 400 m的超大埋深地下洞室中,转运吊装等施工操作空间十分有限,大型机械设备无法投入使用,在施工过程中需充分考虑现场原位环境,优化施工工艺流程。

为此,本文以中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱工程为案例,系统阐述有限空间下大型聚乙烯屏蔽舱建造关键技术。通过大型聚乙烯屏蔽舱各部位定制化无通缝创新设计、聚乙烯拼装单元应力应变状态仿真分析、有限空间下大型聚乙烯屏蔽舱施工工艺等关键技术手段,实现极深地下有限空间内大型聚乙烯屏蔽舱高效建造。通过实地测量与对比分析,中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱射线屏蔽效果达到世界一流水平。本文研究成果可为低辐射本底环境构建

和有限空间下大型拼装式工程建造提供有益参考。

1 大型聚乙烯屏蔽舱总体设计

大型聚乙烯屏蔽舱作为一种屏蔽外界辐射的特殊定制化实验建筑,其选材、设计、施工等与普通砌筑工程有显著区别。首先,在屏蔽材料选择方面,常用的屏蔽材料铅是一种有害重金属,长期暴露于铅中可能导致多种健康问题^[26],其使用需要严格的安全措施,且大型屏蔽舱建造工程所需的铅成本过高、自重较大,难以投入实际应用,相比之下,高密度聚乙烯材料因其成本相对较低、容重较小、定制化加工便捷、防辐射效果良好等优势^[27-28],适合作为大型屏蔽舱的建筑材料,因此设计以高密度聚乙烯板材为基本砌筑单元,并采用类似搭建积木的板材拼装方式建设。其次,为保证大型聚乙烯屏蔽舱的屏蔽效果,拼装完成后屏蔽舱墙体应无水平及垂直方向的通缝,顶板及底板无垂直通缝,否则外部射线可能通过贯通缝隙进入屏蔽舱,而缝隙填充的方式封堵贯通缝隙存在施工繁琐、质量控制难度高、后期养护难度大等不足,为此,设计以错峰拼装的方式搭建聚乙烯屏蔽舱的墙体和顶底板,以此切断可能的外部射线进入通道。最后,大型聚乙烯屏蔽舱拼装所用的聚乙烯板材三边尺寸差别大,单块重量超300 kg,搬运及吊装施工不得导致板材破损或弯曲变形,同时因聚乙烯板材较软、抗变形能力差,为此须采取钢结构骨架作为支撑(见图2),否则屏蔽舱整体稳定性难以保证,导致聚乙烯板材拼装难以达到严丝合缝的效果。

中国锦屏地下实验室聚乙烯屏蔽舱具体方案设计如图3所示,其位于埋深2 400 m的大型地下洞室中,屏蔽舱外部尺寸为52 m×10 m×8 m(长×宽×高),

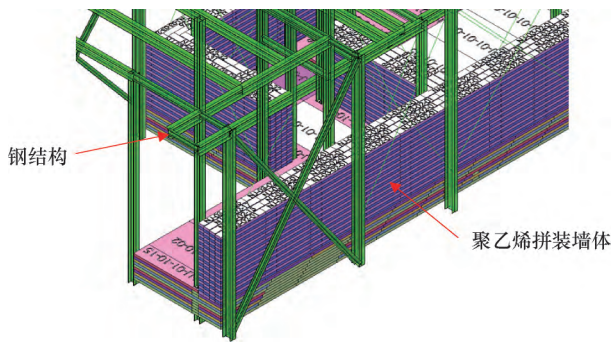


图2 聚乙烯屏蔽舱钢结构和聚乙烯板设计模型
Fig. 2 Design model of steel structure and polyethylene plate for polyethylene shielded cabin

屏蔽舱的底板、侧墙及顶板厚度均为 1 m, 以达到更好的射线屏蔽效果^[29-30], 聚乙烯总用量约为 1 850 m³、重达 1 800 t, 是目前世界最大的聚乙烯屏蔽舱。聚乙烯屏蔽舱平面为矩形, 其中屏蔽舱的前端入口处设置了迷宫式的洁净间入口, 以防外部射线直线射入, 在屏蔽舱侧面设置了大型的聚乙烯电动推拉门以供大型实验设备进出。如图 3 所示, 根据规划, 聚乙烯屏蔽舱内主要分为 3 个使用区域: 准备区、地下放射性测量分析区和预留测试区。其中, 准备区作为进入实验室的第一个房间, 便于工作人员进行更衣、风淋等实验前准备工作, 避免向测量区域引入额外的本底污染; 地下放射性测量分析区是多功能的样品分析区域, 内部包含多种低本底辐射测量仪器, 能够对地下实验室的样品分析提供多方面的参考; 预留测试区是面向各类需要低辐射本底环境的实验保留的区域, 包括前沿物理实验原型实验方案测试、低本底计量基准刻度、极低环境剂量率刻度等实验, 预留测试区内可能有实验的轮换, 需要保证实验场所的灵活性, 提供移动和安装探测装置的器械。

2 聚乙烯屏蔽舱板材定制化设计

为保证屏蔽效果, 防止外部射线射入舱体, 拼装完成后的聚乙烯屏蔽舱应四周无通缝、无直进直出的

缝隙通道。基于总体设计中的聚乙烯板材错峰拼装思路, 采用 BIM(Building Information Modeling) 技术对聚乙烯屏蔽舱进行深化设计, 确保舱体全方位无通缝, 并逐片对聚乙烯板材进行编号, 达到可以指导后台加工的标准。利用三维扫描技术将锦屏地下洞室空间生成较为精确的洞室实体模型, 与屏蔽舱模型进行碰撞检查分析, 提前解决可能出现的冲突问题。制作高密度聚乙烯板的原材料应满足聚乙烯(PE) 树脂(GB/T 11115—2009) 的要求, 聚乙烯板材各方向垂直度偏差不得超过±1 mm, 且需要经过出厂前检测。

2.1 聚乙烯屏蔽舱板材无通缝设计

为避免外部射线通过拼装遗留的直缝进入屏蔽舱内部空间, 降低屏蔽舱的屏蔽效果, 根据总体设计中聚乙烯板材错峰拼装思路, 首先须设计聚乙烯顶底板和墙体的无通缝方案。具体地, 聚乙烯屏蔽舱板底板及顶板厚度均为 1 m, 设计分为 10 层, 每层聚乙烯板材厚度为 10 cm, 将板材每层按纵横向逐层错开 10 cm, 顶板或底板边缘的板的尺寸同一方向每层增加或减少 10 cm, 角上的板将沿两向增加或缩减, 由此可实现竖向贯通线仅为聚乙烯屏蔽舱厚度的 1/10(见图 4)。聚乙烯屏蔽舱墙体厚度为 1 m, 设计分为 4 层, 每层厚度为 25 cm, 将板材每层按墙体纵向逐层错开 25 cm, 竖向逐层错开 2.5 cm, 由此实现贯通线仅为墙体厚度的 1/4(见图 5)。聚乙烯屏蔽舱板材局部衔接设计如图 6 所示。

2.2 聚乙烯屏蔽舱钢柱节点无通缝设计

大型聚乙烯屏蔽舱采用拼装的方式搭建, 为保证结构稳定性, 须配合钢结构设计安装, 钢柱与聚乙烯板材的节点部位是无通缝设计的关键内容。为解决钢柱节点存在的通缝问题, 在聚乙烯板材上搭配钢柱开槽, 开口方向相邻板材界面与钢柱充分贴合, 槽口深度随层数逐层变化。为保证聚乙烯屏蔽舱钢柱节点无通缝, 钢柱与聚乙烯板接缝位置须予以密封, 考虑到 50 目的聚乙烯粉料是本文中聚乙烯屏蔽舱高密度

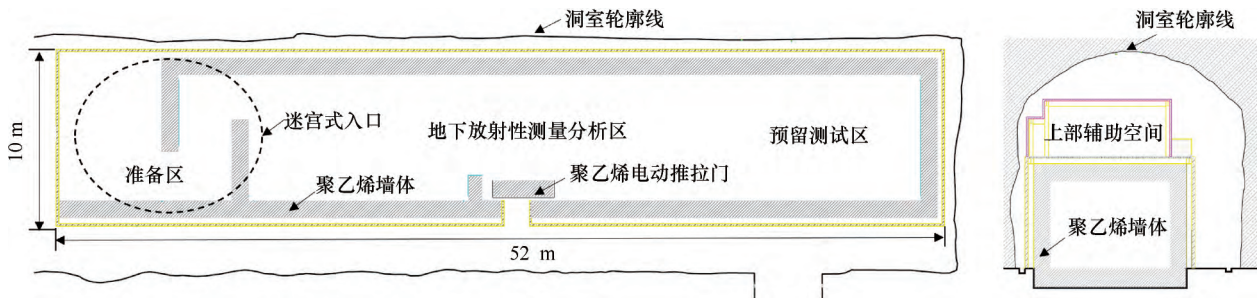


图3 聚乙烯屏蔽舱总体布局设计
Fig. 3 Overall layout of polyethylene shielded cabin

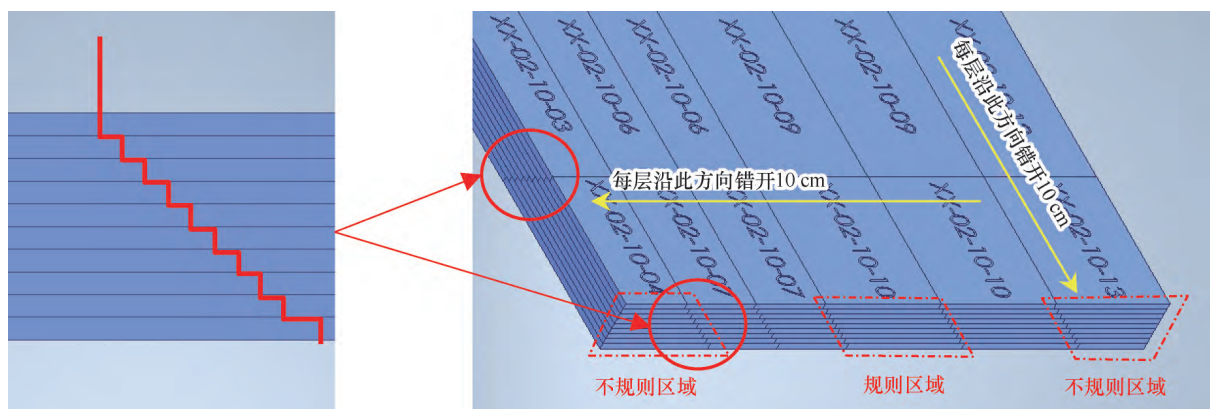


图4 聚乙烯屏蔽舱板材错缝统一标准(底板、顶板)

Fig. 4 Unified standard for staggered seams of polyethylene shielding cabin panels (bottom and top panels)

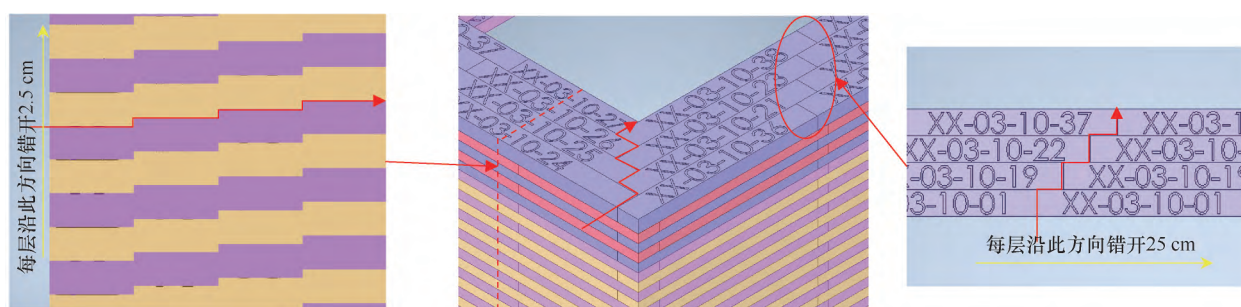


图5 聚乙烯屏蔽舱板材错缝统一标准(墙体)

Fig. 5 Unified standard for staggered seams of polyethylene shielding cabin panels (wall)

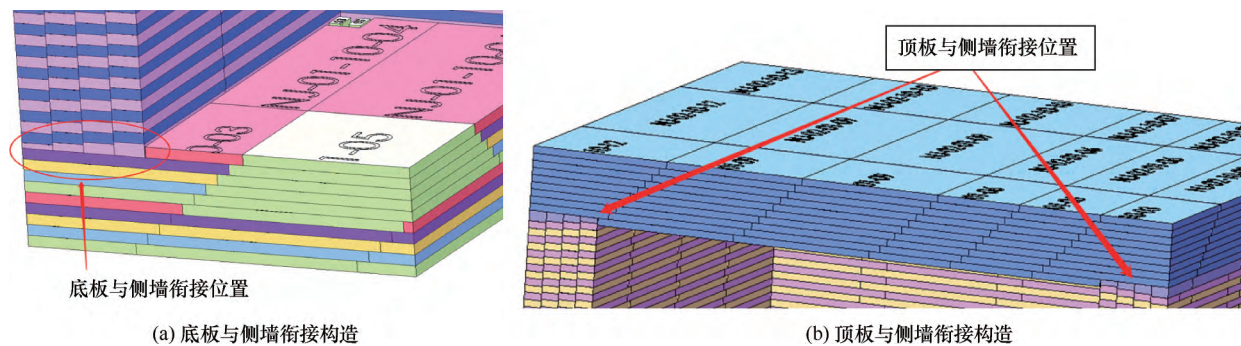


图6 聚乙烯屏蔽舱板材局部衔接位置示意

Fig. 6 Schematic diagram of local connection position of polyethylene shielding compartment board

聚乙烯板材的原材料, 该材料总体性能与高密度聚乙烯板材保持一致, 因此钢柱与聚乙烯板接缝处设计灌注 50 目聚乙烯粉料, 填实压紧并将周边热焊实, 最后顶部封装一块聚乙烯板(见图 7)。

2.3 聚乙烯屏蔽舱电动推拉门设计

聚乙烯屏蔽舱侧面的电动推拉门采用吊轨的方式固定, 吊轨固定在屏蔽舱内侧钢框架上, 门体由运行机构、吊轨、钢骨架、屏蔽板等部分组成, 如图 8 所示。聚乙烯电动推拉防护门内部填充 1 m 厚聚乙烯板, 聚乙烯板的组装方式及要求不低于墙体

组装的要求, 聚乙烯板组装的成形宽度为 3.6 m, 高度为 2.7 m。为保证聚乙烯屏蔽的有效性, 推拉门的聚乙烯板表面与屏蔽舱墙体聚乙烯板表面之间的间距不得大于 130 mm, 门体顶部与墙体门洞边缘的重叠有效宽度不小于 320 mm, 门体底部聚乙烯边缘与舱内聚乙烯底板表面的间隙不得超过 30 mm。推拉门关闭后, 门体底部的间隙用聚乙烯条块封堵, 封堵条厚度为 1 m, 高度为 100 mm, 宽度与门体相同。推拉门在关闭状态下, 门体与隔断间内聚乙烯屏蔽墙侧的墙体门洞边缘的重叠(搭接)有效宽

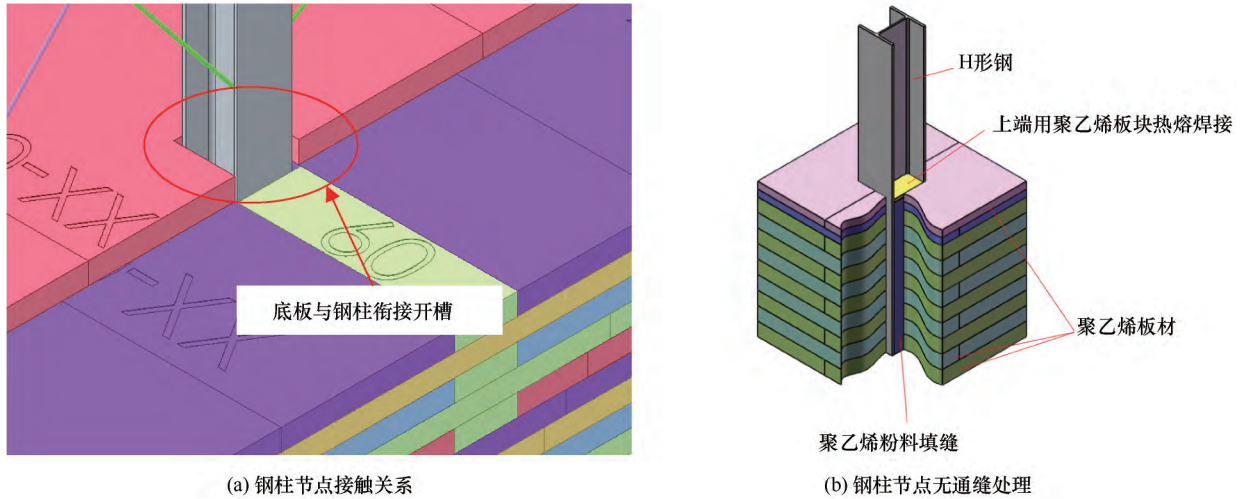


图7 聚乙烯屏蔽舱底板内钢柱节点处理

Fig. 7 Treatment of steel column nodes in polyethylene shielded cabin bottom plate

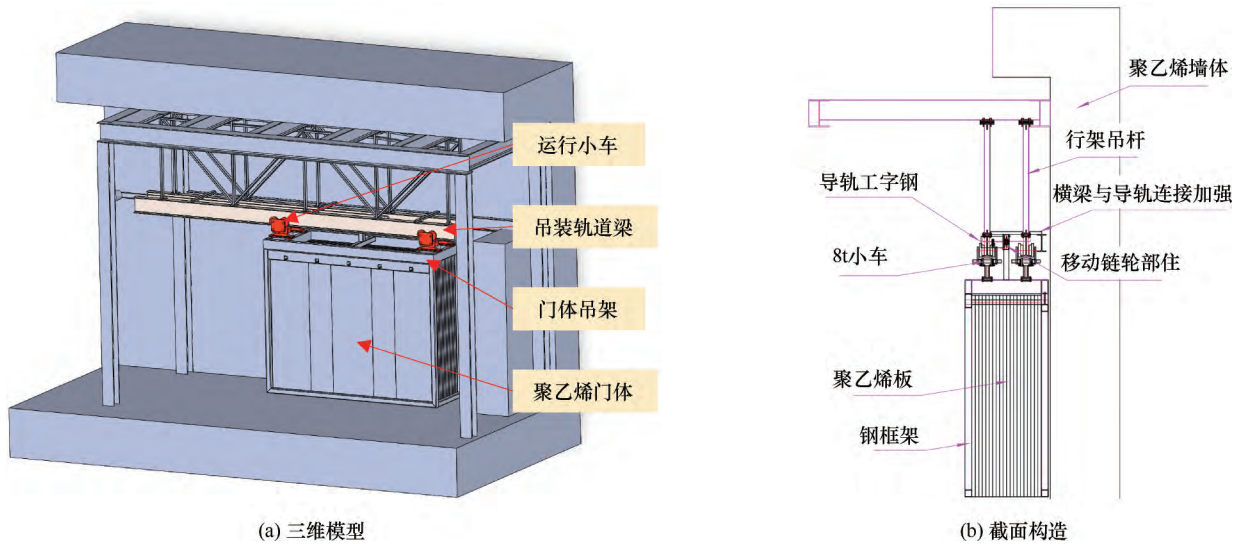


图8 聚乙烯电动推拉门设计模型

Fig. 8 Design model of polyethylene electric sliding door

度为 425~450 mm。

3 自重影响下聚乙烯板材应力应变仿真分析

本工程中的屏蔽舱主体由高密度聚乙烯板材拼装而成, 作为目前世界上规模最大的聚乙烯屏蔽舱, 屏蔽舱体受自重影响较大, 聚乙烯板材的力学稳定性需要进一步分析评价。聚乙烯屏蔽舱由众多的聚乙烯单板拼装组成, 各单板尺寸规格不一, 选取了数量大于 50 件的单板规格作为代表性分析对象, 建立单板的分析模型。共选取 18 种单板进行分析, 单板信息如表 1 所列, 选取的单板来自屏蔽舱顶板、底板、墙体等各个特征单元, 单板长度从 1~4 m, 宽度从 0.18~2 m, 厚度从 0.05~0.1 m,

涵盖了屏蔽舱单板的绝大部分尺寸规格, 具有较强的代表性。

3.1 模型和单元网格划分

本工程使用的聚乙烯单板虽然板块尺寸不尽相同, 但均为矩形体形状, 因此建立聚乙烯板材的几何模型。在有限元计算中, 单元的质量是影响收敛性和结果的重要因素, 由于各高密度聚乙烯板均为矩形体, 选择单元类型为六面体八节点单元, 单元属性为 C3D8T(八结点热耦合六面体单元, 三向线性位移, 三向线性温度), 单元尺寸根据各板块的尺寸进行调整。以数量最多的 2 000 mm×250 mm×100 mm 为例, 选取布点尺寸为 50 mm, 模型网格划分如图 9 所示。

表 1 聚乙烯屏蔽舱代表性单板信息

Table 1 Representative single board information of polyethylene shielded cabin

部 位	序 号	代 号	规格/型号(长度×宽度×厚度)/mm	数量/个	质量/kg
底 板	1	NJ-01-01-05	3 000×1 800×100	193	588.27
顶 板	1	NJ-02-01-06	4 000×1 200×100	200	522.85
	2	NJ-02-01-09	4 000×2 000×100	199	871.65
墙 体	1	NJ-03-02-01	2 000×250×100	10 622	54.35
	2	NJ-03-02-36	2 125×250×100	376	57.75
	3	NJ-03-02-19	1 550×200×100	118	33.76
	4	NJ-03-02-03	2 100×250×100	94	57.06
	5	NJ-03-02-15	2 200×250×100	94	59.80
	6	NJ-03-02-17	2 300×250×100	82	62.52
	7	NJ-03-01-04	2 000×250×75	67	40.72
	8	NJ-03-02-14	2 740×250×100	54	74.51
	9	NJ-03-02-16	2 640×250×100	54	71.79
	10	NJ-03-02-18	2 540×250×100	54	69.05
	11	NJ-03-03-31	2 515×250×100	54	68.38
	12	NJ-03-03-32	2 390×250×100	54	64.96
	13	NJ-03-01-01	2 000×250×50	53	27.11
	14	NJ-03-02-12	2 840×250×100	53	77.24
	15	53	1 000×180×100	50	20.00

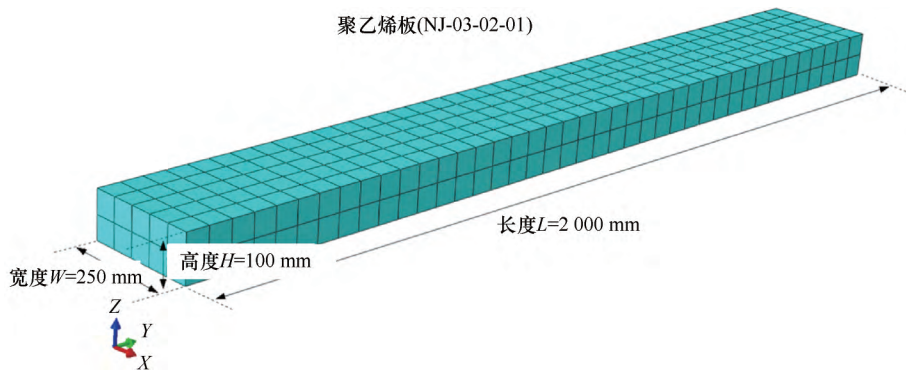


图 9 模型网格划分示意

Fig. 9 Schematic diagram of model mesh division

3.2 边界条件与荷载设置

为了研究上部自重应力下高密度聚乙烯板的力学状态, 基于聚乙烯单板拼装后的位置状态, 同时考虑约束刚体位移且便于观察各个方向的应变特征, 分别约束三个面(底面、左面、背面)法向方向的位移, 在其他方向均可自由移动, 即在三个面上分别设置 X、Y 或 Z 向位移约束, 有限元模型中的约束情况如图 10 所示。本次仿真涉及的聚乙烯材料物性参数包括密度、弹性模量和泊松比, 根据本工程中高密度聚乙烯板材的物性参数, 各参数取值如表 2 所列。

表 2 聚乙烯物性参数

Table 2 Polyethylene physical property parameters table

材 料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/MPa	泊松比
聚乙烯	1.085×10^3	2 000	0.3

为研究墙体自重荷载作用下屏蔽舱的应力与变形情况, 首先在分析单板上施加重力载荷, 模拟单板自身重力作用下的响应, 同时在单板上表面施加沿负 Z 向作用的均布压力, 模拟分析单板以上墙体自重对其响应的影响。不同高度的上部墙体作用通过不同的均布压力进行模拟。

3.3 仿真结果分析

对代表性的聚乙烯单板进行自重变形分析, 得到在自重作用下的应力及变形情况。图 11 为代号 NJ-03-02-01 的聚乙烯单板($L \times W \times D = 2\,000 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 的典型应力及变形情况。设计工况下, 聚乙烯单板三个方向的变形和板底最大应力随上部墙体高度的变化关系如图 12 所示, 表明单板的应力变形响应随上部载荷的增加而线性增加。

进一步分析各代表性单板在最不利荷载情况下的

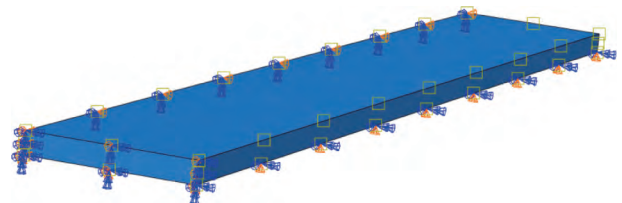


图 10 有限元模型约束示意

Fig. 10 Schematic diagram of finite element model constraints

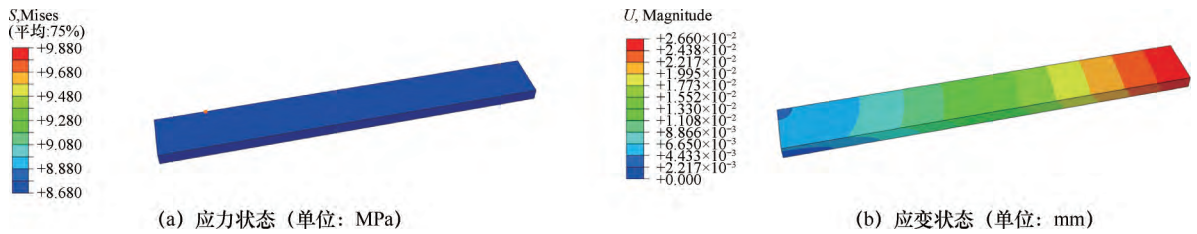


图 11 NJ-03-02-01 的聚乙烯单板的应力和变形状态

Fig. 11 Stress and deformation state of NJ-03-02-01 polyethylene veneer

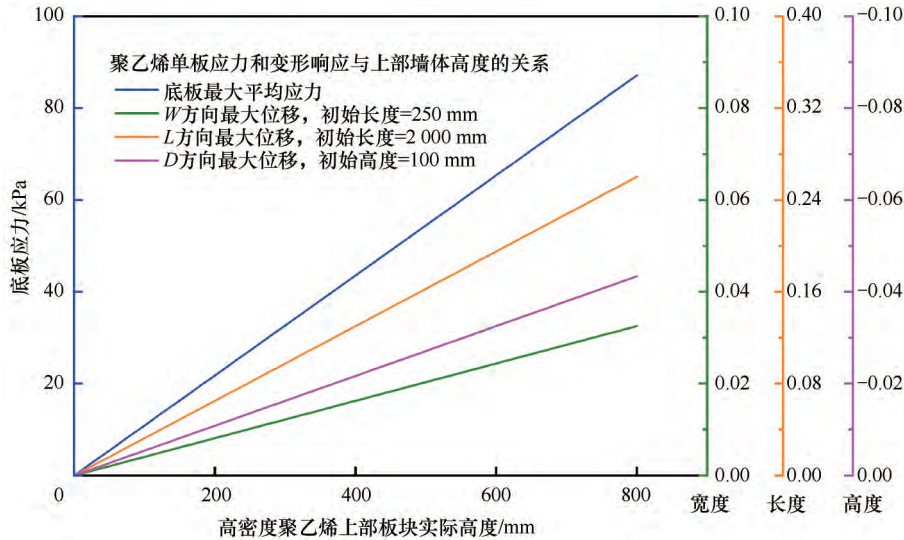


图 12 聚乙烯单板三个方向的变形和板底最大应力随上部墙体高度的变化关系

Fig. 12 The deformation and maximum stress of polyethylene in three directions vary with the height of the upper wall

力学特征, 各代表性单板受最大上部自重载荷作用下 (即分析单板为墙体、顶板、底板的最下层单板) 的变形情况如图 13 所示。在上部自重载荷作用下, 聚乙烯单板的应力和变形随载荷的增加而线性变化, 在最不利载荷作用下, 各代表性单板的最大伸长变形为 0.37 mm, 最大收缩变形为 0.043 mm。该变形均小于聚乙烯单板的加工允差, 在施工排版时, 可不考虑该变形对排版的影响。在自重载荷作用下, 屏蔽舱墙体高度方向的累积收缩变形约 3 mm。在自重载荷作用下, 聚乙烯单板的最大应力为 87.20 kPa, 远小于材料的抗压强度, 在屏蔽舱施工及使用过程中, 屏蔽舱自重产生的应力不会引起聚乙烯单板力学性能的失效。

4 有限空间下大型聚乙烯屏蔽舱施工工艺技术

4.1 建筑材料低本底要求

在包括大型聚乙烯屏蔽舱在内的锦屏大设施的建设中, 为有效服务低本底前沿物理实验, 保证建筑材料的低放射性是关键。建筑材料中放射性核素是建筑物放射性的主要来源, Ra-226、K-40 等长寿命天然放射性核素会对实验空间的低本底要求造成极大影响^[31-32]。因此, 中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏

蔽舱建设所用的钢构件、聚乙烯板等材料除按照设计进行技术参数检测外, 还需通过辐射低本底检测, 要求建材样品中不应含有 Cs、Co 等人工放射性核素, 天然放射性核素活度浓度应在锦屏地下实验室围岩放射性核素活度浓度的 3 倍以内, 指标满足要求后方可投入使用。锦屏地下实验室围岩中天然放射性核素活度如表 3 所列。

表 3 锦屏地下实验室围岩中天然放射性核素活度
Table 3 Natural radioactive nuclide activity in the surrounding rock of Jinping Underground Laboratory

核素	特征峰能量/keV	活度浓度/Bq · kg ⁻¹
Ra-226	186.11	16.7±2.0
Ac-228	295.21	10.9±1.2
Pb-214	351.92	10.4±1.1
Ac-228	609.32	10.5±1.1
Pb-214	1 120.29	10.5±1.3
Bi-214	1 764.49	11.5±1.4
Bi-214	209.3	0.1±0.1
Ac-228	338.3	0.4±0.1
Ac-228	583.2	1.6±0.3
Bi-214	911.6	1.2±0.2
K-40	969.1	1.1±0.2
Tl-208	2 614.5	0.8±0.2
Tl-208	1 460.7	28.7±3.3

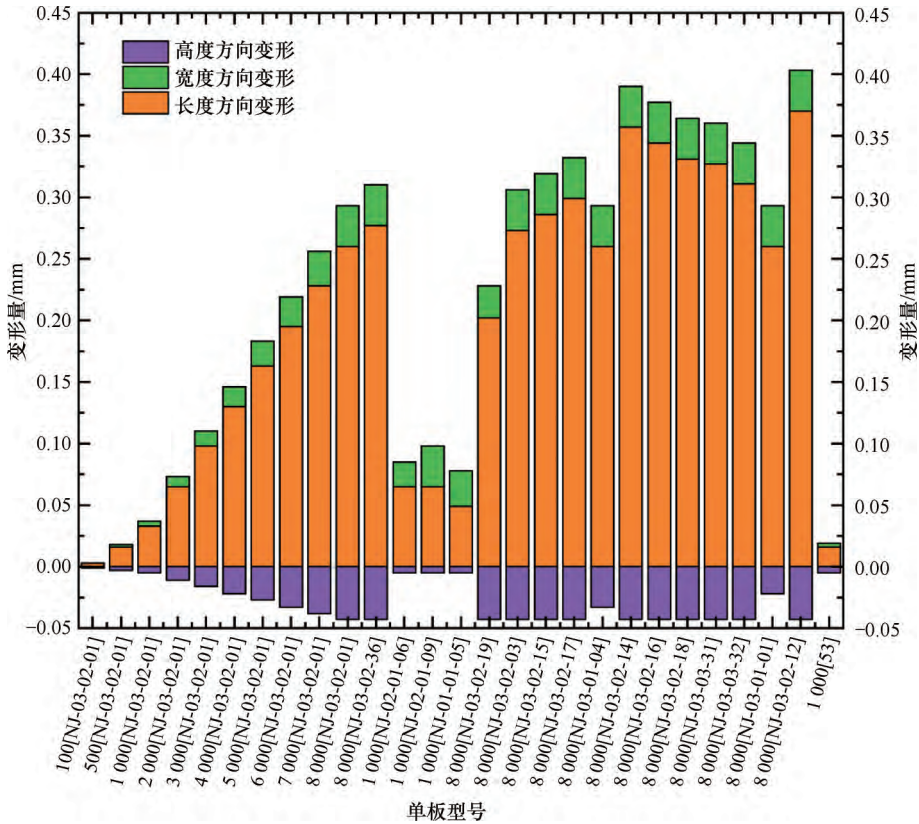


图 13 各代表性单板受最大上部自重载荷作用下的各方向变形情况

Fig. 13 Deformation of representative veneers in all directions under the maximum upper self weight load

4.2 施工工艺流程

由于地下实验室洞室空间较为有限, 无法安装大型吊装设备, 而高密度聚乙烯墙体板材和钢结构部件质量较大, 人工搬运难度极大, 必须采用小型设备机动吊装, 因此采用 16 t 汽车吊进行吊装, 吊装时需充分考虑洞室有限空间和复杂环境, 必须精细操作。采用专用尼龙吊带配合汽车吊开展吊装, 吊带规格为 100 mm×10 m, 每根吊带可承重 5 t, 尼龙吊带捆绑于板材两端约 600 mm 处, 每一捆板材一次起吊, 每次起吊重量不超过 2 t。考虑到聚乙烯屏蔽舱规模较大, 在施工时将舱体按长度方向划分为三个施工区段, 如

图 14 所示, 按照先后端后前端、先低位后高位的顺序施工原则开展吊装拼接, 确保施工过程不会对聚乙烯板材产生异常的应力集中。聚乙烯屏蔽舱主体结构施工主要有钢结构施工和屏蔽舱安装两部分, 施工过程中需考虑两项工作密切配合, 总体施工工艺流程如图 15 所示, 其中, 在主体结构施工前的基坑防水抑氢层主要是为了隔绝基岩渗水和围岩中天然放射性氡气, 避免影响深地洞室的低本底前沿物理实验, 防水抑氢层施工工艺可参考文献 [25]。锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱施工过程中通风防尘是保障工程质量和人员安全的重点, 在施工过程中应加强作业面

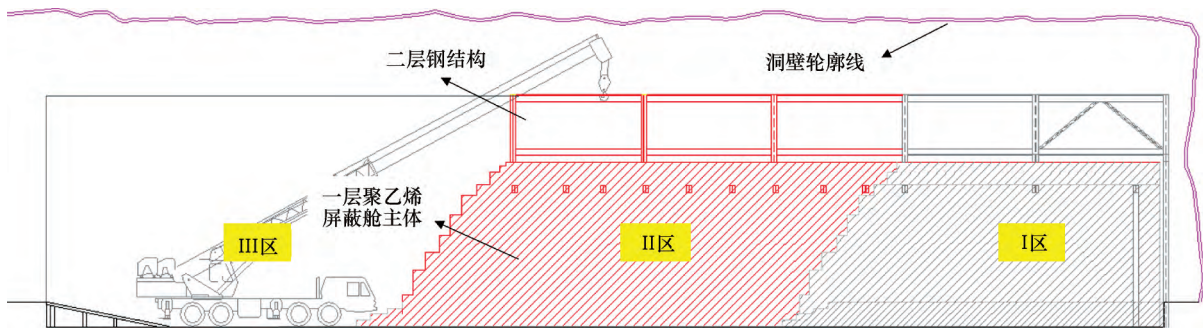


图 14 聚乙烯屏蔽舱分区段施工形貌

Fig. 14 Construction morphology of segmented polyethylene shielding cabin

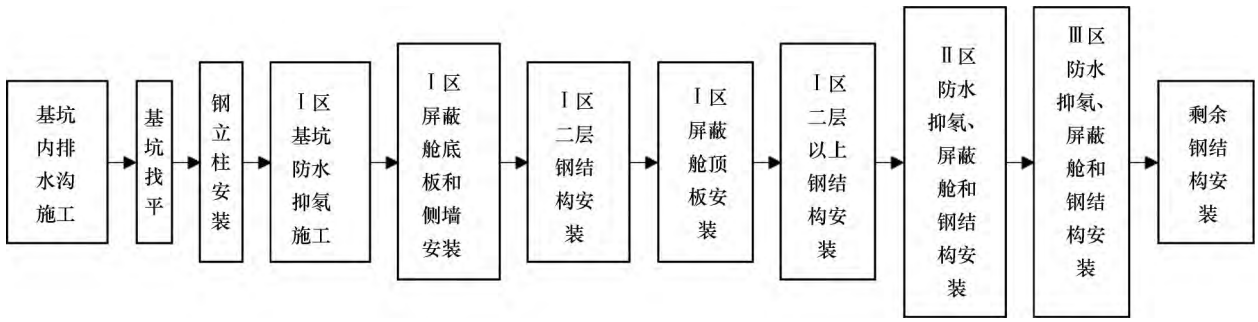


图 15 聚乙烯屏蔽舱施工工艺流程

Fig. 15 Construction process of polyethylene shielding cabin



图 16 聚乙烯屏蔽舱板材转运、拼装与检验

Fig. 16 Transportation, assembly, and inspection of polyethylene sheets

通风, 作业人员必须穿戴连帽式防尘服、防尘鞋套等特殊劳保用品, 每一施工分区的地面前置工作完成后, 对聚乙烯板材安装工作面及其周围环境进行清洁, 清洁完毕后进行聚乙烯板材安装, 且聚乙烯板安装前后需采用吸尘器清洁表面, 避免浮尘颗粒影响聚乙烯板材的拼装质量。

4.3 聚乙烯屏蔽舱板材拼装工艺

聚乙烯屏蔽舱的板材拼装严格执行本文的无通缝定制化设计。聚乙烯板材的错峰拼装关键在于不同尺寸板材的准确定位, 为此, 根据无通缝设计方案, 在聚乙烯板材进场前须给不同尺寸板材标注编号, 根据板材编号分批次进场安装, 避免现场拼接安装时材料错乱。为避免放置时造成较大形变, 聚乙烯板材堆放位置应平整坚实。在聚乙烯板材施工拼装时, 将板材用吊车吊至安装位置, 吊装过程中采取必要的垫布保护措施(见图 16)。聚乙烯板材安装时宜从门洞边开始向两侧依次进行, 无洞口隔墙应从墙的一端向另一端顺序安装, 聚乙烯板材之间应靠紧安装, 确保拼装板材之间缝隙内无粉尘及其他颗粒杂质, 用靠尺和线锤检查平整度和垂直度, 最后用橡皮锤敲打调整直至安装合格为准。在板缝处理施工时, 板材与 H 形钢处缝隙用聚乙烯块嵌填, 并采用 50 目聚乙烯粉料填

充密实, 最后对表面进行热熔焊接, 焊接深度 5 mm, 每一层板材铺设均需采用上述方法进行节点处理。聚乙烯屏蔽舱板材总体拼装流程如图 17 所示。在聚乙烯板施工过程中, 为控制拼装质量, 必须进行过程检查以达到验收标准, 检查验收顺序跟随施工顺序, 具体为先底板、后侧墙、最后顶板, 每个验收模块从第一层验收到最后一层。验收要求聚乙烯板材之间的缝隙宽度不大于 2 mm、表面平整度小于 8 mm、垂直度小于 10 mm、轴线位置偏移小于 10 mm。最终聚乙烯屏蔽舱竣工形貌如图 18 所示。

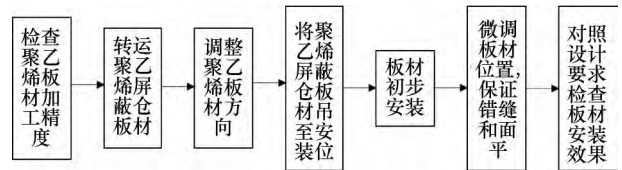


图 17 聚乙烯屏蔽舱板材总体拼装工艺流程

Fig. 17 Overall assembly process of polyethylene shielding cabin panels

5 结果讨论

为了评估中国锦屏地下实验室二期 C2 厅大型聚乙烯屏蔽舱对外部射线的屏蔽效果, 工程竣工后, 针对该大型聚乙烯屏蔽舱内外环境开展了环境伽马本



(a) 聚乙烯屏蔽舱入口形貌

(b) 聚乙烯屏蔽舱内部形貌

图 18 聚乙烯屏蔽舱竣工形貌

Fig. 18 Completed appearance of polyethylene shielding cabin

表 4 国际上不同地下实验室环境伽马本底测量结果

Table 4 In-situ measurement results in different underground laboratories internationally

地下实验室	埋深/m	探测器类型	测量能区/keV	积分计数率/cps
Gran Sasso ^[34] (意大利)	1 400	碘化钠	35~3 000	69.5
Modane ^[35] (法国)	1 700	高纯锗	7~2 734	79
Boulby ^[36] (英国)	1 100	高纯锗	7~2 734	24
Sanford ^[37] (美国)	1 500	碘化钠	0~3 300	596~1 335
SNOLAB ^[38] (加拿大)	2 100	碘化钠	0~3 300	92.5
CJPL-II (C2厅聚乙烯屏蔽舱外 ^[33])	2 400	高纯锗	60~2 700	69.9
CJPL-II (C2厅聚乙烯屏蔽舱内 ^[33])	2 400	高纯锗	60~2 700	2.2

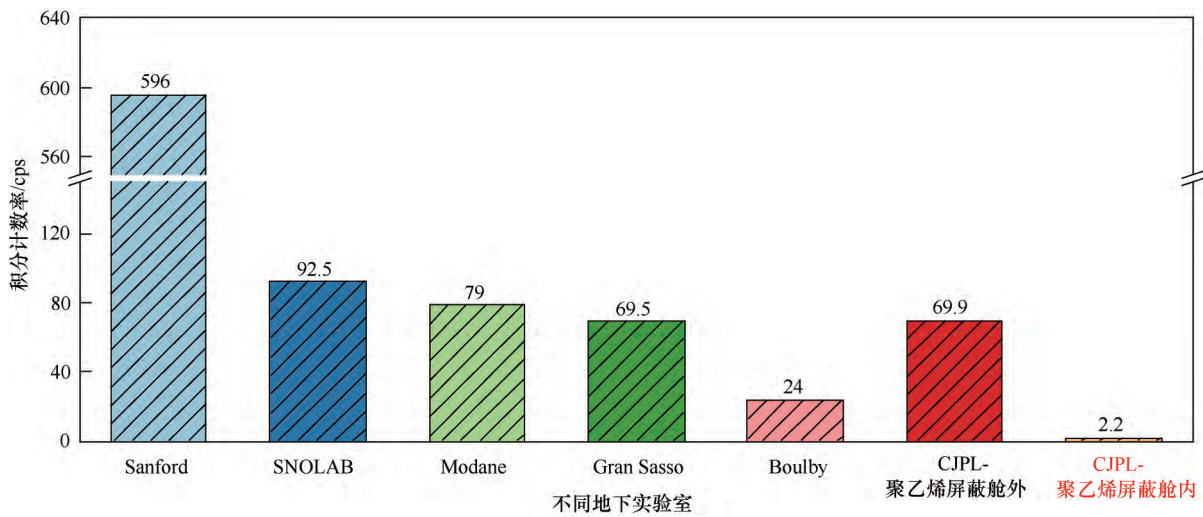


图 19 国际不同地下实验室环境伽马本底测量结果对比

Fig. 19 Comparison of in-situ measurement results in different underground laboratories internationally

底测量^[33], 环境伽马能谱测量可以评估环境伽马本底水平以及环境中 U-238 和 Th-232 等放射性核素含量。表 4 呈现了包括 CJPL-II 中 C2 厅聚乙烯屏蔽舱在内的国际上不同地下实验室环境伽马本底测量结果, 其中, 测量能谱的积分计数率反映了环境伽马射线本底的整体水平, 测量结果表明中国锦屏地下实验

室二期 C2 厅聚乙烯屏蔽舱内环境伽马能谱 60 ~ 2700 keV 积分计数率为 2.2 cps, 相比屏蔽舱外降低了约 97%, 且远远低于 Boulby(24 cps)、Gran Sasso(69.5 cps) 等国外顶尖地下实验室(见图 19)。以上结果对比表明中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱射线屏蔽效果良好, 达到了世界一流水平。中国锦屏

地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱极低辐射本底实验空间,将服务于构建不同的组合式固体辐射屏蔽装置,为暗物质直接探测实验、无中微子双贝塔衰变实验、核天体物理实验和其他物理实验提供不同尺寸可组合的屏蔽装置,为各类中小型实验提供极佳的低本底测试与运行环境。

本文的聚乙烯板材错缝拼装设计适用于多种不同的施工条件。在类似于中国锦屏地下实验室的极深地下洞室环境中,由于施工操作空间较小,采用了小型汽车吊的方式开展聚乙烯板材错缝拼装,如果在地面宽敞空间中建造该大型屏蔽舱,则龙门吊更加适合大量聚乙烯板材的吊运和拼装,提高作业效率。在施工温度环境方面,中国锦屏地下实验室处于2400 m极深的埋深环境,且水平方向距离锦屏山隧道两端出口约9000 m,因此内部温度常年保持稳定(约14℃),因此,本文中由大量聚乙烯板材错缝拼装搭建的大型聚乙烯屏蔽舱不会产生极端的温度应力。然而,如果类似错缝拼装工程处于温度波动较大的现场环境,拼装板材之间的温度应力将导致建筑内外墙侧向受力,严重影响内外墙的安全稳定,在这种不利工况下,需要在板材错缝拼装设计的基础上,在拼装过程中预留一定宽度的温度施工缝,并通过进一步的仿真校核和实验测试保证拼装单元的温度变形处于可控范围内。

6 结论

本文系统阐述了中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱建造关键技术,提出了在地下有限空间中建造大型聚乙烯屏蔽舱的设计思路,通过聚乙烯屏蔽舱各部位定制化无通缝创新设计、聚乙烯板材单元应力应仿真分析评价、有限空间下大型聚乙烯屏蔽舱拼装施工工艺等关键技术手段,实现了世界最大规模的聚乙烯屏蔽舱高效建造。

(1) 中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱采用无通缝拼装创新设计,基于错缝拼装思路,在屏蔽舱底板、墙体、顶板、钢结构节点等各个部位实现了无通缝设计,最大程度保证了聚乙烯屏蔽舱对外部射线的屏蔽效果。

(2) 有限元仿真结果分析表明,在自重应力影响下,聚乙烯板材变形均小于加工允差,屏蔽舱墙体高度方向的累积收缩变形约3 mm,聚乙烯单板的最大应力为87.20 kPa,在变形和强度方面满足大型聚乙烯屏蔽舱稳定性及拼装误差要求。

(3) 在建筑材料低本底要求的基础上,系统介绍了有限空间下大型聚乙烯屏蔽舱施工工艺和聚乙烯板

拼装工艺关键技术。实测数据对比表明中国锦屏地下实验室大型聚乙烯屏蔽舱射线屏蔽效果达到世界一流水平,研究成果可为低辐射本底环境构建和有限空间下大型拼装式工程建造提供有益参考。

参考文献(References):

- [1] CHENG J P, KANG K J, LI J M, et al. The China Jinping Underground Laboratory and its early science [J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2017, 67(1): 231-251.
- [2] WU Y C, HAO X Q, YUE Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing Underground Laboratory [J]. Chinese Physics C, 2013, 37(8): 086001.
- [3] VOTANO L. The Gran Sasso Laboratory [J]. The European Physical Journal Plus, 2012, 127(9): 109.
- [4] SMITH N J T. The SNOLAB deep underground facility [J]. The European Physical Journal Plus, 2012, 127(9): 108.
- [5] PIQUEMAL F. Modane underground laboratory: status and project [J]. The European Physical Journal Plus, 2012, 127(9): 110.
- [6] FUKUDA S, FUKUDA Y, HAYAKAWA T, et al. The Super-Kamiokande detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 501(2/3): 418-462.
- [7] RINALDI C, SABATINO U D, POTENZA F, et al. Robotized inspection and health monitoring in the Gran Sasso National Laboratory [J]. Structural Monitoring and Maintenance, 2021, 8(1): 51-67.
- [8] AREVALO A, AMIDEI D, BAXTER D, et al. Measurement of the bulk radioactive contamination of detector-grade silicon with DAMIC at SNOLAB [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(6): P06019.
- [9] LOZZA V. Scintillator phase of the SNO+ experiment [J]. Journal of Physics Conference, 2012, 375(4): 042050.
- [10] SLOWAKIEWICZ M, GLUYAS J, KOWALSKI A, et al. A new and working petroleum source rock on the UK Continental Shelf (Upper Permian, offshore Yorkshire) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 121: 104605.
- [11] KAJITA T. Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande and Kamiokande-Evidence for ν_{μ} oscillations [J]. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 1999, 77(1-3): 123-132.
- [12] 程建平, 吴世勇, 岳嵩, 等. 国际地下实验室发展综述 [J]. 物理, 2011, 40(3): 149-154.
CHENG J P, WU S Y, YUE Q, et al. A review of international underground laboratory developments [J]. Physics, 2011, 40(3): 149-154.
- [13] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 649-657.
FENG X T, WU S Y, LI S J, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory (CJPL-II) in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 649-657.
- [14] 李邵军, 谢振坤, 肖亚勋, 等. 国际深部地下实验室岩体原位力学响应研究综述 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2491-2509.

- LI S J, XIE Z K, XIAO Y X, et al. Review of international research on rock in situ rockmass behavior in deep underground research laboratory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2491-2509.
- [15] GENG X P, YANG L T, YUE Q, et al. Projected WIMP sensitivity of the CDEX-50 dark matter experiment [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2024, (7): 009.
- [16] PANG B Y, ABDUKERIM A, BO Z H, et al. Detecting Neutrinos from Supernova Bursts in PandaX-4T [J]. Chinese Physics C, 2024, 48(7): 073002.
- [17] LIU W P, GUO B, AN Z, et al. Recent progress in nuclear astrophysics research and its astrophysical implications at the China Institute of Atomic Energy [J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, 35(12): 217.
- [18] APRILE E, AALBERS J, AGOSTINI F, et al. The XENON1T dark matter experiment [J]. The European Physical Journal C, 2017, 77: 881.
- [19] AGNESE R, ARAMAKI T, ARNQUIST I J, et al. Results from the super cryogenic dark matter search experiment at Soudan [J]. Physical Review Letters 2018, 120: 061802.
- [20] DAI W H, JIA L P, MA H, et al. Exotic dark matter search with CDEX-10 experiment at China Jinping Underground Laboratory [J]. Physical Review Letters, 2022, 129: 221802.
- [21] 郝际平, 孙晓岭, 薛强, 等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用 [J]. 工程力学, 2017, 34(1): 1-13.
HAO J P, SUN X L, XUE Q, et al. Research and applications of prefabricated steel structure building systems [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 1-13.
- [22] XU L, ZOU Y, LU Y Q, et al. Automation in manufacturing and assembly of industrialised construction [J]. Automation in Construction, 2025, 170: 105945.
- [23] 李珺鹏, 齐晔华, 谢璠. 聚合物基导热绝缘复合材料导热机理及应用研究 [J]. 材料导报, 2012, 26(3): 69-72.
LI J P, QI S H, XIE P. Thermally conductive mechanism and application of polymer-based insulating thermally conductive composite [J]. Materials Reports, 2012, 26(3): 69-72.
- [24] 王慧杰, 张宜鹏, 廖辉荣. 化学交联高密度聚乙烯的结构与性能 [J]. 塑料, 2018, 53(5): 28-37.
WANG H J, ZHANG Y P, LIAO H R. Structure and properties of chemically crosslinked high-density polyethylene [J]. Plastics, 2018, 53(5): 28-37.
- [25] 杨进忠, 李名川, 李宏璧, 等. 锦屏地下实验室防水抑氨工程技术与应用 [J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 155-168.
YANG J Z, LI M C, LI H B, et al. Waterproof and Radon suppression engineering technology and application at China Jinping Underground Laboratory [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 155-168.
- [26] REDA A M, DALY A A, EID E A. Neutron/gamma radiation shielding characteristics and physical properties of (97. 3-x) Pb-xCd-2. 7Ag alloys for nuclear radiation applications [J]. Physica Scripta, 2021, 96(12): 125321.
- [27] 李小明, 罗晓渭, 郭朝选, 等. ADS 实验大厅中子防护工程技术研究 [J]. 辐射防护, 2019, 39(4): 297-303.
- LI X M, LUO X W, GUO Z X, et al. Research on neutron shielding engineering in ADS experimental hall [J]. Radiation Protection, 2019, 39(4): 297-303.
- [28] 黄兴, 贺国珠, 程晶晶, 等. (n, γ) 反应实验研究中的中子屏蔽设计 [J]. 原子核物理评论, 2015, 32(2): 208-211.
HUANG X, HE G Z, CHENG P J, et al. Neutron shielding design for experiment research of (n, γ) reaction [J]. Nuclear Physics Review, 2015, 32(2): 208-211.
- [29] KURTULUS R, KAVAS T, MAHMOUD K A, et al. Evaluation of gamma-rays attenuation competences for waste soda-lime glass containing MoO₃: experimental study, XCOM computations, and MCNP-5 results [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2021, 557: 120572.
- [30] SHAABAN S M, ALSAIF N A M, GHAMDI H A, et al. Influence of copper ions on the structural, mechanical, radiation shielding and dielectric properties of borate zinc-fluoride glasses [J]. Journal of Electronic Materials, 2023, 52: 6269-6276.
- [31] 程建平, 李元景, 曾志. 暗物质直接探测实验辐射本底研究: 以锦屏大设施项目为例 [J]. 实验技术与管理, 2021, 38(7): 1-10.
CHENG J P, LI Y J, ZENG Z. Research on radioactive background of dark matter direct detection experiment: Taking Jinping underground facility project as example [J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(7): 1-10.
- [32] 岳骞. 我国的深地实验室 CJPL 和 CDEX 暗物质直接探测实验 [J]. 现代物理知识, 2018, 30(2): 14-22.
YUE Q. CJPL and CDEX dark matter direct detection experiment of China's deep earth laboratory [J]. Modern Physics, 2018, 30(2): 14-22.
- [33] 张鹏, 代文翰, 张秋丽, 等. 中国锦屏地下实验室二期环境伽马本底测量 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(1): 178-186.
ZHANG P, DAI W H, ZHANG Q L, et al. Environmental gamma background measurement in the phase II of China Jinping Underground Laboratory [J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2025, 55(1): 178-186.
- [34] MALCZEWSKI D, KISIEL J, DORDA J. Gamma background measurements in the Gran Sasso National Laboratory [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 295(1): 749-754.
- [35] MALCZEWSKI D, KISIEL J, DORDA J. Gamma background measurements in the Laboratoire Souterrain de Modane [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2012, 292(2): 751-756.
- [36] MALCZEWSKI D, KISIEL J, DORDA J. Gamma background measurements in the Boulby Underground Laboratory [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 298(3): 1483-1489.
- [37] AKERIB D S, AKERLOF C W, ALSUM S K, et al. Measurement of the gamma ray background in the Davis cavern at the Sanford Underground Research Facility [J]. Astroparticle Physics, 2020, 116: 102391.
- [38] GOLOVKO V V, KAMAEV O, SUN J, et al. Ambient dose and dose rate measurement in SNOLAB Underground Laboratory at Sudbury, Ontario, Canada [J]. Sensors, 2023, 23(4): 1945.

(责任编辑 王海锋)