doi: 10.11720/wtyht.2019.0254

罗辉,王驹,蒋实,等.高放废物地质处置新场岩体三维地质模型构建与应用[J].物探与化探,2019,43(3):568-575.http://doi.org/10.11720/ wtyht.2019.1478

Luo H, Wang J, Jiang S, et al. Construction and application of three-dimensional geological model in Xinchang Block for high-level radioactive waste disposal[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3); 568-575. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1478

高放废物地质处置新场岩体三维地质模型构建与应用

罗辉1,王驹1,蒋实2,赵宏刚1,金远新1

(1. 核工业北京地质研究院 中核高放废物地质处置评价重点实验室,北京 100029;2. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要:我国高放废物地质处置经过30多年研究,已初步确定新场为地下实验室推荐场址。开展新场岩体三维地 质建模研究,一方面能够充分利用已有资料准确地表达各种地质现象,直观再现地质单元的空间展布及其相互关 系;另一方面可以挖掘隐含的地质信息,方便地质分析和工程决策,这在地下实验室研究阶段非常重要。在对新场 已有资料综合分析和解译的基础上,建立了岩体的三维地质模型,直观地再现了新场岩体地质环境特征;并基于地 质建模结果,开展了钻孔设计等工程应用,取得了较好的效果。本研究可为我国高放废物地质处置后续工作中地 质分析与工程设计提供有益参考和技术支持。

关键词: 高放废物地质处置;新场岩体;三维地质建模;模型应用

中图分类号:X771 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019)03-0568-08

0 引言

高放废物具有放射性高、半衰期长、毒性大等特 点,对其进行最终安全处置难度极大,面临一系列的 科学、技术和工程挑战,受到了各核工业国家的高度 重视^[1]。目前,深地质处置是国际上公认的安全处 置高放废物可行的处置方式。开发处置库是一个长 期的系统化工程,一般需要经过基础研究、处置库选 址场址评价、地下实验室研究、处置库设计、建设和 关闭等阶段^[2-3],其中三维地质建模已成为许多国 家高放废物地质处置项目中地质分析和工程设计必 不可少的手段^[4-7]。

我国高放废物地质处置研究自 1985 年开始以 来,开展了处置库选址、场址评价、处置工程、安全评 价、地下实验室场址初选等研究^[8-10]。目前已确定 甘肃北山为高放废物地质处置的首选预选区,并经 过综合分析和定性比选,初步确定新场为地下实验 室的推荐场址。利用我国高放废物地质处置场址适 宜性调查中多方法获取的地质资料和场址特征数 据,建立新场岩体的三维地质模型,并基于模型开展 一系列三维可视化分析,全面真实地揭示场址深部 地质环境特征,对地下实验室后续的工程设计和开 挖等具有实际的工程指导意义。

1 研究区概况

1.1 地层和岩性分布特征

甘肃北山新场地段位于高放废物处置库甘肃北 山预选区的新场预选地段中部,地貌表现为中山至 低山山地,距玉门市直线距离约 80 km(图1)。

新场岩体位于原1:5万向阳山—新场地段地 质调查区^[11]的中东部,属塔里木—南疆地层大区天 山地层区的中天山—北山地层分区红柳园地层小 区。岩体外围出露的区域地层主要是前长城系敦煌 岩群鱼脊山岩组(AnChDyj)和长城系咸水井群 (Chxs)。

新场花岗岩体西面以旧井断裂为界,东至金庙 沟煤矿;北面以 EW 走向的 F6 韧性剪切带为界,南 界为 EW 走向的 F7 韧性剪切带(如图 2)。花岗岩

收稿日期: 2019-01-05;修回日期: 2019-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41502308)

作者简介:罗辉(1982-),男,高级工程师,主要从事高放废物地质处置选址和场址评价方面的研究工作。Email:luo1029hui@163.com

体岩性类别从北至南依次为: 红柳井南山单元 (Pt₂²H)片麻状花岗闪长岩、新场单元(O₁X)二长花 岗岩、机井沟单元(O₁J)花岗闪长岩和鸳鸯沟单元 (Pt₂²Y)片麻状二长花岗岩。新场花岗岩体属非典 型岩浆成岩,是由变质岩经原地重熔形成的花岗岩。 由于变质岩本身岩性较为复杂,加之重熔的不彻底 性,造成岩浆的均一化程度不一致,因而表现为典型 的多岩性、多成因杂岩体。新场岩体东西长约 20 km,南北宽约 5 km,地表出露面积约 100 km²,地球 物理测量表明花岗岩底板深度超过 1 000 m。



图 1 1 甘肃北山新场岩体交通位置 Fig.1 Traffic location of Xinchang block in Beishan, Gansu



图 2 新场岩体地质简图 Fig.2 The geological map of Xinchang block

1.2 构造分布特征

断裂构造的空间分布决定着岩体的结构和完整性,新场岩体位于天山—阴山纬向构造体系北山段的柳园—天仓褶皱带中段,断裂按方向可分为 NE 向、NW 向和近 EW 向 3 组。压性和压扭性断裂走

向多为 EW 向或近 EW 向,与地层走向一致,为研究 区内具有控制意义的断裂,切割中生代及其以前地 层和岩体,具有多期活动性。扭性和张扭性断裂为 压性、压扭性断裂的次级配套断裂,一般长 2~5 km, 多数走向为 NNE 或 NE 向,少数为 NW 向,倾角 50° ~80°,以左旋扭性为主,该组断裂把花岗岩体切割 成大小不一的岩块。

2 数据处理与解译

研究区建模主要搜集了已有的地形数据、地表 地质调查数据、11条地球物理剖面数据以及34个 钻孔的岩心数据,结合研究区已有的地质认识,重点 对钻孔数据和地球物理测量数据进行了解译。

2.1 钻孔数据的导入与解译

将研究区钻孔地质编录资料整理成表格导入钻 孔数据库,并根据地质编录结果对不同岩石类型赋予 不同地层代号,方便后续地质剖面图和联井剖面图的 绘制及断层的解译。调整好需要显示的信息,如钻孔 名、钻孔符号和孔深,然后生成钻孔轨迹线。为了控 制三维建模时的岩性界面和断层的三维空间延伸,根 据钻孔编录数据,编制了 10 条 NE—SW 向联井剖面 和1条近 EW 向的联井剖面(图 3)。

2.2 地球物理剖面导入与解译

地球物理探测是了解深部地质环境的重要手 段,将11条地球物理剖面导入三维空间(图4),结 合钻孔揭露的岩性信息和地表地质填图资料对地球 物理剖面反演的构造进行解译,同时尝试解译出不 同岩性的界面,分别绘制对应的地质剖面图(图5,



图 4 物探剖面初步解译的地质剖面 Fig.4 Geological section interpreted by geophysical profile

· 571 ·





Fig.5 Geological interpretation of geophysical profile XC11

以 XC11 为例)。这样就能联合联井剖面控制花岗 岩体和断层在地表以下的展布情况,便于后续岩体 建模时对岩体形态的控制。

0

3 新场岩体三维地质建模

新场岩体三维地质建模是一个随着新场地质工 作的深入不断修正与完善的过程。前期先利用地表 地质资料获得断层和岩性的地表分布信息并形成初 步的地质认识;然后结合物探剖面得到岩体的完整 性和断裂的大致空间分布;在此基础上建立新场岩 体初步地质模型,并用于指导钻孔的布设;利用钻孔 揭露的深部地质环境信息对模型进行修正,并用于 指导进一步的工程勘探及后续的工程布设;利用勘 探结果不断对地质模型修正和完善。如此往复,随 着工作的不断深入,建立研究区可信度高的三维地 质模型,真实的反映岩体的深部地质环境特征,应用 于新场地下实验室的工程设计与超前预测中。本次 研究中新场岩体建模范围为100 km²,深度为1 km, 模型主要反映研究区范围岩体与断裂的空间分布规 模及相互关系。建模主要使用 Micromine 软件。

3.1 岩性模型

结合研究区前期已有地质资料首先建立岩体侵 入先后关系、岩体相互穿插关系的空间概念模型,结 合 11 条 AMT 测量数据及磁测资料进行二维与三维 反演,确定岩体的侵入形态与厚度,再利用研究区的 42个钻探资料对岩体形态进行校正,得到研究区的 岩性模型(图 6b)。

新场岩体建模范围内,岩体南北出露地层主要 为前长城系敦煌岩群的鱼脊山岩组(AnChD)、长城 系咸水井群(Chxs)、侏罗系(J)、下白垩统新民堡群 (K₁xn)和第四系(Q)(图 6d)。其中,敦煌群和咸水 井群是该地段花岗岩的围岩,侏罗系和第四系覆盖 于花岗岩之上。

3.2 断裂模型

通过遥感影像解译、野外调查、探槽揭露和钻孔 电视测量等手段^[12-14]对新场岩体研究区域范围内 的断层产状、规模、力学性质、构造岩类型等特征进 行详细调查和研究。三维断裂模型建立的思路如 下:①首先根据研究区地表地质调查和对地球物理 解译结果的初步理解,建立断裂的空间概念模型,即 断层的总体分布大小(深度)、倾向等;②提取地表 的出露轨迹,并与地表 DEM 叠加,生成起伏的断裂 地表轨迹;③根据地表地质调查获得的断裂产状信 息,按照倾向和倾角自地表往下生成一系列断层轨 迹线;④利用地球物理剖面解译的地质剖面及地球 物理数据生成的数据体与断层轨迹线进行相互比对 和校正;⑤利用钻孔揭露断层位置点对断层进行拟 合生成断层网格面。这样就生成了研究区可信度较 高的断裂模型(图6)。



a—提取地质界线生成地表模型;b—生成不同岩性单元模型;c—断裂模型;d—岩体地质模型,包含断裂和岩性信息 1—第四系;2—咸水井群变质中基性火山岩;3—敦煌群鱼脊山组变质岩;4—红柱滩单元角闪辉绿岩;5—新场单元二长花岗岩;6—机井沟单元块状 花岗闪长岩;7—鸳鸯沟单元片麻状二长花岗岩;8—红柳井南山单元片麻状花岗闪长岩;9—钻孔;10—地质界线;11—断层线;12—断裂面 a—extracting geological boundaries to generate surface models; b—generate different lithology unit models;

c-fracture model; d-geological model, including fracture and lithology information

1—quaternary;2—metamorphic medium volcanic rock of Xianshuiyan group;3—metamorphic rocks of Yujishan formation in Dunhuang group;4 hornblende diabase of Hongzhutan unit;5—monzonitic granite of Xinchang unit;6—massive granodiorite of Jijinggou unit;7—kemp-shaped granitic granite of Yuanyanggou unit;8—kemp-shaped granodiorite of Hongliujingnanshan unit;9—drilling;10—geological boundary;11—fault line;12—fracture surface

图6 新场岩体三维地质模型



断层的空间分布决定着岩体的结构和完整性。 新场岩体建模范围内主要断层有 15 条,按方向可分 为 NE 向、NW 向和近 EW 向 3 组。

压性和压扭性断层走向多为 EW 向或近 EW 向,与地层走向一致,为区内具有控制意义的断层,切割中生代及其以前地层和岩体,具有多期活动性。 多数断层长 10~20 km,宽 n×10 m,在地貌上多形成 沟谷。主要有机井—红柳井南山断层(F6)、鸳鸯沟 断层(F7)、鸳鸯沟南断层(F8)等。应该指出,该组 压性、压扭性断层,有些为韧性和脆性的复合性断 层,如F6断层,它们是多期活动的产物,是在早期区 域性韧性剪切带基础上发展起来的。早期形成的拉 伸线理十分发育,眼球状混合岩(即就位片麻岩— 碎斑糜棱岩)宽度为500~1000 m。

扭性和张扭性断层为压性、压扭性断层的次级 配套断层,一般长2~5 km,多数走向为 NNE 或 NE 向,少数为NW向,倾角50°~80°,以左旋扭性为主。 断层带中多见硅质胶结的角砾岩,有时也见有断层 碎粉岩。具有代表性的断层有新场断层(F28)、F29 断层、机井断层(F31)和机井东断层(F32)等,该组 断层把花岗岩体切割成大小不一的岩块。

模型可视化分析应用 4

完成新场岩体三维地质建模后,可基于模型进 行一系列三维可视化分析,还可应用于钻孔设计、地 下实验室工程设计等。

4.1 钻孔设计

钻探是了解深部地质环境特征最直接有效的手 段,然而钻探施工费用昂贵,因此在设计钻孔孔位和 参数时必须要合理,确保通过钻孔施工能达到既定 目的。断裂是影响岩体深部完整性的重要因素,高 放废物地质处置研究中通常利用斜孔来揭露断裂的 深部特征。笔者将以揭露 F31 断裂的 BS35(深度约 600 m)为例对地质模型在钻孔设计中的应用进行 论述。

地表观测 F31 断裂的产状为 290°~305°∠70° ~83°,断裂带宽1.0~2.6 m,是由单个或两个以上大 致平行的断裂面形成的断裂破碎带,具硅化角砾岩 和围岩硅化蚀变。断裂带有早期煌斑岩脉贯入。前 期施工了2口约100 m 的浅钻孔,揭露断层的产状 为 290°∠81°, 断层视厚度为 8.95 m, 构造岩类型为 硅化角砾岩、碎粒岩。综合地球物理测量剖面解译 得出,该断层西北倾,倾角较陡。

利用建立的三维地质模型,选择在 F31 断裂上 盘与断裂平距为197 m 处(图7),布置垂直断层走 向、顶角为11°的斜孔对断层进行揭露。主要考虑 了以下因素:①孔位应布置在 F31 断裂上盘的相对 平缓的沟谷处,便于修路进场,并有足够大的场地便 于施工;②钻孔应尽量垂直断裂走向,这样能较少穿 越断层破碎带的长度,有利于钻孔施工;③我国地下 实验室深度初步定在 500~600 m 间,设计钻孔应尽 量在 550 m 左右揭露断裂, 一方面能了解目标深度 断裂的特征,另一方面能尽量控制揭穿断层后进尺, 降低施工难度。利用模型测算,计划在 580~600 m 左右揭露断层。钻孔设计详细参数见表1。

BS35 揭露 F31 断裂深部特征为:上盘面之上 595.55~609.70m,花岗闪长岩碎裂,裂隙发育,岩石



图 7 BS35 钻孔三维设计

Fig.7 Three-dimensional design of BS35 borehole 表1 BS35 钻孔设计参数

Table 1 Design parameters of BS35 drilling

| 钻孔编号 | 钻孔方位角/(°) | | 钻孔顶角/(°) | | 断层倾角/(°) |
|------|--------------|------|----------|----------------------|----------|
| BS35 | 110 | | 11 | | 81~83 |
| 钻孔编号 | 揭露断裂 孔深/m | 平距/m | | 钻孔位置和方位设计 的主要考虑因素 | |
| BS35 | 590~600 | | 197 | 研究 F31 断裂特征 | |

破碎,碎裂花岗闪长岩表面的碳酸盐化和伊利石化 蚀变较强; 609.70~617.30 m 为断层角砾岩;断层下 盘面之下 617.30~620.20 m,厚度 2.90 m,花岗闪长 裂隙发育,裂隙表面及两侧岩石的碳酸盐化和钠长 石蚀变较强。该钻孔很好地揭露了断裂特征,与设 计比较吻合。

4.2 地下实验室设计

我国地下实验室建设初步方案为"3 竖井+斜坡 道+多层平巷方案"。经对现有地质资料和模型进 行分析,确定地下实验室场址应在 BS32 钻孔附近, 该区域正好位于新场岩体南北两侧 EW 向区域大断 裂 F6 和 F7, 以及 NE 向次级断裂 F31 和 F32 的夹持 部位,避开了大的断裂构造的影响,且该区域附近 BS32 和 BS28 钻孔岩心比较完整, 地表也比较平缓, 有利于地下实验室的建设和地表场地的布置。

地下实验室场址的总体方位为120°,场址范围约 2.25 km×1.5 km,且可往西北方向扩展。从地质模型 可以直观地看到斜坡道要穿过 F29-1 等规模较小的 破碎带(图 8),可以在尽量不增加施工难度的情况 下,在地下实验室的建设过程中通过斜坡道揭露较大 范围的深部岩体和断裂特征,有利于积累更多经验和 试验数据。图9为地下实验室空间立体图。

· 573 ·



图 8 地下实验室场址与断裂的关系 Fig.8 The relationship between underground laboratory field and fracture

5 结论

1)本次研究融合地质和地球物理资料进行综

合解译,在三维空间实现了不同方法解译成果的一 致性;建立了新场岩体(含构造和岩体)可信度较高 的三维地质模型,全面地反映新场岩体地质环境特 征,直观地再现了地质单元的空间展布及其相互关 系。

43 卷

2)新场候选场址所处岩体呈 EW 向展布,南北 两侧由 EW 向断裂控制,与外围变质岩地层分隔开。 花岗体岩性类别从北至南依次为:红柳井南山单元 (Pt₂²H)片麻状花岗闪长岩、新场单元(O₁X)二长花 岗岩、机井沟单元(O₁J)花岗闪长岩和鸳鸯沟单元 (Pt₂²Y)片麻状二长花岗岩。

3) F28、F29、F30、F31、F32、F33、F36 这 7 条扭 性、张扭性断层为 F6 和 F7 的次级配套断裂,走向为 NNE 或 NE 向,该组断裂把花岗岩自西向东切割成 大小不一的岩块,形成多个"构造安全岛"。

4)基于新场岩体地质模型,设计钻孔对断层特 性进行了揭露,取得了较好效果;并初步确定了地下 实验室场址的位置和主要结构布置方式。



图 9 地下实验室空间立体图(草案)



参考文献(References):

- Savage D. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1995.
- [2] 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.

Wang J. Geological disposal of high level radio active waste: Progress and challenges [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(3):58-65.

[3] 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.

Pan Z Q, Qian Q H. Research on geological disposal strategy of high level radioactive waste [M]. Beijing: Atomic energy publishing house2009.

- [4] PosivaOy. Okliluoto site description 2008 Part 1 and 2[R].Posiva OY, 2009.
- [5] SKB. Site description of forsmark at completion of the site investigation phase [R]. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2008.
- [6] 赵宏刚, Kunz Herbert, 王驹. 甘肃北山旧井地段三维地质建模及RockFlow 在核素迁移模拟研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):3989-3994.

Zhao H G, Kunz H, Wang J. 3D geological modelling in Jiujing

block, Beishan area, Gansu Province and application of rockflow to nuclides migration simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 3989-3994.

- [7] 罗辉,王驹,蒋实,等. 高放废物地质处置地下实验室新场候选场址三维地质建模[J].铀矿地质,2017,34(1):53-59.
 Luo H, Wang J, Jiang S, et al. Study on 3D geological modeling of Xinchang potential underground laboratory site for high-level radioactive waste disposal[J].Uranium Geology,2017,34(1):53-59.
- [8] 王驹,徐国庆,郑华铃,等.中国高放废物地质处置研究进展 1985~2004[J].世界核地质科学,2005,22(1):5-16.
 Wang J,Xu G Q,Zhen H L,et al.Geological disposal of high level radioactive waste in China:Progress during 1985~2001[J].World Nuclear Geoscience,2005,22(1):5-16.
- [9] 潘自强,沈文权.2020 年前我国核能发展的策略和目标研究
 [J].铀矿地质,2004,20(5);257-259.
 Pan Z Q,Shen W Q.Tactics and targets for nuclear energy development in China by 2020[J].Uranium Geology,2004,20(5):257-259.
- [10] 王驹,陈伟明,苏锐,等.高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(4):801-812.
 Wang J, Chen W M, Su R, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(4):801-812.

- [11] 王驹,陈伟明,金远新,等. 向阳山—新场地段 1:5 万地质调查 报告[R].核工业北京地质研究院, 2006.
 Wang J, Chen W M, Jin Y X, et al. Geological survey report of Xiangyangshan-Xinchang section (1:50,000)[R]. Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2006.
- [12] 王锡勇,苏锐,陈亮,等. 基于超声波钻孔电视的深部岩体结构 面特征研究[J].世界核地质科学,2014,31(1):31-44.
 Wang X Y,Su R, Chen L, et al.Study on structural plane characteristics of deep rock mass based on acoustic borehole TV[J].World Nuclear Geoscience,2014,31(1):31-44.
- [13] 季瑞利,张明,周志超,等. 北山预选区钻孔水文地质试验方法研究[J].铀矿地质,2018,34(1):53-59.
 Ji R L, Zhang M, Zhou Z C, et al. Research on In-situ Hydraulic Test Method in Beishan Pre-selected Area[J]. Uranium Geology, 2018,34(1):53-59.
- [14] 赵星光,王驹,马利科,等. 高放废物地质处置库北山预选区新 场岩体地应力场分布规律[J].岩石力学与工程学报,2014,33
 (2):3750-375.

Zhao X G, Wang J, Ma L K, et al. Distribution characteristics of geostress field in Xinchang rock block of candidate Beishan area for high level radioactive waste repository in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2):3750-375.

Construction and application of three-dimensional geological model in Xinchang Block for high-level radioactive waste disposal

LUO Hui¹, WANG Ju¹, JIANG Shi², ZHAO Hong-Gang¹, JIN Yuan-Xin¹

(1. CNNC Key Laboratory on Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: After more than 30 years of research in high-level radioactive waste disposal, China has initially identified Xinchang block as the recommended site of underground laboratory. It is necessary to make full use of the existing data to express all kinds of geological phenomena accurately and intuitively to reproduce the spatial distribution of geological units and their mutual relations. on the other hand, it is possible to mine hidden geological information to facilitate geological analysis and engineering decision-making, which is very important in the research phase of underground laboratory. Based on the comprehensive analysis and interpretation of the existing data, the three-dimensional geological model of Xinchang block has been established. The model reproduced the geologic and environmental characteristics of Xinchang block. Based on the model, we designed the drilling to expose the fault and determined the location and main structure of the underground laboratory, the effect seems good. This study can provide useful reference and technical support for the geological analysis and engineering design of the high-level radioactive waste disposal project in China.

Key words: high-level radioactive waste disposal; Xinchang block; 3D geological modeling; application of model

(本文编辑:蒋实)