

《高水平放射性废物地质处置
岩体结构面分级标准》
编制说明

中国科学院地质与地球物理研究所
核工业北京地质研究院
2026 年 8 月

《高水平放射性废物地质处置
岩体结构面分级标准》
编制说明

计划下达： 国家原子能机构

起草单位： 中国科学院地质与地球物理研究所、核工业北京地
质研究院等

起草负责： 祁生文

标准类型： ☒ 制订 ☐ 修订

提交时间： 2026 年 8 月

目次

一、标准背景、目的意义.....	3
二、工作简况.....	4
(一) 任务来源.....	4
(二) 协作单位.....	4
(三) 主要工作过程.....	5
(四) 主要起草人及其所做的工作等.....	6
三、确定团体标准主要内容的论据.....	7
(一) 标准编制原则.....	7
(二) 确定标准主要内容.....	7
(三) 确定主要内容的论据.....	7
四、主要试验(验证)的准确度、可靠性、稳定性分析和综述报告等.....	10
(一) 试验分析.....	10
(二) 综述报告.....	19
(三) 效果分析.....	20
五、与国内同类标准、国际标准和国外先进标准情况及水平对比.....	20
六、重大分歧意见的处理经过和依据.....	20
七、贯彻团体标准的要求和措施建议.....	20
八、标准涉及的相关知识产权说明.....	21
九、其它应予说明的事项.....	21

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》

编制说明

一、标准背景、目的意义

高放废物半衰期长毒性大，处置不当将产生灾难性后果，其安全处置，是我国核工业健康和可持续快速发展的关键。目前，世界上公认的高放射性废物安全处置的最佳途径是将其进行深埋地质处理。因安全处置期长达数万年，处置库周围岩体(围岩)需具有极高的完整性和稳定性。然而，岩体中普遍存在的结构面破坏了岩体的完整性和稳定性，同时提供了地下水流动通道，影响处置库放射性核素迁移和扩散。考虑到不同规模和不同延展性的结构面对岩体完整性和稳定性的影响程度不同，明晰结构面级别及其对岩体稳定性的影响可有效指导工程实践。

当前普遍采用的结构面分级体系是谷德振教授于 1979 年出版的《岩体工程地质力学基础》中根据结构面规模及其对岩体稳定性的影响而建立的 5 级结构面分级体系，这一结构面分级体系跨越了从板块边界的结构面到细小的隐微结构面，同一级结构面其尺寸有数量级的差别。《GB 50287-2016 水力发电工程地质勘察规范》对每级结构面的迹长范围进行了约定，服务于边坡和坝基等岩体稳定性。然而，高水平放射性废物地质处置工程具有服务周期长、安全要求高和评价尺度跨度大的特点，需要结构面分级结果能够与区域选址、场址评价、地下工程建设及局部围岩稳定分析等不同阶段相对应。因此，本标准在继承现有五级结构面分级思想的基础上，结合高放废物处置工程实际需求，对结构面尺度范围进行了适应性调整，按照结构面的控制范围和工程影响尺度，将结构面划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级，分别对应区域尺度、场址尺度、工程尺度、巷道尺度和岩块尺度，其迹长范围分别为 $\geq 10\text{ km}$ 、 $5\sim 10\text{ km}$ 、 $100\text{ m}\sim 5\text{ km}$ 、 $2\sim 100\text{ m}$ 和 $< 2\text{ m}$ 。由于高放废物具有放射性核素半衰期极长（长达数万至数百万年）、衰变释热显著、化学毒性极强且生物屏障要求近乎绝对可靠的特殊性，其地质处置工程必须在数万年乃至更长时序内确保工程屏障与天然屏障的长期协同稳定性，任何穿越处置库的结构面都可能成为地下水优先渗流通道和核素快速迁移的薄弱环节对结构面分级提出了更严苛的要求。现有分级体系

主要面向一般岩石工程，无法有效指导高放废物处置工程。建立专门针对高放废物处置特点的精细的结构面分级标准十分必要而且迫切。

因此，在现有岩体结构面分级体系的基础上，结合高放废物地质处置工程的特殊性，建立适用于高放废物处置工程的岩体结构面分级体系。该体系旨在系统表征不同发育规模和渗透特征结构面的影响，用于规范地质处置设施在场址识别、场址筛选、场址评价、建造与服役、运营、关闭及封闭等阶段的岩体结构面调查、分级评价和成果表达，为处置工程相关设计与评价工作提供支撑。我国北山高放废物处置工程规划建设及相关科研工作的持续开展，为本文件的制定提供了技术基础和工程实践条件。

二、工作简况

（一）任务来源

高水平放射性废物地质处置是保障核能可持续发展和放射性废物长期安全管理的重要工程措施。地质处置设施依靠工程屏障和天然地质屏障，目标是在万年时间尺度内实现放射性核素与生物圈隔离。而岩体结构面是控制围岩完整性、地下工程稳定性和地下水运移的重要地质界面，其几何尺度、空间展布及渗透状态直接关系到处置库场址评价、地下实验室建设、工程布置和长期安全论证。目前，现有工程岩体分级标准主要面向基础设施等一般岩体工程，难以满足高水平放射性废物地质处置的技术需求，亟需建立适用于地质处置领域的岩体结构面分级标准。国家原子能机构批复的科研项目“地下实验室深部围岩力学特性和长期稳定性研究”，将编制“高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准”作为项目成果之一。

2024 年 9 月，经中国地质学会审核批准，中国科学院地质与地球物理研究所、核工业北京地质研究院等单位，承担《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》的编制工作，编制周期为 2024 年 2 月～2026 年 10 月。

（二）协作单位

本标准编制的协作单位包括：核工业北京地质研究院、绍兴大学、中国地质大学（武汉）、中国地质大学（北京）、长安大学、中国水利水电科学研究院等。

（三）主要工作过程

本项目于 2024 年 2 月着手总体设计编写，按照项目工作部署的各项目标任务和工作进展要求，工作进展如下：

1. 编制提纲确定

（1）2024 年 2 月除主编单位编写了“编制工作大纲（讨论稿）”。

（2）2024 年 2 月底，成立编写组并召开第一次编写会议，对工作大纲（讨论稿）进行讨论，落实编写单位、明确分工，责任到人，并建立和形成定期的协商、检查工作制度。

（3）2024 年 3 月初，按照编制组讨论意见对编制工作大纲进行修改，形成工作大纲（送审稿），同立项申请书提交至中国地质学会。

（4）2024 年 9 月 24 日，编制组组织召开了《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》立项的内部评审会，来自中国科学院地质与地球研究所、武汉大学、同济大学、绍兴大学等 5 名专家参加了会议。经专家评审，该标准立项依据充分，框架设计合理，任务清晰，具备可操作性。

（5）2024 年 9 月 29 日，中国地质学会通过视频方式召开了《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》立项评审会。由来自中国地质调查局发展研究中心、中国科学院地质与地球研究所、北京工业大学、武汉大学、同济大学等 5 名专家参加了会议。经专家评审，《标准》符合中国地质学会团体标准立项要求，准予立项。

2. 初稿的制定

（1）2024 年 10 月~2024 年 12 月，采用文献收集的方式，完成了国内外相关专业领域的管理规定及技术标准的调研。

（2）2025 年 1 月~2026 年 5 月，采用文献收集、现场调研和信函调研等方式，广泛征求和收集各方意见，针对标准编制涉及的难点问题展开研究，按分工完成专题研究报告。期间各编制单位按分工完成各自的编制任务，形成标准初稿。

（3）2026 年 6 月，组织召开标准编制第二次工作会议，邀请专家咨询指导组对标准初稿进行咨询。由来自中国地质调查局发展研究中心、中国科学院地质与地球研究所、北京工业大学、武汉大学、同济大学等 5 名专家等 5 位专家

参加了会议，并形成标准初稿咨询意见。

(4) 2026年6月~2026年8月，结合咨询意见，修改和完善标准初稿，形成标准讨论稿（征求意见稿）。

(四) 主要起草人及其所做的工作等

为保障项目顺利实施，组织具有岩体力学、统计岩体结构面、核废料地质处置经验的单位相关人员，成立了编写小组。祁生文为标准编制牵头人。本标准主要起草人员共 30 人：祁生文、王驹、伍法权、赵星光、李长冬、王玉杰、郭松峰、郑博文、刘健、肖易东，沙鹏、朱维伟、侯晓坤、李亚伟、鲁晓、路伟、王赞、杨国香、包含、梁宁、李永超、邹宇、伍劼、罗光明、李金轩、宋帅华、马显东、丛佳宁、汪艺轩、黄子刚。具体编写分工见表 1-1。

为具体编写分工见表 1-1。

表 1-1 标准编制分工表

序号	任务内容	责任分工
1	编写工作大纲和提纲	祁生文
2	专题研究-国内外相关管理规定及技术标准的调研	祁生文、郭松峰、郑博文、朱维伟、侯晓坤、肖易东
3	专题研究-结构面分级方法研究	祁生文、伍法权、郭松峰、郑博文、沙鹏、朱维伟、包含、梁宁
4	专题研究-高放废物地质处置围岩结构面研究	祁生文、王驹、赵星光、郭松峰、刘健、肖易东、朱维伟、李亚伟、鲁晓、王赞
5	第一章 范围	祁生文
6	第二章 规范性引用文件	祁生文、王驹、赵星光、刘健、郑博文、郭松峰、肖易东
7	第三章 术语和定义	祁生文、赵星光、李长冬、郑博文、刘健、肖易东、侯晓坤
8	第四章 基本规定	祁生文、郑博文、侯晓坤
9	第五章 结构面分级方法	祁生文、王驹、伍法权、赵星光、李长冬、王玉杰、郭松峰、郑博文、刘健、肖易东、沙鹏、朱维伟、侯晓坤、李亚伟
10	第六章 成果编制	郑博文、鲁晓、路伟、王赞、杨国香、包含、梁宁、李永超、邹宇、伍劼、罗光明、李金轩、宋帅华、马显东、丛佳宁、汪艺轩、黄子刚
11	条文说明	肖易东、路伟
12	参考文献	郭松峰、郑博文、侯晓坤、肖易东
13	《标准》汇总，负责专题研究的规划、统筹，并进行部分专题研究工作	祁生文

三、确定团体标准主要内容的论据

（一）标准编制原则

1. 全面贯彻执行国家的有关法律、法规和方针政策；
2. 编制工作坚持科学性、先进性和实用性原则，做到技术先进、经济合理、安全适用；
3. 以行之有效的实践经验和可靠的科学研究成果为依据。对需要进行科学测试或验证的项目，一定要认真组织测试或验证，并写出成果报告；对已经鉴定或实践检验的技术上成熟、经济上合理的科研成果，应纳入标准；
4. 积极采用新技术、新方法，纳入标准的新技术、新方法，应当具有完整的技术、方法文件，且经实践检验行之有效；
5. 与国家标准和行业有关标准相协调一致；
6. 对符合我国国情的国际标准的相关规定应积极采纳；
7. 要充分发扬民主，对有争议的技术性问题，应在调查研究、试验验证或专题论证的基础上，进行认真研究，共同确认或恰如其分的作出结论；
8. 编写要求按国标《标准化工作导则》（GB/T 1.1-2020）、《标准化工作指南（GB/T 20000）》、《标准编写规则（GB/T 20001）》、《国家标准管理办法》等执行。《标准》由正文、附录、条文说明三部分组成，要求条文严谨明确、文句简练、不得模棱两可和相互矛盾。
9. 编写程序按建设部《工程建设国家标准管理办法》执行。《标准》编制工作按准备、征求意见、审查和批准四个阶段程序进行。

（二）确定标准主要内容

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》除前言、引言、范围、规范性引用文件、术语和定义外，标准的主体技术内容包括：第四章基本规定、第五章岩体结构面分级方法、第六章成果编制。此外，还包括参考文献和条文说明两部分。标准的技术内容力求全面、合理实用。

（三）确定主要内容的论据

1. 高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级提出背景

高水平放射性废物具有半衰期长、放射性强和毒性大的特点，其安全处置关系到核工业长期可持续发展。目前，国际上普遍认为深地质处置是实现高水平放射性废物长期安全处置的有效途径。由于处置安全期限可达数万年甚至更长，处置库围岩需具备长期稳定性和良好的隔离性能。然而，岩体中普遍发育的结构面降低了岩体完整性和稳定性，同时可能形成地下水优先运移通道，影响放射性核素在地下环境中的迁移与扩散过程。因此，准确识别和评价不同尺度结构面的工程影响，是保障高水平放射性废物地质处置长期安全的重要基础。现有岩体结构面分级体系主要依据结构面的空间规模及其对岩体稳定性的影响建立，其中谷德振教授于 1979 年提出的五级结构面分级体系已成为工程岩体结构特征评价的重要方法。该体系覆盖了从区域尺度断裂到微观尺度结构面的不同类型，在一般岩石工程中发挥了重要作用。然而，高水平放射性废物地质处置工程具有长期服役、极高安全要求和近乎绝对可靠性的特点，任何贯穿或影响处置库的结构面均可能成为地下水运移和核素迁移的潜在通道。现有结构面分级体系主要服务于一般工程建设需求，难以充分体现深部地质环境下结构面的长期水力效应和安全影响，不能完全满足高水平放射性废物地质处置工程在场址评价、工程设计和长期安全评估中的需求。

2. 关于结构面分级指标的确定

岩体结构面类型复杂、影响因素众多，其工程影响通常与结构面的规模、形态特征及水力性质密切相关。现有研究表明，结构面迹长、延展范围、粗糙度、张开度、充填特征、连通性及露头流水状态等参数均可用于描述结构面的发育特征和工程影响。其中，结构面规模参数主要反映其对岩体完整性和稳定性的控制范围，结构面水力参数则反映其作为地下水运移通道的潜在能力。

针对高水平放射性废物地质处置工程对长期安全性和地下水运移控制的特殊要求，编制团队在系统分析国内外岩体结构面分级方法的基础上，结合高放废物处置工程特点，组织开展了多轮组内研讨、专家咨询和工程应用需求论证，对不同结构面参数的适用性、可获取性及工程意义进行了综合分析。考虑到高放废物地质处置过程中结构面的主要影响体现在对围岩完整性的削弱作用以及对地下水运移通道形成的控制作用，最终确定以结构面迹长和渗透状态作为岩体结构面分级的主要指标。其中，结构面迹长用于表征结构面的空间发育规模

和潜在影响范围，是评价结构面对岩体完整性和稳定性影响程度的重要参数；渗透状态用于反映结构面的水力连通特征和地下水运移能力，是评价结构面对放射性核素迁移风险影响的重要指标。

3. 关于结构面分级方法的确定

岩体结构面分级应同时反映结构面的空间发育特征和水力作用特征。针对高水平放射性废物地质处置工程对结构面长期安全评价的特殊需求，本标准在系统分析国内外结构面分级方法的基础上，通过多轮组内研讨、专家咨询和工程应用需求论证，对不同结构面参数的工程意义、可获取性及适用性进行了综合分析，最终确定按照“迹长确定结构面基本级别、露头渗透状态确定结构面亚级”的顺序建立分级方法。首先依据结构面迹长划分基本级别，以实现不同空间尺度结构面的统一识别和工程影响评价；在此基础上，对于具有局部工程影响意义的结构面，进一步结合露头渗透状态划分亚级，以体现结构面水力特征差异。该分级思路既符合岩体结构面影响由空间规模到水力作用逐步细化的认识规律，又满足高水平放射性废物地质处置工程对结构面长期安全评价的需求。

结构面基本级别的确定主要参考现有工程岩体结构面分级体系。谷德振教授提出的五级结构面分级体系以及《GB 50287-2016 水力发电工程地质勘察规范》中，以结构面规模及其对岩体稳定性的影响为主要依据，在一般岩石工程（如边坡、坝基等）中得到了广泛应用，为本标准建立基本级别划分提供了理论基础。然而，高水平放射性废物地质处置工程具有服务周期长、安全要求高和评价尺度跨度大的特点，需要结构面分级结果能够与区域选址、场址评价、地下工程建设及局部围岩稳定分析等不同阶段相对应。因此，本标准在继承现有五级结构面分级思想的基础上，结合高放废物处置工程实际需求，对结构面尺度范围进行了适应性调整，按照结构面的控制范围和工程影响尺度，将结构面划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级，分别对应区域尺度、场址尺度、工程尺度、巷道尺度和岩块尺度，其迹长范围分别为 $\geq 10\text{ km}$ 、 $5\sim 10\text{ km}$ 、 $100\text{ m}\sim 5\text{ km}$ 、 $2\sim 100\text{ m}$ 和 $< 2\text{ m}$ 。

结构面亚级的确定主要考虑小尺度结构面的水力作用差异。对于Ⅰ~Ⅲ级结构面，其空间延展范围较大，主要控制区域、场址和工程尺度的岩体结构特征，结构面的工程影响主要由其规模和展布范围决定，因此记录其渗透状态但不设

置亚级。对于Ⅳ级和Ⅴ级结构面，由于其主要影响巷道围岩和局部岩块稳定性，其渗透状态对地下水局部运移和工程安全具有更直接的影响，因此在基本级别确定后进一步采用露头渗透状态进行亚级划分。其中，Ⅳ级结构面按照流水、滴水、潮湿和干燥状态划分，Ⅴ级结构面按照滴水、潮湿和干燥状态划分。考虑到Ⅴ级结构面出露位置若出现流水，可能表明该结构面实际连续性或延展范围超出当前识别尺度，因此需复核其迹长和连通性，在复核完成前宜按照Ⅳ.1级结构面进行管理，以避免低估其对地下水运移和处置安全的影响。

4. 关于结构面分级结果的表达

根据结构面迹长，将结构面划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级，分别对应区域尺度、场址尺度、工程尺度、巷道尺度和岩块尺度。Ⅰ级至Ⅲ级结构面迹长较大，分级结果直接表达为“Ⅰ级”、“Ⅱ级”或“Ⅲ级”，其露头渗透状态应记录，但不设置亚级。Ⅳ级和Ⅴ级结构面根据露头渗透状态进一步划分亚级。其中，Ⅳ级结构面按照流水、滴水、潮湿和干燥状态，分别表达为“Ⅳ.1”、“Ⅳ.2”、“Ⅳ.3”和“Ⅳ.4”；Ⅴ级结构面按照滴水、潮湿和干燥状态，分别表达为“Ⅴ.1”、“Ⅴ.2”和“Ⅴ.3”。

结构面分级结果不应仅以级别或亚级代码单独表达，还应同步记录结构面编号、分级单元编号、迹长、露头渗透状态、适用时的结构面亚级、数据来源、确定日期、复核状态和版本号。分级结果能够根据迹长和露头渗透状态直接复算，不应采用其他指标维持或调整原分级结果。结构面产状、张开度、粗糙度、充填情况及其他地质特征可作为结构面调查、成果解释和工程分析的基础资料，但改变结构面级别或亚级。通过将分级代码、分级指标及其原始证据对应表达，可保证结构面分级结果依据明确、过程可复核、数据可追溯。

上述分级结果表达方式以结构面迹长反映结构面的尺度属性，以露头渗透状态反映结构面的出水和湿润特征，形成了由基本级别到亚级细分、由阶段成果到动态更新的分级结果表达体系。

四、主要试验（验证）的准确度、可靠性和综述报告等

（一）试验分析

本标准依托“地下实验室深部围岩力学特性和长期稳定性研究”项目，完成标准主要技术内容的编制工作。以北山地下实验室场址岩体结构面分级及处置

库布置规避分析为例进行试验分析。

1. 准备工作

开展了北山地下实验室场址工程地质、水文地质、地应力、地层岩性、区域构造稳定性、结构面发育特征及地下工程揭露资料的收集与整理。

资料来源包括区域地质资料、断裂构造资料、钻孔资料、地表结构面调查资料、地下实验室斜坡道围岩编录资料、三维激光扫描成果、无人机测量成果以及国内外地质处置场址结构面分级与处置库布置经验。

2. 地表结构面发育规律

针对北山地下实验室场址结构面发育特征，开展了千米级、百米级、十米级、米级等多尺度结构面识别与统计。

地表结构面调查中，采用人工测量、无人机测量等方法获取结构面产状、迹长、密度等参数；地下工程调查中，结合斜坡道围岩编录、三维激光扫描和现场复核，获取地下岩体结构面迹长、张开度、空间位置等资料。相关成果为Ⅰ级至Ⅳ级结构面划分、结构面迹长获取方法、分级单元确定和成果图件表达提供了实测依据。

(1) 无人机倾斜摄影与宏观断裂识别

为了获取地形起伏区及人力难以到达区域的宏观结构面信息，编制组以北山地下实验室场址为中心，划定了 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的无人机高精度摄影测量区域。使用搭载高分辨率镜头的专业级小型无人机，按照预设航线进行多角度倾斜摄影，生成了高精度的三维地表点云模型图。

结合收集的地质资料，识别场址周边可能存在的次级断裂。这些断裂在宏观地貌上多表现为线性的负地形冲沟或岩性破碎带。统计表明，这些宏观断裂的走向主要集中在 NW（北西）和 NNE（北北东）两个方向，延伸长度通常在数百米至数公里不等，为《标准》中界定场址尺度（Ⅱ级）和工程尺度（Ⅲ级）结构面提供了直观的几何边界输入。

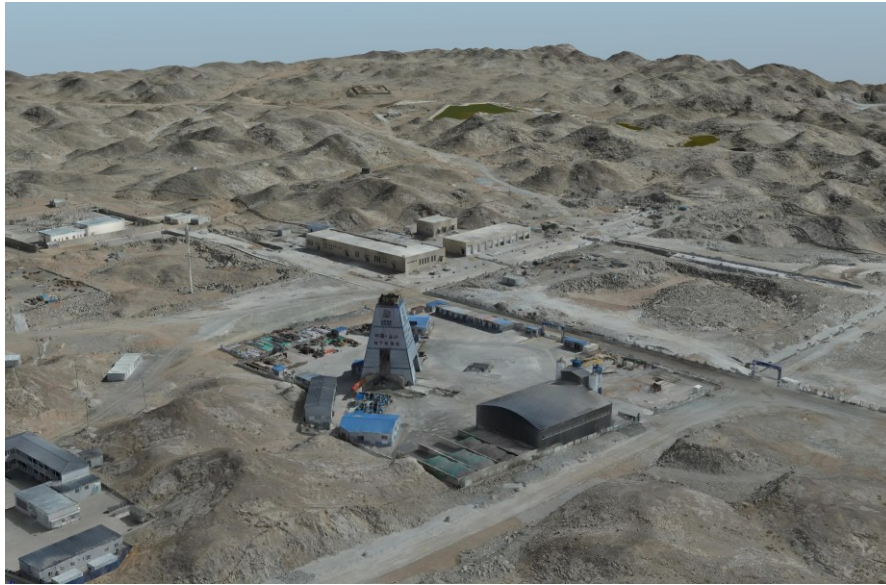


图 1 北山地表无人机扫描建模

(2) 人工测窗精细化勘测与几何参数提取

为弥补遥感影像对中小尺度结构面（IV级、V级）分辨率不足的问题，编制组在无人机测区内，结合岩体出露情况，划分了西北、东北、西南、东南四个重点观测区域，共布设了 32 个直径为 7m 的人工测窗。在每个测窗内，调查人员使用地质罗盘、皮尺等工具，对可见迹长大于 0.2m 的结构面进行了逐一测量与编录，累计获取结构面数据 1200 多条。

1) 结构面产状（倾角与倾向）分布特征

将 32 个测窗的结构面产状数据进行赤平投影极点等密度分析，结果显示，北山地表岩体结构面的空间分布并非随机无序，而是具有高度的“全局确定性”，是对区域古构造演化历史的精准记录。地表结构面呈现出两组占主导地位的优势产状：

(I) NNE 向优势组 ($100^{\circ}\angle 80^{\circ} / 280^{\circ}\angle 80^{\circ}$)：该组结构面走向约为 10° ，倾角陡立。在极点等密度图中极化程度最高，为全区发育规模最大、密度最高的主干裂隙网络。

(II) NW 向优势组 ($50^{\circ}\angle 80^{\circ} / 230^{\circ}\angle 80^{\circ}$)：该组结构面走向约为 140° 。两组优势走向之间的锐角平分线精确指向区域古构造挤压应力方向（NNW 向），构成了典型的“X 型”共轭剪切破裂体系。

在倾角分布上，地表结构面呈现出显著的“陡倾主导”规律。统计表明，倾

角大于 45° 的结构面累计占比高达 90% 以上，其中 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的陡倾角裂隙占据了绝对的统治地位。仅在局部卸荷强烈的区域观测到少量的缓倾角 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}$) 表生风化卸荷裂隙。

2) 结构面迹长统计与分布规律

迹长是《标准》中用于判定结构面级别的最核心指标。对地表 1200 余条结构面的迹长数据进行频率分布直方图绘制与数学拟合，结果显示，地表结构面迹长的频率分布呈现出典型的负指数分布特征。

在尺度划分上，该区域地表裂隙主要以中等延伸长度为主，表现出明显的“中间大、两头小”的橄榄型分布特征：迹长在 1.5m - 5m 范围内的结构面数量最多，占比高达 45%；其次为 0.5m - 1.5m 范围，占比 35%；大于 5m 的长迹线约占 14%，而小于 0.5m 的微短迹线仅占 7%，地表结构面的总体平均迹长期望值收敛于约 2.126 m。

地表多尺度调查的翔实数据，充分证实了《标准》中将“迹长”作为首要分级指标的合理性。它能够直观、定量地反映岩体被切割的宏观尺度，为后续处置库地面设施选址与竖井/斜坡道定位提供了基础的几何避让依据。

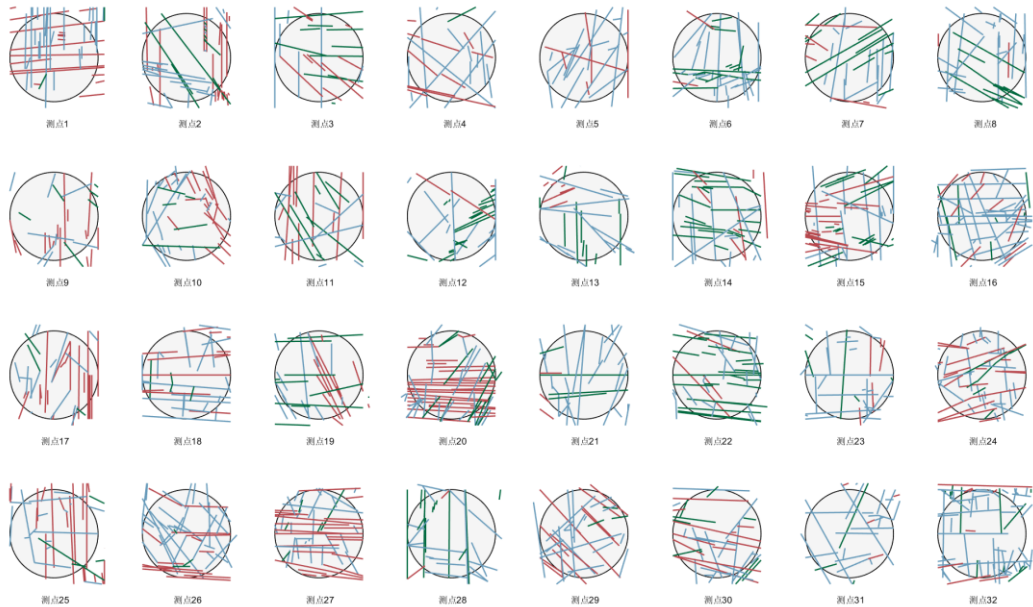


图 2 北山地表结构面编录

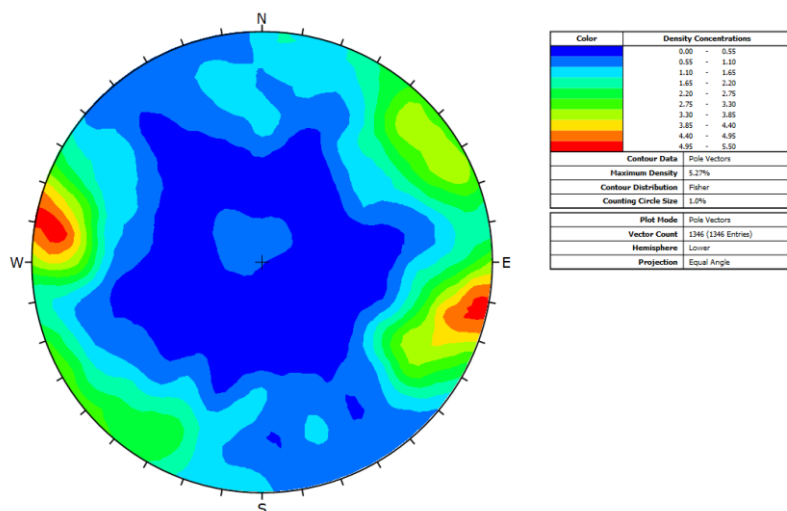


图 3 北山地表结构面极点等密度图

3. 地下结构面发育规律

(1) 地下斜坡道侧壁结构面编录与三维扫描

斜坡道设计总长超过 7km。编制组采用天宝 X7 高精度三维激光扫描仪获取了斜坡道洞壁的毫米级三维点云数据，并编录了斜坡道 495m 至 3000m 施工段侧壁的结构面，结合现场地质工程师的逐米皮尺测绘与罗盘定点，详细记录了洞壁结构面的倾向、倾角、起止点坐标等属性参数，累计获取深部高质量结构面样本超过 3000 条。

相较于地表二维平面的局部观测，深部螺旋斜坡道由于其三维螺旋向下的轨迹，能够与各种走向的结构面形成大角度切割，从而有效排除了直线隧洞观测中易产生的“盲区偏差”，为《标准》的深部适用性提供了严谨的三维空间样本。

(2) 深部结构面产状变化规律

对斜坡道结构面进行赤平投影分析，揭示了在地表呈现的 NW 向（230°组）共轭裂隙在深部发生大幅削弱乃至趋于消失；而 NNE 向（280°组）结构面成为贯穿深部全场的绝对主导优势组系。

在倾角分布上，深部结构面的“陡倾”特征进一步加剧：陡倾角（70°- 90°）占比跃升至 71%，较陡倾角（45°- 70°）占比 21%。缓倾角裂隙在深部几乎绝迹。这一深部几何演化规律，为评估垂向水文地质连通性时提供了重要警示。

(3) 结构面张开度闭合与渗透属性关联

对深部结构面的物理张开度进行分级统计，结果显示：极微张开度（ $<1\text{mm}$ ）在深部岩体中占据绝对统治地位。而且代表宏观贯穿通道的 $>1\text{mm}$ 宽大裂隙随深度增加显著减少，在斜坡道 1900m 里程之后趋于消失。

这种高应力深度闭合效应，使得绝大多数深部结构面呈现干燥或极微弱的潮湿状态。这一实测规律为《标准》中将“结构面露头渗透状态”（流水、滴水、潮湿、干燥）作为核心亚级分类指标提供了现场可操作性基础，实现了地质几何参数向核素阻滞水文评价的转变。

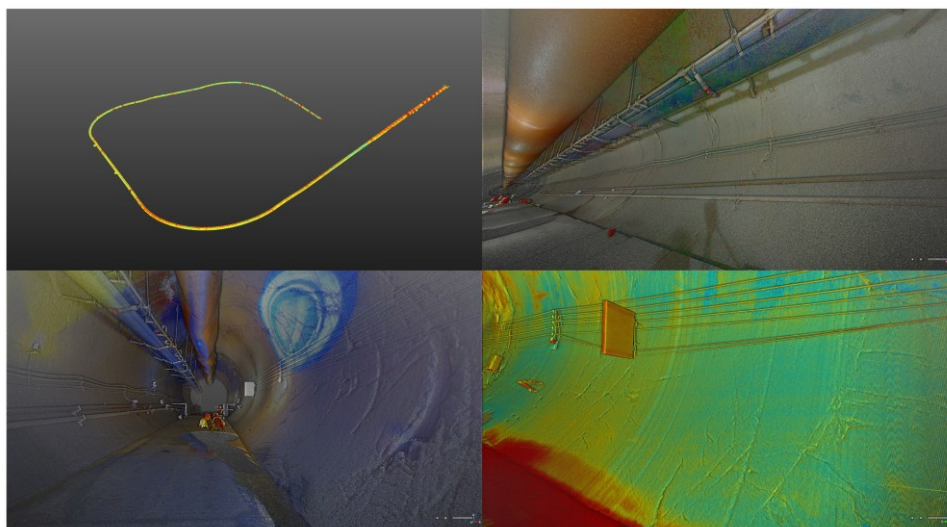


图 3 隧道三维激光扫描图

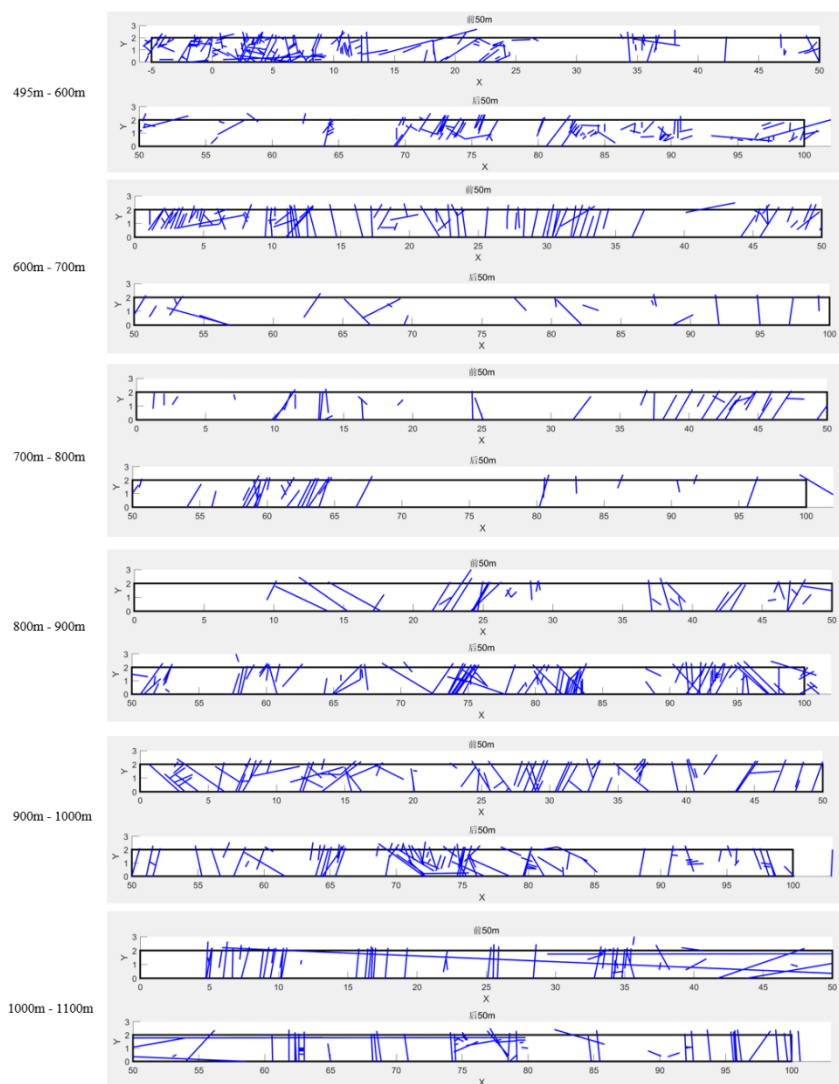


图 3 斜坡道结构面地质编录

3. 结构面尺度分界

结构面迹长分级界限是本标准的关键技术内容，主要参考谷德振教授于 1979 年出版的《岩体工程地质力学基础》以及《GB 50287-2016 水力发电工程地质勘察规范》，将结构面按规模划分为 I、II、III、IV 和 V 五个主级别，并深度考虑了处置库不同构筑物的空间尺度与安全冗余需求：

(I) I级结构面（迹长 $\geq 10 \text{ km}$ ）：表征区域性深大断裂（如北山地区的疏勒河断裂、阿尔金断裂等）。在场址识别阶段，此类结构面是划定“安全岛”的绝对红线，整个处置库外围边界必须对其保持足够的安全退让距离。

(II) II级结构面（ $5 \text{ km} \leq \text{迹长} < 10 \text{ km}$ ）：表征场址尺度断裂。在一般工程

地质调查中，二级、三级结构面的尺度分界可按约 1 km 考虑，但北山地下实验室场址大尺度结构面发育具有特殊性，部分对处置库总体布局、处置巷道规避和场址安全性具有控制意义的结构面尺度超过 1 km，接近 5 km。若仍采用 1 km 作为二级与三级结构面的分界，容易将场址尺度结构面与工程尺度结构面混合，不利于区分不同工程层级的规避对象，所以将界限提升至 5 km。这类结构面在处置巷道布置中必须严格规避，但经工程论证后，允许在加强防渗与支护的前提下，被处置库的公共联络区或非核控制性通道局部穿越。

(III) III级结构面 (100 m ≤ 迹长 < 5 km)：表征工程尺度结构面。这类中大型破碎带或节理密集带是地下处置坑（存放高放废物的最终微单元）定位时必须规避的红线，禁止处置坑与此类结构面直接相交，以防局部剪切错动破坏处置罐工程屏障。

(IV) IV级结构面 (2 m ≤ 迹长 < 100 m) 与 V级结构面 (迹长 < 2 m)：表征巷道与岩块尺度的常规断续裂隙。在深部高应力岩体中，这类结构面普遍存在且呈“压闭”状态，通常不作为宏观工程避让的排斥对象。但它们构成了近场水文地质连通网络的基础细胞，必须依据其渗透状态进行严格的“亚级”评价与人工工程屏障（如注浆、膨润土回填）封堵。

表 1 结构面迹长及尺度属性

迹长 (L)	尺度属性
≥10 km	区域尺度
[5 km,10 km)	场址尺度
[100 m,5 km)	工程尺度
[2 m,100 m)	巷道尺度
<2 m	岩块尺度

结合北山场址结构面调查结果和处置库布置需求，本标准将 5 km 作为场址尺度结构面与工程尺度结构面的分界，将结构面迹长划分为区域尺度、场址尺度、工程尺度、巷道尺度和岩块尺度。结合北山地下实验室场址实例，编制组对不同级别结构面的工程意义进行了分析。I级结构面主要对应整个处置库范围内需要规避的大型结构面；II级结构面主要对应处置巷道布置中需要规避的结构面，部分可出现在公共区或控制性工程部位；III级结构面主要对应处置坑布置中需要规避或重点控制的结构面，局部可出现在处置巷道；IV级结构面多为

一般巷道尺度结构面，通常不作为规避对象。该分级方法能够为场址内结构面赋予分级属性，并为处置库总体布局、巷道布置和处置坑定位提供更具体的地质约束。

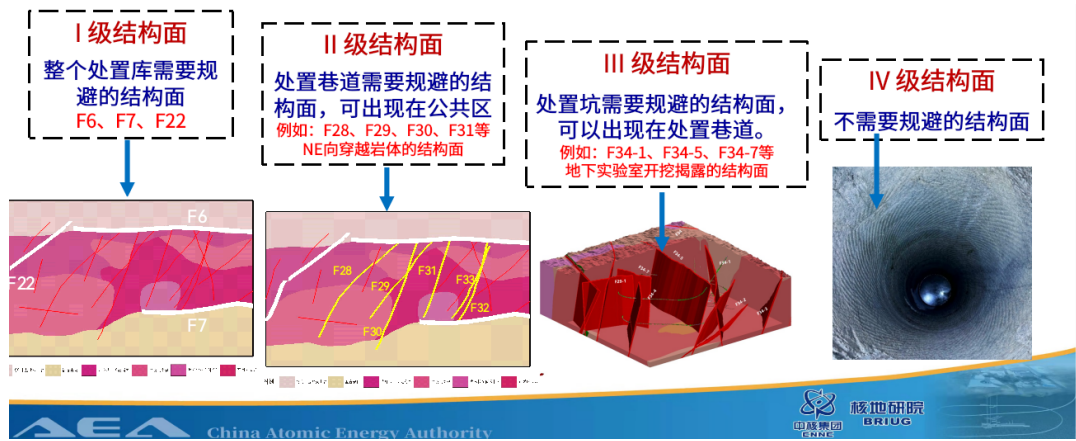


图 3 地下实验室岩体结构面分级体系研究思路

4. 结构面渗透状态与亚级划分

结构面渗透状态是判断结构面导水性和潜在核素迁移通道意义的重要依据。针对不需要在宏观位置上绝对避让的 IV 级与 V 级中小尺度结构面，为量化其潜在的地下水导通风险，引入了“渗透状态”这一亚级评价指标。结合地下实验室巷道揭露、水文地质观测和结构面出水特征，本标准将结构面露头渗透状态划分为流水、滴水、潮湿和干燥四类。

现场分析表明，采用渗透状态作为亚级指标，能够在不增加复杂测试负担的前提下反映结构面的水力意义。对形成连续水流、间歇滴水、湿润无可计量出水 and 无可见渗水的结构面分别记录和分级，有利于后续开展围岩稳定性分析、水文地质评价和长期安全论证中的资料调用与动态更新。

(1) 流水型：表现为连续出水，流量通常 $Q > 100 \text{ mL/min}$ 。这是最为危险的导水通道，可能迅速冲刷缓冲材料并裹挟核素。若 IV 级结构面呈现流水态（定级为 IV.1），则提示该处围岩渗透性局部超标；V 级微裂隙通常不具备形成流水状态的连通尺度，若现场观察到流水，则强制要求调查人员重新复核其迹长，防范将大尺度隐伏断裂误判为微裂隙。

(2) 滴水型：表现为离散的连续或间歇滴水，流量 $0 < Q \leq 100 \text{ mL/min}$ 。定级为 IV.2 或 V.1。

(3) 潮湿型与干燥型：表现为无计量出水的湿渍或完全无水。尤其处于干燥状态时，是深部岩体处于良好封闭状态的常态表征。

表 2 结构面露头渗透状态划分

渗透状态	渗透状态属性	现场判定标准
流水	连续出水	结构面露头形成连续或明显水流；单个渗水点或代表段稳定流量 $Q > 100 \text{ mL/min}$ 时，应判定为流水。
滴水	离散出水	结构面露头出现连续或间歇滴水；单个渗水点或代表段稳定流量 $0 < Q \leq 100 \text{ mL/min}$ 时，应判定为滴水。
潮湿	湿润、无可计量出水	结构面表面存在稳定湿渍、水膜或渗润现象，但无可收集、计量的滴水或流水。
干燥	无可见渗水	结构面及其邻近岩壁无可见湿渍，规定观测期内无滴水或流水。

4. 结构面分级方法及成果

(二) 综述报告

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》属于技术规范类标准，主要以指导层面为主，兼顾操作，用于规范地质处置设施在场址识别、场址筛选、场址评价、建造与服役、运营、关闭及封闭等阶段的岩体结构面调查、分级评价和成果表达，为处置工程相关设计与评价工作提供支撑。本标准编制团队长期从事岩体工程地质力学、岩体结构特征及工程稳定性评价研究，具备开展岩体结构面调查、分类评价和标准制定的理论基础与实践经验。近年来，编制团队依托我国典型高水平放射性废物地质处置研究工作，开展了场址结构面及围岩结构面的调查与数据分析，掌握了深部地质环境下结构面的空间分布规律、影响范围及主要工程效应。在此基础上，结合结构面分级体系，编制形成了《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》。此标准以结构面迹长和露头渗透状态为分级指标，建立结构面级别与亚级相结合的分级方式，使分级能够反映结构面的空间尺度和可能影响范围，又能够体现巷道尺度和岩块尺度结构面的渗透特征。其中结构面迹长确定结构面基本级别、结构面渗透状态确定结构面亚级。编写组成员熟悉不同尺度结构面调查工作，掌握资料搜集、调查（调绘）勘察工作内容及室内分析等流程，在我国典型高水平放射性废物地

质处置区进行了分级，取得了良好的效果。

（三）效果分析

1. 技术经济论证

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》主要规定了高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级的基本要求、分级指标、数据获取、分级结果确定及成果编制要求。适用于地质处置设施场址识别、场址筛选、场址评价、建造与服役、运营、关闭及封闭阶段的天然岩体结构面分级，其他地下实验室相关工作也可参照使用。不适用于工程接缝、支护界面及其他人工界面分级。本标准以结构面迹长和结构面露头渗透状态作为分级指标对地质处置岩体结构面进行分级，删减了与处置库长期安全性关联度较低的指标，技术具有创新性；所需参数均可通过地表调查、围岩编录等常规手段获取，使标准在实际应用中具有可操作性，避免了高成本的原位试验和室内试验，大幅降低调查成本，技术具有经济性。

2. 预期经济效果

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》服务于地质处置设施场址识别、场址筛选、场址评价、建造与服役、运营、关闭及封闭等不同阶段，为处置库围岩稳定性分析及工程长期安全性评价提供地质依据，扭转目前地质处置不同阶段岩体结构面分级无据可循的局面。规定的工作流程与工作方法能够满足高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级的要求，该标准的编制具有重要的工程价值和广阔的应用前景，有利于为我国高放废物地质处置工程项目的规划建设和相关科研项目的顺利实施提供保障。

五、与国内同类标准、国际标准和国外先进标准情况及水平对比

未采用国际标准，国内外无同类标准。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》在起草过程中调研了建筑、水利水电和地质调查相关单位，未出现重大分歧意见。

七、贯彻团体标准的要求和措施建议

为贯彻标准，建议标准发布后，由中国地质学会团体标准专业技术委员会工程地质与灾害专业分技术委员会适时发布贯标的通知，并委托起草单位组织培训，切实推动这项团体标准的贯彻实施。

八、标准涉及的相关知识产权说明

《高水平放射性废物地质处置岩体结构面分级标准》版权为中国地质学会所有，除了用于国家法律或事先得到中国地质学会的许可外，不得以任何形式或任何手段复制、再版或使用本文件及其章节，包括电子版、影印件，或发布在互联网及内部网络等。

九、其它应予说明的事项

无