

ICS 93.160

CCS P 55

DB 65

新疆维吾尔自治区地方标准

DB65/T 4809—2024

隧洞智能化地质编录技术规范

Technical specification for intelligent geological logging of tunnel

2024 - 07 - 11 发布

2024 - 09 - 10 实施

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由新疆维吾尔自治区水利厅提出、归口并组织实施。

本文件起草单位：山东大学、新疆水发建设集团有限公司、新疆水利发展投资（集团）有限公司、中国地质大学（武汉）、中国科学院武汉岩土力学研究所、长安大学、中国矿业大学、中铁第一勘察设计院集团有限公司、新疆维吾尔自治区标准化研究院、河南理工大学。

本文件主要起草人：许振浩、李术才、王军、林鹏、全永威、焦玉勇、热娜·艾尔肯、陈卫忠、吴志军、苏珊、陈建勋、赵向波、李晓昭、李铭杰、黄勇、刘国虎、潘东东、韩强、邱道宏、刘征宇、刘洪亮、刘军生、黄鑫。

本文件实施应用中的疑问，请咨询新疆维吾尔自治区水利厅。

对本文件的修改意见建议，请反馈至新疆维吾尔自治区水利厅（乌鲁木齐市黑龙江路146号）、山东大学（山东省济南市山大南路27号）新疆维吾尔自治区市场监督管理局（乌鲁木齐市新华南路167号）。

新疆维吾尔自治区水利厅 联系电话：0991-5816236；传真：0991-5816236；邮编：830000

山东大学 联系电话：0531-88395428；传真：0531-88395428；邮编：250061

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 联系电话：0991-2818750；传真：0991-2311250；邮编：830004

隧洞智能化地质编录技术规范

1 范围

本文件规定了隧洞智能化地质编录的基本要求、围岩结构智能识别、岩石成分测试、岩性智能识别、不良地质体识别的要求。

本文件适用于钻爆法、敞开式TBM法等施工隧洞中的地质编录。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

隧洞智能化地质编录 **intelligent geological logging of tunnels**

在隧洞开挖过程中，采用数字化、智能化地质信息采集技术手段对所揭露围岩的岩性、结构面特征、完整性、不良地质体发育情况等地质信息进行识别和记录。

3.2

不良地质体 **unfavorable geology body**

能引起隧洞涌水突泥、围岩变形与失稳等问题的地质体。

注：包括溶洞、断层破碎带、裂隙密集带、风化带、蚀变带、软弱夹层等。

3.3

点云数据 **point cloud data**

在一个三维坐标系统中的一组向量的集合。

注：扫描资料以点的形式记录，每一个点包含有三维坐标，有些可能含有颜色信息(RGB)或反射强度信息(Intensity)。

3.4

数码摄影 **digital photogrammetry**

利用数码相机采集隧洞掌子面和围岩图像

3.5

岩石元素成分 **rock element composition**

组成岩石的元素种类及其在岩石中的含量。

3.6

岩石矿物成分 **rock mineral composition**

组成岩石的矿物种类及其在岩石中的含量。

3.7

单源岩性识别模型 lithology identification model based on single-source data

利用一种岩性数据判识岩性的模型。

3.8

多源融合岩性识别模型 lithology identification model based on multi-source data fusion

利用两种或以上岩性数据判识岩性的模型。

4 基本要求

4.1 隧洞智能化地质编录宜在隧洞每循环开挖后、喷混支护环节前进行，宜贯穿隧洞开挖全过程。

4.2 隧洞智能化地质编录应包括下列主要内容：

- a) 隧洞围岩结构识别，包括围岩结构面特征识别和围岩完整性评价；
- b) 隧洞围岩成分识别，包括元素识别和矿物识别；
- c) 隧洞围岩岩性识别，包括单源信息岩性识别和多源信息融合岩性识别；
- d) 隧洞不良地质体识别，包括元素和矿物异常分析以及不良地质识别。

4.3 隧洞智能化地质编录工作符合下列要求：

- a) 应遵循及时性、真实性、准确性及连续性的原则；
- b) 应在同一洞壁上连续进行，遇到不能连续编录情况（如围岩垮塌、溶洞、突水等），应沿地层走向在另一洞壁的对应位置进行数据采集与识别；
- c) 应根据隧洞施工工序、地质条件等分段完善、总结；
- d) 宜采用新技术、新设备和新工艺，做到技术先进、结果可靠。

4.4 隧洞智能化地质编录工作可按图1所示程序实施。

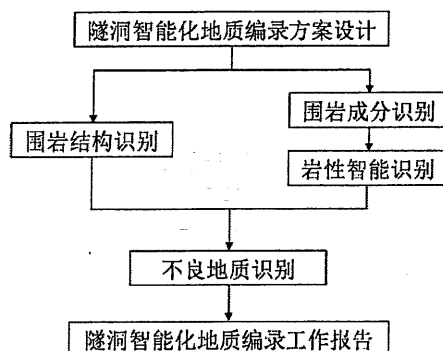


图1 隧洞智能化地质编录工作程序

4.5 隧洞智能化地质识别除应符合本文件的规定外，还应符合国家和行业有关标准和规范的要求。

5 隧洞智能化地质编录方案设计

5.1 隧洞智能化地质编录方案设计应全面了解隧址区地质情况、分析和掌握存在的主要工程地质问题的基础上开展，运用数字化、智能化地质信息采集技术开展隧洞地质编录。

5.2 隧洞智能化地质编录方案设计应包括下列内容：

- a) 编制依据；
- b) 工程概况；
- c) 地质概况、可能存在的主要工程地质问题及地质风险；

- d) 实施智能化地质编录的目的和要求;
- e) 智能化地质编录工艺流程及操作要点;
- f) 计划工作量、进度安排、资源配置等;
- g) 质量要求;
- h) 成果资料编制的内容与要求;
- i) 其他需要说明的问题。

6 围岩结构智能识别

6.1 一般规定

- 6.1.1 围岩结构智能识别技术可适用于钻爆法、敞开式 TBM 法等施工隧道。
- 6.1.2 在钻爆法施工隧洞,宜在爆破、出渣等工序完成后,掌子面裸露条件下开展结构面识别。
- 6.1.3 围岩结构智能识别方式包含基于三维激光扫描的结构面识别和基于数码摄影的结构面识别两种。
- 6.1.4 基于三维激光扫描仪进行结构面产状识别包含岩体迹线形态出露的结构面产状信息提取与岩体面状形态出露的结构面产状信息提取两种。
- 6.1.5 可利用结构面识别结果进行围岩完整性分析。

6.2 基于三维激光扫描的结构面识别

6.2.1 三维激光扫描技术开展洞内结构面识别应包括下列内容:

- a) 点云采集,利用三维激光扫描仪进行数据采集,获取隧洞围岩和掌子面点云数据;
- b) 点云数据处理,对采集的点云数据进行剔除噪点等处理工作,随后开展点云数据坐标转换、点云数据拼接等前处理工作;
- c) 结构面识别,借助机器视觉技术提取点云数据中的结构面产状信息,其中结构面提取主要分为迹线形态出露和面状形态出露的结构面两种;
- d) 可视化与展示,将结构面识别后的三维数据可视化呈现,以便地质工程师或其他相关专业人员更直观地理解隧洞围岩结构。

6.2.2 点云数据采集应包括下列工作步骤:

- a) 对设备进行调试,校准和检验设备,确保其准确性和稳定性,确保三维激光扫描设备处于良好工作状态;
- b) 根据项目要求和设备规格,设置激光扫描的分辨率、密度等参数,将标靶放置在场景中,按照预定路径或规划,避免遗漏任何部分,依次对隧洞内各个区域进行激光扫描,确保覆盖所选区域整个表面;
- c) 采集过程中实时监控数据采集质量,确保每个扫描点的准确性和一致性,并将扫描异常或存在的问题进行记录。

6.2.3 点云数据采集应符合下列要求:

- a) 构建基于激光点云的三维局部坐标, X 轴在横向扫描面内, Y 轴在横向扫描面内与 X 轴垂直, Z 轴与横向扫描面垂直;
- b) 隧洞内三维激光扫描的日期采用公历纪年,时间采用北京时间;
- c) 所使用的三维激光扫描仪应具有双轴补偿功能;
- d) 标靶放置在通视性好的位置,两个测站都能扫描得到;标靶不能放置在一条线上,要高低错开,便于坐标转换矩阵的计算;标靶至少需要 3 个,理想情况下是 4 个,3 个用做坐标转换,剩下的 1 个用来验证坐标转换精度;

- e) 若不存在标靶或是扫描场景特征点较多容易识别的情况下,设计好测站的位置,确保两站之间的公共区域有多个特征点,方便后续的配准工作;
- f) 当隧洞掌子面及边墙区域存在较大区域的不平整现象时,进行多点探测并对扫描轮廓点云进行加密,以保证岩体结构信息形态获取的精细化及准确性;
- g) 对扫描范围和扫描环境进行了解并对扫描工作进行总体规划,确定扫描仪此次扫描的空间范围、站点距离、相机参数和识别标靶等重要参数;
- h) 协调现场人员和设备,在扫描范围内减少人员活动和车辆出入,避免不必要的干扰;
- i) 在数据采集过程中,采用多方位、多角度的全覆盖扫描,同时保证2次连续扫描有足够的重叠区域进行拼接,从而获得全面完整的围岩表面信息。

6.2.4 岩体迹线形态出露的结构面产状信息提取包含下列内容:

- a) 裂隙智能识别:运用语义分割模型对岩体迹线形态进行自动化识别;
- b) 迹线裂隙的识别和分组:利用算法对点云数据中的裂隙进行准确的识别和分类,将相似的裂隙归为一组,以便后续的结构面产状分析;
- c) 结构面产状拟合:采用数学模型对识别的结构面进行产状拟合,以获取结构面的倾向、倾角等几何信息;
- d) 空间尺寸分布函数构建:基于拟合结果,构建空间尺寸分布函数,反映结构面在岩体内的分布规律,为地质工程决策提供可靠的数据支持。

6.2.5 岩体面状形态出露的结构面产状信息提取包含以下内容:

- a) 智能算法应用:岩体面状形态出露的结构面产状信息提取,利用聚类分析算法自动提取岩体面状结构面的特征,如面积、形状等;
- b) 半自动智能提取:结合人工智能技术,进行半自动的结构面提取,通过专业人员的辅助,提高提取的准确性和效率;
- c) 结构面产状信息分析:对提取的结构面信息进行分析,包括产状参数的测定、结构面之间的关系等,以全面理解岩体的地质特征;
- d) 三维模型生成:利用提取的结构面信息,生成三维模型,直观展现岩体内部的结构形态,为地质工程设计提供直观参考。

6.2.6 采用三维激光扫描技术提取产状信息的精度应符合下列要求:

- a) 倾向倾角精度:提取的产状倾向倾角与实际地质倾向倾角之间的误差小于 5° ;
- b) 方位角精度:提取的产状方位角与实际地质方位角之间的误差小于 5° ;
- c) 产状长度:提取的产状长度与实际地质长度之间的误差小于10 cm;
- d) 精度要求可能因不同的地质特征、岩层性质、隧洞尺寸等因素而有所变化。在实际应用中,可以与地质专业人员、工程师和技术专家合作,根据具体情况制定适合项目需求的精度标准,并在数据处理和分析过程中进行实时监控和调整,以确保所提取的产状信息满足工程和科研的要求。

6.3 基于数码摄影的结构面识别

6.3.1 采用数码摄影技术开展洞内结构面识别应包括下列内容:

- a) 使用数码摄影设备对洞内进行全方位、多角度的图像采集;
- b) 对采集到的数字图像进行预处理,包括去除图像噪声、调整对比度和亮度,以及校正畸变;
- c) 利用计算机视觉和图像处理技术,对数字图像中的岩体裂隙进行识别;
- d) 基于已识别的裂隙信息,使用立体视觉技术或其他三维重构方法,将二维图像转换为三维模型;
- e) 从三维模型中提取岩体结构面的相关参数,如结构面的倾向、倾角、长度、间距等。

6.3.2 图像采集过程应符合下列要求:

- a) 具备均匀、自然光源，或者在必要时使用外部补光设备；
 - b) 在拍摄前，清晰标识并记录摄影位置，确保后期能够精确定位照片拍摄位置；
 - c) 在待采集围岩区域内设置两个不同位置的标记点，并测量两标记点间的实际距离，确定数字图像比例尺；
 - d) 图像采集工作要在灰尘浓度和隧洞空气湿度满足要求后进行；
 - e) 根据地质特征，选择合适的拍摄角度，以最大程度地展示隧洞内部情况；
 - f) 隧洞围岩数字图像采集主要包括全局拍摄和局部拍摄，全局摄影需要对掌子面进行多角度整体拍摄，拍摄范围包含整个掌子面；局部摄影需要对掌子面进行局部多角度拍摄，对岩体破碎或裂隙明显处进行重点拍摄；
 - g) 采用适当的重叠度，确保每个区域都能够在相邻图片中有一定的覆盖，以支持后续数字化编录；
 - h) 采用钻爆法施工的隧洞，图像采集时间安排在掌子面排险完成后、衬砌台车推到掌子面之前，TBM 法施工的隧洞，图像采集工作主要在侧壁上实施，采集时间安排在喷浆前进行。
- 6.3.3 采集的图像数据集应符合下列要求：
- a) 隧洞围岩数字图像符合亮度和清晰度要求，宜避免大量的图像噪声；
 - b) 采集的图像中避免出现器械和工作人员；
 - c) 图像之间的重叠区域比例在 20%到 50%之间。即重叠区域的像素数量占整个图像的 20%到 50%。
 - d) 用于训练的岩体裂隙识别训练集每张图像中均含有岩体裂隙；
 - e) 将数据集按照比例建立岩体裂隙识别训练集和验证集，建议比例为 8:2。
- 6.3.4 基于数码摄影的结构面产状识别训练和精度应符合下列要求：
- a) 模型参数设置如迭代次数不低于 100 次和学习率（监督学习以及深度学习中重要的超参，其决定着目标函数能否收敛到局部最小值以及何时收敛到最小值）不低于 0.0001，可根据实际情况酌情调整；
 - b) 模型准确率评价指标一般选用像素准确率值（PA），当 PA 值大于 70%以上，才能满足工程需要。
- 6.3.5 岩体裂隙三维重构应满足下列要求：
- a) 借助智能三维重构完成图像的三维建模时，模型外观满足工程完整性要求；
 - b) 三维建模不应出现游离点、破面、共面、重面情况；
 - c) 模型构图和纹理完整、协调。
- 6.3.6 基于三维重构后的围岩岩体结构面参数提取主要包括下列工作内容：
- a) 获取岩体图像三维重构后的三维坐标，根据智能识别结果的红绿蓝三个颜色通道的数值（RGB 值）进行筛选，获取裂隙三维坐标；
 - b) 对三维重构后的结果进行去噪处理，去除误差点等；
 - c) 借助最小二乘法等算法对裂隙不连续面进行拟合；
 - d) 根据不连续面拟合结果获取裂隙不连续面的迹长、倾向、倾角、圆心坐标等三维信息。
- 6.4 围岩完整性识别
- 6.4.1 围岩完整性主要分级指标包含下列内容：
- a) 裂隙条数，洞壁上裂隙的数量；
 - b) 裂隙产状，包括裂隙组数、裂隙开度、裂隙长度等参数。
- 6.4.2 围岩完整性进行划分，参见附录 A。
- 6.4.3 数据报告与存储应符合下列要求：
- a) 提供数字化的围岩分级报告，包括裂隙条数、裂隙密度、平均裂隙宽度等参数；
 - b) 图文结合的方式展示围岩的裂隙情况；

- c) 将围岩完整性识别分析结果数字化存储, 建立地质信息数据库;
- d) 数据库具备可检索、可查询的功能, 以便进一步分析和比较。

7 岩石成分测试

7.1 一般要求

7.1.1 岩石成分测试内容包括岩石元素成分测试和岩石矿物成分测试两个方面。

7.1.2 开展岩石成分测试的要求:

- a) 岩石成分测试宜在隧洞掌子面开展测试, 条件受限时可在边墙或拱顶开展测试;
- b) 在钻爆法施工隧洞, 宜在爆破、出渣等工序完成后, 掌子面裸露条件下开展岩石成分测试;
- c) 在TBM法施工隧洞, 宜在边墙或拱顶实施喷浆等工序前, 围岩裸露条件下开展岩石成分测试;
- d) 岩石成分测试编号应使用隧洞的实际里程号, 每个里程位置不少于5个测点, 每个测点应至少重复测试2次;
- e) 岩石成分测试应保证测点的连续性, 呈线状或面状测试, 两测点间距不超过1m;
- f) 在不良地质体发育段落应加密测试, 并在相应重点位置进行样品采集以便于后续复测, 样品采集数量为(1~3)块, 样品规格为(3×6×9)cm, 松散样品装入样品袋中, 使用记号笔编号。

7.2 岩石元素成分测试

7.2.1 岩石元素成分测试包括以下内容:

- a) 选择岩石元素成分测试设备, 布置测试点位;
- b) 测试人员携带测试设备到达待测点位, 将测试设备靠近围岩表面, 激发设备进行岩石元素成分测试;
- c) 整理不同测试点位获得的元素数据。

7.2.2 除7.1.2外, 岩石元素成分测试还应满足下列要求:

- a) 测试设备应包含轻元素和重元素2种测试模式, 具备自动和批量测试功能; 应根据隧洞现场工作条件合理选用岩石元素成分测试设备, 包括激光诱导击穿光谱仪(LIBS)、便携式X射线荧光光谱仪(PXRF)等;
- b) 测试人员应装备护具, 选择围岩较平整表面进行测试, 测试设备检测窗口宜与待测岩石表面垂直, 单点测试时间不大于5min;
- c) 测试获得的元素含量数据应统一单位, 结果整理成表, 测试记录表参见附录B。

7.2.3 针对不同岩性的围岩, 岩石元素成分测试结果应至少涵盖以下元素中的一种:

- a) 火成岩类, 主要元素类型为硅(Si)、铝(Al)、铁(Fe)、钙(Ca)、钠(Na)、钾(K)、镁(Mg)、钛(Ti)等;
- b) 沉积岩类, 主要元素类型为硅(Si)、钙(Ca)、碳(C)、铝(Al)、铁(Fe)、镁(Mg)、钾(K)、钠(Na)、硫(S)等;
- c) 变质岩类, 主要元素类型为硅(Si)、铝(Al)、铁(Fe)、锰(Mn)、钙(Ca)、镁(Mg)、钾(K)、钠(Na)、钛(Ti)、磷(P)等。

7.3 岩石矿物成分测试

7.3.1 岩石矿物成分测试包括以下内容:

- a) 选择岩石矿物成分测试设备, 布置测试点位;

- b) 测试人员携带测试设备到达待测点位，将测试设备靠近围岩表面，激发设备进行岩石矿物成分测试；
 - c) 整理不同测试点位获得的矿物数据。
- 7.3.2 除 7.1.2 外，岩石矿物成分测试还应满足下列要求：
- a) 测试设备应包含普通造岩矿物、粘土矿物和蚀变矿物测试模式，具备自动和批量测试功能；应根据隧洞现场工作条件合理选用岩石矿物成分测试设备，包括红外高光谱仪（IR）、便携式 X 射线衍射仪（PXRD）等；
 - b) 测试人员应装备护具，选择围岩较平整表面进行测试，测试设备检测窗口宜与待测岩石表面垂直，单点测试时间不大于 10 min；
 - c) 测试获得的矿物含量数据应统一单位，结果整理成表，测试记录表参见附录 C。
- 7.3.3 针对不同岩性的围岩，岩石矿物成分测试结果应至少涵盖以下矿物中的一种：
- a) 火成岩类，主要矿物类型为石英（Qz）、钾长石（Kfs）、斜长石（Pl）、黑云母（Bt）、角闪石（Hbl）、普通辉石（Aug）、黏土（Clay）等；
 - b) 沉积岩类，主要矿物类型为石英（Qz）、黑云母（Bt）、黏土（Clay）、钾长石（Kfs）、斜长石（Pl）、方解石（Cal）、白云石（Dol）、石膏（Gp）等；
 - c) 变质岩类，主要矿物类型为石英（Qz）、钾长石（Kfs）、斜长石（Pl）、黑云母（Bt）、角闪石（Hbl）、普通辉石（Aug）、石榴石（Grt）、绿泥石（Chl）、绿帘石（Ep）等。

8 岩性智能识别

8.1 一般要求

8.1.1 岩性智能识别方法包括基于图像、元素、矿物等单源信息的识别方法和基于多源信息深度融合的识别方法。现场岩性识别宜优先选用基于多源信息融合的识别方法。

8.1.2 隧洞围岩图像数据采集应符合下列要求：

- a) 图像采集区域处于干燥、光照充足、无明显污染的状态；
- b) 采集围岩图像时，相机正对被拍摄区域，相机与被拍摄区域保持 1 m~5 m 的距离；
- c) 图像为彩色图像，分辨率不低于 800×600；
- d) 数据采集完成后，及时检查数据质量，确保数据无明显异常。

8.1.3 隧洞围岩岩性智能识别应符合下列要求：

- a) 重点区域提高图像、元素和矿物等数据采集及识别频率，进而准确把握岩性变化；
- b) 在识别岩性前，先使用数据对单源岩性识别模型或多源融合岩性识别模型进行测试，确保岩性识别模型已正常部署，软、硬件设备能支持完成相关计算。

8.1.4 岩性智能识别结果宜按附录 D 进行整理。

8.2 单源信息岩性智能识别

8.2.1 单源信息岩性智能识别主要工作内容包括：

- a) 单源岩性识别模型选择；
- b) 单源数据导入；
- c) 结果判定。

8.2.2 采用单源信息岩性智能识别方法识别岩性，符合下列要求：

- a) 当数据为图像等三维数据时，宜采用卷积神经网络模型识别岩性；
- b) 当数据为元素成分等一维数据时，宜采用全连接神经网络模型识别岩性；

- c) 识别次数不小于 3 次，当识别模型输出的最高置信度低于 0.7 时，应适当增加识别次数。

8.3 多源信息融合岩性智能识别

8.3.1 多源信息融合的岩性智能识别的主要工作内容包括：

- a) 多源融合岩性识别模型选择；
- b) 多源数据导入；
- c) 结果判定。

8.3.2 采用多源信息融合方法识别岩性，符合下列要求：

- a) 多源数据维度不同时，宜采用特征级融合识别模型；
- b) 多源数据维度相同时，宜采用数据级融合识别模型；
- c) 将多源数据导入模型时，应确保多源数据来自同一块岩石；
- d) 识别次数不小于 3 次，当识别模型输出的最高置信度低于 0.8 时，应适当增加识别次数。

9 不良地质体识别

9.1 一般要求

9.1.1 不良地质体识别包括下列工作内容：

- a) 围岩元素异常分析；
- b) 围岩矿物异常分析；
- c) 不良地质判定。

9.1.2 应在完成岩石成分识别、围岩结构智能识别以及岩性智能识别的基础上开展不良地质识别工作。

9.2 元素异常分析

9.2.1 元素异常分析宜采用均值标准差法和累计频率法。

9.2.2 元素异常分析宜遵循以下流程：

- a) 选取要分析的元素种类，对每一种元素的数据进行正态分布统计；
- b) 对于符合正态分布的元素，使用均值标准差法按公式(1)到公式(4)计算异常界限值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

式中：

$\bar{x}$ —样本元素含量的算数平均值；

n —测试的样品数量；

i —每一个样品， $i \geq 1$ ；

x_i —样品 i 对应的元素含量值。

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

式中：

S —样本标准差；

n —测试的样品数量；

i —每一个样品， $i \geq 1$ ；

x_i —样品 i 对应的元素含量值；

$\bar{x}$ —样本元素含量的算数平均值。

$$C_1 = \max\{(\bar{x} - 2 \cdot S), 0\} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

C_1 —为异常下界值；

$\bar{x}$ —样本元素含量的算数平均值；

S —样本标准差。

$$C_2 = \min\{(\bar{x} + 2 \cdot S), 1\} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

C_2 —为异常上界值；

$\bar{x}$ —样本元素含量的算数平均值；

S —样本标准差。

- c) 对于不符合正态分布的元素，使用累计频率法按以下方法计算异常界限值：将样本 X 样本值由小到大排列，确定累计频率 4.5% 所对应的样本值，将该值作为异常下界值 C_1 ，确定累计频率 95.5% 所对应的样本值，将该值作为异常上界值 C_2 ；
- d) 若元素数据处于异常界限以内，则认为该元素分布正常，将这部分数据作为正常数据纳入背景样本；
- e) 若元素数据超出异常界限范围，则根据岩性智能识别结果判断隧洞是否掘进至岩性变化带，若隧洞掘进至岩性变化带，则从新岩性处重新开始分析；若隧洞未掘进至岩性变化带，则认为出现围岩元素异常分布；
- f) 对元素异常分析结果进行归纳，若元素含量值大于异常上界限，则认为元素富集；若元素含量值低于异常下界限，则认为元素流失。

9.2.3 元素异常分析结果应包含以下内容：

- a) 存在异常的元素以及元素异常类型；
- b) 异常出现的里程范围；
- c) 隧洞元素分布散点图，X 轴为里程，Y 轴为元素含量，且在 Y 轴中明确标注异常上下限的位置。

9.3 矿物异常分析

9.3.1 矿物异常识别宜使用数据探索性分析（EDA）方法。

9.3.2 矿物异常识别应遵循以下流程：

- a) 选取要分析的矿物种类，若选取的某种矿物未在样品中测试到，则将该种矿物的含量设置为 0。
- b) 确定矿物数据样本的下四分位数 Q_1 、中位数 Q_2 、上四分位数 Q_3 ，并计算四分位数间距：

$$iqr = Q_3 - Q_1 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

iqr —为四分位数间距值；

Q_1 —样本矿物数据下四分位（25%）值；

Q_3 —样本矿物数据上四分位（75%）值。

- c) 分别计算异常下内限值 lif 和异常上内限值 uif ：

$$lif = Q_1 - 1.5iqr \dots\dots\dots (6)$$

式中：

iqr —为四分位数间距值；

Q_1 —样本矿物数据下四分位（25%）值；

lif —异常下内限值。

$$uif = Q_1 + 1.5iqr \dots\dots\dots (7)$$

式中:

iqr —为四分位数间距值;

Q_1 —样本矿物数据下四分位 (25%) 值;

uif —异常上内限值。

d) 根据 EDA 技术理论, 超出内限的即为异常值:

$$C_1 = \max(lif, 0) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

C_1 —为异常下界值;

lif —异常下内限值。

$$C_2 = \min(uif, 1) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

C_2 —为异常上界值;

uif —异常上内限值。

e) 若矿物数据处于异常界限以内, 则认为该矿物分布正常, 将这部分数据作为正常数据纳入背景样本;

f) 若矿物数据超出异常界限范围, 则根据岩性智能识别结果判断隧洞是否掘进至岩性变化带, 若隧洞掘进至岩性变化带, 则从新岩性处重新开始分析; 若隧洞未掘进至岩性变化带, 则认为出现围岩矿物异常分布。若隧洞未掘进至岩性变化带, 则认为出现围岩矿物异常分布。

g) 对矿物异常分析结果进行归纳, 若矿物含量值大于异常上界限, 则认为矿物富集; 若矿物含量值低于异常下界限, 则认为矿物流失。

9.3.3 矿物异常分析结果应包含以下内容:

- a) 存在异常的矿物以及矿物异常类型;
- b) 异常出现的里程范围;
- c) 选取矿物的 EDA 箱线图。

9.4 不良地质判定

9.4.1 不良地质判定应结合围岩结构智能识别结果、岩性智能识别结果、元素异常和矿物异常分析结果综合判定, 不良地质智能识别结果可参照附录 E。

9.4.2 不良地质判定的内容包括:

- a) 不良地质的发育规模, 分为小型、中型、大型;
- b) 不良地质的类型, 包括断层、蚀变带和岩溶。

9.4.3 开展不良地质异常识别应遵循以下流程:

- a) 根据隧洞工程勘察资料以及地面地质调查结果, 主要包括地形地貌、岩性组合、水文地质和构造地质等信息进行合并分析, 圈定不良地质可能赋存的里程区段;
- b) 对异常信息进行合并分析, 并结合勘察阶段获得和隧洞开挖揭露的地质信息进行相交分析, 对可能存在的不良地质进行识别;
- c) 根据元素和矿物的异常情况和异常程度, 结合在隧洞内揭露的宏观地质特征, 对不良地质的类型、规模等做出识别推断, 分析对隧洞施工的影响。

10 隧洞智能化地质编录工作报告

10.1 隧洞智能化地质编录工作报告应及时出具并提交给有关各方。

10.2 隧洞智能化地质编录工作报告应该包括下列内容：

- a) 工程及地质概况；
- b) 智能化地质编录原理、方法及设备；
- c) 围岩结果识别结果；
- d) 围岩成分识别结果；
- e) 岩性识别结果；
- f) 不良地质体识别结果，参见附录 E；
- g) 隧洞智能化地质编录结论及施工建议；
- h) 隧洞智能化地质编录工作经验与教训总结。

10.3 隧洞智能化地质编录工作报告应经校核和审查批准后才能提交，并按有关要求归档。

附 录 A
(资料性)
围岩完整性进行分析

围岩完整性划分见表A. 1。

表A. 1 围岩完整性的划分

完整程度	结构面发育程度			主要结构面类型
	裂隙条数 条/立方米	组数	平均间距 m	
完整	<3	1~2	>1.0	节理、裂隙、层面
较完整	3~10	1~2	>1.0	节理、裂隙、层面
		2~3	0.4~1.0	
较破碎	10~20	2~3	0.4~1.0	节理、裂隙、层面、小断层
		≥3	0.2~0.4	
破碎	20~35	≥3	0.2~0.4	各种类型结构面
			≤0.2	
极破碎	≥35	无序		各种类型结构面

附 录 B
(资料性)
隧洞岩石元素成分测试记录

隧洞岩石元素成分测试记录见表B. 1。

表B. 1 隧洞岩石元素成分测试记录表

项目名称: _____		试验人: _____		测试仪器: _____										
里程	测试 时间	元素 1		元素 2		元素 3		元素 4		...		元素 n		测试 位置
		种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	

附 录 C
(资料性)
隧道岩石矿物成分测试记录

隧道岩石矿物成分测试记录见表C. 1。

表C. 1 隧洞岩石矿物成分测试记录表

项目名称： _____

试验人： _____

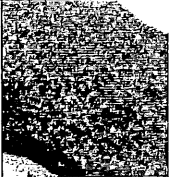
测试仪器： _____

里程	测试 时间	矿物 1		矿物 2		矿物 3		矿物 4		...		矿物 n		测试 位置
		种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	种类	含量	

附 录 D
(资料性)
现场岩性智能识别报告

现场岩性智能识别报告见表D. 1。

表 D. 1 现场岩性智能识别

编号	里程	代表性数据	第一次识别结果	第二次识别结果	第三次识别结果	最终结果
1	109+014.2		斜长角闪岩 (0.95)	斜长角闪岩 (0.93)	斜长角闪岩 (0.96)	斜长角闪岩

注：代表性数据包括图像及岩石组成信息。

附录 E
(资料性)
隧洞不良地质智能识别

隧洞不良地质智能识别结果按表E. 1进行。

表 E. 1 不良地质智能识别结果

施工单位：_____ 编录单位：_____

施工里程：_____ 报告编号：_____

项目名称	状态描述						
围岩结构识别	设计围岩级别						
岩性智能识别	围岩完整程度		主要结构面类型			结构面发育程度	
围岩成分测试	主要岩性类别：						
围岩成分测试	主要元素种类：		主要矿物种类：				
不良地质识别	元素异常			矿物异常			不良地质异常
编录结果描述							

参 考 文 献

- [1] GB/T 34354—2017 全断面隧道掘进机 术语和商业规格
 - [2] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范(2009版)
 - [3] DZ/T 0078—2015 固体矿产勘查原始地质编录规程
 - [4] DZ/T 0248—2014 岩石地球化学测量技术规程
 - [5] SL/T 313—2021 水利水电工程施工地质规程（附条文说明）
 - [6] SY/T 5163—2018 沉积岩中粘土矿物和常见非粘土矿物X衍射分析方法
-