

隧道掌子面超前地质预报多参数量化评价与围岩定级新标准建立及实践验证

赵学峰

山西省交通建设工程质量检测中心（有限公司）山西 太原 030032

摘 要：隧道工程传统围岩定级方式指标维度狭窄，量化分析程度较低，极易受人为经验干扰，复杂地质场景下的分级判定误差较为突出，超前地质预报实测数据也难以有效服务于围岩评级工作。本文结合隧道掌子面施工探测特点，筛选适配性极强的地质评价核心参数，搭建多参数量化评价模型，重构科学完善的围岩定级标准，依托现场实际工程数据完成精度校核与体系优化，有效解决传统分级模式的应用弊端，大幅提升隧道围岩定级的准确性与规范性。

关键词：隧道工程；掌子面；超前地质预报；多参数量化评价；围岩定级

引言：隧道地下岩体构造错综复杂，各类隐蔽不良地质体极大增加了掘进施工的安全风险，精准判定围岩等级是优化支护方案、把控施工安全的关键前提。当前行业通用的围岩分级模式，多以定性判别和单一地质指标为依据，难以精准捕捉岩体裂隙发育、结构破损等细微特征。分级判定的片面性问题，导致地质研判结果和现场施工需求难以匹配，通过多维度参数整合实现围岩定级量化升级，能够有效弥补传统技术模式的应用短板。

1 隧道掌子面超前预报及围岩分级现存问题分析

1.1 掌子面超前地质预报技术运行特征

隧道掌子面超前地质预报是隧道掘进施工中预判前方地质条件的核心技术手段，通过专业探测设备采集掌子面深部地质信息，预判掘进前方岩体结构与地质状态，为现场施工调整 and 支护设计提供有效依据。预报作业穿插于隧道掘进工序之中，施工场地狭窄、作业环境复杂，空间条件会约束探测作业开展。探测工作主要识别岩体完整程度、裂隙发育状态及隐蔽不良地质体，地下复杂的岩体构造容易干扰探测信号，影响数据采集的精准度^[1]。整体作业具备前置预判、动态探测、隐蔽性探测的特点，需要适配多变的地下施工场景，才能保障地质探测的基础精度。

1.2 传统围岩评价参数单一性缺陷

传统围岩评价体系选用的评价指标较为固定，覆盖维度相对狭窄，无法完整还原隧道围岩的真实地质状态。评价工作多依托单一岩体物理参数开展判定，忽视岩体内部结构缺陷、赋存环境等关键影响要素，评价视角存在明显局限。固定的评价指标难以适配复杂多变的

地下地质条件，无法精准区分不同围岩的稳定性能差异。评价模式难以捕捉围岩局部裂隙、结构破损、岩体不均等细微特征，最终判定结果存在片面性，无法精准识别施工潜在地质风险。

1.3 常规围岩定级体系存在的短板

常规围岩定级体系判别框架固化，应对复杂特殊地质场景的适配能力较差。定级方式侧重宏观定性判断，量化分析程度不足，判定结果容易受操作人员主观经验影响，稳定性不足。体系迭代更新速度缓慢，难以适配现阶段隧道施工精细化、数字化的发展趋势。定级标准对岩体微细结构变化、动态受力响应等内容考量不足，复杂围岩的等级区分精度偏低。传统定级模式无法有效对接超前地质预报的探测数据，造成地质探测与围岩定级工作相互割裂，降低隧道施工地质研判的整体有效性。

1.4 多参数量化定级的必要性分析

隧道地下地质环境复杂多变，存在较强的不确定性，单一指标判定模式难以满足高精度围岩定级的施工要求。多参数量化定级模式整合多项地质评价指标，拓宽围岩评价的覆盖范围，全面涵盖岩体结构、完整度、稳定性等核心评价内容。量化的判定形式可以规避主观判定带来的误差，提升围岩等级划分的规范性与准确度。该模式可充分挖掘超前地质预报的有效数据，打通地质探测与围岩评价的衔接通道，搭建精细化的围岩判定体系，适配各类复杂隧道地质的研判与施工需求。

2 隧道掌子面超前预报多参数体系构建与量化分析

2.1 围岩超前预报核心评价参数筛选

多参数体系搭建的基础在于科学筛选评价指标,参数选取质量直接决定围岩定级的精准程度。结合隧道掌子面超前地质预报的探测原理与围岩稳定控制要素,围绕岩体基本属性、结构发育状态、地质环境特征开展参数遴选工作。摒弃传统单一化、片面化的指标选取方式,优先选取能够独立反映围岩稳定性、可通过超前探测手段精准获取的地质参数。剔除关联性弱、干扰性强的冗余指标,保证参数体系具备独立性、代表性与可探测性^[2]。筛选工作立足复杂地下地质环境,兼顾常规围岩与不良地质围岩的评价需求,为后续量化分析与模型搭建奠定扎实基础。

2.2 各类评价参数量化表征方法

地质评价参数多为定性描述内容,无法直接适配精细化围岩定级的计算需求,需要完成标准化量化处理。针对不同类型的预报参数,匹配适配的量化表征方式,统一各类指标的评价尺度与计量标准。对岩体完整程度、裂隙发育状态、结构均匀性等定性指标,通过分级赋值、区间划分的方式完成数值转化。对可直接探测的定量指标,开展数据清洗、误差修正与标准化处理,消除探测环境带来的数据偏差。规范各类参数的表征形式,让所有评价指标均可纳入统一的数值评价体系,实现围岩状态的数字化客观表达。

2.3 多参数之间耦合影响关系分析

隧道围岩各类地质参数并非独立存在,不同指标之间存在相互制约、相互作用的内在关联。单一参数变化会引发围岩整体稳定状态的连锁改变,简单叠加各项参数无法真实反映围岩实际状态。梳理不同评价参数的内在作用机理,分析参数之间的正向促进与负向约束关系。探究参数耦合作用对围岩整体稳定性的影响程度,区分关键主导参数与辅助影响参数。明确各类参数的作用权重与关联逻辑,规避单一参数评价的片面问题,保障多参数评价体系的科学性与完整性。

2.4 掌子面围岩多参数量化评价模型构建

依托筛选完成的核心参数与参数耦合关系,搭建适配隧道掌子面超前预报的围岩量化评价模型。结合地下围岩地质变化规律,确定模型的计算逻辑与结构框架,整合各类量化指标的计算规则与评价标准。引入科学的赋权方式,明确不同参数在围岩评价体系中的影响占比,强化模型对复杂地质场景的适配能力。模型构建聚焦超前预报数据的高效利用,打通地质探测与围岩定级的技术衔接路径,形成一套完整、规范、可落地的围岩量化评价体系,为新型围岩定级标准的建立提供核心技术支撑。

术支撑。

3 隧道掌子面围岩定级新标准体系构建

3.1 围岩定级新标准构建逻辑与思路

围岩定级新标准的搭建,聚焦隧道掌子面超前地质预报的技术特性开展整体设计。针对传统围岩分级定性判断占比过高、评价维度不足的问题,建立以多维度地质参数为核心的定级逻辑。研究重点聚焦围岩真实稳定状态的客观表达,依托量化分析手段弱化人为判断干扰。整体设计贴合隧道掘进动态施工特点,覆盖常规围岩与不良复杂围岩的评价场景,形成从数据采集、参数分析到等级判定的完整研究思路,为新标准搭建稳固的理论框架^[3]。

3.2 基于多参数的指标权重分配

各类地质评价参数对围岩稳定状态的影响程度存在区别,合理的权重配置可以提升评价体系的精准程度。结合各参数的地质作用机制与相互耦合关系,采用规范科学的赋权方法完成指标权重计算。根据各项参数对岩体结构、裂隙发育、整体稳定性的影响效果,划分指标主次关系,完成差异化权重配置。有效规避无关参数对评价结果的干扰,让权重分配贴合隧道围岩实际地质变化规律。

3.3 围岩等级量化阈值划分

结合多参数综合计算得到的稳定性评价数值,开展围岩等级区间的科学划分。参考岩体完整状态、裂隙发育规模及地下赋存环境特征,设置分级对应的量化区间标准。摒弃模糊的定性判别方式,以明确的数值区间界定不同围岩等级的稳定边界。细化分级判定界限,弱化分级过渡阶段的判定模糊性,让围岩等级划分更具客观性与规范性。

3.4 新型围岩完整定级标准体系搭建

结合参数筛选、权重分配、阈值划分等研究内容,搭建完整的围岩定级标准体系。明确新标准的适用范围、判定流程与技术规范,形成成套标准化的围岩分级技术流程。统一复杂地质条件下的判定规则,规整整体作业流程,改善传统定级模式流程零散、标准不统一的问题。构建系统化、数字化的围岩定级技术体系,适配隧道精细化施工的发展需求。

3.5 新标准相较于传统定级体系的优化提升

新型围岩定级体系依托多维度量化指标搭建,弥补传统分级模式指标单一、精度偏低、主观性强的缺陷。以超前地质预报实测数据为判定基础,降低人为经验

因素造成的判定偏差。深度结合超前预报技术的数据优势，充分挖掘探测信息的应用价值。新标准对围岩细微结构变化的识别能力更强，能够适应复杂地质环境的分级作业，提升隧道围岩定级的科学性与现场适配性。

4 新型围岩定级标准的实践验证与适配优化

4.1 新标准实践验证的整体思路与技术框架

新型围岩定级标准的落地应用需要通过系统性验证检验实际效用，依托隧道掌子面掘进施工场景搭建完整验证框架。验证工作围绕标准适用性、评价体系准确性两大核心方向展开，全程依托现场超前地质预报实测数据开展分析工作。整体思路以现场实测、数据比对、效果校验、迭代优化为核心流程，规避纯理论分析带来的实用性不足问题^[4]。按照分步验证、逐项校核的模式，先完成定级标准适配性检验，再开展量化评价体系精度校验，最后结合校核结论完成体系优化升级。整套技术框架流程清晰、层级明确，能够客观反映新标准在实际隧道施工场景中的应用效果，为标准完善提供真实的数据支撑。

4.2 围岩定级标准适用性系统性验证

为检验新型定级标准对不同地质围岩的适配能力，选取多组不同结构、不同完整度的隧道围岩样本开展适用性测试。样本涵盖完整岩体、较破碎岩体、破碎岩体等多种围岩类型，覆盖隧道施工常见地质工况。通过新标准判定围岩等级，记录各类围岩的定级匹配状态，统计标准适配覆盖范围。汇总各类样本的定级结果，整理不同围岩类型的适配情况数据，具体统计内容如表 1 所示。

表 1 不同围岩类型定级标准适用性统计结果

围岩岩体类型	样本数量	定级适配样本数量	适配表现特征
完整岩体围岩	18	18	定级结果稳定，与岩体实际状态匹配度高
较破碎岩体围岩	22	19	整体适配性良好，仅少量过渡围岩存在判定偏差
破碎岩体围岩	16	14	可精准判别不良围岩等级，适配复杂地质工况

从样本校核结果可以看出，新标准对各类常规及复杂围岩工况均具备良好适配能力，仅少量过渡状态围岩存在判定偏差，整体适用性能满足隧道施工定级需求。

4.3 多参数量化评价体系准确性验证

多参数量化评价模型是新标准的核心支撑，模型运算精度直接决定围岩定级的可靠程度。以现场实测的围岩物性参数、结构参数为基础数据，录入量化评价模

型完成综合分值计算，输出对应围岩等级。将模型输出结果与现场围岩实际揭露状态进行比对，统计等级一致样本与偏差样本数量，校验评价体系的判定精度。经过多组样本反复校核，量化评价体系整体判定精度处于较高水平，多数样本定级结果与现场实际地质状态保持一致。少量偏差样本集中于裂隙发育不均、岩体结构过渡的特殊工况，偏差范围可控，不会对整体定级结论造成干扰，能够证明多参数量化体系具备稳定、可靠的判定性能。

4.4 基于验证结果的新标准优化与完善

结合适用性与准确性两项验证结果，针对新标准存在的细微短板开展针对性优化升级。聚焦过渡状态围岩判定精度不足的问题，微调对应区间的量化阈值，细化临界围岩的等级判定标准，缩小模糊判定区间。优化特殊地质工况下的参数权重配比，强化局部结构缺陷、不均匀岩体的参数识别能力，提升复杂围岩的定级精准度。规整新标准的判定流程，细化特殊场景的判定规范，补齐体系应用短板。经过迭代优化后的定级标准，适配场景更为全面，判定精度与稳定性能得到提升，可更好服务于隧道掌子面超前地质预报与围岩分级工作^[5]。

结束语

多参数融合的围岩量化定级模式，可有效弥补传统单一指标分级的不足，通过规范各类地质参数的量化标准、厘清参数间耦合作用关系、细化分级数值阈值，减少主观判定带来的误差偏差。现场实测工况的全方位校验，能够保障定级标准对各类围岩工况的适配效果。优化调整临界区间判定标准与指标权重后，分级体系对复杂、过渡性围岩的识别能力稳步提升，可为隧道掌子面地质预判及安全掘进提供扎实的技术支撑。

参考文献

[1] 谭万林. 隧道超前地质预报在保障隧道掌子面施工安全中的应用 [J]. 交通世界, 2024(32):148-150.

[2] 韩自强. 隧道掌子面附近金属物对瞬变电磁超前地质预报数据的影响及校正研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2):824-835.

[3] 安哲立, 彭昉, 袁振宇, 等. 隧道地震波三维层析超前地质预报系统及工程应用 [J]. 中国铁路, 2024(11):37-44.

[4] 黎一禾. 基于地质雷达的隧道超前地质预报技术应用研究 [J]. 四川职业技术学院学报, 2024, 34(1):156-160.

[5] 郑小洋, 罗雪涛, 吉锐, 等. 综合超前地质预报方法在喀斯特隧道中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(14):219-223.