

DB 65

新疆维吾尔自治区地方标准

DB65/T 4790—2024

敞开式 TBM 水工隧洞岩爆微震监测预警 技术规程

**Technical specification for microseismic monitoring and early warning of
rockburst in open TBM hydraulic tunnel**

2024 - 07 - 11 发布

2024 - 09 - 10 实施

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 基本规定.....	2
5 资料收集和现场调查.....	2
6 岩爆微震监测设计.....	3
6.1 一般规定.....	3
6.2 微震监测区域确定.....	3
6.3 岩爆微震监测设备选型.....	3
6.4 岩爆微震监测系统布置方案设计.....	4
7 岩爆微震监测实施.....	5
7.1 一般规定.....	5
7.2 微震监测设备安装与维护.....	5
7.3 微震监测数据处理与分析.....	5
8 岩爆预警.....	6
8.1 一般规定.....	6
8.2 岩爆预警方法.....	6
8.3 预警结果发布.....	6
附录 A（规范性） 微震传感器技术指标.....	8
附录 B（资料性） 微震监测数据的智能分析法.....	9
附录 C（资料性） 基于微震监测的 TBM 隧洞岩爆智能预警法.....	10
附录 D（规范性） 预警准确率判定标准.....	12
附录 E（规范性） 微震传感器安装示意图.....	13
参考文献.....	14

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：新疆水发建设集团有限公司、东北大学、新疆水利发展投资（集团）有限公司、新疆维吾尔自治区标准化研究院。

本文件主要起草人：王军、冯夏庭、姚志宾、王建、张伟、吕斌、马平、胡磊、焦一峰、姚璐、刘造保、郭新强、杨成祥、许建述、陈炳瑞、潘旭勇、张宇、刘扬扬、牛文静、那木苏荣、熊永润、肖逸飞、付廉杰、马艾山。

本文件实施应用中的疑问，请咨询新疆水发建设集团有限公司。

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）、新疆水发建设集团有限公司（乌鲁木齐市水磨沟区安居南路197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

新疆水发建设集团有限公司 联系电话：0991-5989830；传真：0991-5989986；邮编：830000

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

敞开式 TBM 水工隧洞岩爆微震监测预警 技术规程

1 范围

本文件规定了敞开式TBM水工隧洞施工过程中岩爆微震监测预警的基本规定、资料收集和现场调查、岩爆微震监测设计、岩爆微震监测实施、岩爆预警等内容。

本文件适用于新疆各等级敞开式TBM水工隧洞施工过程中岩爆微震监测预警，其他工程可参照执行。

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。

GB 50487 水利水电工程地质勘察规范

YS 5229 岩土工程监测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩爆 rock burst

在开挖或其他外界扰动下，深部或高构造应力的岩体中聚积的弹性变形势能在一定条件下突然释放，导致围岩爆裂、弹射的动力现象。

[来源：NB/T 10391-2020, 2.0.22, 有修改]

3.2

岩爆等级 rockburst intensity

描述岩爆强烈程度与破坏规模的指标。

3.3

微震监测 microseismic monitoring

利用微震设备实时采集岩体破裂信号的监测技术。

3.4

岩爆预警 rockburst warning

预判潜在岩爆的发生位置、等级及其发生概率，并发出警报。

3.5

微震事件 microseismic event

触发微震传感器并能够被记录的事件。

3.6

波形识别 waveform recognition

从微震系统采集的波形信号中识别岩石破裂信号。

3.7

微震源定位 **microseismic source location**

定位微震发生时刻和微震源空间位置。

3.8

微震辐射能 **microseismic radiated energy**

岩体在开裂或滑动过程中，以弹性波的形式释放的能量，也称为微震释放能或微震能。

3.9

微震视体积 **microseismic apparent volume**

微震源非弹性变形区岩体的体积。

3.10

即时型岩爆 **immediate rockburst**

隧洞开挖卸荷效应影响过程中发生的岩爆。

注：一般发生在掌子面后3倍洞径内，滞后开挖时间小于3 d。

3.11

时滞型岩爆 **time delayed rockburst**

隧洞开挖卸荷后应力调整平衡后而发生的岩爆。

注：一般发生在掌子面后3倍洞径外，或滞后开挖时间大于3 d。

4 基本规定

4.1 岩爆等级划分应按 GB 50487 和相关设计文件的规定执行。

4.2 隧洞设计岩爆评估结果为中等岩爆、强烈岩爆和极强岩爆的洞段，应开展岩爆微震监测预警。

4.3 微震监测施工安全应符合 YS 5229 的规定。

4.4 岩爆微震监测预警，除应符合本文件外还应符合国家现行有关标准的规定。

4.5 岩爆微震监测系统设计应遵循动态设计原则，当工程施工作业环境、方法、地质条件变化时，应及时调整微震监测系统设计。

4.6 微震监测设备应定期检测和校准。

5 资料收集和现场调查

5.1 岩爆微震监测应开展资料收集，主要内容宜包括：

- 地质资料应包括区域地质成果及工程区的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、围岩类别和现场地质编录资料；
- 试验及测试资料应包括岩石（体）力学试验；
- 地应力资料包括区域性地应力资料和工程区地应力测试资料；
- 勘察设计阶段的岩爆评估结果及岩爆治理措施；
- 设备资料应包括 TBM 结构及尺寸，锚杆钻机打孔范围、直径和深度；
- 隧洞沿线潜在岩爆风险评估结果施工资料应包括工程开挖方案、支护方案及措施、施工组织方案。

5.2 岩爆微震监测前应开展现场调查，主要内容宜包括：

- 本工程已开挖洞段或邻近工程中历史发生的片帮、岩爆等应力型灾害的位置、类型、等级、规律、发生原因及危害性等信息；

- b) 监测范围及其附近区域的高压线路、变电站和其他可能产生强电场、强磁场的电气设备的空间分布信息;
- c) 可供线路布设及仪器安装的敞开式 TBM 结构与隧洞空间位置信息;
- d) TBM 通讯系统方式与运行情况信息。

6 岩爆微震监测设计

6.1 一般规定

6.1.1 岩爆微震监测网络应包括传感器、监测基站、监控中心及通讯网络。

6.1.2 微震监测宜采用自动化监测方案。

6.1.3 岩爆微震监测前应编制岩爆微震监测方案, 并包括下列内容:

- a) 微震监测区域确定;
- b) 微震监测设备选型;
- c) 微震传感器布置;
- d) 微震监测系统布置;
- e) 微震监测通讯方案。

6.2 微震监测区域确定

6.2.1 TBM 水工隧洞微震监测重点区域应包括下列部位:

- a) 掌子面前方 2 倍洞径至掌子面后方 3 倍洞径范围区域;
- b) 未形成有效支护的区域;
- c) 已发生强烈或极强岩爆区域的相邻或平行洞段;
- d) 岩性、岩体结构发生显著变化区域;
- e) 赋存造成局部应力集中且诱发急剧能量释放的地质构造区域;
- f) 交叉洞口及其附近区域。

6.3 岩爆微震监测设备选型

6.3.1 岩爆微震监测设备由硬件和软件组成, 硬件包括微震传感器、微震采集仪、数据服务器、安全运行保障设备及通信设施等, 软件包括系统控制与数据分析软件等。

6.3.2 监测对象微震信号的主频以低频为主时, 传感器宜选择速度型; 监测对象微震信号的主频以高频为主时, 传感器宜选择加速度型。

6.3.3 微震传感器性能应符合下列规定:

- a) 传感器技术指标应按照附录 A 的规定;
- b) 频带宽度应覆盖监测对象微震信号的主要频率范围;
- c) 传感器量程应大于监测对象主要微震信号的最大振幅。

6.3.4 微震采集仪应满足以下要求:

- a) 采样频率不应低于监测对象主要微震信号最高主频频率的 2 倍, 且不宜低于 2000 Hz;
- b) 模数转换位数不应低于 24 位;
- c) 时间同步误差不应高于 1 ms;
- d) 微震监测设备应具备 IP45 以上防护等级;
- e) 平均无故障时间不低于 4000 h。

6.3.5 数据服务器应满足以下条件:

- a) 应配置双网卡;
- b) 数据存储容量不小于 1 TB, 数据存储时长不少于 3 个月;
- c) 数据备份时间间隔不超 7 d;
- d) 数据缺失率不超 0.1%;
- e) 微震监测设备工作温度范围应满足为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.6 安全运行保障设备选型应符合下列规定:

- a) 具有防电涌保护功能;
- b) 配备不间断电源与稳压设备, 不间断电源在断电后的持续供电应不小于 4 h。

6.3.7 通讯线缆应符合下列规定:

- a) 传感器与微震监测基站采用通信线缆时, 应采用双层屏蔽的铜芯电缆;
- b) 用于微震数据传输的光纤通讯应采用光缆;
- c) 用于微震数据传输的无线通讯传输速率应不低于 150 Mbps。

6.3.8 系统控制与数据分析软件应包含下列功能:

- a) 传感器、采集仪等设备工作状态实时查看;
- b) 微震信号识别和到时拾取;
- c) 微震源初次自动定位及人工二次定位;
- d) 微震辐射能、视体积、矩震级等震源参数自动计算;
- e) 微震事件随时间和空间演化;
- f) 微震事件三维显示;
- g) 工程及数据三维显示。

6.4 岩爆微震监测系统布置方案设计

6.4.1 微震传感器布置应符合下列要求:

- a) 微震传感器监测范围应覆盖岩爆微震监测重点区域; 岩爆高风险区域, 传感器应加密布置;
- b) 微震传感器应布置在岩体稳定性和完整性良好的区域; 在同一断面内应错开式布置, 应跟随开挖进度而动态调整;
- c) 传感器布置位置应便于监测实施的操作和设备连接;
- d) 微震传感器应跟随开挖动态移动, 且传感器宜远离可能产生强电场、强磁场的电气设备;
- e) 微震传感器的布置应减少对现场施工的影响。

6.4.2 敞开式 TBM 水工隧洞岩爆微震监测, 微震传感器布置应符合下列规定:

- a) 沿隧洞纵轴线方向在掌子面后方布置 2 个~3 个监测断面, 每个监测断面宜布置 3 个~4 个微震传感器, 宜分散布置在隧洞顶拱 140° 范围内, 且沿隧洞轴线方向的间距不宜小于 1 m。
- b) 距离掌子面最近的监测断面宜布置在护盾后方 5 m 范围位置;
- c) 相邻监测断面间距宜为 15 m~30 m, 具体数值宜根据 TBM 结构确定;
- d) TBM 掘进 15 m~30 m 后, 及时回收后排监测断面传感器, 安装到护盾后方 5 m 范围位置;
- e) 远离掌子面的时滞型岩爆无法被掌子面后方传感器监测时, 宜在时滞型岩爆风险区动态增布传感器。

6.4.3 微震监测基站包括微震采集仪及采集仪前端连接的防电磁干扰设备, 微震监测基站布置应符合下列规定:

- a) 微震监测基站宜布置于 TBM 操作室附近;
- b) 布置区域应远离高压设备、高压线等强电磁干扰区域, 并宜远离密集施工区;
- c) 微震监测基站的电源应配备具有稳压功能的专用电源, 输出电压的最大变化量应不大于 $\pm 10\%$ 。

6.4.4 岩爆微震监控中心宜布置在施工工区办公室。

6.4.5 岩爆微震监测通讯方案应符合下列规定：

- a) 传感器与微震监测基站之间宜采用电缆通讯或无线通讯；
- b) 微震监测基站与监控中心的通讯方案宜根据 TBM 通讯方案确定，宜采用光纤、无线或网络通讯，优先采用 TBM 本身的光纤通讯系统；
- c) 电缆通讯线路宜远离密集施工区域；
- d) 无线通讯宜布置于通讯信号良好区域。

6.4.6 岩爆微震监测坐标系统宜采用独立系统，并宜与隧洞项目坐标系统和高程系统联测。

7 岩爆微震监测实施

7.1 一般规定

7.1.1 岩爆微震监测应连续实时开展。

7.1.2 微震监测设备（微震传感器、微震采集仪）应定期进行检验和校准。

7.2 微震监测设备安装与维护

7.2.1 微震传感器安装应符合下列要求：

- a) 微震传感器宜采用钻孔可回收式安装，安装深度应超过围岩松动圈，与岩体紧密耦合，钻孔宜采用 75 mm，宜采用大螺距三向刚性耦合装置；
- b) 微震传感器无法采用钻孔式安装时，宜采用导波杆式安装，导波杆宜采用注浆方式安装在钻孔内，尾部出露孔口长度宜大于 10 cm；
- c) 微震传感器宜安装在岩体相对完整的区域。

7.2.2 微震监测设备安装应符合下列要求：

- a) 微震监测基站应接地；
- b) 微震监测基站应做好防水；
- c) 通信电缆应远离强电线路；
- d) 微震监测设备安装区域应设立标识并采取措施保护。

7.2.3 微震传感器安装后，宜根据隧洞坐标系统和高程系统计算监测坐标系统和高程系统，测量精度不应低于 0.1 m。

7.2.4 岩爆微震监测应制定安全运行保障措施，应符合下列要求：

- a) 微震监测设备应定期维护；
- b) 微震传感器与通讯电缆应定期更换。

7.2.5 每日巡视检查监测系统的频次应不低于 2 次，间隔时间应不少于 4 h，发现故障时应及时维修，如果是传感器损坏、老旧或线路老化等因素，应及时予以更换。

7.3 微震监测数据处理与分析

7.3.1 微震监测数据处理应包括下列内容：

- a) 微震波形识别；
- b) 波形到时拾取；
- c) 微震源定位；
- d) 微震源参数计算。

7.3.2 微震波形识别与波形到时拾取宜采用智能分析方法，并应符合附录 B 的规定。

7.3.3 微震源定位结果宜采用三维形式进行全方位显示。

- 7.3.4 微震源参数计算宜包括微震辐射能、体变势、地震矩、视体积、视应力等。
- 7.3.5 微震监测数据分析内容宜包括不同区域微震事件的空间集中程度和微震参数随时间演化规律。

8 岩爆预警

8.1 一般规定

- 8.1.1 岩爆预警应区分岩爆类型，岩爆类型包括即时型岩爆和时滞型岩爆。
- 8.1.2 岩爆预警信息宜包含微震监测信息和 TBM 掘进信息。

8.2 岩爆预警方法

- 8.2.1 岩爆预警可采用单指标或多指标等定量预警方法，宜采用基于微震信息的 TBM 隧洞智能定量预警方法，可采用附录 C 的方法。
- 8.2.2 即时型岩爆预警区域及范围应根据微震活动和岩爆的空间分布特征确定，预警范围应包含护盾到掌子面区域和掌子面前方 2 倍洞径区域。
- 8.2.3 即时型岩爆的预警区域应随掌子面向前移动。
- 8.2.4 时滞型岩爆预警区域及范围应根据微震活动在掌子面后方异常聚集的位置与区域大小确定。
- 8.2.5 岩爆预警模型宜基于智能算法和实际工程条件建立，可自动更新预警信息、计算岩爆风险。
- 8.2.6 岩爆预警方法宜能识别微震活动在掌子面后方已开挖区域的异常聚集状态，自动圈定时滞型岩爆预警区域范围，更新岩爆预警信息并计算时滞型岩爆风险。
- 8.2.7 岩爆预警结果应随 TBM 掘进参数信息和微震监测信息的变化而动态更新。

8.3 预警结果发布

- 8.3.1 岩爆预警结果发布形式应包括岩爆预警报告和岩爆预警短报。
- 8.3.2 岩爆预警结果的发布周期应根据现场施工情况确定，轻微、中等岩爆宜每掘进 10 m~15 m 发布一次岩爆预警报告，强、极强岩爆应及时预警，岩爆预警报告应主要包括以下内容：
 - a) 岩爆预警区域与区域内微震时空分布特征；
 - b) 岩爆预警等级；
 - c) 报告编写与校核人员；
 - d) 上一次岩爆预警区域、时间与等级；
 - e) 岩爆调控措施建议；
 - f) 上一次岩爆预警结果与实际发生的对比分析，记录每一次岩爆发生的时间、声响、位置和爆坑的几何信息。
- 8.3.3 当未开挖至下一个预警区域岩爆风险发生变化时，宜发布岩爆预警短报，岩爆预警短报应主要包括以下内容：
 - a) 岩爆预警区域与区域内微震时空分布特征；
 - b) 岩爆预警等级；
 - c) 报告编写与校核人员；
 - d) 与上一次预警结果进行对比；
 - e) 岩爆调控措施建议。
- 8.3.4 微震监测系统应具有自动发布预警结果的提醒功能，当监测区域岩爆风险变化时，通过短信等方式及时提醒相关工作人员。
- 8.3.5 岩爆预警结果应通过建立多方（业主、监理、设计、施工、监测）通讯交流群，将岩爆预警结

果及时发布；综合研判单位结合勘察、超前地质预报、已揭露的地质条件、TBM 掘进参数、渣料等信息，经综合研判，及时发布于微震监测群，并进行动态调整支护参数、防控措施与岩爆调控决策。

8.3.6 岩爆预警结果应与预警区域实际发生的岩爆等级进行对比，通过照片、视频等形式进行资料保存，以验证岩爆预警的准确性，岩爆等级确定应按 GB 50487 的规定执行。

8.3.7 岩爆预警整体准确率应高于 75%，无岩爆、轻微岩爆、中等岩爆预警准确率应高于 70%，强、极强岩爆预警准确率应高于 80%，判别标准应遵照附录 D 的规定。

附录 A
(规范性)
微震传感器技术指标

传感器技术指标宜符合表A. 1和A. 2的规定。

表A. 1 速度型传感器技术指标

技术指标	指标范围
频率范围	下限 ≤ 10 Hz，上限 ≥ 2000 Hz
灵敏度	$\geq 80\text{V}/(\text{m/s})$
谐波失真	$\leq 0.5\%$
防护等级	$\geq \text{IP67}$

表A. 2 加速度型传感器技术指标

技术指标	指标范围
频率范围	下限 ≤ 0.5 Hz，上限 ≥ 5000 Hz
灵敏度	$\geq 1\text{ V/g}$
分辨率	$\leq 0.0005\text{ g}$
防护等级	$\geq \text{IP67}$

附 录 B
(资料性)
微震监测数据的智能分析法

- B.1 微震监测数据的智能分析法宜包括波形智能识别法和到时智能拾取法。
- B.2 微震波形智能识别法宜符合下列规定：
- a) 岩石破裂波形识别模型宜采用深度神经网络构建，具体宜采用深度卷积神经网络、深度循环神经网络或 transformer 网络来构建岩石破裂波形识别模型，应注意深度神经网络的超参数设置，其超参数组合应通过贝叶斯优化等算法进行寻优；
 - b) 波形识别模型的输入向量宜为微震波形，输出向量宜为波形类型，包括岩石破裂波形和噪声波形；
 - c) 岩爆微震监测初期或波形样本不充分情况下，可采用相同岩性条件的敞开式 TBM 隧洞工程中使用过的波形识别模型，并宜随着新建工程微震监测数据的增加及时更新波形识别模型，若难以获得相同岩性条件的敞开式 TBM 隧洞工程案例，可采用数据增强技术来补充样本数量。
- B.3 岩石破裂波形到时智能拾取法宜符合下列规定：
- a) 宜以深度神经网络来构建岩石破裂波形到时拾取模型，宜采用 U-net 神经网络来构建岩石破裂波形到时拾取模型，应注意深度神经网络的超参数设置，其超参数组合应通过贝叶斯优化等算法进行寻优；
 - b) 到时拾取模型的输入向量宜为岩石破裂波形，并分别以概率最大的采样点作为 P 波和 S 波到时；
 - c) 拾取的 P 波到时和 S 波到时应满足微震源定位的基本要求，P 波到时不宜少于 4 个，S 波到时不宜少于 1 个；
 - d) 岩爆监测初期或波形样本不充分情况下，可采用相同岩性条件的敞开式 TBM 隧洞工程中使用过的到时拾取模型，并宜随着新建工程微震监测数据的增加及时更新到时拾取模型，若难以获得相同岩性条件的敞开式 TBM 隧洞工程案例，可采用数据增强技术来补充样本数量。
- B.4 微震监测数据智能分析结果应进行人工复核。

附录 C
(资料性)

基于微震监测的 TBM 隧洞岩爆智能预警法

- C.1 TBM 隧洞岩爆智能预警方法应区分岩爆类型。
- C.2 TBM 隧洞岩爆智能预警应对岩爆发生区域、岩爆等级及发生概率进行预警。
- C.3 TBM 隧洞即时型岩爆预警空间单元大小应按式 (C.1) 计算：

$$\begin{cases} x \in [-3.5D, 1.5D] \\ y \in [-5D, 5D] \\ z \in [-5D, 5D] \end{cases} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

D——TBM 隧洞的洞径，单位为米（m）。

注：以隧洞中心作为坐标系原点；*x* 方向，以隧洞掘进方向为正方向；*y* 方向，以面向隧洞掌子面的左侧为正方向；*z* 方向，以隧洞正上方为正方向。

- C.4 TBM 隧洞即时型岩爆预警时，应保持预警空间单元大小不变，预警区域随掌子面向前移动。
- C.5 TBM 隧洞时滞型岩爆预警空间单元位置应根据微震活动聚集成核的位置确定，预警空间单元沿隧洞轴向方向的长度不应小于 10 m。
- C.6 TBM 隧洞岩爆智能预警参数宜包含累积微震事件数、累积微震释放能、累积微震视体积、即时微震事件数、即时微震释放能、即时微震视体积等微震活动参数，及推力、贯入度、FPI 中位数、FPI 标准差等 TBM 掘进参数。
- C.7 TBM 掘进参数的 FPI 值，应按式 (C.2) 计算：

$$FPI = \frac{F}{100G} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

F——TBM 掘进的推力，单位为千牛（kN）；

G——TBM 掘进的贯入度，单位为 mm/r。

- C.8 岩爆预警的微震参数应按微震释放能对数 $LgE > n$ 对用于预警的有效微震信息进行筛选。其中，*n* 值为有效微震信息筛选阈值，可依据微震能量级配曲线确定。
- C.9 岩爆预警的 TBM 参数应按推力 $F \geq f$ KN、贯入度 $G \leq g$ mm/r 确定，对用于预警的有效 TBM 信息进行筛选，应设置 TBM 掘进循环中的空推段、上升段、稳定段与下降段的划分规则，稳定段的识别可通过时间划分法等算法实现。*f* 与 *g* 值依据岩爆段落掘进过程中稳定段的最小推力和最大贯入度确定。
- C.10 TBM 隧洞岩爆预警案例库，宜包含地质、TBM 掘进参数、微震参数、支护参数、岩爆发生等级、岩爆类型等信息。
- C.11 建立 TBM 隧洞岩爆预警案例库时，宜通过聚类分析方法识别与选取不同等级的典型岩爆案例，案例库样本进行模型训练时，应确保不同等级的岩爆典型案例的样本数量均衡，可利用欠/过采样等技术实现。
- C.12 TBM 隧洞即时型和时滞型岩爆智能预警模型可利用智能算法建立，从岩爆预警案例库中选择 70% 的案例组成训练集、30% 的案例组成测试集，最终建立针对 TBM 隧洞即时型和时滞型岩爆的智能预警模

型，智能算法可采用深度卷积神经网络、长短时记忆循环神经网络等方法。

C.13 岩爆监测与预警初期或岩爆案例不充分的情况下，可采用相近地质条件下的其他 TBM 隧洞工程的案例训练模型。

C.14 TBM 隧洞即时型岩爆预警时，利用即时型岩爆待预警区域的微震预警参数和预警时刻掌子面后方 5 m 范围内的 TBM 掘进预警参数，利用 TBM 隧洞即时型岩爆智能预警模型计算预警区域内的岩爆等级和对应概率。

C.15 TBM 隧洞时滞型岩爆预警时，利用时滞型岩爆待预警区域的微震预警参数和 TBM 掘进参数，利用 TBM 隧洞时滞型岩爆智能预警模型计算预警区域内的岩爆等级和对应概率。

C.16 TBM 隧洞岩爆预警结果宜为最大发生概率对应的岩爆等级及发生概率。当多个岩爆等级的发生概率相差不到 5%，宜选择最高岩爆等级作为最终岩爆预警的结果。

C.17 随着 TBM 隧洞岩爆微震监测与预警的实施，应及时更新岩爆预警案例库，重新训练预警模型。

C.18 当监测数据满足以下条件时，应更新预警区域的预警参数值，重新计算岩爆风险：

- a) 有微震释放能对数 $LgE \geq 3$ 的微震事件产生；
- b) 30 min 内有超过 20 个微震事件产生；
- c) FPI 标准差 > 35 。

附录 D
(规范性)
预警准确率判定标准

D.1 岩爆预警准确率以岩爆预警报告次数为单位进行统计，准确率计算方法见式 (D.1)：

$$p = \frac{m}{n} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

- p ——岩爆预警准确率；
- m ——岩爆预警准确报告数量；
- n ——岩爆预警报告总数量。

D.2 当同一预警区域内施工、地质、支护等条件显著变化时，进行的动态预警算作一次报告，预警结果以最新发布的报告为准。

D.3 岩爆预警准确的判定：

- a) 预警无岩爆，实际无岩爆发生；
- b) 预警轻微岩爆，实际发生轻微岩爆；
- c) 预警中等岩爆，实际发生中等岩爆；
- d) 预警强烈岩爆，实际发生强烈岩爆；
- e) 预警极强岩爆，实际发生极强岩爆；
- f) 预警有岩爆，采取岩爆调控措施后等级降低或无岩爆的（即岩爆调控措施起作用使得岩爆等级降低），岩爆预警为准确。岩爆调控措施具体指采取应力释放、加强支护、降低掘进速度（掘进速度降低 20%及以上）中的一种或几种措施。

D.4 岩爆预警不准确的判定：

- a) 预警无岩爆，实际发生极强岩爆、强烈岩爆、中等岩爆或轻微岩爆；
- b) 预警轻微岩爆，实际发生极强岩爆、强烈岩爆、中等岩爆，或无调控措施情况下实际无岩爆发生；
- c) 预警中等岩爆，实际发生极强岩爆、强烈岩爆，或无调控措施情况下实际发生轻微岩爆或无岩爆；
- d) 预警强烈岩爆，实际发生极强岩爆，或无调控措施情况下实际发生中等岩爆、轻微岩爆或无岩爆；
- e) 预警极强岩爆，无调控措施情况下实际发生强烈岩爆、中等岩爆、轻微岩爆或无岩爆。

附 录 E
(规范性)
微震传感器安装示意图

E.1 微震传感器采用钻孔可回收式安装, 安装示意图如图 E.1 所示:

- a) 通常采用直径 75 mm 钻孔安装传感器, 具体孔径应根据传感器尺寸确定; 钻孔长度应超过围岩损伤区范围, 以确保足够的事件采集和数据质量;
- b) 清理干净孔内因钻孔而产生的砾石、水和其他残留物;
- c) 通常将传感器安装在孔底, 确保传感器与孔壁紧密固定, 具体安装和回收方式应根据微震传感器生产厂家确定。

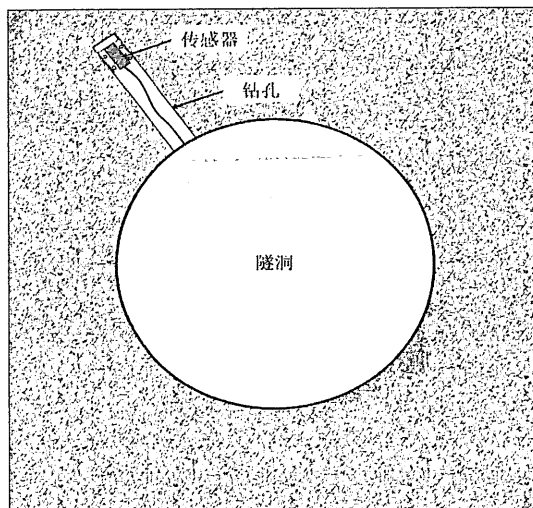


图 E.1 钻孔可回收式安装

E.2 微震传感器采用导波杆式安装, 将传感器与适宜的导波杆尾部刚性耦合, 通常采用螺栓固定的方式; 具体耦合方式应根据传感器生产厂家进行确定, 安装示意图如图 E.2 所示。

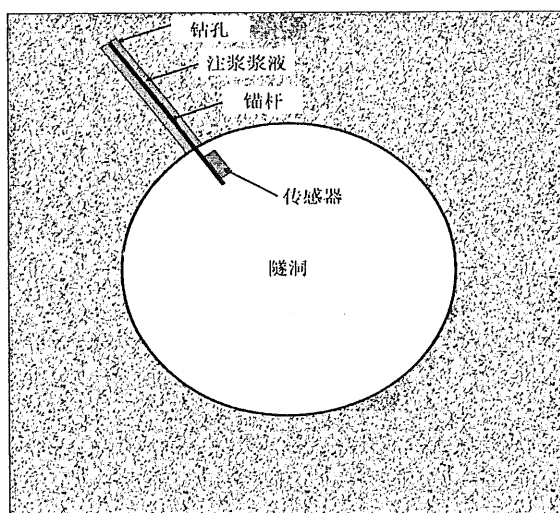


图 E.2 导波杆式安装

参 考 文 献

- [1] NB/T 10391-2020 水工隧洞设计规范
-