

DB51

四川省地方标准

DB51/T 3231—2024

公路隧道岩爆防控技术规程

2024 - 12 - 18 发布

2025 - 01 - 18 实施

四川省市场监督管理局 发布

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 勘察与预测 3

6 岩爆隧道设计 6

7 岩爆段施工 8

8 岩爆段监测与预警 11

附录 A（资料性） 微震监测设备的安装与实施方案 14

附录 B（资料性） 微震监测数据的处理和整理方法 16

附录 C（资料性） 微震监测报告的编制 19

附录 D（资料性） 基于微震指标的岩爆预警方法 21

附录 E（资料性） 基于微震监测信息岩爆预警的 EMS 方法 23

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由四川省交通运输厅提出、归口、解释并组织实施。

本文件起草单位：四川省公路规划勘察设计研究院有限公司、成都理工大学、四川川交路桥有限责任公司、四川高速公路建设开发集团有限公司

本文件主要起草人：林国进、唐协、马春驰、邵江、张睿、杨枫、张兆杰、何佳、向龙、朱长安、田尚志、黄兵、王联、向波、白皓、李涛、田志宇、韦远飞、江俊杰、郑建国、李泳仲、蔚艳庆、聂亮、安俊吉、牟智恒、赖孝辉、张航、喻业洪

公路隧道岩爆防控技术规程

1 范围

本文件确立了公路隧道岩爆防控的程序，规定了岩爆段勘察与预测、岩爆隧道设计、岩爆段施工、岩爆段监测与预警等步骤的指示。

本文件适用于四川省境内钻爆法和TBM法施工的山岭公路隧道岩爆防控，其它类型的隧道可参考执行。

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 6722爆破安全规程
- GB 50086 岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范
- GB/T 50218 工程岩体分级标准
- GB/T 50266 工程岩体试验方法标准
- DL/T 5807-2020 水电工程岩体稳定性微震监测技术规范
- JTG C20 公路工程地质勘察规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG F90 公路工程施工安全技术规程
- JTG 3370.1 公路隧道设计规范 第一册 土建工程
- JTG/T 3660 公路隧道施工技术规范
- JTT 1375.1公路水运工程施工安全风险评估指南 第1部分：总体要求
- JTT 1495公路水运危险性较大工程安全专项施工方案审查规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩爆 rockburst

在地层中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突然释放，导致岩体爆裂松脱、剥离、弹射乃至抛掷等动力现象。

3.2

岩爆隧道 tunnel with rockburst

勘察阶段预测可能发生岩爆和施工时发生过岩爆的隧道。

3.3

岩爆等级 rockburst intensity

描述岩爆地层中岩爆强烈程度与破坏规模的指标。

3.4

岩爆防控 rockburst prevention and control

避免岩爆发生或降低岩爆发生等级的预防和控制措施，以及对人员和设备的保护措施。

3.5

弹性变形能指数 elastic deformation energy index

指岩石中储存的弹性变形能与由于永久变形和碎裂造成的损耗应变能之间的比值。

3.6

岩石应力强度比 ratio of shear stress to intact rock strength

岩石洞壁最大切向应力与单轴饱和抗压强度之比。

3.7

岩石强度应力比 ratio of intact rock strength to in-situ stress

岩石单轴饱和抗压强度与初始应力场最大主应力之比。

3.8

围岩高地应力破裂时间效应 time-dependent behavior of subcritical crack propagation under high in-situ stress

高地应力条件下，隧洞开挖后围岩破裂损伤呈现出随时间发展的特征。围岩破裂时间效应一般可持续数月乃至数年，表现为围岩破裂松弛深度和程度随时间不断增大，支护结构的受力随时间持续增长。

3.9

即时型岩爆 immediate rockburst

隧道开挖卸荷效应影响过程中发生的岩爆，一般发生在掌子面后3倍洞径内，滞后开挖时间不超过3天。

3.10

时滞型岩爆 time delayed rockburst

隧道开挖卸荷后应力调整平衡后而发生的岩爆，一般发生在掌子面后3倍洞径外，或滞后开挖时间大于3天。

3.11

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。

3.12

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。

4 基本规定

4.1 公路隧道岩爆防控应贯彻安全第一、预防为主和综合治理的方针，以安全经济为目标，根据岩爆等级采取分级防控技术措施。

4.2 公路隧道岩爆等级由低至高分为轻微、中等、强烈和剧烈，施工前勘察应对隧道岩爆有无、岩爆段落与岩爆等级等进行预测，并提出岩爆防控的建议措施；施工期勘察应根据岩爆特征、超前地质预报和岩爆监测等综合校核勘察阶段岩爆预测情况，并动态调整岩爆等级和岩爆防控措施。

4.3 设计阶段应明确岩爆段施工方案、支护结构、岩爆监测方案和施工措施等综合防控措施；应根据施工前勘察阶段预测的岩爆段落与岩爆等级综合制订施工方案，对于强烈岩爆、剧烈岩爆段应开展专题研究岩爆防控措施。

- 4.4 隧道岩爆段应采用全工序机械钻爆法施工或 TBM 法施工，应严格减少和控制掌子面作业人数，对作业人员必须采取个体防护措施。
- 4.5 岩爆隧道岩爆段施工应开展岩爆监测和岩爆预警工作，并把监测和预警报告及时反馈给参建各方，及时开展动态设计与施工，调整岩爆防控措施；中等岩爆段宜开展微震监测和岩爆预警，强烈岩爆、剧烈岩爆段应开展微震监测和岩爆预警。
- 4.6 施工期发生了强烈岩爆、剧烈岩爆段的衬砌结构宜开展施工期和运营期监测，运营期监测期宜大于 5 年。
- 4.7 公路隧道岩爆防控应贯彻国家有关技术经济政策，积极慎重地采用新技术、新工艺、新工法、新材料和新设备。

5 勘察与预测

5.1 一般规定

- 5.1.1 当硬质岩隧道埋深大于 500m，或邻近类似工程发生过岩爆，或地应力为高地应力或极高地应力时，应按岩爆隧道进行岩爆勘察，勘察阶段分为施工前勘察和施工期勘察，施工前勘察应符合 JTG C20 的规定。
- 5.1.2 没有岩体初始应力实测成果时，宜根据地形和地质勘察资料，按照 GB/T 50218 对初始应力场做出评估，初步判定地应力状态。
- 5.1.3 当岩爆等级为中等岩爆以上时，宜按照 JTG 3370.1 围岩分级对初始应力状态影响修正系数 K_3 取值，修正围岩级别。
- 5.1.4 岩爆勘察和预测分析应贯穿于隧道勘察设计和施工的各个阶段，勘察设计阶段主要根据勘察资料预测岩爆等级和分布范围；施工阶段需要结合施工地质和各种探测手段，细化岩爆发生的等级、范围。

5.2 勘察内容

- 5.2.1 施工前期勘察应包括下列内容：
- a) 隧址区域地质构造、全新世地质活动特征、地震活动历史、断裂活动性、高地应力活动历史等；
 - b) 隧址区地形地貌、地质构造、地层岩性、岩体结构，以及隧道的围岩分级；
 - c) 隧址区地应力量级、地应力场变化特征、隧道走向与最大主应力方向的相互关系；
 - d) 隧道区域的各硬质岩物理力学性质、储能特性、释能特性；
 - e) 隧址区水文地质条件、地下水的类型、分布特征、水量，岩体的含水性、透水性，划分含水层和相对隔水层；
 - f) 隧址区岩爆的发育级别、分布段落，并提出防护措施及施工地质建议。
- 5.2.2 施工期岩爆勘察结合已开挖段围岩情况和岩爆特征，可根据隧道内的地应力实测，对勘察设计阶段所评估的岩爆等级、段落进行校核、修正，并提出相应的防护措施建议。

5.3 勘察方法

- 5.3.1 隧道岩爆勘察应在充分收集、分析区域地质资料基础上，采用地质遥感解译、地质调绘、综合物探、地质钻探、取样试验、地应力测试等相结合的勘探方法。
- 5.3.2 隧道沿线应布置纵、横物探剖面，并利用钻孔进行物探测试。物探方法宜采用大地电磁法、地震法，当地面物探测试困难时，可采用航空物探。
- 5.3.3 隧道宜在不同地貌、构造、地层单元布置深孔，并利用钻孔开展孔内物探、水文试验及地应力

测试：受地形地貌、环境等因素限制，难以开展竖直钻探时，可布置水平定向钻孔。

5.3.4 地应力测试的地表孔深宜大于 1/2 隧道最大埋深，且大于 300m。

5.3.5 隧道围岩试验和测试，应符合下列要求：

- a) 宜在深孔中取样进行岩石试验，包括岩石单轴极限抗压强度、应变参数试验、应力-应变全过程试验及抗拉试验等；
- b) 宜在深孔中进行地应力测量，每孔测试点位不少于 3 段；
- c) 宜在深孔中进行水文地质观测及水文地质试验；
- d) 应观测和统计深孔中的高地应力特征，如孔内缩径，岩芯饼化等。

5.3.6 施工前勘察阶段隧道地应力测试宜采用孔内水压致裂法，在深孔中难于开展水压致裂法时，可取岩芯进行 Kaiser 效应测试或基于岩芯的非弹性应变恢复法（简称 ASR 法）；施工阶段的地应力测试视现场条件可采用孔内水压致裂法、应力解除法等，测试方法按照 GB/T 50266 执行。

5.3.7 隧道地应力场分析，可采用有限元法对隧址区地应力场进行三维数值模拟，并用施工前勘察阶段深孔测试地应力值修正、反演隧址区初始地应力场。

5.4 岩爆风险预测

5.4.1 当符合下列所有条件时，可初步判定为可能会发生岩爆。

- a) 岩石单轴饱和抗压强度不小于 60MPa；
- b) 岩体完整系数 K_v 大于 0.55；
- c) 地质构造不发育~较发育；
- d) 岩体较干燥无水，呈脆性；
- e) 隧道埋深大于临界深度，临界深度可按式计算：

$$H_{cr} = \frac{0.318R_c(1-\mu)}{(3-4\mu)\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R_c ——岩石的饱和抗压强度（kPa）；

μ ——岩石泊松比；

γ ——为岩石的容重（kPa）。

5.4.2 对于强度高、硬度大、较高脆性的岩石，岩爆等级可根据岩爆倾向性指数按表 1 初判确定，岩爆倾向性指数 w_{et} 可按式（2）计算：

$$w_{et} = \frac{w_{sp}}{w_{st}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

w_{et} ——岩爆倾向性指数；

w_{sp} ——试样加载到单轴抗压强度的 0.7 倍~0.8 倍应力水平后卸载到单轴抗压强度的 0.05 倍应力水平时恢复的弹性应变能（J/m³）；

w_{st} ——加卸载循环中试样产生塑性变形和微裂隙而消耗的能量（J/m³）。

表1 岩爆倾向性指数法判定岩爆等级

判别阈值	岩爆等级
$2.0 \leq w_{ef} < 3.5$	轻微岩爆
$3.5 \leq w_{ef} < 5.0$	中等岩爆
$w_{ef} \geq 5.0$	强烈岩爆及以上

5.4.3 经初步判定认为可能会发生岩爆的段落，可采用岩石应力强度比法或岩石强度应力比法进行复判预测岩爆等级。

5.4.4 采用岩石应力强度比法可根据表 2 判断岩爆分级。

表2 岩石应力强度比法岩爆分级表

岩爆等级	判据
轻微岩爆	$0.3 \leq \sigma_{\theta max} / R_c < 0.5$
中等岩爆	$0.5 \leq \sigma_{\theta max} / R_c < 0.7$
强烈岩爆	$0.7 \leq \sigma_{\theta max} / R_c < 0.9$
剧烈岩爆	$0.9 \leq \sigma_{\theta max} / R_c$
注： $\sigma_{\theta max}$ 为洞壁最大切向应力； R_c 为岩石单轴饱和抗压强度。	

5.4.5 洞壁最大切向应力可按式（3）~式（5）计算。

$$\sigma_{\theta max} = \begin{cases} 3\sigma_n - S_v & (\sigma_n \geq S_v) \\ 3S_v - \sigma_n & (\sigma_n < S_v) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$S_v = (\gamma \times z) / 1000 \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_n = 1/2(\sigma_1 + \sigma_3) + 1/2(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \dots\dots\dots (5)$$

式中：
 $\sigma_{\theta max}$ ——洞壁最大切向应力；
 σ_n ——水平正向应力；
 S_v ——垂向应力；
 γ ——岩石容重；
 z ——隧道最大埋深；
 σ_1 ——最大水平主应力；
 σ_3 ——最小水平主应力；
 θ ——隧道水平轴向法线方向与最大水平主应力方向的夹角。

5.4.6 采用岩石强度应力比法可根据表 3 判断岩爆分级。

表3 岩石强度应力比法岩爆分级表

岩爆等级	岩石强度应力比 (R_c/σ_{max})	分级描述
轻微	4~7	围岩表层有岩爆、剥离现象，内部有噼啪、撕裂声，人耳偶然可听到，无弹射现象，主要表现为洞顶的劈裂~松脱破坏和侧壁的劈裂~松脱、隆起等，岩爆零星间隔发生，影响深度小于 0.5m；对施工影响小。
中等	2~4	围岩爆裂、剥离现象较严重，有少量弹射，破坏范围明显；有似雷管爆破的清脆爆裂声，人耳朵常可听到围岩内的岩石撕裂声，有一定持续时间，影响深度 0.5~1m，对施工有一定影响。
强烈	1~2	围岩大片爆裂脱落，出现强烈弹射，发生岩块的抛射及岩粉喷射现象，有似爆破的爆裂声，声响强烈，持续时间长，并向围岩深部发展，破坏范围和块度大，影响深度 1m~3m，对施工影响大。
剧烈	<1	围岩大片严重爆裂，大块岩片出现剧烈弹射，振动强烈，有似炮弹、闷雷声，声响剧烈，迅速向围岩深部发展，破坏范围和块度大，影响深度大于 3m，严重影响施工工程。
注1：注1：爆判别适用于完整~较完整的中硬、坚硬岩体，且无地下水活动的地段。 注2： R_c 为岩石单轴饱和抗压强度（MPa）； σ_{max} 为垂直隧道轴线方向的最大初始地应力（MPa）。		

5.4.7 隧道岩爆预测应结合地应力特征、岩石强度、岩体完整性、储能特征、岩石的脆性程度、地下水发育条件等多因素综合判断。当判定岩爆等级不一致时可按最高级进行确定。

6 岩爆隧道设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 应根据施工前勘察预测的岩爆规模、施工条件、施工技术及施工设备等因素，采用 TBM 法施工时，且强烈岩爆、剧烈岩爆段落较长时，宜采用护盾式 TBM，并进行防岩爆措施的专题设计。
- 6.1.2 应对岩爆段进行监测设计，监测包括支护和围岩的变形与受力监测、岩爆监测、爆破震动监测等。
- 6.1.3 本文件未明确的隧道荷载分类、荷载组合、围岩压力计算、结构计算、衬砌结构设计、系统锚杆布置方式、超前地质预报方案等应符合现行 GB 50086 的相关规定。

6.2 隧道位置及断面设计

- 6.2.1 隧道位置选择宜避开高地应力集中区，选择在地应力值相对较低区域；当不能避开时，隧道轴线宜与最大水平地应力方向平行或小角度相交，与主要构造方向垂直或大角度相交。
- 6.2.2 岩爆隧道设计应考虑洞群开挖扰动效应，岩爆段平行隧道之间岩体厚度不宜小于开挖最大洞径的 3 倍。
- 6.2.3 岩爆段的隧道横断面形状设计应遵循降低围岩应力集中程度、改善围岩受力条件的原则，强烈岩爆、剧烈岩爆段宜采用曲墙式或近圆形断面。

6.3 衬砌结构设计

6.3.1 隧道岩爆段支护结构应充分考虑围岩高地应力破裂时间效应对衬砌结构长期安全性的不利影响，应采取措施保障结构长期稳定性和耐久性。

6.3.2 岩爆段采用钻爆法施工时，支护结构应采用复合式衬砌结构，支护参数应结合岩爆等级、断面大小等根据工程类比、计算分析综合确定，并应符合以下规定：

- a) 轻微岩爆和中等岩爆段的初期支护宜采用柔性防护网喷射混凝土或钢筋网喷射混凝土或纤维喷射混凝土、系统锚杆、钢架等联合支护；
- b) 强烈岩爆和剧烈岩爆段初期支护宜采用纤维喷射混凝土、系统锚杆、超前支护、加强钢架支护等综合治理措施，二次衬砌宜设置仰拱，并应采用模筑钢筋混凝土；
- c) 喷射混凝土宜采用早强砼，设计强度等级不应低于 C25，钢纤维喷射混凝土的设计强度等级宜采用 C30，8h 龄期强度分别不宜低于 10MPa；
- d) 系统锚杆宜采用涨壳式中空锚杆、水胀式锚杆、树脂预应力锚杆。

6.3.3 采用钻爆法施工的两车道隧道，设计阶段岩爆段衬砌支护参数可参照表 4 取值。

表4 钻爆法两车道隧道岩爆段支护参数表

单位：cm

岩爆等级	初期支护					预留变 形量	拱墙	仰拱
	喷砼厚 度	锚杆		钢筋网	钢架			
		长度	纵×环					
轻微岩爆	20	250	120×150	φ8@25	I14@120	5	35	/
中等岩爆	22	300	100×150	φ8@15	I16@100	8	35	/
强烈岩爆	24	400	80×120	φ8@15	I18@80	10	35 (18@25)	
注：剧烈岩爆宜进行专项设计。								

6.3.4 采用钻爆法施工的三车道隧道岩爆段衬砌设计参数可参照表 5 取值。

表5 钻爆法三车道隧道岩爆段支护参数表

单位：cm

岩爆等级	初期支护					预留 变形 量	拱墙	仰拱
	喷砼厚 度	锚杆		钢筋网	钢架			
		长度	纵×环					
轻微岩爆	22	250	100×150	φ8@25	I16@100	8	45	/
中等岩爆	24	300	80×150	φ8@15	I18@80	10	45	/
强烈岩爆	26	400	70×120	φ8@15	I20b@70	15	45 (20@20)	
注：剧烈岩爆宜进行专项设计。								

6.3.5 采用敞开式 TBM 法施工的隧道，宜采用复合式衬砌结构，支护参数应结合岩爆等级、断面大小等根据工程类比、计算分析综合确定，并符合以下规定：

- a) 轻微岩爆和中等岩爆段初期支护宜采用纤维喷射混凝土、系统锚杆、加强型钢筋排、型钢钢架等联合支护；
- b) 强烈岩爆和剧烈岩爆段宜采用钢管片、系统锚杆、钢筋混凝土二次衬砌等联合支护；
- c) 喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C25，钢纤维喷射混凝土的设计强度等级宜采用 C30；
- d) 系统锚杆宜采用涨壳式中空锚杆、水胀式锚杆、低预应力树脂锚杆。

6.3.6 采用敞开式 TBM（刀盘外径 8~10m）法施工的隧道，岩爆段衬砌设计参数可按表 6 取值。

表6 敞开式 TBM 法隧道岩爆段支护参数表（刀盘外径 8~10m）

单位：cm

岩爆等级	初期支护						预留 变形 量	拱墙	仰拱
	钢筋排	喷砼	锚杆		钢筋网	钢架			
			长度	纵×环					
轻微岩爆	20@5	15	/	/	/	H125@180	5	35	
中等岩爆	22@5	15	300	90×150	φ8@15	H125@90	5	35	
强烈岩爆	/	/	300	90×120	/	钢管片 90（宽）×20（高）	5	50	
注：剧烈岩爆宜进行专项设计。									

6.3.7 采用护盾式 TBM 法施工的隧道，强烈岩爆和剧烈岩爆段宜采用双层衬砌，一次支护采用预制钢筋混凝土管片或钢管片，二次衬砌采用现浇钢筋混凝土。

6.3.8 中等及以上等级岩爆段的隧道断面突变处、隧道与横通道相交段的支护结构应加强，二次衬砌结构宜采用钢筋混凝土。

7 岩爆段施工

7.1 一般规定

7.1.1 隧道岩爆段采用钻爆法施工时，本规程未明确的施工要求、施工工艺和质量控制等应符合 JTG/T3660 和 JTG F80 / 1 的规定。

7.1.2 隧道岩爆段施工前应进行危险源辨析，并依据 JT T1375.1、进行施工安全风险评估，现场应实施动态风险控制和跟踪处理。

7.1.3 隧道岩爆段施工前应根据勘察设计要求、施工方法、地质与地应力情况、岩爆特征、岩爆防控措施等，依据 JTG F90 和 JTT 1495 编制岩爆段专项施工方案并组织审查。

7.1.4 隧道岩爆段采用钻爆法施工时，应配置全电脑智能型多臂凿岩台车开挖、拱架安装台车立架和混凝土湿喷台车喷砼等，应对驾驶室采取防岩爆冲击措施。

7.1.5 宜结合安全监测，采用视频监控或三维激光扫描等自动化设备，记录岩爆位置、特征和等级、避让岩爆时间、岩爆对机械设备损害和回填爆坑等情况，可编制相应的补充定额。

7.1.6 岩爆段施工前，应向作业人员开展岩爆专题培训、安全技术交底，告知其危险因素、防范和应急措施，定期组织安全应急演练。

7.1.7 岩爆风险防控措施应根据岩爆等级确定，宜采取改善围岩性质、优化开挖方式、释放应力和加

强支护等措施。

7.2 钻爆法施工

7.2.1 钻爆法施工的隧道岩爆段应基于设计要求采取综合防控措施，可参照表 7 采用。防岩爆支护措施可按本规程第 6 章的规定采用。

表7 钻爆法施工的隧道岩爆段防控综合措施

防治措施		岩爆等级			
		轻微	中等	强烈	剧烈
改善围岩性质	多次高压喷水	采用	采用	采用	专项设计
	钻孔注水或化学溶剂	—	采用	采用	
优化开挖方式	光面爆破	采用	采用	采用	
	短进尺	—	采用	采用	
	分部开挖	—	宜采用	采用	
	修正掌子面形态	—	—	采用	
实施应力释放	岩壁切槽	—	—	采用	
	超前应力释放孔	—	宜采用	采用	
	应力解除爆破	—	—	采用	
	开挖导洞	—	—	宜采用	
加强支护	防岩爆支护	采用	采用	采用	
设备防护		采用	采用	采用	

7.2.2 钻爆法施工的隧道岩爆段开挖应符合下列要求：

- a) 应采用光面爆破技术，使隧道周边圆顺，减少应力集中；严格控制单段最大爆破药量，减少对围岩的扰动；
- b) 轻微岩爆可采用全断面开挖，中等及以上岩爆宜采用台阶法、导洞法等分部开挖法；
- c) 轻微岩爆和中等岩爆段每循环开挖进尺不宜大于 3m，强烈岩爆和剧烈岩爆段每循环开挖进尺不宜大于 2 榀钢架间距；
- d) 相向开挖两掌子面距离达到 3 倍开挖跨度时，宜由岩爆等级相对较低的掌子面单独开挖至贯通；
- e) 并行隧道开挖掌子面纵向错开距离宜不小于最大洞径的 3 倍。

7.3 TBM 法施工

7.3.1 TBM 法施工的隧道岩爆段应基于设计要求采取综合防控措施，可参照表 8 采用。防岩爆支护措施可按本规程第 6 章的规定采用。

表 8 TBM 法开挖隧道段的岩爆防治措施

防治措施		岩爆等级			
		轻微	中等	强烈	剧烈
改善围岩性质	喷水	采用	采用	采用导洞开挖，TBM 扩挖通过； 或采用钻爆法施工，TBM 步进通过	专项设计
优化开挖方式	减小掘进速率	—	采用		
	优化掘进参数	—	采用		
实施应力释放	超前应力释放孔	—	采用		
	开挖导洞	—	—		
加强支护	防岩爆支护	采用	采用		

- 7.3.2 TBM 法施工的隧道岩爆段施工应符合下列要求：
- a) TBM 施工宜采用低速率开挖方式，及时地对开挖面进行有效支护，缩短围岩暴露时长，防止岩爆再次发展；
 - b) 高度大于 10m 的 TBM 施工隧道，可先采用钻爆法开挖上导洞，后进行 TBM 扩挖；
 - c) TBM 转矩应加大设计，当 TBM 出现卡钻或受困时，前方刀头在油压的驱动作用下变速反转，从而脱困；
 - d) 改进 TBM 设施，在尾盾安置多功能钻孔系统，为地质钻探和灌浆支护等服务。

7.4 通用作业要求

7.4.1 超前注水孔宜布置在隧道拱部及边墙开挖断面轮廓线外 10cm~15cm 范围内，并向孔内灌高压水或化学溶剂，软化围岩。

7.4.2 超前应力释放孔施工应符合下列规定：

- a) 应力释放孔可采用掌子面超前和开挖断面径向布置；
- b) 应力释放孔深度宜超过岩体应力和能量集中的部位，潜在岩爆由硬性结构面或刚性断裂引起时，应力释放孔深度宜超过结构面或断裂部位；
- c) 应力释放孔直径不宜小于 $\phi 70\text{mm}$ 。

7.4.3 应力解除爆破设计应符合下列规定：

- a) 应力解除爆破孔的装药段应位于掌子面前方的围岩二次应力集中区；
- b) 应力解除爆破孔的数量、位置和装药量的设计参数应根据现场应力解除爆破试验结果反馈修正；
- c) 可在超前应力释放孔中进行松动爆破。

7.4.4 导洞施工应符合下列规定：

- a) 应布置在上台阶，宜部分重合主洞开挖轮廓，揭露主洞顶拱；
- b) 导洞尺寸应根据导洞岩爆风险评估和主洞岩爆风险评估综合确定，并满足机械化开挖支护要求；
- c) 导洞开挖轮廓线与主洞开挖轮廓线重合部分的支护参数应采用主洞岩爆支护参数；导洞开挖轮廓线与主洞开挖轮廓线不重合部分的支护参数应根据导洞岩爆风险评估结果设计实施。

7.4.5 隧道岩爆段的支护施工应符合下列要求：

- a) 开挖后应及时喷混凝土封闭，厚度宜为 4cm~8cm；
- b) 初喷后应立即施作系统锚杆，并宜与网喷混凝土联合使用。

7.5 施工安全

7.5.1 岩爆段施工人员和机械设备防护措施应符合下列要求：

- a) 岩爆段凿岩台车、拱架台车、装载机、挖掘机、运输车辆等主要机械设备上应加装防护钢板、防护棚（罩）及防护钢丝网等安全防护措施；
- b) 强烈岩爆和剧烈岩爆段宜在岩面挂设钢筋网或柔性防护网，防止因岩石弹射砸伤施工人员，损伤施工机具；
- c) 作业人员应佩戴防弹背心等安全防护用品。

7.5.2 施工过程中应密切观察岩面剥落、监听岩体内部声响情况，出现岩爆迹象，应立即采取下列措施：

- a) 停机待避，必要时人、机撤至安全地段，待围岩稳定后进行防治；
- b) 检查确认安全后方可进行开挖工作面的观察记录，应记录岩爆的发生时间、位置、强度、类型、数量以及山鸣等，总结岩爆规律；
- c) 每循环内对暴露的岩面采取机械反复扰动找顶不小于 3 次，释放岩爆；
- d) 根据岩爆程度和特性，按设计文件和施工方案要求，采取释放围岩应力、加强防爆支护等方法，同时做好对应的防护措施。

8 岩爆段监测与预警

8.1 一般规定

8.1.1 隧道施工期间应开展安全监测与预警工作，监测内容包括支护和围岩的变形与受力监测、岩爆监测和爆破震动监测等，采用钻爆法施工时，除岩爆监测外，本文件未明确之处应符合 GB 6722 和 JTG/T 3660 的要求。

8.1.2 隧道施工中的岩爆预警宜根据微震监测、超前地质预报、地质综合分析、电磁辐射法或其他监测方法获取的信息进行综合判断与预警。

8.1.3 岩爆监测应在隧道施工过程中通过布设传感器和监测设备，对围岩的物理状态及其变化进行实时监测，及时获取围岩的应力、位移、微震等数据，分析和评估岩体的稳定性，预防和减少岩爆危害。

8.1.4 岩爆预警应基于岩爆监测所获取的数据，通过分析和模型计算，提前识别可能发生岩爆的风险，并向施工人员和相关管理人员发出警示的过程。

8.1.5 在隧道的勘察或施工期间，岩爆监测与预警方案应考虑实时数据、施工方法、施工条件、施工技术及施工设备动态调整监测预警方案。

8.1.6 岩爆段监测与预警工作应纳入施工工序管理，应符合下列要求：

- a) 汇总不同手段的监测成果，分析形成综合报告，并及时反馈给参建各方；
- b) 可委托具备相关资质和能力的第三方机构汇总不同手段的监测成果，分析形成综合报告并及时反馈给参建各方。

8.2 岩爆监测

8.2.1 岩爆隧道监测设计方案应依据工程特点、监测对象、监测目的和监测环境进行总体规划，同时应遵循动态设计原则，与实际条件相适应，突出重点，兼顾全面。

8.2.2 岩爆隧道监测设计方案应主要包括以下内容：

- a) 隧道监测区域确定；
- b) 不同监测方法制定相应的布置要求、数据采集与管理 and 报告编制要求；
- c) 岩爆隧道监测通讯方案设计；

- d) 建立施工与监测之间的协同、反馈机制，将施工计划与监测方案进行同步，及时调整施工方案以应对监测结果，确保监测工作紧密围绕施工进度进行；
 - e) 隧道监测安全运行保障措施。
- 8.2.3 岩爆隧道监测区域宜重点包括下列部位：
- a) 掌子面附近区域；
 - b) 重点工程结构与部位；
 - c) 洞室交叉部位以及洞室曲率变化较大部位；
 - d) 相向开挖临近贯通时掌子面间岩柱；
 - e) 已发生中等及以上岩爆等级的区域及其相邻平行洞段；
 - f) 岩性、地质构造和岩体结构发生显著变化区域。
- 8.2.4 岩爆隧道监测应采用多种监测方法，宜优先考虑微震监测、超前地质预报、地质综合分析和电磁辐射法。
- 8.2.5 岩爆隧道微震监测方案的设计应包括以下内容：
- a) 微震监测设备的安装与实施，具体宜包括微震监测设备的选型与采购计划、设备的检查与维护计划、施工程序与进度安排、安装与埋设方法及相应的保护措施，以及最终的安装调试与验收流程。具体执行可按本文件附录 A 的相关规定执行；
 - b) 微震监测数据的处理和整理，具体宜包括以下内容：微震信号的分类、降噪处理、到时提取、事件定位、震源参数计算，以及监测信息的记录与整理。具体执行可按本文件附录 B 的相关规定；
 - c) 微震监测报告的编制与发布，具体宜包含微震监测系统构建、微震事件分析评价和岩爆风险评估等内容。具体执行可按本文件附录 C 的相关规定。
- 8.2.6 岩爆隧道超前地质预报方案的设计应包括以下内容：
- a) 超前地质预报设备的安装与实施，具体应根据项目特点和地质条件，选择适合的超前地质预报方法，可选择钻探取样、地质雷达、地震波探测等技术手段。并明确所需的设备类型及数量，包括设备的选型、采购、安装及调试方案，确保其能够满足预报需求；
 - b) 超前地质预报数据的处理和整理，具体宜包括以下内容：分类整理收集到的数据、数据清洗与分析、结果可视化以及相应地质模型的建立；
 - c) 超前地质预报报告的编制与发布，具体宜包括以下内容：采用的超前地质预报技术和方法、收集的地质数据分析结果、岩爆发生可能性及其影响分析、施工过程中的注意事项及应对策略。
- 8.2.7 岩爆隧道地质综合分析方案的设计应包括以下内容：
- a) 综合运用地质勘探和监测设备，掌握隧道沿线的地质特征，宜包括岩石类型、结构特征和应力状态。同时，制定监测方案，实时收集与岩爆相关的数据，宜包括应力、变形和地下水位等信息；
 - b) 基于地质条件和监测信息开展岩爆机制分析，宜包括岩爆发生的原因、影响因素、发生机制及其与围岩性质、施工方法的关系，可运用三维地质模型和数值模拟综合分析岩爆机制；
 - c) 地质综合分析报告的编制与发布，具体宜包括以下内容：地质综合分析技术和方法、施工区域的地质背景和隧道围岩监测信息、岩爆地质力学机制分析、基于地质综合分析的岩爆风险评估、评估岩爆发生的可能性及其潜在影响、提出相应的控制措施。
- 8.2.8 岩爆隧道电磁辐射法方案的设计应包括以下内容：
- a) 电磁辐射法设备的安装与实施，具体宜包括电磁辐射源的选择、监测设备的配置、设备的检查与维护计划、施工程序与进度安排、安装与埋设方法及相应的保护措施，以及最终的安装调试与验收流程；

- b) 电磁辐射法数据的采集与处理，具体宜包括制定详细的数据采集方案，明确数据采集的频率和时段，并建立数据处理流程，以便及时分析和解读监测数据。建立异常信号识别机制，确定电磁辐射变化的阈值，及时识别可能的岩爆前兆；
- c) 电磁辐射法报告的编制与发布，具体宜包括采用的电磁辐射法技术和方法、监测数据分析结果、岩爆的风险评估与预警机制、施工过程中的注意事项及应对策略。

8.3 岩爆预警

- 8.3.1 岩爆隧道施工预警应预判潜在岩爆的位置及其岩爆等级和发生概率，为岩爆风险防控提供依据。
- 8.3.2 岩爆隧道施工预警应进行地质综合分析，考虑隧道围岩地质特征、应力状态、构造关系及历史岩爆事件，通过多方面评估岩爆发生的可能性及其影响。
- 8.3.3 岩爆隧道施工预警应结合超前地质预报方法获取的施工面前方地质情况，分析地层结构、岩石性质及其变化等信息进行综合分析判断、预警。
- 8.3.4 岩爆预警宜结合电磁辐射监测技术，实时监测岩体在应力变化过程中的电磁辐射信号，通过信号特征分析，识别潜在的岩爆活动。
- 8.3.5 岩爆隧道施工预警可结合其他相关监测手段，如声波监测、位移监测等，获取更多维度的信息，以增强对岩爆风险和岩爆等级的评估能力。
- 8.3.6 岩爆隧道施工预警应根据微震监测信息动态实施，实时收集和分析岩体内部的微震事件，通过震源参数、震源分布及其活动规律，判断潜在的岩爆风险。
- 8.3.7 即时型岩爆隧道施工预警宜采用基于微震指标的岩爆预警方法，实现短时间内对岩爆的风险及其岩爆等级进行预警，岩爆预警方法宜按本文件附录 D 的相关规定执行。
- 8.3.8 时滞型岩爆隧道施工预警宜采用基于微震监测信息岩爆预警的 EMS 方法，基于微震监测信息的岩爆预警法宜按本文件附录 E 的相关规定执行。

8.4 结构运营期监测

- 8.4.1 开展运营监测的隧道应编制详细的实施性监测方案。
- 8.4.2 运营期监测宜采用对隧道运营影响小且自动化程度高的技术手段，数据宜实现自动采集、传输、标准化输出和实时预警等，并应建立全过程的信息化数据库。
- 8.4.3 岩爆段运营期监测方法、监测项目及控制基准应与围岩类型、岩爆等级和监测周期等相适应。
- 8.4.4 运营期监测及分析应达到掌握隧道结构受力及变形状况、评价隧道结构的安全状态、为隧道管理决策提供基础数据的目的。
- 8.4.5 运营期监测项目应包括围岩深部应力监测、二次衬砌表面变形及开裂观察、内力监测，必要时应对初期支护进行监测。
- 8.4.6 宜根据施工期现场发生岩爆的情况划分监测区段，每段不应少于 2 个断面，监测断面间距宜取 50m~200m。监测初期支护时，应与二次衬砌监测布置在同一断面。
- 8.4.7 运营期监测在下列条件下应提高监测频率，加强分析预警并及时采取措施。
 - a) 隧址区发生地震后；
 - b) 隧道出现病害段落。

附 录 A

(资料性)

微震监测设备的安装与实施方案

A.1 微震监测设备安装

微震监测设备安装应主要包括以下内容：

- 组织机构、现场工作场所布置及主要设备配置；
- 微震监测设备的选型及采购计划；
- 微震监测设备的检查计划；
- 施工程序与进度计划；
- 安装埋设方法及保护措施；
- 安装调试和验收。

A.2 传感器安装

传感器安装应符合下列规定：

- 传感器宜采用钻孔可回收式安装；
- 安装传感器的钻孔直径定位宜在 32mm 左右；
- 安装传感器钻孔的深度定位宜在 3m 左右；
- 安装传感器钻孔的倾角宜为 70°；
- 在传感器安装孔口宜安放隔音棉；
- 传感器安装宜根据现场实际情况，对安装方案稍作调整。

A.3 信号采集系统、主机和监控系统

信号采集系统、主机和监控中心安装应符合下列规定：

- 强电设备宜单独放置；
- 信号采集系统内线路宜平行布设；
- 信号采集系统和主机外宜张贴反光条等警示标志；
- 宜使用帐篷对信号采集系统和主机进行保护、防尘；
- 接地电阻不应大于 10Ω；
- 监测中心安装位置宜为硐室、板房或配电柜。

A.4 通信设备

通信设备安装应符合下列要求：

- 传感器与信号采集系统宜采用一对 20 AWG 且带有铝线圈的屏蔽线铜电缆相连接；
- 通信电缆不宜和强电线路同侧铺设，同侧铺设时宜远离强电线路；
- 通信电缆和光缆宜铺设在机械设备、人员难以触及的安全区域；
- 通信电缆和光缆表部应做好警示标志；
- 通信电缆和光缆布置宜采用外部悬挂与内部埋设相结合的方法；
- 通信电缆或光缆需要加长时，需要采用同型号的电缆或光缆加长。

A.5 参数设置

微震监测系统安装完成后应进行参数设置，参数设置宜包括下列内容：

- 设置采样频率、触发阈值、时间同步方式与时间同步间隔等采集参数；
- 设置传感器类型、灵敏度和空间坐标等传感器参数；
- 设置定位算法、纵波速度和横波速度等微震事件定位参数；
- 设置岩体密度和剪切模量等工程岩体物理力学参数。

A.6 测试试验

微震监测系统安装完成后应通过测试试验调试系统灵敏性和定位精度，测试试验应符合下列规定：

- 测试点应位于微震监测的重点关注区域；
- 测试点个数不宜少于 3 个；
- 每个测试点的测试次数不应少于 3 次；
- 测试试验信号源宜通过非微差小药量爆破、电火花或敲击等人工方式产生。

A.7 监测

每天巡视检查监测系统的频次不宜低于1次，发现故障时应及时维修。微震监测系统的监测应主要包括以下内容：

- 监测系统应对监测区域岩体破裂进行实时监测；
- 传感器、采集仪、授时服务器等设备工作状态实时查看。

附 录 B

(资料性)

微震监测数据的处理和整理方法

B.1 数据整理内容

微震监测数据整理应包括下列内容：

- 微震信号分类；
- 微震信号降噪；
- 微震信号到时拾取；
- 微震事件定位；
- 微震事件震源参数计算；
- 微震监测信息记录和整理。

B.2 微震信号分类处理

微震信号分类处理应符合下列要求：

- 进行微震信号特征分析，对微震监测系统采集的数据进行分类，从采集到的微震信号里选取由岩体微破裂产生的微震信号；
- 信号特征分析内容宜包括时域、频域和时频特征分析，信号特征分析参数宜包括信噪比、持续时间、最大振幅、纵波到时、主频、最大频率范围和最大即时频率等；
- 微震信号分类宜根据事件触发量选择分类方法，当事件触发频率较低时宜采用专业人员分类；当隧道存在较多噪音源，触发事件较多时，宜采用微震信号智能分类方法；
- 微震信号分类结果宜进行人工复核；
- 应自动化地进行微震信号分类处理。

B.3 信号降噪处理

信号降噪处理应符合下列要求：

- 去除微震信号噪音，提高波形信噪比；
- 波形降噪前后，微震波形不能发生过大畸变或失真；
- 波形降噪方法选择宜根据信号特征与事件数量情况而定：当事件数量较少时，可采用傅里叶变换、小波分析、经验模态分解等降噪算法进行波形降噪处理；当噪音源较多，噪音波形特征复杂或触发事件较多时，宜采用智能降噪模型进行波形降噪。

B.4 信号到时拾取处理

信号到时拾取处理应符合下列要求：

- 应根据纵波、横波传导至各传感器时的时间确定；
- 波形拾取方法宜根据微震信号数据量情况进行选择：当单位时间内微震事件较少时，宜采用长短时窗比法进行波形到时检测；当微震事件较多时，需要进行波形批量处理时，宜采用智能模型进行波形降到时拾取。

B.5 震源定位处理

震源定位处理应符合下列要求。

- 微震监测阵列布置应尽可能将空间范围进行扩大;双线隧道宜采用多阵列双线联合监测;单线隧道在布置传感器阵列时,宜通过加深埋设深度来提高空间定位精度。
- 震源定位方法的选择应与阵列布置情况相匹配,震源定位算法宜采用 IPS0(改进粒子群算法)算法进行震源空间坐标求解。

B.6 震源参数计算

微震事件的震源参数计算宜包括微震事件的微震辐射能、体变势、地震矩、视体积、视应力和矩震级等微震参数变量,计算公式及说明见表B.1。

表B.1 震源参数计算公式表

物理量	公式	说明
微震辐射能 E	$E = \frac{8}{5} \pi \rho v R^2 \int_0^t u^2(t) dt$	ρ 为岩石密度 (kg/m^3); v 为微震波速度 (m/s); R 为震源距离 (m); t 为地震波信号的时间跨度 (s); $u(t)$ 为接收端地震波的位移函数
体变势 P	$P = \Delta \epsilon V$	$\Delta \epsilon$ 为震源非弹性应变; V 为震源体积 (m^3)
地震矩 M_0	$M_0 = PG$	P 为体变势 (m^3); G 为岩体剪切模量(MPa)
视体积 V_A	$V_A = \frac{\mu P^2}{E}$	μ 为岩体变形刚度(MPa); E 为地震能量 (J); P 为体变势 (m^3)
视应力 σ_a	$\sigma_a = G \frac{E}{M_0}$	E 为地震能量 (J); G 为岩体剪切模量 (MPa); M_0 为地震矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)
矩震级 M_w	$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.033$	M_0 为地震矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)

B.7 微震监测数据

微震监测数据宜根据微震事件发生的位置分区域进行记录和整理,微震监测信息记录表宜按如下执行。

单个微震事件的微震监测信息记录表见表B.2, 等时化后的微震监测信息记录表见表B.3。

表B.2 单个微震事件的微震监测信息记录表

序号	微震事件名称 (年/月/日/时/ 分/秒)	桩号	位置	微震参数变量					备注
				$M_0(N\cdot m)$	$V_a(m^3)$	stress_drop (Mpa)	E(J)	stress_app (Mpa)	

表B.3 等时化后的微震监测信息记录表

日期	小时	微震参数变量							备注
		$M_0(N\cdot m)$	$V_a(m^3)$	stress_drop (Mpa)	E(J)	stress_app (Mpa)	lgEI(1h)	lgEI(4h)	
(年/ 月/日/ 时)	0								
	1								
	2								
	3								
	4								
									

附 录 C
(资料性)
微震监测报告的编制

C.1 内容

- 微震监测报告宜包含以下内容：
- 介绍微震监测系统的组成、布置及运行情况；
 - 列出监测期间的微震事件，包括事件时间、震源位置、震级等信息；
 - 分析微震事件的震源参数，评估其与岩爆活动的相关性；
 - 根据微震监测结果，进行岩爆风险评估，并提出相应的安全措施和预警建议。

C.2 分类

微震监测报告类型宜包括风险速报、日常简报、阶段性报告和总结报告。

C.3 微震监测风险速报

微震监测风险速报宜在隧道围岩活动异常以及微震活动异常发生后的2h内发布，监测日常简报的发布周期宜为1天，监测阶段性报告发布周期可为1月或1季度。

监测区域岩爆风险高时，微震监测报告发布周期宜缩短。

- 微震监测风险速报宜包含以下内容：
- 发生隧道围岩活动异常或者微震活动异常的地点、时间点和异常特征；
 - 报告监测时段内微震事件数、微震能量、地震矩震级的变化情况；
 - 提供相应的岩爆等级预警、风险等级和预警信息；
 - 根据风险预警结果，提出相应的防范和应对措施，如加强监测、采取加固措施、停工等待等；
 - 明确风险速报所覆盖的监测时间，通常为 12 小时一报，但在特殊情况下可加密至 6 小时一报或更短时间。

C.4 微震监测日常简报

微震监测日常简报的格式宜参照图C.1的样表格式。

微震事件发育统计			
微震监测时间段		微震事件每小时率（次/小时）	
	小能量事件	中能量事件	大能量事件
数量			
比重			
微震事件分布统计			
(1) 微震事件空间分布：			
(2) 微震事件时间分布：			

图C.1 微震监测日常简报样表格式

	掌子面桩号	岩爆等级预警	潜在灾害位置	建议措施
右洞		无 轻微 中等 强烈 剧烈		
左洞		无 轻微 中等 强烈 剧烈		
今日隧道双线微震监测情况 正常 ，主要结论如下：				

图C.1 微震监测日常简报样表格式(续)

C.5 微震监测阶段性报告

微震监测阶段性报告应包括该阶段微震监测实施概述、微震监测结果、岩体稳定性分析结果及其与实际情况的对比、存在的问题及下一步监测计划。

C.6 微震监测总结报告

微震监测总结报告应包括资料收集与现场调查、监测系统设计、监测施工、监测与维护、监测数据整编与分析、获得的监测结果、考虑施工情况、开展岩体稳定性分析与岩爆预警、监测效果分析、结论与建议、参与监测单位及人员等。

附 录 D
(资料性)
基于微震指标的岩爆预警方法

D.1 岩爆预警指标

圈定隧道围岩微震活动区域范围,通过合理微震阵列布置方式获取所采集的微震事件的准确位置和参数信息,监测区域基于微震信息的岩爆预警指标宜选取微震事件数、微震能量、地震矩震级。

D.2 判断岩爆等级

对岩爆灾害形成全过程实现监测预警,具体应研究监测区域内的微震活动强度,若无异常,则认为围岩暂时处于相对稳定状态。若微震活动异常,需要基于已采集的监测数据,判断岩爆可能发生的等级。

微震事件数可以反映岩体内部的破裂程度和能量积累情况,随着岩体内部破裂程度的增加,微震事件的频次和数量也会相应增加。具体分为:

- 当微震事件数为 0-5 个/小时的范围内,通常岩爆发生的等级为轻微;
- 当微震事件数为 5-20 个/小时的范围内,通常岩爆发生的等级为中等;
- 当微震事件数为 20-50 个/小时的范围内,通常岩爆发生的等级为强烈;
- 当微震事件数大于 50 个/小时的范围内,通常岩爆发生的等级为剧烈。

D.3 微震能量

微震能量是反映岩体破裂程度和能量释放情况的重要指标。不同等级的岩爆所诱发的微震能量也会有所不同。一般来说,随着岩爆等级的提升,微震能量也会相应增加:

- 当微震能量指标为 10^2 到 10^4 的范围内,通常岩爆发生的等级为轻微;
- 当微震能量指标为 10^4 到 10^5 的范围内,通常岩爆发生的等级为中等;
- 当微震能量指标为 10^5 到 10^6 的范围内,通常岩爆发生的等级为强烈;
- 当微震能量指标大于 10^7 的范围,通常岩爆发生的等级为剧烈。

D.4 地震矩震级

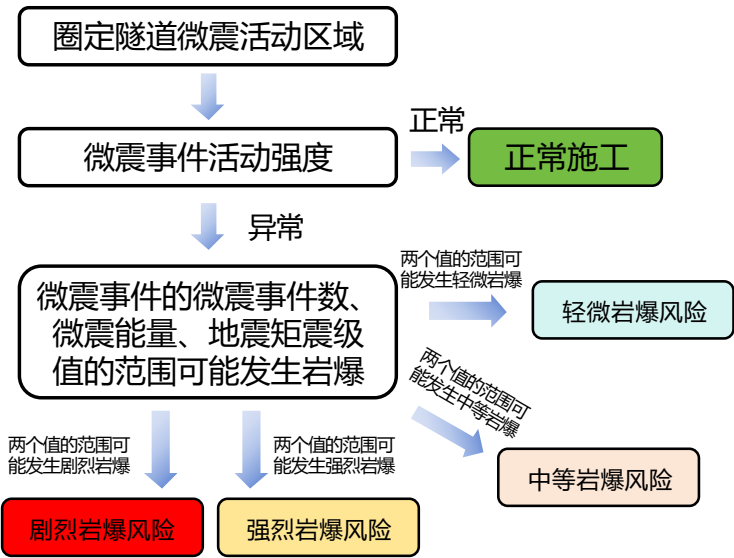
地震矩震级是描述地震大小的物理量,与地震释放的能量成正比。在岩爆预警中,地震矩震级可以反映岩体的破裂程度和能量释放情况:

- 当地震矩震级指标为-3.0 到-1.5 的范围内,通常岩爆发生的等级为轻微;
- 当地震矩震级指标为-1.5 到 0.0 的范围内,通常岩爆发生的等级为中等;
- 当地震矩震级指标为 0.0 到 1.5 的范围内,通常岩爆发生的等级为强烈;
- 当地震矩震级指标大于 1.5,通常岩爆发生的等级为剧烈。

D.5 风险等级预警

进行岩爆预警时,应对监测区域内岩爆发生的风险及等级进行预警。

具体应研究监测区域内的微震事件的活动强度,若无异常,则认为围岩暂时处于相对稳定状态。若微震活动异常,需要基于已采集的监测数据(微震事件数、微震能量、地震矩震级)来发布风险和等级预警,各个微震指标的预警阈值在D.0.3到D.0.5中描述,岩爆发生的风险及等级预警流程如图D.1。



图D.1 岩爆发生的风险及等级预警流程图

进行岩爆时空预警中，应针对不同的监测对象和地质条件应当根据实际监测情况调整微震活动异常的判断条件。

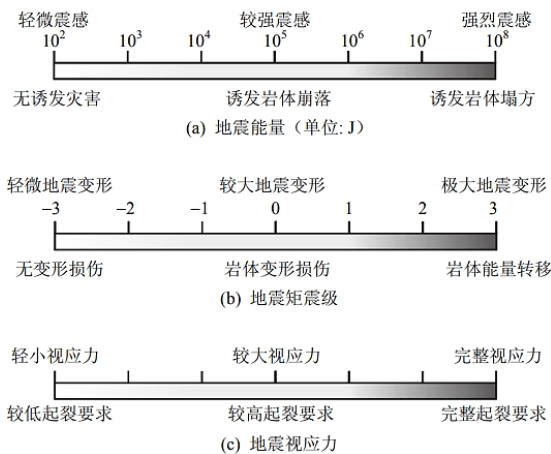
附 录 E
(资料性)
基于微震监测信息岩爆预警的 EMS 方法

E.1 评价指标

岩爆评估及预测的EMS方法包含了三种震源参数的评价指标，“E”代表了地震能量，“M”代表了地震矩，“S”代表了视应力，这三种指标可用于评估不同程度的岩体灾变特点。

图E.1反映了在微震监测范围中EMS方法各指标的取值及含义：

- a) 对于地震能量指标，随着量值的增大，监测现场可感受到从轻微到强烈的震感，并且可诱发岩体崩落甚至岩体塌方灾害；
- b) 地震矩评估震源变形（由轻微到极大的变化），随着地震矩的增加，震源向周围岩体作用更大的变形量，造成变形驱动式的岩体损伤，甚至将大量的应变能转移到周围岩体；
- c) 视应力评估岩体应力调整的程度或岩体破裂的过程。较大的视应力代表了更高的岩体起裂要求，此时相对较小的震源变形对应了相对较高的能量释放；随着视应力的增大，岩体越趋近于完整断裂。

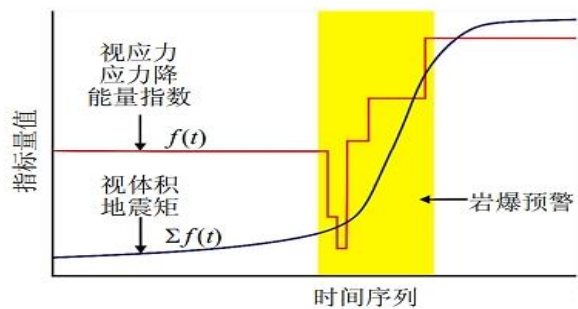


图E.1 微震监测范围内 EMS 各指标取值及含义

E.2 岩爆预警阶段

图 E.2 反映了 EMS 方法及相关指标可用于预测岩爆发生。实时演化曲线 $f(t)$ 可由视应力、应力降或能量指数 3 种指标代表，且三者互为正相关；累积演化曲线 $f(t)$ 可由视体积或地震矩指标代表。岩爆的预警阶段（黄色覆盖区域）可判识为：

- a) 实时演化指标经过一段时期的稳定发展后，出现迅速的降低；
- b) 累积演化指标出现大幅度的上升。
- c) 结合这两种变化趋势，可判断岩体破裂行为由稳定发展进入加速破裂，岩体非弹性变形和损伤程度迅速增大，可对岩爆灾害进行预警。

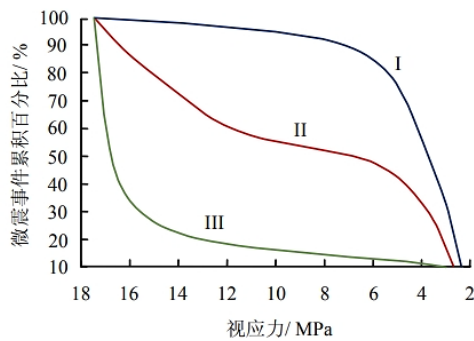


图E.2 基于 EMS 方法及相关指标的岩爆预警

E.3 微震监测范围内 EMS 各指标取值及含义

图E.3反映了根据EMS方法实时、累积演化曲线判识岩爆预警阶段后,可评估当前岩爆发育范围(微震事件簇)的视应力级配曲线特征,预测潜在岩爆灾害等级。3 种可能出现的视应力级配曲线类型用于定性区分潜在岩爆等级。

- 类型I描述先陡后缓的曲线特征。在这种情况下,低量级视应力的微震事件占有主要比重,表明岩体的起裂要求总体较低,破裂过程可出现明显的震源变形和更高的能量耗散。因此,潜在岩爆可判识为轻微等级。
- 类型II描述中间缓两边陡的曲线特征。在此情况中,低量级和高量级视应力的微震事件均占有较大比重,潜在岩爆的等级常为中等或强烈。
- 类型III描述先缓后陡的曲线特征。在此情况中,高量级视应力的微震事件占有主要比重,表明岩体的起裂要求总体较高,岩性较完整且破裂过程能量耗散较少。因此,可出现较剧烈等级的岩爆。



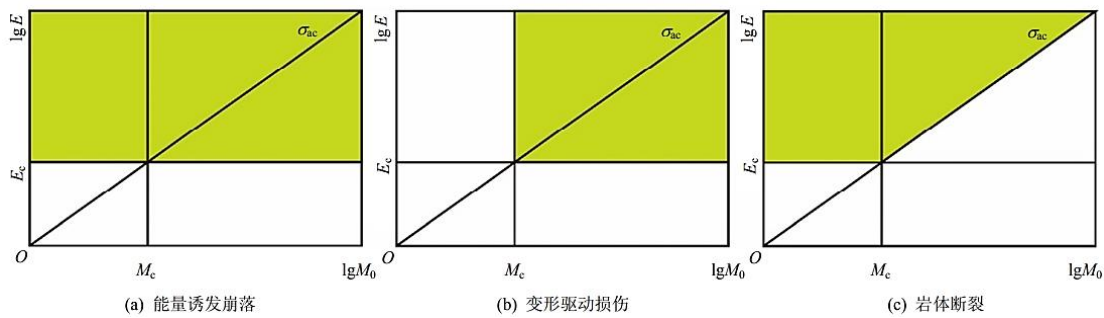
图E.3 视应力级配曲线类型及岩爆等级预测

注：横坐标代表微震事件的视应力量级，纵坐标为小于（或大于）某量级的微震事件比重（累积百分比）。

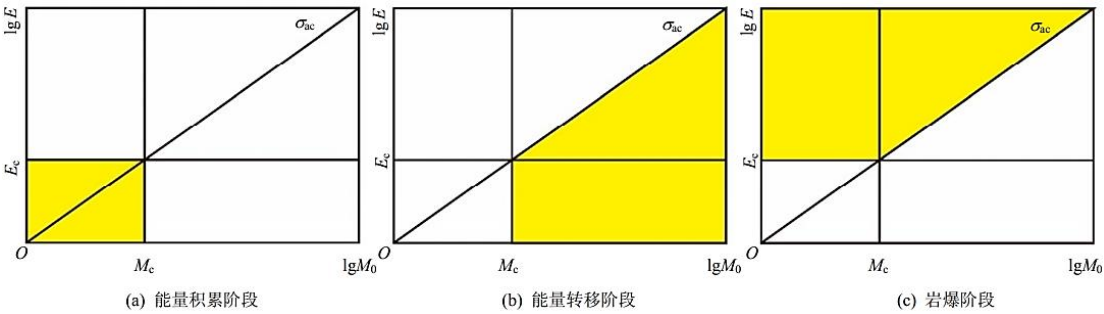
E.4 定量区分岩爆等级预警

定量区分岩爆等级预警可按DL/T 5807-2020的附录F的有关规定执行。

图E.4反映了震源参数空间可划分两种方案。根据EMS指标阈值和岩爆致灾类型的震源参数空间的分区见图E.4所示：能量诱发崩落、变形驱动损伤和岩体断裂，可以辅助判断岩爆发生的类型。根据能量演化过程的震源参数空间的分区见图E.5所示：能量积累阶段、能量转移阶段和岩爆阶段，可以辅助判断岩爆孕育的阶段，确定岩爆发生的风险。在实际岩爆过程中，能量演化3阶段的微震事件在时间序列上先后出现。



图E.4 根据致灾类型的空间分区



图E.5 根据能量演化过程的空间分区

由于岩性结构、地应力场等条件不同，提出的基于微震监测信息岩爆预警的EMS方法中各评估指标阈值的设定在不同的工程案例中具有不同的量级。可参考某次完整岩爆（类似岩性条件岩爆）确定评估指标阈值，并对后续岩爆灾害进行评估与预警；或初始采用指标阈值对应级配曲线50%比重的原则，针对实际岩爆过程的特点进行动态调整。