



T/CECS ××××—202×

中国工程建设标准化协会标准

硬岩动力扰动真三轴试验标准

Standard for true-triaxial test under dynamic disturbance of hard
rock

（征求意见稿）

××××出版社

中国工程建设标准化协会标准

硬岩动力扰动真三轴试验标准

Standard for true-triaxial test under dynamic disturbance of hard
rock

T/CECS ××××—202×

主编单位：东北大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月××日

××××出版社

202× 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2024 年度第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2024〕28 号）的要求，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，结合我国实际情况，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 8 章和 4 个附录，主要内容包括：总则、术语、振动波监测、开挖应力确定、试样制备、动力扰动真三轴试验、试验数据处理等。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中国铁路经济规划研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给中国铁路经济规划研究院有限公司（地址：北京市海淀区北蜂窝路乙 29 号，邮编：100038，邮箱：carrin@foxmail.com）。

主编单位：

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目录

1 总则	1
2 术语	2
3 振动波监测	4
3.1 一般规定	4
3.2 振动监测设备	4
3.3 布设测点	4
3.4 振动监测步骤	4
3.5 数据处理及报告编制	5
4 开挖应力路径确定	6
4.1 一般规定	6
4.2 深部工程岩体三维原岩应力的获取	6
4.3 开挖应力路径的获取	7
5 试样制备	8
5.1 岩样采集	8
5.2 试样加工	9
6 动力扰动真三轴试验设备与试件安装	10
6.1 一般规定	10
6.2 试验设备	10
6.3 试件装配和安装	10
6.4 变形传感器安装	11
6.5 声发射传感器安装	11
7 动力扰动真三轴试验	12
7.1 一般规定	12
7.2 岩石峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验	12
7.3 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验	13
7.4 岩石动力扰动真三轴压缩时效试验	14
8 试验数据处理	15
8.1 一般规定	15
8.2 应力及强度参数计算	15
8.3 应变及变形参数计算	16
8.4 试验结果	16
附 录 A 深部工程多源振动监测	18

附 录 B 岩块采样记录表	19
附 录 C 真三轴试样制备记录表	20
附 录 D 试验记录表 D.0.1~D.0.3	21
用词说明	24
引用标准名录	25
附：条文说明	26

Contents

1	General provisions	1
2	Term and definition	2
3	Vibration wave monitoring	4
3.1	General requirements	4
3.2	Vibration monitoring equipment	4
3.3	Layout measuring points	4
3.4	Vibration monitoring steps	4
3.5	Data processing and report preparation	5
4	Determination of excavation stress path	6
4.1	General requirements	6
4.2	The acquisition of three-dimensional in-situ rock stress of deep engineering rock mass	6
4.3	Excavation stress path	7
5	Specimen preparation	8
5.1	Collection of rock specimen	8
5.2	Specimen processing	9
6	Dynamic disturbance true triaxial test equipment and specimen installation	10
6.1	General requirements	10
6.2	Testing equipment	10
6.3	Specimen assembly and sealing	10
6.4	Deformation sensor installation	11
6.5	Acoustic emission sensor installation	11
7	Dynamic disturbance true triaxial test	12
7.1	General requirements	12
7.2	Pre-peak dynamic disturbance rock mechanics test under true triaxial compression	12
7.3	Post-peak dynamic disturbance rock mechanics test under true triaxial compression	13
7.4	Time-dependent dynamic disturbance rock mechanics test under true triaxial compression	14
8	Analysis of test data	15
8.1	General requirements	15
8.2	Calculation of stress and strength parameters	15
8.3	Calculation of strain and deformation parameters	16
8.4	Test result	16
Appendix A	On-site vibration monitoring table	18
Appendix B	Rock mass sampling record table	19
Appendix C	Specimen preparation record table	20
Appendix D	Testing record tables D.0.1~D.0.3	21
	Explanation of wording	24
	List of quoted standards	25
	Addition: Explanation of provisions	26

1 总 则

1.0.1 为规范深埋硬岩动力扰动真三轴力学性能测试，做到安全可靠、技术先进、测试稳定，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于深部工程硬岩真三轴力学性能测试，用于其开挖掘进过程中，受到动力扰动影响下的围岩力学性能室内试验测试。

1.0.3 深埋硬岩动力扰动真三轴力学性能测试除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 振动波 Vibration wave

在钻爆法施工的隧道中，由隧道掌子面爆破或相邻后行隧道爆破产生的振动。在 TBM 等机械掘进隧道中，振动主要来自于刀具切削岩体产生的振动、TBM 本身机械设备的振动、地震引起的隧道围岩振动等。

2.0.2 监测点 Monitoring points

直接或间接设置在研究对象上并能反映其振动变化特征的观测点。

2.0.3 岩脉 Dike

地壳中由于地质运动或化学作用而形成的矿物质或岩石的线状或带状体。

2.0.4 结构面 Structural plane

具有极低的或没有抗拉强度的不连续面，包括一切地质分离面。

2.0.5 原位特性 In situ properties

保持岩体的天然结构和环境状态。

2.0.6 初始地应力 In situ stress

初始地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力，也称原岩应力、绝对应力。

2.0.7 开挖应力路径 Excavation stress path

在地下工程开挖中，岩体的原始应力平衡状态被打破，真三向应力发生演化。

2.0.8 动力扰动 Dynamic disturbance

岩石在受到外界动力（如TBM、爆破、地震等）作用下，其内部应力、应变及破裂等物理力学行为发生变化的过程。这种动力扰动会影响岩石的稳定性和强度，进而可能导致岩石破裂、变形甚至崩塌。

2.0.9 峰前动力扰动岩石力学试验 Pre-peak dynamic disturbance rock mechanics test

峰前动力扰动岩石力学试验是一种研究岩石在动力扰动作用下力学行为的试验方法，是在岩石加载过程中，尚未达到峰值强度前施加扰动，用于研究动力扰动对岩石变形、裂隙演化及峰值强度的影响机制。

2.0.10 峰后动力扰动岩石力学试验 Post-peak dynamic disturbance rock mechanics test

峰后动力扰动岩石力学试验是指在岩石加载超过峰值强度后施加动力扰动，以探究扰动对岩体峰后跌落阶段破裂扩展、残余强度及失稳机制的影响，该试验模拟岩石破裂发生时受到扰动的情形。

2.0.11 动力扰动时效岩石力学试验 Time-dependent dynamic disturbance rock mechanics test

动力扰动时效岩石力学试验是将扰动以长时加载的方式施加于岩石样本，研究扰动作用时长对岩石力学性能的影响，常用于分析岩体在长期服务或长时扰动条件下的破裂、损伤演化特征与长期稳定性。

3 振动波监测

3.1 一般规定

- 3.1.1** 振动波监测可分为开挖振动监测和偶发振动监测。
- 3.1.2** 振动波监测前应进行现场踏勘及资料收集，并编制监测方案，包括项目名称、工程概况、测点位置、监测范围、监测方法、监测设备、测试步骤和预期成果等。
- 3.1.3** 振动波监测前应记录监测时的掌子面桩号、测试点与掌子面之间的地质信息等。
- 3.1.4** 在围岩振动监测断面，沿轴向和径向测点应不少于3个。振动监测全过程分为三个阶段：分别为准备阶段、现场测试阶段和数据回放处理阶段。

3.2 振动监测设备

- 3.2.1** 监测设备量程、采样频率、精度应满足采集要求。
- 3.2.2** 振动监测设备系统应由传感器、控制部件（计算机），以及供电部件三部分构成。
- 3.2.3** 仪器设备投入使用前，应经过标定和校准。
- 3.2.4** 监测过程中应定期进行仪器设备的维护保养以及配套元器件的检查。
- 3.2.5** 振动监测设备工作温度、防护等级、尺寸大小要能适应现场工作环境。

3.3 布设测点

- 3.3.1** 测点处应进行清洁处理，去除干扰异物。
- 3.3.2** 围岩振动测点布设应避开沟槽、破碎带、空洞等存在不良地质条件和设备易损位置，且宜选择同一基岩平面。
- 3.3.3** 传感器布置要考虑地应力大小及方向、应力集中区、岩体结构面、断层等因素。
- 3.3.4** 传感器与被测岩体应紧密贴合，宜采用刚性固定方式。在围岩内部布设时，固定材料波阻抗应与围岩波阻抗相匹配。

3.4 振动监测步骤

- 3.4.1** 振动监测应通过现场调研选取目标试验段，合理确定监测时长，择优监测手段；
- 3.4.2** 制定试验方案，选取监测断面位置，布设监测设备；

- 3.4.3 确保监测传感器与围岩固定良好，传感器X方向指向震源；
- 3.4.4 启动监测设备，设置采集时长、采集模式、触发模式、激发阈值等参数；
- 3.4.5 进行设备清零，开展敲击预测试，查看振动波形，并记录震源距离；
- 3.4.6 开始采集，采集结束后回收设备，进行传输数据。

3.5 数据处理及报告编制

- 3.5.1 振动监测后应对现场监测原始数据进行整理、分析和处理。
- 3.5.2 监测数据应导入分析系统中进行处理，获取各测点的速速、加速度及相应地频率。
- 3.5.3 数据预处理可通过加减直流量、数字滤波、直线滑动平均等方式进行处理。
- 3.5.4 数据分析阶段可通过量纲分析、萨道夫斯基拟合等方法进行分析。
- 3.5.5 振动测试完成后应进行成果整理，数据记录表参见附录A。
- 3.5.6 振动测试报告应包括以下内容：
 - 1 工程地质背景。振动测试前应编制监测实施方案，宜包含项目名称、工程概况、监测目的、测点位置、监测范围、测试方法、设备型号、监测步骤和预期成果等内容；
 - 2 编制依据；
 - 3 记录监测过程中的测量设备和步骤；
 - 4 振动测试数据分析与成果整理；
 - 5 测试过程和附图与、附表
 - 6 结论与建议。
- 3.5.7 监测工作结束后，应整理监测项目成果报告，对各类监测数据和现场调查信息进行汇总、分析和说明，对监测工作进行综合评价。

4 开挖应力路径确定

4.1 一般规定

4.1.1 三维原岩地应力场的获取应采用从宏观区域地质构造运动、地形分析到局部区域地应力状态分析，并最终得到研究洞段原岩地应力。

4.1.2 开挖应力路径宜基于研究区域原岩地应力场，结合现场原位测量、理论公式和数值分析多手段，综合分析获取围岩在开挖过程中的应力变化情况。

4.2 深部工程岩体三维原岩应力的获取

4.2.1 三维原岩应力的获取流程参见图4.2.1，应按如下步骤：

- 1 根据区域构造运动背景和地形特征，判断原岩地应力方向，对地应力测试结果的准确性进行审查，剔除与整体规律不符的测试结果。
- 2 基于原岩地应力测试结果数据，反演区域三维原岩应力场。
- 3 利用地下工程开挖过程中揭露的多源信息，包括现场高应力破坏位置、声波测试结果、钻孔摄像结果等，对局部洞段地应力状态进行验证分析。
- 4 最终得到研究区域的三维原岩应力场。

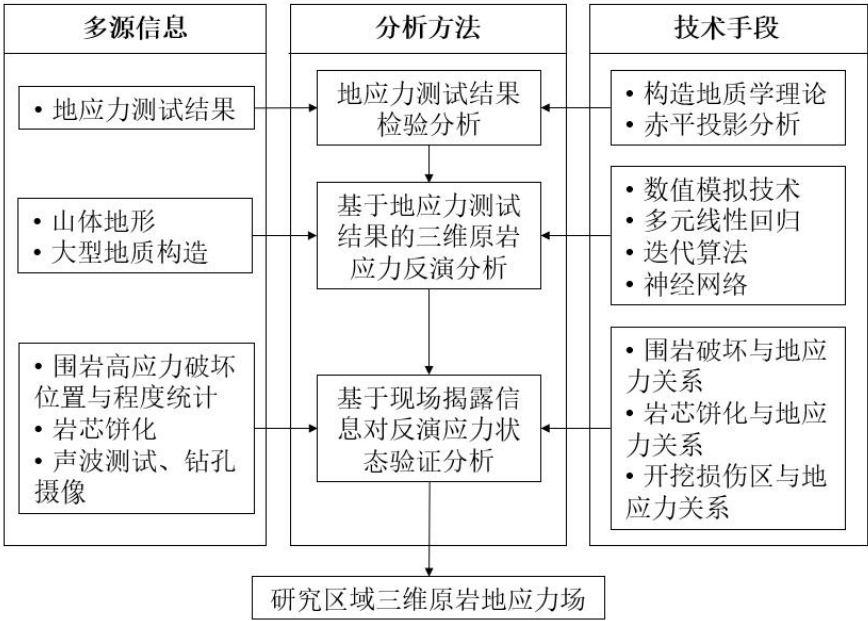


图 4.2.1 三维原岩应力场分析流程图

4.2.2 三维原岩地应力场反演应按以下步骤进行：

1 圈定工程区，对工程区地层、岩体的地质构造及山体地形条件进行概化，建立三维几何模型。

2 根据工程所在区域的地形、地质条件及构造运动特点，分析影响地应力的各种因素，并表达为边界和初始条件。

3 根据各个测点计算所得的应力分量值和实测应力点分量值，反演得出各个作用因素对地应力场的影响权重系数。

4 依据所得权重系数调整各个作用因素的作用大小，重新施加到模型边界上进行计算，并将计算结果进行叠加得出区域原岩地应力场。

4.2.3 反演中应选择岩体自重、地形和地质构造运动（水平挤压构造应力、水平剪切构造应力和竖向剪切构造应力）作为初始地应力回归分析的主要影响因素。

4.2.4 深部工程岩体三维原岩应力反演效果检验，各个测点应力分量实测值与计算值差值须小于20%，实测值与计算值复相关系数 $R>0.85$ 。

4.3 开挖应力路径的获取

4.3.1 隧道开挖后形成开挖应力场，现场地应力测量宜采用技术较成熟的水压致裂法或套芯解除法。

4.3.2 应力路径数值分析方法是三维数值分析软件模拟深部工程开挖过程，在洞周或围岩内部关键位置设置记录点，获取这些关键点在开挖过程中的应力变化情况。采用该方法需要注意以下几点：

- 1 应选用三维数值模拟软件和力学模型，可以模拟岩石在三维应力下的变形破裂过程；
- 2 物理模型外边缘尺寸不小于工程尺寸的3~5倍，避免边界效应的影响；
- 3 对模型施加初始边界条件，根据现场实测结果反演初始地应力；
- 4 围岩力学参数应充分反映围岩的力学性质；
- 5 为获取深部工程中关键点在开挖前、开挖中、开挖后整个过程的应力路径变化，监测点不宜靠近模型两端位置。

5 试样制备

5.1 岩样采集

5.1.1 岩样采集基本方法如下：

1 通过工程现场的地质资料，确定取样区域围岩特性。为保证试样的质量，岩样采取尽量避开蚀变区、风化带、断层破碎带及其影响区域范围地段。根据围岩的应力分布情况、区域的地质构造以及岩脉的出露位置，选取具有代表性和针对性的采样点进行现场取样，并保证同组岩样的地层和岩性相同。

2 含结构面岩样的采集，应进一步结合取样区域结构面的产状、结构面的位置、结构面的性质、结构面的发育程度以及结构面和隧道的空间位置关系进行采样。

3 含岩脉岩样的采集，应进一步结合取样区域岩脉的产状、岩脉的位置、岩脉的性质、结构面的发育程度以及岩脉和隧道的空间位置关系进行采样。

5.1.2 岩样采集应按照以下要求：

1 采样应当避开蚀变区、风化带、断层破碎带区域。

2 含结构面岩体进行采样时，应当选取含有连续、规整，具有代表性的坚硬结构面岩体。

3 含岩脉岩体进行岩样时，应当选取广泛发育，具有较大出露规模的岩脉分布区域。

5.1.3 每组岩样的数量应不少于试样数目需求的2倍，每组含结构面岩样及含岩脉岩样的数量应不少于试样数目需求的3倍。岩样的大小应当满足试样加工要求，岩块规格宜大于250 mm×250 mm×200 mm。

5.1.4 采样后用记号笔对岩样进行编号，并记录工程名称、采样日期、采样地点、采样方法、岩性描述及工程问题描述等。含结构面的岩样应当额外记录结构面的形态和产状，含岩脉的岩样应当额外记录岩脉的形态和产状，记录内容应当符合附录B的规定。

5.1.5 岩块的装箱与运输应按照以下要求：

1 采用多层塑料保鲜膜包裹密封现场岩块，尽量保持岩块的原位特性，避免岩块因暴露在空气中而出现的风化影响，以达到对试样的保水效果。

2 在岩块外面包裹多层柔性泡沫塑料，并用木箱装订，减小岩块在运输过程中可能发生的损坏，运送至岩样加工厂进行切割和打磨处理，进行试验所需的标准岩石试样切割。

5.2 试样加工

5.2.1 试样形状和尺寸应按照以下要求：

- 1 为了减小试验数据的离散性和实验结果的可对比性，同组岩石试样取自同一岩块，并标明采样方向，减小误差。
- 2 同组含结构面的岩石试样应当取自同一岩块的同一硬性结构面，同组含岩脉的岩石试样应当取自同一岩块的同一条岩脉。
- 3 试样应加工成长、宽、高分别为 100 mm、50 mm、50 mm 的标准长方体，试样的尺寸公差满足 $50\text{ mm} \pm 0.009\text{ mm}$ 或 $100\text{ mm} \pm 0.011\text{ mm}$ 。同时，确保试样最短边的边长至少是岩石颗粒最大直径的 20 倍以上，应当符合附录 C 的规定。
- 4 试样两端的平整度满足误差在 $\pm 0.01\text{ mm}$ ，垂直度公差在 0.02 mm 以内。试样表面粗糙度满足 $R_a = 1.6$ 。

5.2.2 试样加工应按照以下步骤：

- 1 加工含结构面的岩石试样应当标记结构面最大主应力加载角、中间主应力加载角、最小主应力加载角以及结构面的位置。
- 2 加工含岩脉的岩石试样应当标记岩脉最大主应力加载角、中间主应力加载角、最小主应力加载角以及岩脉的位置。
- 3 使用岩石切磨一体机对岩石试样初加工和打磨后，预留足够的长度以便后续试样的精确制备。

5.2.3 加工岩石试样时应当进行标号和记录，记录内容应当符合附录B的规定。包括岩样编号、岩样类型、试样编号、试样类型、试样尺寸、是否含有结构面、是否含有岩脉及加工方式等。

5.2.4 试样制备完成后应对其进行基本物理参数的测定，包括以下内容：

- 1 试验的名称、颜色、岩性、矿物成分、试样尺寸、试样相对密度以及试样波速等。
- 2 含结构面的岩石试样应记录结构面的产状、分布情况，含岩脉的岩石试样应记录岩脉的产状、分布情况。
- 3 试样的含水状态。

6 动力扰动真三轴试验设备与试件安装

6.1 一般规定

6.1.1 实验前应对试件岩相及结构进行素描或拍照，必要时可进行 P 波波速及 S 波波速测试，确保试样的均匀性。

6.1.2 试验前应完成试件对中安装、变形传感器和声发射传感器的安装等。

6.1.3 试验测试中使用的力传感器、位移传感器、声发射传感器、测试仪表和计量器具均应按仪器设备检验、检定规定进行周期性检查和校准，并做好一起设备使用记录和使用维护记录台账。

6.2 试验设备

6.2.1 宜根据试验目的选用不同加载方式的岩石伺服控制动力扰动真三轴试验机，且试验机应符合下列规定：

1 试验机应具有安全防护装置和急停操作按钮。

2 试验机的刚度应远远大于试件最大刚度，为满足动力扰动应力施加需求，建议加载刚度不宜小于 10G N/m。

3 试验机动力扰动应力施加方式应为点扰动或面扰动，开挖应力路径为加卸载。开挖应力路径与动力扰动应力加载，可采用双作动器同步对中加载模式，扰动应力加载也可采用单作动器对中补偿加载模式，但应防止试件产生偏心加载。

4 试验机动力扰动应力施加参数应考虑扰动幅值、扰动频率、扰动方向、扰动时长（次数），为满足科研需求，建议试验机扰动幅值应高于 20 MPa，扰动频率应覆盖 0-100 Hz。

6.2.2 试验前应完成试验机的检查，且应包括以下几个方面：

1 检查所有液压管路和阀门、电路及气路的连接情况，以及作动器移动情况。

2 检查动态数据采集线路的连接情况，消除外界因素对数据采集信号的干扰。

3 测试控制器对三个主应力方向加载活塞的控制情况。

6.3 试件装配和安装

6.3.1 试样装配方式宜根据试验目的和边界应力加载方式确定

1 三个方向主应力均采用刚性进行加载时，试件相互垂直的刚性加载面应留有足够的应力空白角，空白角大小可根据岩石性质进行适当调整，宜不大于岩石该加载面最大长度的 5%，且两侧对称空白布置。金属压块的刚度和强度应远大于试件的最大刚度和强度，压块与岩石试验接触面的平整度宜小于 0.2%。

2 采用液压油等液体直接对试样进行柔性加载时，试件加载面宜选用密封胶密封。

6.3.2 试件装配和密封前，试件和金属压块间应使用减摩材料来减低开挖应力路径、动力扰动应力施加过程中的端部效应。减摩材料的摩擦系数应小于0.02，宜采用膏状减摩材料。膏状材料可用铜模隔离，避免减摩材料压入试件内部。

6.4 变形传感器安装

6.4.1 试件变形测量宜采用LVDT式传感器，变形传感器的测量分辨率应达到1 μm ，测量精度应达到0.1% FS，其量程应覆盖试件的最大变形值，根据试件大小宜选用2 mm及以上量程。

6.4.2 试件装配和密封完毕后，试件每个加载轴方向应至少安装一个变形传感器。对于弹性压头装配的试件，宜采用双传感器对角线布置于试件的相对面，测量结果取其均值以减小扰动应力施加过程中的变形测量误差。传感器布置应保证测量轴线与试件中心轴平行。

6.4.3 试验前可通过螺旋测微器进行变形传感器的校准；对于对角线布置的双传感器，校准时应两个传感器同步进行。

6.5 声发射传感器安装

6.5.1 声发射传感器的频响带宽应与试件破裂的声发射特征匹配。

6.5.2 应在试件装配和密封的同时，进行声发射传感器的安装。声发射传感器宜非对称布置于试件的相对面，且应通过耦合剂与试件表面紧密贴合。

6.5.3 声发射传感器应与试件保持电绝缘，并具有一定的电磁干扰屏蔽能力。

6.5.4 进行岩石破裂定位监测时，声发射传感器数量不宜少于8个。

7 动力扰动真三轴试验

7.1 一般规定

7.1.1 应按照研究目的制定好具体的试验方案。

7.1.2 同一试验，试件的数量不宜少于3个。如果试验结果离散性高，试件数量应增加到5个。

7.1.3 试验前后应做好试验记录，实验记录应符合附录D的规定。

7.2 岩石峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验

7.2.1 试件安装应遵循以下步骤：

1 将试件放在加载弹性压头框架内，调整试件位置，使试件中心轴线与加载压头中心线重合，保证同面两侧空白角相等。

2 在试件与夹具、夹具与加载压头间进行减摩处理。

3 连接好变形传感器和声发射传感器，并调节变形传感器初始值，保证岩石变形量在传感器量程范围内。

7.2.2 声发射监测

1 若进行声发射定位或矩张量测试，在试样完成预紧力施加后，应进行主动波速测试。

2 声发射监测宜与动力扰动真三轴加载同步启停。

7.2.3 应力施加

1 动力扰动真三轴应力-应变曲线获取宜遵循下列步骤：

1) 对试样施加0.2 MPa~1 MPa的夹紧力。

2) 采用应力控制方式，以0.5 MPa/s速率同步独立加载 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 直至达到设定的最小主应力水平和中间主应力水平。

3) 保持 σ_2 和 σ_3 不变，采用应力控制方式，以同样速率继续施加 σ_1 。

4) 当 σ_1 增加到设定的扰动应力施加值，停止加载 σ_1 且采用应力控制保持不变。设定好动力扰动方向、扰动幅值、扰动频率、扰动时机、扰动时长（次数），开始施加动力扰动。

5) 在上述阶段若试件发生脆性破坏，则按照加载路径的反向顺序依次将应力卸掉；若该阶段试件未发生脆性破坏，则继续以同样速率梯级增加 σ_1 至下一扰动阶段的预设应力水

平，多级加载的应力级差应根据试验目的确定，并以应力控制保持不变，重复上述步骤开始施加动力扰动应力，重复此循环直至试件达到极限应变，发生脆性破坏，应按照加载路径的反向顺序依次将施加的应力卸掉，避免应力卸载造成试件二次破坏。

2 试验过程试件不宜偏心加载。可通过监测同轴方向加载压头的位置，确定试件偏心加载程度，同轴方向加载压头的位移偏差不宜超过 0.05 mm。

3 试验结束后应维持试件破裂形态，避免拆卸过程中造成附加的试件破坏，收集试件破裂后粉尘、碎屑。

7.2.4 数据采集应按照以下要求：

1 试验过程中应实时采集应力、变形、破裂的数据，开挖应力路径加载过程数据采样速率不应小于 10 次/s。

2 声发射信号、应力信号、变形信号的采集时间应保持同步。

7.3 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验

7.3.1 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验中，试件安装及声发射检测应分别符合 7.2.1 和 7.2.2 的规定。

7.3.2 峰后扰动应力施加时的开挖应力预设值应根据试件峰后力学性能与试验目的确定，宜选取峰后强度不低于峰值强度 85% 的应力水平开始施加动力扰动应力。

7.3.3 应力施加宜遵循下列步骤：

1 按照 7.2.3 将试件加载至设定的最小主应力和中间主应力水平。

2 当试件的 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 变形曲线开始偏离线性或体积变形达到反转拐点时，应采用变形控制方式进行最大主应力的加载。变形控制方式宜采用最小主应力方向的变形控制，变形速率可根据岩石类型和试件尺寸确定。

3 当硬岩试件达到峰值强度后，进入峰后阶段。在到达峰后预设值后， σ_1 方向加载由变形控制转为应力控制保持不变。施加动力扰动应力前，设定好动力扰动应力幅值和扰动应力频率以及扰动时长，开始施加扰动应力。

4 上述阶段若试件发生脆性破坏，则按照加载路径的反向顺序依次将应力卸掉；若该阶段试件未发生脆性破坏，则继续以同样速率梯级降低 σ_1 至下一扰动阶段的预设应力水平，多级卸载的应力级差应根据试验目的确定，并以应力控制保持不变，重复上述步骤开始施加扰动应力，重复此循环直至试件达到极限应变发生脆性破坏，应按照加载路径的反向顺

序依次将施加的应力卸掉，避免应力卸载造成试件二次破坏。

7.4 岩石动力扰动真三轴压缩时效试验

7.4.1 岩石真三轴动力扰动压缩时效试验中，试件安装及声发射检测应分别符合 7.2.1 和 7.2.2 的规定。

7.4.2 岩石真三轴动力扰动压缩时效试验应在恒温条件下进行，试验过程中外部环境温度波动不宜超过 1℃。

7.4.3 岩石动力扰动真三轴压缩时效试验的应力施加应遵循下列步骤：

1 按照 7.2.3 将试件加载至设定的最小主应力和中间主应力水平。

2 当进行单级动力扰动时效加载时，保持 σ_2 和 σ_3 不变，采用应力控制方式，以同样速率继续施加最大主应力 σ_1 至设定的应力水平，并保持应力恒定。开始施加动力扰动应力，动力扰动幅值、扰动频率和单级扰动时长应根据岩石试件性质及试验目的确定；当进行多级动力扰动时效加载时，保持 σ_2 和 σ_3 不变，采用应力控制方式，以同样速率梯级增加 σ_1 至设定的每一级应力水平，分别开始施加动力扰动应力。多级动力扰动时效加载的应力级差应根据试验目的确定。

3 当试件发生动力扰动时效失稳破坏时，应按照加载路径的反向顺序依次将施加的应力卸掉，并避免造成附加的试件破坏。

7.4.4 试验过程中，室内湿度应控制在±5%的允许误差范围内，各方向主应力恒定误差不宜超过 0.1%，且试验应符合 7.2.3 的规定。

7.4.5 岩石的每级动力扰动时效加载时间应根据试件变形和应力水平综合确定，硬岩试件的每级加载时间适当增加。

7.4.6 试验过程中应实时采集应力、变形、破裂的数据，数据采集速率应根据每级动力扰动时效加载时间确定。

8 试验数据处理

8.1 一般规定

动力扰动试验结束后应对岩石破坏过程的应力、应变(变形)、破裂声发射及相关参数进行计算,并对试验结果进行整理。应力、应变等变量应以压为正、拉为负进行计算。

8.2 应力及强度参数计算

8.2.1 作用在试件表面的主应力应按公式(1)计算:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_i} \quad (8.2-1)$$

式中:

i ——1, 2, 3;

σ_i ——试件的第 i 主应力, MPa;

F_i ——试件的第 i 主应力方向的荷载, N;

A_i ——荷载 F_i 对试件的作用面积, mm²。

8.2.2 作用在试件表面的扰动应力幅值应按公式(2)计算:

$$\sigma_{id} = \frac{F_{id}}{A_i} \quad (8.2-2)$$

式中:

σ_{id} ——试件的第 i 主应力方向的动力扰动应力, MPa;

F_{id} ——试件的第 i 主应力方向的动力扰动荷载, N;

A_i ——动力扰动荷载 F_i 对试件的作用面积, mm²。

8.2.3 作用在试件表面的扰动应力频率应按公式(3)计算:

$$f = \frac{1}{T} \quad (8.2-3)$$

式中:

f ——动力扰动应力频率, Hz;

T ——动力扰动应力一个周期所需时间, s。

8.3 应变及变形参数计算

8.3.1 试件主应变按公式(4)计算:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (8.3-1)$$

式中:

ε_i —— σ_i 方向试件的主应变;

l_i —— σ_i 方向试件的初始长度, mm;

Δl_i —— σ_i 方向上试件的变形量, mm。

8.3.2 岩石的体积应变按公式(5)计算:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (8.3-2)$$

式中:

ε_v —— 试件的体积应变。

8.3.3 弹性模量应根据胡克定律进行换算, 变形模量应按公式(6)计算:

$$E_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \quad (8.3-3)$$

式中:

E_i —— σ_i 方向的变形模量, GPa;

$\Delta \sigma_i$ —— σ_i 方向的应力增量, MPa;

$\Delta \varepsilon_i$ —— σ_i 方向的应变增量。

8.4 试验结果

8.4.1 岩石峰前、峰后真三轴动力扰动压缩变形破坏试验中, 宜以主应力(σ_i)为纵坐标, 应变(ε)为横坐标绘制应力-应变曲线, 并在图中表明 σ_2 、 σ_3 和动力扰动幅值 A 、频率 f 。曲线应包含三个不同轴向应变。

8.4.2 试验后宜以声发射振铃计数等 AE 参数、应力 (MPa) 为纵坐标, 加载时间 (s) 为横坐标绘制二维曲线。

8.4.3 试验后应对试件的最终破坏形态进行素描, 并绘制出试件表面的裂纹发育情况, 以及测量主破裂面的破坏角。在表达试件的破裂面信息时, 可借助扫描电子显微镜(SEM)、

CT 扫描仪、破裂面 JRC 粗糙度扫描以及偏光显微镜等仪器，分析破裂面上的细观破坏模式、微裂纹发育情况等。

8.4.4 岩石真三轴动力扰动压缩破坏试验中，应给出峰值破坏强度在不同扰动频率、扰动幅值、方向、时长（次数）改变过程中的变化特征。

8.4.5 试验数据整理完毕后应编制试验报告，报告中宜包含试验背景、试验目的、试件描述、试验原理和方法、试验内容以及试验结果等。

附 录 A
深部工程多源振动监测

A.0.1 振动监测记录应按表A.0.1规定内容填写 。

表 A.0.1 振动监测记录表

仪器型号：_____ 工程名称：_____ 测量日期：_____

掌子面桩号							
工程地质描述							
测点桩号		径向深度	传感器安 装深度	振动监测数据			爆破参数/TBM 掘进参数/地震震 级
				速度	加速度	主振频率	

测量人：_____ 计算：_____ 校准核对：_____

附 录 B
岩块采样记录表

B.0.1 岩块采样记录应按表B.0.1规定内容填写。

表 B.0.1 岩样采集记录表

采样日期：_____

采样单位：_____

岩样编号	采样地点	采样方法	岩样类型	岩样规格	岩性描述	结构面描述	岩脉描述	埋深	工程问题 描述	备注

记录：_____

校核：_____

附 录 C
真三轴试样制备记录表

C.0.1 试样制备记录应按表C.0.1规定内容填写。

表 C.0.1 真三轴试样制备记录表

采样日期：_____

采样单位：_____

岩样编号	岩样类型	试样编号	试样 尺寸 (mm)	尺寸 偏差 (mm)	含水状态	是否含 结构面	结构面 描述	是否含 岩脉	岩脉 描述	备注

记录：_____

校核：_____

附 录 D
试验记录表 D.0.1~D.0.3

D.0.1 岩石峰前真三轴动力扰动压缩变形破坏试验记录应按表D.0.1规定内容填写。

表 D.0.1 岩石峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验记录表

送样单位：_____

工程名称：_____

试验日期：_____

试件编号	开挖应力水平		动力扰动水平			控制方式			试验结果	
	σ_2 MPa	σ_3 MPa	开始 时机	频率 f	幅值 A	扰动 级差	加载 方式	加载 速率	动力扰动 时间	峰值强度

试验人：_____

计算：_____

校准核对：_____

D.0.2 岩石峰后真三轴动力扰动压缩变形破坏试验记录应按表D.0.2规定内容填写。

表 D.0.2 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验记录表

送样单位：_____ 工程名称：_____ 试验日期：_____

试件编号	开挖应力水平		动力扰动水平			控制方式			试验结果	
	σ_2 MPa	σ_3 MPa	开始 时机	频率 f	幅值 A	扰动 级差	加载 方式	加载 速率	静力峰值	破坏强度

试验人：_____ 计算：_____ 校准核对：_____

D.0.3 岩石动力扰动真三轴时效压缩变形破坏试验记录应按表D.0.3规定内容填写。

表 D.0.3 岩石动力扰动真三轴时效压缩变形破坏试验记录表

送样单位：_____ 工程名称：_____ 试验日期：_____

试件编号	开挖应力水平		动力扰动水平			时效控制			试验结果	
	σ_2 MPa	σ_3 MPa	开始 时机	频率 f	幅值 A	时效 时长	时效 级差	时效 温度	峰值强度	动力扰动 时长

试验人：_____ 计算：_____ 校准核对：_____

用词说明

为便于在执行本规程条款时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本标准引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本标准。

《公路工程岩石试验规程》 JTG 3431-2024

《铁路工程岩石试验规程》 TB 10115-2023

《水利水电工程岩石试验规程》 SL/T 264-2020

《岩石三轴试验仪校验方法》 GB/T 40961-2021

《深部卸压工程常规三轴岩石力学测试规范》 T/GRM 058-2023

《深部工程岩体围岩变形灾害释能主控技术规范》 T/GRM 040-2022

《岩土工程勘察规范》 GB 50021

《敞开式 TBM 施工隧道振动监测 技术规程》 T/CI 489-2024

《爆破振动监测技术规范》 T/CSEB 0008-2019

中国工程建设标准化协会标准

硬岩动力扰动真三轴试验标准

T/CECS ××××—202×

条文说明

制定说明

本标准制定过程中，编制组进行了深部工程现场振动监测、硬岩取样方法、室内动力扰动真三轴试验等方面的调查研究，总结了我国深部工程硬岩动力扰动真三轴试验操作的实践经验，同时参考了国内外先进技术法规、技术标准，通过大量现场监测、室内试验等实践获得了硬岩动力扰动真三轴力学性能测试过程操作流程。

在深部隧道施工和运营过程中，动力扰动常常会对隧道结构和周围岩体产生显著影响，甚至引发灾难性事件。当隧道位于深埋岩层中时，地应力水平较高，岩体本身存在应力集中现象。在这种情况下，外界动力扰动如地震、爆破、TBM振动、列车振动、岩爆应力波等作用于隧道及其周围岩体，可能导致岩体内部应力的重新分布和积累。动力扰动会引起岩体的应力波动，导致岩体强度降低，裂缝扩展，甚至发生岩爆等突发性灾变现象，危及施工人员和设备的安全。因此，深入研究和理解动力扰动对深部硬岩的影响机制，制定科学的设计和施工方案，采取有效的监测和防护措施，显得尤为重要。只有这样，才能有效预防和减轻动力扰动引发的灾变风险，确保深部隧道的安全与稳定。

岩石力学室内试验是突破现场“卡脖子”问题的重要研究手段，目前深部硬岩真三轴力学试验机已经演化为可以在高应力开挖路径基础上来施加动力扰动应力，用以完善深部硬岩扰动力学的研究。当前，关于硬岩静力试验的标准已经较为完善，这为研究岩体静力学特性研究提供了可靠的实验手段支持。

然而，相比之下，动力扰动真三轴试验方法缺乏，这主要体现在地应力场还原技术方法、原位采样标准化建议与规范以及实验操作等几个方面。设备的动态加载能力和高频测量精度仍需进一步提升，以便更准确地捕捉岩体在动力扰动下的瞬态响应。试验标准和操作方法缺乏统一的标准和规范。各实验室采用的试验方法、设备参数和试样制备方式存在较大差异，导致试验结果的可比性和重复性较差。这种不一致性使得不同研究之间的数据难以进行有效对比和综合分析，限制了研究成果的推广。

因此，硬岩动力扰动真三轴试验条件下微观破裂机制和力学行为尚未得到充分研究。现有的理论模型、判别准则在处理复杂的动力扰动问题时，仍存在一定局限性。对岩体在高应力、高频率动态加载条件下的力学特性和破坏模式的研究仍需深入探索。

1 总 则

本文件为基础性试验标准，可用于水利水电、矿山、油气、交通、国防、工业与民用建筑等领域的各类岩石工程。本文件对硬岩动力扰动真三轴力学性能测试流程和技术要求进行了相关规定，重点介绍了适用于深部工程原位振动监测方法、深部工程开挖掘进地应力反演计算、深部工程围岩取样及运输规定，以及动力扰动真三轴试验具体操作规范等。详细介绍了岩石峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验、岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验和岩石动力扰动真三轴压缩时效试验。

本文件的主要使用对象为从事岩石力学试验和研究的相关人员。

2 术语和定义

2.0.1 振动波

指在深埋隧道工程建设过程中，由爆破或机械作业等引起的振动传播现象。对于钻爆法施工的隧道，振动波主要源于掌子面爆破或相邻工作面爆破所产生的应力波，沿围岩传播，并可能对支护结构和周边岩体稳定性造成影响。在采用盾构等机械掘进的隧道中，振动波可来源于刀具切削过程中的岩体破碎、盾构设备运转过程中的机械振动。此外，地震产生振动波，对隧道结构和围岩稳定构成扰动。

2.0.2 监测点

设置于被观测对象表面或围岩内部，用以获取结构或介质在特定工况下振动频率、幅值变化的观测位置。监测点通常包括埋设式、贴附式和远程传感式等多种形式，可用于分析围岩或支护结构在施工及运营期间的动力响应特征，是实施安全预警与工程风险控制的重要手段。

2.0.3 岩脉

指在地质构造或岩浆活动过程中，岩浆沿断裂或裂隙侵入上覆岩层并冷却固结形成的线状或带状岩体。岩脉常呈脉状、板状展布，其组成物质、物理力学性质及与围岩的接触关系对隧道围岩稳定性具有显著影响，尤其在动力扰动作用下可能成为潜在的弱面或结构不连续面。

2.0.4 结构面

指地质体内部存在的不连续面或弱面，包括节理、层理、断层、劈理等各类地质分离面。结构面一般具有较低抗拉强度，易在外界荷载或动力扰动下产生位移或开裂，对隧道围岩的力学行为及破坏模式有决定性影响，是进行岩体力学分析与工程设计的重要依据。

2.0.5 原位特性

指岩土体在自然环境中所具有的力学、结构和物理状态特征，未受工程扰动或采样扰动影响。原位特性包括天然应力状态、孔隙结构、含水状态等，反映岩体的真实工程行为，是分析岩体稳定性和开展工程模拟的基础。

2.0.6 初始地应力

存在于地层中的天然应力状态，通常在工程扰动前保持平衡状态。初始地应力主要包括垂向应力和水平应力，是地下岩体在地壳演化、地质构造和重力作用下形成的原始应力

场，广泛用于地下开挖扰动分析、围岩分类与支护设计中。

2.0.7 开挖应力路径

指岩体在地下空间开挖过程中所经历的应力演化过程。随着隧道或地下结构逐步开挖，原始平衡状态被打破，不同部位如拱顶、边墙和拱底的应力状态将发生重分布，形成动态应力场。该路径对裂隙演化、围岩失稳与支护响应具有重要影响。

2.0.8 动力扰动

指岩体在受到外界动态荷载（如爆破振动、机械振动、地震波动等）作用时，内部应力与应变状态发生变化，并引发微裂纹萌生、扩展或破坏过程的物理力学行为。动力扰动常导致岩体局部或整体失稳，是隧道设计与安全评估中需重点考虑的因素之一。

2.0.9 峰前动力扰动岩石力学试验

一种模拟岩石在应力尚未达到极限强度前，受到动力扰动时力学响应行为的实验方法。该试验用于研究岩石在加载过程中动力扰动对其变形、破坏与稳定性影响，有助于揭示裂纹萌生前的能量积累机制与扰动敏感性。

2.0.10 峰后动力扰动岩石力学试验

一种在岩石达到峰值强度后施加动力扰动以探究其残余强度、应变软化及破裂模式变化的实验方法。峰后扰动试验能更真实反映岩体破坏后的再加载能力，适用于揭示隧道围岩失稳后的次生破坏机制。

2.0.11 动力扰动时效岩石力学试验

指在岩石经历长时、连续、反复的动力扰动后，通过控制动力扰动施加时间，研究其力学性能随时间演化规律的实验方法。该试验揭示了长时动力扰动作用后的力学衰减、结构松弛或动态蠕变趋势，是分析围岩长期稳定性和时效损伤效应的重要技术手段。

3 振动波监测

3.1 一般规定

3.1.1 振动监测包括钻爆法开挖振动监测和TBM开挖振动监测，偶发振动监测包括地震波监测。

3.1.2 本条对现场踏勘及资料收集提出了要求。为了对振动效应进行有效监测，提高监测工作质量，需详细了解和收集现场资料，包括地形、地质，以及工程施工参数（掘进里程、震源参数、掘进参数等）。通过调查进一步明确具体要求和现场实施的可行性，确定监测目的、监测方案、监测范围和监测时长。

3.1.3 本条提到的地质信息是指地质灾害区域的具体工况，一般包括埋深、地应力大小和方向、岩性、地质灾害、岩体结构面、地下水等，进行详细描述和记录，建议采取测量、摄影或录像等手段进行宏观调查，并结合振动监测结果，评估地质灾害受开挖扰动的影响程度，主要包括轻微、中等、严重。施工前后对比的主要内容一般包括：

- 1 灾害区域的深度、宽度。
- 2 灾害区域破碎程度有无进一步加深情况。
- 3 节理裂隙有无进一步发育情况。

3.1.4 本条提到的完整的振动监测流程参见图1。

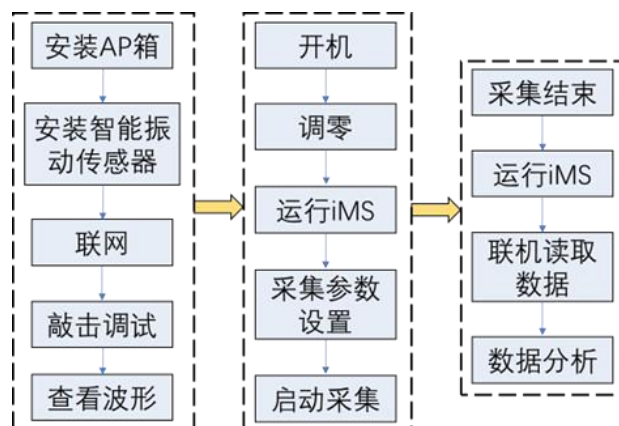


图1 振动监测流程图

3.1.5 本条是由于，噪音信号会造成误触发而导致采集数据的不准确。因此，在正式开展监测前，需做预监测进行设备调试，以获得合适触发电平，既可阻止干扰信号引起的误触发，又保证目标信号的有效记录。

3.2 振动监测设备

3.2.1 本条的振动监测设备精度需高于国家标准5%，速度、加速度、频响量程需满足监测要求。

3.2.2 振动监测系统组成部分参见图2。

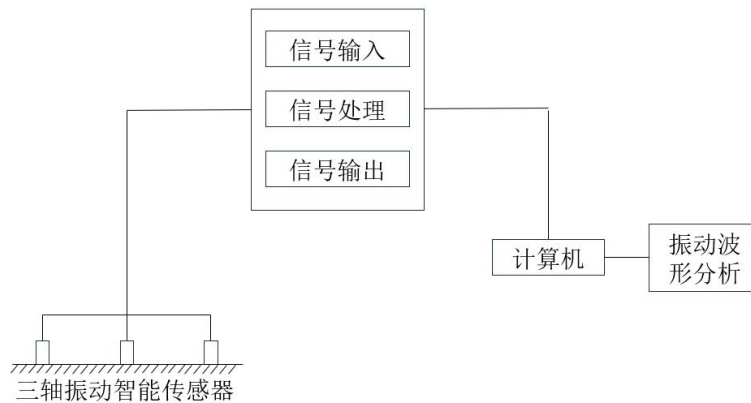


图2 振动监测系统

3.2.3 本条是由于测振仪中元器件因不当使用和存放造成失准，而传感器属于敏感器件，使用环境差，强振动，极易受损。传感器需经计量部门标定或校准，周期一般不超过1年。

3.2.4 由于现场监测环境复杂，易受各类电磁干扰，可能造成监测仪器运行偏差从而影响监测精度，需对传感器定期维护保养，一般包括灰尘清理、密封性及常规功能检查等检查。

3.2.5 本条的振动监测设备应包含速度传感器或加速度传感器、记录设备等，并要符合下列规定：

- 1 传感器频带线性范围需符合监测要求。
- 2 监测仪器防尘、防潮性能要满足IP65防护等级要求，抗高温和低温性能，需满足-30℃~80℃的运行环境要求。

3.3 布置测点

3.3.1 本条在于岩石介质表面或内部安装设备前，需对测点进行表面平整、清理或清洗。

3.3.2 破碎带等不良地质处的监测误差大，测试点一般选择在同一基岩平面以保证监测结果的有效性。

3.3.3 本条由于地质条件的复杂性和岩体的非均质性，振动波在传播过程中受地应力、结构面、断层破碎带、地层岩性等环境因素影响，传感器布置时应重点现场工况进行布置。

3.3.4 本条是为了有效获取被测信号，除了传感器自身的性能指标满足一定要求外，传感器的安装固定也极为重要的。为了得到振动或结构动力响应数据，传感器需与测点牢固贴合或刚性连接，同时需避免振动造成传感器松动、滑落，使振动信号失真。有以下布设方法可供选择：

- 1 通过地插固定设备；
- 2 通过石膏或胶水固定设备；
- 3 通过设备底部M5粗口螺丝固定设备；
- 4 通过内置磁环固定设备。

3.4 振动监测步骤

3.4.3 传感器通过石膏或胶水与围岩固结，保证固定紧密。传感器相对隧道轴线方向的布置示意图参见图3。

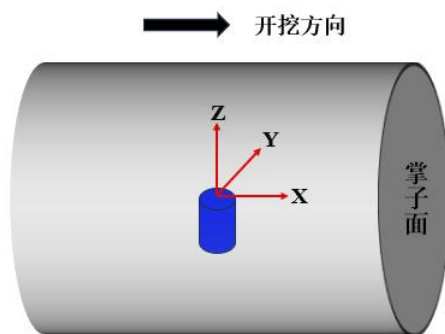


图 3 传感器布置示意图

3.4.4 参数设定需要开展预试验，根据监测振动类型预设参数，测试完成后检查振动数据是否清晰、完整。

3.5 数据处理及报告编制

3.5.1 本条是由于振动监测的现场条件十分复杂、影响因素众多，监测成果会因仪器参数、测试方法和传感器布设等造成偏差。因此，现场监测结束后，应对地质资料、灾害信息、数据参数进行比对和校核。

4 开挖应力路径确定

4.2 深部工程岩体三维原岩应力的获取

4.2.1 受地形、地应力测量技术、经费等条件限制，工程施工前地应力信息相对匮乏。需要在宏观地应力分布特征指导下，开展局部区域三维地应力场分析，并在开挖过程中不断验证宏观和局部地应力场的分析结果。

1 针对工程区域构造运动的背景，结合世界应力图，运用构造地质学理论，判断构造应力场的方向，得到工程区域原岩应力场的总体分布特征及规律。由山体及河谷组成的特殊地形条件，地应力分布规律的分析不能简单应用埋深自重的经验，必须考虑地形对地应力场的影响。

2 在工程区域开展地应力测试工作非常重要，测试成果则作为认识地应力分布特征的基础依据，但由于受到局部地质条件的影响，且测试方法本身存在一定的误差。因此，首先需要对测试结果的正确性进行审查，然后分析测试结果所反应出的总体规律，以便剔除与整体规律不符的测试结果，这些成果往往仅能反应受到局部地质条件影响的地应力状态，这对于工程区域总体地应力场的认识是无意义的。

3 基于现场揭露信息对局部洞段地应力状态进行验证分析，深部硬岩地下工程开挖后会揭露出围岩破坏与损伤、岩芯饼化等信息，这些信息是反映现场围岩中应力作用效应的最直接证据。因此可以根据这些信息检验地应力反演结果的合理性。如果先前分析得到的结果与这些信息相符，则可直接进行后续研究；若二者不符，则应以这些信息为基本依据，进行地应力的二次分析。但是，结构控制型破坏（如塌方）发生的位置与地应力方向之间不存在确定的关系。

4.2.2 三维原岩地应力场反演过程中，三维几何模型范围必须包含全部研究区域，且适当增大，减少边界效应影响。边界处的几何约束条件必须易于确定，包括山脊线与河谷线，因其两侧地形大致对称，可假定此类边界条件不会在与边界线垂直方向上发生位移。适当增大计算范围，同时要考虑计算机的计算能力。

采用数值模拟分析方法，以现场实测地应力数据为基础，进行地应力回归分析是获取大规模三维地应力场分布的有效手段。多元线性回归法是较成熟的地应力场反演方法，将

地应力回归计算值 $\hat{\sigma}_k$ 作为因变量,把数值计算求得的自重应力场和构造应力场相应于实测点的应力计算值 σ_k^i 作为自变量,则回归方程的形式为:

$$\hat{\sigma}_k = \sum_{i=1}^n b_i \sigma_k^i \quad (1)$$

式中: k 为观测点的序号; $\hat{\sigma}_k$ 为第 k 观测点的回归计算值; b_i 为相应于自变量的多元回归系数; $\hat{\sigma}_k$ 和 σ_k^i 为相应应力分量计算值的单列矩阵, n 为工况数。

假定有 m 个观测点,每个测点有6个观测分量,则最小二乘法的残差平方和为:

$$Q = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk} - \sum_{i=1}^n b_i \sigma_{jk}^i)^2 \quad (2)$$

式中: σ_{jk} 为第 k 观测点 j 应力分量的观测值, σ_{jk}^i 为 i 工况下 k 观测点 j 应力分量的数值计算值; 应力分量 $j=1,2,\dots,6$, 对应6个原岩应力分量。

根据最小二乘法原理,可以得 n 个待定回归系数 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$, 则计算区域内任意一点的回归初始应力可由式 (1) 获得。

4.2.3 在岩石工程领域,地应力场主要由重力和构造作用产生。同时,岩体的物理特性、风化、剥蚀等作用,地形、地质构造、地温及地下水等众多因素的影响,最终形成现今的应力场。大量工程实践表明,自重、构造运动和地形是岩体地应力场形成的主要因素,故在研究中应作为主要考虑的影响因素;地质构造、地温与地下水等因素影响程度相对较小,也可在模型中考虑。

4.3 开挖应力路径的获取

4.3.1 现场实测地应力测量设备配置选择和技术步骤,可以参考DB/T 14-2000的相关信息。

5 试样制备

5.1 岩样采集

5.1.1 本条明确了岩样采集时应遵循的基本要求，以确保试样的代表性和可靠性。在工程现场采样前，应充分了解地质资料，结合围岩特性、应力分布及地质构造条件，选取典型的采样区域。采样时，应避开可能影响试样质量的蚀变区、风化带和断层破碎带等区域，从而最大程度减少外部因素对试样力学性质的干扰。此外，对于含结构面和含岩脉的岩样采集，应结合结构面和岩脉的产状、发育程度及其与隧道的空间位置关系，保证采样点的科学性和针对性。

5.1.2 本条规定了岩块采样的具体要求，旨在规范采样操作，减少人为因素对试样质量的影响。采样时应避开不良地质区域，确保采集的岩块具有代表性和完整性。对于含结构面和含岩脉的岩体，强调了采样区域的选择及岩体连续性、规整性的要求，以保证试样在后续试验中的一致性和准确性。

5.1.3 本条明确了采样数量的要求，以确保试样数量满足试验需求。通过规定含结构面岩样和含岩脉岩样的采集数量不少于试样需求的3倍。此外，规定岩块规格应大于 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，能够有效满足试样加工的尺寸要求。

5.1.4 本条对岩样的记录和编号提出了具体要求，旨在规范采样信息的管理。采样记录的内容包括工程背景信息、采样方法、岩性描述和工程问题描述等，能够全面反映采样的基本情况。对于含结构面和含岩脉的岩样，需进一步记录其形态和产状，以便在后续试验中提供完整的基础资料。

5.1.5 本条明确了岩块在装箱和运输过程中的保护措施，以防止岩样在运输过程中受损或风化。采用多层塑料保鲜膜和柔性泡沫塑料对岩块进行密封和缓冲，能够有效保持岩块的原位特性。通过木箱包装和固定，减少了运输过程中可能出现的振动和碰撞对试样完整性的影响。

5.2 试样加工

5.2.1 本条对试样的形状和尺寸提出了明确要求，旨在减少试验数据的离散性，提高试验结果的精确性。通过规定试样的长、宽、高比例及尺寸公差，确保了试样在加工过程中的

规范性。同时，要求试样最短边的边长至少是岩石颗粒最大直径的20倍，以减少岩石颗粒尺寸对试验结果的影响。此外，试样端面的平整度和垂直度公差的限制，进一步提高了试样在实验中的精度。

5.2.2 本条对试样加工的具体步骤进行了规范，强调了含结构面和含岩脉试样加工时的特殊标记要求，以确保试样在实验中的方向性和准确性。加工过程中，使用岩石切磨一体机进行初加工和打磨，并预留足够的长度，为后续的精确制备提供保障。

5.2.3 本条规范了试样编号与记录的要求，确保试样信息的完整性。记录内容涵盖岩样编号、试样类型、试样尺寸、是否含有结构面或岩脉等信息，为后续试验提供了详细的背景资料。

5.2.4 本条对试样制备完成后的基本物理参数测定提出了要求，以评估试样的物理特性。通过测定岩样的岩性、矿物成分、试样尺寸、相对密度和波速等参数，可以为后续试验分析提供依据。同时，含结构面和含岩脉的试样需记录其结构面和岩脉的产状及分布情况，进一步丰富了试样的地质信息。

6 动力扰动真三轴试验设备与试件安装

6.1 一般规定

6.1.1 为了记录试件的形态和构造，需在进行实验前对试件的岩相、微观结构、矿物成分进行素描或拍照，以便于试验前后对比分析。

6.1.2 ~ 6.1.3 动力扰动真三轴试验设备中的加载活塞力传感器、位移传感器、温度传感器等仪器/仪表要进行定期检测或校准，试件夹具中的位移传感器、温度传感器等仪器要定期进行更换以及校准，以确保试验数据的准确性与可重复性。动力扰动真三轴试验试件安装，要确保试件位于夹具前后、左右中心位置，避免在后续加载过程中出现加载偏心问题，影响试件破裂模式，以及峰值强度等物理力学特性的准确获取。动力扰动真三轴试验过程中要时刻注意试验机油源温度示数，避免高温损伤试验设备。

6.2 试验设备

6.2.1 ~ 6.2.2 岩石伺服控制动力扰动真三轴试验机主要由主机刚性加载模块（三主应力方向各两个刚性活塞）、伺服控制模块以及数据采集模块组成，集高应力加载、动力扰动加载、伺服控制、数据采集，以及试验结果预处理功能为一体。刚性加载模块用于提供加载过程中的开挖应力路径加载，以及动力扰动应力加载，伺服控制模块用于实时监测试件的应变数据，即时采取最有效控制方式，以获得岩石真三轴峰前、峰后全应力-应变曲线，数据采集模块可根据需求调整采样间隔以准确获取岩石破裂全过程的应力、应变数据。动力扰动真三轴试验机一般采用闭环伺服控制，以便实现岩石试件加载过程稳定，从而获得准确的岩石真三轴全应力-应变曲线。

硬岩真三轴试验机根据试件加载边界类型不同分为刚性加载试验机、柔性加载试验机和混合型加载试验机。目前普遍应用于硬岩真三轴加载的两类试验机分别为：三个刚性加载边界的试验机；两个刚性加载边界和一个柔性加载边界的试验机。由于两类试验机的三向应力加载方式不同，导致其主要用途和研究侧重也不同。其中，三个刚性加载边界的试验机由于其试件加载夹具在加载过程中处于相互分离状态，即互不干扰。岩石试件在极高开挖应力路径下施加动力扰动可能会给试件夹具带来共振效应，因此，此类型试验机更适合用于硬岩动力扰动真三轴试验。

试验机刚性加载框架的刚度要大于硬岩的刚度，以防止框架刚度不足导致岩石峰后阶段出现失控，发生脆性破裂。根据岩石单轴压缩应力-应变试验的ISRM建议方法，试验机刚度要大于10 GN/m。

硬岩试件在动力扰动真三轴应力加载过程中，会出现偏心加载导致试件受力不均匀，而影响试验最终结果准确性，故需要对岩石的偏心加载进行消除。现代岩石力学真三轴试验机消除偏心加载的方式一般有两种，一种方法是使用可移动加载框架结构，借助反力作用原理实现同步变形补偿，该方法因其造价低、偏心控制效果优异而得到广泛使用。另一种方法是同一主应力方向两侧刚性加载作动器采用伺服控制完成实时同步对中，但这种装置的成本非常高，且对伺服控制精度要求高。岩石试件动力扰动真三轴偏心加载补偿控制示意参见图4。

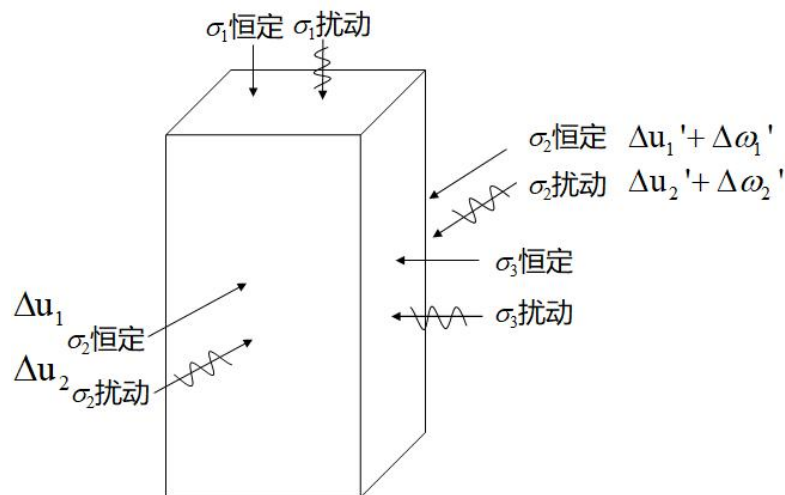


图 4 试样偏心加载补偿示意图

6.3 试件装配与安装

6.3.1 ~ 6.3.2 在三个主应力均为刚性活塞加载设置的动力扰动真三轴试验前，岩石试件装配要保持对中，可通过尺子等测量道具进行检查，防止加载过程中在试件边界出现剪切效应。

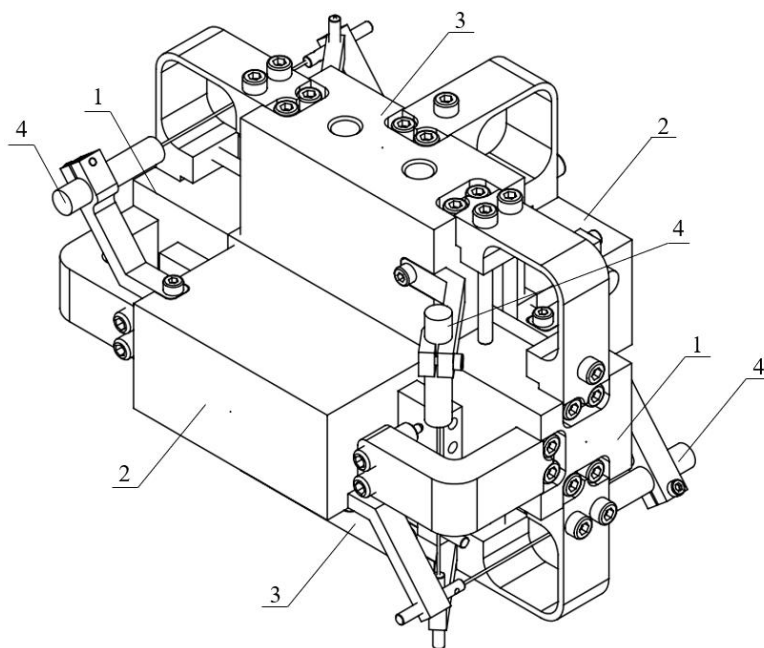
在动力扰动真三轴加载过程中，由于金属夹具与岩石变形不同步，导致金属夹具与岩石试件之间存在摩擦力，产生端部效应，限制岩石试件端部自由变形及破裂，最终导致试件的破裂模式失真。因此要进行减摩处理，以避免金属夹具与试件的摩擦对加载边界条件的影响。根据经验，其中硬脂酸和凡士林混合润滑剂的减摩效果较好，硬脂酸和凡士林混合润滑剂需要安装 1:1 配比，在一定温度下加热融化后冷却凝固使用。另外，在金属夹具

和硬岩试件之间孔隙可以放置铜膜片，放置铜膜片有两个有益效果：其一为可以进一步地减小端部摩擦效应，其二可以隔绝减摩剂与硬岩试件，防止减摩剂在高压条件下被压入硬岩试件表面，导致测试结果不准确。

“三刚”型动力扰动真三轴试验机的试件装配步骤如下：

1 试件装配前，在试件与金属夹具之间进行减摩处理：将减摩材料均匀涂抹在金属夹具与试件接触的表面上并覆盖铜膜，防止减摩材料侵入岩石。铜膜厚度一般不超过 0.02 mm。

2 目前较为可靠的“三刚”型动力扰动真三轴金属夹具设计，参见图 5。在装卸试件时，可将 σ_2 方向金属夹具固定螺丝拆卸后，将 σ_2 方向金属夹具取下，将岩石试件放入夹具中。放置试件过程要严格注意试件安装对中情况，必要时可用长度测量工具，尽可能地保证试件两侧空白角长度一致，以避免真三轴加载过程中出现偏心加载。调整好位置后，将 σ_2 方向金属夹具安装归位后通过螺丝锁固，此时要注意锁固过程中不要让调整好的岩石试件位置出现变化。



标引序号说明：

1— σ_1 方向试件夹具；2— σ_2 方向试件夹具；3— σ_3 动力扰动方向试件夹具；4—试件位移传感器

图 5 “三刚”型动力扰动真三轴试件夹具

6.4 变形传感器安装

6.4.2 硬岩动力扰动真三轴试验过程中不同加载方向岩石的变形需要进行单独测量。为减小测量误差，可在试件每个主应力加载方向对称面上布置两个变形传感器。

刚性加载方向上的位移传感器可分别固定在试件的金属夹具上，且要保证对称布置的传感器在空间上无论任何角度均平行于试件该加载方向，以保证变形数据测量准确。在后续数据处理上要将测量出的夹具位移数据减去金属夹具变形，获取真实的硬岩试件变形数据。

为便于伺服反馈控制，变形和应力等数据采集应由高分辨率的数据采集通道进行采集，作为伺服反馈输入信号，不应单独采用应变仪进行采集。伺服反馈系统要形成闭环通路，将变形数据实时作为反馈信号传递给伺服控制中心，以便于更稳定地将硬岩试件控制至岩石峰后，获取岩石试件的动力扰动真三轴全应力-应变曲线。

7 动力扰动真三轴试验

7.1 一般规定

7.1.1 一般地，动力扰动真三轴实验方案设计要紧密联系深部工程硬岩动力扰动环境。试验方案设计应设置正交设计并设置对照组，以便于后续试验数据对比与分析。

7.1.2 同一试验工况下，若试验结果存在较大离散性，可剔除偏差最大的试验数据后，将剩余所有试验数据取平均值来代表该应力条件下的结果。同一试验工况下，数据离散性小的试件，重复性试验试件数量可选取 3 个；离散性较大的情况，重复性试验个数以 5~7 个为宜。

7.2 岩石峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验

7.2.2 通道灵敏度检验方法如下：利用断铅模拟声发射源，分别检测不同传感器的响应幅值，其响应幅值宜取三次折断的平均值。各传感器对笔芯模拟源的响应幅值偏差不宜超过 3dB。

噪音检查及过滤方法：试验加载前，测量各通道的平均信号电平值，时间不应小于 5min，所有在用通道均应满足平均信号电平值与检测门槛的差值大于 15dB 的要求。当出现高于检测门槛的噪声干扰时，应检查噪声来源并予以排除。

7.2.3 硬岩峰前动力扰动真三轴压缩变形破坏试验的典型应力路径如图 6 所示：首先采用应力控制方式同步加载 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，直到设定的最小主应力水平；然后保持 σ_3 不变，采用应力控制方式同步加载 σ_1 、 σ_2 ，直到设定的中间主应力水平；然后 σ_2 、 σ_3 保持不变，继续采用应力控制方式加载 σ_1 ；直到设定的动力扰动施加点，开始施加动力扰动应力。动力扰动施加点一般选取岩石开挖应力峰值强度的百分比确定，具体值要根据试验目的及需求确定。

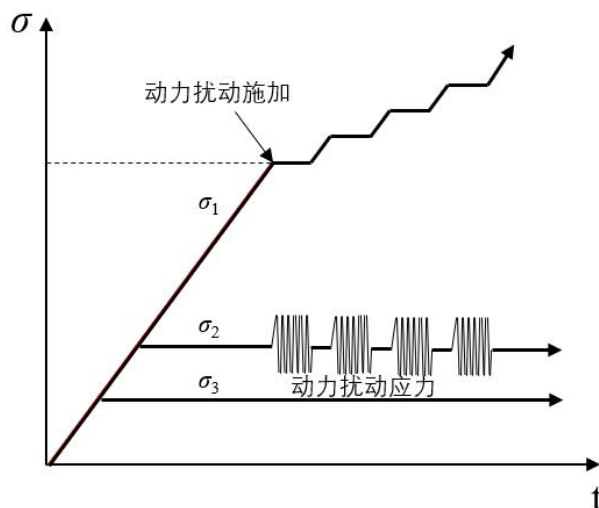


图 6 典型岩石峰前动力扰动真三轴加载应力路径示意图

7.3 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验

7.3.3 岩石峰后动力扰动真三轴压缩变形破坏试验的典型应力路径如图 7 所示：与说明 7.2.3 中区别在于图中虚线位置处，即当 σ_1 - ϵ_1 变形曲线开始偏离线性或达到体应变拐点时，最大主应力方向由应力控制方式转为变形控制方式，通过闭环伺服变形控制获得岩石峰后变形曲线。岩石应力-应变曲线到达峰后，根据实验目的及需求选取动力扰动施加点，此时将变形控制方式转为应力控制方式，开始施加动力扰动应力。

这里需要说明：应力控制方式是指以应力反馈方式控制试验机对试件进行加载。变形控制方式是指以变形反馈控制试验机对试件进行加载，通常分为最大主应力方向变形控制和最小主应力方向变形控制。为避免岩石峰后应变控制出现失控而发生脆性破裂，通常硬岩或脆性强的岩石选用最小主应力方向变形控制。

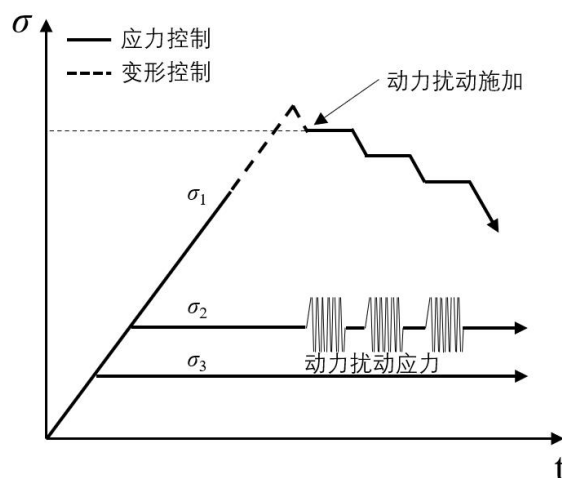


图 7 典型岩石峰后动力扰动真三轴加载应力路径示意图

7.4 岩石动力扰动真三轴压缩时效试验

岩石动力扰动真三轴压缩时效试验主要研究试件在动力扰动真三轴应力条件下，其应力、变形随时间不断变化的限性质，主要体现在动态时效变化方面。

7.4.3 岩石动力扰动真三轴压缩时效试验的典型应力施加步骤与上述基本相同，也可以分为峰前动力扰动真三轴压缩时效试验与峰后动力扰动真三轴压缩时效试验。不同在于单级最大主应力方向恒载，最小主应力或中间主应力方向动力扰动直至破坏；或最大主应力方向梯级加载，最小主应力或中间主应力方向动力扰动直至破坏。其中，梯级加载 σ_1 要根据岩石试件动力扰动真三轴强度和研究内容确定每级应力等级，总分级数量不应超过 9 级。同时，硬岩动力扰动真三轴压缩时效试验最好选取“两刚一柔”型试验机完成，以减小金属夹具与试样端部摩擦，提升试验结果准确性。

8 试验数据处理

8.2 应力及强度参数计算

8.2.1 岩石刚性加载端面上的应力需要进行计算，柔性加载端面上的应力可直接根据液压压力获得。

8.2.2 动力扰动真三轴试验过程中作用在试件表面的扰动应力幅值要根据试验系统动力扰动施加方式确定，如采用点扰动施加方式的动力扰动真三轴试验机，需要用动力扰动杆单次加载的压力值除以点扰动作用的截面积；如采用面扰动施加方式的动力扰动真三轴试验机，需要用动力扰动刚性活塞单次加载的压力值除以作用在试件上的截面积来确定。一般情况，动力扰动幅值在动力扰动真三轴试验机出厂时已设置完成。

8.2.3 动力扰动真三轴试验过程中作用在试件表面的扰动应力频率一般采用正弦波形式进行加卸载。一次加载与一次卸载视作为一次完整扰动周期，频率则是一秒钟内完成周期性变化的次数。

8.4 试验结果

8.4.1 岩石真三轴动力扰动压缩下应力-应变曲线示意图参见图8。

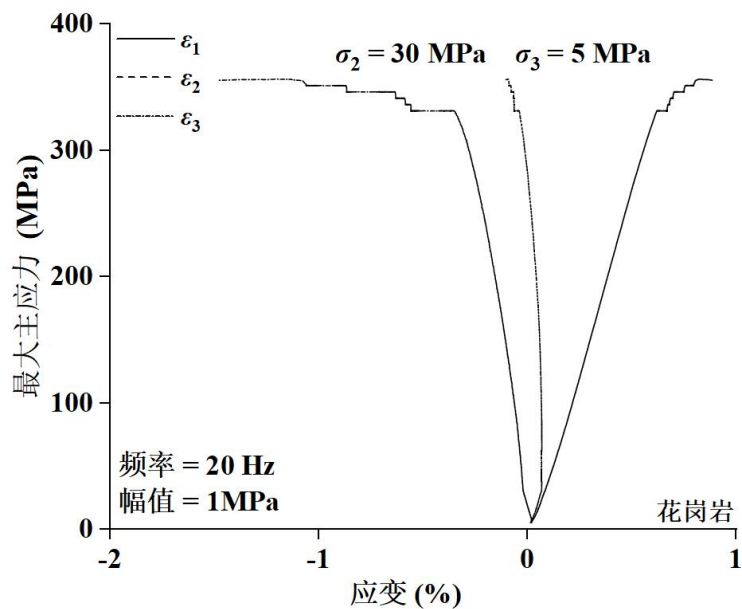


图8 岩石峰前真三轴动力扰动压缩下应力-应变曲线

9.4.2 岩石动力扰动真三轴压缩下声发射参数特征曲线示意图参见图9。

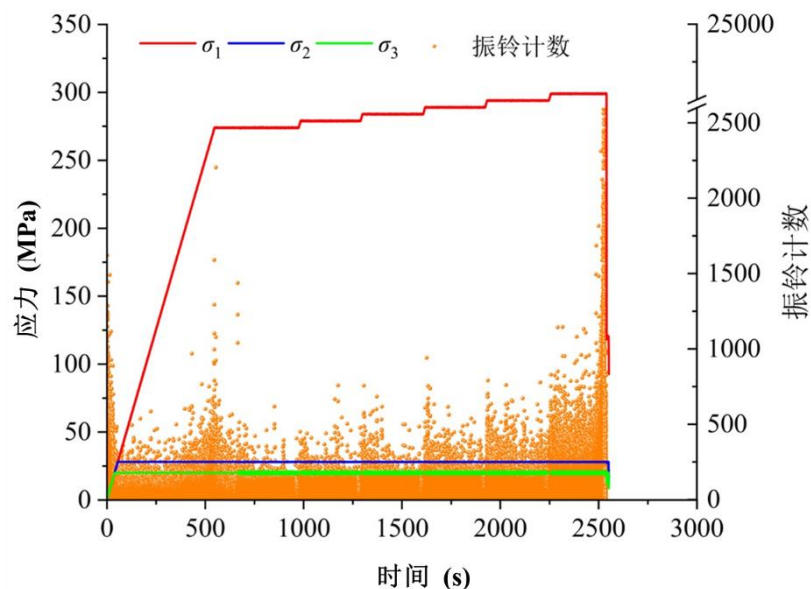


图 9 岩石动力扰动真三轴压缩下声发射参数特征示意图

9.4.3 对试件进行真三轴主应力加载时，由于应力诱导的破坏各向异性，岩石的主破裂面往往平行于中间主应力，垂直于最小主应力，因此试件的破坏角 (θ) 可定义为试件的宏观破裂面的法向方向与 σ_1 方向的夹角。破裂角测量可使用量角器对破坏面的迹线进行测量，并取 3 次以上测试结果的平均值。试件破坏模式示意图参见图 10，试件破裂面扫描参见图 11。

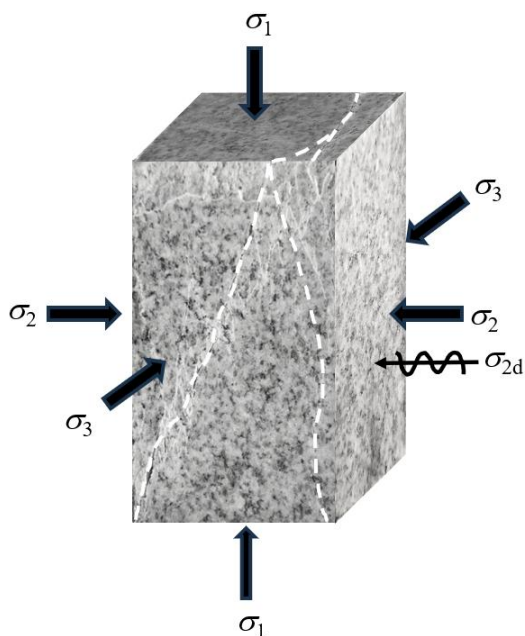


图 10 真三轴试件破裂

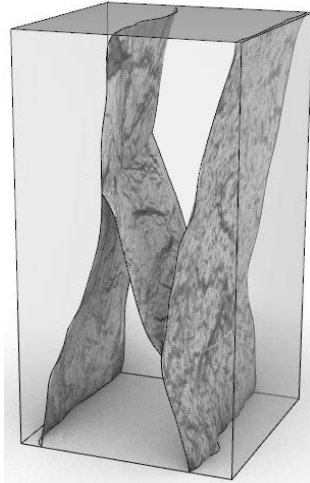


图 11 真三轴试件破裂面扫描