

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM

硬岩微波作用前后强度折减测试技术与方法

Testing technology and method for strength reduction of hard rock before and after
microwave irradiation

2025 年 XX 月 XX 日 发布

2025 年 XX 月 XX 日 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发 布

目录

前 言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

 3.1 微波辅助破岩 microwave-assisted rock breakage 1

 3.2 熔融破裂 melt fracture 1

 3.3 崩裂破裂 burst fracture 1

 3.4 破裂时长 fracture time 1

 3.5 微波致裂 microwave-induced cracking 1

 3.6 微波作用腔体 microwave irradiation cavity 1

 3.7 场微波 field microwave irradiation 1

 3.8 面微波 surface microwave irradiation 2

4 基本规定..... 2

 4.1 一般规定 2

 4.2 技术要求 2

5 硬岩采集与制备..... 2

 5.1 硬岩采样 2

 5.2 硬岩采样规格 2

 5.3 硬岩制备 2

 5.4 硬岩基础物性参数 3

6 硬岩升温特性测定..... 3

 6.1 不同微波功率作用下硬岩升温测定 3

 6.2 不同微波模式作用下硬岩升温测定 5

7 硬岩物理力学参数劣化测定..... 6

 7.1 微波作用下硬岩劣化无损测定 6

 7.2 微波作用下硬岩单/三轴力学参数测定 7

 7.3 成果记录 9

8 硬岩强度折减效率评价..... 9

 8.1 一般规定 9

 8.2 主要仪器设备 10

 8.3 升温特性 10

 8.4 物理力学参数 10

 8.5 多参量微波作用前后硬岩强度折减效率评价规定 12

 8.6 成果记录 12

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。

本文件起草单位：深圳大学、四川大学、中国矿业大学、新疆燕园地空科技发展有限责任公司、东南大学

本文件主要起草人：高明忠、杨本高、宫凤强、谢晶、郝海春、高亚楠、唐瑞烽、王云龙、张洋、白彦博、杨磊、王轩、周雪敏。

硬岩微波作用前后强度折减测试技术与方法

1 范围

本文件规定了硬岩微波作用前后强度折减测试过程中涉及的硬岩采集与制备、硬岩升温特性测定、硬岩物理力学参数劣化测定和硬岩强度折减效率评价。

本文件适用于硬岩微波作用前后强度折减测试。

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，标注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不标注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 4706.90《家用和类似用途电器的安全 商用微波炉的特殊要求》

GB 6722《爆破安全规程》

GB/T 23561.1《煤和岩石物理力学性质测定方法第1部分：采样一般规定》

GB 24849《家用和类似用途微波炉能效限定值及能效等级》

GB/T 50266《工程岩体试验方法标准》

JB/T 6122《弱岩滚刀》

MT/T 198《煤矿用液压凿岩机通用技术条件》

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 微波辅助破岩 microwave-assisted rock breakage

利用微波能量的加热效应对硬岩内部矿物成分加热，发生热膨胀和热应力集中现象，促进裂纹形成和发育，降低岩石破碎能耗的技术。

3.2 熔融破裂 melt fracture

在微波作用过程中，硬岩因微波加热效应导致部分矿物达到熔点，熔融矿物沿宏观裂纹流动，并形成产生新的自由面的现象。

3.3 崩裂破裂 burst fracture

在微波作用过程中，硬岩因微波加热效应导致矿物间的热应力和蒸汽压力超过岩石的抗拉强度，完整的岩石试样崩碎为岩石碎块，产生新的自由面的现象。

3.4 破裂时长 fracture time

在给定的微波功率下硬岩试样在发生熔融或崩裂破裂时的微波作用时长。

3.5 微波致裂 microwave-induced cracking

微波作用时，在硬岩试样发现熔融或崩裂破裂前，硬岩试样因微波加热在表面或内部产生微裂纹，试样保持完整且无新的自由面产生的过程。

3.6 微波作用腔体 microwave irradiation cavity

由金属材料加工成的放置岩石负载的空间，通过波导将微波引入该空间内并形成稳定的电磁场。

3.7 场微波 field microwave irradiation

当硬岩试样被放置于微波腔体内时，岩石在电磁场中因自身介电特性被加热，微波能量从岩石的各方向进入岩石并加热的微波。

3.8 面微波 surface microwave irradiation

区别于场微波，微波能量仅从岩石特定表面进入岩石并加热的微波。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 硬岩微波作用前后强度折减测试技术与方法可运用在地下隧道、水电硐室、交通隧道、煤炭井下开采、金属矿井下开采等硬岩破碎领域。

4.1.2 微波试验过程中应采取保证操作人员安全的措施，微波腔体封闭门应紧闭。

4.1.3 微波试验后应立即清理因熔融或崩裂破裂产生的熔融矿物和碎块，应保持腔体整洁。

4.1.4 微波试验结束后应立即取出被作用试样，并置于通风口的金属托盘上。

4.1.5 微波试验前应排查安全隐患，检查实验设备应正常运转，腔体应能正常封闭。

4.1.6 每次微波试验应完整记录试验工况、使用时间以及试验结果。

4.2 技术要求

4.2.1 微波试验前应测定硬岩试样的电磁学、矿物学、热力学等基础物理参数。

4.2.2 微波试验方案应按特定硬岩试样的升温规律和破裂时长确定，在破裂时长内应设置微波作用时间梯度。

4.2.3 硬岩取样可参照GB/T 23561.1执行。

4.2.4 微波试验开始前应通过三销钉调节负载腔体的微波能量吸收效率达到最高。

4.2.5 微波试验时应控制工业摄像机开始时间与微波输出时间相当，应准确记录硬岩试样上裂纹的萌生、发育和破裂时间。

4.2.6 当硬岩试样出现熔融或崩裂破裂时，应立即停止微波输出。

4.2.7 给定微波功率的破裂试验每组应至少取3块试样。

4.2.8 每个试样应监测温度和表面形貌。

4.2.9 试样应保证均质性。

5 硬岩采集与制备

5.1 硬岩采样

5.1.1 采样前应提取采样地区地址综合柱状图，确定采样地点地层结构。

5.1.2 分析局部区域硬岩强度时，应在研究地点附近，根据需要选择有代表性的采样点采样。

5.1.3 分析范围较大的硬岩性质时，应根据岩性变化情况，在代表性采样点采样。

5.1.4 硬岩样品采样点应避开冲蚀带、断层破碎带及其影响区域等地段。

5.2 硬岩采样规格

5.2.1 采集硬岩岩样应每组4块，岩样尺寸不应小于 $250 \times 250 \times 250 \text{ mm}$ ，不应包含明显裂隙。

5.2.2 目标区域存在层理面时，采集岩样高度方向应垂直岩层层理。

5.3 硬岩制备

5.3.1 场微波致裂试验应采用直径 $50 \text{ mm} \times$ 高度 100 mm 的圆柱体试样测试。

5.3.2 大尺度面微波致裂试验应采用 $200 \times 200 \times 100 \text{ mm}$ 立方体试样测试。

5.3.3 试样加工精度应为试样相对端面平行度小于 0.1 mm ；试样任意轴向长度偏差不得大于 0.2 mm 。

5.4 硬岩基础物性参数

5.4.1 矿物组分测定时，每组岩样宜随机选取3份样品开展岩相薄片测试，确定每组样品中矿物成分，以及相对应比例以及粒度。

5.4.2 电磁-热参数测定时，应将每组岩样以及成岩矿物放入测试试管中并置于脊波导中间，被测样品完全填充两脊波导空隙开展电磁热参数测定，确定波导两端S参数进行反演确定被测样品的复介电系数。频率2450 MHz对应的脊波导型号应为BJ 22；915 MHz时应为BJ 9。

5.4.3 硬岩试件质量测量前，试样表面应清洁、平整，采用高精度电子天平精确测量，精度为0.01g。每个试样质量应重复测量3次并记录，计算算术平均值。

5.4.4 硬岩试件尺寸测定时，直径应在试件的上下端面附近以及中央附近的断面，测定相互垂直的3个方向的直径，取平均值为试件的直径。长度量测时，高度应在试件的中心轴线的两个相交的平面内各取2个点，测定3个高度值，取算术平均值作为试件尺寸长度。

5.4.5 岩石试件密度应按质量算术平均值、直径算术平均值以及长度的算术平均值(mm)计算。

6 硬岩升温特性测定

6.1 不同微波功率作用下硬岩升温测定

6.1.1 一般规定

a) 适用于输出微波功率从0~15 kW连续可变、微波频率从2450 MHz $\pm$ 30 MHz的系统。

b) 待测样品应充分干燥消除试样内不均匀含水的影响。

c) 微波激励模块输入电压应为三相 AC380V $\pm$ 10%，50Hz $\pm$ 2Hz，冷却方式应采用8L/min水冷系统。

d) 电磁波传输应采用BJ 26型矩形波导，并且只传输主模TE₁₀。

6.1.2 测试系统

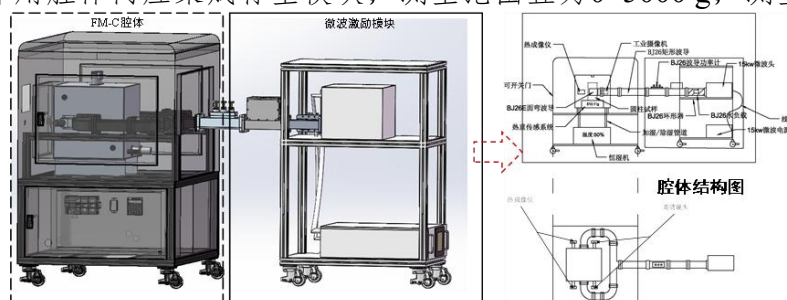
a) 测试系统应场微波作用腔体（见图1），并应符合下列规定：

b) 场微波作用腔体应集成红外热成像模块实时监测模块，光学分辨率不应小于382 $\times$ 288像素，测温范围宜为-20~900 $^{\circ}$ C。

c) 测试精度：量程应为 $\pm 2^{\circ}$ C，检测角度应为360 $^{\circ}$ 。

d) 场微波作用腔体应集成高清图像实时监测，像素不应小于1000万，可实时查看，检测角度360 $^{\circ}$ 。

e) 场微波作用腔体内应集成称重模块，测重范围宜为0~5000 g，测重精度应为0.01g。



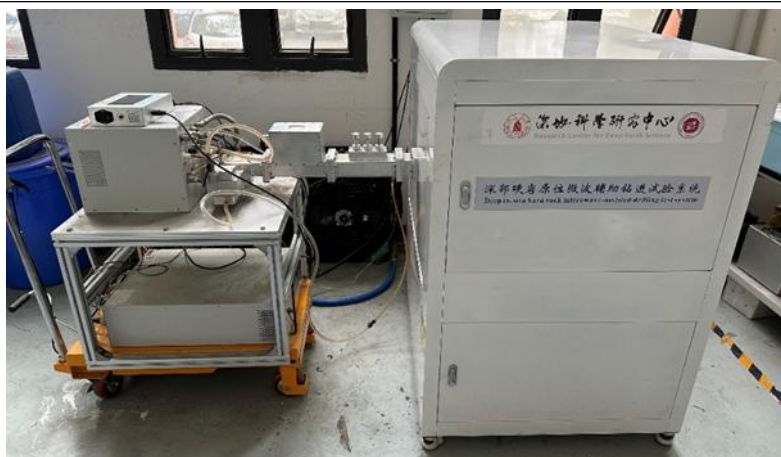


图1 场微波作用腔体

6.1.3 场微波致裂试验见图2。试验应按下列步骤执行：

- a) 将充分干燥后的试验样品根据试验安排做好标记，记录基础物性参数。
- b) 将微波腔体内清洁干净。
- c) 将任一组标记好的试样端面擦拭干净，将试样端面中心对准腔体内氮化硼底座顶面标记放置。
- d) 设备通电，开启水冷水泵及冷凝器，开启微波激励模块开始预热，开启实时红外热成像监测系统、高清摄像监测模块以及热重监测模块。
- e) 微波激励模块预热5分钟后，设定作用功率为1 kW，开启微波并计时，直至试样破裂，关闭微波作用系统，并记录微波作用时间、热成像、热重以及摄像数据。
- f) 更换全新本组试样，重置热成像、热重以及摄像数据检测数据，以1 kW为跨度提高微波作用功率重复上述测量步骤，并记录相关检测数据，直至照射破裂时间不大于30 s，结束本组试样场微波致裂试验并开展下一组场微波致裂试验。

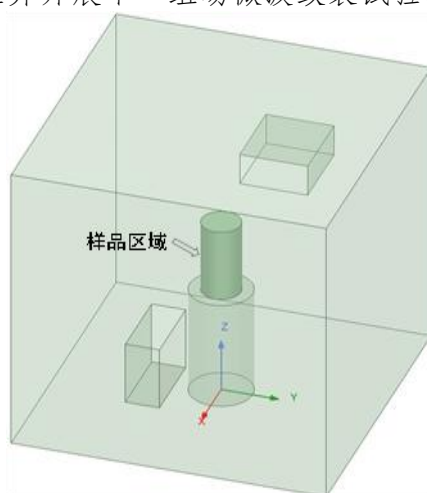


图2 场微波致裂试验示意图

6.1.4 数据处理应按下列步骤执行：

- a) 通过专用软件导入温度、热重数据，绘制微波作用下温度（℃）-时间（s）变化规律曲线，包含最高温度、最低温度以及平均温度和质量（g）-时间（s）变化规律曲线。
- b) 以破裂时间为节点（ t_b ），划分 $1/5 t_b$ 、 $2/5 t_b$ 、 $3/5 t_b$ 、 $4/5 t_b$ 、 t_b 升温阶段。
- c) 截取不同时间段微波作用下试样高清图像以及红外成像绘制微波作用下硬岩试样各阶段温度分布以及破裂特征图。

6.1.5 成果整理应按下列步骤执行：

- 获得每组岩样不同微波功率下场微波致裂破裂试样以及破裂时间。
- 得到微波作用下硬岩试样温度-时间变化规律曲线，包含最高温度、最低温度以及平均温度和质量-时间变化规律曲线。
- 得到微波作用下硬岩试样各阶段温度分布以及破裂特征。

6.2 不同微波模式作用下硬岩升温测定

6.2.1 一般规定

- 适用于输出微波功率从0~15 kW连续可变、微波频率从2450 MHz $\pm$ 30 MHz的系统。
- 待测试样应充分干燥消除试样内不均匀含水的影响。
- 微波激励模块输入电压应为三相 AC380V $\pm$ 10%，50Hz $\pm$ 2Hz，冷却方式应采用8L/min水冷系统。
- 电磁波传输采用BJ 26型矩形波导，并且只传输主模TE₁₀。

6.2.2 测试系统

测试系统应采用大尺度面微波作用腔体（见图3），并应符合下列规定：

- 微波作用后表面温度测量应采用手持红外热成像仪。
- 红外分辨率不低于120 $\times$ 90像素，MSX分辨率不低于320 $\times$ 240 像素。
- 测温范围不低于-20~280 $^{\circ}$ C，测试精度应为0.1 $^{\circ}$ C，图像帧率不低于9 Hz。

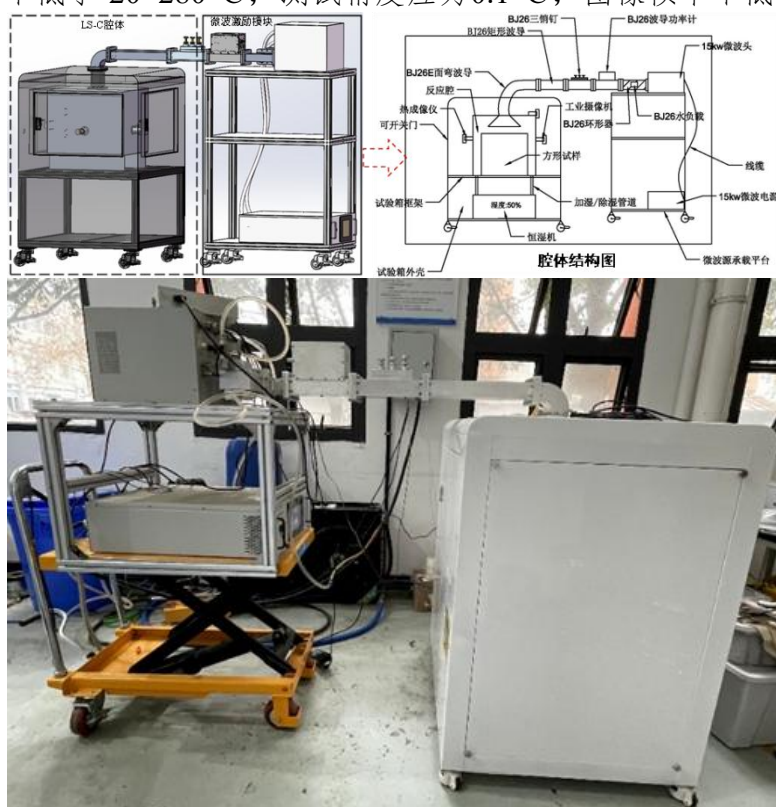


图3 大尺度面微波作用腔体

6.2.3 大尺度面微波致裂试验见图4，试验应按下列步骤执行：

- 将充分干燥后的立方体岩块根据试验安排做好标记，进行三轴线方向P-波波速测试，记录基础物性参数。
- 将微波腔体内清洁干净。

c) 将任一组做好标记的立方体岩块各表面擦拭干净，将试样底面中心对准腔体内底座标记放置，将立方体岩块标注上下面，采用铝箔将侧面和底面包裹，仅留顶面用作微波照射。

d) 设备通电，开启水冷水泵及冷凝器，开启微波激励模块开始预热。微波激励模块预热5分钟后，设定作用功率为场微波致裂试验中测得的最高功率，开启微波并计时30 s，随后关闭微波作用系统，结束本组试样大尺度面微波致裂试验并开展下一组大尺度面微波致裂试验。

e) 微波作用完迅速打开微波腔体，利用手持式红外热成像仪为样品上表面进行温度测定，随后拆开包裹铝箔，对其余表面同样进行温度测定。

f) 等样品冷却后，进行微波作用前后称重和P-波波速测试。

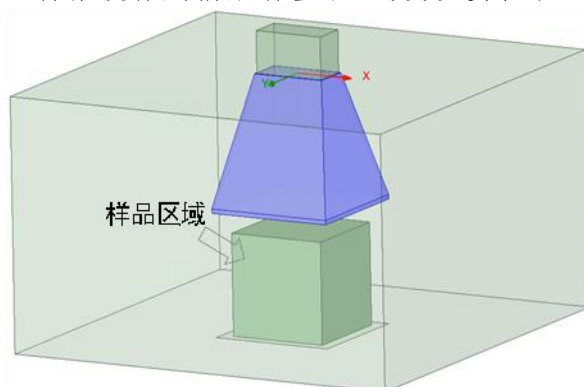


图4 大尺度面微波加热致裂试验示意图

6.2.4 数据处理应按下列步骤执行：

a) 统计各个表面最高温度、最低温度并导出面温度数据计算平均温度并记录。

b) 记录微波作用前后质量并计算质量损失率。

c) P-波波速应每个样品分别进行三个轴线方向测试，记录微波作用前后波速数据，计算折减率。

6.2.5 成果整理应按下列步骤执行：

a) 获得每组岩样大尺度面微波致裂试样。

b) 得到微波作用后立方体岩块试样各表面温度数据，包含最高温度、最低温度以及平均温度。得到微波作用前后立方体岩块试样质量、P-波波速数据以及相应折减率。

7 硬岩物理力学参数劣化测定

7.1 微波作用下硬岩劣化无损测定

7.1.1 一般规定

a) 该方法通过测量微波作用前后岩石波速、质量变化情况，在不破坏样品的前提下综合定量描述硬岩劣化效果，并结合CT测试手段重构试样裂纹分布及微观孔隙变化特征。

b) 能制成规则试件的硬岩均适用于本文件表述的无损测试方法。

c) 硬岩试件采集、制备应符合本文件5.1~5.3的规定。

d) 微波作用前的波速测试应在干燥处理后开展，微波作用后，硬岩试样应保存在干燥环境中自然冷却至室温，并立即开展后续测试。

e) 开展CT测试过程中应防止岩石二次损伤。

f) 波速测试宜使用直透法，测量P波，可参照GB/T 50266执行。

7.1.2 测试仪器应包括下列内容：

a) 温度105℃~110℃的烘箱。

- b) 精度0.01g的天平或电子秤。
- c) 岩石超声波参数测定仪。
- d) 纵横波换能器。
- e) CT扫描仪。

7.1.3 试验应按下列步骤执行：

- a) 测试开始前将硬岩置于烘箱中，在温度105℃~110℃内烘干24h，待试样在干燥环境中冷却至室温后开展波速测试。
- b) 对于直径50mm×高度100mm的圆柱体试样，应将换能器分别布置在两个轴向端面，对于200×200×100mm立方体试样，应分别测量3个垂直方向的波速，在波速测试结束后应使用吸油纸擦拭去除样品表面耦合剂。
- c) 波速测试完成后应及时开展质量测试，质量测试步骤应符合本文件5.4.3的规定，质量测试结束后即开展微波作用实验。
- d) 微波处理后将硬岩在干燥环境中冷却至室温，重复上述波速、质量测试过程，测试结束后将样品保存在干燥容器中，并及时完成CT扫描测试。

7.1.4 数据处理应按下列步骤执行：

- a) 统计分析不同时间、不同功率等不同工况下的微波作用硬岩质量/波速折减情况，绘制微波作用前后微波波速/质量对比图，
- b) 进行样品致裂前后质量/波速衰减率计算，绘制质量/波速衰减率演化曲线图，并拟合实验数据。
- c) 质量/波速衰减率应按下列式计算：

$$\Delta_{w/p} = (1 - S_{后, w/p} / S_{前, w/p}) * 100$$

式中， $\Delta_{w/p}$ 代表微波作用前后样品质量/P波波速衰减率， $S_{前, w/p}$ ， $S_{后, w/p}$ 为微波作用前后质量/P波波速参数。

7.1.5 成果整理应按下列步骤执行：

- a) 记录微波作用后硬岩形貌特征，CT扫描测试结果。
- b) 分析微波作用下的硬岩波速折减曲线，联合损伤变量理论，确定硬岩劣化情况。
- c) 对比分析硬岩质量折减情况及CT扫描结果，总结微波作用下硬岩劣化机制。

7.2 微波作用下硬岩单/三轴力学参数测定

7.2.1 一般规定：

- a) 微波作用下硬岩单/三轴力学参数测定试样尺寸应符合本文件5.3.1的规定。
- b) 微波作用下硬岩单/三轴力学参数测定试样加工精度应符合本文件5.3.3的规定。
- c) 应选择初始波速、重量等物理参数相似的试样开展试验，保证试样均质性，同一工况下的试验不宜低于3组。
- d) 力学测试试验开始前应测定试样端面平整度，试样两端面不平行度应小于0.1mm，微波作用后宏观损伤特征显著，表面形态不平整的试样不宜继续开展单轴、三轴力学测试。
- e) 三轴试验应为常规三轴实验。
- f) 微波作用岩石在干燥环境自然冷却后应及时开展力学参数测试。

7.2.2 测试系统应符合下列规定：

- a) 检验设备应包括最小分度值0.02mm的游标卡尺；水平测试台；万能角度尺、百分表架及百分表。
- b) 单轴、三轴试验机系统宜配备轴向传感器，环向应变引伸计，轴压加载系统，三轴腔体，围压控制系统。试验机精度不应低于一级，并能够以0.5MPa/s~1.0MPa/s的速率加载。

c) 对于电液伺服试验机, 应选用较小的加载速度, 加载范围应满足下式要求:

$$1.25P_{\max} \leq P_0 \leq 5P_{\max}$$

式中, P_0 为试验机加载范围的最大值, 单位为千牛 (kN), $P_{\max}$ 为预计试件的最大破坏载荷, 单位为千牛 (kN)。

7.2.3 试验应按下列步骤执行:

a) 试验开始前对试样直径、高度、波速、质量并记录, 剔除不良试样, 对试样编号, 记录。

b) 开展力学测试时, 应用热塑套包裹试样或采取其他保护措施, 随后将试件置于材料试验机承压板中心, 调节试验机压头, 使试验机、上下承压板、试件三者中心线成一直线, 并使试件上下面受力均匀。

c) 加载过程应采用连续加载直至试件破坏, 当峰值出现后, 继续加载3~5s后停止, 无峰值时, 至轴向应变达到15%~20%后停止。

d) 对试样施加合理的固定措施, 记录试样破坏特征及试验数据。

7.2.4 数据处理应按下列步骤执行:

a) 整理硬岩加载过程中的轴向荷载, 确定硬岩破坏时的荷载, 按下式计算岩石单轴抗压强度:

$$R_c = \frac{P}{A}$$

式中, R_c 为试件单轴抗压强度, 单位为兆帕 (MPa); 单轴力学试验中, P 为试件破坏时的轴向荷载 (N); A 为初始承压面积, 单位为平方毫米 (mm^2)。

b) 试样三轴应力条件下的最大主应力按下式计算:

$$\sigma_1 = \frac{P}{F}$$

式中, σ_1 为三轴应力条件下的最大主应力, 单位为兆帕 (MPa); 单轴力学试验中, P 为试件破坏时的轴向荷载 (N); A 为初始承压面积, 单位为平方毫米 (mm^2)

c) 按下式计算硬岩加载过程中的轴向应变 ε_1 、径向应变 ε_d :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D}$$

式中, ε_1 为各级应力的轴向应变值; ε_d 为径向应变值; ΔL 为各级荷载下的轴向变形平均值 (mm); ΔD 为与 ΔL 同荷载下的径向变形平均值 (mm); L 为轴向测量标距或试件高度 (mm); D 为试件直径 (mm)。

d) 按轴向应变、径向应变结果计算体积应变, 计算公式为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_d$$

式中, ε_v 为体积应变, ε_1 为各级应力的轴向应变值, ε_d 径向应变值。

7.2.5 成果整理应按下列步骤执行:

a) 拍摄记录硬岩宏观破裂特征, 分析不同微波参数条件下的硬岩单/三轴压缩破坏形态差异。

b) 统计不同微波参数条件下的单轴、三轴抗压强度, 分析不同微波参数条件下的硬岩强度演化规律。

c) 对于单轴力学参数测定试验, 以轴向应力为纵轴, 以轴向应变、径向应变和体积应变为横轴绘制应力-应变曲线图, 对于三轴力学测试试验, 以偏应力为纵轴, 以轴向应变、径向应变和体积应变为横轴绘制应力-应变曲线图, 分析不同微波参数条件下的硬岩变形特征。

7.3 成果记录

7.3.1 记录格式与要求

微波作用下硬岩单/三轴力学参数试验记录内容应包括：微波作用模式，微波功率，微波时长，微波作用后的试样温度，硬岩类型，硬岩试样含水状态，硬岩试样尺寸（高度、直径），试样面积，侧向应力，硬岩试样破坏荷载，力学测试前后试样形貌特征。

7.3.2 单轴力学参数测定记录见表1。三轴力学参数测定记录见表2。

表1 单轴力学参数测定记录表

试样 编号	微波 模式	微波功 率/kW	作用 时长/s	含水 状态	试样尺寸 /mm		试样面积 A/mm ²	破坏荷 载P/N	试样形貌 描述	
					直 径	高 度			测试 前	测试 后

表2 三轴力学参数测定记录表

试样 编号	微波 模式	微波功 率/kW	作用 时长 /s	含水 状态	试样尺 寸/mm		试样面积 A/mm	破坏 荷载 P/N	侧向压力 σ_3 /MPa	试样形貌 描述	
					直 径	高 度				测试 前	测试 后

8 硬岩强度折减效率评价

8.1 一般规定

- 评价微波作用前后强度折减效率的基础物性参数测定应符合本文件5.4的规定。
- 评价微波作用前后强度折减效率的物理参数的测定应符合本文件7.1的规定。

c) 评价微波作用前后强度折减效率的力学参数的测定应符合本文件7.2的规定。

8.2 主要仪器设备

- a) 微波作用下硬岩升温速率测量设备应符合本文件6.1.2和6.2.2的规定。
- b) 微波作用下硬岩物理参数测定应符合本文件7.1.2相关规定。
- c) 微波作用下硬岩结构特征参数测定应包括游标卡尺、高精度三维激光扫描仪。

8.3 升温特性

8.3.1 微波作用下硬岩升温速率表示为：

$$\Delta T = \frac{T}{t}$$

式中，T为微波作用结束时的硬岩温度，℃，包括最大温度、平均温度和最低温度，t为微波作用时间，s。

8.3.2 表面温度变异系数

a) 微波作用下硬岩表面温度变化系数表示为：

$$COV_T = \frac{\sigma_T}{\bar{T}}$$

式中，COV_T为温度变异系数，σ_T为该表面温度方差， $\bar{T}$ 为该表面平均温度，℃。

b) 变异系数变化率表示为：

$$\Delta_{COV} = \frac{COV_{T_2} - COV_{T_1}}{t_2 - t_1}$$

8.4 物理力学参数

8.4.1 物理参数

- a) 物理参数指标宜包括质量、波速，质量/波速衰减率计算见7.1.4。
- b) 其他辅助评价指标宜包括介电常数、比热容、热传导系数。

8.4.2 结构参数

- a) 结构参数指标宜包括硬岩体积变化参数、硬岩表面裂纹数量，硬岩表面裂纹长度及深度。
- b) 硬岩体积变化采用参数测定宜使用高精度激光扫描仪进行三维重构，利用计算机软件辅助计算微波作用前后硬岩体积变化参数。
- c) 对于宏观裂隙明显的试样应利用游标卡尺测定裂隙长度及宽度，精度0.01mm。

8.4.3 力学参数

- a) 力学参数指标宜包括弹性模量、泊松比、脆性指数、裂纹体积应变。
- b) 单轴应力状态下硬岩弹性模量计算公式为：

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

c) 泊松比计算公式：

$$\mu = \frac{\varepsilon_{dp}}{\varepsilon_{lp}}$$

式中, E 为单轴状态下弹性模量, GPa; μ 为单轴应力状态下硬岩的泊松比; a 为应力-应变曲线中直线段起点的应力, MPa; b 为应力-应变曲线中直线段起点的应力, MPa; ε_a 为应力-应变曲线中直线段起点的应变值; ε_b 为应力-应变曲线中直线段终点的应变值; ε_{dp} 为应力-环向应变曲线上对应直线段部分的环向应变的平均值; ε_{lp} 为应力-轴向应变曲线上对应直线段部分的轴向应变的平均值。

d) 三轴应力状态下硬岩弹性模量计算公式为:

$$E = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{1000\varepsilon_1}$$

e) 三轴应力状态下硬岩泊松比计算公式为:

$$\mu = \frac{\sigma_1\varepsilon_3 - \sigma_3\varepsilon_1}{2\sigma_3\varepsilon_3 - \sigma_1\varepsilon_1 - \sigma_3\varepsilon_1}$$

式中, E 为三轴应力状态下试件的弹性模量, GPa; μ 为三轴应力状态下硬岩的泊松比; σ_1 为施加在试件上的轴向应力, MPa; σ_3 为施加在试件上的侧向应力, MPa; ε_1 为测得的轴向应变;

f) 体积应变计算

裂纹体积应变应基于单轴压缩条件下的基本力学参数计算, 获取不同微波作用工况下的裂纹损伤应力、裂纹起裂应力, 分析计算公式为:

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \frac{1-2\mu}{E}\sigma_1$$

式中, ε_v^c 为裂纹体积应变; ε_v 为体积应变; E 为弹性模量, GPa; μ 为泊松比; σ_1 为应力, MPa

g) 脆性指数计算公式为:

$$BE_{pre} = \frac{U^e}{W}$$

式中, BE_{pre} 为峰前脆性指数; W 为外界输入能密度, 单位J/cm³; U^e 为岩石峰前阶段的弹性能密度, J/cm³。

h) 单轴应力状态下, 外界输入能量密度计算公式为:

$$W = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1$$

i) 单轴应力状态下, 岩石峰前阶段的弹性能密度为:

$$U^e = \frac{\sigma_1^2}{2E}$$

j) 三轴应力状态下, 外界输入能量密度计算公式为:

$$W = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3$$

k) 三轴应力状态下，外界输入能量密度计算公式为：

$$U^e = \frac{1}{2E_0}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]$$

式中， σ_1 为施加在试件上的轴向应力，MPa； σ_2 、 σ_3 为施加在试件上的侧向应力，MPa。

8.5 多参量微波作用前后硬岩强度折减效率评价规定

- a) 分析不同时长作用和不同应力水平对二长岩的强度和脆性特征的影响。
- b) 选定微波作用时长、应力水平以及二长岩峰值强度/脆性参数，构建三元一次函数，解析微波作用时长和应力水平对二长岩峰值强度/脆性的影响权重。

$$\begin{aligned} A_1t + B_1\sigma_3 + C_1 &= \sigma_1 \\ A_2t + B_2\sigma_3 + C_2 &= BE_{pre} \end{aligned}$$

式中， t 为微波作用时长，s； σ_3 为施加在试样上的侧向压力，MPa； σ_1 为轴向应力，MPa； BE_{pre} 为峰前脆性指数。

- c) 分别计算得出 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 和 C_2 值，为保证数据的有效性，采用任意参量验证，在5%的显著水平下，参数估计值均显著不为零。

8.6 成果记录

8.6.1 记录格式与要求

- a) 微波作用下岩石升温特性分析应记录微波功率，微波时长，微波作用后的试样表面最大温度、最小温度，并计算平均温度及温度方差，由此获取温度变异系数及温度系数变化率并记录于表3中。
- b) 多参量微波作用前后硬岩强度折减效率评价应基于微波作用下硬岩单/三轴力学参数测定结果开展，按微波作用硬岩单/三轴应力应变曲线，计算微波作用硬岩弹性模量、泊松比、弹性能密度、外界输入能量密度，并计算岩石脆性指数，相关结果记录于表4中。

8.6.2 升温特性测定分析记录见表3；多参量微波作用前后硬岩强度折减效率评价记录见表4。

表3 升温特性测定分析记录表

试样编号	微波功率/kW	作用时长/s	最大温度/℃	最小温度/℃	平均温度/℃	温度方差/(℃) ²	温度变异系数	温度变异系数变化率

表4 多参量微波作用前后硬岩强度折减效率评价记录表

试样 编号	微波功 率/kW	作用 时长/s	围压 /MPa	弹性模 量E/GPa	泊松 比 μ	外界输入 能密度W/ J/cm ³	弹性能密度 U°/J/cm ³	脆性 指数