ICS
CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GRM

中 关 村 绿 色 矿 山 产 业 联 盟 团 体 标 准

T/GRM XXXX—XXXX

冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验方法

Physical simulation test method for sidewall rockburst induced by impact load

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟　　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　总则 1
5　基本规定 1
6　岩样采集与制备 2
7　岩爆模拟试验方法 3
附录 A （资料性 ） 冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验测试记录 8

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。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：长安大学，湖南科技大学，东南大学，江西理工大学，中南大学，安徽理工大学，中国科学院武汉岩土力学研究所，中国矿业大学（北京），南华大学，福州大学，青岛乾坤兴智能科技有限公司。

本文件主要起草人：宫凤强，伍武星，司雪峰，赵光明，江权，刘冬桥，金解放，彭康，吴学震，孟祥旭，徐磊，何志超，欧阳奥辉。

本文件为首次发布。

冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验方法

1 范围

本文件规定了冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验的总体原则、基本规定、试样采集与制备、试验方法、数据处理和成果整理等。

本文件适用于爆炸、冲击、地震等冲击扰动下洞壁型岩爆物理模拟试验和相关分析。

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/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

T-CSRME 001-2019 岩石动力特性试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

洞室 cavern

在岩体中开挖出的具有一定形状和尺寸的空间，多为圆形、直墙拱形、矩形等。它是一种地下工程设施，通常用于多种用途，如矿山巷道、交通隧道、地下厂房、地下仓库、地下电站、人防工程等。

3.2

岩爆 rockrurst

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突然释放,导致围岩爆裂、弹射的动力现象。

3.3

冲击荷载 impact load

在很短的时间内以很大的速度作用在构件上的荷载。

3.4

岩爆坑 rockburst pit

岩爆发生后形成的岩坑。

3.5

圣维南原理 saint-Venant's Principle

如果作用在弹性体某一小块面积（或体积）上的力系被另一个静力等效的力系所替换，那么在远离荷载作用区的地方，应力和应变的分布将主要取决于荷载的合力和合力矩，而与荷载的具体分布无关。

4 总则

4.1 为建立一套科学、规范的冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验方法，统一试验流程、数据采集标准及成果分析要求，推动洞壁型岩爆试验技术的发展，增强试验结果的可比性，特制定本标准。

4.2 本文件主要对冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验方法进行规范和指导。

4.3 本文件除了对岩石试样的采集作严格要求外，每组岩石试样应有同批岩石试样的静力特性资料。

5 基本规定

5.1 岩石采样时应记录采样地点、采样时间、埋深、层位、试样种类、风化与新鲜程度等；有条件时应描述地质构造与地应力状态等，采取的岩样应满足试验要求。

5.2 试验前，应收集相关资料与成果。应根据试验要求，编写试验大纲，大纲应包括下列内容：

a) 任务来源与要求；
b) 试验目的、试验内容与技术要求；
c) 试验设计；
d) 仪器设备；
e) 人员安排；
f) 试验进度；
g) 试验成果；
h) 安全保障。

5.3 试验前，每个岩石试样应进行地质素描、拍照，且应有同批试样的静力特性资料。试验结束后应对岩石试样做破坏特征描述、拍照和岩屑称重。

5.4 试验设备应按规定标定；计量设备应按规定检定或校准。

5.5 试验数据记录与整理可以参照附录 A。

5.6 试验结束后应及时编制和提交试验报告，报告应有审核。

6 岩样采集与制备

6.1 岩样采集

6.1.1 岩样宜在工程现场按试验要求采集。

6.1.2 同组岩样的取样地点、地层应相同。

6.1.3 采集的岩样宜在采样点立即用保鲜膜包好，然后进行装箱并按编号标明试样的特征，并置于相应环境中保存。

6.1.4 采样数量应满足试样制备的需求，且不少于试验所需求的 2 倍。含结构面试样的数量应适当增加。

6.1.5 岩样在封装、运输和储存时，应采取避免岩样受损的保护措施。

6.2 岩样制备

6.2.1 冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验中，宜采用立方体形状岩样。在加工岩样前，应对岩样的结构特征进行标记；对于含结构面或层理面的岩样的加工，应注意结构面与最大主应力方向的夹角及结构面的位置。

6.2.2 应将采集的岩样按照同一方向切割，粗加工成略大于标准试样尺寸 1mm～2mm 的立方体。

6.2.3 应将初步切割后的立方体试样加工成标准试样。对于亲水性较强的岩石材料，宜采用干磨或者干冰冷却等方式加工。

6.2.4 应将加工好的立方体试样固定在雕刻机上，利用雕刻机在立方体试样的中心部位加工断面为圆形方形、直墙拱形等形状贯穿洞室。

6.2.5 应将加工好的试样进行自然风干，然后用保鲜膜包好。

6.3 岩样尺寸

6.3.1 立方体岩样长度与宽度之比宜为 1:1，高度应大于长度或宽度的 0.2 倍以上。

6.3.2 岩样的尺寸宜为长 100mm、宽 100mm 或长度 150mm、宽度 150mm，相对应高度要大于长度或宽度的 0.2 倍以上。对于加载力的量程比较大的试验设备，可以适当的增大立方体试样的尺寸。

6.3.3 立方体岩样中洞室的尺寸应满足圣维南原理，深部洞室开挖对周围岩体的扰动影响范围通常为3～5倍的洞室直径，故洞室截面的直径宜为岩样边长的1/5～1/3。对于100mm×100mm截面的立方体岩样，洞室的直径宜为25mm～33mm；对于150mm×150mm截面的立方体岩样，洞室的直径宜为30mm～50mm。

6.3.4 岩样的边长应大于最大矿物颗粒尺寸的10倍。

6.4 岩样精度

6.4.1 岩样边长允许偏差应为±0.1mm。

6.4.2 岩样端面不平整度允许偏差应为±0.02mm。

6.4.3 岩样相邻两端面应互相垂直，允许偏差应为±0.25°。

6.4.4 岩样相对端面不平行度的允许偏差应为±0.02mm。

6.5 岩样描述

岩样加工完成后应对试样进行物理性质参数测量和描述，宜包括下列内容：

a) 试样编号、名称、颜色、岩性、矿物成分、均质性、最大颗粒直径、结构、风化程度、胶结物性质、试样的质量、密度和波速等；
b) 试样内层理、节理、裂纹分布及其与加载方向的关系；
c) 含结构面试样中结构面充填物（胶结物）的性质及其厚度；
d) 试样的初始缺陷及含水状态。

试样的量测数据记录见附录A表A1。

7 岩爆模拟试验方法

7.1 一般规定

本方法适用于在实验室条件下，能够加工成规则的各类含预制孔洞的岩石成品试样在二维应力以及冲击扰动条件下（应变率10^0S^{-1}~10^2S^{-1}）的洞室岩爆试验。

7.2 主要仪器设备

采用岩石双轴霍普金森试验系统（Biaxial Hopkinson Pressure Bar System，简称BHPB试验系统）开展试验，如图1所示。本方法中定义沿入射杆方向为Z向、且为最大垂直主应力方向，沿输出杆方向为Y向、且为水平主应力方向，垂直方向为X向。

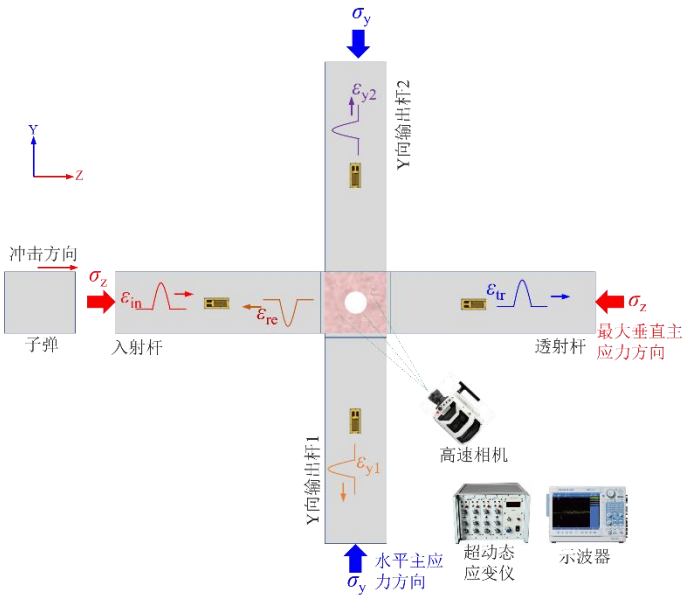


图1 岩石双轴霍普金森试验系统（以圆形洞室为例）

7.2.1 试验加载设备

对于所采用的岩石双轴霍普金森试验系统，宜满足以下条件：

a) 岩石BHPB试验系统由冲头、入射杆、透射杆、吸收杆、两输出杆、数据采集单元和液压加载系统等组成。所有杆件和冲头均采用相同材质的高强度钢材加工而成。
b) 所有杆件均为正方形截面且边长不宜少于50mm。所有杆件的长度应大于杆件边长的30倍。两输出杆长度保持一致。
c) 所有杆件均可由单独的液压加载系统施加各自荷载。冲击扰动荷载由气缸充压后释放气压推动冲头冲击入射杆。
d) 将试样放置在入射杆、透射杆和两输出杆中间，冲头冲击入射杆后在入射杆中产生入射波（ε_I），入射波与试样作用产生反射波（ε_R）和透射波（ε_T）以及两输出杆中的输出波（ε_{y1}和ε_{y2}）。
e) 试验中应力波信号通过贴在各杆件中间位置的应变片获得，应变片栅长应不大于2mm。
f) 通过条件冲头的长度可实现冲击扰动脉冲加载持续时间。
g) 采用整形器法减少应力波振荡。在入射干前端中心位置放在薄片，可以采用相对杆件材质较软材质制成，如紫铜、铝片或橡胶等。

7.2.2 监测设备

对试验过程中所采用超动态应变仪、示波器以及高速相机设备，宜采用如下标准：

a) 超动态应变仪通道数应大于4，信噪比应不小于50dB，灵敏度不低于1v/1000με（2v桥压），数据采集频率应不小于1MHz。
b) 示波器动态采集仪通道数应大于4，采样频率应不低于1MHz。
c) 高速相机采样频率宜不少于 10000fps，分辨率应不低于 256×256。

7.3 试验步骤

室内开展冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验时，宜采用如下试验步骤：

a) 试验前应对BHPB系统进行校准，检查射杆与透射杆是否互相对齐，两输出杆是否互相对齐，所有方杆都保持在同一高度，不得偏心；且应对未加载试样前提下进行试冲，应无反射波出现，确认系统可靠；
b) 将适量的黄油涂抹在试样端面和方杆断面以减少摩擦，将试样放入四根方杆之间，且与方杆对齐，不得偏心；
c) 将高速相机对准试样，拍摄角度宜以试样为正中心；
d) 静应力加载阶段，Z和Y向静态液压加载单元以0.05MPa/s对试样施加二维静应力，其中Z向为最大垂直主应力方向，Y向为水平主应力方向，直至加载至预设初始应力水平后，并保持该初始应力水平恒定5min，以减少应力波动（如图2所示）；
e) 检查数据采集系统，并调整示波器和高速相机处于等待触发模式；
f) 根据设定的冲击速度，调整冲击气压，发射冲头，实现冲击扰动加载；
g) 卸荷、检查波形数据，保存应力波信号和视频数据；
h) 对最终破坏试样形态及特征进行详细拍照，回收碎屑。
i) 重复上述步骤，每次试验应重复2~3次，以保证试验结果的有效性。

7.4 注意事项

为了保证试验结果的有效性和准确性，应注意以下事项：

a) 岩爆发生时洞壁上岩片会高速弹射并发出声响，为了安全起见，应在试样表面盖上高强度且透明的亚克力板。对质地比较致密、抗压强度较高的岩石例如玄武岩、板岩、花岗岩等进行试验观察时，实验人员需要头戴安全帽；
b) 试验前应检查BHPB系统是否校准，检查是否应力平衡，保证设备性能可靠；
c) 应变片应粘贴于规定位置，每根方杆左右端应变片应互相平行对齐；
d) 试样在进行安装时，应对试样端面和杆件端面涂抹润滑剂，以减小摩擦阻力和应力波弥散效应；
e) 试验正式开始前，应检查所有设备是否正常工作；

f) 发射冲头前，超动态应变仪与高速相机设置为同步触发模式，以保证加载过程中视频图片与应力-时间曲线或应变-时间曲线进行对应；

g) 试验中应保持试样整体完整仅洞壁局部破坏；

h) 试验完成拆卸试样之前和拆卸完成后，应即时对试样表面和洞室内部破坏情况进行拍照留存。

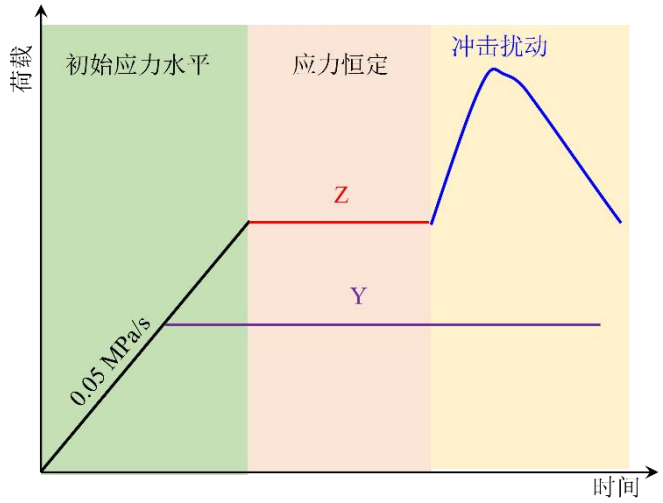


图 2　应力路劲

7.5　数据处理

冲击扰动加载过程中应力波沿入射杆传播，对试样进行加载直至洞壁发生破坏，并产生相应的反射波、透射波和输出波。利用以下公式求试验中入射载荷、反射载荷、透射载荷，以及作用试样的动态荷载和输出荷载。

$$\begin{cases} F_{\mathrm{in}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{in}}(t), \\ F_{\mathrm{re}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{re}}(t), \\ F_{\mathrm{tr}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{tr}}(t) \\ F_{\mathrm{dz}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}[\varepsilon_{\mathrm{in}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{re}}(t)] \end{cases} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\begin{cases} F_{\mathrm{y1}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{y1}}(t), \\ F_{\mathrm{y2}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{y2}}(t) \\ F_{\mathrm{dy}}(t)=A_{\mathrm{b}}E_{\mathrm{b}}[\varepsilon_{\mathrm{y1}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{y2}}(t)]/2 \end{cases}$$

式中：

$F_{\mathrm{in}}(t)$—入射荷载，单位（kN）；

$F_{\mathrm{re}}(t)$—反射荷载，单位（kN）；

$F_{\mathrm{tr}}(t)$—透射荷载，单位（kN）；

$F_{\mathrm{y1}}(t)$、$F_{\mathrm{y2}}(t)$—两输出杆的动态荷载；

$F_{\mathrm{dz}}(t)$—作用于试样的 Z 向平均动荷载，单位（kN）；

$F_{\mathrm{dy}}(t)$—作用于试样的 Y 向平均动荷载；

$\varepsilon_{\mathrm{in}}$、$\varepsilon_{\mathrm{re}}$、$\varepsilon_{\mathrm{tr}}$—入射波应变、反射波应变、透射波应变；

$\varepsilon_{\mathrm{y1}}$、$\varepsilon_{\mathrm{y2}}$—两输出杆的输出波应变；

A_b—杆件的截面；

E_b—杆件的弹性模量；

t—应力波加载时间。

7.6 洞室洞壁岩爆的发生过程

利用高速相机实时记录洞室洞壁围岩实时岩爆过程，以圆形洞室洞壁岩爆发生过程为例进行说明，可将岩爆破坏过程分为平静期阶段→裂纹萌生、扩展、贯穿阶段→板裂阶段→岩片弹射阶段，如图 3 所示。

a) 在冲击初始阶段(0~150 μs)，圆形洞室洞壁保持完整，但内部微裂纹仍在扩展，处于平静期阶段；

b) 在200 μs时，孔洞中心处围岩上有宏观裂纹萌生、扩展、贯通，形成局部破坏区，处于裂纹萌生、扩展、贯穿阶段；

c) 随着裂纹逐渐往洞壁内扩展和贯通，形成“弧形”裂纹，且薄岩板逐渐屈曲张开，为典型的动态板裂破坏特征(250~300 μs)， 岩石抗压不抗拉，当张拉应力超过围岩张拉极限强度时，诱发动态板裂破坏，处于板裂破坏阶段。

d) 随着洞壁破坏程度加剧，裂纹从“弧形”过渡至“V”形(350 μs)。当V形破坏区内裂纹互相贯通后，大量岩石碎屑向孔内弹射(500~800 μs)，直至岩爆结束，处于岩片弹射阶段。

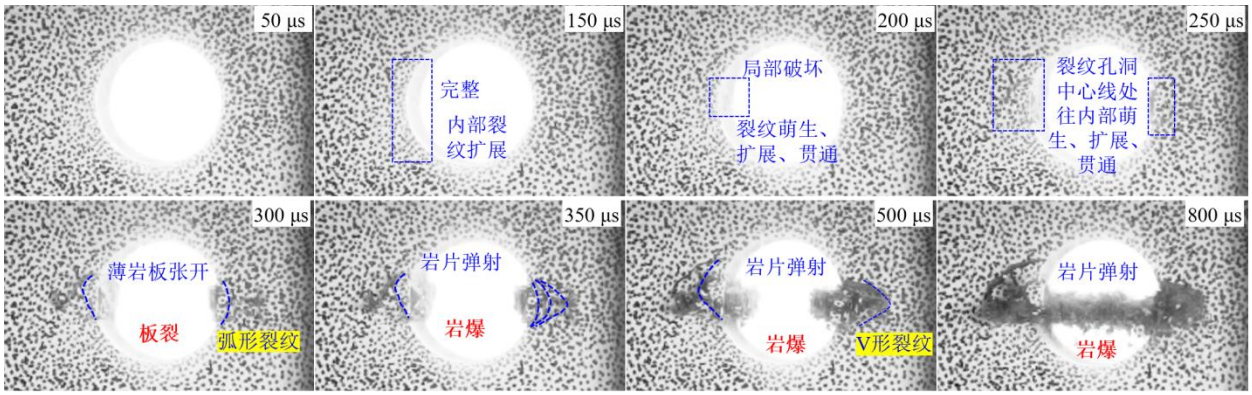


图 3 圆形洞室洞壁围岩岩爆破坏过程

7.7 洞室围岩的破坏特征

试验结束后及时对洞壁围岩破坏形态进行拍照（如图4所示），记录岩爆坑形态特征并测量相关尺寸（如岩爆坑大小、角度和高度等），借助可借助扫描电子显微镜(SEM)、CT扫描仪以及偏光显微镜等仪器，分析破裂面上的微细观破坏模式，微裂纹发育情况等。

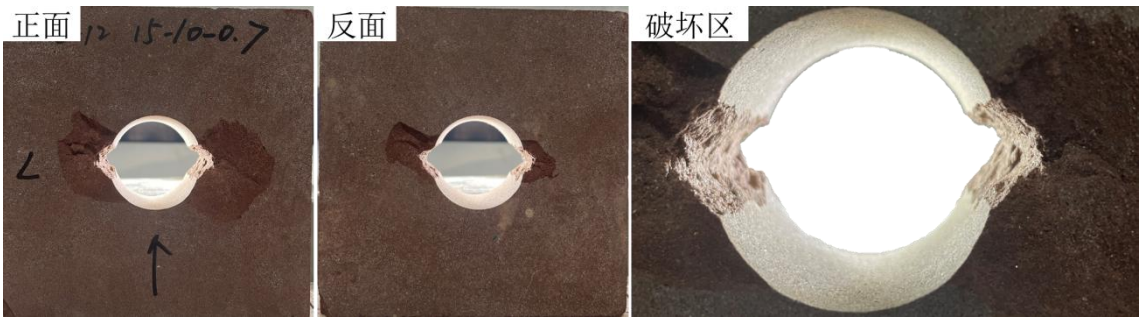


图 4 圆形洞室洞壁围岩岩爆坑的形态特征

7.8 成果记录

7.8.1 记录格式与要求

试验记录一般包括试样名称、取样时间、取样地点、试样编号、试样尺寸、洞室围岩破坏形态特征、岩屑特征、破坏荷载、记录人员和日期等。

7.8.2 试验记录见附录 A 表 A2

附 录 A
（资料性）
冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验测试记录

A.1 立方体试样量测数据记录

表 A.1 立方体试样量测数据记录

工程名称： 取样位置：

试样编号	立方尺寸			洞室尺寸/mm	质量/g	密度/(g/cm³)	波速			备注
	X/mm	Y/mm	Z/mm				X/(m/s)	Y/(m/s)	Z/(m/s)	

试样描述：

试验者： 计算者： 校核者： 日期：

A.2 冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验记录

表 A.2 冲击扰动诱发洞壁型岩爆物理模拟试验记录表

<table>
<tr><td colspan="11">工程名称：　　取样位置：</td></tr>
<tr><td rowspan="2">试样编号</td><td colspan="2">初始应力水平</td><td colspan="7">冲击扰动下动态荷载</td><td>备注</td></tr>
<tr><td>Y/kN</td><td>Z/kN</td><td>入射荷载 F_{in} /kN</td><td>反射荷载 F_{re} /kN</td><td>透射荷载 F_{tr} /kN</td><td>输出杆 F_{y1} /kN</td><td>输出杆 F_{y2} /kN</td><td>平均动荷载 F_{dz} /kN</td><td>平均动荷载 F_{dy} /kN</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="11">洞壁围岩岩爆坑特征：

岩片特征：</td></tr>
<tr><td colspan="11">试验者：　　计算者：　　校核者：
日期：</td></tr>
</table>