#### 矿产保护与利用

#### CONSERVATIO NAND UTILIZATION OF MINERAL RESOU RCES

# 水环境影响下花岗岩巷道岩爆红外辐射特性试验研究

张再道<sup>1,2</sup>,田宝柱<sup>1,3</sup>,张艳博<sup>1,3</sup>,王亚东<sup>1,2</sup>

(1. 华北理工大学 矿业工程学院,河北 唐山 063009;2. 华北理工大学以升创新教育基地,河北 唐山 063009;3. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室,河北 唐山 06309)

摘 要:以红外热像仪为观测手段,在室内进行了自然和饱水状态下花岗岩试样的巷道岩爆模拟试验,对水环 境效应下花岗岩巷道岩爆的红外辐射特性进行了研究。研究发现饱水试样岩爆发生剧烈程度有所减弱,能量 释放速率更为缓慢。水环境影响下,岩石试样的红外三种辐射温度(平均、最高、最低红外辐射温度)具有不同 的变化规律:岩爆过程中,饱水花岗岩 AIRT 与载荷的关系更为密切,增温幅度大于自然试样。在岩爆发生时, 饱水花岗岩 MAIRT 升温幅度小,MIIRT 的下降幅度大于自然状态下试样。该研究为地下工程中岩爆红外辐射 预警技术提供理论基础。

关键词:水环境;岩爆;红外辐射;试验研究 中图分类号:TD235.1 文献标志码:B 文章编号:1001-0076(2017)02-0030-05 DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.02.006

### Experimental Study on Infrared Radiation Characteri stics of Granite Tunnel Rockburst in Water Environment

ZHANG Zaidao<sup>1,2</sup>, TIN Baozhu<sup>1,3</sup>, ZHANG Yanbo<sup>1,3</sup>, WANG Yadong<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Tehnology, Tangshan 063009, China;
2. Yishen g College, North China University of Science and Technology, Tangshan 06309, China;
3. Hebei Province Mining Industry Develops and Safe Technology Priority Laboratory, Tangshan 063009, China)

**Abstract**: Applying the infrared thermal imager as means of observation , simulation experiments of granite tunnel rockburst were conducted in water saturated condition, and the infrared radiation characteristics of granite tunnel rockburst in water environment were studied . The results showed that the saturation degree of rockburst in saturated water was weakened, and the energy release rate became slower In water environment, the variation patterns of rock specimen at three radiation temperatures (mean, maximum and minimum infrared radiation temperature ) were different.During the rockburst process, AIRT of water saturated granite had a more closely relationship with the load and larger heating amplitude than natural samples. However, MAIRT of water saturated granite had a small heating amplitude, and the falling amplitude of MIIRT was greater than that of the natural samples. This study provides a theoretical basis for the infrared radiation warning technology of rockburst in underground engineering.

Key words: water environment; rockburst; infrared radiation; experimental study

\* 收稿日期:2016-06-19

作者简介:张再道(1994-),男,湖北宜昌人,在读本科生,主要从事岩石力学方面的研究。

基金项目:河北省高等学校科学研究项目(QN2016124、QN2016125);国家级大学生创新创业训练计划项目 (20 1410081006)

# 引言

岩石吸水软化是一种由于物理作用引起的强度 和刚度降低现象,在实际工程中,利用水的软化作用 可以降低岩石的储能强度进而减少岩爆的发生,但 另一方面,水又加速裂纹的萌生,加快岩石的破坏过 程,促进了岩爆的发生因而,研究自然和饱水状态 下花岗岩巷道岩爆的特征,探求水在岩爆中所起的作 用对岩爆的预防与控制十分有意义。

作为影响岩爆的因素之一,相关学者开展了水与 岩爆的研究工作。张艳博<sup>[1-3]</sup>对开圆孔的大理岩试 样进行双向加载岩爆模拟试验,研究了含水与干燥情 况下的大理岩岩爆规律特征。何满潮<sup>[4-6]</sup>对花岗岩 进行了三轴加载再单向卸载岩爆模拟试验,研究了花 岗岩岩爆过程中的声发射特征。王斌<sup>[7-9]</sup>基于饱水 岩石的静态和动态破坏特征,从能量原理、围岩效应 等角度探讨了水对防治层裂屈曲型岩爆的静力学与 动力学机制;并且对自然干燥与饱水状态砂岩进行静 力学特性试验,探讨了水对防治岩爆的静力学机制。 徐林生<sup>[10-11]</sup>发现一般情况下有地下水活动的湿润地 段,围岩中地应力较易释放,故不容易发生岩爆活动。 刘善军<sup>[12-14]</sup>等对岩石破裂前兆做了系统的总结与分 析,并且研究了水对岩石破裂时红外辐射影响,为以 红外监测手段研究岩爆提供了理论依据。

综上所述,水对岩石的力学性能以及岩爆有着重要的影响,本文将以深部巷道围岩岩爆为工程背景与研究主题,利用室内试验模拟巷道岩爆过程,通过红外技术监测其行为过程,研究岩爆孕育、发生过程中的多种异常前兆特征及规律从而为地下工程中岩爆预警提供理论基础。

## 1 试验设计

#### 1.1 巷道试样模型

试验中按照国际岩石力学试验规范加工成尺寸 为150 mm×150 mm×150 mm的立方体花岗岩试样, 试样两端面不平行度控制在0.02 mm以内,由于巷道 开挖后的影响范围为巷道半径的3~5倍,在正对的 两面中心钻直径45 mm 贯通圆孔,其后以充填体充 填。



图 1 花岗岩试样

#### 1.2 试验方法

试验设计自然状态和饱水状态下花岗岩巷道开 挖卸荷岩爆试验。采用力控制方式,以1 kN/s 速率 将水平方向加载到 200 kN,轴向加载到 800 kN 后保 持5 min,形成初始应力场,进而巷道开挖(取出充填 体),开挖后保持5 min,之后水平应力不变,轴向载荷 继续加载,模拟开挖引起的应力集中现象,加载速率 为0.3 mm/min,直至试样发生多次岩爆并导致孔洞 左右两侧形成贯通"V"形坑。

## 2 岩爆破坏过程

试验发现,岩爆过程可以分为平静期、颗粒弹射、 片状剥离和剧烈岩爆4个阶段,与文献<sup>[15]</sup>结果一致。 从试验现象来看,自然和饱水花岗岩均出现了明显的 片状剥离、岩片弹射等典型岩爆特征。自然花岗岩孔 洞内岩屑弹射速度更快,更为剧烈,在发生剧烈岩爆 瞬间个别试样会出现岩粉喷射现象。而饱水试样岩 爆剧烈程度则相对较弱,剧烈岩爆发生前片状剥离过 程更加明显,岩屑弹射剧烈程度明显小于自然花岗 岩。



图 2 自然与饱水花岗岩岩爆试验结果图

考虑到岩爆的产生与能量密切相关,声发射累积 能量包含了加载过程中的历史声发射信息,更易反映 由于能量释放引发的趋势性变化,绘制饱水和自然花 岗岩声发射累积能量随时间变化曲线,从能量释放角 度探索饱水对巷道岩爆过程的影响,见图 3。



从整个加载过程来看,饱水和自然花岗岩累积能 量演化过程均分为平静期I、缓慢增加期II和快速增加 期Ⅲ三个阶段。相比较而言,饱水花岗岩能量释放形 式属于"缓慢释放",自然花岗岩属于"突然释放",饱 水花岗岩累积能量进入缓慢增加期时间和快速增加 期时间均早于自然花岗岩,而且饱水花岗岩以上两个 阶段的持续时间均大于自然花岗岩,由此可知饱水花 岗岩能量释放速率更为缓慢。

# 3 岩爆过程红外辐射特征影响研究

#### 3.1 岩爆过程热像特征

图4、图5分别为自然和饱水试样加载过程热 像。



对比发现,自然状态下的巷道岩爆热像可分为均 匀增温、两侧增温、低温区显现、低温区扩展四个阶 段。饱水岩石热像分为均匀增温,低温区显现、低温 区扩展三个阶段。饱水岩石并没有出现两侧增温这 个阶段,而是出现了两侧降温的现象。当孔洞两侧受 压增温时,由于水具有热传递的作用,将热能向四周 岩体扩散,因而左右两侧升温的现象不明显;由于饱 水花岗岩两侧的破坏更为剧烈,导致孔隙大量暴露, 冷空气的进入加剧了空气与水的热交换速度,所以出 现小部分降温的现象。但该阶段孔洞下部升温幅度 较其他区域偏低,这主要是由于孔洞下部是载荷的主 动加载端,受到拉应力影响明显,因而温度升高幅度 低于孔洞周围其他区域。其次,饱水花岗岩的红外热 像低温区域明显比自然花岗岩更广泛,说明饱水花岗 岩的岩爆产生的颗粒与块状物更多,破裂程度更明 显。

#### 3.2 巷道围岩岩爆区红外辐射温度变化特征

对岩石加载过程表面红外辐射温度场进行定量 研究,通常的做法是在岩石表面选定一定范围的目标 区域(如异常区、敏感区、重点监测区等),使用区域内 的红外辐射温度(IRT)作为分析指标,观察 IRT 随时 间的变化过程,并与载荷-时间曲线进行对比。通常 用到的温度指标为平均红外辐射温度、最高红外辐射 温度、最低红外辐射温度。根据试验结果可见,巷道 围岩岩爆区位于洞室两侧,由于破裂区域的对称性, 因而选择巷道左侧破裂区域红外辐射温度场进行分 析。

3.2.1 岩爆区平均红外辐射温度(AIRT)曲 线特征

对两组自然、饱水花岗岩试样的 AIRT - 时间曲

线进行分析,发现以下差异:

(1)自然花岗岩 AIRT 曲线与载荷变化的同步性 较差,饱水花岗岩的 AIRT 变化趋势与载荷的变化较 为相似,饱水试样红外辐射与应力关系更为密切。

(2)自然花岗岩 AIRT 曲线阶段性演化特征明 显,初始阶段 AIRT 曲线水平波动,后期快速上升;而 饱水花岗岩初始阶段 AIRT 就随载荷增加呈上升趋 势,上升速度较快。与饱水试样相比,自然花岗岩孔 隙率较大,在此阶段试样内原生裂纹或孔隙被压密, 使得岩石内部的气体被排出,产生吸热的物理效应, 使得温度下降,因此初始阶段红外辐射温度上升较缓 并出现波动。而饱水试样的大部分孔隙被水占据,没 有空气溢出带走热量。压力的作用使得水产生热弹 效应,导致温度升高,所以饱水花岗岩 AIRT 初期呈快 速上升趋势。



图 6 饱水与自然状态花岗岩区域 AIRT 曲线

3.2.2 岩爆区最高红外辐射温度 (MAIRT) 曲线特征

对两组自然、饱水花岗岩试样的 MAIRT - 时间曲线进行分析,发现以下差异:

(1)自然状态下花岗岩试样 MAIRT 曲线表现 为缓慢上升、突然上升再降低;而饱水花岗岩 MAIRT 曲线随载荷增加呈上升趋势,上升速度较 快,相对自然试样,岩爆时红外辐射温度波动性较小。

(2) 自然状态下花岗岩试样在岩爆发生时出现 高温极值,饱水花岗岩试样在岩爆前没有明显的突 升的现象。这主要因为岩爆模拟试验过程中孔洞左 右两侧内壁为主破裂区,碎片剧烈弹射,裂隙间相互 摩擦错动,导致主破裂瞬间自然试样温度出现突跳 现象 。而饱水试样温度相对波动幅度小,原因在于 饱水试样颗粒之间被水充满,由于水的润滑作用,使 破裂间摩擦作用有所减弱,从而导致温度升高幅度 较小。同时水分蒸发也会带走一定热量,所以在整 个试验过程中数摄出现明显的最高温度峰值,最高 温度曲线近似于直线。

### 3.2.3 岩爆区最低红外辐射温度(MIIRT) 曲线特征

对两组自然、饱水花岗岩试样的 MIIRT - 时间 曲线进行分析,发现以下特征:

(1)对比自然和饱水状态下花岗岩岩石试样最 低温度变化曲线具有极为相似的演化特征。

(2 巷道围岩最低温度曲线出现了骤降, 饱水 状态下岩石下降幅度较大, 原因是岩石表面水分蒸 发,造成了部分热量蒸发, 同时在岩石破裂前已经出 现了大量的微裂隙, 冷空气的进入加剧了空气与水 的热交换速度, 因此最低温度曲线会出现大幅度下 降。表1自然花岗岩最低温度平均降幅在 0.196 ℃, 饱水花岗岩降低幅度在 0.202 ℃, 表明水的存在 降低了岩石的热红外辐射。





图 8 饱水与自然状态花岗岩区域 MII RT 曲线

表1 自然和饱水状态下花岗岩降低幅度

饱水性	时间编号	最低温度 降幅/℃	最低温度平均 降幅/℃	
	KZHG – 200 – 1	0.24	0.10(	
	KZHG – 200 – 2	0.25		
目然化冈右	KZHG – 200 – 3	0.1	0.196	
	KZHG – 200 – 4	0.16		
	KBHG – 200 – 1	0.31	0.000	
	KBHG – 200 – 2	0.12		
饱水化冈石	KBHG – 200 – 3	0-3 0.29 0.202		
	KBHG – 200 – 4	0.13		

### 3.2.4 自然与饱水试样红外辐射温度特征 对比

由于水的加入,自然与饱水试样在试验过程中, 红外辐射温度的表现出现了明显的差异性,见表2。 主要有三个差异点:(1)在岩爆发生前,饱水试样 AIRT 与载荷的关系更为密切,增温幅度大于自然试 样;(2)岩爆发生时,自然花岗岩 MAIRT 的温度陡 增明显,饱水花岗岩升温幅度小;(3)在岩爆发生 时,饱水花岗岩 MIIRT 的下降幅度大于自然状态下 试样。

表2 温度曲线特征统计表

试样	AIRT 特征		MAIRT特征		<b>MIIRT</b> 特征	
	曲线特征	差异性	曲线特征	差异性	曲线特征	差异性
	水平波动和		缓慢上升 -		曲线呈现	
	上升阶段		突然上升 -	饱水试样	下降 – 上	
自然		饱水比自然	下降	在岩爆时	升 - 下降 -	饱水试样
		与载荷的关		温度升高	上升的波动	在岩爆发
		系更密切		不明显,温		生时下降
	线性上升		均匀上升,	度波动幅	曲线波动	的幅度大
饱水			波动性较小	度小	形式与自	
					然状态相似	

### 4 结论

(1)利用自然和饱水下花岗岩巷道岩爆模拟试验,发现饱水试样岩爆发生剧烈程度有所减弱,相比较而言,饱水花岗岩能量释放形式属于"缓慢释放",自然花岗岩属于"突然释放",饱水花岗岩能量释放速率更为缓慢。表明水可以在一定程度上降低岩石发生岩爆的剧烈程度。

(2)通过岩爆试验中的红外监测表明,在岩爆 发生前,饱水试样 AIRT 与载荷的关系更为密切,增 温幅度大于自然试样。岩爆发生时,自然花岗岩 MAIRT 的温度陡增明显,饱水花岗岩升温幅度小。 在岩爆发生时,饱水花岗岩 MIIRT的下降幅度大于 自然状态下试样。

#### 参考文献:

- [1] 张艳博,李占金.水对大理岩岩爆影响的模拟实验研究 [J].河北理工大学学报,2007(1):1-3.
- [2] 张艳博,李健,刘祥鑫,等.水对花岗岩巷道岩爆红外辐

射特征的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015(4):453-458.

- [3] 张艳博,李健,刘祥鑫,等.水对花岗岩巷道岩爆声发射特征影响实验研究[J].矿业研究与开发,2015(6):82-87.
- [4]何满潮,苗金丽,李德建,等. 深部花岗岩试样岩爆过程 实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(5):865 -876.
- 5]何满潮,苗金丽,李德建,等. 深部花岗岩岩爆过程实验研究[C]//中国软岩工程与深部灾害控制研究进展— 第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会暨中国矿业大学(北京)百年校庆学术会议论文集.北京:中国岩石力学与工程学会软岩工程与深部灾害控制分会,2009:10.
- [6]何满潮,贾雪娜,苗金丽,等. 岩爆机制及其控制对策实 验研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 岩石力学与工 程的创新和实践:第十一次全国岩石力学与工程学术大 会论文集.中国岩石力学与工程学会,2010:11.
- [7] 王斌,赵伏军,尹土兵.基于饱水岩石静动力学试验的水防治屈曲型岩爆分析[J].岩土工程学报,2011(12): 1863-1869.
- [8] 王斌,赵伏军.水防治岩爆的静力学机制研究[J]. 矿业 研究与开发,2010(5)26-28,80.
- [9] 王斌. 锚固长度对巷道围岩支护作用的数值模拟研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2015.
- [10] 徐林生. 地下工程岩爆发生条件研究[J]. 重庆交通学 院学报,2005(3):31-34.
- [11] 徐林生,唐伯明,慕长春,等. 岩爆发生条件研究[J]. 公路交通技术,2003(4):73-75,98.
- [12] 刘善军,吴立新,张艳博. 岩石破裂前红外热像的时空 演化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009(7): 1034-1038.
- [13] 刘善军,魏嘉磊,黄建伟,等.岩石加载过程中红外辐射 温度场演化的定量分析方法[J].岩石力学与工程学 报,2015(S1):2968-2976.
- [14] 魏嘉磊,刘善军,吴立新,等.含孔岩石双轴加载过程声 发射多参数特征对比分析[J].采矿与安全工程学报, 2015(6):1017-1025.
- [15]李健,张艳博,刘祥鑫,等.不同含水花岗岩岩爆模拟声 发射试验研究[J].金属矿山,2014(4):53-59.