

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0786-07

巷道岩爆红外辐射前兆特征实验研究

张艳博, 李健, 刘祥鑫, 田宝柱

(华北理工大学矿业工程学院, 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063009)

摘要 以美国 Therna CAM SC3000 红外热像仪为观测手段, 选取含孔花岗岩进行不同水平应力下巷道岩爆模拟实验, 并结合数值模拟, 对岩爆过程中应力分布和红外辐射温度变化特征进行了实验研究。结果表明: 1) 轴向应力与水平应力比值随着水平应力的增大而减小, 水平应力越高, 岩爆发生的最大主应力值也相应提高。2) 岩爆发生的红外前兆时空演化特征: 主破裂前, 孔洞左右两侧平均红外辐射温度表现为突然升温型或略降转升型, 对应的破裂机制分别为压剪破裂和先张拉后压剪的复合破裂形式; 主破裂沿孔洞左右两侧高温异常条带扩展。3) 岩爆过程中, 孔洞上、下区域增温幅度比左右两侧低, 增温较为稳定, 孔洞上边区域 AIRT 均比孔洞下边区域高。4) 水平应力越大, 孔洞周围平均红外辐射温度越高。

关键词 含孔花岗岩; 岩爆; 红外辐射; 破裂前兆

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.014

Infrared radiation portentous characteristics of rock burst in roadway

ZHANG Yanbo, LI Jian, LIU Xiangxin, TIAN Baozhu

(College of Mining Engineering, Hebei Province Mining Industry Develops with Safe Technology Priority Laboratory,
North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract Selecting the infrared thermal imager CAM SC3000 produced by America as observation method, an experiment was carried out to simulate roadway rock burst under different horizontal stress by using the granites with hole. Combined with numerical simulation, the stress distribution and infrared radiation temperature characteristics were studied during the process of rock burst. The results show that the ratio of axial stress and horizontal stress decreases with the increase of horizontal stress, and the greater the horizontal stress is, the higher the maximum principal stress of rock burst is. The average infrared thermal temperature (AIRT) in the left and right sides of the hole suddenly increase or slightly decrease and then transfer to increase, and the corresponding fracture mechanism is the compressively-sheared fracture form and the composite form with early tensile fracture and late compressively-sheared fracture. The main fracture zone extends along the high temperature abnormal stripe on the left and right sides of the hole. During the rock burst process, the increasing extent of temperature above and below the hole is lower than that in the left and right sides of the hole, that is, the temperature increasing extent above and below the hole is relatively stable. Meanwhile, the AIRT above the hole is

收稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374088, 51174071); 河北省自然科学基金项目(E2012209047); 河北省高等学校科学研究计划项目(QN2014067)

作者简介: 张艳博(1973—), 男, 河北省徐水县人, 博士, 教授, 从事采矿工程和岩土工程方面的研究。

E-mail: fzd44444@163.com

Tel: 15133954081

higher than that below the hole. Moreover, the greater the horizontal stress is, the higher the average infrared radiation temperature around the hole is.

Key words granite with hole; rock burst; infrared radiation; fracture precursor

随着许多矿山、铁路(公路)交通隧道等工程向深部发展,地下巷道岩爆发生的频度和强度均明显增加。巷道开挖后,岩体内原有的应力平衡状态被打破,引起应力重分布,巷道壁面区域由原来的三向受力状态变为双向受力状态,局部产生应力集中,容易引发岩爆灾害。岩爆发生时,储存于岩体中的弹性应变能突然释放,产生爆裂、松脱、颗粒弹射甚至岩块抛掷等破坏现象,破坏性极大,严重危害设备和施工人员的安全^[1]。岩爆已成为深部地下工程中最突出的难题之一,寻找岩爆发生的前兆特征显得尤为重要。

国内外学者从不同角度对岩爆预测进行了大量的研究工作。苗金丽、贾雪娜等^[2-3]进行了三向加载再单向卸载岩爆模拟实验,研究了岩爆过程中的声发射规律特征。刘滨等^[4-7]基于微震监测技术,根据微震事件指标对岩爆发生前微震规律特征进行了分析。张建忠^[8]对闽西南某隧道进行围岩强度分析,利用强度应力比法对高应力下围岩中可能发生的岩爆进行了预测。S. Bagaraja^[9]利用能量指标从能量平衡角度对岩爆进行了预测。

近年,红外技术已广泛应用到岩石的力学行为与灾变领域。众多学者的研究表明,岩石在受力破坏过程中存在规律性的红外辐射效应,岩石在灾变前存在红外异常前兆。刘善军等^[10]研究了岩石破坏过程中红外辐射的时空分布及演化特征,发现岩石变形与破裂过程中引起的红外效应与岩石应力、应变以及破裂的性质有密切关系。马立强等^[11]通过分析煤样受力过程的红外辐射温度变化特征,发现了岩样破裂前兆。刘杰等^[12]对高强混凝土受力损伤破坏过程中的红外辐射特征进行了实验研究。

本文在进行岩爆模拟实验过程中,利用红外热像仪观测岩爆孕育、发生过程中的红外辐射特征,结合数值模拟分析,对岩样不同区域的红外辐射变化特征进行研究,以期寻找岩爆发生的前兆特征。

1 实验设计

通过数值模拟和物理实验相结合的方法,研究含孔花岗岩受力过程的应力场、红外辐射温度场变化规律,通过分析获取岩爆过程的红外辐射变化特征。未开挖的地下岩体为三向应力状态,开挖巷道

后,巷道壁面围岩呈单向压缩或双向压缩状态,应力重分布过程中局部产生应力集中,此种状态可能会发生岩爆。本实验为模拟不同水平应力下巷道岩爆破坏,选择双向加载方式,主要模拟围岩壁面的双向压缩受力状态,即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$ 。

实验选花岗岩试样,尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$,正对中心钻直径为 30 mm 的贯通圆孔。采用 RLW-3000 微机控制伺服压力机对试件进行双向加载(如图 1)。采用美国 Therma CAM SC3000 红外热像仪观测加载过程中岩样表面红外辐射变化特征。实验前关闭门窗,避免室外环境对试件红外辐射的影响,待试件表面温度稳定后开始实验。



图1 岩样受载方式

Fig.1 Loading mode of sample conditions

水平方向以力控方式分别加载到 30, 60, 90 kN 后保持稳定,轴向以 0.3 mm/min 速率加载至岩样发生岩爆,同时红外热像仪开始采集数据,每组水平应力下进行 5 组实验。试样按不同水平应力进行编号: HGY-30-序号, HGY-60-序号, HGY-90-序号。

数值模拟: 采用 RFPA^{2D} 软件模拟圆形巷道在双向受力情况下发生岩爆,数值模型划分网格为 150×150 个单元,中心钻直径 30 mm 圆孔,模型如图 2。数值模型参数根据单轴加载得到的花岗岩物理力学参数选取,假设试样非均匀细观单元服从 Weibull 分布,相应的分布参数如表 1。

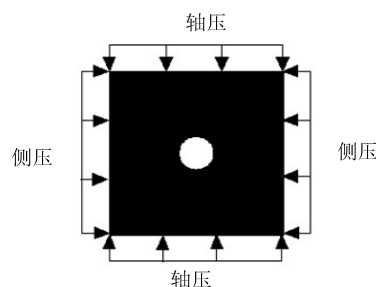


图2 模型几何特征及边界条件

Fig.2 Geometry characteristics of model and boundary conditions

表 1 RFPA^{2D} 数值模拟分布参数
Table 1 The distribution parameters
of RFPA numerical simulation

岩性	均质度 系数	弹性模量 均值/GPa	单轴抗压 强度/MPa	泊松比	压拉比
花岗岩	3	50	130	0.25	10

2 力学结果分析

2.1 基础力学分析

首先进行单轴加载实验,确定花岗岩试样基本力学参数,试样尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm,基本力学参数如表 2。

表 2 花岗岩力学参数
Table 2 Mechanics parameters of granite

试件编号	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	泊松比
HGY-1	48.9	124.1	0.213
HGY-2	51.8	130.4	0.229
HGY-3	55.2	138.7	0.252
HGY-4	51.1	129.8	0.231
HGY-5	46.7	120.1	0.237

岩爆模拟实验中轴向应力与水平应力如表 3 所列,每一组水平应力下,岩爆发生的最大主应力平均值 $\bar{\sigma}_1$ 、轴向应力与水平应力比值的平均值 Δ 计算公式如下:

$$\bar{\sigma}_1 = \sum_{i=1}^5 \sigma_{1i} / 5$$
$$\Delta = \bar{\sigma}_1 / \sigma_2$$

式中 σ_{1i} 表示该水平应力下第 i 块试件的轴向应力最大值。

表 3 岩爆模拟实验力学数据
Table 3 Mechanics data of experiment on rock burst

试件编号	水平载荷/kN	水平应力/MPa	Δ	$\bar{\sigma}_1$ /MPa
ZHG-30-序号	30	2.6	37.3	97.0
ZHG-60-序号	60	5.3	22.2	118.1
ZHG-90-序号	90	8.0	15.7	126.2

可以发现,轴向与水平应力比值随着水平应力的增大而减小,水平应力越高,岩爆发生的最大主应力值也相应提高。说明岩体发生岩爆破坏与水平应力绝对值密切相关,实验中水平应力值越高,岩样发生岩爆的程度也越剧烈。

2.2 数值模拟结果分析

在 3 种水平应力下分别进行数值模拟,结果破坏形式均是以水平方向贯通为主,见图 3a。现以水平载荷 90 kN 时为例,图 3b 为水平载荷 90 kN 时

数值模拟结果,从 Step 2 可以看到,在加载前期孔洞周围出现明显的应力集中现象,亮度越大,应力集中越强烈。初始加载时,轴压较小,由于存在水平应力,孔洞上下区域出现应力集中,亮度较大。随着轴向载荷继续加载,孔洞附近应力场调整,应力转移,在孔洞两侧部位逐渐出现应力集中区,呈现亮灰色,而在孔上下部位呈现暗灰色(见 Step 17)。当孔洞周边的应力达到材料的极限强度时,孔洞周边开始萌生微裂纹,继而,在孔壁两侧应力集中部位首先出现微破裂。

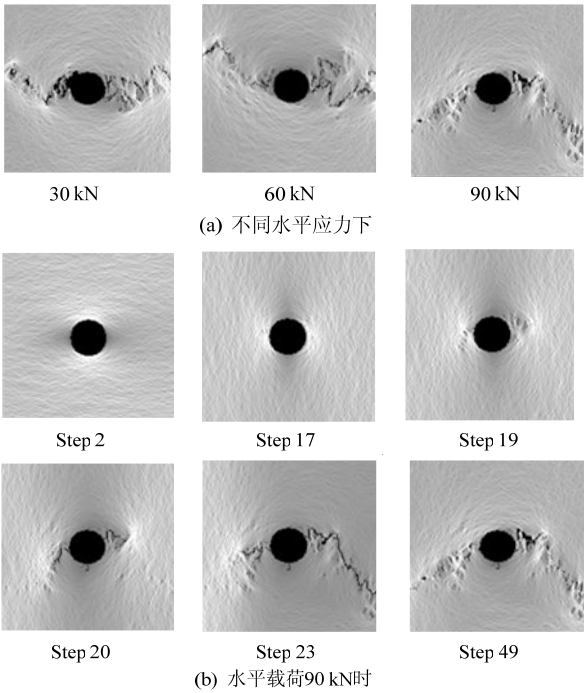


图 3 岩爆过程数值模拟最大主应力图

Fig.3 The maximum principal stress diagram of numerical simulation in the process of rock burst

由图 3 可见,初始阶段微破裂随机孤立地分布于孔洞左右两侧,微破裂之间的相互作用并不明显。随着载荷增加,微破裂之间相互作用,破裂的从集现象越来越强烈,裂纹尖端单元亮度较大,出现明显的应力集中,裂纹沿着应力集中区域由孔洞左右两侧向两端不断扩展。最后,随着破坏单元的数目不断增多,破坏单元相互连通逐步扩展到岩样的边界,最终形成贯通裂缝导致岩样的破坏,孔洞发生变形。

3 红外辐射时空特征分析

3.1 花岗岩不同区域红外辐射温度时序特征分析

对岩样不同应力性质区域的平均红外辐射温度的变化特征进行分析,分别圈定孔洞周围上、下、

左、右4个区域,如图4a。对4个区域的平均红外辐射温度(AIRT)特征进行分析。

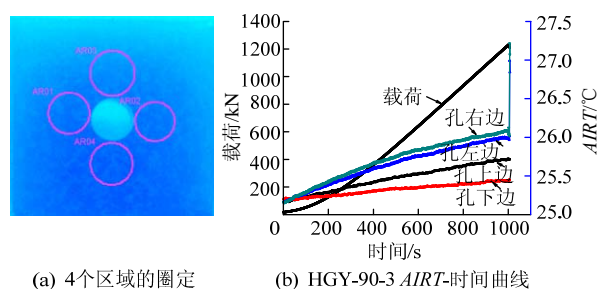


图4 试样 HGY-90-3 4个区域 AIRT 变化

Fig.4 AIRT variation of four region with sample HGY-90-3

3种不同水平应力下4个区域AIRT随时间变化趋势类似,只是AIRT数值有所不同,限于篇幅仅以水平方向载荷为90 kN时的平均红外辐射温度变化为例。从图4b可看出,孔洞上、下2个区域AIRT曲线变化相似,孔洞左、右两侧区域的AIRT曲线变化相似。岩样均表现出如图4b所示特征:孔上下区域的增温较为稳定,几乎呈线性上升,增温幅度不大;而孔洞左右区域增温幅度相对较大,并且在岩样主破裂瞬间AIRT变化曲线发生转折,出现突增现象,平均红外辐射温度上升幅度急剧增加。

出现上述变化特征的原因与岩石受力产生热辐射的物理机制有关。许多研究表明^[13-15]:岩石受力过程中产生热辐射的物理机制主要有热弹效应和摩擦热效应,前者发生在岩石的弹性变形区域,

而后者发生在岩石的屈服破裂区域。由热弹效应理论可知,固体受拉温度下降,受压时吸热温度上升。微破裂的性质不同,其热效应也会不同。当发生张拉破坏时,破裂面之间不产生摩擦,也就没有摩擦热效应,而破裂时体积膨胀受拉,会使温度略有下降;当发生剪切破坏时,由于破裂面的摩擦和错动,必然会导致温度上升和高温热辐射。

实验中使用含孔试样,由数值模拟最大主应力图3可见,水平方向加载过程中孔洞的上下区域产生短暂的应力集中,之后随着轴向加载的进行,应力转移,逐渐在孔洞左右两侧对称出现应力集中区,继而在孔洞左右两侧应力集中部位出现破裂;另外由物理实验结果发现,孔洞左右两侧区域为主要破裂区,由于破裂面之间的摩擦热效应,因此孔洞左右区域温度上升幅度较大。岩爆瞬间孔洞左右两侧大量破裂面间剧烈摩擦错动,加上岩样内储存的大量能量瞬间急剧释放,一部分会转化为热能,使岩石内部和表面温度升高,在表面以红外辐射形式向外放射,导致平均红外温度急剧增加。

图5为不同水平应力下孔上、孔下区域AIRT-时间曲线。由图可见,孔洞上、下区域平均红外辐射温度变化趋势相似,在岩样破坏过程中均稳定上升,几乎与时间呈线性关系。有所不同的是,岩样上端为被动加载端,靠近被动加载端的温度高于主动加载端,即孔洞上边区域AIRT均比孔洞下边区域温度高,高出的温度大约在0.1~0.4℃之间。

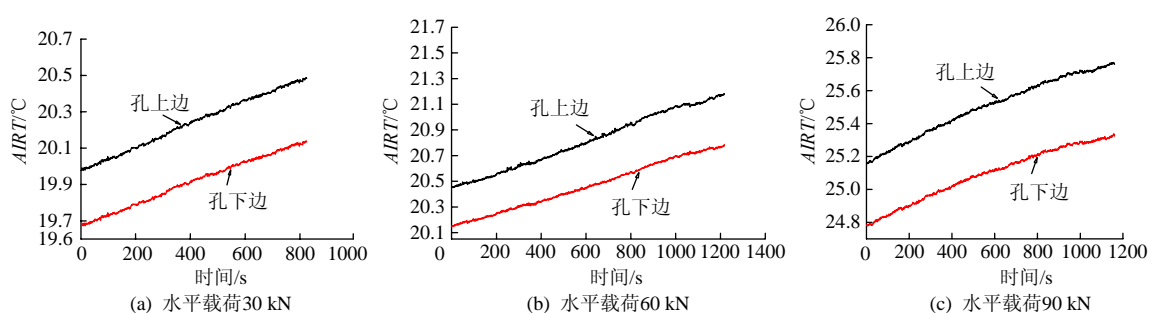


图5 不同水平应力下孔上、下区域 AIRT-时间曲线

Fig.5 AIRT-time curves above and below the hole under different horizontal stress

3.2 花岗岩不同区域红外辐射温度空间分布特征

由红外热像仪获得的图像称为红外热像图,它可以反映试件表面的红外辐射温度场变化。由图6试件 HGY-90-3 加载过程中的红外热像图可见,在840 s时,孔洞左右两侧应力集中区出现高温亮点。随着加载继续进行,孔洞左右两侧高温区域逐渐扩

大,高温异常逐渐明显。890 s时,孔洞两侧分别出现高温条带,由于岩样表面剧烈弹射及碎片剥落过程的遮挡,高温条带略显模糊。990 s时,高温条带温度急剧升高,变得异常明显,出现较为剧烈的高温辐射。1000 s时高温条带范围扩大,岩样沿高温条带区发生破坏,另外可以看到孔洞内右侧孔壁因

剧烈弹射出现明显的高温区(图 6 中 1 000 s 时)。相对于孔洞左右两侧来说,孔洞上、下区没有出现明显的高温异常,与其 *AIRT*-时间曲线特征一致。

高温条带的出现及其范围扩大反映了微破裂

产生、扩展的时空过程。孔洞两侧出现异常高温亮点可作为岩样破裂的前兆,主破裂带沿孔洞左右两侧高温异常条带扩展。

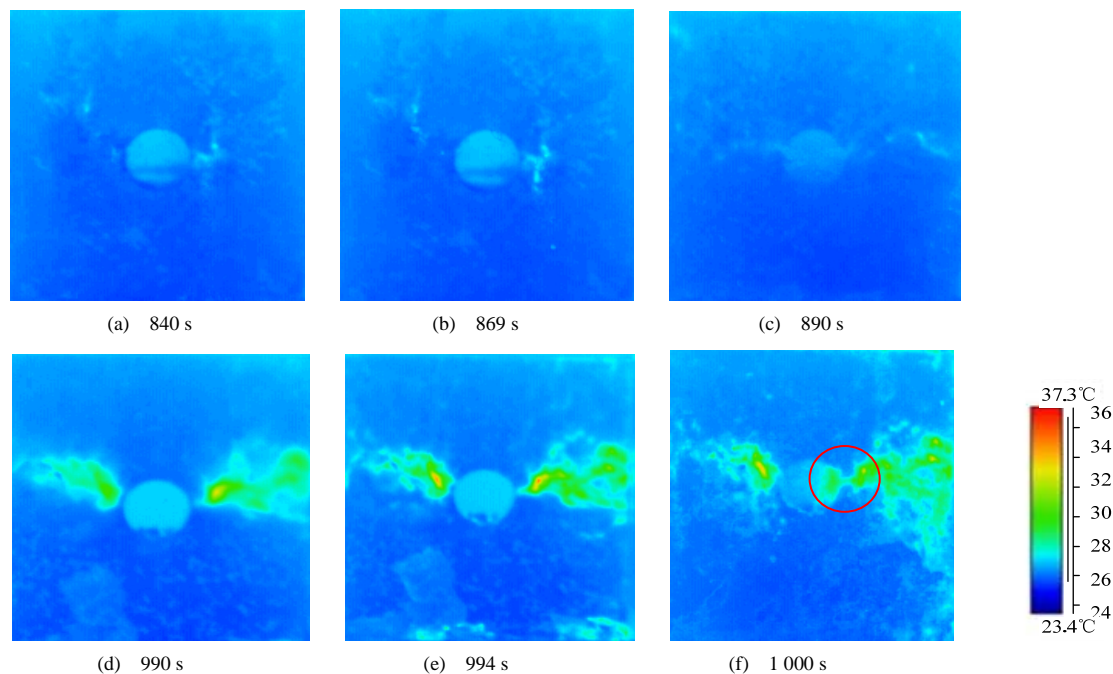


图 6 岩爆过程红外热像图

Fig.6 Thermal infrared images in the process of rock burst

从岩爆过程中实验现象可见,岩样孔洞左右两侧内壁出现剧烈弹射、剥离片落,弹射部位出现岩爆坑,之后逐渐连通形成贯通裂缝(见图 7),造成孔洞内壁温度升高。破裂区域不断向两侧扩大,由于裂纹间的剧烈摩擦错动,导致孔洞左右两侧温度急剧升高。



图 7 贯通裂缝

Fig.7 Penetrating crack

3.3 不同水平应力下平均红外辐射温度特征分析

由于孔洞左右两侧温度变化特征相似,仅以孔左边区域 *AIRT* 为例进行分析。如图 8 为不同水平应力下花岗岩载荷-时间、孔左边区域 *AIRT*-时间曲线,图 8a 中试样 HGY-30-2 峰值载荷前的温度变化较为稳定,孔左边区域平均红外辐射温度整体上呈上升趋势,前期上升幅度也较为稳定,在主破裂前

温度出现突跳现象,表现为突然升温型,升温幅度非常大,整个过程 *AIRT* 升高幅度达 1.1 °C。

图 8b 中试样 HGY-60-1 孔左边区域平均红外辐射温度不断波动,初始阶段,温度稍有下降,但整体上呈上升趋势,在主破裂前温度出现短暂的降低趋势(如图中 *a* 点),之后突然急剧上升,表现为略降再转上升的特征,即略降再转上升型。初始阶段温度略有下降,是因为试样中存在孔隙等微小缺陷,裂隙和孔隙处于压密阶段,此过程中热弹效应是温度变化的主要原因,产生的热量很少;而且有研究表明这是由于加载初期,内部孔隙被压缩闭合,挤压出的空气带走了部分热量,导致温度略有下降^[16-17]。主破裂前温度出现短暂的降低,可能由于临近失稳,应力松弛发生张性反弹,加上裂缝与空气间进行热交换的速度大于升温速度,从而出现降温现象。

图 8c 中试样 HGY-90-2 孔左边区域平均红外辐射温度整体上呈上升趋势,在主破裂前温度出现短暂的降低(如图中 *b* 点),之后加速上升,温度突跳,表现为略降再转上升的特征,属于略降再转上升型。

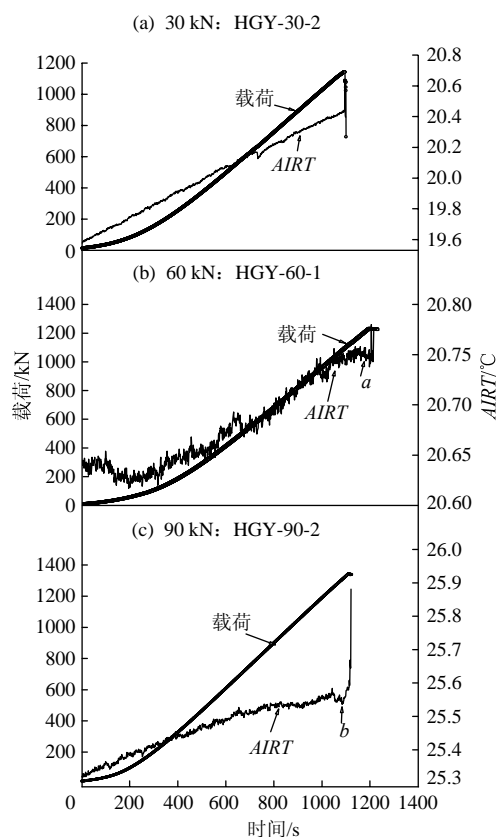


图8 不同水平应力下孔左边区域载荷、AIRT-时间曲线

Fig.8 Load and AIRT-time curves of left area of the hole under different horizontal stress

由以上分析可知,岩爆发生的热红外前兆特征表现为2种演化规律:1)主破裂前孔左右两侧平均红外辐射温度突增,即突然升温型,破裂机制表现为压剪破裂,裂纹的起裂方式为压剪型,由于裂纹间剧烈的摩擦错动以及岩爆瞬间大量弹性应变能急剧释放,导致温度突增;2)主破裂前孔左右两侧平均红外辐射温度出现短暂的降低后突增,表现为略降再转上升的特征,即略降再转上升型,对应的破裂机制为先张拉后裂纹错动,呈现压剪破裂的复合破裂形态,温度略降主要是由于岩爆发生时裂纹的起裂方式以张拉为主。

如图9所示,不同水平应力下岩样孔洞周围上、下、左、右4个区域平均红外辐射温度随时间的推进均呈现上升趋势。对比发现,岩爆过程中,孔周围平均红外辐射温度与水平应力有关,水平应力越大,孔洞周围区域平均红外辐射温度越高。温度越高,红外辐射能量就越大,说明地壳深部水平构造应力越大,岩体积聚的能量越多,岩爆发生的可能性越大。

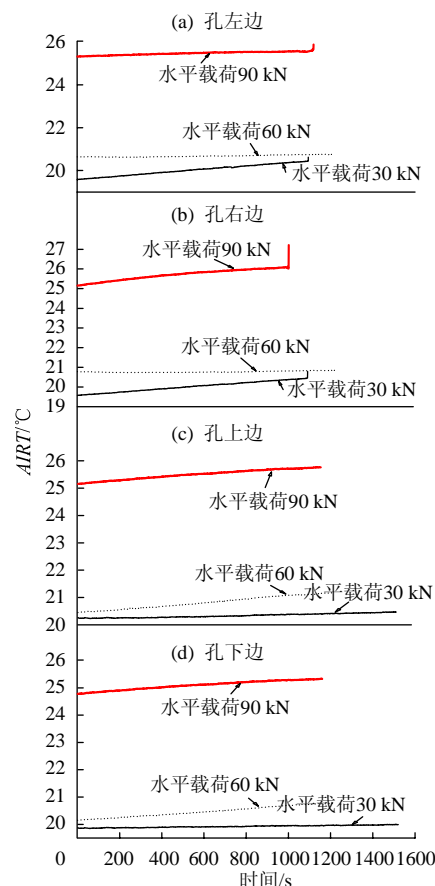


图9 不同水平应力下孔周围区域 AIRT-时间曲线

Fig.9 AIRT-time curves with the area around the hole under different horizontal stress

岩石受载过程中的红外辐射变化是一种能量累积及转化的复杂过程。压力机所做的机械功一部分会转化为热能,使岩石内部和表面温度升高,在表面以红外辐射形式向外放射。有相关的研究表明,红外辐射温度与应力所做机械功呈正相关关系,水平应力越大,外力做功越多,因此平均红外辐射温度也越高。

4 结 论

1) 轴向应力与水平应力比值随着水平应力的增大而减小,水平应力越高,岩爆发生的最大主应力值也相应提高,说明岩体发生岩爆破坏与水平应力绝对值密切相关。

2) 岩爆发生的热红外前兆特征表现为2种演化规律:突然升温型,岩爆时裂纹的起裂方式以压剪为主;略降再转上升型,对应的裂纹起裂先以张拉为主,再转化为裂纹相互错动,发生剪切破裂。

3) 岩爆过程中,孔洞上、下区域增温幅度比左

右两侧低, 增温较为稳定, 几乎呈线性上升, 孔洞上边区域平均红外辐射温度均比孔洞下边区域温度高。

4) 岩爆过程中, 孔周围平均红外辐射温度与水平应力有关, 水平应力越大, 孔周围平均红外辐射温度越高。红外辐射温度与应力所做机械功呈正相关关系, 水平应力越大, 外力做功越多, 因此平均红外辐射温度也越高。

参考文献:

- [1] 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, 26(5): 865-876.
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876.
- [2] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1593-1603.
MIAO Jinli, HE Manchao, LI Dejian, et al. Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1593-1603.
- [3] 贾雪娜. 应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [4] 刘滨, 刘泉声. 岩爆孕育发生过程中的微震活动规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 174-180.
LIU Bin, LIU Quansheng. Space evolution regularity of microseism during the development of rockburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 174-180.
- [5] 黄满斌. 深埋隧道岩爆机理与微震监测预警初探[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [6] 赵周能, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 491-497.
ZHAO Zhouneng, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Study of relativity between rock burst and microseismic activity zone in deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 491-497.
- [7] 谭信荣, 陈寿根, 杨家松. 基于微震监测的岩爆预报在引水隧洞施工中的运用[J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 73-76.
TAN Xinrong, CHEN Shougen, YANG Jiasong. Application of microseismic monitoring based rock burst prediction to construction of diversion tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(6): 73-76.
- [8] 张建忠. 闽西南某隧道高地应力特征及隧道岩爆预测研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(3): 183-189.
ZHANG Jianzhong. Case study on high ground stress behavior and rock burst prediction of tunnels[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(3): 183-189.
- [9] BAGARAJA S, RIDHO K W, NUHINDRO P W. Rockburst prediction of a cut and fill mine by using energy balance and induced stress[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2013(6): 426-434.
- [10] 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, 30(7): 1034-1038.
LIU Shanjun, WU Lixin, ZHANG Yanbo. Temporal-spatial evolution features of infrared thermal images before rock failure[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2009, 30(7): 1034-1038.
- [11] 马立强, 李奇奇, 曹新奇, 等. 煤岩受压过程中内部红外辐射温度变化特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 331-336.
MA Liqiang, LI Qiqi, CAO Xinqi, et al. Variation characteristics of internal infrared radiation temperature of coal-rock mass in compression process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 331-336.
- [12] 刘杰, 张千里, 杨峰, 等. 高强混凝土受压损伤过程红外辐射特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 36-40.
LIU Jie, ZHANG Qianli, YANG Feng, et al. Test study on the infrared radiation features of high strength concrete during fracturing process under pressure[J]. China Railway Science, 2013, 34(2): 36-40.
- [13] 刘善军, 吴立新. 脆性岩石与有机玻璃受力红外辐射特征的比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4183-4188.
LIU Shanjun, WU Lixin. Comparison of infrared radiations of brittle rock and polymethyl methacrylate induced by stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup 2): 4183-4188.
- [14] 刘善军, 吴立新, 张艳博, 等. 潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 265-268.
LIU Shanjun, WU Lixin, ZHANG Yanbo, et al. Change feature of infrared radiation from loaded damp rock[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2010, 31(2): 265-268.
- [15] 张艳博, 刘善军. 含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1013-1017.
ZHANG Yanbo, LIU Shanjun. Thermal radiation temperature field variation of hole rock in loading process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1013-1017.
- [16] 吴立新, 刘善军, 吴育华. 遥感-岩石力学引论: 岩石受力灾变的红外遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 28-36.
- [17] FREUND A A, TAKEUCHI A, LAU B W S, et al. Stimulated infrared emission from rocks: assessing a stress indicator[J]. Earth Discuss, 2007(1): 97-121.