

文章编号: 1001-4888(2020)01-0041-17

岩石节理动摩擦过程中的声发射和产热特性研究^{*}

单俊芳, 徐松林, 张磊, 陈丽娜, 王鹏飞

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 节理岩体摩擦普遍存在于地震孕震、板块滑动等自然现象中。目前研究的重点主要集中于大位移下滑动摩擦特性的揭示, 很很少有人对摩擦滑移初期阶段的相关特性进行研究。本文基于改进的分离式霍普金森压杆装置(SHPB)建立了多点声发射和红外测温等实验装置, 研究了 5 种角度节理表面在摩擦滑动初期的声发射和产热特性。结果表明, 与节理摩擦滑移相关的信息位于声发射信号的高频域中, 对于所研究的花岗岩样品, 其频率范围为 78.1~312.5kHz, 低于该频率范围的信号源于撞击界面的扰动; 与节理摩擦滑移相关的产热信息位于红外测温信号的低频域中, 5 种节理面摩擦滑移产热对应的温升明显较低。为了揭示这些测量信号的内在规律, 基于数值方法建立了合理的分析模型。计算结果表明, 随着节理角度的增大, 节理面越易滑移, 节理表面温升幅值越大, 但都低于 0.1℃, 与实验结果相一致。

关键词: 节理岩体; 摩擦滑动; 声发射; 红外测温; 数值计算

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-19-121

0 引言

摩擦是一种普遍存在的自然现象。岩体摩擦的研究是地震孕震、板块滑动等研究中的热点问题之一^[1-3]。摩擦涉及岩石的多尺度、多层次的物理机制, 给相关研究带来很大困难, 如何揭示岩石在摩擦滑动过程中的弱化机制引起了人们的广泛关注。Di Toro 等^[4]利用伺服控制压-扭装置, 在任意湿度和温度条件下进行了一系列快速滑动实验, 得到了动摩擦系数在不同滑移速度下的值。Okada 等^[5]进行了压剪联合冲击下的平板斜撞击动摩擦实验, 并根据试样中波的传播过程和一维应力波理论, 得到了界面发生滑移时的滑动速度。徐松林等^[6]利用轻气炮装置对具有斜节理的花岗岩试件进行了不同正压力、不同滑移速度的压剪联合冲击加载实验, 研究了加载、荷载维持以及卸载三个阶段的摩擦系数, 得到了花岗岩界面整体的滑移特性。Rice^[7]研究了动摩擦系数与滑动速度之间的关系, 发现动摩擦系数是以震荡形式减小和急剧增大, 同时由于岩石内部微裂纹的存在使得动摩擦系数随滑动速度的变化关系具有明显的差异, 最为重要的是发现了在滑动速度为 4m/s 时出现了动摩擦系数为零, 也就是零摩擦现象。Xia 等^[8]根据岩体断层的滑动过程, 发现了亚瑞利波和超剪切波之间的转化, 并且得到了两种波转化时节理面的滑移速度, 该理论很好地解释了地震学中的一些现象。

除了力学性能弱化, 即滑动弱化外, 岩石强度的弱化机制还包括热弱化。热弱化包含高强度摩擦应力状态下的瞬时加热和孔隙流体的热压。Beeler 等^[9]对凹凸起伏的接触表面进行局部的急速加热, 揭示了热对于界面摩擦强度的影响。Di Toro 等^[10]在旋转圆盘实验中发现, 摩擦引起的熔化是沿滑移面而

^{*} 收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11672286, 11602267, 11472264, 11872361), 中石油与中科院重大战略合作项目(2015A-4812), 安徽省自然科学基金(1708085MA05) 资助

通讯作者: 徐松林(1971-), 男, 博士, 研究员。主要从事材料的冲击响应理论与实验技术研究。Email: slxu99@ustc.edu.cn

产生的,且大部分熔体从组合试样中被挤压出去;在实验结束后,滑移面上依然保留有部分熔体,形成一个连续层,这很好地揭示了地震过程中节理面上出现的摩擦强度热弱化现象。另外,当节理岩石界面发生滑动时,界面会产生一定频率的声发射信息,分析有关的声发射信息,就可以推测界面发生变化的位置和规模。Goebel 等^[11]结合声发射技术和三轴压缩实验系统,模拟发震地壳内的条件,研究了节理花岗岩的应力响应和声发射响应。实验发现,声发射信号的起跳点、下降点、增长速率以及幅值大小均与应力信号的变化趋势一致。幅值的大小和 AE 震源位置的组合可以提供对节理界面上特性的重要依据。

目前的研究结果多集中于滑动速度与摩擦系数或摩擦强度之间的关系,考虑的大部分情况也局限于节理岩体在准静态和大位移下的滑动摩擦领域,针对摩擦发生前期的内在机制以及相应的物理力学特性的变化情况并没有给予足够的重视。为此,建立全新的研究方法,探索摩擦过程中声、热等物理信息显得尤为重要。本文基于改进的 SHPB 方形杆束装置,建立了多点声发射法和红外测温法等一系列测量系统,对摩擦滑移初始阶段的声发射以及热信号进行记录与分析;最后,采用数值方法验证了这一过程。

1 实验

1.1 试样制备

本次实验所用的岩石为福建产的 G603 晋江巴厝白花岗岩,其体积密度(ρ)、杨氏模量(E)、泊松比(μ)和硬度分别为 $2650\text{kg}/\text{m}^3$ 、 88.4GPa 、 0.21 和 106 。为研究岩石节理的摩擦特性,首先将 $50\times 50\times 50\text{mm}^3$ 的花岗岩立方体以与垂直方向呈 10° 、 15° 、 20° 、 30° 和 40° 的角度切割成两个部分,处理后的试件如图 1 所示。由于加工的难度以及精度问题,导致 20° 的节理花岗岩试样尺寸略小于其他试样,但不影响实验结果分析。在进行实验之前,试样与杆接触的前、后面,以及节理互相接触的节理面都用了同一型号 Type2000 的砂纸进行打磨,以保证试样前后面的平面度,以及节理表面粗糙度的一致性。为了保证实验的重复性,每种节理角度花岗岩至少做 5 组重复性实验,具体的试样尺寸以及冲击速度见表 1 所示。



图 1 不同角度的节理花岗岩试样

Fig. 1 Jointed granite specimens with different angles

1.2 实验装置与方法

基于 Albertini 等^[12]以及张磊等^[13]建立的 Hopkinson 杆束系统实验的思想,设计了一套套筒式的 Hopkinson 方形杆束实验装置,如图 2 所示。实验装置采用直径为 37mm 、长度分别为 200mm 和 2000mm 的圆形钢杆作为子弹和过渡杆,并采用四根边长为 8mm 、长度为 800mm 的方形钢杆,利用铝合金套筒形成杆束,以此作为入射杆束和透射杆束。方形杆在加工过程中由于应力集中等问题,会造成端面垂直度具有一定的偏差,为了使圆杆与方杆的接触面更为紧密,减少应力波传播过程中在界面上的损失,在套筒中预留直径略大于方杆对角线长度的圆形孔,使得每根方杆在组合时可以适当进行调整。

表 1 不同节理角度花岗岩的尺寸和冲击速度
Tab. 1 Size and impact velocity for granite with different joint angles

节理角度	横截面积 /(mm ²)	高度 /m	冲击速度 /(m/s)	节理角度	横截面积 /(mm ²)	高度 /m	冲击速度 /(m/s)
10°	50.18×50.10	50.04	2.42	15°	50.08×50.12	50.08	2.18
	50.20×50.06	50.12	2.34		50.10×50.06	50.16	2.35
	50.16×50.10	50.08	2.23		50.00×50.08	50.14	2.16
	50.14×50.10	50.06	2.56		50.06×50.10	50.10	2.20
	50.22×50.08	50.14	2.42		50.12×50.04	50.18	2.24
20°	49.94×49.60	50.04	2.16	30°	50.06×50.10	50.04	2.26
	49.68×49.88	49.90	2.18		50.14×50.02	50.06	2.14
	49.72×50.04	48.88	2.14		50.02×50.08	50.02	2.39
	49.92×49.94	49.00	2.27		50.10×50.08	50.08	2.18
	49.66×49.88	50.08	2.14		50.08×50.08	50.10	2.18
40°	50.16×50.10	50.06	2.32				
	50.14×50.06	50.14	2.23				
	50.18×50.10	50.12	2.15				
	50.20×50.02	50.04	2.44				
	50.14×50.12	50.08	2.27				

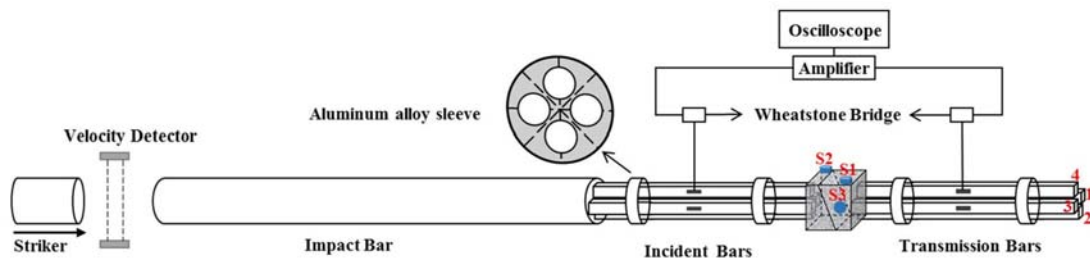


图 2 基于 Hopkinson 杆束的声发射实验装置图

Fig. 2 Diagram of the acoustic emission experimental device based on the Hopkinson bundle bars

该杆束实验装置的具体动态测试流程如下：发射装置利用氮气加压，为子弹提供一定的加载速度，当子弹撞击到过杆束时，在过杆束上产生一个应力脉冲。当应力脉冲到达入射杆束后会在每根方杆上产生一个入射脉冲，入射脉冲由方杆上的电阻应变片捕捉，并将此信号通过动态应变仪放大后，用示波器显示和记录。应力脉冲传播到花岗岩试样时会产生一个沿着入射杆束原路返回的反射脉冲和透过试样传播到透射杆束上的透射脉冲。同理，可由入射杆束和透射杆束上的电阻应变片分别记录得到反射脉冲和透射脉冲信号。由于试件尺寸明显比小杆尺寸大得多，因此，小杆撞击和小杆接收的波是一维应力波，但试件中传播的是一维应变波。

为了分析本文杆束实验装置的可行性，在进行节理花岗岩动态冲击加载实验之前，对空打波形进行测试分析。图 3 是子弹速度为 2.14m/s 时示波器记录得到的四组应变片测得的波形信号。由图 3(a) 可见：四根小杆的入射波、透射波基本一致，只在卸载末尾段有差异，但并不影响节理面滑移信号分析。分别对每根小杆的入射波、透射波进行比较，如图 3(b) 所示，图中 Bar1、Bar2、Bar3 和 Bar4 分别表示四组小杆，黑色曲线和红色曲线分别对应入射和透射信号。可见：四根小杆的波形和脉冲宽度具有较好的一致性，应变幅值相差低于 2%，说明在实验范围内每组小杆的接触面平整，空打条件下基本满足一维应力波假定。常规 SHPB 实验得到的是试件碰撞面上的平均效应，但本文所使用的杆束系统是测试试

件表面局部不同位置处的材料特性。至于局部波系的传播和影响,则需要等这些波系的边界反射到来。从所记录的波形来看,入射小杆和相应的透射小杆的脉冲波形相对比较完整,边界效应尚没有影响到。

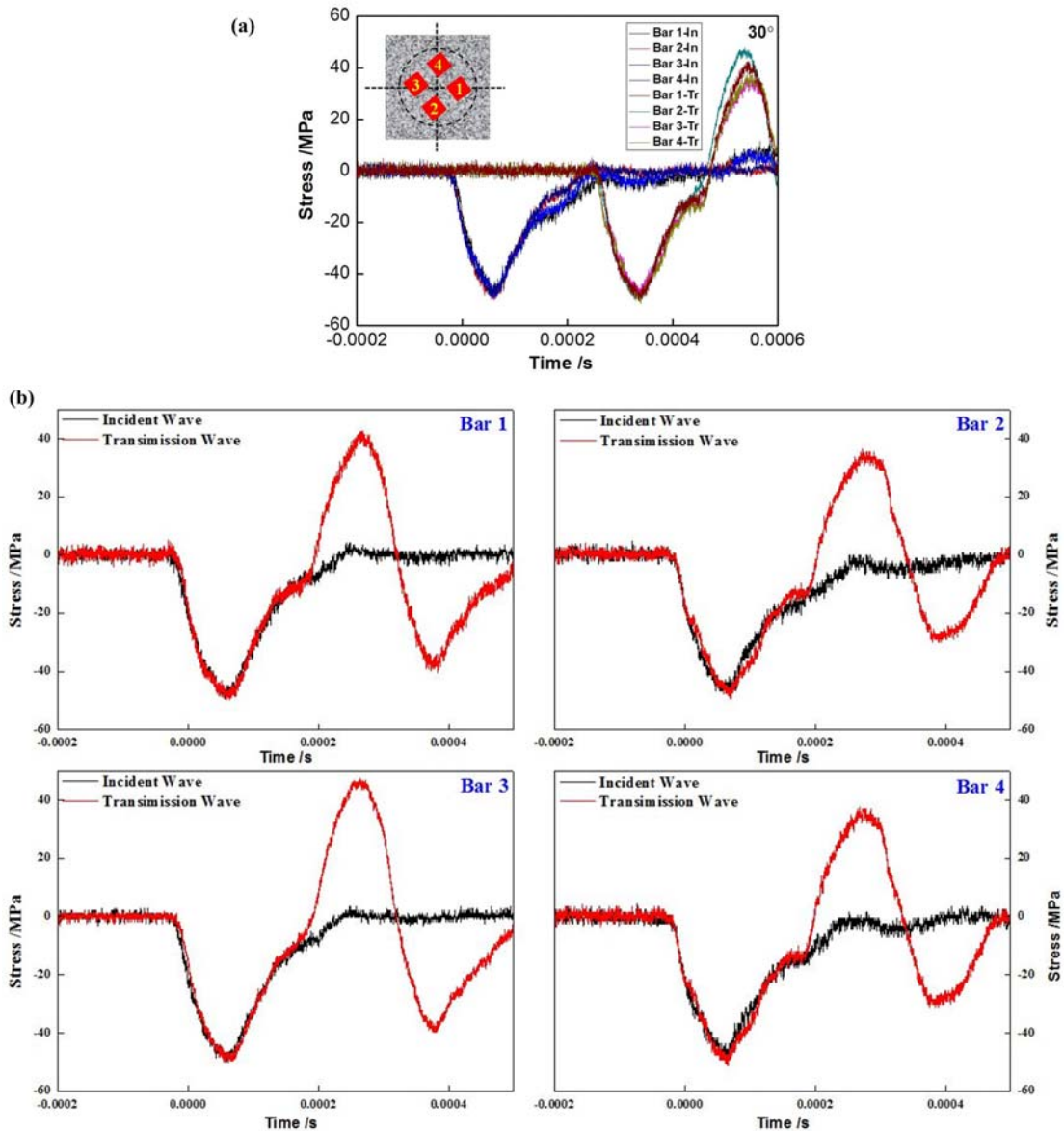


图3 空打条件下四根小杆的原始波形:(a)波形比较;(b)四根小杆波形分别比较

Fig. 3 The original waveforms of four groups of square bars under air strike conditions:

(a) comparison of four-bar waveforms;(b) comparison of single-bar waveforms

实验时,为了获得花岗岩节理面的微动滑移信息,在试件上分布了三个直径20mm、高度20mm、共振频率为200~1300kHz的声发射探头,如图2所示。其中声发射探头S1和S2位于花岗岩正上方对角线位置;S3位于背侧紧挨节理面位置。由此,以花岗岩为基准建立一个空间坐标系,结合声发射传感器位置以及节理面的角度信息,就可以找到初步的声发射源定位方法。同时,采用Phantom V12.1高速摄影机拍摄节理面滑移过程,并利用数字图像相关法(DIC)测量试样的全场变形。

刘永贵等^[14]已经验证了红外测温系统的可行性,本文采用与其系统一致的红外测温系统装置。完整的红外测温系统主要包括:激光发射器、红外探测器、镀金凹面镜、前置放大器、热电偶丝、直流电源等,如图4所示。此套红外测温系统的工作原理是将花岗岩试件置于反射光路中,当试件的温度产生瞬态变化时,其表面的微小面积上的辐射能通过聚焦凹面镜汇聚到探测器内的光敏单元上,转化为电信号后通过前置放大器将放大的电信号传输到示波器上并采集记录。另外,为了精确获得示波器记录的

电压信号与花岗岩节理表面处温度之间的关系,在动态实验之前要进行静态标定。为了剔除冲击升温的影响,将冲击速度控制到尽可能低,使冲击过程试件处于弹性变形状态,因此,本实验冲击速度控制在 2m/s 左右。

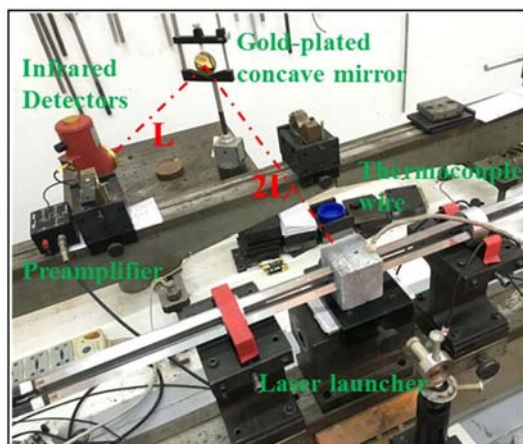


图 4 红外测温装置图

Fig. 4 The infrared temperature measurement setup

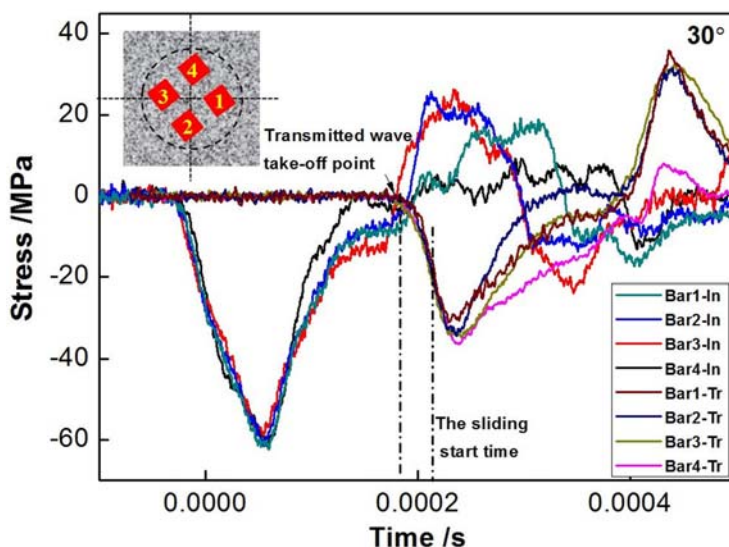


图 5 30°节理花岗岩的实验波形

Fig. 5 The wave profiles of granite with 30° joint

2 实验结果

2.1 具有节理面试件的杆束信号与局部变形分布

图 5 为 30°花岗岩节理面滑移时对应的入射杆束及透射杆束上的应变时程曲线。四根方杆的对应位置如图 5 中左上角所示。比较花岗岩试件不同位置处的波形信号,四个位置对应的应变波形相差不大,其幅值保持在 2%左右。由于四根小杆的长度均为 800mm,入射波会受到反射波的叠加影响,因此应变波形卸载段尾端有差异。本文研究的微动滑移在加载段就已经开始,卸载段尾端的差异不影响本文的分析。另外,透射波形之间呈现一定的差异。这种差异主要源于节理面上不同位置的微动摩擦滑移特性存在差异,例如局部粗糙特性、局部波动特性等。当冲击速度很小时,试件产生的变形只有弹性变形,试件中传播的只有弹性波而没有塑性波。每当入射端有一个入射应力的作用,根据试件与杆之间的波阻抗的关系,在透射端必然接收到一个透射应力的作用;但当节理面滑移时,节理面上应力波会发生部分反射,即进入节理另一侧的透射波与节理面未滑移时的透射波相比会出现明显的变化,即可利用

透射应力与入射应力的关系变化作为判断节理面是否发生滑移的依据^[13,15]。利用此方法计算发现,30°花岗岩节理面大概在32 μ s左右开始滑移;而对于10°、15°、20°和40°的节理花岗岩而言,滑移起点大致为70 μ s、62 μ s、48 μ s和26 μ s左右。也就是说,随着节理角度的增大,试样越易滑移,滑移时间也越早。

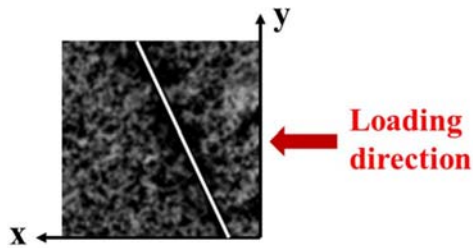


图6 试件表面散斑场及坐标系
Fig. 6 Speckle field and coordinate system on specimen surface

图6所示为30°节理花岗岩数值散斑图像。设冲击加载方向为x方向,花岗岩表面为x-y平面。图7为30°节理花岗岩表面x和y方向的位移场。以x方向位移场为例,沿冲击加载方向试件表面位移有明显的变化;节理面左右两侧位移场的变化有一定差异,右侧位移要大于左侧位移,这说明冲击加载下节理面两侧的变形并不均匀。y方向位移场具有相同的趋势。由此可见,节理面微动滑移过程可分为三个阶段,即初始稳定阶段、滑移阶段、反向运动阶段,具体如下:当 $T_1=28.56\mu$ s时,节理面未滑移,位移场没有明显的变化,处于初始稳定阶段;当 $T_2=85.68\mu$ s时,节理面右侧和左侧位移场出现了明显的变化,右上角和左上角的位移变化最大,此时试件整体向左平移运动,右侧向上平移,左侧向下平移,节理面开始滑移,处于滑移阶段;当 $T_3=92.82\mu$ s时,右侧和左侧位移场幅值继续增大,节理面继续滑移,处于滑移阶段;从 $T_4=139.23\mu$ s直到 $T_5=149.94\mu$ s,节理面右侧和左侧虽然继续向左运动,但在y方向,两侧出现了很大的反向位移差,节理面两侧开始反向相对运动,为反向运动阶段;当 $T_6=171.36\mu$ s时,两侧位移场幅值继续增大,节理面两侧继续反向滑移,处于反向运动阶段。上述过程主要针对微动摩擦三个阶段,即波致摩擦、惯性摩擦和滑动摩擦的前面二个阶段。根据DIC图像,可以推算出滑移扰动的波速约为370 m/s,但在滑移阶段的扰动传播速度为200m/s,反向运动阶段为10m/s。其滑移的内在机制还有待进一步研究。

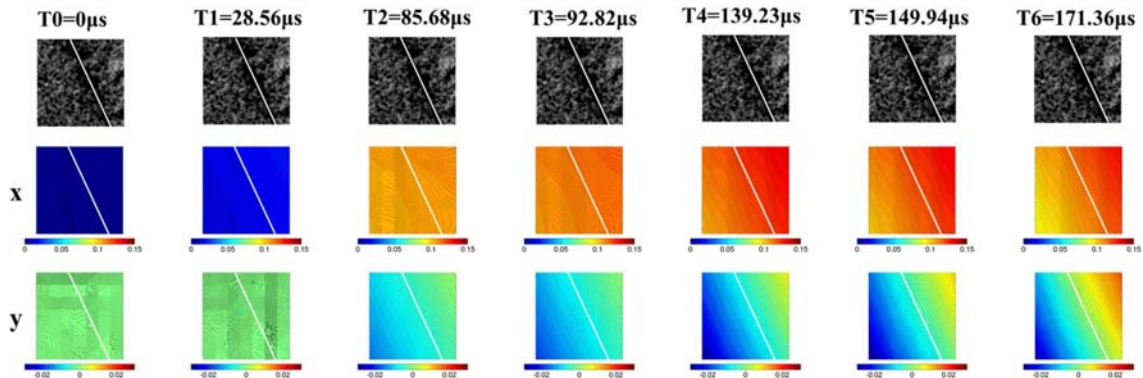


图7 30°节理岩体表面位移场
Fig. 7 The full displacement field of granite with 30° joint

2.2 声发射信息

在加载速度相同的情况下,可以测得不同节理角度的花岗岩的原始声发射信号,如图8所示。其中S1、S2和S3分别对应三个位置的声发射传感器的信号。由图直观可知,三个传感器对应的声发射信号的起跳时间间隔时间极短。对于不同节理角度的花岗岩试件,位于上表面的S1和S2传感器所记录的声发射信号具有一定的相似性,位于侧面的S3传感器所记录的声发射信号强度通常小于S1和S2处。

为了研究声发射信号的物理机制,利用小波变换对声发射信号进行8层离散小波分解,分解后每层所对应的频带范围见表2。本文以30°节理花岗岩为例对声发射信号的基本特征进行说明,其经过小波分解后的低频信号如图9(a)所示。对于同一位置的声发射信号,不同频带的近似分解波形与原始波形基本相同,即对于原始声发射信号的低频信号部分,不同频段所包含的声发射特性与频率无关,始终保持一致性。所以,在该状态下无法通过低频信号直观确定不同节理角度花岗岩的滑移信息。三个声发

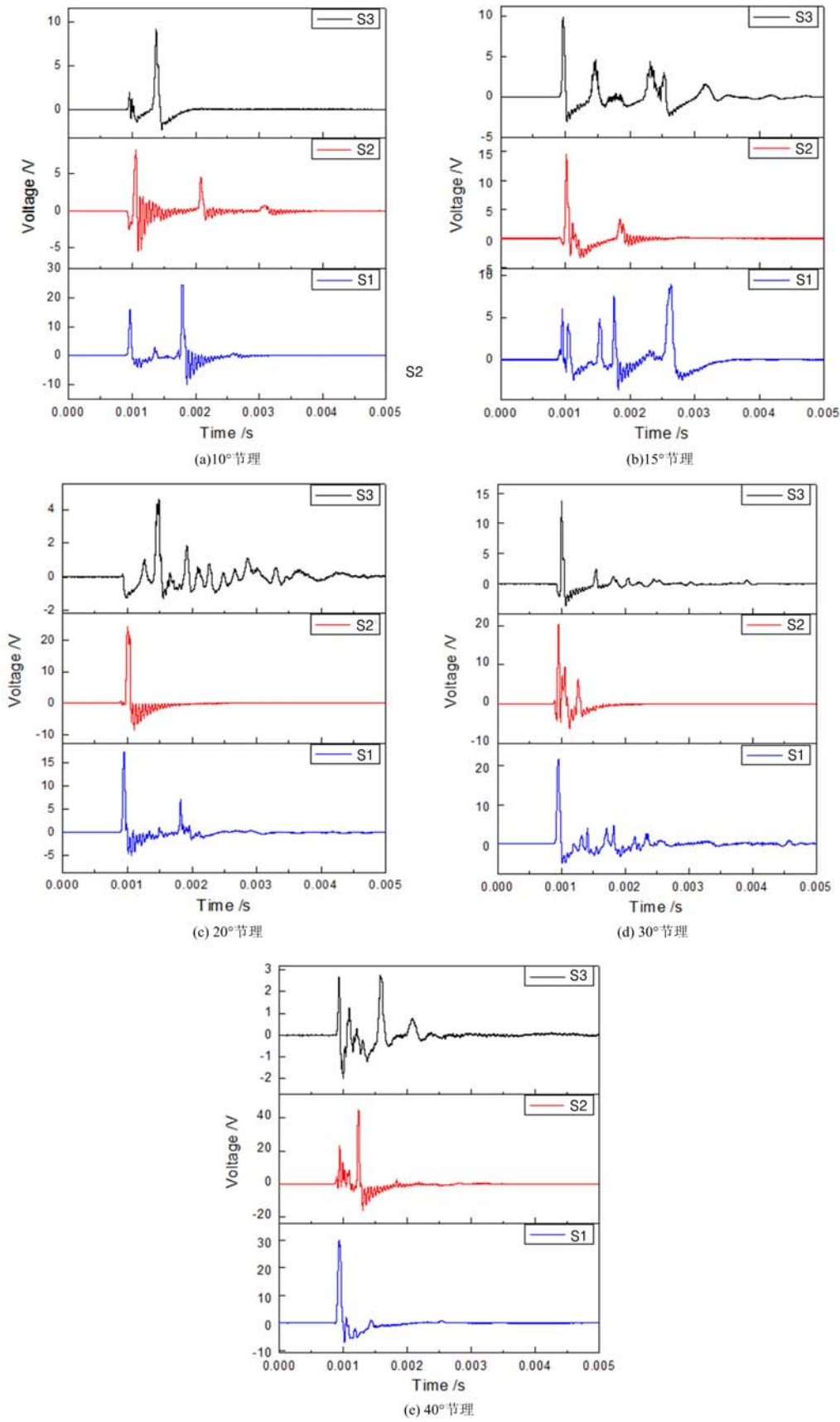


图 8 不同节理角度花岗岩的原始声发射信号

Fig. 8 Original acoustic emission signals of granite with different joint angles

射信号的高频部分如图 9(b)所示,从中可以发现:同一个声发射信号的细节信号 D1-D8 显示出明显的差异性,而且三个位置的声发射信号在同一频段的细节信号也具有明显的差异性。这些分解的细节信号可分为三种,即连续信号(D1-D2)、不连续突发信号(D3-D6)和非周期非连续信号(D7-D8)。从声发射信号源以及节理面微动滑移的过程来看,这三个信号分别对应系统噪声信号、节理摩擦滑移信号以及表面波信号。

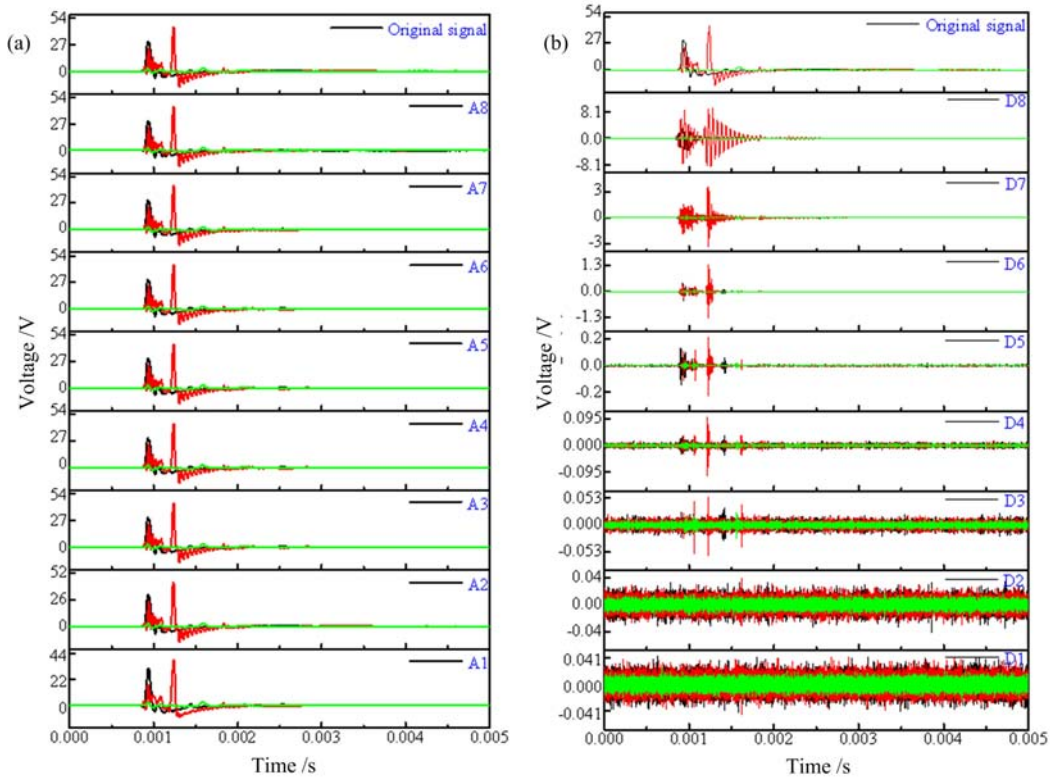


图 9 30°节理花岗岩三个位置的声发射信号:(a)小波分解近似信号;
(b)小波分解细节信号。A1-A8 和 D1-D8 分别是低频信号和高频信号。

Fig. 9 The acoustic emission signals at three positions of specimen with 30° joint: (a) Original acoustic emission signals; (b) Approximate acoustic emission decomposition signals. (c) Detailed acoustic emission decomposition signals. A1-A8 and D1-D8 represent the low frequency domain and the high frequency domain, respectively.

表 2 8 个分解层的低频信号和高频信号对应的频带范围

Tab. 2 Band range of frequency signals in eight decomposition layers

低频信号	频带范围/(kHz)	高频信号	频带范围/(kHz)
A1	0~2500.0	D1	2500.0~5000.0
A2	0~1250.0	D2	1250.0~2500.0
A3	0~625.0	D3	625.0~1250.0
A4	0~312.5	D4	312.5~625.0
A5	0~156.3	D5	156.3~312.5
A6	0~78.1	D6	78.1~156.2
A7	0~39.1	D7	39.1~78.1
A8	0~19.5	D8	19.5~39.1

结合声发射信号和应变场演化特性,试件上表面靠近节理处(S2)的声发射信号来源为节理面的摩

擦滑移;上表面完整位置处(S1)的声发射信号来源主要为应力脉冲加载下花岗岩试件入射端面发生的局部变形和节理面的相对滑移;试件侧表面位置(S3)的主要信号来源为节理面的摩擦滑移;试件上表面位置早于侧表面位置出现声发射信号并达到最大值。基于声发射原理、小波变换理论和傅里叶频谱分析方法,可以将摩擦滑移对应的声发射信号定位在 78.1~312.5kHz 的高频区域。

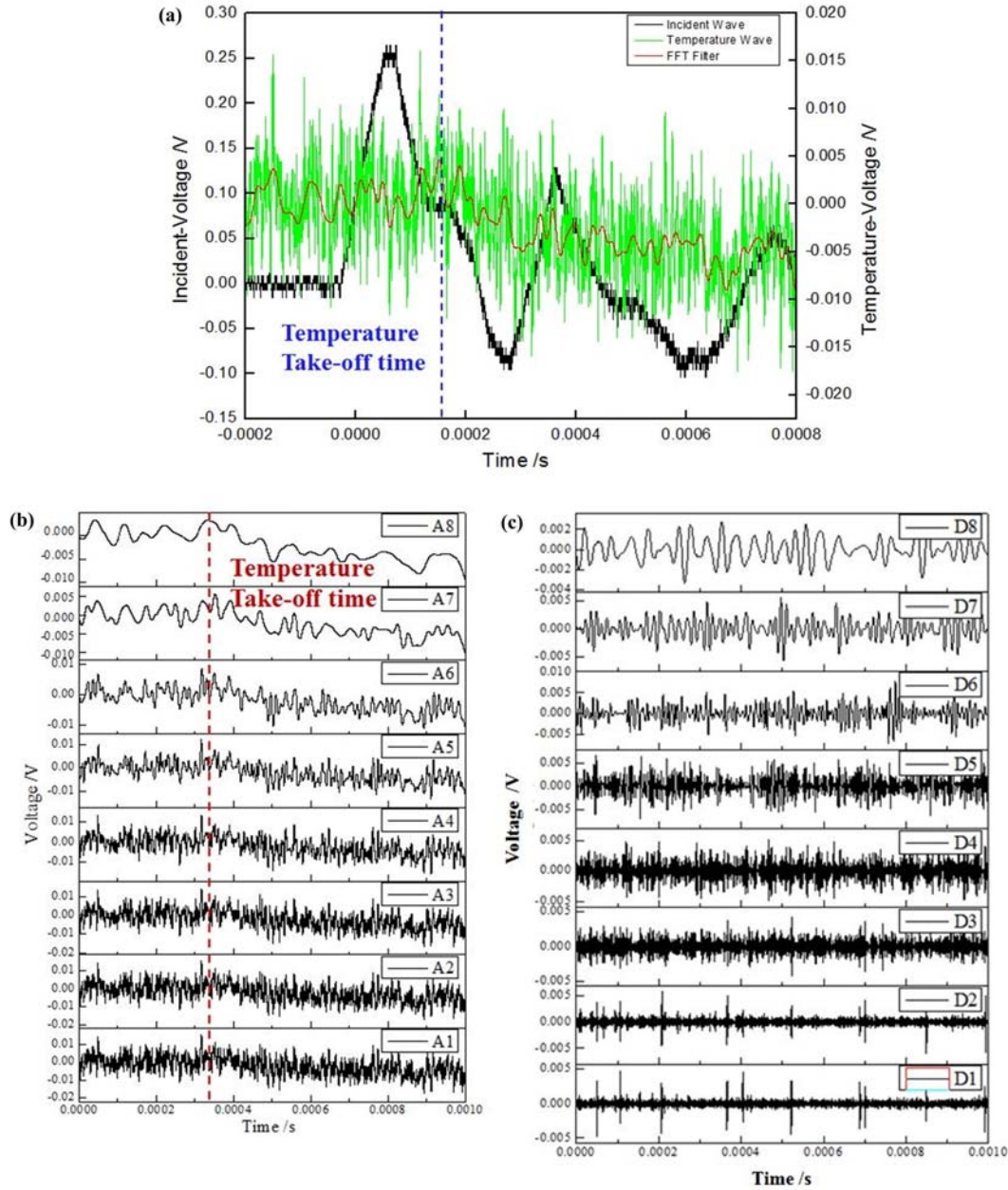


图 10 30°节理花岗岩的红外测温信号：(a) 原始温度信号；(b) 低频信号；
(c) 高频信号。A1-A8 和 D1-D8 分别是低频信号和高频信号。

Fig. 10 The infrared temperature signals at specimen with 30° joint: (a) Original signals; (b) The low-frequency signals; (c) The high-frequency signals. A1-A8 and D1-D8 represent the low frequency domain and the high frequency domain, respectively.

2.3 产热特性

为了研究花岗岩节理面在摩擦滑移时的产热特性,进行了系列的红外测温实验。因为冲击速度很低,因此冲击过程中无塑性温升。图 10(a)所示为 30°节理花岗岩的红外温度信号。黑色曲线对应入射杆上应变片所记录到的入射波和反射波,绿色曲线对应红外测温系统测量的原始温度信号。为了从原

始信号中提取温升信息,分别利用傅里叶滤波法和小波分析方法对温度信号作进一步处理。图 10(a)中的红色曲线为傅里叶滤波法(截止频率为 62.5kHz)处理后的结果,图 10(b)和图 10(c)分别对应用 dh5 小波基进行 8 层离散小波变换后的低频和高频信号。不同频带的近似分解波形与原始波形基本相同,而且比较不同节理角度花岗岩试件的低频信号(如图 11 所示),发现彼此之间存在明显的差异性,此部分信号反映出节理面微动滑移产热引起的温升信息,为有用信息;而高频信号变化不大,此部分高频信号主要表征的是实验系统存在的固有噪声信号。

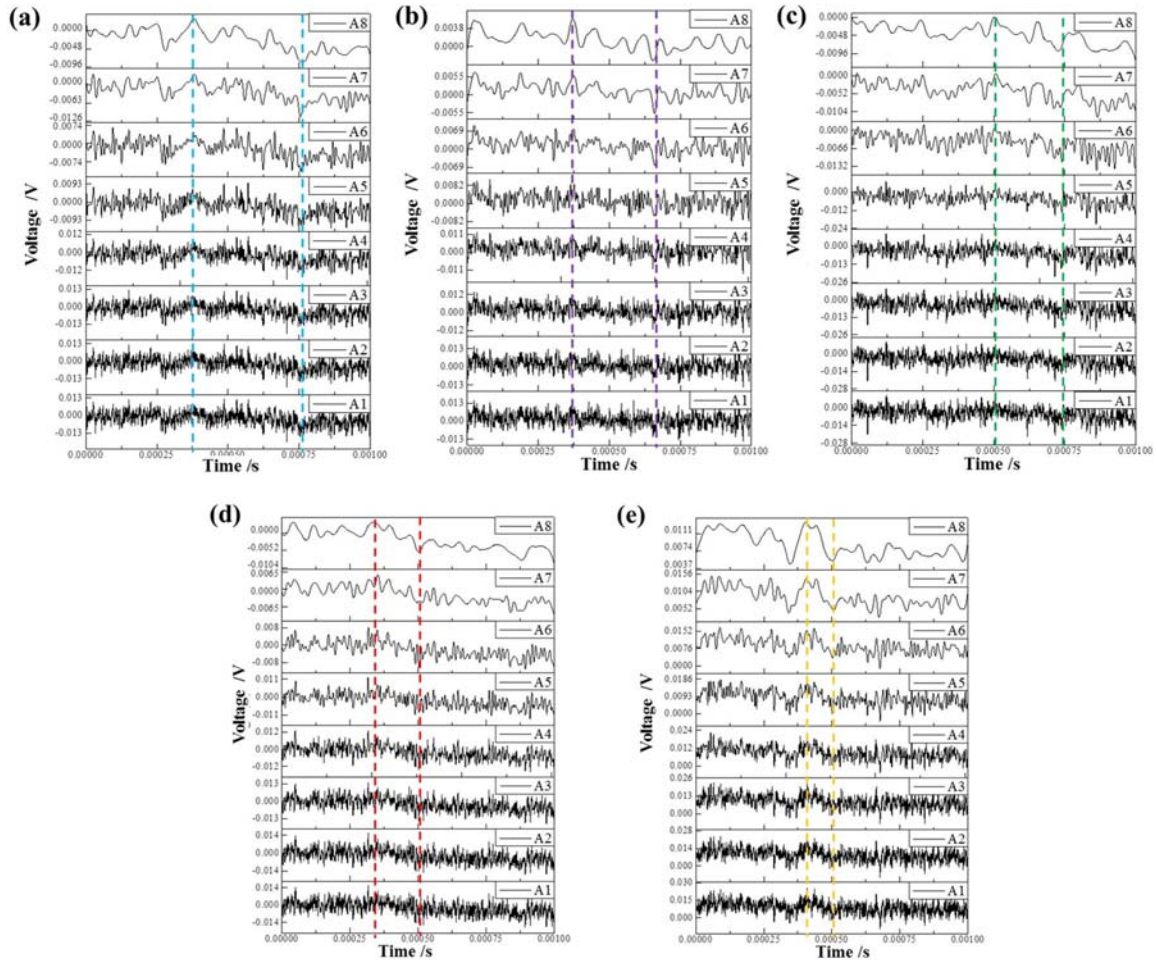


图 11 不同节理角度花岗岩的低频温度信号:(a) 10°节理;(b) 15°节理;(c) 20°节理;(d) 30°节理;(e) 40°节理

Fig. 11 The low frequency temperature signals of granite with different joint angle:

(a) 10° joint; (b) 15° joint; (c) 20° joint; (d) 30° joint; (e) 40° joint

图 11 所示为五种节理面红外信号的小波分解结果。图中虚线之间部分对应节理面微动摩擦带来温度变化的区域,随着节理面角度的增加,温度变化的幅度愈来愈大,但温升的持续时间愈来愈短,这与节理面滑移特性相关。这里花岗岩试件的温度起跳时间,与节理面开始滑移时间基本一致,但有一定的滞后。在冲击作用下,节理面出现相对滑动时,节理面摩擦滑移逐步产生热量,然后由产热区域向试件表面进行传播,因此,表现出温升时间滞后。图 11 还表明:随着节理角度的增大,温升发展越早,温升完成所需的时间也越短,节理面越容易进入“滑动”摩擦阶段。

图 12 所示为在较低的温升范围内进行的温升—电压变化关系式的标定结果。须说明的是:虽然厂家给出 HgCdTe 探测器精确测量的最低温升为 0.1℃,鉴于目前尚没有成熟的技术进行更小温升变化的测量,因此,本实验中仍采用此探测器通过多次反复标定的方式对其进行原位标定,以期对微动摩擦温升结果有个定性的认识。由此得到各节理角度花岗岩较为粗糙的平均温度变化量如表 3 所示。结果表明:在加载速度基本一致的情况下,随着节理角度的增大,节理面更容易发生滑移,滑移过程确实会产生温度变化,温升都低于 0.1℃。David 和 Paul^[16]曾利用 150×150×40cm 的对角节理花岗岩样品进行

双向围压实验,测得节理面发生黏滑时所产生的温升可达 0.01°C ;当滑移速度为 $0.09\sim 9.1\mu\text{m/s}$,并给节理面上加水后,温升与滑移速度成比例增加,且小于 0.1°C 。由此可见,本文使用红外测温系统测得的节理面微动摩擦滑移所产生的温升与 David 和 Paul 的结果相当。由于试样尺寸较大,温升较小,很难给出具体的量化结果,所以下一步研究工作有必要考虑减小试样尺寸,并采用多点红外测温技术^[17]或者更高精度的探测器来提高实验精度。

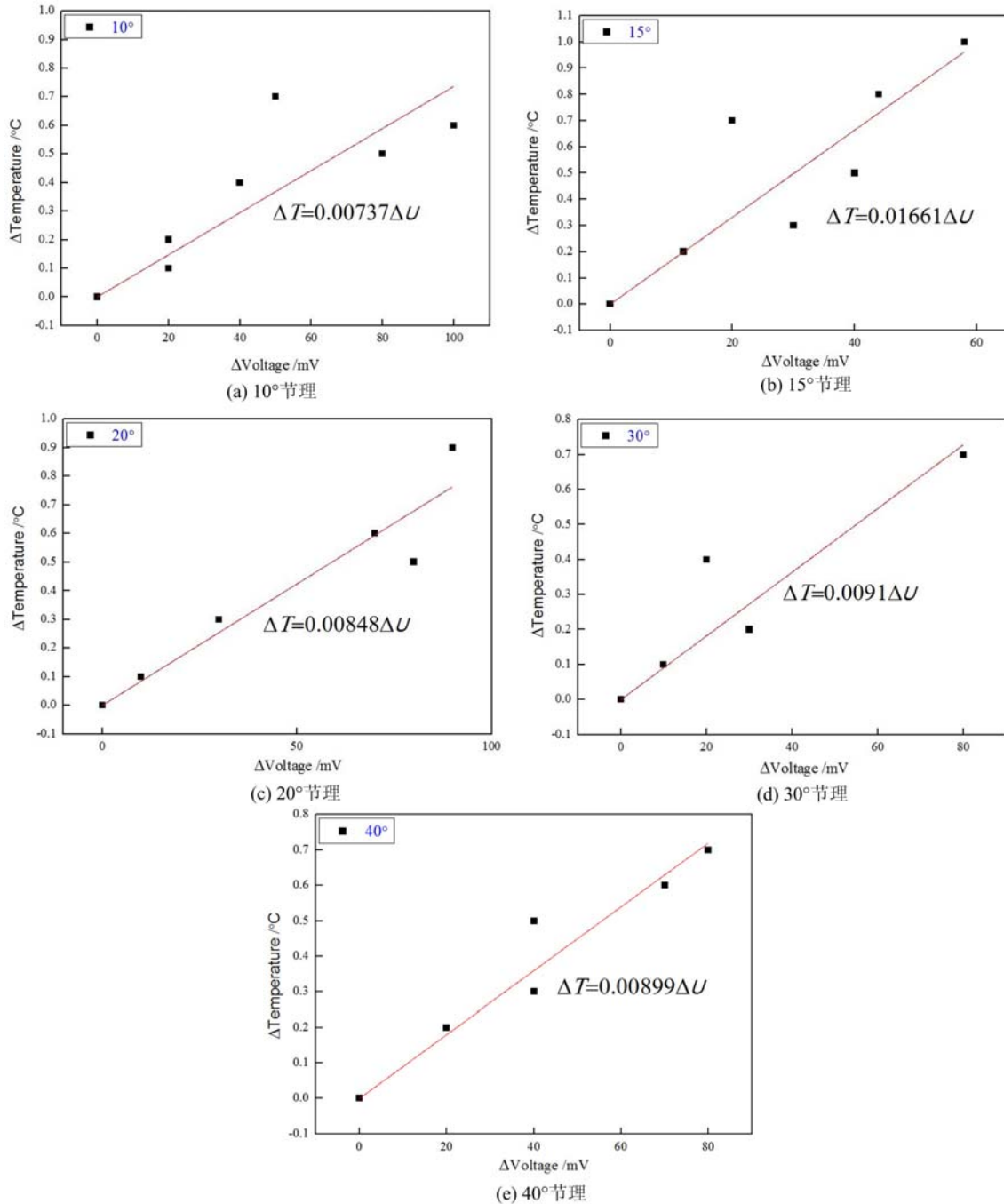


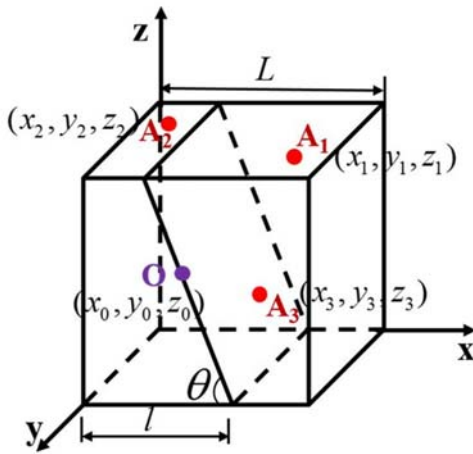
图 12 不同节理角度的花岗岩温升标定曲线

Fig. 12 The temperature calibration curves of granite with different joint angle

表3 不同节理角度花岗岩的温升标定和实验结果

Tab. 3 Calibration and experimental results of temperature rise for granite with different joint angles

节理角度	标定关系	平均电压变化量/mV	平均温度变化量/°C
10°	$\Delta T=0.00737\Delta U$	3	0.02(4)
15°	$\Delta T=0.01661\Delta U$	3	0.05(5)
20°	$\Delta T=0.00848\Delta U$	3	0.03(7)
30°	$\Delta T=0.00910\Delta U$	4	0.05(6)
40°	$\Delta T=0.00899\Delta U$	5	0.05(8)

图13 30°节理微动滑移
节理面局部形态Fig. 13 Local sliding contour for
specimen with 30° joint

2.4 节理微动滑移的定位和局部形态

为了更为精准地获得花岗岩节理面的滑移信息,本文实验采用在空间上分布三个声发射传感器的方法。如图2所示,其中S1号和S2号传感器位于花岗岩正上方对角线位置;S3号传感器位于背侧紧挨节理面位置。由此,以花岗岩为基准建立一个空间坐标系,结合声发射传感器位置以及节理面的角度信息,就可以找到初步的声发射源定位方法。微动滑移位置的确定如图13所示。三个声发射传感器的坐标分别可表示为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3, z_3)$,并假设节理面上的声发射源位于 $O(x_0, y_0, z_0)$ 。声发射源与三个传感器之间的距离可表示为:

$$\begin{aligned} |OA_1| &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \\ |OA_2| &= \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \\ |OA_3| &= \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

假设花岗岩中的波速为 C ,则声发射源产生的应力波到达三个传感器的时间可表示为:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{|OA_1|}{C} \\ T_2 &= \frac{|OA_2|}{C} \\ T_3 &= \frac{|OA_3|}{C} \end{aligned} \quad (2)$$

由此可得1号传感器与2号和3号传感器接收信号的时间差:

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_1 - T_2 = \frac{|OA_1| - |OA_2|}{C} \\ \Delta T_2 &= T_1 - T_3 = \frac{|OA_1| - |OA_3|}{C} \end{aligned} \quad (3)$$

ΔT_1 和 ΔT_2 的实际值可以通过记录到的声发射波形得到。因为声发射源位于节理面上,故满足几何关系: $\tan\theta = z_0 / (l - x_0)$; l 和 θ 均为可测得的量。联立求解,即可得到节理面上声发射源的坐标位置。

应用本文“2.3”节中三个声发射传感器的结果,可进行定位,其声发射源的大致空间位置在表4中列出。从表4可以看出,对于不同节理角度的花岗岩节理面在滑移时,其声发射源是不同的,意味着其滑移起点也是变化的,主要原因为每种节理面的粗糙程度以及凸起部分不同。另外,本文采用光学显微镜对30°节理微动滑移的局部形态进行观察,如图14所示。在局部微动滑移形态中,右边图形是对左

边图形局部区域的放大,其滑移尺度大致在 $400\mu\text{m}$ 左右,产生滑移的局部坑深在 $30\sim 50\mu\text{m}$ 。

表 4 节理面上声发射源的坐标位置

Tab. 4 Coordinate position of acoustic emission source on joint surface

试件 编号	加载 速度 /(m/s)	节理 角度 /(°)	声发射信息					声发射源空间位置 O/(mm)
			频率范围 /(kHz)	声发射 传感器	主频 /(kHz)	周期 /(μs)	幅值 /(mV)	
04	2.56	10°	78.125~156.25	S1	115.3	10.3	136	O(25.3,24.8,23.8)
				S2	101.7	10.7	63	
				S3	98.3	8.4	70.6	
			156.25~312.5	S1	169.5	4.3	8.7	
				S2	172.9	3.4	5.1	
				S3	196.6	4.7	10.3	
07	2.35	15°	78.125~156.25	S1	135.6	9.3	73.3	O(26.7,49.7,34.6)
				S2	118.6	10.4	13.8	
				S3	115.3	9.4	10.4	
			156.25~312.5	S1	172.9	5.4	87.1	
				S2	183.1	3.3	9.1	
				S3	159.3	5.3	17.3	
14	2.27	20°	78.125~156.25	S1	98.3	9.6	200	O(24.6,44.8,40.8)
				S2	88.1	8.8	39.2	
				S3	91.5	11.0	38.7	
			156.25~312.5	S1	176.3	3.5	76.0	
				S2	155.9	6.1	18.2	
				S3	196.6	3.2	13.1	
18	2.39	30°	78.125~156.25	S1	98.3	10.6	432	O(25.3,46.8,49.8)
				S2	101.7	10.6	357	
				S3	94.9	9.6	51	
			156.25~312.5	S1	213.6	3.3	32	
				S2	193.2	3.4	38	
				S3	176.3	5.9	6.4	
25	2.27	40°	78.125~156.25	S1	98.3	12.6	436	O(22.3,34.8,38.2)
				S2	105.1	11.3	362	
				S3	118.6	8.4	35	
			156.25~312.5	S1	183.1	4.9	53	
				S2	183.1	4.3	116	
				S3	179.7	5.0	5.9	

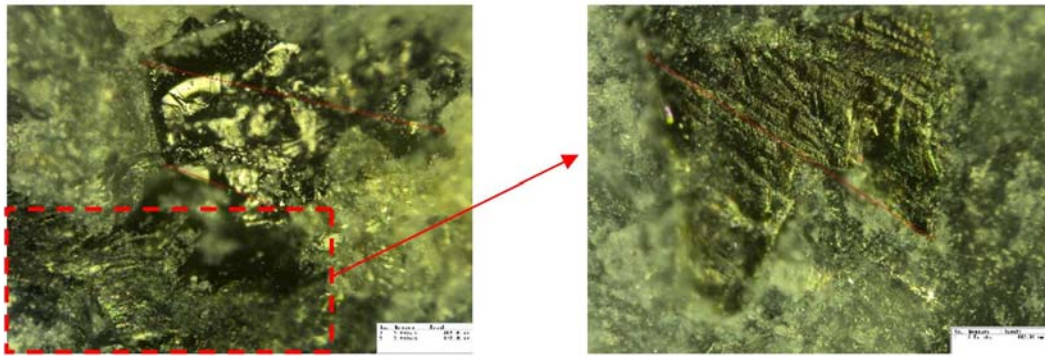


图 14 30°节理微动滑移节理面局部形态

Fig. 14 Local sliding contour for specimen with 30° joint

3 数值模拟

为了验证上述声发射和温升的结果,对 SHPB 杆束动态实验系统利用 ABAQUS 软件建立对应的三维模型。以 30°节理花岗岩试件为例,试样尺寸:50×50×50mm³;冲击杆直径:37mm;冲击杆长度:2000mm;方杆横截面积:8×8mm²;方杆长度:800mm。其中所有的杆件均为钢杆,其体积密度(ρ)、杨氏模量(E)和泊松比(μ)分别为 7850kg/m³、210GPa 和 0.3;花岗岩试样的材料参数已在文中“1.1”节中给出。花岗岩试样和杆件的单元类型均为 C3D8R,即八节点线性六面体单元。为满足 SHPB 的两个基本假定,在三维模型上施加适当的边界条件以保证杆件和试件在轴线方向上无约束地自由运动。花岗岩试件的节理面接触定义为摩擦系数为 0.15 的硬接触;入射杆、透射杆与试件的接触以及过渡杆与入射杆之间的接触均定义为无摩擦的硬接触。

图 15 为 30°节理花岗岩在冲击加载速度 2.5m/s 下的计算波形。可以看出:当节理面发生滑移时,杆 1、2 和杆 3、4 的透射应变波形在局部显示出明显的差异性,这与实验测试结果基本一致。但是,由于真实节理表面的粗糙度比数值节理表面的粗糙度要复杂得多,所以数值计算出的应变波形与实验测到的波形仍存在一定差异。通过比较入射信号和透射信号,可估算出发生滑移的临界时间距离透射信号起跳点约为 42 μ s,与实测结果 32 μ s 相差不大。

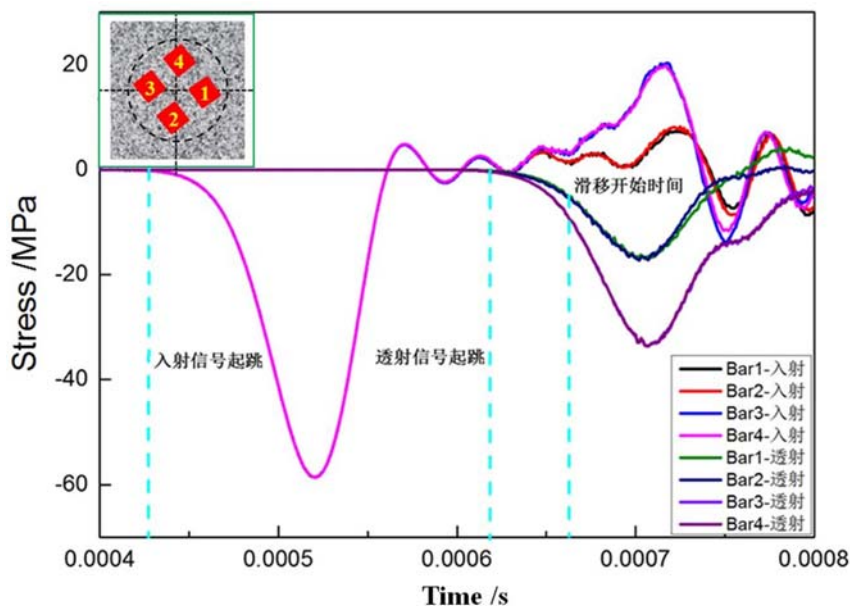


图 15 30°节理花岗岩的计算波形

Fig. 15 The calculated wave signals of granite specimen with 30° joint

图 16 为声发射信号及其细节分解信号 D3-D6,图中两种颜色虚线所指示的时刻分别对应于数值计

算中入射波起跳点以及节理面开始滑移时间。节理面开始滑移时, S1 和 S2 处的声发射信号的振幅为正, 而 S3 处的声发射信号的振幅为负。三个信号的幅度满足: $S2 > S1 > S3$, 且 S1 处的波形比 S2 和 S3 处的波形复杂。在滑移初期阶段, S1 处的信号来源主要为应力脉冲加载下花岗岩试件的入射端面发生的局部变形和节理面相对滑移所产生的声发射波; S2 和 S3 处的主要信号来源为节理面滑移所产生的声发射波。相应的频率主要分布在 78.1~312.5kHz 之间, 与实验结果相一致。

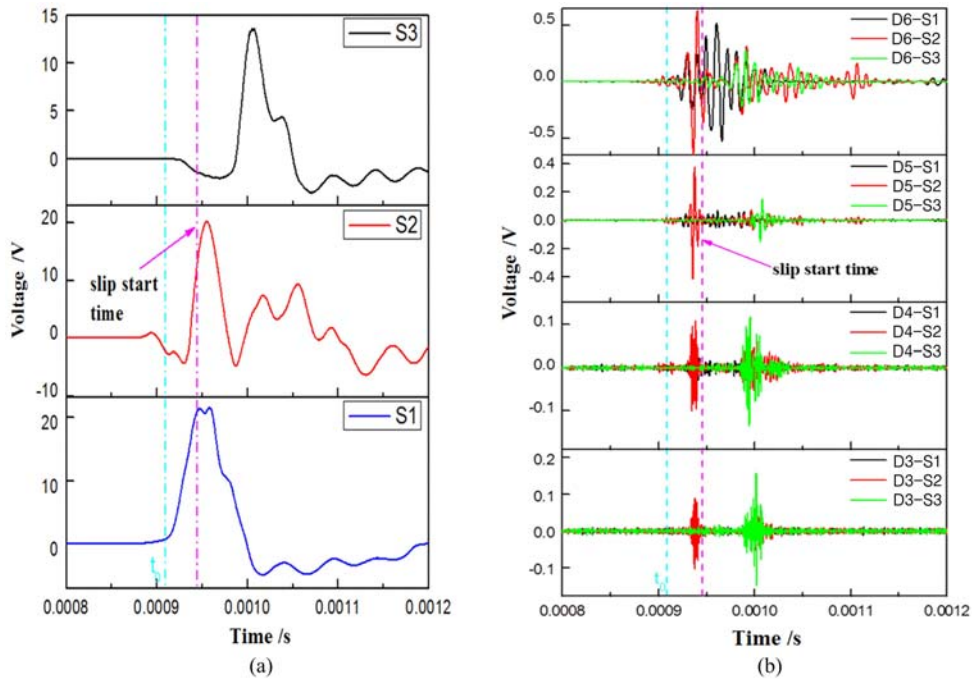


图 16 30°节理花岗岩在三个位置的声发射信号:

(a)原始声发射信号; (b)声发射分解细节信号; D3-D6 表示高频域的信号

Fig. 16 The acoustic emission signals at three positions of specimen with 30° joint: (a) Original acoustic emission signals; (b) Detailed acoustic emission decomposition signals; D3-D6 represent the signals at the high frequency domain

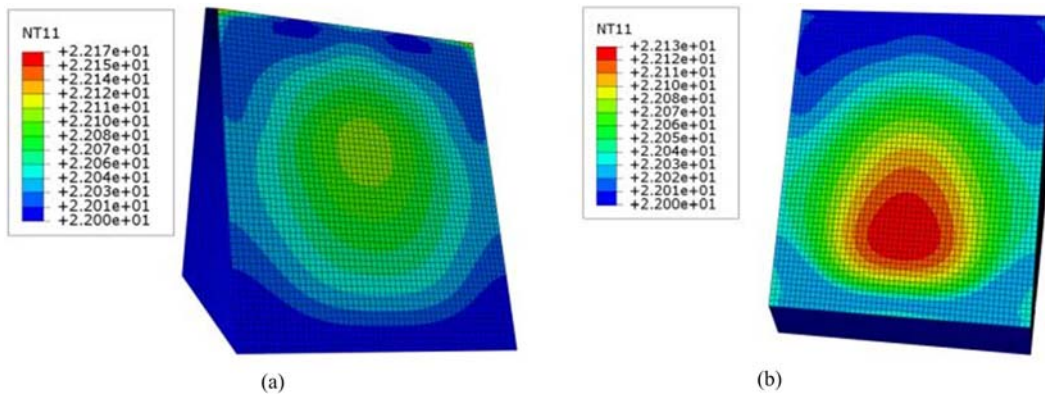


图 17 节理滑移产生对应的温度云图: (a)节理面左侧; (b)节理面右侧。

Fig. 17 Cloud maps of elevated temperature generated by joint slip of granite specimen with 30° joint:

(a) The joint surface on the left side; (b) The joint surface on the right side.

在数值分析中,与节理滑移起始时间相对应的温度起跳时间也约为 42μs,节理面的热产生与花岗岩的摩擦滑移同时发生。图 17 为节理面摩擦滑移时在节理面两侧产生的温度变化,结果表明,两个节理面温度升高幅度不同。这些温升传递到试样的外表面,出现了约为 0.04℃的温度变化。通过比较不同节理角度的花岗岩试件在滑移时产生的表面温升变化,发现随着试件节理角度的增加,节理面更易滑移,温升也增加,但变化幅值都低于 0.1℃,其结果与实验结果相一致。

4 结论

本文利用改进的分离式霍普金森压杆 SHPB 方形杆束实验装置,研究了花岗岩试样在冲击加载下的节理面动摩擦过程中的声发射和产热特性。通过分析实验系统记录到的应变波形、三个声发射传感器测得的声发射信号和红外测温系统测得的高温信号,并结合数值计算分析,详细讨论了五种角度的节理岩体在 2.5m/s 冲击速度下的动摩擦滑移行为。研究发现,对于目前的花岗岩试样,节理摩擦滑移分别对应于声发射信号中的高频域(即 78.1~312.5kHz)和红外温度信号中的低频域。随着节理角度的增加,节理面更容易滑移,温度也会有所变化,但变化幅值较低。

参考文献:

- [1] Chester F, Evans J, Biegel R. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B1):771-786.
- [2] Wibberley C, Shimamoto T. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(1):59-78.
- [3] Wilson B, Dewers T, Reches Z, et al. Particle size and energetics of gouge from earthquake rupture zones[J]. *Nature*, 2005, 434(7034):749.
- [4] Di Toro G, Pennacchioni G. Superheated friction-induced melts in zoned pseudotachylytes within the Adamello tonalites (Italian Southern Alps)[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(10):1783-1801.
- [5] Okada M, Liou N S, Prakash V, et al. Tribology of high-speed metal-on-metal sliding at near-melt and fully-melt interfacial temperatures[J]. *Wear*, 2001, 249(8):672-686.
- [6] 徐松林, 章超, 黄俊宇, 等. 花岗岩压剪联合冲击特性与细观力学机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10):1945-1958 (XU Songlin, ZHANG Chao, HUANG Junyu, et al. Investigation of dynamic behavior and micromechanical mechanism of granite under combined compression and shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(10):1945-1958 (in Chinese))
- [7] Rice J. Heating and weakening of faults during earthquake slip[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B5):311-340.
- [8] Xia K, Rosakis A, Kanamori H. Laboratory earthquakes: The sub-Rayleigh-to-supershear rupture transition[J]. *Science*, 2004, 303(5665):1859-1861.
- [9] Beeler N, Tullis T, Goldsby D. Constitutive relationships and physical basis of fault strength due to flash heating [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B1):401-413.
- [10] Di Toro G, Goldsby D, Tullis T. Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates [J]. *Nature*, 2004, 427(6973):436-439.
- [11] Goebel T, Candela T, Sammis C, et al. Seismic event distributions and off-fault damage during frictional sliding of saw-cut surfaces with pre-defined roughness[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1):612-625.
- [12] Albertini C, Cadoni E, Labibes K. Impact fracture process and mechanical properties of plain concrete by means of an Hopkinson bar bundle[J]. *Le Journal de Physique IV*, 1997, 7(C3):C3-915-C3-920.
- [13] 张磊, 徐松林, 施春英. 应用杆束系统研究水泥砂浆节理面的压剪动特性[J]. *实验力学*, 2016, 31(2):186-192 (ZHANG Lei, XU Songlin, SHI Chunying. On the dynamic compression-shear characteristics of cement mortar joint surface based on a bunched bar system[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(2):186-192 (in Chinese))
- [14] 刘永贵, 唐志平, 崔世堂. 冲击载荷下瞬态温度的实时测量方法[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(4):471-475 (LIU Yonggui, TANG Zhiping, CUI Shitang. Real-time measuring methods for transient temperature under shock loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4):471-475 (in Chinese))
- [15] 张磊. 冲击载荷下节理面动摩擦特性研究[D]. 中国科学技术大学, 2016 (ZHANG Lei. Study on dynamic frictional properties of joint plane under impact load[D]. University of Science and Technology of China, 2014 (in Chinese))
- [16] David A L, Pual G O. Measurements of frictional heating in granite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983,

88(B5):4313—4320.

- [17] Jiang Hebin, Xu Songlin, Shan Junfang, et al. Dynamic breakage of porous hexagonal boron nitride ceramics subjected to impact loading[J]. *Powder Technology*, 2019, 353:359—371.

Investigation on acoustic emission and heat production characteristics on joint surfaces due to dynamic friction

SHAN Jun-fang, XU Song-lin, ZHANG Lei, CHEN Li-na, WANG Peng-fei

(CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Dynamic friction slip of rock joint is prevalent in seismic wave propagation and plate sliding. At present, great attention has been paid to revealing the sliding friction characteristics under large displacement, but the related characteristics at initial stage of friction-slip are seldom studied. The measurement techniques including the multi-point acoustic emission method and the infrared temperature method are established based on the modified split Hopkinson pressure device (SHPB), and the characteristics of acoustic emission and heat production at initial stage of friction sliding on the joint surfaces with five joint angles are investigated. The results show that wave profiles corresponding to the wave-induced micro slip is located at the higher frequency domain of the acoustic emission signals, e. g. , frequencies ranging from 78.1kHz to 312.5kHz for granite specimens. While the signal measured at the lower frequency domain originates from the disturbances impacting the interface. Wave profiles corresponding to the heat radiation information is located at the lower frequency domain in the temperature signals, and the measured amplitudes of elevated temperature of five joint surfaces are obviously lower. To reveal the intrinsic rules of these measured signals, a reasonable analysis model based on the numerical method is established. The numerical results show that with increasing the joint angle, the joint surface slides more easily, and the amplitude of elevated temperature on the joint surface increases, which is always lower than 0.1°C. The calculations are in good agreement with the experimental results.

Keywords: rock joint; friction slip; acoustic emission; infrared thermometry; numerical method