

文章编号: 1001-4888(2020)01-0091-09

Kaiser 效应激发验证中的压头尺寸效应研究^{*}

马春德^{1,2}, 龙珊¹, 胡顺喜¹, 王业顺¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 高等研究中心, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对声发射(AE)法现场测量地应力须选用便捷式小型加载设备来激发岩石声发射信号的实际要求, 本文提出以减小压头直径来提高激发应力的解决思路。为此, 利用 MTS 试验机、PCI-II 声发射仪等仪器对预设应力的岩石试件开展 5 组不同直径(5mm、10mm、15mm、20mm 和 50mm)压头下的 Kaiser 效应激发显现验证试验。确定激发岩石 Kaiser 效应的压头直径临界值范围为 5~10mm 后, 再增设 4 组(6mm、7mm、8mm、9mm)压头直径试验。试验结果表明: 采用 8mm 直径的小压头可以有效激发并准确显现岩石 Kaiser 效应, 压头直径对 Kaiser 效应的显现特征具有一定的影响作用。与预设应力相比, 实测突变点应力出现“滞后显现”或“提前显现”现象。同时, 文中还运用 FLAC3D 软件模拟计算了不同直径压头下大理岩试件的内部应力分布情况。结合声发射试验结果, 初步分析解释了端部效应及压头直径对岩石试件 Kaiser 效应影响的机理。上述研究成果对在现场使用 AE 法准确测量地应力具有一定的参考意义。

关键词: Kaiser 效应; 声发射; 尺寸效应; 单轴压缩; FLAC3D

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-136

0 引言

地应力(也称原岩应力)是地壳中岩体所具有的天然内在应力, 它是引起各种地下岩土工程失稳破坏的根本作用力, 准确掌握其分布规律是实现地下岩体工程决策、设计与施工科学化的必要前提^[1]。目前, 全世界地应力测量方法有数十种之多, 其中, 声发射法(又称 AE 法)是被实践所证明的一种有效的地应力测量方法。就目前而言, 利用岩石 Kaiser 效应测量地应力主要通过建立三维坐标系, 沿确定的 6 个方向钻取岩芯, 加工成规则试样, 单轴加载后寻找出对应的 Kaiser 效应点, 计算这 6 个切样方向的正应力, 及它们所在坐标轴方向的余弦值, 最后进行计算、比较, 得出主应力的方向和大小^[2]。对此, 国内外学者开展了大量关于如何在实验室内提高 AE 法测量地应力的精度和可靠性方面的研究, 并取得了诸多研究成果^[3-7], 但在实际推广使用中, AE 法却远不如应力解除法、水压致裂法应用广泛, 主要是由于 AE 法不能直接在现场开展测量工作, 主体测量工作只能在实验室内完成, 从而大大影响了测试结果的即时性, 进而影响推广使用。因此, 如果能在现场直接对钻取的岩芯开展 AE 法地应力测量, 即时获取地应力数据, 将大大简化测试工序, 减少人力物力成本, 提高测试效率, 也必将增强该技术方法的生命力和实用价值。

AE 法的基本原理是岩石的 Kaiser 效应(即当岩石试件承受超过其历史最大应力时突然产生大量声发射信号的现象), 若在现场中也能同实验室一样, 利用加载设备对岩石试件施加足够的应力荷载, 激

^{*} 收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-08-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600706)

通讯作者: 马春德(1976—), 男, 博士后, 教授级高级工程师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的研究工作。Email: cd.ma@163.com

发出其内在的 Kaiser 效应,即可实现地应力的现场测量。岩石试件在压头直径大于或等于试件直径的面荷载作用下的 Kaiser 效应早已被学界广泛认可^[8-12],有些学者也尝试利用点荷载激发岩石声发射信号方面的研究^[13-17]。刘明松^[15]用试验证明了水岩、花岗岩、砂岩三种岩石对点荷载作用均具有明显的记忆效果,并运用数值模拟软件 RFPA 验证了点荷载作用下岩石具有 Kaiser 效应。赵奎^[17]等人也通过试验证实了点荷载作用下岩石具有 Kaiser 效应的结论。但由于点荷载受力面积难以准确确定、数据离散性大,在实际应用中仅能用于粗略估算地应力,难以准确量化,而面荷载的受力面积可通过压头直径准确计算,故本文提出将点荷载更换为面荷载以提高 AE 法现场测试地应力的精度的解决思路。在现场进行岩石声发射试验测地应力,需使加载装置尽量小型化,但若它提供足够的应力用以激发岩石的 Kaiser 效应,可以通过减小试件所接触压头的直径,以较小的荷载产生较大应力。

那么,选用的压头直径是不是越小越好呢? 本文利用先进的美国 MTS815 材料试验机、MTS Insight30 试验机和 PCI-II 型多通道声发射仪,开展了 5 组不同直径压头下预加载岩石试件的 Kaiser 效应对比试验,得出使岩石 Kaiser 效应点显现的压头直径临界值范围,通过增设试验,找出能准确激发岩石 Kaiser 效应的压头直径最小值,并结合数值模拟解释压头直径对岩石试件 Kaiser 效应影响的机理,对 AE 法现场测量地应力的科学实施具有一定的参考意义。

1 试验设备及试验方案

1.1 岩样选取及试件、压头加工

试验所用的岩石试样都加工自湖南浏阳某露天采石场的同种浅表大理岩块,以减小岩石试样本身的离散型和各向异性。为减少爆破作业对岩样造成的人为损伤,采用非爆的机械法采集,所采的大块岩样颜色洁白,晶粒细腻,质地坚硬,外观完整性好,表面无明显裂纹裂隙。对该岩样按相关规程采用湿法加工成若干个直径为 50mm、高径比为 2:1 的圆柱体试件,用其中的一部分试样测试其基本物理力学参数,结果列于表 1 中。留 30 个同种试件用于后面的声发射试验研究。选用适用于夹具制作的高锰合金钢材料加工制作成 5 组不同直径(分别为 5mm、10mm、15mm、20mm 和 50mm)、高径比为 1:1 的压头,压头刚度超过 $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

表 1 大理岩基本力学参数

Tab. 1 Basic mechanical parameters of marble specimens

密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	单轴抗拉强度 /MPa	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)
2.729	3.66	80.63	45.21	0.356	4.35	46.59

1.2 试验设备

岩石声发射试验(包括 Kaiser 效应验证试验)所需的仪器主要包括作为 AE 信号采集的声发射仪和作为加载机构的材料试验机两大部分。本试验采用美国 PCI-II 型多通道声发射仪来采集声发射信号,该仪器采样速率最高达 40MHz,具有连续波形的实时采集记录能力,可记录包括 AE 事件数、能量、幅值、振铃、上升时间等 20 多个特征参数,其前置放大器设定为 40db,声噪门槛值为 40db。所用声发射传感器大小为 $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$,谐振频率为 20~400kHz,采样频率为 1MHz,用双通道采集数据,两个探头分别用胶布缠绕粘于试件长度方向的中部对侧。材料试验机选用了两种,一种是最大荷载量程为 2600kN 的 MTS815 试验机(见图 1),用于给大理岩试件施加预应力荷载(预设 Kaiser 点);另一种是最大荷载量程为 30kN 的 MTS Insight30 试验机(见图 2),主要用于不同直径压头条件下的 Kaiser 效应激发。两台试验机的荷载数据均可以通过外加参数的方式引入到 PCI-II 型声发射系统中^[18],从而实现加载过程中荷载、声发射数据的同步采集与实时显现。

1.3 试验方案

将 20 个加工好的大理岩试件分成 I、II 两组,每组 10 个试样,对每个压头直径进行两次试件试验,分别设置不同的预应力作为其 Kaiser 点。Fuentealba 等^[19]研究表明,如果预设应力为岩石单轴抗压强

度的 10%~70%,那么它的 Kaiser 效应显现效果最佳,故 I、II 两组分别用与试件等直径的 50mm 压头,以 0.1mm/min 的加载速率在 MTS815 试验机上预加载至 20MPa 和 40MPa,并保持该荷载持续作用 10min 以上,使岩石试件产生记忆效果。然后,如图 2 所示,以同样加载速率在 MTS Insight30 试验机上用不同直径压头对每个试件进行预设应力的 Kaiser 效应显现准确度验证,声发射仪同步采集数据。当荷载超过预设的应力值后再继续加载一段时间,以便观察 Kaiser 效应的显现情况,但最终荷载不宜超过其单轴抗压强度的 80%(即保持在弹性范围以内)。为减少试件端部效应影响,加载前在压头与试件接触端面均匀涂抹一层凡士林。

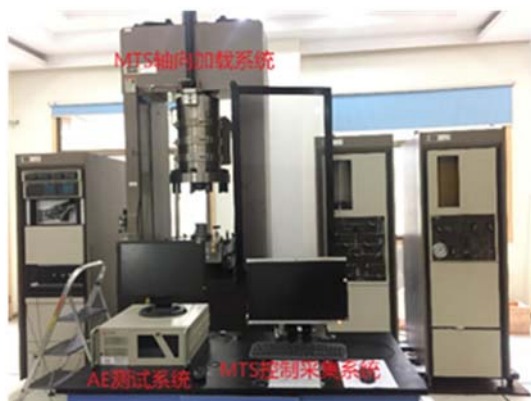


图1 MTS 815 型材料试验机

Fig. 1 MTS 815 materials testing machine



图2 试验加载示意图

Fig. 2 Test loading diagram

2 试验数据分析

AE 法测量地应力的关键是 Kaiser 效应特征点(简称 Kaiser 点)的确定。在试验过程中,声发射仪自动记录每一个声发射信号的到达时间、持续时间、事件数、振铃计数和能量等基本参数^[20],在同一界面内还可以同步显示实时荷载数据。声发射的产生必然有能量释放,因为能量参数放大倍数更大,使得 Kaiser 点位置相对于其他特征参数更容易判断,为提高 Kaiser 点的判定精度,选用声发射绝对能量和声发射事件累计计数作为测试参数。

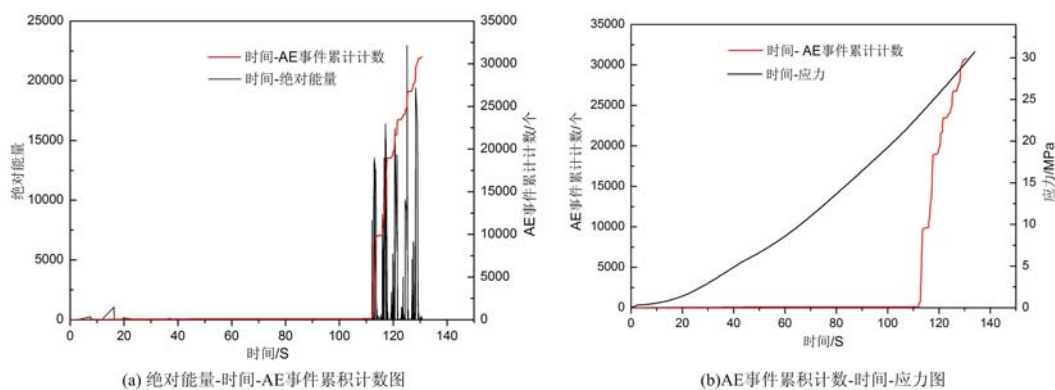


图3 15mm 压头 20MPa 预应力岩石声发射特性图

Fig. 3 15mm indenter 20MPa prestressed rock AE characteristics

由于篇幅关系,本文仅在图 3 和图 4 中列出 15mm 直径压头下试件 I-3(预设应力 20MPa)和 II-3(预设应力 40MPa)获得的单轴压缩声发射特性曲线图,其中(a)图为声发射绝对能量时间 AE 事件累计计数图,(b)图为声发射 AE 事件累计计数时间应力图。从(b)图中能明显看出声发射事件 AE 事件累计计数曲线存在一个突增区域,不能准确判定具体的突增点,可以先以 AE 事件累计计数为主要参数在其曲线上粗选出信号突增区域,进而在该区域内通过横向放大绝对能量曲线信号,精确找到突增点(即 Kaiser 点),最后在 AE 事件累计计数-时间-应力图中找出 Kaiser 点对应的应力值。

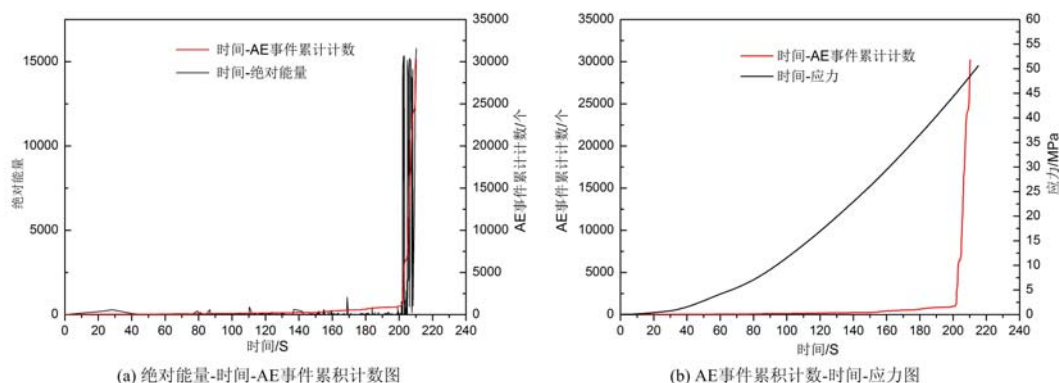


图 4 15mm 压头 40MPa 预应力岩石声发射特性图

Fig. 4 15mm indenter 40MPa prestressed rock AE characteristics

综合比较 I、II 组所有试件的声发射特征曲线,都随着轴向应力的增加,在达到预设应力前,声发射事件数很少或几乎没有,达到预设应力附近后,不同压头直径、不同预应力级别下都表现出较明显的声发射信号突增现象,激发出的事件数也表现出随应力级别和压头直径增大而增多的趋势。当使用直径 5mm 压头时,虽有 AE 信号突增现象,但总体数量很小,都未超过 100 个,而使用其他直径压头加载时,AE 事件累积计数明显多于 5mm 压头单轴压缩产生的声发射信号。分析认为:当采用小直径压头加载激发 Kaiser 效应时,在同一应力水平下,越大的压头在岩石试件上覆盖和影响的区域越大,激发出的 AE 信号也应更多。同样,对于同一压头直径,越大的应力级别,影响的深度和广度也应更大,AE 信号也应更多。

表 2 预荷载和突变点关系拟合表(5~50mm 直径压头)

Tab. 2 Preload and mutation point relationship fitting table(5~50mm diameter indenter)

试件编号	压头直径 ϕ/mm	预加荷载 P_0/N	预设应力 σ_{K0}/MPa	突变点应力 σ_R/MPa	Dev 值
I-1	5	434.3	21.11	28.31	1.341
I-1-1	5	423.1	21.02	27.01	1.285
I-2	10	1674.6	20.29	20.80	1.025
I-2-1	10	1675.4	20.44	20.69	1.012
I-3	15	3968.6	20.46	19.42	0.949
I-3-1	15	3975.3	20.66	20.31	0.983
I-4	20	6349.1	21.21	19.96	0.941
I-4-1	20	6347.3	20.96	19.39	0.925
I-5	50	15778.9	21.55	20.49	0.951
I-5-1	50	15776.2	21.43	20.85	0.973
II-1	5	757.3	39.55	56.20	1.421
II-1-1	5	758.3	40.01	54.25	1.356
II-2	10	3036.5	40.66	44.16	1.086
II-2-1	10	3037.4	40.72	41.74	1.025
II-3	15	6777.3	39.35	37.70	0.958
II-3-1	15	6778.2	39.46	37.21	0.943
II-4	20	12144.1	40.66	38.10	0.937
II-4-1	20	12143.2	40.23	38.46	0.956
II-5	50	59365.2	41.39	39.86	0.963
II-5-1	50	59363.4	40.85	39.95	0.978

试验结果经计算整理,列于表 2 中,其中 P_0 为预先施加的最大荷载; σ_{K0} 为对应的预设应力,即预设

的 Kaiser 点应力值； σ_R 为通过试验实际测定的应力突变点应力值；Dev 值为偏差率，表示实际值与预设值的偏差程度，根据文献资料^[21]，通常认为当比值介于 0.9~1.1 之间时，岩石试件的 Kaiser 效应显现准确，否则认为有较大偏差，Kaiser 效应失效。

从表 2 中可以看出：当用直径 5mm 压头加载时，两个预设应力级别的 Dev 值分别为 1.341、1.258 和 1.421、1.356，偏差较大，可认为此时 Kaiser 效应失效。用其他尺寸压头加载时 Dev 值都在 0.9 至 1.1 范围内，Kaiser 效应能较准确显现，因此推测在 5~10mm 压头直径间存在一个能激发出岩石 Kaiser 效应的临界值。故继续加工 6mm、7mm、8mm、9mm 直径压头和 16 个大理岩试样，增设第Ⅲ、Ⅳ组，每组 8 个试样，第Ⅲ组预加载至 20MPa，第Ⅳ组预加载至 40MPa，进行与第Ⅰ、Ⅱ组相同的试验以得出具体的临界值。所得结果列于表 3，可知在 8mm 直径压头下，预加载至 20MPa、40MPa 都可以很好激发出岩石 Kaiser 效应。

表 3 预荷载和突变点关系拟合表(6~9mm 直径压头)

Tab. 3 Preload and mutation point relationship fitting table(6~9mm diameter indenter)

试件编号	压头直径 ϕ/mm	预加荷载 P_0/N	预设应力 σ_{K0}/MPa	突变点应力 σ_R/MPa	Dev 值
Ⅲ-1	6	652.3	20.11	25.44	1.265
Ⅲ-1-1	6	648.9	20.08	26.06	1.298
Ⅲ-2	7	877.4	21.05	25.58	1.215
Ⅲ-2-1	7	875.6	20.98	24.92	1.188
Ⅲ-3	8	1025.7	20.22	21.13	1.045
Ⅲ-3-1	8	1022.4	20.17	21.30	1.056
Ⅲ-4	9	1244.6	20.54	21.24	1.034
Ⅲ-4-1	9	1248.5	20.62	21.18	1.027
Ⅳ-1	6	1274.5	41.12	53.54	1.302
Ⅳ-1-1	6	1270.2	40.86	52.18	1.277
Ⅳ-2	7	1556.3	40.33	50.61	1.255
Ⅳ-2-1	7	1552.4	40.24	46.52	1.156
Ⅳ-3	8	2032.4	40.18	41.31	1.028
Ⅳ-3-1	8	2034.9	40.22	42.47	1.056
Ⅳ-4	9	2516.7	39.98	41.34	1.034
Ⅳ-4-1	9	2518.5	40.07	41.99	1.048

3 数值模拟解释

为解释和证明上述观点和论证，采用 FLAC3D 有限元软件模拟了压头直径分别为 5mm、10mm、15mm 和 50mm 四种情况下岩石试件在单轴压缩荷载作用下的内部应力分布情况，以对上述试验结果加以解释说明。模拟采用与声发射试验一致的控制方式和加载速率，应力加载到超过 40MPa 时结束。考虑到与实际情况相符，加载过程中考虑了端部效应的影响。

图 5 为用 50mm 压头对试件预加载到 40MPa 时岩石试件的内部应力云图，左图为端面俯视图，右图为纵剖面主视图。由图 5 明显可看出，此时在试件内部大部分区域的轴向应力分布比较均匀，应力值为 40MPa 左右。而在两端部中心区域却因端部效应而形成透镜形应力集中区(具有一定的深度和广度，其范围大小决定于端部效应的强弱，若压头与试件端面摩擦力大，端部效应强，则应力集中区范围相应就大；如果采取一些减小端部效应的措施，则结果相反。但不管采用什么样的措施，端部效应是无法

完全消除的,因此应力集中区是必然存在的),应力集中区内轴向应力大于 40MPa。由横端面中心向四周发散降低,到横端面边缘附近时又形成一环形应力降低区。图 6、图 7 和图 8 展示的是分别用 5mm、10mm 和 15mm 直径压头对试样加载至 40MPa 时的内部应力分布情况,其整体形态基本一致,均以压头与试件的接触面为中心,在接触面以下一定深度范围内形成一个应力集中区,其影响范围在深度和广度上随压头直径的增加而增大。当采用 5mm 压头对试样进行 Kaiser 效应声发射信号激发时,其应力影响范围在预加应力的等值线以内,未达到先前所受的应力,故不能有效地激发声发射信号,此时所得到的少量信号也只是由于压头局部应力集中而产生的,这就很好地解释了在用 5mm 压头进行压缩时 Kaiser 效应失效的原因。只有继续加大载荷,当影响范围突破预应力形成的集中区后,才会激发出声发射信号,形成 Kaiser 效应“滞后现象”。

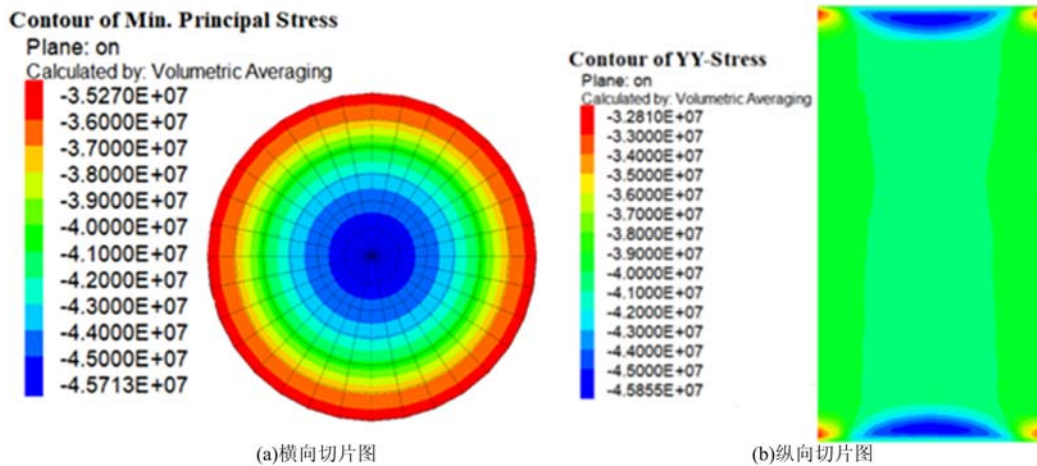


图 5 50mm 压头切片图

Fig. 5 50mm indenter slice

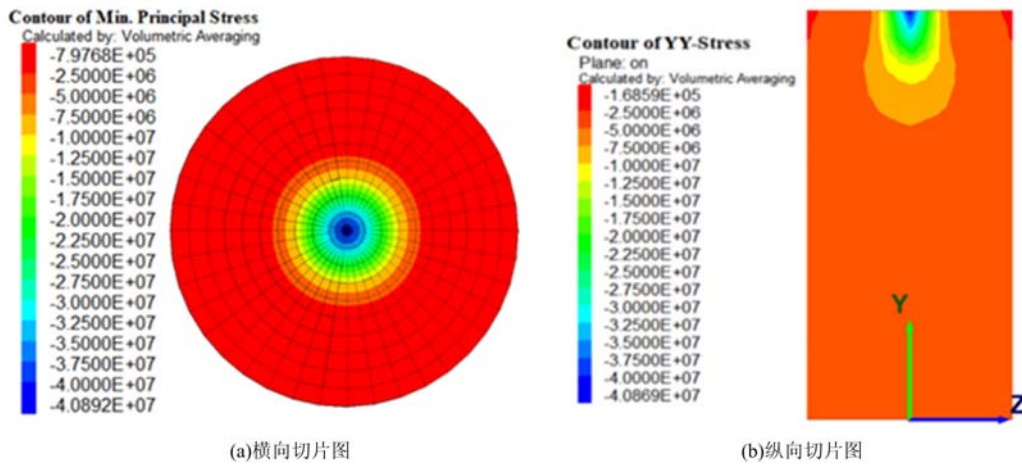


图 6 5mm 压头切片图

Fig. 6 5mm indenter slice

当采用 10mm 压头对试样进行声发射信号激发时,其应力影响范围超出预加应力的应力集中区,达到正常的应力均布区,故能部分激发出对应的声发射信号,此时有效 AE 信号虽然没有大直径压头激发的个数多,但也能显现出 Kaiser 效应。其最大影响深度超过了预加应力的应力集中区,但是广度不足,虽然不影响 Kaiser 效应的激发,但还是会存在一定“滞后显现”现象,Dev 值大于 1。随着压头直径的增加(>15mm),压头覆盖范围超过预加应力的应力集中区,环形应力降低区所受的应力超过预加应力,Kaiser 效应提前显现,Dev 值小于 1。数值模拟结果显示,端部效应是岩石试件声发射显现具有尺寸效应的重要影响因素。

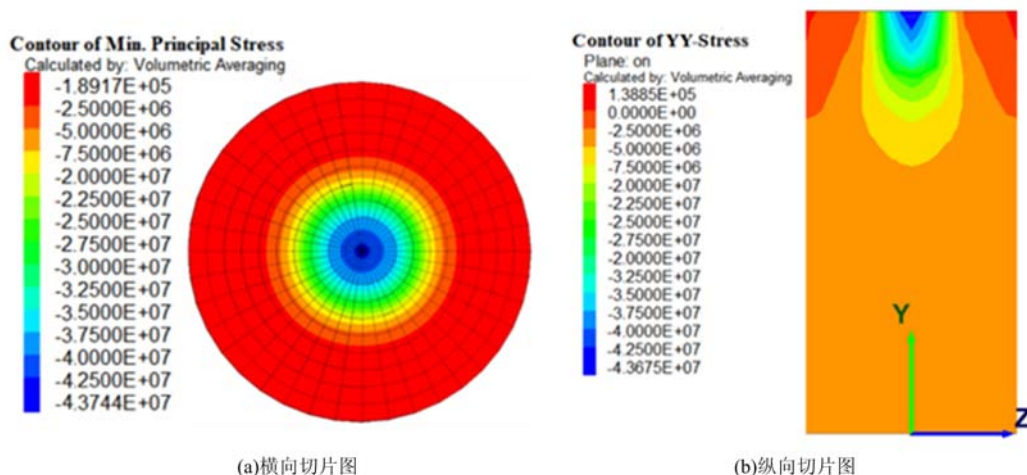


图 7 10mm 压头切片图
Fig. 7 10mm indenter slice

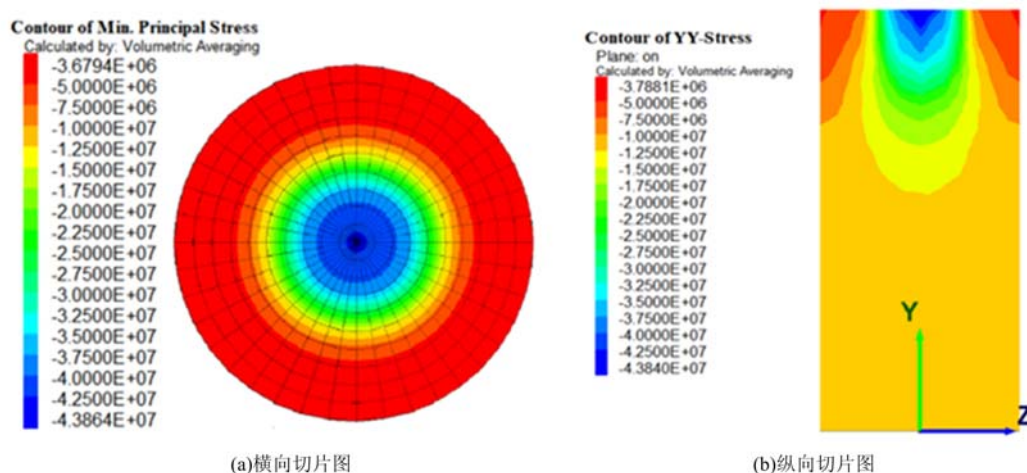


图 8 15mm 压头切片图
Fig. 8 15mm indenter slice

4 结论

本文针对不同压头直径激发岩石 Kaiser 点进行了试验与数值模拟分析研究,初步得出以下结论:

(1) 采用小直径压头对岩石试件进行单轴压缩加载声发射试验时,在预设应力点附近一般都会产生较明显的 AE 信号突增现象,采用双参数信号比较法能更精确地获得应力突变点的准确值。

(2) 压头直径对 Kaiser 效应的显现特征具有一定的影响作用,AE 信号突增区域的有效 AE 信号事件数呈现出随压头直径增大而增多的趋势,5mm 直径压头因激发出的有效 AE 事件数过少,有可能会影响到应力突变点的准确判断。

(3) 与预设应力相比,实测突变点应力表现出两种不同的特征:“滞后显现”和“提前显现”现象。试验中,5mm、10mm 直径压头下表现出突变点滞后显现,并且越小直径压头突变点应力的滞后显现越明显,偏差越大;15mm 及以上直径压头表现出提前显现,但总体偏差不大。除 5mm 直径压头外,其余直径压头的实测突变点应力与预设应力值偏差总体在 0.9~1.1 的合理范围内,即采用合适直径的小压头可以有效激发并准确显现岩石 Kaiser 效应。

(4) 试验研究表明,8mm 直径压头可以激发出岩石 Kaiser 效应,通过采用减小压头直径来提高激发应力的思路具有可行性,小型化加载机构配置合适直径的压头是可以在现场进行准确原岩应力测试的,本文相关研究成果对在现场中使用 AE 法准确测量地应力具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术(修订版)[M]. 北京:科学出版社, 2004 (CAI Meifeng. Ground stress measurement principle and technology (revised edition)[M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese))
- [2] 万国香, 王其胜, 李夕兵. 应力波作用下岩石声发射能量特征[J]. 实验力学, 2012, 27(6):727—733 (WAN Guoxiang, WANG Qisheng, LI Xibing. Characteristics of acoustic emission energy of rock under stress wave[J]. Laboratory Mechanics, 2012, 27(6):727—733 (in Chinese))
- [3] ZHAO Kui. Comprehensive analysis method and experimental verification for in-situ stress measurement by acoustic emission tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8):1403—1411.
- [4] 牛双建, 冯文林, 党元恒, 等. 单轴压缩条件下破裂岩样声发射及能耗特性试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):515—522 (NIU Shuangjian, FENG Wenlin, DANG Yuanheng, et al. Experimental study on acoustic emission and energy consumption characteristics of ruptured rock samples under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):515—522 (in Chinese))
- [5] LI Yuanhui, YANG Yujiang, LIU Jianpo. Experimental and theoretical analysis on the procedure for estimating geo-stresses by the Kaiser effect[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2010, 17(5):514—518.
- [6] 王晓军, 肖伟晶, 陈辰, 等. 基于声发射参量的不同深度灰岩塑性破坏识别研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1):107—112 (WANG Xiaojun, XIAO Weijing, CHEN Chen, et al. Study on plastic damage identification of limestone with different depths based on acoustic emission parameters[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):107—112 (in Chinese))
- [7] Zhao X. Application of the Kaiser effect of acoustic emission to measure vertical stress in an underground mine[J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2012, 54(12):662—666.
- [8] 张昕, 付小敏, 沈忠, 等. 利用岩石声发射 Kaiser 效应测试地应力的方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(10):18—23 (ZHANG Wei, FU Xiaomin, SHEN Zhong, et al. Study on the method of testing ground stress by using Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. China Measurement & Testing Technology, 2017, 43(10):18—23 (in Chinese))
- [9] 傅翔, 谢强, 江小城, 等. 受拉加载方向变化对 Kaiser 效应点准确度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7):1365—1370 (FU Xiang, XIE Qiang, JIANG Xiaocheng, et al. Effect of the change of the loading direction on the accuracy of the Kaiser effect point[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1365—1370 (in Chinese))
- [10] 曾鹏, 纪洪广, 高宇, 等. 三轴压缩下花岗岩声发射 Kaiser 点信号频段及分形特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2):376—384 (ZENG Peng, JI Hongguang, GAO Yu, et al. The frequency band and fractal characteristics of acoustic emission Kaiser point signal of granite under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2):376—384 (in Chinese))
- [11] Tuncay E, Ulusay R. Relation between Kaiser effect levels and pre-stresses applied in the laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(4):524—537.
- [12] 张东明, 白鑫, 齐消寒, 等. 含层理岩石的 AE 特征分析及基于 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1):87—97 (ZHANG Dongming, BAI Xin, QI Xiaohan, et al. Analysis of AE characteristics of layered rock and geostress test based on Kaiser effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1):87—97 (in Chinese))
- [13] 刘洋, 余贤斌, 谢强, 等. 岩石 Kaiser 效应方向独立性的研究现状及进展[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6):1185—1191 (LIU Yang, YU Xianbin, XIE Qiang, et al. Research status and development of directional independence of rock Kaiser effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6):1185—1191 (in Chinese))
- [14] YIN Jianhua, Wong R H C, Chau K T, et al. Point load strength index of granitic irregular lumps: Size correction and correlation with uniaxial compressive strength[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70:388—399.
- [15] 刘明松. 点荷载作用下岩石声发射对应力记忆效应的研究[D]. 江西理工大学, 2008 (LIU Mingsong. Study on the effect of rock acoustic emission on stress memory under point load[D]. Jiangxi University of Science and

- Technology, 2008 (in Chinese))
- [16] 郭曼丽. 试论岩石点荷载试验的适用性[J]. 岩石力学, 2003, 24(3):488—494 (GUO Manli. On the applicability of rock point load test[J]. Rock Mechanics, 2003, 24(3):488—494 (in Chinese))
- [17] 赵奎, 金解放, 刘明松, 等. 岩石点荷载作用下对应力记忆效应的声发射数值模拟与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(S1):2695—2702 (ZHAO Kui, JIN Jiefang, LIU Mingsong, et al. Numerical simulation and experimental study on acoustic emission effect of rock under point load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(S1):2695—2702 (in Chinese))
- [18] 马春德, 胡顺喜, 王业顺, 等. 引入外参数的声发射系统在地应力测量中的应用[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2):1—5 (MA Chunde, HU Shunxi, WANG Yeshun, et al. Application of acoustic emission system with external parameters in geostress measurement[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2):1—5 (in Chinese))
- [19] Fuentealba J F, Galleguillos R, Vargas-Hernández Y. Stress memory lasting in composite materials[J]. Physics Procedia, 2010, 3(1):873—881.
- [20] 倪纯博, 张广清, 贾久波. 声发射测量地应力方法中 Kaiser 点确定方法的优选与分析[J]. 岩土工程技术, 2014(3):137—142 (NI Chunbo, ZHANG Guangqing, Jia Jiubo. Optimization and analysis of Kaiser point determination method in acoustic stress measurement in geostress method [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2014(3):137—142 (in Chinese))
- [21] 杨振琦, 赵永川, 杨天鸿, 等. 闪长岩单轴加载过程中声发射和弹性波速度变化规律的研究[J]. 实验力学, 2015, 30(5):649—657 (YANG Zhenqi, ZHAO Yongchuan, YANG Tianhong, et al. Study on the variation law of acoustic emission and elastic wave velocity during uniaxial loading of diorite[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):649—657 (in Chinese))

Investigation on indenter size effect in Kaiser effect excitation verification

MA Chun-de^{1,2}, LONG Shan¹, HU Shun-xi¹, WANG Ye-shun¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Center for Advanced Studies, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In view of practical requirement that the on-site crustal stress measurement by acoustic emission (AE) method should use a small and convenient loading device to excite acoustic emission signal of rock, this paper proposes a solution to increase the excitation stress by reducing the diameter of indenter. For this reason, using MTS testing machine, PCI-II acoustic emission instrument and other instruments, Kaiser effect excitation behavior verification experiments for five groups of prefabricated stress rock specimens with different indenter diameters (5mm, 10mm, 15mm, 20mm and 50mm) were carried out, respectively. After determining the critical range of indenter diameter for Kaiser effect of rock to be 5~10mm, further experiments for four groups of specimen with different indenter diameters (6mm, 7mm, 8mm and 9mm) were carried out. Experimental results show that the indenter with 8 mm diameter can excite and accurately show the rock Kaiser effect, but the indenter diameter still has a certain effect on Kaiser effect. Compared with prefabricated stress, the phenomenon of “delayed appearance” or “early appearance” occurs in the measured catastrophe point stress. At the same time, the internal stress distribution of marble specimens with different diameters is simulated by FLAC3D software. Based on results of acoustic emission experiment, the mechanism of end effect and indenter diameter on Kaiser effect of rock specimen is analyzed and explained. Above results have certain guiding significance for accurate on-site measurement of crustal stress by using AE method.

Keywords: Kaiser effect; Acoustical emission (AE); size effect; uniaxial compression; FLAC3D