

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.12.025

不同围压下花岗岩 σ_{cc} , σ_{ci} 和 σ_{cd} 的确定

陈世万¹, 杨春和^{1,2}, 王贵宾², 魏翔¹
(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为研究不同围压下裂隙闭合应力阈值 σ_{cc} , 起裂应力阈值 σ_{ci} 和损伤应力阈值 σ_{cd} , 对高放废物地质处置新疆预选场址雅满苏 YM01 号钻孔岩心进行了三轴压缩试验和巴西劈裂试验. 应用裂隙体积应变模型、移动点回归法和声发射确定了 σ_{cc} , σ_{ci} 和 σ_{cd} ; 通过分析不同方法确定各阈值的适用性, 优化了一套确定各阈值的综合方法; 分析了不同围压下 σ_{cc} , σ_{ci} 和 σ_{cd} 与围压的关系: σ_{cc} 受围压的影响不明显, $\sigma_{cc} = \sigma_1 = 50 \sim 65$ MPa; σ_{ci} 为裂隙张拉破坏的起点, 起裂强度满足格里菲斯强度理论; σ_{cd} 与峰值抗压强度 σ_c 线性关系明显, 损伤强度满足摩尔-库伦强度理论.

关 键 词: 损伤强度; 起裂强度; 裂隙闭合应力; 移动点回归法; 裂隙体积应变模型; 声发射

中图分类号: TU 458 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)12-1789-06

Experimental Study on the Determination Method of σ_{cc} , σ_{ci} and σ_{cd} for Granite Under Different Confining Pressures

CHEN Shi-wan¹, YANG Chun-he^{1,2}, WANG Gui-bin², WEI Xiang¹
(1. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China. Corresponding author: CHEN Shi-wan, E-mail: chswan01@163.com)

Abstract: The determination of the stress thresholds of crack closure (σ_{cc}), crack initiation (σ_{ci}) and crack damage (σ_{cd}) of rock is of great significance for understanding the progressive failure process of rock from high-level radioactive geological waste repository. The Brazilian test and triaxial compression test are performed to determine those stress thresholds. Three methods including moving point regression technique, crack volumetric strain and acoustic emission hits rate are applied to determine these thresholds mentioned above. A comprehensive method is proposed to determine stress thresholds accurately and conveniently. The relationship of various thresholds and corresponding confining pressure are also analyzed, results show that σ_{cc} is less sensitive to confining pressure compared with the crack damage stress σ_{cd} , the crack initiation strength (σ_{ci}) meets Griffith strength theory, which is confirmed by the tensile strength from Brazilian test.

Key words: crack damage strength; crack initiation strength; crack closure stress; moving point regression technique; crack volumetric strain model; AE

高放废物深地质处置,即将高放废物埋在距地表深约 500~1 000 m 的地质体中. 由于高放废物毒性大、半衰期长,需要保证地下处置库在很长(10⁴a 以上)的时间内与生物圈有效地隔离. 如此大的时间尺度和高的安全要求对岩石地下工程提出了新的要求.

Martin^[1]研究了加拿大核废料处置库主岩 LB 花岗岩,提出裂隙体积应变模型用以确定岩石的起裂强度. 认为岩石在 $\sigma_{ci} = 0.4 \sigma_c$ 起裂,之后裂隙随应力增长持续稳定发展,直到 $\sigma_{cd} = 0.8 \sigma_c$,岩石内裂隙开始非稳定发展,此强度为岩石的损伤强度,与岩石的长期强度相当. Eberhardt

等^[2]提出移动点回归法计算岩石体积应变刚度用以确定裂隙起裂强度 σ_{ci} 和损伤强度 σ_{cd} . Chang 等^[3]认为移动点法回归取值区间最佳取值为数据总数 5%, 并改进了损伤强度的取值方法. Shiotani 等^[4]设计岩石的剪切和拉伸试验研究声发射, 分析了岩样破坏全过程中声发射的特征; Cai 等针对声发射(微震)开展了大量研究, 对地下开挖岩体的损伤进行量化, 通过声发射反演工程岩体力学参数^[5-6].

汪斌等^[7]分析了体积应变法、声发射及波速测试 3 种方法确定起裂强度、损伤强度的可靠性及差异. 周辉等^[8]对比了目前常用的 4 种确定硬岩起裂强度和损伤强度的方法. 赵星光等^[9]采用声发射累计计数确定北山深部花岗岩在压缩条件下起裂强度 σ_{ci} , 并探讨了围压对起裂强度和损伤强度的影响.

综上, 岩石压缩过程裂隙闭合、起裂、损伤应力阈值的确定及裂隙演化规律对高放废物地下处置库的建设有重要意义. 本文将系统地分析花岗岩压缩过程中基于应力-应变关系和声发射确定各阈值的适用性, 提出一套确定阈值的综合方法. 并对不同围压下花岗岩内裂隙闭合、起裂、损伤过程的力学机理进行研究.

1 试验材料及方法

岩芯采自我国高放废物地质处置新疆预选场址雅满苏 YM01 号钻孔, 岩性为含斑中粒黑云母二长花岗岩. 岩芯加工为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 和 $\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的试样, 分别用于三轴压缩和巴西劈裂试验. 三轴压缩试验设备为美国 MTS815 岩石力学测试系统. 试验采用轴向位移控制, 加载速率为 0.001 mm/s , 试验过程中记录轴向力、轴向位移和侧向位移; 巴西劈裂试验采用 RMT-150C 岩石力学测试系统; 声发射监测采用美国物理声学公司(PAC)PCI-II 声发射采集系统. 进行 4 组试验, 围压分别为 5, 10, 15, 20, 25 MPa. 部分试验结果列于表 1.

表 1 试验结果				
Table 1 Experiment results				
编号	围压/MPa	峰值强度 MPa	编号	抗拉强度 MPa
1-4-1	5	231.56	1-2-1	13.13
1-4-2	10	292.34	1-2-2	14.49
1-4-3	15	331.68	1-2-3	13.79
1-4-4	20	365.75	1-2-4	12.57
1-4-5	25	402.95	1-2-5	12.32

2 压缩过程 σ_{cc} , σ_{ci} 和 σ_{cd} 的确定

脆性岩石压缩条件下峰前变形可划分为孔隙压密阶段 I、弹性变形阶段 II、裂隙稳定发展阶段 III 和非稳定扩展 IV 4 个阶段^[1-2], 如图 1 所示.

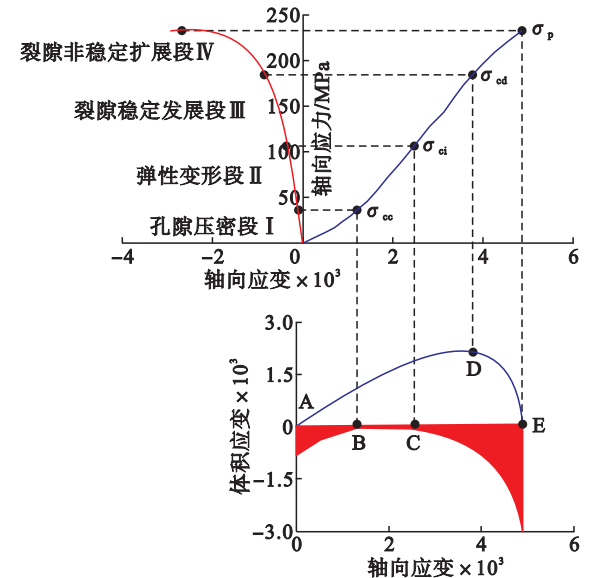


图 1 裂隙体积应变模型确定应力状态
Fig. 1 Stress state calculated by volumetric strain model

2.1 移动点回归法确定应力阈值

移动点回归法的实质是对应力-应变曲线或体积应变等曲线求一阶导数, 从而获得曲线的变化规律. 从数据起始点以一定间距(通常为数据总数的 5% 或 10%) 对曲线进行最小二乘法线性拟合求得该段曲线的斜率, 然后向后滑动一个间距(本文中采用 10 个数据点), 按相同的方法求得本段斜率, 重复以上步骤, 获得整条曲线的斜率变化规律.

2.1.1 移动点回归法确定阈值

为获得岩石受压变形过程中各阶段泊松比变化规律, 采用式(1)计算切线泊松比:

$$\mu = d\varepsilon_3/d\varepsilon_1 = \frac{d\varepsilon_3}{d\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon_1} = k_2/k_1. \quad (1)$$

式中: $d\varepsilon_1$, $d\varepsilon_3$ 为分别为轴向、径向应变增量; $d\sigma$ 为应力增量; k_1 , k_2 分别为通过移动点回归法计算所得轴向、径向应变随应力变化率.

以试样 1-4-1 压缩试验为例, 按数据点总数的 2.5%, 5% 和 10% 取间距, 采用最小二乘法对各区间进行线性拟合, 每次滑动 10 个数据点计算轴向刚度、泊松比和体积刚度如图 2 所示. 可见, 采用不同取值区间移动回归法得到的曲线有相同的变化规律, 但波动性差别较大. 对于轴向刚

度, A ~ B 段随着孔隙的闭合, 轴向刚度迅速增长; B ~ C 段, 轴向应变刚度在一定水平上下波动, 为线弹性阶段; C ~ E 段为裂隙稳定扩展段及裂隙非稳定扩展段, 轴向刚度在本阶段迅速增长到峰值后开始跌落.

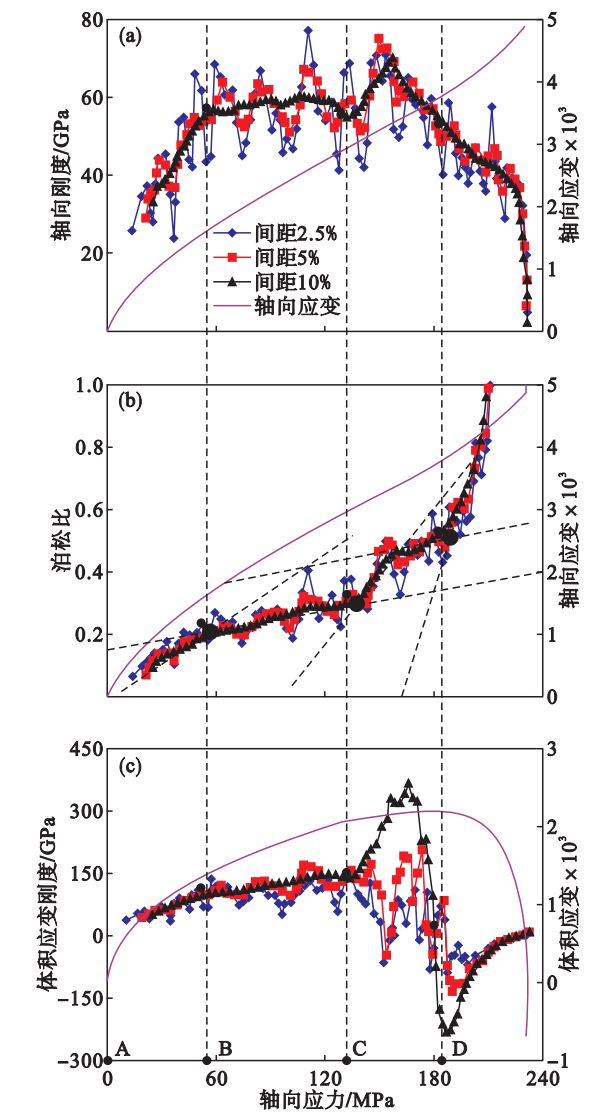


图 2 不同间距移动点回归法获得刚度曲线
Fig. 2 Stiffness curves obtained by moving point regression technique based on different interval
(a)—轴向刚度; (b)—泊松比; (c)—体积刚度.

对于切线泊松比曲线, 在峰前变形阶段, 泊松比均为上升趋势, 不存在常数段, 即对于侧向变形并没有真正意义上的线弹性. A ~ B 段, 随着裂隙的闭合, 泊松比以较低的增长率从 0.06 增长到 0.19; B ~ C 段泊松比增长率最低, 本阶段岩样内裂隙基本闭合, 而应力尚不足以诱导裂隙, 认为本阶段泊松比最为接近岩石材料本身的泊松比, 范围为 0.2 ~ 0.28; C ~ D 段, 泊松比迅速增大, 横向张拉裂隙开始产生, 泊松比从 0.28 增长到 0.5; D ~ E 段

为非稳定裂隙发展, 泊松比以更高的增长率迅速增加, 在强度峰值点附近, 裂隙贯通, 泊松比超过 1.

对于体积应变刚度曲线, 在 A ~ C 阶段以较稳定的增长率增加, 难以识别出裂隙闭合应力阈值 σ_{cc} ; C 点开始, 体积应变曲线出现很大的波动, 对于取值区间较小 (数据总数的 2.5% 和 5%) 移动回归获得的曲线, 曲线波动很大, 难以准确识别 C 点; 对于较大取值区间 (10%) 可以确定 C 点起裂应力阈值 σ_{ci} . C ~ D 段内体积应变刚度波动较大, D 点体积应变刚度迅速跌落至 0, D 点之后应变刚度为负, D 点为扩容阶段的起始点, 该点的强度为 σ_{cd} .

2.1.2 关于移动回归法中取值区间大小的讨论

图 2 反映了不同取值区间移动回归得到的曲线的稳定性有较大差别. 较小的取值区间获得曲线波动性大, 可以更清楚反映曲线的局部特征, 但波动性过大, 掩盖了曲线的变化规律, 难以从曲线上识别应力阈值拐点; 较大的取值区间获得的曲线较为稳定, 能很好地识曲线变化的拐点.

另一方面, 移动点回归法是对曲线分段进行拟合, 拟合的效果也是评价取值区间是否合理的重要指标. 对不同间距取值区间拟合曲线的相关系数计算, 如图 3 所示. 显然, 在 2.5%、5% 和 10% 取值区间内, 宽间距取值区间拟合效果好于窄间距. 2.5% 的取值区间拟合的相关系数波动范围很大, 拟合相关系数很低, 这些点的拟合值在刚度曲线上也造成很大的波动, 造成曲线的拐点无法识别. 结合图 2 分析认为, 采用数据总数的 10% 作为移动回归法的取值间距能获得可信且易于识别拐点的曲线.

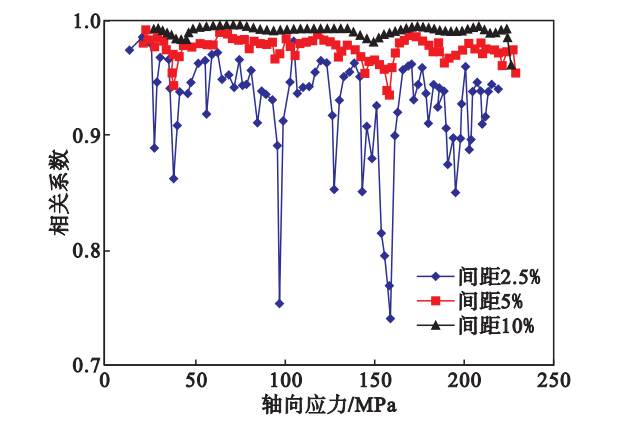


图 3 不同间距取值区间线性回归相关系数
Fig. 3 Correlation coefficients of different interval of moving point regression technique

2.2 裂隙应变模型算法确定应力阈值

2.2.1 裂隙应变模型算法

Martin^[1]将岩石压缩过程岩石的体积应变分为岩石材料的弹性体积应变和岩石中裂隙的体积

应变. 裂隙体积应变为岩石总体积应变与弹性体积应变之差:

$$\varepsilon_v^e = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三个主应力; $\varepsilon_v, \varepsilon_v^e, \varepsilon_v^c$ 分别为岩样体积应变、弹性体积应变和裂隙体积应变; E, μ 分别为岩样弹性阶段的弹性模量和切线泊松比. 图 1 为 1-4-1 岩样采用裂隙体积应变模型获得的曲线及应力-应变曲线的阶段划分示例.

2.2.2 泊松比对裂隙体积应变模型法确定 σ_{cc} , σ_{ci} 和 σ_{cd} 的影响

Eberhardt 等^[2] 指出裂隙体积应变法确定 σ_{cc}, σ_{ci} 和 σ_{cd} 受泊松比影响显著. 在图 2 中, 弹性变形阶段 B~C 段内弹性模量 E 变化很小, 切线泊松比 μ 在此范围内最为稳定. 将弹性阶段弹性模量和不同切线泊松比代入式(3), 图 4a 给出了不同泊松比裂隙体积应变曲线. 可以看到不同泊松比获得裂隙体积应变在 B~C 段相差不大, 由裂隙体积应变模型确定 σ_{cc}, σ_{ci} 值仅有微小差别. 对不同泊松比裂隙体积应变曲线按移动点回归法求裂隙体积应变刚度(图 4b). 代入此范围内的

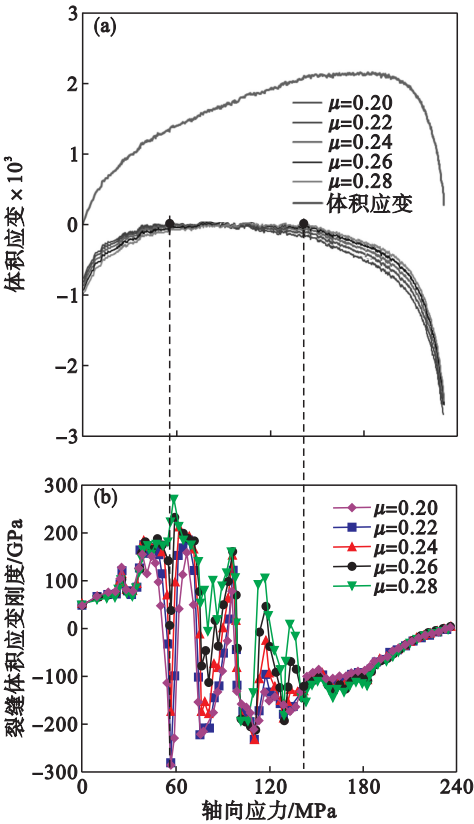


图 4 采用不同泊松比计算裂隙体积应变
Fig. 4 Volumetric strain curves based on different Poisson ratios
(a) — 体积应变; (b) — 刚度.

不同泊松比, 计算得到裂隙体积应变刚度曲线变化规律相同, 采用裂隙体积应变刚度曲线更易准确确定 $B(\sigma_{cc}), C(\sigma_{ci})$ 点.

2.3 声发射参数确定 σ_{ci} 和 σ_{cd}

声发射参数是获得岩石压缩过程中岩石所处的状态的有效手段. 常用于确定岩石状态声发射参数为声发射撞击率和能量率. 撞击率为单位时间内撞击个数. 声发射信号的能量为信号检测波包络线下的面积, 反映声发射撞击的相对能量和相对强度.

图 5 为岩石压缩过程中声发射演化规律, 声发射撞击率和能量率具有相似的规律. 在 0~182 MPa 声发射撞击很少, 仅在 110 MPa 附近有少量撞击; 以 182 MPa 为起点, 声发射撞击率和能量率开始大幅增加, 大量声发射撞击反映了裂隙的非稳定发展, 即该点为裂隙非稳定发展的起点, 应力为 σ_{cd} , 与通过裂隙体积应变模型和移动点回归法计算的 σ_{cd} 具有很好的一致性. 而 110 MPa 处撞击率变化虽然与前文确定 σ_{ci} 较接近, 但变化很小, 不足以证明通过声发射撞击率能有效确定 σ_{ci} .

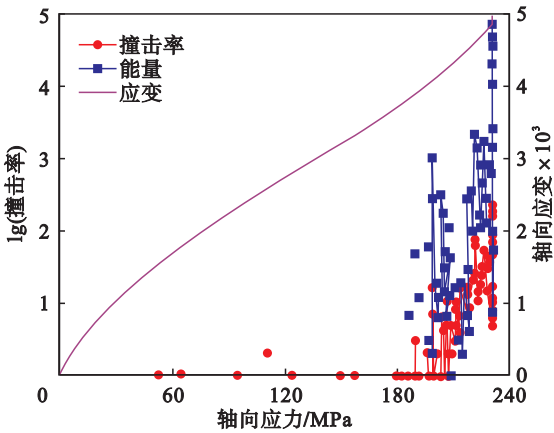


图 5 声发射撞击率与能量率及对应应力-应变关系
Fig. 5 AE hit rate, energy rate and the corresponding relationship to stress-strain curve

通过以上分析, 以试件 1-4-1 为例得到室内试验基于应力应变关系和声发射确定 σ_{cc}, σ_{ci} 和 σ_{cd} 的综合方法体系如表 2 所示.

3 围压对 σ_{ci} 和 σ_{cd} 的影响

按表 2 列出的确定 σ_{cc}, σ_{ci} 和 σ_{cd} 的方法, 确定不同围压下 σ_{ci}, σ_{ci} 和 σ_{cd} 如图 6 所示. 不同围压下 σ_{cc} 变化不显著, 认为 σ_{cc} 与围压关系不大, 只要最大主应力 σ_1 达到阈值即基本完成裂隙的闭合: $\sigma_{cc} = \sigma_1 = 50 \sim 65$ MPa; σ_{ci} 随着围压增高, 缓

慢线性增加,增长率明显低于峰值强度 σ_p 随围压的增长率; σ_{cd} 随围压增加变化最为明显,且与峰值强度 σ_p 有很好的线性关系; $\sigma_{cd} - \sigma_3 = (0.74 \pm 0.03) \sigma_p$. 认为岩石在压缩状态下损伤强度与峰值强度满足相同的强度准则. 而岩石的起裂强度 σ_{ci} 与峰值强度 σ_p 之间难以建立线性关系.

表 2 室内试验确定 σ_{cc} 、 σ_{ci} 和 σ_{cd} 的综合方法

Table 2 A comprehensive method to determine σ_{cc} 、 σ_{ci} and σ_{cd} based on laboratory test

应力阈值/MPa	阈值确定方法
$\sigma_{cc} = 56.30$	泊松比曲线第一个明显拐点;裂隙体积应变刚度绕 0 水平剧烈波动起点;裂纹体积应变曲线拐点.
$\sigma_{ci} = 134.71$	泊松比曲线第二个明显拐点;体积应变刚度曲线剧烈波动起点;裂隙体积应变刚度绕 0 水平剧烈波动终点.
$\sigma_{cd} = 183.23$	体积应变刚度为 0 值点;声发射撞击率和能量率激增点.

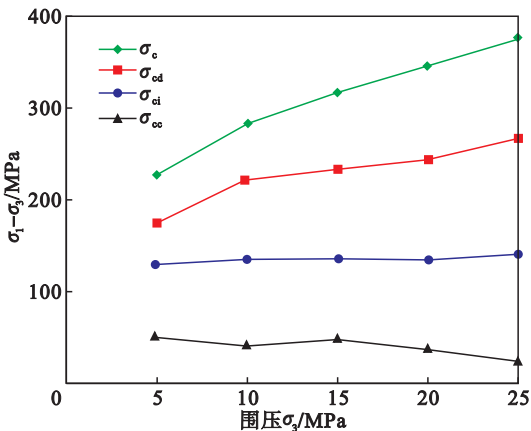


图 6 不同围压下 σ_{cc} 、 σ_{ci} 和 σ_{cd}

Fig. 6 σ_{ci} 、 σ_{ci} 、 σ_{cd} under different confining pressures

如前文所述,岩石受压起裂时裂隙的稳定发展过程为裂隙尖端附近达到极限拉应力而断裂开始扩展,应用格里菲斯强度理论:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = 8\sigma_t. \tag{4}$$

式(4)为 $(\sigma_1 + 3\sigma_3) \geq 0$ 双向压缩下裂隙扩展准则, σ_t 为试样的抗拉强度. 将不同围压下 $\sigma_1 = \sigma_{ci}$ 和对应的围压 σ_3 代入式(4)计算得到不同围压下 σ_t 如表 3 所示.

对比表 3 中计算 σ_t 与表 1 通过试验获得 σ_t , 计算值与试验值具有很好的一致性. 证实岩石受压起裂强度满足格里菲斯强度理论,裂纹主要为张拉型.

表 3 不同围压下由 σ_{ci} 计算 σ_t 值

Table 3 σ_t calculated by σ_{ci} under different confining pressures

编号	围压/MPa	σ_{ci} /MPa	σ_t /MPa
4-1	5	134.71	15.05
4-2	10	146.08	14.82
4-3	15	152.02	14.05
4-4	20	156.21	13.16
4-5	25	166.45	13.06

4 结 论

1) 对于移动点回归法,分析了不同取值间距确定各应力阈值的适用性,认为数据总数 10% 作为取值间距能对各阈值明显识别;切线泊松比曲线在各个阈值有明显的拐点,对确定 σ_{cc} 、 σ_{ci} 、 σ_{cd} 都有较好的效果.

2) 通过移动点回归法获得弹性阶段最接近岩石材料弹性模量和泊松比的范围,验证了裂隙体积应变模型法采用此范围内的弹性模量和泊松比不会造成显著的阈值差异,裂隙体积应变刚度能有效确定 σ_{ci} .

3) 分析了声发射参数法确定各阈值的适用性,认为声发射撞击率和能量率能有效确定 σ_{cd} ,但在本实验条件下难以确定 σ_{cc} 和 σ_{ci} .

4) 通过分析不同方法对不同阈值的适用性,优化了一套确定各应力阈值的方法;分析了围压对各阈值的影响: σ_{cc} 受围压的影响不明显, $\sigma_{cc} = \sigma_1 = 50 \sim 65$ MPa; σ_{ci} 为裂隙张拉破坏的起点,起裂强度满足格里菲斯强度理论; σ_{cd} 与峰值抗压强度 σ_p 线性关系明显,损伤强度满足摩尔-库伦强度理论.

参考文献:

[1] Martin C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings [M]. Winnipeg: University of Manitoba, 1994.

[2] Eberhardt E, Stead D, Stimpson B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2): 222-233.

[3] Chang S H, Lee C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(7): 1069-1086.

[4] Shiotani T, Ohtsu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5): 235-246.