

不同围压下茅口灰岩渐进性破坏的试验研究

王亚¹, 万文^{1,2}, 赵延林^{1,2}, 罗世林¹, 唐劲舟¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:利用 MTS815 电液伺服控制刚性试验机进行不同围压下茅口灰岩三轴压缩试验, 通过计算绘得相应裂隙体积应变图, 分析得出裂纹起始应力、裂纹破坏应力。结果表明: 随着围压的增大, 应力门槛值均呈非线性增长态势, 当围压超过 17 MPa 时, 裂纹起始应力、裂纹破坏应力分别增加 48.5% 和 20.1%, 茅口灰岩延性开始增强; 裂纹破坏应力为峰值强度的 64% ~ 75%, 三轴压缩下茅口灰岩裂隙不稳定发展阶段较长; 环向应变值随围压增大而增大, 当轴力超过裂纹破坏应力进入裂隙不稳定发展阶段, 环向应变增大 2.7 ~ 3.2 倍, 用环向 - 轴向应力应变曲线图能较好的反映岩石应力门槛值。

关键词: 围压; 三轴压缩; 茅口灰岩; 应力门槛值

中图分类号: TU47

文献标识码: A

Experimental study on progressive failure process of Maokou limestone under different confining pressure

WANG Ya¹, WAN Wen^{1,2}, ZHAO Yan-lin^{1,2}, Luo Shi-lin¹, Tang Jing-zhou¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hu'nan University of Science and Technology, Hu'nan Xiangtan 411201, China; 2. Hunan University of Science and Technology, Hu'nan Province Key Laboratory of Safety Mining and Technology of Coal Mine, Hu'nan Xiangtan 411201, China.)

Abstract: Under different confining pressure, triaxial compressive strength of Maokou limestone is tested by MTS 815 test system. By calculating data, the fracture strain figure is painted and crack initiation stress and crack failure stress are obtained, it shows that: with the increase of confining pressure, three stress thresholds increase, the period of unstable crack growth is longer than uniaxial compressive strength, crack propagation is limited under confining pressure. Under the same confining pressure, circ strain is larger than axial strain, circ strain grows quickly when axial force over crack initiation stress, a sharp increase in circ strain when axial force over crack failure stress, the circ - axial stress strain curve can reflect three stress thresholds.

Key words: confining pressure; triaxial compressive strength; Maokou limestone; stress thresholds

矿山岩体一般赋存于地下, 井下巷道围岩破坏是由于围岩受到的应力超过围岩本身的起裂强度, 进而导致围岩失稳, 最后影响巷道的安全性。岩石失去承受载荷的能力是一个渐进性破坏过程。W. F. Brace 等^[1]通过研究不同岩石的渐进性破裂过程提出了裂纹扩展应力门槛值的概念; 国内学者^[2-9]对此也做了大量研究工作, 但研究多

集中于单轴压缩。茅口灰岩是我国南方矿山广泛存在的岩体, 而对它的实验研究较少。为此, 本文选取茅口灰岩为试验岩样, 做不同围压下三轴压缩试验, 研究其渐进性破坏应力门槛值变化情况。

1 力学试验

1.1 试样制取及实验设备

本次试验岩石采用长沙宁乡煤炭坝煤矿的茅口灰岩,选取质地均匀的岩块,通过切割打磨之后制得的试样为 50 mm × 100 mm 圆柱形试件。

实验仪器为美国 MTS 公司生产的多功能电液伺服控制刚性试验机 (MTS815),该实验系配备三套独立的伺服控制系统,分别为轴压、围压与孔隙(渗透)压力。实心钢制重支架储存很小的弹性能从而实现刚性压力试验,该试验机可施加的最大轴力为 4 600 kN,最大围压为 140 MPa。与试件直接接触的引伸计可在高温 200℃、高压 140 MPa 中精确工作,采集试样轴向位移和环向位移,实现岩石破坏前后的应力、应变最精确地测量。全程计算机控制,可实现实验全过程数据的动态监测。

1.2 三轴压缩试验

将试样置入三轴腔后,在试样外部套入一层透明热塑管,并用热风机加热热塑管使之紧密贴合试样,杜绝三轴腔内硅油侵入试样内部,同时防止试样破裂时碎渣溅入硅油内。将环向引伸计安装在试件中部,实时监测其环向位移,将轴向引伸计设置在环向引伸计上下端,用于监测轴向位移。

为研究围压对茅口灰岩三轴压缩下应力门值变化的规律,四组茅口灰岩试样在围压分别为 3、12、17 和 22 MPa 四个等级下加载至破坏,从而测定相应围压下试样的环向位移、轴向位移及峰值应力。对采集系统中环向位移、轴向位移和最大轴力等数据进行分析、计算后,绘得不同围压下三轴破坏环向-轴向应力应变曲线见(图1)。

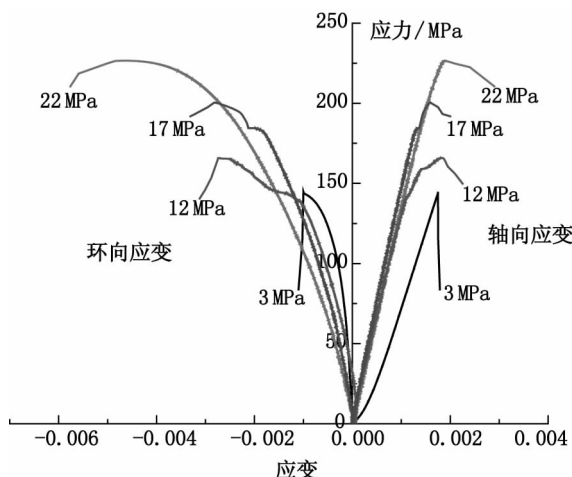


图1 环向-轴向应力应变图

Fig.1 Circ-aixal stress-strain curve

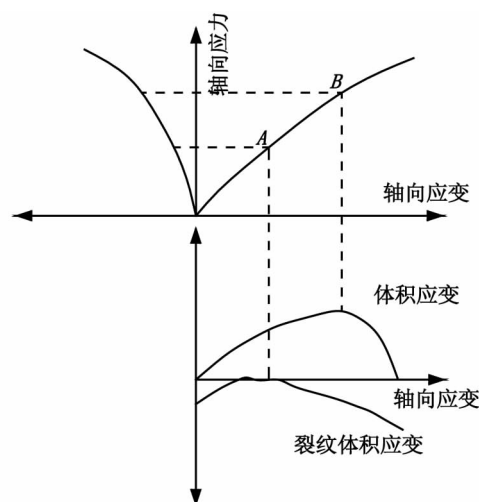


图2 裂纹起始应力与裂纹破坏应力取值示意图

Fig.2 Strength thresholds of crack initiation and crack damage

2 岩石渐进性破坏分析

2.1 应力及应变计算

裂纹应变模型算法广泛应用于岩石起裂强度的计算,计算公式为:

$$\varepsilon_{ve} = V_r / V_{\text{elastic}} = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = V_r / V \approx \varepsilon_x + 2\varepsilon_y \quad (2)$$

$$\varepsilon_{vc} = \varepsilon_v - \varepsilon_{ve} \quad (3)$$

式(1)-(3)中, ε_{ve} —弹性体积应变; V_r 、 V_{elastic} —试件体积、弹性体积;通过轴向应力应变曲线的弹性变形阶段可算得弹性模量 E 与泊松比 ν ; ε_v —总体积应变; ε_x 、 ε_y —环向应变,轴向应变; ε_{vc} —裂隙体积应变。

得到裂隙体积应变 ε_{vc} 后,绘得裂纹体积应变-轴向应变曲线示意图,如图2所示,图中A、B点分别对应裂纹起始应力与裂纹破坏应力。在弹性阶段并未发生变形膨胀,固裂纹体积-应变曲线在该阶段没有明显变化,接近水平线段;当裂纹萌生扩展时,裂纹体积应变开始膨胀,故A点对应为裂纹起始应力,体积应变的拐点B点对应为裂纹破坏应力。得到各组试样应力门值结果如表1所示:

表1 不同围压下应力门值

Tab.1 Strength thresholds under different confining pressure

围压/MPa	σ_f /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{ci}/σ_f	σ_{cd} /MPa	σ_{cd}/σ_f
3	144.7	54.9	0.38	108.5	0.75
12	165.8	69.6	0.42	121	0.73
17	200.4	70.1	0.35	128.2	0.64
22	226.5	104.1	0.46	154	0.68

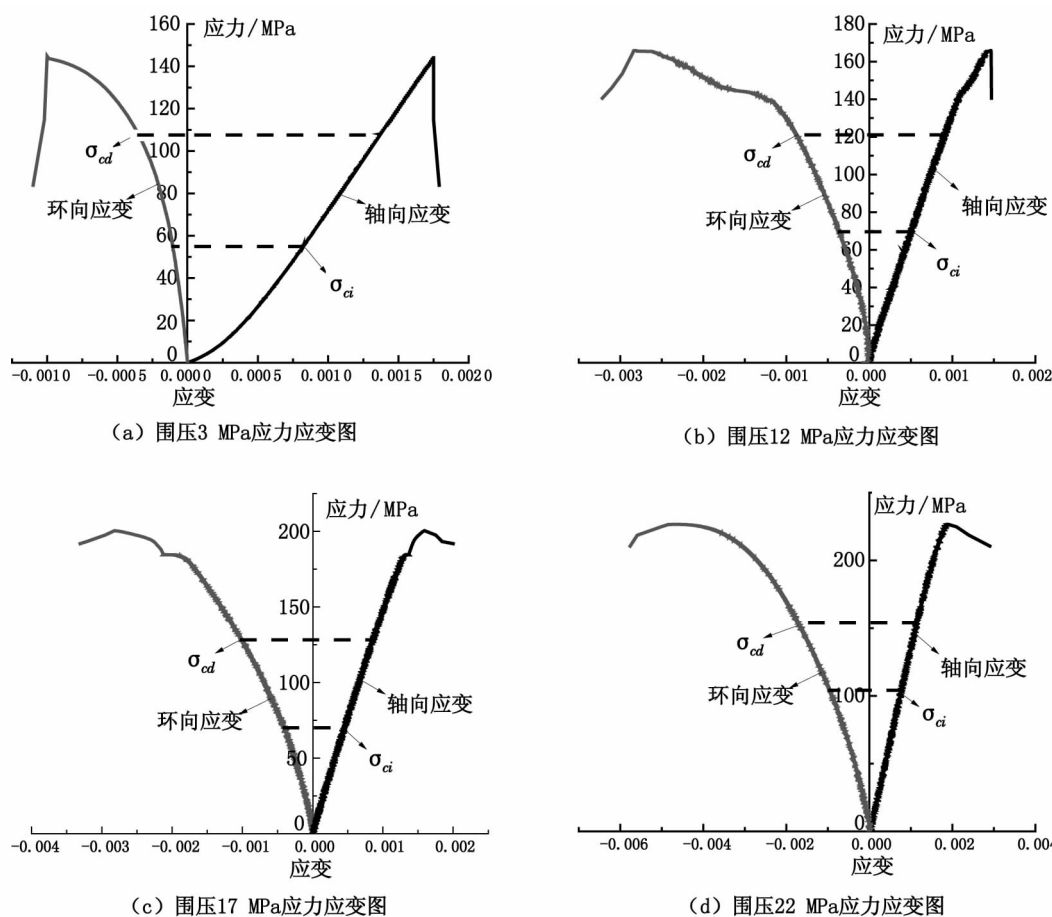


图3 环向-轴向应力应变图
Fig. 3 Circ-axial stress-strain curve

2.2 围压对应力门槛值的影响

在围压作用下,通过轴向应力应变曲线很难找到对应应力门槛值的拐点,通过裂纹体积应变-轴向应变曲线得到相应的应力门槛值后,然后绘出环向-轴向应力应变曲线来反映应力门槛值更加直观,如图3(a)~(d)所示:

岩石加载至破裂经历以下阶段:微裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙发生与扩展阶段、裂纹不稳定扩展至破裂阶段。裂纹起始应力标志着裂隙发生与扩展阶段的开始,裂纹破坏应力标志着裂纹不稳定扩展阶段的开始。围压对岩石的应力门槛值的影响是显著的,为进一步反映三轴压缩下茅口灰岩的围压效应,采用 origin 软件对表1所得数据进行曲线拟合,采用单一变量法只改变围压,得出裂纹起始应力 σ_{ci} 、裂纹破坏应力 σ_{cd} 与围压强度 C 的拟合结果依次为:

$$\sigma_{ci} = 59.361 - 1.561C + 0.157C^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{cd} = 110.751 - 0.952C + 0.130C^2 \quad (5)$$

裂纹起始应力 σ_{ci} , 裂纹破坏应力 σ_{cd} 与围压

强度 C 数据点及其拟合曲线如图4所示:

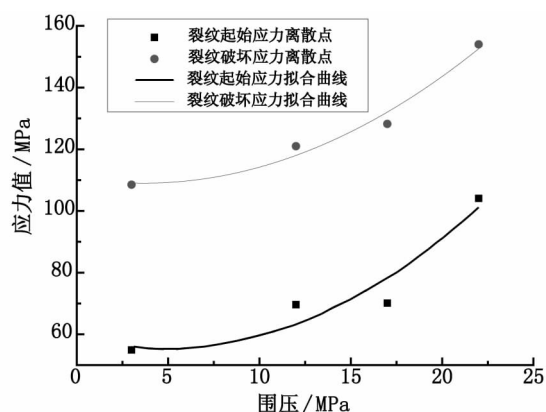


Fig. 4 Fitting curve of strength thresholds of crack initiation and crack damage

拟合的相关性系数分别为 0.82 和 0.93, 拟合度较高, 能较好的反映裂纹起始应力、裂纹破坏应力随围压增大而增大的趋势, 当围压超过 17 MPa 时, 裂纹起始应力、裂纹破坏应力分别增加 48.5% 和 20.1%, 说明当围压超过 17 MPa 时, 茅口灰岩延性显著增强。

表2 不同围压下应变率

Tab.2 Strain rate under different confining pressure

围压/MPa	环向应变			轴向应变		
	σ_{ci}	σ_{cd}	σ_f	σ_{ci}	σ_{cd}	σ_f
3	-1.1×10^{-4}	-3.6×10^{-4}	-1×10^{-3}	8.2×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.8×10^{-3}
12	-3.6×10^{-4}	-8.8×10^{-4}	-2.8×10^{-3}	5×10^{-4}	9×10^{-3}	1.5×10^{-3}
17	-4×10^{-4}	-1×10^{-3}	-2.8×10^{-3}	4.5×10^{-4}	8.6×10^{-3}	1.6×10^{-3}
22	-9.6×10^{-4}	-1.7×10^{-3}	-4.9×10^{-3}	7.8×10^{-4}	1.2×10^{-3}	1.9×10^{-3}

由表1和图4可知, σ_{ci}/σ_f 值一直稳定在0.4附近,一般认为,在单轴条件下裂纹起始应力约为峰值的0.4,说明围压对 σ_{ci}/σ_f 值影响较小,与单轴压缩条件下相近。 σ_{cd}/σ_f 值为0.75~0.64,呈递减趋势。一般认为,在单轴条件下裂纹起始应力约为峰值的0.8,说明围压对 σ_{cd}/σ_f 值影响较大,随围压增大试样比单轴压缩条件下更早进入裂纹不稳定扩展阶段。

2.3 围压对应变值的影响

通过数据采集系统得到裂纹起始应力、裂纹破坏应力、峰值所对应的环向、轴向位移,换算成应变后制得表2。

(1)轴向应变:由表2分析可知,四组试样轴力加载至裂纹起始应力时,随着围压增大,试样轴向应变值逐渐减小。由图1看出,轴向应变曲线上阶段斜率逐渐增加,说明弹性模量逐渐增大;轴力加载至裂纹破坏应力时,试样轴向应变值稳定在 1.0×10^{-3} 附近,轴力加载至峰值时,试样轴向应变值稳定在 1.7×10^{-3} 附近,即轴向应变没有进一步增加,试样内部横向裂纹没有进一步扩展。

(2)环向应变:由表2分析可知,当围压由3 MPa逐级加至22 MPa,四组试样轴力加载至裂纹起始应力时,环向应变由 -1.1×10^{-4} 增大到 -9.6×10^{-4} ,增大8.7倍;轴力加载至裂纹破坏应力时,试样的环向应变由 -3.6×10^{-4} 增大到 -1.7×10^{-3} ,增大4.7倍,轴力加载至峰值时,环向应变由 -1×10^{-3} 增大至 -4.9×10^{-3} ,增大4.9倍。由图1看出,环向应变曲线上阶段斜率逐渐减小,环向应变明显增大,这是岩石塑性不断增大,脆性减弱,延性加强的表现。当轴力超过裂纹破坏应力时,试样进入裂隙不稳定发展阶段,此阶段试样抵抗变形能力降低,环向应变增大2.7~3.2倍,显著增加,图3中环向应变的拐点能较好的反映裂纹破坏应力取值区间。

3 结论

1)随着围压的增大,应力门槛值均呈非线性增长态势,当围压超过17 MPa时,裂纹起始应力、

裂纹破坏应力分别增加48.5%和20.1%,茅口灰岩延性开始增强。

2) σ_{ci}/σ_f 值较单轴条件下相近,为0.35~0.46, σ_{cd}/σ_f 值较单轴条件下偏小,为0.64~0.75,在围压作用下,试样裂隙不稳定发展阶段更长,围压对试件内部的裂隙扩展、搭接有明显的约束作用。

3)环向应变值随围压增大而增大,当轴力超过裂纹起始应力进入裂隙稳定发展阶段,环向应变增大1.8~3.3倍,当轴力超过裂纹破坏应力进入裂隙不稳定发展阶段,环向应变增大2.7~3.2倍,用环向-轴向应力应变曲线图能较好的反映岩石应力门槛值。

参考文献:

- [1] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: part 2. microscopic observations and interpretation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(3): 513 - 545.
- [2] 周建超,贾纯驰,吕建国. 含预制裂纹的脆性岩石单轴压缩下渐进性破坏过程的试验研究[J]. 探矿工程, 2012, 39(9): 66 - 70.
- [3] 周辉,孟凡震,卢景景,等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 913 - 925.
- [4] 张晓平,王思敬,韩庚友,等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究—以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(9): 1772 - 1781.
- [5] 田勇,俞然刚. 不同围压下灰岩三轴压缩过程能量分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 118 - 129.
- [6] 李英杰,张顶立,宋义敏,等. 软弱破碎深埋隧道围岩渐进性破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1138 - 1147.
- [7] 梁昌玉,李晓,王声星,等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1830 - 1838.
- [8] 王洪亮,范鹏贤,王明洋,等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1340 - 1346.
- [9] 徐洪宇,赖远明,喻文兵,等. 人造多晶冰三轴压缩强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1120 - 1126.

(责任编辑 王利君)