

渗透压作用下茅口灰岩强度特性

王亚, 王文, 赵延林, 罗世林, 唐劲舟

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
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: 矿山岩体受力复杂, 且常处于渗流场中。本文以渗透压作用下茅口灰岩强度试验为基础, 研究了不同围压渗透压作用下茅口灰岩的强度特性, 分析了渗透压对岩石峰值强度、起裂强度和损伤强度影响, 通过引用孔压弱化系数, 提出考虑考虑渗透水压影响的非线性强度准则, 并对新准则和其他强度准则进行比较分析, 验证了新准则的科学性与合理性。

关键词: 强度准则; 茅口灰岩; 孔压弱化系数; 渗透水压

中图分类号: TD313.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)04-0063-05

Research on mechanical test of Maokou limestone under osmotic pressure

WANG Ya, WAN Wen, ZHAO Yanlin, LUO Shilin, TANG Jingzhou

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The stress acted on mine rock mass stress is complex, and often in the seepage field. Based on the strength test of Maokou limestone, strength characteristics of them which are under different osmotic pressure are studied, and the impact of osmotic pressure on peak strength, splitting strength, and damage strength is analyzed. The rock strength criterion which considered osmotic pressure is proposed, and the comparison of new strength criterion with others is conducted, which has verified the scientificity and rationality of the new guidelines.

Key words: strength criterion; Maokou limestone; attenuation coefficient of pore pressure; osmotic pressure

复杂应力状态下岩石强度变形特征是矿业工程研究中基础性课题,也是学者们致以研究的热点问题之一。强度理论研究发展至今已有较为丰硕的成果,应用比较广泛的有 Mohr - Coulomb 强度理论、Griffith 强度理论、Hoek - Brown 强度理论等。但各强度理论均基于一定假设条件下提出,有一定的应用条件和使用范围。因此,需要对岩石强度准则进行深入研究,提高矿山岩体实际环境的描述精度,分析其适用性,确保各复杂条件下岩石应用的强度准则的科学性、合理性。黄书岭等^[1]通过建立广义双曲线型破坏函数和八面体偏平面上光滑角隅型破坏函数,提出非线性广义多轴应变能强度准则;陈卫忠等^[2]在大理岩强度试验基础上提出一种幂函数型 Mohr 强度准则;尤明庆^[3]基于多种岩石数据研究了 6 种常规三轴强度准则;张后全^[4]从弹性能角度出发建立了可考虑中间主应力对岩石破坏弹性能释放影响的真三轴能量强度准则。矿山岩体受力复杂,且常处于地下水压中,如复杂条件下的水工巷道、水电坝站、地下能源储存库等,现有强度准则中,多基于三轴受力情况下岩体力学性质提出,对考虑渗透水压作用的强度准则少有研究,研究考虑渗透水压作用的强度准则在理论创新和实际工程应用都有着重要意义。本文在已提出的强度准则基础上,基于渗透压作用下的茅口灰岩强度试验,研究渗透压作用下强度特性,并提出考虑渗透水压影响的非线性强度准则。

收稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174088); 湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S140002)

通信作者: 王文(1968-),男,湖南衡阳人,博士,教授,研究方向: 岩石力学。E-mail: wanwen68@163.com

1 渗透压作用下茅口灰岩破坏强度

1.1 渗透压作用下的茅口灰岩强度试验

试验采用茅口灰岩取自湖南宁乡煤炭坝. 根据国际岩石力学学会推荐的标准, 制备茅口灰岩的标准柱状样, 尺寸 50 mm × 100 mm (直径 × 高度). 试验采用 MTS815 多功能岩石试验机, 试验过程中, 预先设置一轴压值, 加载围压至试验预设值. 当应力达到预设值时, 轴向加载系统和围压系统都采用应力方式控制, 利用孔隙加载系统在岩样上下两端施加孔隙水压力 $P_1 = P_2 = 0.2$ MPa, 然后突然增加下端的孔隙水压力, 使岩样上下两端形成孔隙压差 ΔP . 形成渗流场后, 采用应力控制方式加载, 直至试件破坏. 共 23 组试验, 方案如下:

1) 0, 3, 7, 12, 17, 22 MPa 围压条件下, 茅口灰岩抗压强度试验;

2) 在 3, 7, 12, 17, 22 MPa 各级围压条件下分别加载 2, 5, 8, 11, 14 MPa 孔隙水压的茅口灰岩抗压强度试验. 为保证热缩管不被水压撑破, 试验均在孔隙水压小于围压下进行.

1.2 岩石渐进破坏规律

现有研究成果表明脆性岩石应力 - 应变曲线可分为 5 个阶段, 图 1 为典型岩石应力应变曲线图. 阶段 I 为岩石原生裂纹的压缩闭合阶段, 该阶段应力阈值为裂纹闭合应力 σ_{cc} , 它取决于已有的裂纹密度、形态以及所处的应力条件; 阶段 II 为线弹性变形阶段, 应力 - 应变曲线呈线性关系; 阶段 III 为裂纹的稳定扩展阶段, 进入该阶段的应力阈值为起裂强度 σ_{ci} , 当轴向应力增大到岩石的起裂强度时, 岩石内部出现新生微裂纹, 并且微裂纹稳定扩展, 若保持荷载不变, 裂纹维持在当前状态不会继续扩展; 阶段 IV 为裂纹的非稳定扩展阶段, 进入该阶段的应力阈值为损伤强度 σ_{cd} (又称为扩容应力), 此时岩石内部出现贯通的裂纹, 岩石体积开始膨胀, 出现体积扩容现象; 阶段 V 峰后应变软化阶段, 随着轴向应力的进一步增大, 岩石达到承载极限即峰值强度 σ_f 而破坏, 岩石出现宏观贯通裂纹.

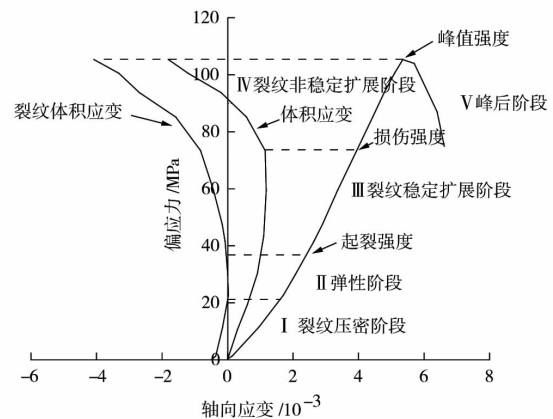


图 1 岩石应力应变曲线

起裂强度和损伤强度是划分岩石破坏过程的 2 个重要指标, 它们的确定方法主要有: 裂纹应变模型算法^[5]、声发射试验确定法^[6]、移动点回归法^[7]. 本文采用由 C. D. Martin^[5]提出的裂纹应变模型法计算岩石的起裂强度.

1.3 茅口灰岩渗透压强度效应

渗透压作用下茅口灰岩三轴试验结果如表 1.

表 1 茅口灰岩渐进破坏指标

围压/MPa	渗压/MPa	σ_{ci}/MPa	σ_{cd}/MPa	$(\sigma_{cd}/\sigma_{ci})/\%$	σ_{cd}/MPa	$(\sigma_{cd}/\sigma_{ci})/\%$
4	0	145	51	35.17	102	70.34
	2	119	31	26.05	95	79.83
7	0	172	85	49.20	140	81.40
	2	156	57	36.80	131	83.97
	5	140	41	29.20	102	72.86
12	0	201	74	37.00	171	85.07
	2	192	68	35.42	155	80.73
	5	170	54	31.76	130	76.47
	8	150	50	33.33	114	76.00
	11	137	46	33.58	89	64.96
17	0	221	113	51.00	162	73.30
	2	205	100	48.78	155	75.61
	5	197	95	48.22	143	72.59
	8	188	93	49.47	120	63.83
	11	177	82	46.33	106	59.89
	14	160	77	48.13	103	64.38

表 1(续)

围压/MPa	渗压/MPa	$\sigma\sigma_f/\text{MPa}$	$\sigma\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$(\sigma_{ci}/\sigma_f)/\%$	$\sigma\sigma_{cd}/\text{MPa}$	$(\sigma_{cd}/\sigma_f)/\%$
22	0	245	103	42.00	186	75.92
	2	232	94	40.52	174	75.00
	5	230	87	37.83	149	64.78
	8	223	82	36.77	145	65.02
	11	218	80	36.70	133	61.01
	14	206	74	35.92	137	66.50
	17	195	71	36.41	145	74.36

1) 渗透压对峰值强度影响

各级围压作用下茅口灰岩峰值强度随孔压变化关系如图 2。试验结果表明相同围压作用下,茅口灰岩强度特性具有明显的孔压效应,即随孔压的增大,峰值强度减少。由图 2 可知,在围压 22 MPa 下压条件下,孔压从 2 MPa 增至 17 MPa 时,岩石峰值强度由 232 MPa 减少到 195 MPa,减少 37 MPa,峰值强度减少了 16%。在围压 12 MPa 条件下,围压从孔压从 2 MPa 增至 11 MPa 时,岩石峰值强度由 192 MPa 增至 137 MPa,增幅达 55 MPa,峰值强度增加了 28.6%。同时随着各级围压的增大,强度与孔压的变化速率逐渐减小,即围压可弱化孔压对岩石峰值强度的影响,这是由于高围压促使岩石内部裂隙闭合更为紧密,孔隙水流入岩石内部通道减少,使部分水压仅作为外部荷载作用于岩石端部,增加了岩石有效应力,故而弱化了孔压对强度的影响。

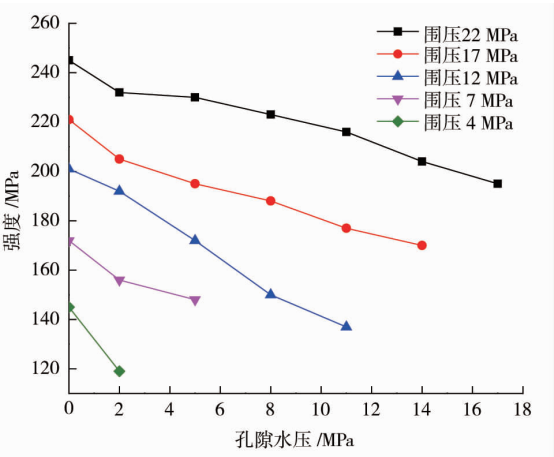


图 2 孔隙水压强度效应

2) 渗透压对起裂强度、损伤强度影响

从表 1 可以得出,起裂应力与峰值应力的比值在 26.05% ~ 51% 之间,与前人对脆性岩石干燥情况下起裂强度的拟合结果 0.3 ~ 0.5 倍峰值强度接近。岩石损伤强度与峰值应力的比值在 59.89% ~ 85.07% 之间,稍低于一些学者^[8,9]试验得出的 70% ~ 85% 的水平。这是由于应力在到达其起裂强度之前,岩样中仅含有少量原生微裂纹且多为闭合状态,其有效应力系数较小,渗压对其力学行为影响较小;然而,应力超过起裂强度后,新裂纹萌生并扩展,其有效应力系数急剧增大,渗压对其力学性质具有明显的弱化效应,从而加快了裂纹的扩展速度^[10],使得稳定扩展阶段缩短。在同一围压作用下,随孔隙水压的增大,岩石起裂强度和损失强度表现出逐渐减少的倾向。由于原始裂纹的存在,在水压作用下水流进入岩石内部,改变其内部结构,加速裂纹的扩展,使岩石提前达到损伤强度,进入裂纹不稳定扩展阶段。

1.4 孔压弱化系数

为研究相同围压作用下孔隙水压对岩石强度的弱化程度,本文引入孔压弱化系数 λ , 定义为

$$\lambda = \frac{\sigma_{fw}}{\sigma_f} \tag{1}$$

式中, σ_{fw} : 孔压作用下岩石峰值强度; σ_f : 无水压作用时峰值强度。

图 3 给出了孔压弱化系数和孔隙水压力的关系,由图孔压看出:作用相同围压时,随着孔压增大,孔压弱化系数减小,即对岩石强度弱化程度越高,两者呈负相线性关系,拟合方程和相关参数见表 2。同时在同一孔压下,随着围压增大, λ 呈逐渐增大的趋势,即围压可减少孔压对岩石的弱化程度。

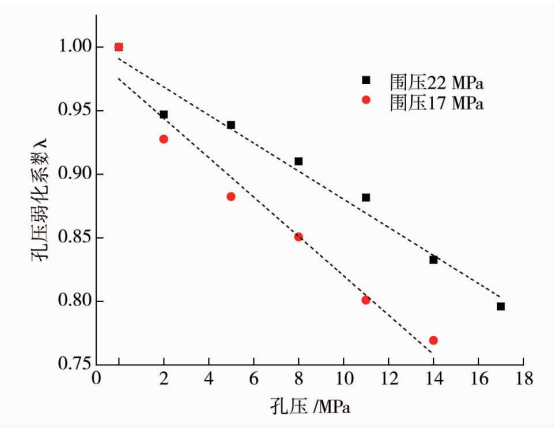


图 3 λ - P 关系和拟合曲线

表 2 孔压和弱化系数 λ 拟合方程

围压/ MPa	拟合方程	系数 a	系数 b	R ²
22	$\lambda = \frac{\sigma_{fw}}{\sigma_f} = aP + b$	0.990 84	-0.011 05	0.965 68
17		0.975 06	-0.015 49	0.955 74

2 考虑渗透压作用的岩石强度准则

基于前文进行的单轴抗压试压和不同围压不同水压下的三轴抗拉试验结果,运用几种常用的强度准则对试验结果进行拟合分析,探讨渗透压作用下各强度准则的适用性.本文定义了孔压弱化系数 λ,在此结合茅口灰岩单轴抗压和水压作用下三轴抗压试验数据,引用孔压弱化系数 λ,提出 2 种可以考虑渗透压作用的非线性强度准则,并将 2 种准则的拟合效果进行分析研究.

考虑渗透压作用的强度准则形式为

$$\sigma_1 = m(\lambda \sigma_3)^n + \sigma_c.$$
 (2)

式中,m,n:与岩石材料相关的参数;λ:孔压弱化系数;σ_c:岩石单轴抗压强度.本文对考虑渗透水压作用的强度准则进行拟合分析,拟合图见图 4 和图 5,拟合结果如表 3.

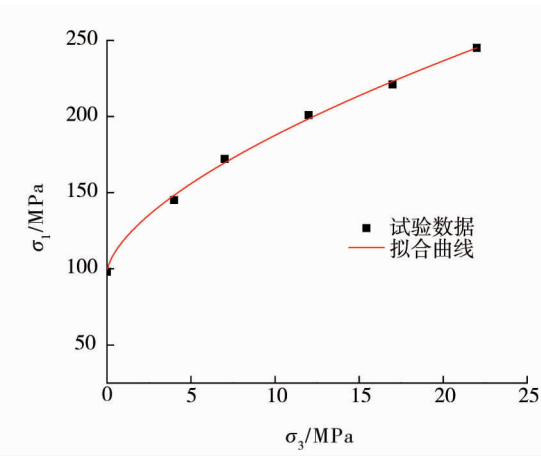


图 4 新强度准则拟合结果图(0 MPa 渗透压)

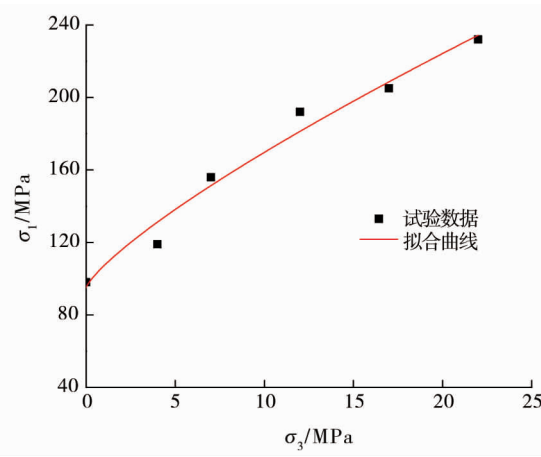


图 5 新强度准则拟合结果图(2 MPa 渗透压)

表 3 考虑渗透水压作用的强度准则拟合结果

水压/MPa	拟合结果	R ²	λ	计算抗压
0	$\sigma_1 = 21.32\sigma_3^{0.625} + 97.54$	0.999 0	1.00	97.54
2	$\sigma_1 = 12.76(0.93\sigma_3)^{0.79167} + 96$	0.961 3	0.93	96.00
5	$\sigma_1 = 6.72(0.87\sigma_3)^{1.0056} + 98.19$	0.998 8	0.87	98.19
8	$\sigma_1 = 2.10(0.84\sigma_3)^{1.40405} + 97.78$	0.996 8	0.84	97.78

由表 3 和图 4 和图 5 可知,新强度准则较好的反映了渗透水压作用下岩石的非线性力学特性.

2.2 强度准则的比较与分析

运用摩尔库伦准则、Hoek – Brown 准则和本文新建立的强度准则对渗透压作用下的茅口灰岩强度试验结果进行拟合分析,表 4 为茅口灰岩各强度准则拟合结果.由表可知,摩尔库伦准则预测的茅口灰岩抗压强度为 103.21 MPa,比试验值 98 MPa 偏高 5 MPa,本文强度准则和 Hoek – Brown 准则预测的抗压强度值一致,为 96 MPa,比试验值 98 MPa 偏低 2 MPa,与实际结果较为接近.

表 4 茅口灰岩各强度准则拟合结果

准则形式	拟合结果	R ²	计算抗压
本文强度准则	$\sigma_1 = 12.76(0.93\sigma_3)^{0.79167} + 96$	0.961 3	96
摩尔库伦准则	$\sigma_1 = 6.17\sigma_3 + 103.21$	0.956 1	103
Hoek – Brown 准则	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{51.54\sigma_c\sigma_3 + 2.39\sigma_c^2}$	0.967 2	96

图6为渗透压2 MPa下3种强度准则的拟合曲线。3种强度准则拟合结果均较好,相关系数达95%以上。直线型的摩尔库伦准则有明确的物理背景,各参数物理意义明确,但拟合偏差较大,计算出的单轴抗压强度值也较试验值偏高,故不能较好的预测渗透压作用下茅口灰岩的强度特性;Hoek - Brown 准则与本文强度准则拟合曲线基本重合,与试验数据点较为接近,但 Hoek - Brown 准则拟合参数 m 的值为 51.54, s 的值为 2.39,这超出了所定义的参数范围($1 \times 10^{-7} < m < 25, 0 < s < 1$),与实际物理意义不吻合。新准则各参数物理意义明确,拟合效果优良,且 $n = 1, \lambda = 1$ 时,蜕化成直线型摩尔库伦准则,变参数 n 与 λ 可更大程度模拟岩石的非线性强度特性,将计算的抗压强度值

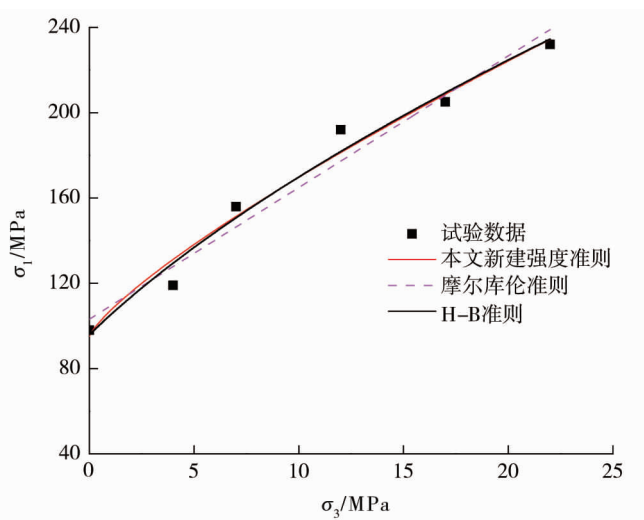


图6 茅口灰岩强度准则拟合图

与试验值相比,发现二者吻合良好,可以看出新准则在渗透压作用下强度计算有较高的可信度。综上,本文所建立的强度准则能较好的反映渗透压作用下岩石的强度特性。

3 结论

1) 孔压增大,岩石峰值强度、起裂强度、损伤强度均随之降低。渗透压多岩石强度存在弱化作用。

2) 基于渗透压作用下的茅口灰岩三轴试验数据,提出考虑渗透压作用的非线性强度准则。将新准则应用于试验数据拟合中,结果表明渗透压作用下岩石表现出的非线性特性与新准则所反映的非线性特性有很好的吻合。

3) 将新准则与其它常用准则对试验数据进行拟合,拟合结果表明,新准则比摩尔库伦准则和 Hoek - Brown 准则更好的反映了渗透压作用下岩石的强度特性。

参考文献:

- [1] 黄书岭,冯夏庭,张传庆. 脆性岩石广义多轴应变能强度准则及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1): 124 - 134.
- [2] 陈卫忠,刘豆豆,杨建平,等. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11): 2214 - 2220.
- [3] 尤明庆. 岩石强度准则的数学形式和参数确定的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11): 2172 - 2184.
- [4] 张后全,徐建峰,贺永年,等. 脆性岩石真三轴能量强度准则研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(4): 564 - 570.
- [5] Martin C D. The strength of massive Lac du bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1993.
- [6] Goktan R M, Yilmaz N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005,105:727 - 733.
- [7] 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.
- [8] Schulze O, Popp T, Kern H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. Engineering Geology,2001, 61(3):163 - 180.
- [9] Snow D T. Rock fracture spacings, openings, and porosities[J]. J Soli Meeh,1968(4):73 - 79.
- [10] 姜振泉,季梁军,左如松,等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. 岩石力学与工程学报,2002, 21(10):1442 - 1446.