

赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究

周宏伟^①, 谢和平^{①②}, 左建平^①, 杜盛浩^①, 满轲^①, 严春野^①

① 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

② 四川大学, 成都 610065

E-mail: zhw@cumt.edu.cn

2010-07-24 收稿, 2010-09-27 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB201201)、国家自然科学基金(50674092, 50221402)和科技部国际科技合作项目(2007DFB60100)资助

摘要 研究赋存深度对岩石物理力学参数的影响, 对于认识深部岩体变形破坏规律, 以及分析深部工程灾害事故机理具有十分重要的意义. 通过在北京门头沟矿区大台井同一岩层进行现场取样, 获得了赋存深度处于 410~1010 m 的 7 个深度水平上的同一层玄武岩, 将其加工成 77 个标准试件(其中单压 21 个、三轴 35 个、劈裂 21 个), 借助 MTS815 和 RMTS150 岩石力学实验系统, 分别进行了单轴压缩、三轴压缩和巴西劈裂实验, 获得了玄武岩密度、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等基本岩石物理力学参数随赋存深度的变化规律. 研究发现, 统计意义上玄武岩密度、弹模、单拉强度、单压强度、黏聚力、内摩擦角随赋存深度的增大而线性增加, 仅泊松比随深度增加而线性减小. 另外, 还简要分析了造成不同深度同一岩层物理力学参数差异的原因.

关键词

赋存深度
力学参数
玄武岩
实验研究

随着矿产资源开采深度的不断增加, 工程灾害日趋增多, 与深部开采相关的岩石力学问题已成为国内外学者研究的热点, 并取得了大量研究成果^[1]. 深部开采条件下, 岩石的基本力学性能(如变形特征、破坏特征、强度特性等)与浅部岩石有明显差异, 因受到高地温、高应力和高渗压的共同影响, 岩石的力学行为更加复杂, 而且一些基本的物理力学参数, 如弹性模量、泊松比等也随埋深的增加而变化. 因此研究深部开采条件下的岩石力学行为, 尤其是岩石基本物理力学参数随赋存深度的变化规律, 具有十分重要的意义.

赋存深度对岩石力学行为的影响研究主要集中在岩石变形性质、强度特性和破坏特征等方面. 岩石脆-延性转化的发现是围压升高导致岩石变形性质改变的最重要进展之一. 实验研究表明, 在较低围压下表现为脆性的岩石可以在高围压下转化为延性^[2~4], Singh^[5]根据大量实验结果, 提出了一个基于应力和强度关系的脆-延转化条件. 深度对岩石强度的影响

十分显著, 总体上岩石的强度随深度的增加而有所提高^[6], 如有的矿区从深度小于 600 m 变化到 800~1000 m 时, 单压强度为 21~40 MPa 的岩石所占的比重从 30%减少到 24%, 而强度为 81~100 MPa 的岩石的比重则从 5.5%增加到 24.5%. 姜晨光等人^[7]通过实验也发现花岗岩的弹模、抗压强度、抗拉强度都随岩体赋存深度的增大而增大. Shimada 和 Liu^[8]根据实验发现, 在 200~280℃和不同围压的条件下, 花岗岩具有较低的强度值, 据此提出了地壳强度的圣诞树结构模型. 浅部岩石强度理论是以摩尔-库仑准则为代表的线性破坏准则, 而深部高地应力下则更多地采用了非线性强度准则, 如 Hoek-Brown 强度准则^[9]及其更一般形式的推广^[10]. 随着开采深度的增加, 岩石破坏机理也随之发生变化, 根据 Cleary 的研究, 发现岩石由浅部的脆性能或断裂韧度控制的破坏转化为深部开采条件下由侧向应力控制的断裂生长破坏, 即由浅部的动态破坏转化为深部的准静态破坏, 以及由浅部的脆性力学响应转化为深部的潜在的延性

行为力学响应^[11]。与此观点相反, Wagner^[12]和 Gibowicz 等人^[13]认为深部岩体的破坏更多地表现为动态的突然破坏,即岩爆或矿震。此外, Gercek^[14]对泊松比的研究、仵彦卿^[15]通过室内三轴实验发现岩石孔隙率随地层深度增加(应力增大)而逐渐减小的结论,也具有重要意义。

总之,关于赋存深度对岩石物理力学行为的影响研究,国际上常用的方法是在实验室通过围压、升温装置来模拟深部岩石所处环境,从而获得不同深度条件下岩石的物理力学特性。实验室再现深度的影响虽然具有重要意义,但仍与实际情况有一定差异。本文的出发点是研究不同深度下同一岩层,通过真实情形来研究赋存深度对岩石物理力学性质的影响,通过对不同赋存深度下的同一岩石(玄武岩)在相同实验条件下进行密度测试、单轴压缩实验、劈裂实验、三轴压缩实验,系统研究玄武岩在不同赋存密度的密度、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、三轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角、弹性模量、泊松比等物理力学参数的变化规律。

1 实验

1.1 取样与试样准备

实验所用的岩石取自北京门头沟区大台煤矿大台井田,为南大岭组玄武岩。该岩层是基性喷出岩,具有块状构造,颜色为灰黑色,形成于中生代早侏罗世,距今 180~200 Ma。取样岩层的赋存深度分别为 410, 510, 610, 710, 810, 910, 1010 m。

实验按照国家标准“工程岩体试验方法标准: GB/T50266-99”的规定。单轴压缩实验、三轴压缩实验所用的岩样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$, 劈裂实验所用的试件尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times H25 \text{ mm}$ 。单轴压缩实验每个深度准备 3 个标准试件, 7 个深度共 21 块岩样, 编号分别为 UC410-1, UC410-2, UC410-3, UC510-1, … UC1010-2, UC1010-3。劈裂实验即巴西法, 每个深度准备 3 个试件, 7 个深度共 21 块岩样, 编号分别为 B410-1, B410-2, B410-3, B510-1, … B1010-2, B1010-3。假三轴压缩实验每个深度准备 5 个标准试件, 围压分别为 5, 10, 20, 30, 40 MPa, 7 个深度共 35 块岩样, 编号分别为 CTC410-1, CTC410-2, CTC410-3, CTC410-4, CTC410-5, CTC510-1, … CTC1010-4, CTC1010-5(编号中 UC 表示单压、B 代表巴西劈裂、CTC 表示假三

轴, 数字表示埋深(m)以及岩样序号)。

1.2 实验设备

单轴压缩实验和三轴压缩实验采用 MTS 程控伺服高温高压破坏力学实验系统, 设备型号为 MTS815 Flex Test GT(图 1)。劈裂实验采用 RMTS150 型程控伺服混凝土与岩石力学实验系统(图 2)。

1.3 实验过程

(i) 单轴压缩实验。单轴压缩实验采用 $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 自然风干试样, 在室温条件下进行。实验前先对岩样覆盖一层热熔胶膜, 以免试件破裂时崩坏环向引伸计。实验时将岩样置于承压板中心, 固定岩样(图 3), 然后在试件上安放环向引伸计和轴向引伸计, 将轴向变形、环向变形、加载轴位移清零。加载过程中, 首先采用力控制的方式加轴向荷载



图 1 MTS815 Flex Test GT 岩石力学实验系统

技术指标: 轴向荷载, 0~4600 kN(压缩)、0~250 kN(拉伸); 轴向位移, 0~100 mm($\pm 50 \text{ mm}$); 轴向应变, -2.5 (拉伸)~ $+5$ (压缩); 横向应变, -2.5 (压缩)~ $+8$ (拉伸); 围压, 0~140 MPa; 测量精度, 误差为示值的 0.5%



图 2 RMTS150 型程控伺服混凝土与岩石力学实验系统

技术指标: 最大轴(切)向荷载, 1500 kN(压缩)、900 kN(拉伸); 轴(切)向伺服行程, 0~150 mm($\pm 75 \text{ mm}$)

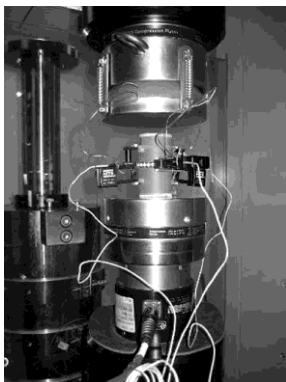


图 3 单轴压缩实验

(120 kN/min)到 150 kN 后,再采用环向位移控制(0.015 mm/min)加载直至岩样破坏,即将环向链条式位移传感器作为加载控制指标,可有效避免因轴向载荷控制而导致的试件突然横向爆裂。

(ii) 劈裂实验. 劈裂实验采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times H 25 \text{ mm}$ 自然风干试件,室温条件下进行. 实验前先通过岩样直径的两端,沿轴线方向画 2 条相互平行的加载基线. 调整好实验机加载垫条的位置,沿岩样的加载基线将岩样置于垫条上. 然后采用手动控制的方式给岩样加几千牛顿的初始荷载以固定岩样,关好防护门(图 4). 加载时采用力控制的方式施加轴向荷载(5 kN/min),直至岩样破坏。

(iii) 三轴压缩实验. 三轴压缩实验采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ 自然风干试件,室温下进行. 首先固定试件、安装环向引伸计和轴向引伸计(图 5),然后施加围压(3 MPa/min)到指定值,围压分别设置为 5, 10, 20, 30, 40 MPa. 将轴向变形、环向变形、加载轴位移清零,施加轴向荷载(120 kN/min)到 400 kN 后,转换轴向荷载控制为横向变形控制,再采用环向位



图 4 劈裂实验



图 5 三轴压缩实验

移控制(0.015 mm/min)继续加轴向荷载直至试件破坏,并进入残余强度阶段。

2 结果与分析

2.1 单轴压缩实验

对所有试件进行外形尺寸测量和称重实验,获得了不同深度下玄武岩的风干密度(图 6、表 1),可见玄武岩密度随赋存深度的增加而呈线性增大趋势. 单压载荷下,不同赋存深度玄武岩的应力-应变曲线及其对应的岩样破坏前后形态如图 7 所示. 可见,峰值载荷前,玄武岩应力-应变关系曲线表现为明显的线性弹性;峰值载荷后,则变形为明显的脆性破坏. 且随着赋存深度的增加,玄武岩的单轴抗压强度逐渐增加(图 8).

图 7 中,根据国际岩石力学学会(ISRM)推荐的方法进行弹性模量、泊松比估算,通过下式得到岩石的弹性模量和泊松比:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (1)$$

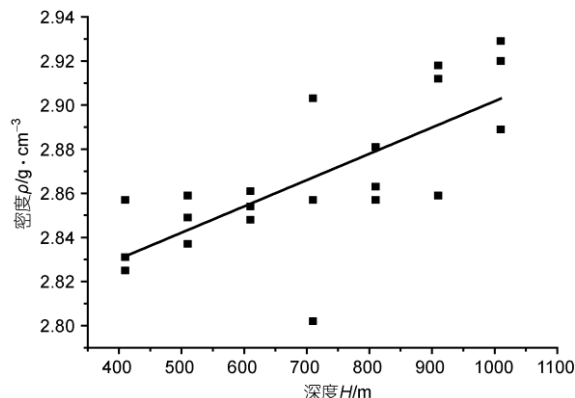


图 6 密度-岩样赋存深度曲线

表 1 单轴压缩实验数据

岩样编号	几何尺寸		质量/g	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	单压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
	高度/mm	直径/mm					
UC410-1	102.56	49.79	570.68	2.857	146	59.2	0.187
UC410-2	103.32	49.92	571.37	2.825	178	64.9	0.201
UC410-3	100.47	49.81	554.35	2.831	139	59	0.181
UC510-1	101.86	51.40	599.65	2.837	144	66.8	0.214
UC510-2	101.90	51.41	604.70	2.859	201	58.1	0.196
UC510-3	102.53	51.48	608.09	2.849	141	58.9	0.188
UC610-1	102.19	50.07	573.10	2.848	220	63.5	0.142
UC610-2	100.41	49.95	562.80	2.861	222	62.9	0.178
UC610-3	101.96	49.88	568.60	2.854	251	62.9	0.173
UC710-1	101.91	50.22	576.64	2.857	195	69.5	0.186
UC710-2	101.04	49.75	570.10	2.903	221	74.8	0.174
UC710-3	100.98	49.86	552.50	2.802	207	69.7	0.165
UC810-1	100.85	50.16	570.51	2.863	225	77	0.184
UC810-2	100.48	50.18	567.55	2.857	213	73.3	0.164
UC810-3	101.05	50.20	576.18	2.881	242	74.4	0.169
UC910-1	101.43	49.20	562.74	2.918	274	76.6	0.16
UC910-2	101.21	49.48	556.32	2.859	256	73.8	0.157
UC910-3	100.45	48.89	549.11	2.912	219	78.2	0.178
UC1010-1	102.27	49.78	581.22	2.920	263	81.3	0.154
UC1010-2	100.33	49.76	563.62	2.889	250	72.5	0.149
UC1010-3	100.38	49.80	572.79	2.929	300	77.1	0.177

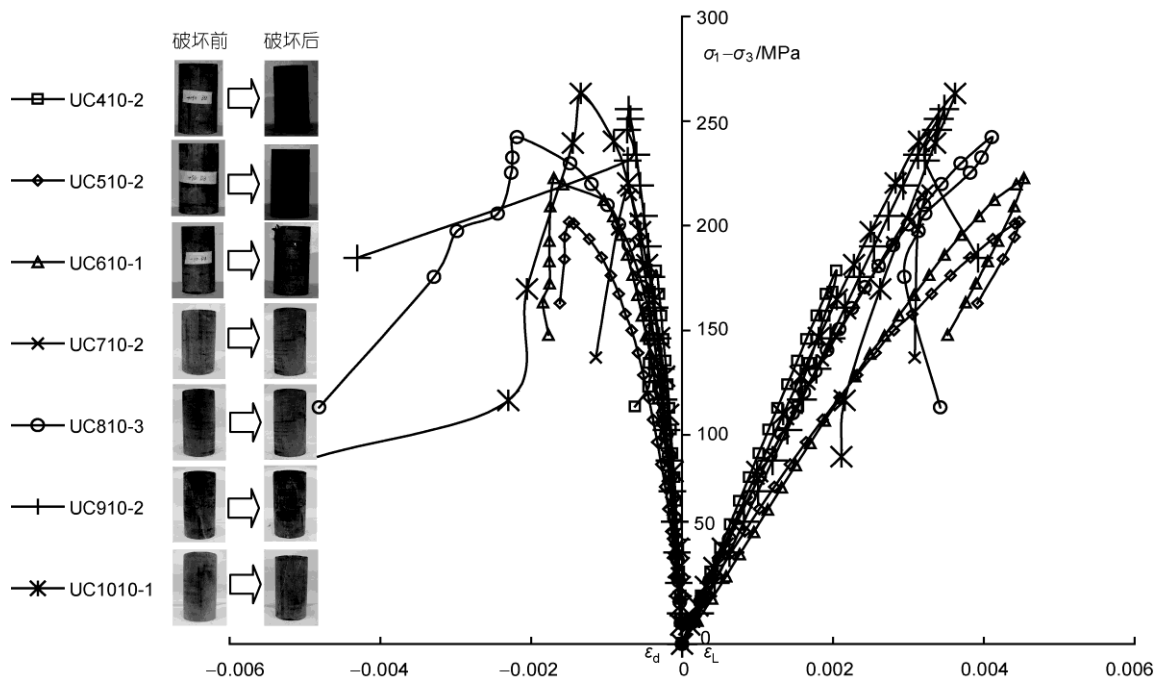


图 7 不同赋存深度下岩样应力应变曲线

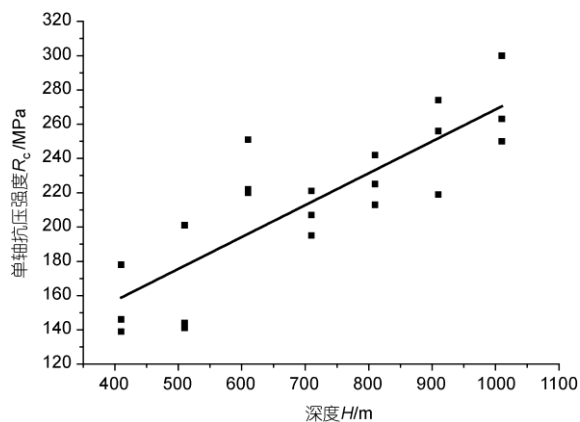


图 8 单轴抗压强度-赋存深度曲线

$$\nu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_L}, \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量, σ_1 和 σ_2 分别为应力应变曲线上直线的应力值, ε_1 和 ε_2 为与 σ_1 和 σ_2 对应的应变值, ν 为泊松比, ε_d 为横向应变, ε_L 为轴向应变。

根据实验数据可得到弹性模量、泊松比与赋存深度的关系曲线(图 9 和 10)。可见, 随着玄武岩赋存深度的增加, 岩石的弹性模量在增加, 而岩石的泊松比在减小。

2.2 劈裂实验

巴西劈裂实验得出的不同赋存深度玄武岩的峰值载荷如表 2 所示, 根据国际岩石力学学会推荐方法, 可通过下式估算劈裂强度:

$$R_t = \frac{2P}{\pi Dh}, \quad (3)$$

式中 R_t 为岩石抗拉强度(MPa), P 为岩样破坏荷载(N), D 为岩样直径(mm), h 为岩样厚度(mm)。

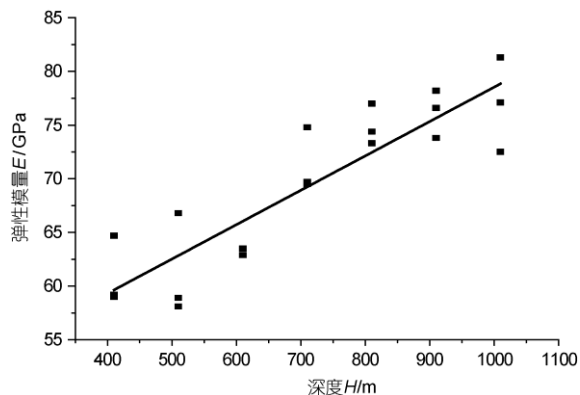


图 9 弹性模量-赋存深度关系曲线

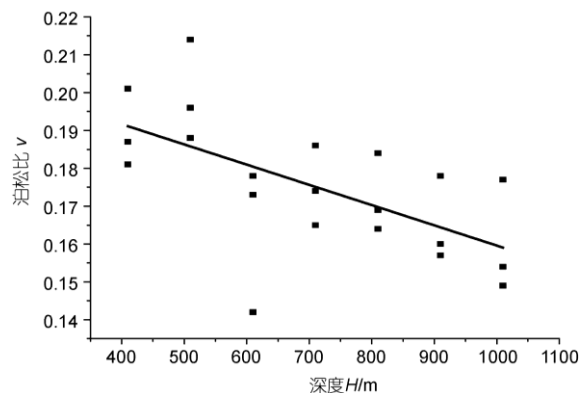


图 10 泊松比-赋存深度曲线

据此可得到玄武岩抗拉强度随赋存深度变化趋势(图 11), 可见每个深度的 3 个试件的平均强度随埋深的增加而线性增大。

2.3 三轴实验

共进行了 7 个赋存深度、每个赋存深度 5 个围压值的假三轴实验, 共 35 次实验。以深度 710 m 的 5 个假三轴实验为例, 不同围压下的应力-应变曲线及其对应岩样破坏前后形态如图 12, 峰值强度如表 3 所示。

基于三轴实验结果, 绘制相应的 Mohr 包络线, 结合单轴压缩实验和劈裂实验结果估算了岩石黏聚力 C 和内摩擦角 ϕ (表 3)。可见, 随着赋存深度的增加, 岩样的黏聚力 C 、内摩擦角 ϕ 也随之增大(图 13 和 14)。

根据实验结果, 得到相同围压 30 MPa 条件下, 不同赋存深度玄武岩的应力-应变关系曲线及岩样破坏形态(图 15)。发现随着赋存深度的增加, 岩石三轴抗压强度也增大, 且岩石的破坏形式有向延性破坏转化的趋势(图 15)。

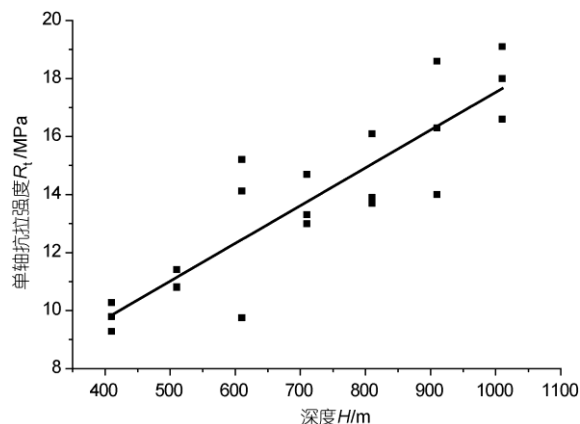


图 11 单轴抗拉强度-赋存深度曲线

表 2 劈裂实验数据

岩样编号	厚度/mm	直径/mm	峰值载荷/kN	单拉强度/MPa	平均单拉强度/MPa
B410-1	29.68	49.94	21.6	9.28	9.78
B410-2	29.56	49.93	22.7	9.79	
B410-3	30.65	49.95	24.7	10.27	
B510-1	30.25	51.45	27.9	11.41	11.01
B510-2	29.5	51.45	25.8	10.82	
B510-3	28.86	51.45	25.2	10.80	
B610-1	28.75	50.05	34.4	15.21	13.03
B610-2	28.45	50.25	21.9	9.75	
B610-3	29.96	49.96	33.2	14.12	
B710-1	23.64	50.21	24.80	13.3	13.7
B710-2	22.01	50.25	25.52	14.7	
B710-3	24.15	50.25	24.83	13.0	
B810-1	24.37	50.15	30.86	16.1	14.5
B810-2	23.89	49.91	25.57	13.7	
B810-3	23.26	49.91	25.27	13.9	
B910-1	22.84	49.99	33.36	18.6	16.3
B910-2	23.54	50.23	25.95	14.0	
B910-3	24.00	50.10	30.80	16.3	
B1010-1	24.46	50.10	34.71	18.0	17.9
B1010-2	24.12	49.73	31.36	16.6	
B1010-3	22.70	48.91	33.38	19.1	

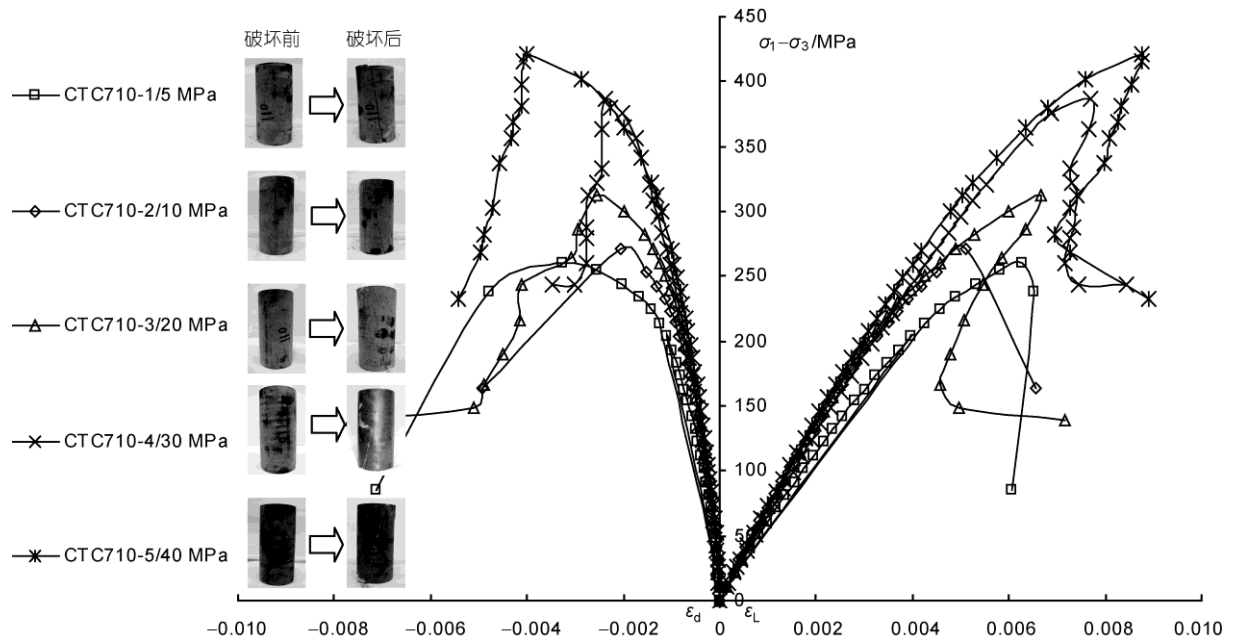


图 12 CTC710 岩样不同围压下的应力-应变曲线

表 3 三轴压缩实验数据

岩样编号	几何尺寸		围压/MPa	峰值强度 $\sigma_1-\sigma_3$ /MPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
	高/mm	直径/mm				
CTC410-1	101.36	49.63	5	303	36.2	47.3
CTC410-2	101.43	49.70	10	336		
CTC410-3	102.39	49.85	20	349		
CTC410-4	100.72	49.72	30	427		
CTC410-5	101.45	49.98	40	495		
CTC510-1	100.45	51.45	5	244	40.5	45.9
CTC510-2	100.52	51.45	10	267		
CTC510-3	100.76	51.40	20	295		
CTC510-4	100.20	51.41	30	321		
CTC510-5	102.33	51.42	40	354		
CTC610-1	101.46	50.02	5	276	49.1	46.5
CTC610-2	101.11	50.03	10	305		
CTC610-3	99.97	49.97	20	354		
CTC610-4	100.28	49.99	30	379		
CTC610-5	99.77	50.00	40	413		
CTC710-1	99.49	50.19	5	260	43.9	47.2
CTC710-2	101.91	50.22	10	271		
CTC710-3	100.75	49.78	20	313		
CTC710-4	102.15	50.23	30	387		
CTC710-5	101.02	49.80	40	422		
CTC810-1	100.75	50.37	5	273	47.5	47.6
CTC810-2	101.57	50.18	10	281		
CTC810-3	100.48	50.18	20	365		
CTC810-4	100.76	50.42	30	417		
CTC810-5	100.68	50.37	40	431		
CTC910-1	101.99	49.87	5	278	51.9	48.5
CTC910-2	101.73	49.65	10	293		
CTC910-3	100.91	49.20	20	372		
CTC910-4	101.31	49.93	30	418		
CTC910-5	102.01	49.90	40	438		
CTC1010-1	102.27	49.78	5	303	56.2	49.2
CTC1010-2	100.33	49.76	10	312		
CTC1010-3	100.48	49.78	20	381		
CTC1010-4	101.88	49.92	30	426		
CTC1010-5	100.13	50.02	40	465		

3 结论

通过 7 个深度水平上同一层玄武岩单轴、三轴、劈裂共 77 个标准试件的实验研究,发现在统计意义上,玄武岩的密度、单轴抗压强度、单轴抗拉强度、三轴抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角都随赋存深度的增加而线性增大,而泊松比随赋存深度的

增加而线性减小.

总的来看,在本文所述条件下,随着赋存深度的增加,玄武岩的密度、强度等参数都有所增加,且呈线性变化趋势.由于本文提及的玄武岩属同期岩浆侵入岩,组成成分上并无明显差异,造成其物理力学参数差异的根本原因是岩浆侵入固结后,在长期地

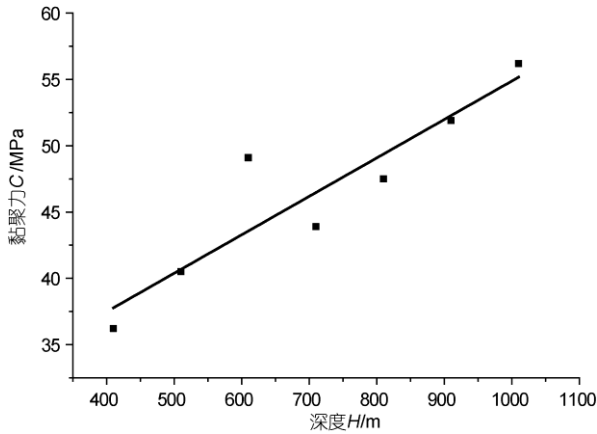


图 13 岩样黏聚力-赋存深度曲线

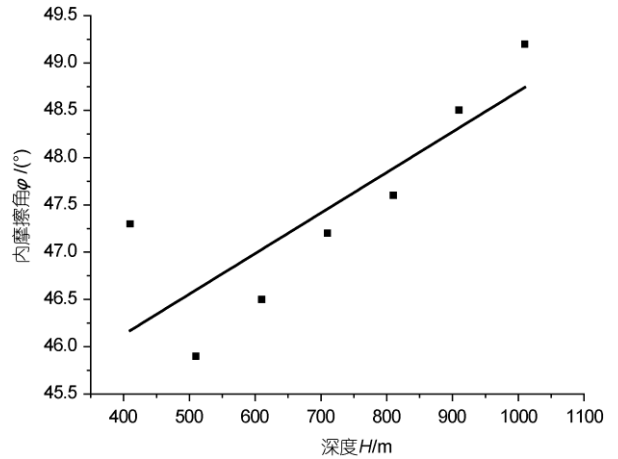


图 14 岩样内摩擦角-赋存深度曲线

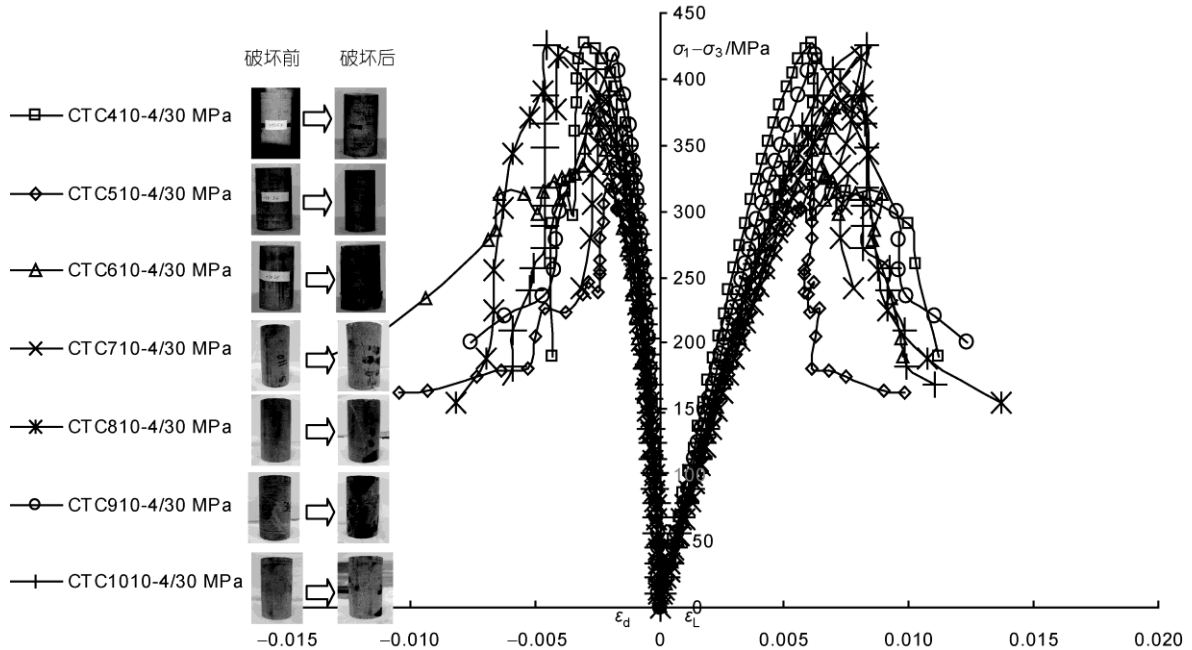


图 15 不同赋存深度下岩样在围压 30 MPa 条件下的应力-应变曲线

质年代作用下, 由于玄武岩所处地质环境的差异, 尤其是地应力环境的差异, 导致深部的玄武岩致密程

度增加、孔隙率减少, 强度等参数明显增大, 但变形参数(如泊松比)则有所下降。

致谢 本文实验完成于四川大学, 刘建锋博士在实验过程中提供了帮助; 北京大台煤矿的工程技术人员帮助现场取样, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展. 力学进展, 2005, 35: 91—99

- 2 Paterson M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. *Bull Geol Soc Am*, 1958, 69: 465—467
- 3 Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. *Bull Earthquake Res Inst Tokyo Univ*, 1966, 44: 215—232
- 4 Paterson M S, Wong T F. *Experimental Rock Deformation: The Brittle Field*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2005
- 5 Singh J. Strength of rocks at depth. In: Maury V, Fourmaintrax D, eds. *Rock at Great Depth*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 37—44
- 6 李世平, 贺永年, 吴振业, 等. 岩石力学简明教程. 北京: 煤炭工业出版社, 1996
- 7 姜晨光, 姜祖彬, 刘华, 等. 花岗岩岩石力学参数与岩体赋存深度关系的研究. *石材*, 2004, 7: 4—6
- 8 Shimada M, Liu J T. Temperature dependence of granite strength under high confining pressures and the brittle-ductile hypothesis for seismogenic zones in the crust. In: *Proceedings of International Conference on Deformation Mechanism, Rheology and Microstructures*. 1999. 46—50
- 9 Hoek E, Brown E. Empirical strength criterion for rock mass. *J Geotech Eng ASCE*, 1980, 106: 1013—1035
- 10 Hoek E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News J*, 1995, 2: 4—16
- 11 Cleary M. Effects of depth on rock fracture. In: Maury V, Fourmaintrax D, eds. *Rock at Great Depth*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 1153—1163
- 12 Wagner H. Support requirements for rockburst conditions. In: Gay N C, Wainwright E H, eds. *Proceedings of 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity*, Johannesburg, 1984. 209—218
- 13 Gibowicz S J, Kijko A. *An Introduction to Mining Seismology*. San Diego: Academic Press, 1994
- 14 Gercek H. Poisson's ratio values for rocks. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2007, 44: 1—13
- 15 仵彦卿. 岩石孔隙率随地层深度变化规律研究. *西安理工大学学报*, 2000, 16: 69—73

Experimental study of the effect of depth on mechanical parameters of rock

ZHOU HongWei¹, Xie HePing^{1,2}, ZUO JianPing¹, DU ShengHao¹, MAN Ke¹ & YAN ChunYe¹

¹ State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

² Sichuan University, Chengdu 610065, China

Study on the effect of depth on physical and mechanical parameters of rock plays an important role in understanding the deformation and failure of rock at depth and analyzing the mechanism of engineering disasters at depth. In this work, basalt specimen are taken from at 7 different depths ranging from 410 m to 1010 m at Datai Coal Mine, Beijing, which are processed into 77 standard rock samples (21 for uniaxial compression tests, 35 for conventional triaxial compression tests, 21 for Brazilian tests). With the rock mechanics test system of MTS815 and RMTS150, some physical and mechanical parameters are obtained, including rock density, uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, friction angle, by uniaxial compression tests, conventional triaxial tests and Brazilian tests. The results show that, rock density, uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, elastic modulus, cohesion and friction angle increase linearly with increasing depth, and there is a linear decreasing in Poisson's ratio with increasing depth. Furthermore, the cause of the difference of physical and mechanical parameters of the same rock at different depth is analyzed.

overburden depth, mechanical parameters, basalt, experimental study

doi: 10.1360/972010-786