

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.017

# 煤层上覆岩层力学性质随赋存深度变化试验

李鹏波<sup>1,2</sup>, 王金安<sup>1</sup>(1.北京科技大学 土木与环境工程学院, 100083 北京; 2.煤炭资源与安全开采国家重点试验室  
(中国矿业大学), 221116 江苏 徐州)

**摘要:** 为获得煤层上覆岩层力学性质随赋存深度变化的规律, 钻孔选取从地表到煤层的所有完整岩石, 通过室内力学试验获取相应力学参数。试验结果表明: 试样的天然密度、抗拉强度、单轴抗压强度和弹性模量等随着赋存深度增加而增大, 吸水率、泊松比随着赋存深度增加而减小; 试样力学性质除了与赋存深度有关外, 还与岩性有直接关系; 试验数据的离散性随着赋存深度增加而增大。造成试验数据离散性的原因除构造应力、煤层采动及温度影响外, 主要是砂岩等沉积岩试样内部颗粒随着应力解除而重新耦合。

**关键词:** 岩体力学参数; 赋存深度; 试验研究; 离散性; 颗粒耦合

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)12-0098-04

## Experimental on mechanical properties of overlying strata rock changed with the occurrence depth

LI Pengbo<sup>1,2</sup>, WANG Jin'an<sup>1</sup>

(1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, 100083 Beijing, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining (China University of Mining and Technology), 221116 Xuzhou, Jiangsu, China)

**Abstract:** Mechanical parameters were obtained by mechanical test to obtain the mechanical properties of overlying strata in coal seam. Test results show that natural density, tensile strength, uniaxial compressive strength and the elastic modulus of the samples increase with the raise of the occurrence depth while water absorption rate and Poisson's ratio decrease with the increase of the occurrence depth, and the mechanical properties of the specimen are directly related to the lithology. Discreteness of test data increases with the increase of the occurrence depth. In addition to tectonic stress, coal mining and temperature effects, the main reason for discreteness is that the internal particles of the sandstone and other sedimentary rocks recouple with the stress relief.

**Keywords:** mechanical parameters; the occurrence depth; experimental study; discreteness; particle coupling

随着人类活动向地下空间发展, 地下工程灾害也日益加剧<sup>[1-2]</sup>, 谢和平<sup>[3]</sup>认为地下岩石力学性质(如弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角等)和地表有很大不同, 是造成工程灾害的主要原因。

国内外学者对不同赋存深度下的岩石力学性质进行研究。Paterson<sup>[4]</sup>的试验表明, 单轴状态下的脆性岩石在高围压条件下转为延性破坏; 姜晨光等<sup>[5]</sup>和景峰等<sup>[6]</sup>分别通过试验发现花岗岩的抗压强度、

抗拉强度和弹性模量等力学参数都随岩体赋存深度增大而增大; 作彦卿<sup>[7]</sup>通过某油田地层岩样室内三轴试验, 发现岩石孔隙率随地层深度增加而减小; 周宏伟等<sup>[8-9]</sup>通过室内力学试验, 揭示了玄武岩的力学性质随赋存深度变化的规律; 满轲等<sup>[10]</sup>对不同赋存深度岩石的动态断裂韧性与拉伸强度进行了实验室研究。但是实验室研究多是模拟理想状态下的赋存条件, 忽略了岩石结构和地层构造等因素的变化。进行不同实际赋存深度下岩石力学研究对于分析工程灾害事故机理和保证矿山开采等生产活动具有重要现实意义。

本文通过勘探钻孔选取从地表到煤层的所有完整岩石进行力学试验, 进而得到煤层上覆岩层在不同赋存深度上的力学性质。勘探钻孔位于华亭煤田

收稿日期: 2015-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1361208); 煤炭资源开采与环境保护国家重点试验室资助项目(11KF03).

作者简介: 李鹏波(1982—), 男, 博士研究生;

王金安(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李鹏波, 117854536@qq.com.

硯北煤矿,终孔靠近采空区,对钻孔过程中取得的所有完整岩石都进行了书面记录。

## 1 试 验

钻孔孔径为 50 mm,岩石取出后进行岩性分类并标注取样深度等参数,密封后立即送至实验室进行选择 and 加工,以避免试样含水率的变化。华亭煤田钻孔共计取样 298 件,试样的岩性为:粗粒砂岩、中粒砂岩、细粒砂岩、含砾粗粒砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩等,根据试样的岩性和在地层中的深

度,将其划分为 20 组进行试验,每组 3~5 个试样。

采用 LP3102 型电子天平和游标卡尺等仪器测定试样的天然密度和饱水密度;采用 WEP-600 液压式屏显万能试验机及相应的压力传感器与程序记录仪测量岩石的单轴抗压强度;采用巴西劈裂法测量岩石的抗拉强度;采用变角剪切仪器分组以 38°、46°、54°、62°和 70°来进行变角剪切试验。

## 2 结果分析

试验结果见表 1。

表 1 岩石力学试验结果

试样 岩性	赋存深 度/m	自然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	吸水 率/%	自然抗 压/MPa	饱和抗 压/MPa	软化 系数	弹性模 量/GPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
粗粒砂岩	205.5	2.05	2.24	8.9	5.57	1.69	0.30	3.8	0.27	1.15	28.68
中粒砂岩	255.0	1.92	2.15	11.8	12.70	1.02	0.08	5.5	0.25	2.82	20.18
含砾粗砂岩	282.3	2.04	2.21	8.1	19.82	10.32	0.52	5.9	0.29	2.15	28.87
细砂岩	302.7	2.27	2.43	7.0	28.10	18.36	0.65	6.5	0.24	5.07	22.29
粉砂岩	328.6	2.34	2.42	3.5	34.29	1.37	0.04	7.9	0.25	4.56	24.36
粉砂岩	346.5	2.33	2.47	5.8	31.57	10.25	0.32	6.9	0.26	3.96	27.25
泥质粉砂岩	350.8	2.56			27.02			4.9	0.32	3.43	29.85
粉砂岩	364.8	2.34	2.41	3.0	34.02	4.27	0.13	7.9	0.24	4.33	30.28
粉砂岩	376.3	2.50			27.63			4.0	0.24	6.62	22.61
细粒砂岩	390.2	2.43	2.55		38.04	8.53	0.22	12.0	2.1	3.97	29.21
粉砂岩	403.9	2.59	2.74	5.7	39.46	39.76	0.86	13.4	0.2	4.49	28.89
细粒砂岩	411.2	2.44	2.60		21.93	1.64	0.09	4.6	0.27	6.34	21.93
细粒砂岩	415.5	2.52	2.60	3.5	35.56	3.54	0.13	8.2	0.28	5.52	20.56
细粒砂岩	424.5	2.43	2.53	4.3	39.92	25.43	0.64	12.0	0.24	4.89	26.20
细粒砂岩	433.0	2.42	2.57	6.4	44.96	12.81	0.32	8.9	0.26	3.74	33.12
细粒砂岩	443.5	1.76	1.80	2.4	51.40	13.78	0.32	21.6	0.19	6.54	24.51
细粒砂岩	452.8	2.45	2.55	3.9	56.97	19.35	0.36	7.6	0.23	7.49	20.63
粗粒砂岩	475.0	2.18	2.35	7.9	33.69	13.68	0.41	11.8	0.24	6.09	30.71
细粒砂岩	487.5	2.45	2.54	3.4	43.65	20.67	0.59	11.4	0.23	4.80	33.00
粉砂岩	499.2	2.52	2.59	3.0	50.80	16.30	0.32	36.9	0.20	5.85	23.71

注:表中所示数据均为一组试样的平均值,其中有空缺的部分因试样饱水破坏没有获得数值。

从表 1 可看出,试验数据具有一定的规律性:

1) 力学性质随赋存深度变化而变化。试样的抗拉强度、单轴抗压强度、弹性模量、内聚力等随着赋存深度增加而增大;泊松比、吸水率随赋存深度增大而减小,趋势较明显。

2) 岩石力学性质与岩性紧密相关。

地下 255 m 处地层岩性为中粒砂岩,其相邻地层为粗粒砂岩和含砾粗砂岩;475 m 处为粗粒砂岩,其临近地层皆为细粒砂岩。试样在 255 m 处和 475 m 处,其抗拉强度、天然密度、吸水率等都有较大突变。这说明岩石的力学性质除了与赋存深度有关外,还与其岩性有直接关系。从表 1 还可看出,试样的软化系数、内摩擦角等与赋存深度并无直接关系,更多地与岩样本身的岩性有关。

对表 1 数据进行拟合分析,利用 origin 软件画出散点图见图 1。试样的抗压强度在 150~300 m 处

曲线拟合的决定系数为 0.747,300~500 m 处决定系数为 0.479;抗拉强度在 150~350 m 处决定系数为 0.680,350~500 m 处决定系数为 0.142;同样的,弹性模量在 200~350 m 处决定系数为 0.870,350~500 m 处决定系数为 0.286。从数据拟合的决定系数可直观看到数据离散性,试验数据的离散性随试样赋存深度增加而增大,这种数据的离散性现象在以往的试验和研究中极为少见。

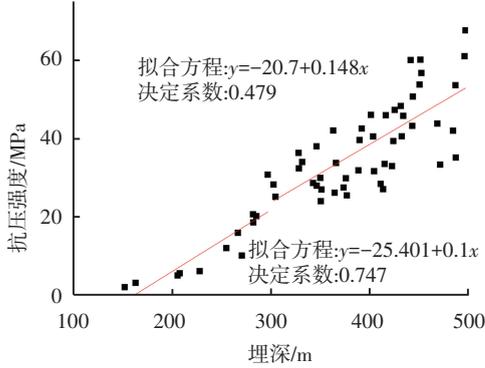
## 3 数据离散性分析

造成试验数据离散性随赋存深度增加而增大的原因有以下几种:

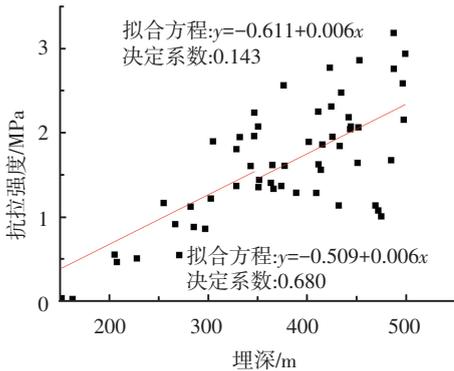
1) 试样含水率的变化。钻孔现场未发现大的天然含水层,同时由于试样运送较为及时,水的蒸发基本可忽略,因此认为试样含水率未发生变化。

2) 构造应力及煤层采动的影响。华亭煤田处于背

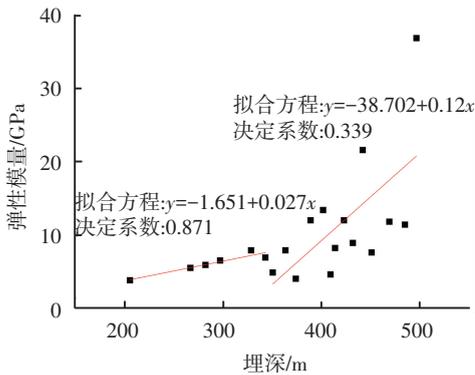
斜处,无大的断层,认为岩层构造应力对试验结果影响较小;但随着试样位置靠近煤层(约 500 m 处),数据的离散性渐渐变大.这是因为取样位置下方为砚北煤矿,煤层上覆岩层在开采过程中发生较大位移,不可避免地对取样位置造成扰动,引起应力的重新分布,这是造成试验数据离散性变大的原因之一.



(a) 单轴抗压强度



(b) 抗拉强度



(c) 弹性模量

图 1 试验数据随赋存深度变化的拟合曲线

3) 温度降低及应力解除的影响. 试样从地下取出后, 温度降低, 弹性模量和抗压强度等力学参数会随温度降低而增大. 计算地层内温度时采用陕甘宁盆地的地温梯度 2.75<sup>[11]</sup>, 则

$$t = 0.027 \ 5H + 14. \quad (1)$$

式中:  $H$  为地层深度, m;  $t$  为温度, °C. 则 500 m 处,  $t = 27.75$  °C. 试样从地下取出后, 温度降低, 岩石的抗压强度和弹性模量都会有一定程度的增加, 类似于赵彦东等<sup>[12]</sup>的研究, 变化公式为

$$E_1 = E_0 + 14k_1 + 0.027 \ 5k_1H, \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_0 + 14k_2 + 0.027 \ 5k_2H. \quad (3)$$

式中:  $E_1$ 、 $\sigma_1$  为温度降低后岩石的弹性模量和抗压强度,  $E_0$ 、 $\sigma_0$  为地层中原始弹性模量和抗压强度,  $k_1$ 、 $k_2$  为温度系数.

由于所取试样为砂岩和泥岩类沉积岩, 且其赋存深度在 500 m 以上, 未引起岩石塑性变化, 所以可忽略岩石内部的压结作用和重结晶作用, 只考虑颗粒之间的相互作用. 随着应力的解除, 岩石内部除弹性变化外, 颗粒之间还会产生相对运动, 颗粒重新耦合, 造成了弹性模量和抗压强度的减小, 此时有

$$\sigma_0 = \sigma_1 - 14k_2 - 0.027 \ 5k_2H - \sigma_2, \quad (4)$$

$$E_0 = E_1 - 14k_1 - 0.027 \ 5k_1H - E_2. \quad (5)$$

式中  $E_2$ 、 $\sigma_2$  为岩石颗粒重新耦合造成的弹性模量和抗压强度的减小量.

温度降低和应力解除对试样的影响见图 2. 图中  $\partial E_2$  和  $\partial \sigma_2$  为颗粒耦合影响的弹性模量和抗压强度沿试样半径分布的减小量.

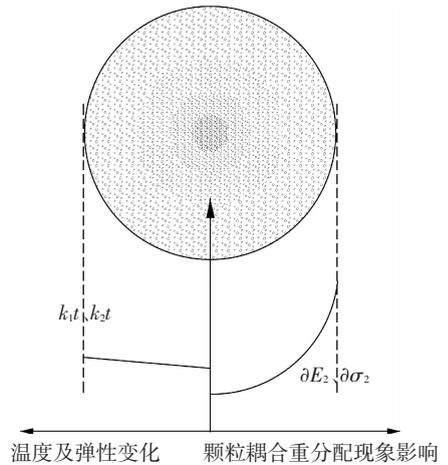


图 2 试样内部影响因素

试样因温度降低和弹性膨胀而产生的变化内外基本一致; 因颗粒重新耦合而产生的变化则是越靠近试样表面变化越大, 所以其造成的  $\partial E_2$  和  $\partial \sigma_2$  数值就越大, 极限状态为颗粒间耦合程度减小到与地表岩石相同, 所以有图 3、4 的曲线.

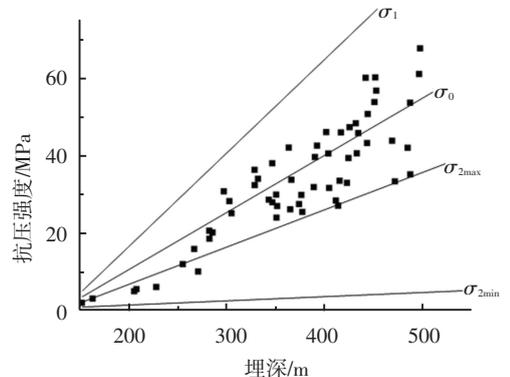


图 3 抗压强度分析

图 3 中  $\sigma_0$  曲线为地层中原始抗压强度,  $\sigma_1$  曲线为温度降低后的抗压强度,  $\sigma_{2\max}$  和  $\sigma_{2\min}$  为岩石颗粒重新耦合造成的抗压强度减小量的最大值和最小值。结合式(4)可看出, 颗粒重新耦合造成了抗压强度试验数据呈现出类似扇形的离散性。

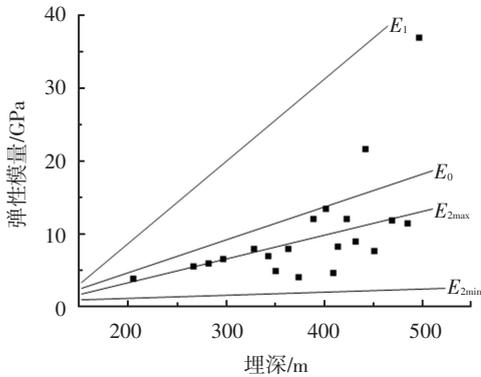


图 4 弹性模量分析

图 4 中  $E_0$  曲线为地层中原始弹性模量,  $E_1$  曲线为温度降低后的弹性模量,  $E_{2\max}$  和  $E_{2\min}$  为岩石颗粒重新耦合造成的弹性模量减小量的最大值和最小值。结合式(5)可看出, 颗粒重新耦合造成了弹性模量试验数据呈现出类似扇形的离散性。

颗粒重新耦合造成了试样力学性质的差异性, 体现在试验数据上就是离散性的增加。需要指出的是, 以碎屑、砂砾等颗粒为主要构成的砂岩才存在上述明显的颗粒耦合重组现象, 其他以结晶为主的花岗岩等岩浆岩, 其颗粒耦合重组现象并不明显; 同时, 图 3、4 所示的曲线为定性分析, 定量分析还需后续进一步研究。

## 4 结 论

1) 从试验结果看, 试样的天然密度、抗拉强度、单轴抗压强度和弹性模量随着赋存深度增加而增大; 吸水率、泊松比则随着赋存深度增加而减小; 岩样软化系数、内摩擦角等与赋存深度并无直接关系, 更多是与试样的岩性有关。

2) 在靠近煤层(约 500 m)处, 由于受采动影响, 试样所处地层的受力状态非常复杂, 这使同一地层试样的试验数据表现出较大的差异性。

3) 试验数据的离散性随着赋存深度增加而增大。砂岩等颗粒沉积岩从地层中取出后, 随着应力解

除, 其内部颗粒会重新耦合, 这是数据离散性随赋存深度增加而增大的主要原因。

4) 由于试样选取深度为 500 m 以上的砂岩和泥岩, 忽略了岩石内部的晶体结构以及砂岩的压结作用和重结晶作用, 这与花岗岩等岩浆岩会存在较大区别。

## 参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展—深部岩体力学的若干问题[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10-17.
- [2] SELLERS E J, KLERCK P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 463-469.
- [3] 谢和平. 深部高应力下的资源开采—现状、基础科学问题与展望[C]//香山科学会议. 科学前沿与未来. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179-191.
- [4] PATERSON M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble[J]. Geological Society of America Bulletin, 1958(69): 465-467.
- [5] 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[J]. 石材, 2004, 22(7): 4-6.
- [6] 景锋, 盛谦, 余美万. 地应力与岩石弹性模量随埋深变化及相互影响[C]//岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 武汉: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 69-74.
- [7] 仵彦卿. 岩石孔隙率随地层深度变化规律研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4): 69-73.
- [8] 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[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99.
- [9] 周宏伟, 谢和平, 左建平, 等. 赋存深度对岩石力学参数影响的试验研究[J]. 科学通报, 2010, 55(34): 3276-3284.
- [10] 满轲, 周宏伟. 不同赋存深度岩石的动态断裂韧性与拉伸强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1657-1663.
- [11] 付秀清, 王正东. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [12] 赵彦东, 赵文奎, 柯尊乾, 等. 温度对深井岩石力学性质的影响[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 12(4): 71-73.

(编辑 赵丽莹)