

含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨*

孟召平 彭苏萍 傅继彤

(中国矿业大学资源开发工程系 北京 100083)

摘要 基于含煤岩系主要岩石类型,系统分析了决定岩石力学性质的主要控制因素如岩性、地应力和水,探讨了不同岩性岩石在不同侧压和不同含水条件下的力学特征,分别建立了含煤岩系岩石力学性质与岩性、地应力和水等主要控制因素之间的定量关系。研究表明,含煤岩系岩性随着碎屑颗粒粒度由粗到细,即由砂岩到泥岩变化,碎屑岩的强度与刚度均迅速衰减。岩石的变形和强度以及破坏机制与其所承受的有效侧压大小有关,表现为不同岩性岩石的刚度和强度均随侧压的增大而增大,呈非线性关系,其应变软化性态和破坏机制也均随侧压的增大而发生转化。水对岩石力学性质亦产生重要影响,在干燥或较少含水量情况下,岩石在峰值强度后表现为脆性和剪切破坏,应力-应变曲线具有明显的应变软化特性;随着含水量的增加,岩石单轴抗压强度和弹性模量值均急剧降低,主要表现为塑性破坏,且应变软化特性不明显。

关键词 含煤岩系, 岩石力学性质, 控制因素

分类号 TD 315

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)01-0102-05

1 引言

含煤岩系是一种在成因上有共生关系并含有煤层(或煤线)的沉积岩系,简称煤系。成煤古地理环境、古构造条件、古气候和古植物条件是控制煤系形成的重要因素。含煤岩系形成是在潮湿气候条件下沉积盆地边缘发生的充填,主要由陆源碎屑岩和煤层构成,岩性多为砂岩、粉砂岩和粘土岩,如淮南煤田二叠纪含煤岩系,形成于三角洲平原环境,砂岩占 33.66%,粉砂岩占 8.7%,泥岩占 50.38%,煤占 7.23%(含不可采煤层)。由于含煤岩系形成于地壳浅部,其生成和赋存环境与岩浆岩或变质岩显然不同,岩性较为软弱,变化较大,成分复杂,使得含煤岩系岩石具有不同于其他岩类的变形力学特性。因此,在进行矿井工程地质和井巷围岩质量及稳定性评价时,有必要对含煤岩系岩石的变形力学特性及其控制因素进行专门研究^[1, 2]。

有关岩石力学特性研究,早已受到国内外学者的重视,取得了许多研究成果^[3~12]。但从目前的研究状况看,岩石力学中的控制因素研究得还很不

够,因此,对岩石强度和变形特性及岩石发生破裂的发展过程的认识在一定程度上受到限制。众所周知,影响岩石力学性质的因素很多,其中,主要受岩性(相)和赋存环境,如水和地应力环境等因素影响^[13, 14],对岩石力学性质的认识,只有认真地考虑这些因素,才能作出正确的评价^[1]。本文试图通过对含煤岩系岩石力学性质的主要控制因素如岩性、地应力和水的系统分析,来了解不同岩性岩石在不同侧压和不同含水条件下的力学特征,分别建立岩石力学性质与岩性、地应力和水等主要控制因素之间的定量关系,为复杂的地下工程设计与围岩控制提供理论依据。

2 岩性(相)对岩石力学性质的控制

试验表明(表 1),任何一类岩石的力学性质的变化范围都很大,并与其他岩类有较大范围的交叉,如砂岩的单轴抗压强度为 50.6~281.3 MPa,粉砂岩为 67.28~130.09 MPa,泥岩为 9.81~81.50 MPa,煤层为 2.25~14.20 MPa;其他参数也具有相类似的现象。这些均反映出相同类型的岩石,其力学性

2000年6月9日收到初稿,2000年7月27日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(40172059, 59774003 和 49872053), 国家“九五”攻关项目(97224-02)。

作者 孟召平 简介:男,36岁,1999年于中国矿业大学(北京)矿产普查与勘探专业获博士学位,现任副教授,主要从事矿井地质及地下工程地质方面的教学与科研工作。

表1 含煤岩系岩石力学性质测试结果

Table 1 Experimental results of rock mechanics properties of coal-bearing formation

岩石类型	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	抗压强度 R_c / MPa	抗拉强度 R_t / MPa	粘聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	弹性模量 E_{50} / GPa	泊松比 μ	速度 V_p / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
砂岩	2.47-3.47 ^①	50.60-281.30	1.77-10.67	1.91-13.07	33.41-39.15	16.13-86.44	0.11-0.33	3 888-5 714
	2.76	111.50	6.66	6.30	36.49	59.54	0.20	4 836
粉砂岩	2.43-2.63	67.28-130.09	1.20-9.20	1.25-2.40	39.00-40.03	30.00-34.00	0.28-0.33	3 600-4 800
	2.56	94.54	5.20	2.33	39.52	32.00	0.30	4 200
砂质泥岩	2.64-2.98	13.50-112.10	0.70-8.70	4.00-11.90	31.90-38.39	7.60-44.00	0.10-0.30	1 300-5 700
	2.72	53.46	4.39	6.22	34.14	22.96	0.22	3 500
泥岩	2.05-2.97	9.81-81.50	0.30-7.29	0.14-8.40	31.80-41.52	2.01-19.71	0.15-0.34	1 696-3 072
	2.68	42.75	1.91	3.95	36.72	10.35	0.24	2 478
煤	1.30-1.46	2.25-14.20	0.19-0.55	0.04-4.13	30.20-33.42	0.70-4.74	0.11-0.38	2 374-2 944
	1.39	11.45	0.35	2.09	31.81	2.69	0.23	2 564

注：①表示： $\frac{\text{最小}-\text{最大}}{\text{平均}}$ 。

质差异较大，说明影响沉积岩石力学性质的因素之多，如沉积岩石的成分、结构、胶结成分，胶结类型和支撑类型等因素都影响着岩石力学性质。

尽管同一岩性的岩石力学性质变化较大，但仍可以看出，不同岩性的岩石力学性质差异较大，单轴抗压强度和抗拉强度等指标以砂岩类最大，平均值分别为 111.50 和 6.66 MPa；粉砂岩次之，平均值分别为 94.54 和 5.20 MPa；泥岩较小，平均值分别为 42.75 和 1.91 MPa；煤层最小，平均值分别为 11.45 和 0.35 MPa。砂岩的平均单轴抗压强度和抗拉强度指标分别为泥岩的 2.6 倍和 3.5 倍。

根据岩石试块单轴抗压强度(R_c)，可以把含煤岩系岩石简单地分为：硬质岩石、中硬岩石和软质岩石三类，如表 2 所示。

表2 含煤岩系岩石力学强度类型
Table 2 Types of rock mechanical strength on coal bearing formation

岩石力学类型	主要岩性和岩相	单轴抗压强度 R_c / MPa
硬质岩石	主要为分流河道、河口沙坝和决口扇及小型水道相砂岩和粉砂岩	≥ 60
中硬岩石	主要为分流间湾、泛滥平原和天然堤相的粉砂岩和粉砂质泥岩	30~60
软质岩石	主要为泛滥平原、沼泽相和泥炭沼泽相泥岩和煤层	< 30

对于不同岩性的岩石，破坏机制存在一定的差异，如软质岩石在单轴压缩条件下为剪张破坏，在

一定侧压条件下为弱面剪切破坏和塑性破坏；并且，随着侧压的增大，岩石应力-应变曲线由应变软化性态向近似应变硬化性态过渡，并伴有体积膨胀现象。中硬岩石在单轴压缩条件下为脆性张裂破坏，随着侧压的增加，岩石便进入剪切破坏；岩石应力-应变曲线表现出一定的应变软化特性。硬质岩石在试验的侧压范围内均为脆性张裂破坏和剪切破坏，破坏时发出较大的声响和振动，岩石应力-应变曲线表现出明显的脆性和应变软化特性^[3]。这些说明岩性对岩石力学性质具有重要的控制作用。

3 地应力对岩石力学性质的控制

含煤岩系岩石的变形与强度特征，除受岩性控制外，主要受赋存环境因素如水和地应力环境的控制，在这一方面，利用三轴试验法了解岩石在不同侧压条件下的变形与强度特性尤为重要^[13]。

试验表明(图 1)，含煤岩系岩石承载后发生的变形及破坏形态与其所承受的有效侧压大小密切相关，其主应力差-应变曲线斜率随着侧压的增加而明显变陡，破坏荷载增高，表现为岩石的刚度和强度均随侧压的增大而增大，这说明含煤岩系岩石原来具有较多的孔隙裂隙，在侧压作用下，孔隙裂隙被压密闭合，从而使岩石刚度和强度增大。试验结果统计表明，岩石的弹性模量与侧压之间呈非线性关系：

$$E = b_2 \sigma_3^2 + b_1 \sigma_3 + b_0 \tag{1}$$

式中： E 为岩石弹模(GPa)； σ_3 为侧压(MPa)； b_0 ， b_1 和 b_2 为岩石刚度岩性影响系数，对于不同岩性岩石其系数不同，如表 3 所示。

表 3 岩石刚度岩性影响系数统计表
Table 3 Influencing coefficient of lithological characters on stiffness

岩性	系数 b_2	系数 b_1	系数 b_0	侧压	相关系数
				σ_3 / MPa	R
中细砂岩	0.016	-0.121	38.113	≤ 50	0.97
砂质泥岩	0.040	-0.678	26.909	≤ 40	0.94
泥岩	0.006	0.254	28.876	≤ 50	0.99

不同岩性的岩石，随着侧压(σ_3)的增大，岩石的轴向破坏应力(强度)也增大，但其增大的速率，受岩性所控制，则不完全相同，经回归分析，其关系可用下式表示：

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \sigma_3 \quad (2)$$

式中： σ_1 为轴向破坏应力(MPa)， σ_3 为侧向应力(MPa)， σ_c 为岩石的单轴抗压强度(MPa)， k 为岩石强度岩性影响系数，如表 4 所示。

表 4 岩石强度岩性影响系数统计表
Table 4 Influencing coefficient of lithological characters on compressive strength

岩性	σ_c / MPa	k	σ_3 / MPa	相关系数 R
中细砂岩	117.41	6.17	≤ 40	0.92
砂质泥岩	77.45	5.60	≤ 40	0.99
泥岩	40.15	2.66	≤ 50	0.99
煤	8.83	2.07	≤ 30	0.99

不同岩性岩石受侧压影响程度不同，在侧压为 10 MPa 时，与单轴压缩时相比，砂岩的刚度增加了 28%，砂质泥岩的刚度则增加了 11.3%，泥岩的刚度则增加了 7%；而在侧压为 40 MPa 时，与单轴压缩时相比，砂岩的刚度增加了 72%，砂质泥岩的刚度则增加了 179%，泥岩的刚度则增加了 93%；在低侧压时，砂岩的刚度明显地大于砂质泥岩和泥岩，但随着侧压的增大，砂岩与砂质泥岩和泥岩的刚度差值逐渐减少。

在试验中，泊松比受侧压影响较小，也即，沉积岩石的泊松比并不因侧压的不同而有明显变化，关于这方面有待于进一步加以研究。

试验结果表明，侧压除影响岩石的变形和强度特性外，也对岩石的破坏机制产生重要的影响。在没有侧压条件下，岩石试件呈典型的脆性张破坏，即破裂面平行于主压应力作用力方向；随着侧压的增加，岩石试件由剪张破坏，即以张破坏为主，剪

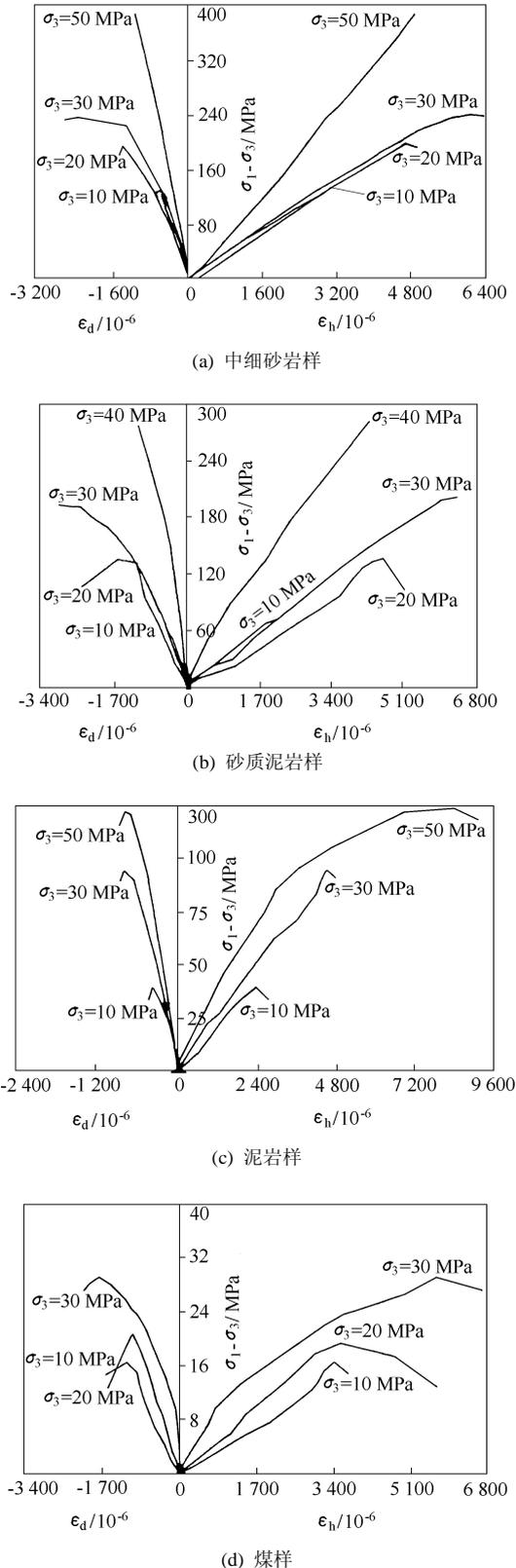


图 1 不同岩石在不同侧压下主应力差-应变曲线

Fig.1 Curve of difference of principal stresses versus strain of different rocks under different confining pressures

破坏为辅的破坏形式,到张剪破坏,即剪破坏为主,张破坏为辅的破坏形式;然后,向典型的剪切破坏转化。在高侧压条件下,岩石试件呈塑性破坏,试件表面形成密集的“X”节理,剪切破裂面上有很多岩粉,破裂面交汇处有较大范围的挤压粉碎区,并有显著的侧向膨胀。

由上可知,侧压对岩石的力学性质的影响十分明显,在研究顶板岩体稳定性时,只有认真地考虑岩体环境应力因素,才能作出正确的评价^[13]。

4 水对岩石力学性质的控制

地壳中的岩石,尤其是沉积岩,大部分都或多或少地含有水分或溶液,有的含有油气。Müller L (1974)曾指出,岩体是两相介质,即由矿物-岩石固相物质和含于孔隙和裂隙内水的液相物质组成^[4]。它们都会降低岩石的弹性极限,提高韧性和延性,使岩石软化,易于变形。

水对沉积岩力学性质的影响程度明显高于岩浆岩和变质岩。当岩石内含水量不同时,其变形与强度特征受到重要影响,如图2所示(据李成江资料,略加修改)。

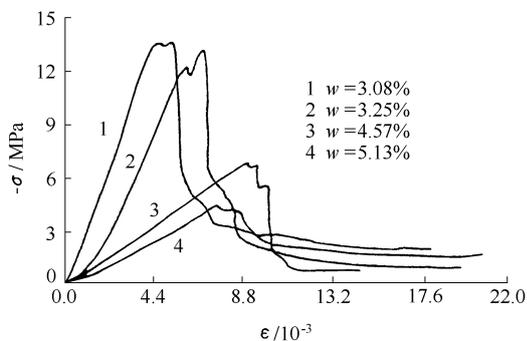


图2 不同含水状态下泥岩的全应力-应变曲线
Fig.2 Complete stress-strain path of mudstone with different moistures

由图2可以看出,随含水量增加,岩石的单轴抗压强度和弹性模量值均急剧降低。但是由于岩性不同,其岩石矿物成分、胶结状况和结晶程度等因素差异较大,因此,随含水量增加,岩石的强度和刚度降低的速率则不完全相同,水对沉积岩单轴抗压强度的影响经回归分析得到如下关系:

$$\sigma_c = \sigma_0 - k w \tag{3}$$

式中: σ_c 为不同含水量状态下岩石单轴抗压强度(MPa), σ_0 为干燥状态下岩石单轴抗压强度(MPa),

k 为水对岩石强度影响系数(如表5所示), w 为含水量(%)。

除了水对岩石的强度产生重要影响外,当岩石内的含水量不同时,其变形特征也受到影响,且十分显著。

据周瑞光的研究成果,弹性模量及泊松比与含水量的关系是为

$$E = E_0 \exp(-bw) \tag{4}$$

$$\mu = \mu_0 \exp(cw) \tag{5}$$

式中: E_0, μ_0 分别为岩石干燥时的弹性模量和泊松比; E, μ 分别为对应一定含水量 w 时的弹性模量和泊松比; c 为与岩性有关的实验常数。

表5 水对岩石强度影响系数统计表
Table 5 Influencing coefficient of moisture on compressive strength

岩性	σ_0 / MPa	k	w / %	相关系数 R
中细砂岩	143.35	277.59	≤ 0.35	0.99
砂质泥岩	120.98	71.61	≤ 0.84	0.94
泥岩	30.36	4.93	≤ 5.13	0.95

含水量不仅影响变形参数的大小,而且影响岩石的变形破坏机制,图2为不同含水状态下顶板泥岩的全应力-应变曲线(控制条件 $\dot{\epsilon} = 10 \times 10^{-6}$)。从图中可以看出,各曲线在峰值强度之前,除低应力时略呈上凹外,基本上呈直线,峰值强度之后,随着应变值的增加,应力迅速降低,发生应变软化,曲线非光滑呈波状起伏,但是随着含水量增加,泥岩的弹性模量及峰值强度均急剧降低,且峰值强度对应的应变值有随之增大的趋势。同时,在干燥或较少含水量情况下,应力-应变曲线在峰值强度后岩石表现为脆性和剪切破坏,具有明显的应变软化特性,且随着含水量的增加,峰值强度后岩石主要为塑性破坏,应变软化特性不明显。

水溶液对岩石变形与强度影响的原因是由于水的加入使分子活动能力加强,在岩石孔隙、裂隙中的液体或气体会产生孔隙压力,抵消一部分作用在岩石内部任意截面的总应力(包括围压和构造运动所产生的应力),使岩石的弹性屈服极限降低,易于塑性变形,同时还会降低岩石的抗剪强度,使岩石剪切破坏。

5 结 论

影响含煤岩系岩石力学性质的主要控制因素有

岩性、水和地应力等因素，通过上面的分析获得如下认识：

(1) 不同岩性的岩石具有不同的形变速率和强度特征，岩石力学性质主要表现为，随着碎屑颗粒粒度由粗到细，即由砂岩到泥岩变化，碎屑岩的强度与刚度均迅速衰减。

(2) 含煤岩系岩石的变形和强度与其所承受的有效侧压大小有关。表现为：不同岩性的弹性模量均随侧压的增大而增大，呈非线性关系；岩石的强度随侧压的增大而增高，其增长速率受岩性所控制，呈线性关系。

(3) 水对岩石力学性质亦产生重要影响，在干燥或较少含水量情况下，岩石在峰值强度后表现为脆性和剪切破坏，应力-应变曲线具有明显的应变软化特性；随着含水量的增加，岩石单轴抗压强度和弹性模量值均急剧降低，主要表现为塑性破坏，且应变软化特性不明显。

参 考 文 献

- 孟召平. 煤层顶板沉积岩体结构及其对顶板稳定性的影响[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1999
- 孟召平, 彭苏萍. 煤层顶底板岩石成分和结构与其力学性质的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 136~139
- 法默 I W. 岩石的工程性质[M]. 汪 浩译. 北京: 中国矿业大学出版社, 1988
- Müller L. 岩石力学[M]. 李世平译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981
- Murrell S A F. The effect of triaxial stress systems on the strength of rock at atmospheric temperatures[J]. Geophys. J. Roy. Abstr. Soc., 1965, (10): 231~281
- 何满潮, 彭 涛, 王 瑛. 软岩沉积特征及其力学效应[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(2): 37~39
- 周瑞光. 山东龙口北皂煤矿软岩力学特性试验研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 55~60
- 葛修润, 周百海, 刘明贵等. 岩石峰值后特性和数值模拟方法探讨[A]. 见: 葛修润主编. 计算机方法在岩石力学及工程中应用国际学术讨论会论文集(中文版)[C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994, 389~397
- 张梅英, 袁建新, 李廷芥等. 单轴压缩过程中岩石变形破坏机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 1~8
- 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497~502
- 杨更社, 谢定义, 张长庆等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250~254
- 肖洪天, 周维垣, 杨若琼. 岩石裂纹流变扩展的细观机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 623~626
- 孟召平, 彭苏萍. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 15~18
- 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987, 1~6

STUDY ON CONTROL FACTORS OF ROCK MECHANICS PROPERTIES OF COAL-BEARING FORMATION

Meng Zhaoping, Peng Suping, Fu Jitong

(China University of Mining and Technology, Beijing 100083 China)

Abstract Based on the rock type of coal-bearing formation, the key factors to control rock mechanics properties, such as lithological characters, in-situ stresses, and moisture, are systematically analyzed. The mechanical characters of different rocks under different confining pressures and moistures are studied. The quantitative relationships between the rock mechanics properties and lithological characters, in-situ stresses and moistures are established, respectively. It is shown that the strength and stiffness of rocks are rapidly reduced with decrement of the grain diameter, namely from sandstone to mudstone. The stiffness and strength of different rocks increase with confining pressure. The behavior of the strain softening and failure mechanism of different rocks are transformed with the increment of confining pressure. Moisture influences the rock mechanics properties evidently. Under the dry condition or low moisture, rock reveals the attributes of brittle and shear fracture after peak strength. From the stress-strain curves, the strain softening characters are evidently shown. With the increment of moisture, the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the rocks decrease remarkably, and plastic failure is the main evidence, but the properties of strain softening is not so remarkable.

Key words coal-bearing formation, rock mechanics properties, control factors