

煤岩力学性质测试分析与应用

李同林 乌效鸣 屠厚泽

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

[摘 要] 通过大量煤岩力学性质的测试与分析, 证实了试验区煤岩的弹性模量相对较低, 泊松比较高, 脆性大, 易破碎, 易压缩, 且煤岩垂直层理方向上和平行层理方向上的力学性质相比差异较大, 故而应将煤岩视为横观各向同性体来处理。运用 Griffith 断裂理论, 试验和研究了煤岩的脆性断裂过程, 针对煤岩结构构造和力学性质对水压致裂裂缝发育特点的影响做了定性分析, 并对水力压裂设计与施工提出了有重要参考价值的建议。

[关键词] 煤岩力学性质 水压致裂 Griffith 断裂理论 横观各向同性体 裂缝形式临界深度判据

[中图分类号] P641.4⁺ 61 P642.3 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2000)02-0085-04

1 引言

煤层气井与常规油气井在水力压裂技术方法和压裂结果上, 既有相似性又有差异性。其差异性主要表现在两个方面: 其一, 煤层甲烷主要是以分子吸引力呈吸附状态, 吸附在煤岩裂隙和基质孔隙(微孔隙)的内表面上, 赋存于煤层内, 其赋存和产出机理与砂岩天然气完全不同; 其二, 煤岩在成份、结构、构造以及力学物理性质上同油气储层有显著差异。正是上述差异性给煤层气井水力压裂设计与研究带来了许多新课题, 表现出了其压裂机理的特殊性, 从而造成了不同的压裂结果。

水压致裂在岩层中造缝、形成裂缝的条件、裂缝的扩展及展布形态、裂缝的发育特点等, 均与岩层所处地应力状态、结构构造特征、力学物理性质、压裂液性质及其注入方式等因素密切相关。但是, 客观内在的关键因素是岩石的实际受力状态及其分布以及岩石的结构构造特征和力学物理特性。

2 煤岩的结构构造特征

岩石的组成成份、结构构造特征造成了岩石物质成份的非均质性、物理力学性质的各向异性和结构构造的不连续性。这是区别于其它力学材料的最突出特征, 而煤岩层的这些特征尤为显著。

煤岩的非均质性和各向异性突出表现在其组成成份在同一煤层中纵向(垂直层理)和横向不同方向和深度上的差异, 以及在其生成过程中所形成的明显层状构造和孔隙结构所体现出的差异。通常煤岩中存在有两组近于垂直的割理, 主要裂隙组面割理

发育较完善, 延伸可达数百米, 而端割理发育在面割理之间, 沟通了面割理。两组割理与层理面近于正交或陡角相交。本试验区目的煤层属焦煤或焦瘦煤, 经测定其层理十分发育, 割理系统较完善, 割理发育明显受层理控制。由于煤岩层状构造发育, 孔隙结构特殊, 构造作用对裂隙的后期改造或产生新的裂隙, 都充分体现出了煤岩结构构造的不连续性。

一般认为层理为煤岩层最弱结合面, 面割理次之。这些弱结合面对煤岩试样的制备、力学物理性质的测试, 特别是对煤层水力压裂造缝机理和裂隙发育规律都有不容忽视的影响。

3 煤岩力学性质的测试分析

3.1 煤岩力学性质测试与分析

科研组对试验区大量煤岩样进行了各种力学性质的测试。表 1 是试验区煤岩部分实测结果与有关资料进行力学性质对比的情况。表 2 表明了煤岩力学性质的各向异性对比情况。与常规砂岩相比煤岩的弹性模量 E 较低, 泊松比 μ 较高, 脆性大, 易破碎, 易受压缩。且由于煤岩结构的不均质性, 原生和次生裂隙系统十分发育和复杂, 均导致煤岩物理力学性质具有显著的各向异性特征。

3.2 煤岩的脆性断裂过程

由实验结果发现岩石断裂发生之前岩石内已产生许多微破裂, 且以张破裂为主, 很少甚至没有剪切破裂现象。这些实验现象显然用 Coulomb-Mohr 提出的剪切破裂机理不能做出满意的解答。Griffith 通过对脆性材料破裂过程的详细研究, 认为脆性材料的实际强度远低于其理论强度的原因, 在于内部存在

[收稿日期] 1999-12-08; [修定日期] 2000-01-09; [责任编辑] 王 梅。

[基金项目] 本文研究工作为国家“八五”重点科技攻关(85-102-11-05-02)课题资助。

有大量微裂隙和不连续性 (Giffith 裂纹)。当裂纹端部引起的拉应力一旦超过固体材料分子间的结合力时就引起裂隙的不稳定扩展,最终导致材料的破坏。基于这一认识,提出了脆性材料的 Giffith 判据。Meclintock 和 Walsh 又提出了修正的 Giffith 判据。

事实证明,脆性岩石受压,闭合裂纹扩展时所需应力要比张开型裂纹扩展时所需应力更大^[3]。总之,这两种判据在实验中都证实了在压应力状态下,岩石脆性断裂虽然都与微裂隙密切相关,但都不是沿原微裂缝简单延伸的结果。

表 1 材料力学性质对比

类 别		弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	抗压强度 σ_{bc} (MPa)	抗拉强度 σ_{bt} (MPa)	内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	粘聚力 τ_0 (MPa)	备 注
砂 岩	范围	10~61	0.09~0.36	20.0~300.0	3.00~20.00	45~52	10~28	资料[1,2]
	一般	—	—	60.0~100.0	4.00~13.00	—	—	
	平均	35.5	0.22	80.0	8.50	48	19	
煤	范围	0.3~6.5	0.10~0.50	5.0~50.0	0.25~5.00	28~35	2~4	资料[1,2]
	一般	0.3~2.5	0.15~0.45	10.0~16.0	1.50~2.50	—	—	
	平均	1.4	0.30	13.0	2.00	32	3	
安二、1 煤	范围	0.39~2.80	0.14~0.37	6.8~13.6	0.29~0.75	33	2.37	实 测
	平均	1.14	0.26	10.3	0.56	—	—	
柳 4 煤	范围	0.70~1.72	0.18~0.42	4.8~12.3	0.12~0.30	—	—	实 测
	平均	1.10	0.32	8.5	0.23	—	—	
柳 5 煤	范围	0.25~3.19	0.11~0.34	4.2~15.0	0.25~0.81	56	0.94	实 测
	平均	1.68	0.23	9.6	0.42	—	—	
柳 8 煤	范围	0.58~1.44	0.11~0.42	5.0~14.3	0.15~0.46	43	2.13	实 测
	平均	0.98	0.29	9.6	0.30	—	—	

表 2 材料力学性质各向异性对比 *

类 别		弹性模量 E (GPa)		泊松比 μ		抗压强度 σ_{bc} (MPa)		抗拉强度 σ_{bt} (MPa)		备 注
		E	E	μ	μ	σ_{bc}	σ_{bc}	σ_{bt}	σ_{bt}	
煤	无烟煤	6.5	0.3	0.5	0.1	19.6	13.2	0.25	5.00	资料[1,2]
	烟 煤					10.8	7.4			
	褐 煤					13.5	8.0			
安二、1 煤		2.797	0.391	0.37	0.14	13.6	6.8	0.26	0.75	实测样 10 块
柳 4 煤		1.718	0.696	0.42	0.18	12.3	4.8	0.12	0.27	实测样 9 块
柳 5 煤		3.192	0.415	0.34	0.11	9.6	4.5	0.25	0.44	实测样 16 块
柳 8 煤		1.437	0.579	0.42	0.23	10.7	6.4	0.26	0.46	实测样 11 块

*表中符号 σ_{bc} 或 σ_{bt} 分别表示该物性参数是垂直层理方向上的或平行层理方向上的。

理论和实践都证明,当对岩石试件施以单轴垂直向压应力时必然有水平拉应力产生,这些水平拉应力致使与它正交或与压应力成临界角的主裂纹开始失稳扩展。岩石试件的最大承载能力应发生在这些裂纹相互联接时。而压应力状态下岩石的断裂是大量裂纹沿断裂面发展的结果,所以用任何单一的强度准则,都很难解释这种断裂过程。Brace 用大理岩、花岗岩和细晶岩,夏继祥用砂岩在不同应力级别下进行了单轴压缩试验^[4],认为岩石扩容膨胀是在应力达到强度的三分之一至三分之二时开始发生,当应力达到 $0.85\sigma_{bc}$ 时,微裂隙大量增加,且与轴向应力方向呈较小角度 ($\leq 30^{\circ}$) 的微裂隙数目增长较快。岩石最终宏观断裂正是这些近乎平行轴向应力方向的大量微裂纹的产生、扩展、密集、集中沿相对较弱的方向相互贯通形成一定宽度的断裂破坏带的结果。

科研组分别对实验区 27 块煤岩试样进行了单轴抗压强度与变形试验。经分析研究将煤岩的脆性断裂的变形过程划分为以下几个阶段。

3.2.1 压密阶段

一般煤岩在轴向压力作用下与轴向呈垂直或倾斜的裂隙受压闭合。应力应变曲线表现为初始段下凹。这导致割线模量 E 值偏低。若消除这一影响,则弹性模量 E 值将明显提高。图 1(a) 为安二、1 煤 3 号试样在 Instrn1342 电液伺服材料试验机上单轴压缩实测荷载位移曲线,图 1(b) 为柳 5 煤 111 号试

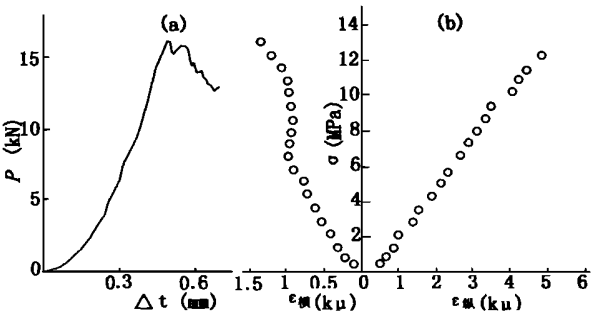


图 1 (a) —安二、1 煤 3 号样实测 $P-\Delta l$ 曲线;
(b) —柳 5 煤 111 号试样实测 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

样在常规万能材料试验机上单轴压缩实测应力应变曲线。试样的受力方向垂直层理,图中 $\varepsilon_{纵}$ 、 $\varepsilon_{横}$ 分别

表示试件轴向和横向应变。

3.2.2 弹性变形及微裂隙扩展阶段

试件除产生弹性变形外还表现为部分微裂隙表面具有摩擦滑动,开始不稳定扩展破裂,应力应变读值不稳定跳跃,但应力应变曲线大体呈线性比例关系。

3.2.3 扩容膨胀阶段

扩容现象是岩石破裂前最重要的前兆现象,此时岩石的非弹性体积增长,试件裂隙明显大量地出现、扩展、转化联接、密集、新裂隙出现、体积膨胀、裂隙再扩展。这时应力应变曲线明显偏离直线段,且跳跃变化较大。预示着岩石即将出现宏观断裂破坏。

3.2.4 宏观破裂阶段

当扩容发展到一定程度时,岩石便开始产生宏观的断裂,并且这一断裂过程较迅速和突然。在常规试验机上,这一破坏阶段被试验机的柔性特征所掩盖,不能获得一条完整的应力应变曲线。而在刚性试验机上或电液伺服材料试验机上,则可获得较为完整的曲线(图1(a))。

在试验中,若试件层理与轴向呈平行或夹角较小,则断裂面基本沿层理面呈纵向破裂;若夹角较大或垂直,则断裂基本沿割理、节理等裂隙追踪扩展、密集、联接集合,并沿相对较弱的方向相互扩展贯通而形成与轴向呈倾斜的断裂破碎带或试件完全呈破碎状。

4 煤岩力学性质在水压致裂设计施工中的应用

4.1 水压致裂目的岩层——横观各向同性体

几十年来,水力压裂技术应用于常规油气井开采中,在理论、设备和工艺技术各方面都有了长足地进展。但是在水压致裂造缝力学机理等基础理论的研究方面尚存薄弱之处。其最勉强的假定之一,就是将压裂目的岩层通常视为各向同性的弹性体来处理^[5]。

一般认为地壳浅部岩层(石)大多处于脆性状态,其应力应变关系接近于线弹性关系,实际上油气或煤层气等储层相关的地块是由具层状结构的沉积岩层(产状一般较平缓)所构成。实验已证实(表2),煤岩(或沉积岩层)在垂直层理方向上的弹性模量 E 要比平行层理方向上的大,且泊松比 μ 和各种强度参数也明显不同。这类具层状结构岩体的主要特征是:在平行层理的各个方向上(即横向)力学物理性质较为相近,可近似地认为相同。而平行岩层层理的任一方向与垂直层理方向上相比较,力学物

理性质差异则较大。因此,在研究其受力产生的力学响应时,一般应将沉积岩层,尤其是煤岩层,视为横观各向同性体,其5个独立物性参数在实验室中较易测得^[6]。

应用弹塑性理论对宏观各向同性体和水力压裂力学机理的分析,提出了新的水压致裂裂缝形式临界深度判据^[7]:

$$L_{cr} = \frac{E_2 (\sigma_{br}^H - \sigma_{br}^V) (1 - \mu_1)}{(\gamma - \gamma_s) [E_2 (1 - \mu_1) - 2 E_1 \mu_2]}$$

这是对文献[5]中相关理论的拓展。若代入煤岩相关参数,由上式算得 $L_{cr} \approx 310$ m,此结果与美国矿业局通过放射线示踪和开拓巷道观察的结果 $L_{cr} \approx 366$ m相比非常接近^[8],而据文献[5]相关公式算出结果则为 $L_{cr} \approx 1077$ m,与煤岩实际压裂情况相差甚远。同时此结果也证明了煤岩层在水力压裂施工中,裂缝形态以产生垂直裂缝为主。

4.2 水压致裂裂隙发育特点定性分析和施工建议

综上所述,对煤岩水力压裂裂缝的扩展、展布形态及发育特点及其影响因素和水力压裂施工建议,提出以下几点:

(1) 煤岩水力压裂结果比常规水力压裂模式要复杂得多。通常煤岩水力压裂裂缝是沿煤岩各级弱结合构造面(层理面、割理面或次生节理面等)开裂、延伸、并拓宽,而难以产生“新”的裂缝。无疑,同常规压裂结果相比裂缝要宽而短,缝面不规则,较粗糙,形态上可能会形成一些裂缝“网络”。这就要求在水力压裂施工中注意:对由于上述原因而导致水力压裂破裂压力梯度的明显提高,应采取适当施工措施。改进压裂液和压裂施工程序,避免出现砂堵。适当增加水力压裂布井密度,合理布井。

应将煤岩层视为横观各向同性体,对煤岩水力压裂造缝机理、裂缝形式判别临界深度界线以及破裂压力梯度都会产生重要影响。

(2) 煤层压裂裂缝主体形态大体以产生垂直裂缝为主,但裂缝和展布形态会在其扩展过程中产状产生转化,转化为倾斜裂缝,甚至水平裂缝。

(3) 煤层水压致裂裂缝的长、宽、高尺寸是决定煤层气井压裂增产效果的重要因素,它们受地层和煤岩力学性质和受力状态的制约,同时也受到水力压裂施工作业参数的影响。因此,应综合考虑这些条件和因素,而煤岩力学性质的研究结果为此提供了理论依据。

(4) 由于煤岩易破碎,脆性大,在水压致裂时,随着压裂裂缝的扩展,压裂液按一定规律向地层中滤

失,滤失的结果不仅影响裂缝尺寸和压裂液效率,还会对地层造成损害。因此,关于压裂液滤失的研究,应充分注意到煤岩结构构造和力学物理特性的影响。

(5) 水压致裂裂缝内摩阻的计算,也同煤岩的力学物理性质和结构构造特征及裂缝形态特征有着密切的联系。而缝内摩阻的计算是用以确定各时刻裂缝中各点处的净压力,它是裂缝尺寸和压裂滤失计算的主要影响因素。

[参考文献]

[1] 李先伟. 岩块力学性质[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1983. 123 ~ 146.

[2] 安欧. 构造应力场[M]. 北京:地震出版社, 1992. 6 ~ 60.

[3] 李贺. 岩石断裂力学[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1998. 85 ~ 112.

[4] 夏继祥,等. 单轴压力下砂岩破裂过程的实验研究[J]. 西南交通大学学报, 1982, 4:36 ~ 40.

[5] 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1987. 1 ~ 13.

[6] 刘北辰,等. 弹性力学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1979. 36 ~ 41.

[7] 李同林. 煤层水力压裂造缝机理分析[M]. 成都:天然气工业出版社, 1997, 17(4). 53 ~ 56.

[8] 华北石油地质局译. 煤层气译文集[C]. 郑州:河南科学技术出版社, 1990. 579 ~ 590.

THE MEASUREMENT AND ANALYSIS AND APPLICATION ON THE MECHANICAL PROPERTY OF COAL SEAM

LI Tong - lin ,WU Xiao - ming ,TU Hou - ze

Abstract :According to a lot of tests on the mechanical property of coal sample for measurement and analysis , the paper proves that it is lower elastic modulus , higher Poisson 's ratio , brittleness , and being easy of compression of coal seams in the test region , and it is obvious that the mechanical property between the direction of vertical and parallel bedding to make a great difference , then we must operate about the coal seam as isotropic in tranverse review . The authors apply Griffith 's brittle fracture theory etc. to test and research the process of brittle fracture in the state of stress at single axial pressure of coal seam . The paper makes analysis qualitatively for character of growing crack by hydraulic fracture . It also proposes some important and valuable suggestion about hydraulic fracture design and operations .

Key words :mechanical property of coal seam , hydraulic fracture , Griffith 's fracture theory , isotropic in tranverse review , critical depth criterion of failure form



第一作者简介:

李同林(1955年-),男,副教授。1978年毕业于中国地质大学(原武汉地质学院),后获硕士学位;现主要从事力学教学和力学在地质工程中应用的科研工作。

通讯地址:武汉市武昌喻家山 中国地质大学工程学院 邮政编码:430074

(上接第75页)

[参考文献]

[1] 藏建兵,王艳辉,王明智. Ti、Mo、W、Cr 及合金金属层与超硬材料之间结合性能的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1997, 7:6.

[2] 宋月清. 钴基金刚石工具体材料中碳化物形成元素的作用[J]. 人工晶体学报, 1993, 1:74.

[3] 芮松椿. 低温沉积金刚石——金属化学键工艺研究[J]. 矿冶工程, 1994, 3:56.

[4] 胡国荣,杨凯华,汤凤林,等. 金刚石表面化学镀 Ni - W - P 及高温下 WC 的生成机制[J]. 机械工程材料, 1997, 5:19.

[5] 徐湘涛. 金刚石上化学镀覆[J]. 电镀与环保, 1997, 3:13.

[6] 徐明霞,加藤昭夫. 均一沉淀法云母片被覆 TiO₂[J]. 应用化学, 1995, 6:38.

DEPOSITION TiO₂ ON SURFACE OF DIAMOND BY HOMOGENEOUS PRECIPITATION

PAN Bing - suo ,CHEN Yu - kang ,HU Guo - rong ,YANG Kai - hua

Abstract :Technology of depositing TiO₂ on surface of diamond by homogeneous precipitation phase transfer method are presented , TiO₂ is reduced into Ti in vacuum at high temperature , formation of Ti and TiC is verified by X - ray diffraction analysis .

Key words :diamond , homogeneous precipitation , TiO₂



第一作者简介:

潘秉锁(1973年-),男。1997年毕业于中国地质大学工程学院,硕士,主要从事金刚石工具的研究与应用。

通讯地址:湖北省武汉市 中国地质大学工程学院 邮政编码:430074