

文章编号: 1000-582X(2013)01-103-07

含瓦斯软弱煤三轴力学特性试验

赵洪宝^{1,3}, 张红兵², 尹光志¹

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 河南工程技术学校采矿系, 河南焦作 454000; 3. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 以由具有突出倾向的软弱煤制备的型煤试件为研究对象, 对围压、瓦斯压力二因素对含瓦斯软弱煤的力学特性影响进行了系统研究。试验结果表明: 围压对含瓦斯软弱煤的力学性质具有明显影响, 随着围压的增大, 含瓦斯软弱煤的压密阶段不明显且三轴强度逐渐增加; 围压对含瓦斯软弱煤弹性模量影响不明显, 对应力应变曲线形状影响亦不明显。随着瓦斯压力的增加, 煤样强度呈减小趋势; 围压较小时, 含瓦斯软弱煤强度受瓦斯压力影响较显著, 而围压较大时影响较小; 瓦斯压力对含瓦斯软弱煤的杨氏模量影响不明显, 且对煤样进入屈服阶段的变形量影响亦不明显; 瓦斯压力对煤样具有显著的力学影响, 而且也存在明显的化学作用; 含瓦斯软弱煤的应力应变曲线可由二次曲线表征, 并认为瓦斯压力影响可归结为等效围压效应。

关键词: 含瓦斯软弱煤; 瓦斯压力; 围压; 经验公式

中图分类号: TU452

文献标志码: A

Experiments on triaxial mechanical properties of soft coal containing gas

ZHAO Hongbao^{1,3}, ZHANG Hongbing², YIN Guangzhi¹

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Mining Department, School of Engineering and Technical of Henan, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Taking briquette specimens composed by soft coal with outbursting trends as research object, systematic research of the influence on triaxial mechanical properties of soft coal containing gas caused by confining pressure and gas pressure is done. The results show that confining pressure can significantly affect mechanical properties of soft coal containing gas, the compression phase of soft coal containing gas is obvious and the triaxial strength is increased gradually as confining pressure is increased; the influence on elastic modulus and shape of stress-strain curve is not obvious. The triaxial strength of soft coal containing gas shows decrease trend as gas pressure is increased; the influence on strength of soft coal containing gas caused by gas pressure is obvious when the confining pressure is smaller, but it is not obvious when the confining pressure is bigger. the influence caused by gas pressure on elastic modulus and deformation of yield step is not obvious; gas pressure has not only obvious mechanical effects, but also have chemical action on soft coal containing gas; stress-strain curve of soft coal containing gas can be expressed by conic, the influence caused by gas pressure can be considered as equivalent confining pressure effects.

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004110); 国家科技重大专项项目(2008ZX05034-002); 国家自然科学基金重点项目(50834005); 中央高校基本科研业务费资助项目(2009QZ03)

作者简介: 赵洪宝(1980-), 男, 中国矿业大学(北京)讲师, 现为西南资源开发环境及灾害控制工程教育部重点实验室访问学者, 主要从事岩石力学与安全技术工程的研究, (E-mail) hongbaozhao@126.com.

Key words: soft coal containing gas; gas pressure; confining pressure; empirical formula

煤与瓦斯突出事故是发生在井下的一种严重的矿井动力现象,它发生时可导致严重的矿井灾害,如煤流埋人、工作面设备被摧毁、矿井风流逆转等;在条件具备的前提下还可能导致瓦斯爆炸、粉尘爆炸等次生灾害发生,其危害性非常巨大,并正在逐渐成为煤矿开采过程中最主要的灾害类型之一。根据煤与瓦斯突出综合作用假说可知,含瓦斯煤的力学特性对于煤与瓦斯突出的发生和发展具有重要的控制作用;又根据前人研究的结果,煤与瓦斯突出多发生在软弱煤层或结构破碎煤层中^[1-2]。因此,研究含瓦斯软弱煤的力学特性对于弄清煤与瓦斯突出的发生机理及发生、发展过程具有重要的理论意义。

国内对于含瓦斯煤的力学特性研究工作开展较早,如曹树刚等研究了瓦斯压力对型煤试件内的瓦斯流动特性影响,得出了煤样内的瓦斯流动速度与瓦斯压力呈二次函数关系规律^[3];赵洪宝等进行了单轴压缩情况下含残余瓦斯时煤样的力学特性,得到了含残余瓦斯压力情况下的含瓦斯煤本构方程^[4];尹光志等研究了地应力对煤样内瓦斯渗流特性影响,认为煤样应力应变曲线与瓦斯渗流曲线具有较好的对应关系^[5];王维忠、赵洪宝等分别研究了含瓦斯煤的蠕变特性和三轴应力作用下煤岩蠕变特性,并均建立了本构方程^[6-7]。国内外学者在含瓦斯煤在不同条件下的本构方程研究方面也开展了较多的研究工作,如基于耗散理论^[8-9]、灰色系统理论建立的含瓦斯煤本构方程^[10-12];文献[12-15]分别根据各自的实验条件所得结果建立了含瓦斯煤蠕变力学模型和基于内时理论的本构模型。但对于易于发生煤与瓦斯突出的软弱煤体含瓦斯时的三轴力学特性研究,尚需进一步深入研究,且这一研究将对于弄清楚煤与瓦斯突出事故的发生、发展机理均具有高的理论价值。因此,笔者以含瓦斯软弱煤为研究对象,对其三轴条件下的力学特性进行了系统的研究,并根据试验结果得到了含瓦斯软弱煤应力-应变关系的拟合关系。

1 试验准备

1.1 试件制备

易于发生煤与瓦斯突出的软弱煤层具有煤体强度小、结构破碎等特点。因此,利用原煤进行含瓦斯软弱煤的力学性质研究难度较大。因此,广大学者多采用二次成型的型煤试件对其力学特性进行研究,根据前人研究结果,可以利用型煤试件代替原煤进行含瓦斯煤力学性质的研究^[1]。

试验煤样取自松藻煤电集团打通一矿的 7# 分层,该矿为全国典型的煤与瓦斯突出矿井,且其 7# 分层具有明显的软弱煤层的特点,并在开采过程中发生过多次不同程度的煤与瓦斯突出事故。煤样自现场取回后,进行粉碎、筛选,在含水率为 2% 条件下经加压成型制备尺寸为 $\phi=50\text{ mm}$ 、 $h=100\text{ mm}$ 的标准型煤试件,成型压力为 20 MPa。在型煤试件的制备过程中,不添加任何粘结剂,目的是使型煤能够尽可能的排除外部因素干扰而模拟原煤的力学特性,其主要力学参数如表 1 所示。

表 1 型煤试件与原煤主要力学参数

参数	型煤参数值	原煤参数值
单轴抗压强度/MPa	0.40	手捻可碎
弹性模量/MPa	9.00	—
泊松比	0.3	—
自然含水率/%	4	6.2
内聚力/MPa	0.91	—
内摩擦角/(°)	29	—
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.17	1.4

1.2 试验设备

试验全部在重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室进行。载荷由日本岛津公司生产的岛津 Ag-250 型伺服试验机提供,可提供最大轴向载荷 250 kN,可实现单轴压缩、蠕变、循环载荷作用下煤岩类材料力学试验;含瓦斯煤力学特性试验设备为自行研制开发的三轴煤岩瓦斯渗流蠕变试验系统,其三轴载荷由压力机施加载荷和液压油提供围压组成,可提供的围压范围为 0~20 MPa,可以用来进行煤岩蠕变、含瓦斯煤岩力学性质、瓦斯渗流特性等试验,如图 1 所示。试验用样见图 2。

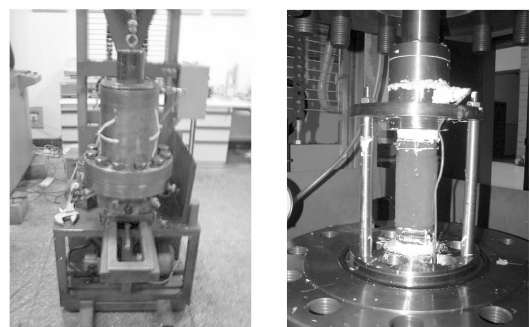


图 1 三轴煤岩瓦斯渗流蠕变试验系统

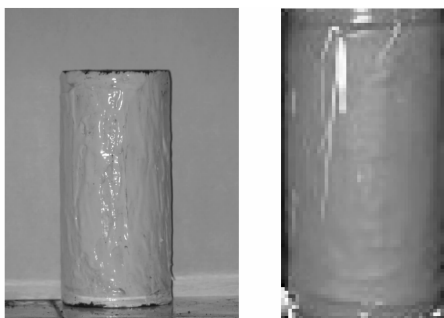


图 2 试验用样

1.3 试验方案

为得到含瓦斯煤三轴力学特性,分别进行瓦斯压力为 0.25、0.50、1.00 MPa 三种情况下的围压 2.0、4.0、6.0 MPa 条件下的含瓦斯软弱煤三轴力学性质研究,每种试验进行 3 块试件的实验。加载方式采用位移控制式,速率为 0.02 mm/min。试件准备好后,持续通瓦斯 8 h,待饱和吸附后进行试验。

2 试验结果及分析

2.1 围压对含瓦斯软弱煤力学特性影响

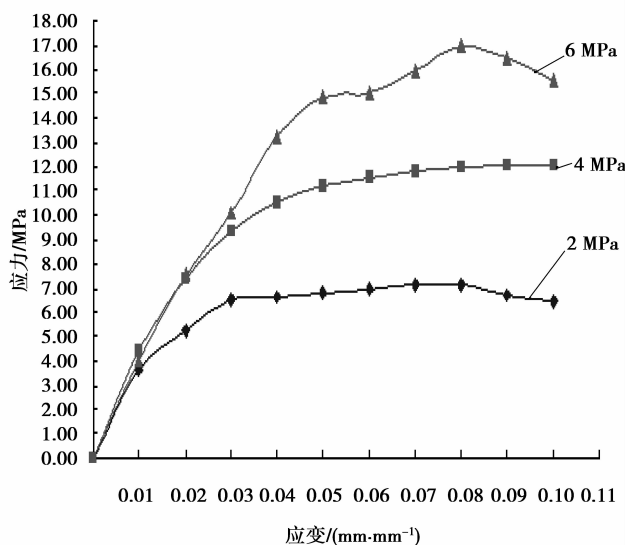
根据设计的实验方案,进行了含瓦斯软弱煤的三轴力学性质试验,获得了其典型的应力-应变曲线,如图 3 所示。

分析图 3 可知:

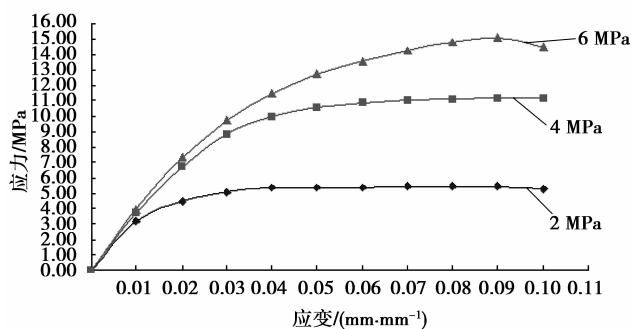
1) 三轴压缩时,含瓦斯软弱煤的压密阶段不明显。这可能是由于煤样试件强度较小,在形成三轴载荷环境时,事先施加的轴向载荷和围压导致煤样已经发生了压缩变形,即压密阶段;试验开始时的应力应变均直接进入了线性阶段所致,故而使煤样在变形特性曲线上表现出无压密阶段的特性。

2) 含瓦斯软弱煤的线弹性变形阶段线性较好,但围压对弹性模量影响不明显。这可能是型煤试件的均一性要明显高于原煤试件,故其变形性质能表现为较好线性;但型煤试件的均质性比原煤试件要强的多,故由其性质决定的变形特性表征参数——杨氏模量在围压变化时所受影响不明显,这也符合岩石力学的经典理论。

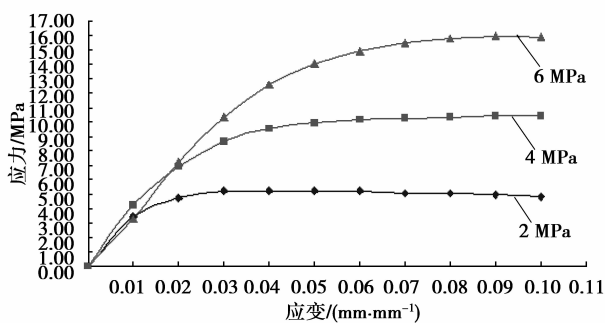
3) 随着围压的增加,含瓦斯软弱煤的强度呈增加趋势,但围压对其强度的影响并非线性。这可能是随着围压的增加,相同载荷作用于试件时产生的横向应变减小,从而使试件更难以满足发生剪切破坏的条件所致,但此影响随着围压的增加而逐渐减



(a) 瓦斯压力为0.25 MPa



(b) 瓦斯压力为0.50 MPa



(c) 瓦斯压力为1.00 MPa

图 3 含瓦斯软弱煤力学特性曲线

小,致使其表现为非线性特性。

4) 围压对含瓦斯软弱煤应力应变曲线形状影响不明显,含瓦斯软弱煤样的应力-应变曲线均基本呈开口向下的二次曲线型,特别是峰值强度之前的部分。

5) 含瓦斯软弱煤的破坏形式以剪切破坏为主。试验后含瓦斯软弱煤破坏形式如图 4 所示。

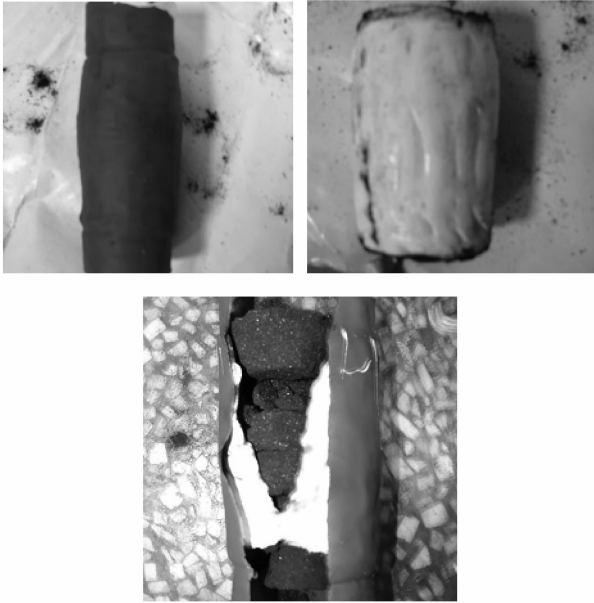


图 4 含瓦斯软弱煤破坏形式

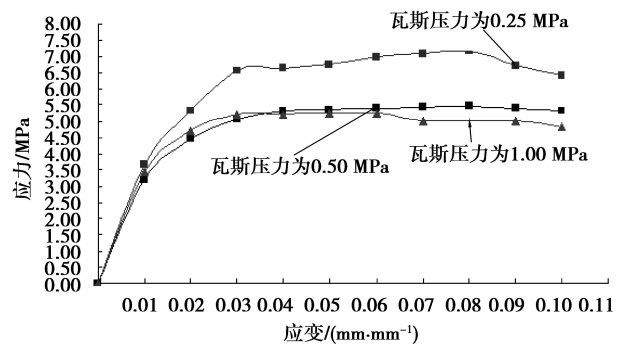
2.2 瓦斯压力对含瓦斯软弱煤力学特性影响

瓦斯压力在煤与瓦斯突出的发生、发展过程中起到主要动力作用,故对煤样的失稳、破坏也将有显著的影响。为得到瓦斯压力对含瓦斯软弱煤力学性质的影响,分别进行了瓦斯压力为 0.25、0.50、1.00 MPa 三种情况下的围压 2.0、4.0、6.0 MPa 条件下的含瓦斯软弱煤三轴力学性质研究,每种试验进行 3 块试件的实验。加载方式采用位移控制式,速率为 0.02 mm/min。试件准配好后,持续通瓦斯 8 h,待饱和吸附后进行试验。通过实验研究,得到了含瓦斯软弱煤的应力-应变典型曲线,如图 5 所示。

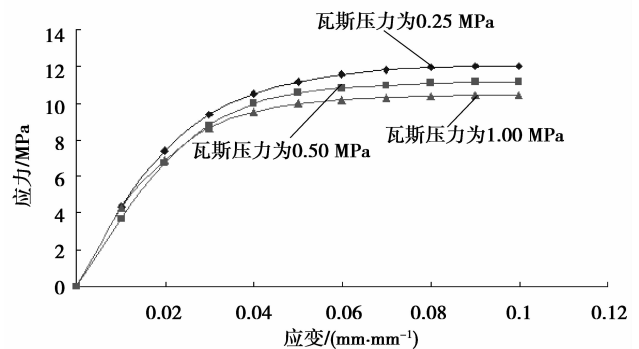
分析图 5 可知:

1) 相同围压条件下,瓦斯压力对煤样的强度具有显著影响,随着瓦斯压力的增加,煤样强度呈反向变化趋势。即,瓦斯压力越大,含瓦斯煤样的强度越小,且瓦斯压力变化幅度相等时,含瓦斯煤样的三轴强度变化也基本相同。这可能是孔隙瓦斯压力在煤样受载变形过程中被压缩时,在煤样内的孔隙结构内部形成反向作用力,表现在煤样孔隙结构内的尖端即为拉应力,且瓦斯压力越大产生的拉应力将越大,拉应力的存在并逐渐增加将促使煤样内孔隙结构的破坏,使煤样在较小载荷处破坏失稳,导致强度变小。

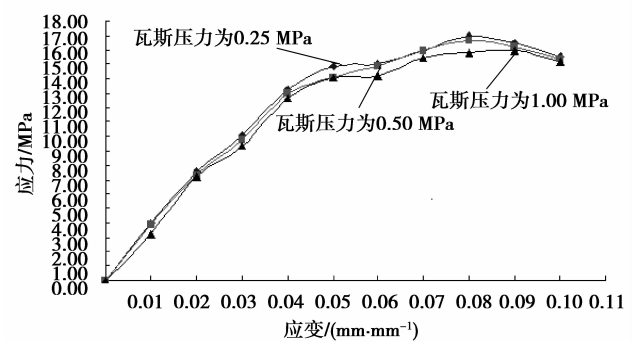
2) 含瓦斯软弱煤受瓦斯压力的影响大小与围压变化成反向变化关系,即:围压较小时,含瓦斯软弱煤强度受瓦斯压力影响较显著,而围压较大时,受瓦斯压力影响不明显。这可能是由于软弱煤本身强度



(a) 围压为 2.00 MPa



(b) 围压为 4.00 MPa



(c) 围压为 6.00 MPa

图 5 瓦斯压力对煤样强度影响

较小,在较大围压作用下,其力学性质将由围压影响决定,且瓦斯压力与围压比较要小得多,故而高围压下瓦斯压力对含瓦斯软弱煤强度影响不明显。

3) 瓦斯压力对含瓦斯软弱煤的杨氏模量影响不明显,且对煤样进入屈服阶段的变形量影响亦不明显。

4) 根据岩石力学相关理论并结合前人研究成果,计算得到了不同瓦斯压力条件下,含瓦斯软弱煤的内聚力和内摩擦角,如表 2 所示。

由表 2 可知,瓦斯压力的大小对于软弱煤样的内聚力与内摩擦角大小具有程度不同的影响。随着瓦斯压力的增加,软弱煤内聚力呈减小趋势,且变化非常明显;内摩擦角亦呈减小趋势,但变化不明显。

瓦斯压力对煤样固有力学参数的影响,说明瓦斯对煤样不但存在力学方面的影响,而且也存在明显的化学作用,即:吸附瓦斯和游离瓦斯均对煤样的破坏失稳具有显著影响。

表2 不同瓦斯压力条件下软弱煤内聚力及内摩擦角

瓦斯压力/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
0.25	0.73	25.4
0.50	0.42	25.1
1.00	0.26	24.8

3 含瓦斯软弱煤变形特性经验公式的建立

3.1 应力应变经验公式的建立

根据对含瓦斯软弱煤变形特性曲线分析,可知其具有以下特点:

1) 应力应变曲线总体表现为开口向下的抛物线型,基本为对称轴左侧部分;

2) 含瓦斯软弱煤的线弹性阶段弹性较好,但此阶段较短;

3) 含瓦斯软弱煤的屈服应变大小基本相等。

如对其峰值强度之前部分展开研究,则可用下式表述含瓦斯软弱煤的应力应变关系曲线。

$$\sigma = \alpha \cdot \epsilon^2 + \beta \cdot \epsilon + \gamma, \quad (1)$$

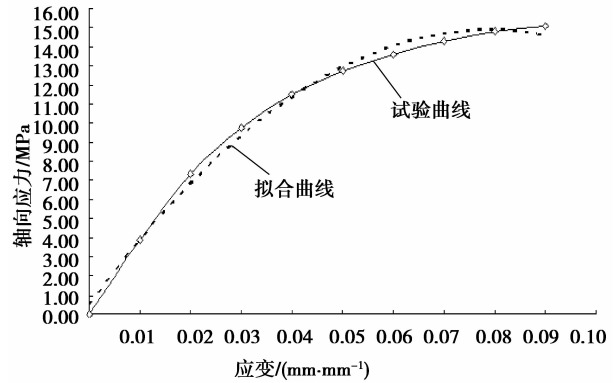
式中: α 、 β 、 γ 为拟合参数,由含瓦斯煤样力学性质决定。

以瓦斯压力为0.5、1.0 MPa和围压为4.00、6.00 MPa为例对其进行拟合分析,得到了相关拟合参数,如表3所示。

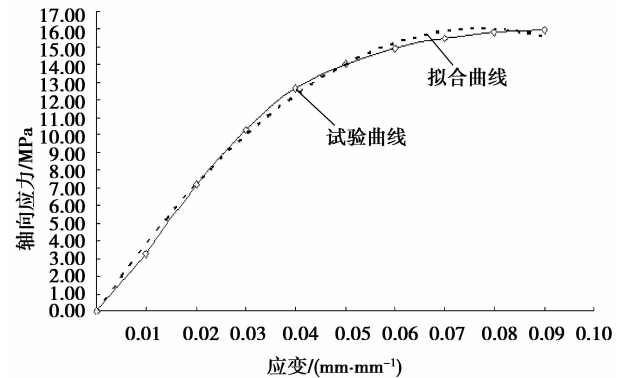
表3 经验公式拟合参数

瓦斯压力/ MPa	围压/MPa		参数名
	4.00	6.00	
0.5	-3 227.1	-2 908.2	α
	375.31	401.9	β
	0.209 4	0.157 3	γ
1.0	-3 264.7	-3 090.4	α
	361.47	441.92	β
	0.530 6	-0.326 7	γ

为检验拟合曲线的正确性,将拟合曲线与实验曲线进行对比分析研究,如图6。以瓦斯压力为0.5 MPa、围压为6.00 MPa和瓦斯压力为1.0 MPa、围压为4.00 MPa为例进行研究。



(a) 瓦斯压力0.5 MPa、围压为6.00 MPa



(b) 瓦斯压力为1.0 MPa、围压为4.00 MPa

图6 试验曲线与拟合曲线对比分析

由图6可知,拟合曲线和试验曲线具有较好的相似性,拟合曲线与实验曲线具有三个交点,分别位于线弹性阶段初期、屈服阶段初期和峰值阶段前期,这说明含瓦斯软弱煤的变形并非按理想曲线进行,这是由含瓦斯软弱煤本身材料的复杂性决定的。

3.2 煤样内瓦斯化学作用的等效围压效应

根据前人研究的成果,如果煤样内不含瓦斯时,煤样的三轴强度与围压的关系可用下式表述:

$$\sigma_1 = A + B\sigma_3. \quad (2)$$

式中: σ_1 为三轴抗压强度,MPa; σ_3 为围压,MPa; A 、 B 为拟合参数。

根据试验研究结果发现,煤样内的瓦斯不仅对煤样具有显著的力学作用,而且也具有显著的化学作用,此二者共同作用致使含瓦斯软弱煤的强度发生明显变化,根据有效应力原理并且不考虑化学作用时,含瓦斯煤的三轴强度可表示为:

$$\sigma_1 - p_{\text{CH}_4} = A + B(\sigma_3 - p_{\text{CH}_4}). \quad (3)$$

式中： p_{CH_4} 为瓦斯压力，MPa； A 、 B 为拟合参数。

煤样内的瓦斯对煤样的化学作用机理比较复杂，但根据前人的研究结果表明其化学作用主要表现为对煤样内的微结构的侵蚀作用，从而作用于煤样的强度。因此，可以把瓦斯对煤样复杂的化学作用考虑为对围压作用的抵消作用，从而降低了煤样的强度，即等效围压效应。此时含瓦斯煤样的三轴强度可表示为：

$$\sigma_1 - p_{\text{CH}_4} = A + B(\gamma \cdot \sigma_3 - p_{\text{CH}_4}). \quad (4)$$

式中， γ 为围压等效系数。

4 结 论

根据试验结果及分析，可得以下主要结论：

1) 相同围压条件下，瓦斯压力对煤样的强度具有显著影响，随着瓦斯压力的增加，煤样强度呈反向变化趋势。

2) 含瓦斯软弱煤的线弹性变形阶段线性较好，但围压对弹性模量影响不明显。随着围压的增加，含瓦斯软弱煤的强度呈增加趋势，但围压对其强度的影响并非线性；含瓦斯软弱煤样的应力-应变曲线均基本呈开口向下的二次曲线型，特别是峰值强度之前的部分；煤样破坏以剪切破坏为主。

3) 瓦斯压力对煤样的强度具有显著影响，随着瓦斯压力的增加，煤样强度呈反向变化趋势；含瓦斯软弱煤受瓦斯压力的影响大小与围压变化呈反向变化关系。

4) 瓦斯压力对含瓦斯软弱煤的杨氏模量影响不明显，且对煤样进入屈服阶段的变形量影响亦不明显；瓦斯压力对煤样内聚力影响显著，对内摩擦角影响不明显。

5) 根据实验结果分析，建立了含瓦斯软弱煤应力应变经验公式并提出瓦斯化学作用的等效围压效应。

参考文献：

- [1] 周世宁, 林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 科学出版社: 北京, 2007.
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治技术[M]. 中国矿业大学出版社: 徐州, 1990.
- [3] 曹树刚, 郭平, 李勇, 等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 595-599.
CAO Shugang, GUO Ping, LI Yong, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 595-599.

- [4] 赵洪宝, 李振华, 仲淑娟, 等. 单轴压缩状态下含瓦斯煤岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 131-134.
ZHAO Hongbao, LI Zhenhua, ZHONG Shuheng, et al. Experimental study of mechanical properties of coal rock containing gas under uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 131-134.
- [5] 尹光志, 黄启翔, 张东明, 等. 地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 336-343.
YIN Guangzhi, HUANG Qixiang, ZHANG Dongming, et al. Test study of gas seepage characteristics of gas-bearing coal specimen during process of deformation and failure in geostress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 336-343.
- [6] 王维忠, 尹光志, 赵洪宝, 等. 含瓦斯煤岩三轴蠕变特性及本构关系[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(2): 197-201.
WANG Weizhong, YIN Guangzhi, ZHAO Hongbao, et al. Triaxial creep characteristics and constitutive relation of gas-containing coal [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2): 197-201.
- [7] 赵洪宝, 尹光志, 张卫中. 围压作用下型煤蠕变特性及本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2305-2308.
ZHAO Hongbao, YIN Guangzhi, ZHANG Weizhong. Study of creep characteristics and constitutive relation of briquette under confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2305-2308.
- [8] Rao S N, Kumar N D. Earth pressure on caissons in marine clay under cyclic loading [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2007, 25(1): 15-35.
- [9] Prasad Y V S N, Rao S N. Experimental studies on foundations of compliant structures-II under cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 1994, 21(1): 15-27.
- [10] Kusumi H, Mine Y, Nishida K. Effect of structural anisotropy on deformation properties of granite under cyclic loading[J]. Zairyo, 1997, 46(9): 1029-1034.
- [11] Bai Z Z, Au F T K, Kwan A K H. Complete nonlinear response of reinforced concrete beams under cyclic loading[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2007, 16(7): 107-130.
- [12] 尹光志, 张东明, 何巡军. 含瓦斯煤蠕变实验及理论模型研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 528-532.
YIN Guangzhi, ZHANG Dongming, HE Xunjun. Creep experiment and theoretical model of gas-

- containing coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 528-532.
- [13] 姜耀东, 祝捷, 赵毅鑫, 等. 基于混合物理理论的含瓦斯煤本构方程[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1132-1137.
JIANG Yaodong, ZHU Jie, ZHAO Yixing, et al. Constitutive equations of coal containing methane based on mixture theory[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1132-1137.
- [14] 谈庆明, 俞善炳, 朱怀球, 等. 含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 514-518.
TAN Qingming, YU Shanbing, HU Huaiqiu, et al. Fracture of coal containing pressurized gas by sudden relieving[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 514-518.
- [15] 梁冰, 王泳嘉, 章梦涛. 含瓦斯煤的内时本构关系及其参数的实验研究[J]. 固体力学学报, 1996, 17(3): 229-234.
LIANG Bing, WANG Yongjia, ZHANG Mengtao. The study of endochronic constitutive equations of coal effected by gas and the determining of parameters by experiment[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996, 17(3): 229-234.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 97 页)

- [10] Liu Y G, Xiao L S, Tian J H. Optimized corrosion diagnosis of large-scale grounding grid [C] // Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [11] Liu J, Wang S Q, Ni Y F, et al. A new approach of testability evaluation for grounding grid corrosion diagnosis[C]// Proceedings of the Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April, 2008, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2008: 804-808.
- [12] 刘渝根, 吴立香, 王硕, 等. 大中型接地网腐蚀优化诊断实用化分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 417-420.  
LIU Yugen, WU Lixiang, WANG Shuo, et al. Practicality analysis for optimized erosion diagnosis of large and grid medium-scale grounding grid[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(4): 417-420.
- [13] 狄乐夫. 钢结构变电构架设计[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(24): 106-107.  
DI Lefu. Design of substation structural frames for steel[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(24): 106-107.
- [14] 刘渝根, 徐峰, 刘小二, 等. 拓扑结构改变对接地网故障诊断的影响分析[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 59-62.  
LIU Yugen, XU Feng, LIU Xiaoe, et al. Analysis on the influence of change of topology on the erosion diagnosis of grounding grids [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 59-62.
- [15] 刘渝根, 王硕, 田金虎, 等. 接地网腐蚀诊断优化测量方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(11): 1303-1306.  
LIU Yugen, WANG Shuo, TIAN Jinhu, et al. A corrosion diagnosis method for optimized measurement of grounding grids [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(11): 1303-1306.

(编辑 王维朗)