12月

2015 年

高 霞 刘文新 高 橙 為.含瓦斯水合物煤体强度特性三轴试验研究 [J].煤炭学报 ,2015 ,40(12):2829-2835.doi: 10.13225/j. enki.jees.2014.1578

Gao Xia ,Liu Wenxin ,Gao Cheng et al. Triaxial shear strength of methane hydrate-bearing coal [J]. Journal of China Coal Society 2015 40 (12): 2829-2835.doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1578

含瓦斯水合物煤体强度特性三轴试验研究

高 霞^{1 2} 刘文新^{2 3} 高 橙^{2 3} 吴 强^{2 3} 张保勇^{2 3} 汪立娜⁴

(1.黑龙江科技大学 建筑工程学院 黑龙江 哈尔滨 150022;2.瓦斯等烃气输运管网安全基础研究国家级中心实验室 黑龙江 哈尔滨 150022;3. 黑龙江科技大学 安全工程学院 黑龙江 哈尔滨 150022;4.云南农业大学 建筑工程学院 云南 昆明 650201)

摘 要: 含瓦斯水合物煤体力学性质准确测定是利用水合物技术预防煤与瓦斯突出的重要基础。 利用水合固化反应与三轴压缩一体化原位试验装置开展了饱和度变化对含水合物煤体强度特性影 响试验。结果表明: 随着围压增加(123 MPa),含瓦斯水合物煤体应力-应变曲线从软化型向硬 化型转化 破坏强度显著增加; 随着饱和度增加,煤样破坏强度线性增加,饱和度对黏聚力和内摩擦 角无明显影响; 与含瓦斯煤体的强度特性比较发现,水合物生成提高了煤体破坏强度、变形模量和 内摩擦角,而黏聚力没有明显变化。

关键词: 含水合物煤体; 水合物饱和度; 三轴压缩; 力学性质

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015) 12-2829-07

Triaxial shear strength of methane hydrate-bearing coal

GAO Xia^{1,2} ,LIU Wen-xin^{2,3} ,GAO Cheng^{2,3} ,WU Qiang^{2,3} ,ZHANG Bao-yong^{2,3} ,WANG Li-na⁴

(1.School of Architectural and Civil Engineering Heilongjiang University of Science and Technology Harbin 150022 , China; 2. National Professional Center
 Lab of Safety Basic Research forHydrocarbon Gas Pipeline Transportation Network Harbin 150022 , China; 3. School of Safety Engineering , Heilongjiang University of Science and Technology , Harbin 150022 , China; 4. School of Construction Engineering , Yunnan Agricultural University , Kunming 650201 , China)

Abstract: The accurate mechanical property measurements of gas hydrate-bearing coal are primarily important for coal and gas outburst prevention based on hydrate method. Authors investigated the bulk strength of the specimens at different levels of methane hydrate saturation using a self-developed integrated gas hydrate formation and triaxial compression apparatus. The results show that the stress-strain curves exhibit strain softening under confining pressure 1 and 2 MPa while exhibiting strain hardening under 3 MPa. The results also show that confining pressure has significant impact on the failure strength. The failure strength linearly increases with the increase of saturation ,with little fluctuation. The friction angle and cohesion are weakly dependent on saturation. Comparing with those of gas-bearing coal ,the methane hydrate formation increases failure strength deformation modulus and internal angle ,with no obvious cohesion variation.

Key words: gas hydrate-bearing coal; hydrate saturation; mechanical behavior; triaxial compression test

煤与瓦斯突出作为一种具有极其复杂动力现象 的工程地质灾害^[1],其发生机理与防治技术是国内 外学者研究热点^[2]。在中国未来的煤炭开采中需要 一种更加清洁、更加高效、更加安全、更加科学的理论

收稿日期: 2014-11-18 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51334005); 国家自然科学基金资助项目(51104062,51274267) 作者简介: 高 霞(1984—), 女,山西忻州人,讲师,博士。E-mail: klgaoxia1984@163.com

和技术^[3-4]。吴强等基于瓦斯水合物具有生成条件 温和、含气率高、分解热大等特性提出了煤层瓦斯固 化防突技术^[5]。其主要机理是采用中高压注促进剂 溶液法使突出危险煤层中 164 倍体积瓦斯在一定温 度-压力条件下固化为 1 体积冰状水合物,从而消除 破煤时高压瓦斯流,并结合含水合物煤较含瓦斯煤力 学性质改善作用,实现突出防治目标。因此,含水合 物煤体力学性质准确测试是瓦斯固化防突技术重要 理论基础。

煤体作为一种多孔介质,其富含水合物状态下力 学性质研究工作相关文献报道较为有限^[6],目前类 似研究主要集中于含天然气水合物多孔介质方面,如 含水合物土体、含水合物沉积物等,其主要基于天然 气水合物开采技术、自然界水合物地质灾害防治等研 究动机^[7-10]。后者多认为含水合物沉积物的力学性 质与水合物含量密切相关,且水合物存在会使其力学 性质发生变化^[11-18]。对于瓦斯水合物-煤体介质体 系,因瓦斯赋存量、注水量、水合物含气率等变化,会 出现不同水合物饱和度条件。因此,从饱和度影响角 度深入研究含水合物煤体强度特性具有较强科学意 义。

据此,以甲烷气体作为瓦斯气样,利用瓦斯水合 固化高压反应-三轴压缩作用一体化原位试验装置, 分析不同饱和度对含瓦斯水合物煤体三轴压缩特性 的影响。

1 试 验

1.1 试验设备

含水合物煤体力学性质试验装置如图1所示,其 主要由瓦斯水合固化实验系统与力学性质试验系统 组成,包括水合固化釜、三轴压缩荷载系统、恒温控制 箱、气体增压系统、数据采集系统等。其中,煤样安装 在水合固化-荷载高压釜,可承受最大围压 20 MPa、 最大轴压 40 MPa、釜内承压 16 MPa,可对样品进行 两端同时供气,能满足瓦斯水合物合成所需气体平稳 供应;恒温控制箱控温范围-20~60 ℃,温度波动度 <±0.5℃。

1.2 试验材料

型煤严格按照"煤与岩石物理力学性质测定方法(GB/T 23561.9—2009)"要求制作,尺寸 φ50 mm× 100 mm,脱模后仔细检查煤样,端面不平行度<0.05 mm。

型煤试样孔隙结构特征经美国康塔 PoreMaster33 型压汞仪进行测试,试验中汞的表面张力取 0.480 N/m,汞与煤接触角取140°,本次试验进汞压



图 1 含瓦斯水合物煤体力学性质原位测试装置

Fig. 1 Integrated apparatus for gas hydrate formation and triaxial compression on gas hydrate-bearing coal

力范围为 0.14~231 MPa,相应孔径范围 D 为 0.007 0~1000 μm。经压汞仪测得孔容 V_p为 0.189 2 mL/g。

试验所用瓦斯气体为 CH₄,纯度 99.99%,由哈 尔滨黎明气体有限公司提供;试验用水为自制蒸馏 水。

1.3 试验步骤

实验过程主要包括煤体中瓦斯水合物生成实验, 含瓦斯煤体与含瓦斯水合物煤体三轴压缩实验。具 体步骤如下:

(1)首先将制作好的型煤试件置于压力室中,缓 慢加载围压至0.5 MPa,通过进气管路通入0.3 MPa 气体压力,排空;反复3次,以排掉试样和管线里的空 气。

(2) 将 围 压 升 到 4.5 MPa, 孔 隙 气 压 升 到4.0 MPa,保持 24 h 使气体充分溶解在溶液中。

(3) 根据 Sloan 相平衡软件计算得到水合物的生 成温度和压力为 0.5 ℃ 和 2.77 MPa,因此为了保证 水合物的生成,将试验温度设定为 0.5 ℃,压力为 4.0 MPa,进行水合反应,反应过程中压力下降 0.1 MPa 即对孔隙压力进行补气,使其保持在 4.0 MPa,最后当气体压力连续6h不再下降时,认为 水合物完全生成。试样中瓦斯水合物完全生成后,开 始进行三轴压缩试验,先加围压至 4.0 MPa,保持釜 内瓦斯压力不变,然后施加轴压直至应变达到 15%, 试验终止。

(4) 在进行含瓦斯煤体力学试验时,瓦斯气压保 持在 4.0 MPa 吸附 24 h 后,进行含瓦斯煤体三轴压 缩试验。

(5)根据采集数据分析围压对含瓦斯水合物煤体的破坏强度、变形模量、黏聚力和内摩擦角。

(6)改变围压的大小,重复以上实验过程,进行 下一组含瓦斯水合物煤体三轴压缩实验。

1.4 水合物饱和度控制

水合物饱和度是指水合物体积与煤孔隙总体积 比值 ,即

$$S_{\rm H} = \frac{V_{\rm H}}{V_{\rm P}} \times 100\% \tag{1}$$

式中, V_H和 V_P分别为水合物体积和煤样孔隙总体积。

笔者采用气体过饱和法合成瓦斯水合物,从而以 注水量控制含瓦斯水合物煤体的饱和度。即基于瓦 斯水合物相平衡条件,在相平衡稳定区域内设定一定 驱动力条件,根据水合指数计算出所需气体量,在保 证瓦斯气体供给且时间充分的情况下,煤样中的水分 可与气体充分络合形成水合物^[4],通过控制初始含 水率来控制水合物饱和度。

对于甲烷气体,其水合过程可由化学方程式(2) 控制:

 $8CH_4 + 46H_2O \Longrightarrow 8CH_4 \cdot 46H_2O$ (2)

基于以上水完全参加反应的假设,本组试验设定 25%,50%和80%三种饱和度条件。结合1.2节煤样 压汞测试数据,可以计算出不同饱和度状态下初始注 水量:

$$V_{\rm H} = S_{\rm H} V_{\rm P} m_{\rm s}$$
(3)

$$m_{\rm H} = V_{\rm H} \rho_{\rm H}$$
(4)

$$m_{\rm w} = \frac{m_{\rm H} (46 \times 18)}{46 \times 18 + 8 \times 16}$$
(5)

其中, m_s 为试样型煤质量,取220g; V_P 为 0.1892mL/g; m_H 为水合物质量; m_s 为达到目标饱 和度所需水的质量;因甲烷水合物为1型水合物, 其密度为 ρ_H =0.91g/cm³。据此,计算出生成目标 饱和度为25% 50%和80%的含瓦斯水合物煤体需 水量分别为7.65,15.3和24.5g。对于3种饱和度 状态的含瓦斯水合物煤体,开展围压1,2,3 MPa下 9组三轴压缩试验。

2 试验结果与分析

2.1 不同饱和度下含水合物煤体应力-应变曲线特
 征

应力-应变关系分为应变硬化型和应变软化型 两种类型。图 2 为不同饱和度和围压条件下含瓦斯 水合物煤体应力-应变曲线。

整体而言,在围压较低时(1和2MPa),含瓦斯 水合物煤体呈现出一定的软化性;而围压较高 时(3MPa),含瓦斯水合物煤体表现出应变硬化的特 性。可以看出,随着围压增加,存在应力-应变关系



图 2 不同饱和度下含瓦斯水合物煤体应力-应变关系 Fig. 2 Stress-strain curves for hydrate-bearing coal with different hydrate saturation

类型转化 从应变软化型转化为应变硬化型。

在应力-应变曲线中,将应变 ε₁ = 15% 对应偏应 力作为破坏偏应力(即破坏强度),将偏应力达到 50%破坏偏应力时所对所对应割线模量 E₅0作为变形 模量,则不同饱和度下含水合物煤体破坏强度与围压 关系如图 3 所示。

由图 3 可见,破坏强度随围压增加而显著增加。 分析认为,围压增加抑制了压实过程试样的裂隙发 育,使其颗粒间摩擦力及胶结力增加,并导致其致密 程度增大,从而增加了试样强度、屈服应力和弹性区 域;此外,随着饱和度增加,破坏强度线性增加,但增 幅较小,说明饱和度对破坏强度影响较小。

图 4 为不同围压下饱和度与变形模量的关系,从 图 4 中可以看出 除个别试样的随机性,在围压的作 用下,孔隙被压密,而使含瓦斯水合物煤体刚度增大, 随着围压的增加,含瓦斯水合物煤体变形模量增加; 由于水合物生成时分布的随机性,造成孔隙充填不均 匀。因此使得含瓦斯水合物煤体变形模量与饱和度



图 3 破坏强度与含瓦斯水合物煤体饱和度关系

Fig. 3 Variations of the yield strength with the saturation for gas hydrate-bearing coal









2.2 饱和度对含水合物煤体强度指标影响

本研究中采用摩尔-库伦公式定律计算不同饱 和度下煤体的强度指标。根据摩尔-库伦定律,试样 的强度包络线可以表示为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{6}$$

其中 π 为剪切强度; σ 为法向应力; c 为黏聚力; φ 为 内摩擦角; τ 由黏聚力 c 和摩擦强度 $\sigma \tan \varphi$ 两部分组 成。由此绘制出不同饱和度下含瓦斯水合物煤体摩 尔圆(图 5) 以及黏聚力、内摩擦角与瓦斯水合物饱和 度关系曲线(图 6)。

分析发现,瓦斯水合物饱和度对黏聚力和内摩擦 角影响较小。在含不同饱和度水合物沉积物的强度 特性研究中^[7,11],水合物的生成会提高试样的黏聚强 度,黏聚力随饱和度的增长明显增加。而本研究中, 不同饱和度瓦斯水合物的生成并未对黏聚力和内摩 擦角产生明显影响,分析认为其可能受水合物在煤体 中的分布模式所影响。

胡高伟等^[19]利用 CT 原位探测装置,通过模拟沉 积物中天然气水合物的生成过程,直接观测水合物在



图 5 不同饱和度下含瓦斯水合物煤体应力摩尔圆

Fig. 5 Mohr's failure envelopes of coal samples bearing gas hydrate with saturations





沉积孔隙中等的微观分布特征,发现:沉积物孔隙空间中水合物形成并非单一模式,可能出现"悬浮"(即水合物在孔隙流体中、"接触"(水合物与沉积物颗粒呈接触状态,但未胶结沉积物颗粒)和"胶结"(水合物类似胶结物,将多个沉积物颗粒黏结在一起)的 混合模式。后续研究应利用 CT 和超声等装置监测 水合物在煤体中的分布模式,从而探索水合物饱和度 及其在煤体中微观分布特征对于试样力学性质影响。

3 水合物生成对煤体力学性质影响

为了确定水合物生成对煤体力学性质影响,选取 水合物生成前后煤样(即含瓦斯煤体与含水合物煤 体)应力-应变图、破坏强度和变形模量进行对比,探 讨瓦斯固化防突作用。含瓦斯煤体三轴压缩力学试 验为空白对比试验。试验过程中瓦斯气体压力为 4.0 MPa^[20],气体压力达到设定值时充分吸附 24 h 后排空瓦斯压力,进行三轴压缩试验,其应力-应变 关系如图 7 所示。







3.1 含瓦斯煤体应力-应变曲线

为了确定瓦斯水合物的生成对煤体力学性质的 影响,进行3组不同含水量条件下的含瓦斯煤体三轴 压缩试验,与含瓦斯煤体的试验结果进行对比。图7 为不同含水量条件下含瓦斯煤体的应力-应变曲线。

从图 7 中可以看出,含瓦斯煤体应力-应变曲线 为应变硬化型,煤体呈塑性破坏。同一围压下,不同 含水量对含瓦斯煤体的破坏强度并没有显著影响。

对含瓦斯煤体的试验结果进行整理分析 利用摩尔-库伦公式计算出煤体的黏聚力、内摩擦角等指标。由此绘制出含瓦斯水合物煤体应力摩尔圆 如图 8 所示。



图 8 不同含水量下含瓦斯煤体应力摩尔圆

Fig. 8 Mohr's failure envelopes of coal sample with gas under different water content

3.2 关于水合物生成影响的讨论

根据试验结果 将含瓦斯水合物煤体与含瓦斯煤体的力学参数进行统计 ,见表 1。

从表1可以看出,含瓦斯煤体在生成水合物后破 坏强度和变形模量明显增大,内摩擦角有所加大,而 黏聚力没有明显变化;说明水合物的生成对于含瓦斯 煤体抵抗破坏及变形的能力都有所增强,内摩擦角的 增大是含瓦斯水合物承载能力提高的一个原因。由 于试验目前只对强度较低的人工煤样进行了试验,无 法获得规律性较强的试验结果,今后将对强度更高的 人工煤样及原煤样进行进一步的试验研究,综合分析 水合物的生成对不同煤样力学性能影响。

表1 含瓦斯煤体与含瓦斯水合物煤体力学参数

煤炭学报

体系	含水 量/g	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/MPa	围压/ MPa	破坏强 度/MPa	变形模 量/MPa	体系	饱和 度/%	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/MPa	围压/ MPa	破坏强 度/MPa	变形模 量/MPa
含瓦斯煤体	7.65	23. 52	0. 47	1	2.73	98.17	含瓦斯水 合物煤体	25	30. 5	0. 55	1	3.91	352.76
				2	4.22	81.82					2	6.08	174.31
				3	5.33	98.88					3	8.07	270.51
	15.3	24.6	0. 56	1	3.28	93.60		50	31. 17	0. 49	1	3.95	186.01
				2	4.21	116.97					2	6.34	229.20
				3	6.25	118.66					3	9.01	242.61
	24. 5	24. 62	0. 62	1	3.32	76.77		80	33. 7	0. 64	1	4.69	207.80
				2	4.74	91.92					2	7.26	218.32
				3	6 16	100.96					3	10_1	308 91

Table 1 Comparisons of mechanical parameters between the gas-bearing coal and gas-hydrate bearing coal

4 结 论

(1)含瓦斯水合物煤体应力-应变曲线分析发现在较低围压(1,2 MPa)时,应力-应变曲线呈软化型;围压为3 MPa时,应力-应变曲线呈应变硬化型。随着围压增加,破坏强度显著增加;随着饱和度增加,破坏强度线性增加,但增幅较小;变形模量相关性小。

(2)利用摩尔-库伦强度理论对含瓦斯水合物煤 体三轴压缩试验结果进行分析发现,饱和度对黏聚力 和内摩擦角没有明显影响,后续工作应利用 CT 和超 声等装置监测水合物在煤体中的分布模式,从微观分 布特征角度解释其影响机理。

(3)含瓦斯煤体的应力-应变曲线呈硬化型,煤 体发生塑性破坏;水合物生成提高了煤体的破坏强度 和变形模量,增大了煤体的内摩擦角,初步说明水合 物的生成对于利用水合物技术预防煤与瓦斯突出有 一定理论可行性。由于试验目前只对强度较低的人 工煤样进行了试验,无法获得规律性较强的试验结 果,今后将对强度更高的人工煤样及原煤样进行进一 步的试验研究,综合分析水合物的生成对不同煤样力 学性能影响,尤其是进行多次重复试验降低试验的离 散性以及进行水合物分布对含瓦斯水合物煤体力学 性质的影响。

参考文献:

- [1] 付建华 程远平.中国煤矿煤与瓦斯突出现状及防治对策[J].采 矿与安全工程学报 2007 24(3):253-259.
 Fu Jianhua ,Cheng Yuanping.Situation of coal and gas outburst in Chinaand control countermeasures [J].Journal of Mining & Safety Engineering 2007 24(3):253-259.
- [2] 俞启香 程远平 蒋承林 、等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采 原理及实践[J].中国矿业大学学报 2004 ,33(2):127-131.

Yu Qixiang ,Cheng Yuanping ,Jiang Chenglin ,et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in t hick and high-gas seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2004 33(2): 127-131.

- [3] Yuan Liang. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2015 2(1): 3-11.
- [4] Cheng Yuanping , Wang Liang , Liu Hongyong , et al. Definition , theory methods and applications of the safe and efficient simultaneous extraction of coal and gas [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2015 2(1):52-65.
- [5] Wu Qiang He Xueqiu.Preventing coal and gas outburst using methane hydration [J].Journal of China University of Mining & Technology 2003, 13(1):7-10.
- [6] 吴 强 李成林 江传力.瓦斯水合物生成控制因素探讨[J].煤 炭学报 2005 30(3):283-287.
 - Wu Qiang ,Li Chenglin ,Jiang Chuanli.Discussion on the control factors of forming gas hydrate [J].Journal of China Coal Society ,2005 , 30(3): 283–287.
- [7] Winters W J ,Waite W F ,Mason D H ,et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering 2007 ,56(1-3): 127-135.
- [8] Hyodo M ,Nakata Y ,Yoshimoto N ,et al. Shear behavior of methane hydrate-bearing sand [A].Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Lisbon, Portugal, 2007: 1326-1333.
- [9] 魏厚振.颜荣涛.陈 盼.等.不同水合物含量含二氧化碳水合物 砂三轴试验研究[J].岩土力学 2011 32(S2):198-203.
 Wei Houzhen ,Yan Rongtao ,Chen Pan et al.Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different hydrate contents under triaxial shear tests [J].Rock and Soil Mechanics 2011 32(S2):198-203.
- [10] 颜荣涛,韦昌富,魏厚振,等.水合物形成对含水合物砂土强度 影响[J].岩土工程学报 2012 ,34(7),1234-1240. Yan Rongtao,Wei Changfu,Wei Houzhen, et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate-bearing sand[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(7),1234-1240.
- [11] 张旭辉,王淑云,李清平,等.天然气水合物沉积物力学性质的 试验研究[J].岩土力学 2010 31(10) 3069-3074.
 Zhang Xuhui, Wang Shuyun, Li Qingping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits [J]. Rock

and Soil Mechanics 2010 31(10) 3069-3074.

[12] 李令东,程远方,孙晓杰,等.水合物沉积物试验岩样制备及力 学性质研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012, 36(4):97-101.

> Li Lingdong , Cheng Yuanfang Sun Xiaojie et al. Experimental sample preparation and mechanical properties study of hydrate bearing sediments [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) 2012 36(4):97–101.

- [13] 刘 芳,寇晓勇,蒋明镜,等.含水合物沉积物强度特性的三轴 试验研究[J].岩土工程学报 2013 35(8):1565-1572.
 Liu Fang, Kou Xiaoyong, Jiang Mingjing, et al. Triaxial shear strength of synthetic hydrate-bearing sediments[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2013 35(8):1565-1572.10
- [14] Masui A ,Haneda H ,Ogata Y ,et al. Mechanical properties of sandy sediment containing marine gas hydrates in deep sea offshore Japan [A]. Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Lisbon ,Portugal 2007: 53-56.
- [15] Masui A, Haneda H, Ogata Y, et al. Effect of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediment [A]. Proceedings of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Seoul, Korea 2005: 364–369.
 Wu Qiang Z on mechanica China Coal So

- [16] Gilbert L Y Mason D H ,Pecher I A ,et al. Effect of grain size and pore pressure on acoustic and strength behavior of sediment containing methane gas hydrate [A]. Proceedings of 5th International on Gas Hydrate [C]. Trondheim ,Norway 2005: 507-516.
- [17] Ebinuma E ,Kamata Y ,Minagawa H ,et al. Mechanical properties of sandy sedi ment containing methane hydrate [A]. Proceedings of 5th International on Gas Hydrate [C]. Trondheim ,Norway 2005 3: 958-961.
- [18] Yun T S Santamarina J C ,Ruppel C.et al.Mechanical properties of sand ,silt ,and clay containing tetrahydrofuranhydrate [J]. Journal of Geophysical Research 2007 ,112: 1–13.
- [19] 胡高伟,李承峰,业渝光,等.沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J].地球物理学报,2014,57(5):1675-1682.
 Hu Gaowei, Li Chengfeng, Ye Yuguang et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space [J]. Chinese Journal of Geophysics 2014,57(5):1675-1682.
- [20] 吴 强,朱福良,高 霞,等.晶体类型对含瓦斯水合物煤体力 学性质的影响[J].煤炭学报 2014,39(8):1492-1496.
 Wu Qiang Zhu Fuliang Gao Xia et al.Effect of hydrate crystal type on mechanical properties of gas hydrate bearing coal [J].Journal of China Coal Society 2014, 39(8):1492-1496.