

微生物增产煤层气技术研究进展

郭红光* 王飞 李治刚

(太原理工大学 矿业工程学院 山西 太原 030024)

摘要: 微生物增产煤层气技术能够产生新的煤层气, 有效缓解能源紧张问题, 是煤层气开采、增产的研究热点。微生物增产煤层气技术的核心机理是煤的厌氧生物降解产甲烷。国内外研究者通过实验室模拟研究了本源和外源微生物的降解煤产甲烷能力及影响因素。部分煤层气公司富集或分离获得了高效产甲烷菌群, 并研究了微生物增产煤层气技术的现场实施方法。开发煤的预处理技术、构建新型高效菌群等可进一步提高微生物的增产煤层气能力, 促进微生物增产煤层气技术的应用。

关键词: 微生物增产煤层气, 煤的生物降解, 产甲烷菌, 实验室模拟, 现场试验

Research progress of microbially enhanced coalbed methane

GUO Hong-Guang* WANG Fei LI Zhi-Gang

(College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Microbially enhanced coalbed methane (MECoM), which can produce new coalbed methane (CBM) and efficiently release the stress of energy needs, is the hot point in the study on the exploitation and enhancement of CBM. The mechanism of MECoM is the production of methane via anaerobic biodegradation of coal. Stimulation experiments have been performed to investigate the ability of indigenous and exogenous microorganisms to produce methane by degrading coal. And the influential factors have been analyzed in laboratory as well. Diverse methanogenic flora have been obtained through enrichment or isolation methods by some CBM companies. The methods of field implementation have also been investigated. The abilities of microorganisms to produce methane by coal biodegradation could be improved by developing new methods of coal pretreatment, and structuring new microbial flora with high potential to degrade coal, which would promote the application of MECoM.

Keywords: Microbially enhanced coalbed methane, Coal biodegradation, Methanogen, Stimulation experiment, Field experiment

煤层气(Coalbed methane, CBM)的开采不仅能够改善能源供给结构, 有效缓解化石能源供应不足的能源危机, 同时能够促进煤矿的安全开采, 减少

温室气体的排放, 具有重大经济、社会和环境意义。近年来, 世界上各产煤大国相继开展了煤层气开发利用, 美国已率先实现煤层气的大规模商业化开

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51404163); 山西省基础研究计划项目(No. 2014021036-2)

*通讯作者: ✉: hongsinb.com@163.com

收稿日期: 2014-10-03; 接受日期: 2015-01-07; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2015-01-08

发。我国井下抽采和地面开采利用煤层气也非常活跃,煤层气产量逐年增大。然而,煤层气抽采率和利用率低的现状严重制约了煤层气产业的发展。如何实现煤层气的增产成为当今煤层气开发的重要内容。在众多煤层气增产技术中,微生物增产煤层气(Microbially enhanced coalbed methane, MECoM)技术以其绿色、无污染、能够产生新的煤层气等特点,已成为当前研究热点。

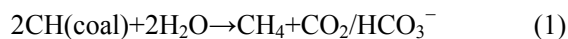
微生物增产煤层气是由 Scott 于 1999 年提出^[1]。他将其定义为将厌氧微生物种群及其所需营养物质注入到煤层中,利用微生物能够降解煤产甲烷的特性来实现煤层气的增产。他指出,这一技术不但存在产出新煤层气的资源潜力,同时微生物的降解作用可以增加煤层的渗透性,有利于煤层气的开采。此外,微生物增产煤层气与二氧化碳驱替增产煤层气相结合,能够将注入煤层的 CO₂ 转化为甲烷而被再次利用,从而实现资源的循环利用^[2]。同时,在废弃矿井以及难开采煤层(如薄煤层),该技术同样能够通过煤的原位生物气化而实现资源的充分利用。因此,微生物增产煤层气技术具有重大能源和经济价值,具有广阔的应用前景。

本文介绍了微生物增产煤层气的技术原理,对生物降解煤产甲烷的实验模拟研究和微生物增产煤层气的现场试验研究的现状及进展情况进行总结,以期推动微生物增产煤层气技术的应用及发展。

1 微生物增产煤层气技术机理及研究现状

微生物增产煤层气技术的核心机理是微生物降解煤产甲烷,也即生物成因煤层气的生成机理。煤是杂环大分子化合物,主要为芳香族及木质素衍生的包含氮、硫、氧的复杂碳水化合物,可以作为碳源被微生物生物降解^[3]。一般来说,大分子化合物的厌氧发酵产甲烷都符合传统生物气的生成理论,即产酸、产氢、产甲烷过程(图 1)。而与一般大分子有机物相比,煤分子的结构更加紧密,基本结构包含大量的苯环、脂环和杂环,微生物降解煤

的难度更大。Strapoć 等在总结了大量实验数据的基础上,提出微生物厌氧降解煤产甲烷的可能途径^[4]。煤的生物降解首先是煤分子中官能团或共价键的断裂,使煤分子转变为较小的分子结构片段;然后,在一系列微生物胞外酶的作用下产生中间代谢产物;这些中间产物经微生物发酵后转化为产甲烷底物,最后被产甲烷菌利用生成甲烷^[4]。他们在研究了伊利诺伊盆地生物成因气及相关微生物群落结构后,推测出该地区煤降解产甲烷的大致途径^[3](图 2)。从能量角度来看,煤的生物降解产甲烷过程可看作是煤中的能量转移给甲烷(反应式 1)。



虽然已有研究揭示出生物降解煤的代谢途径,并检测到部分潜在中间代谢产物,如芳香族化合物、脂肪族化合物和烷烃类化合物等^[5-7],然而,大分子的煤被逐步降解为小分子化合物的具体过程还没有形成统一认识,尤其是煤分子的厌氧断裂还

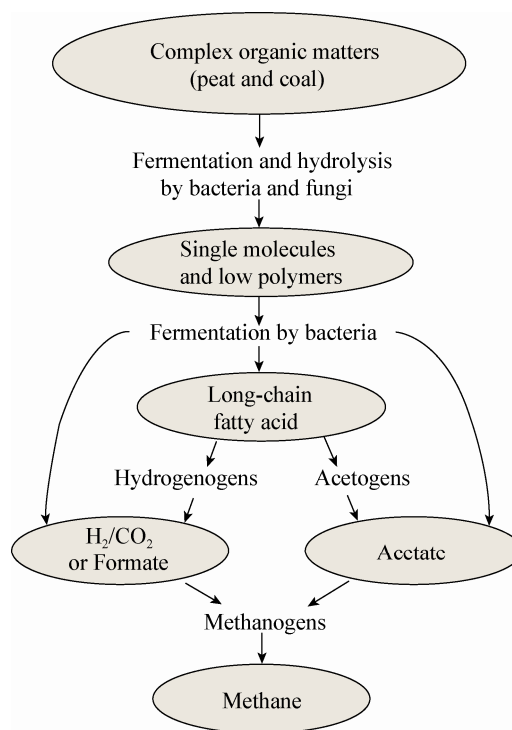
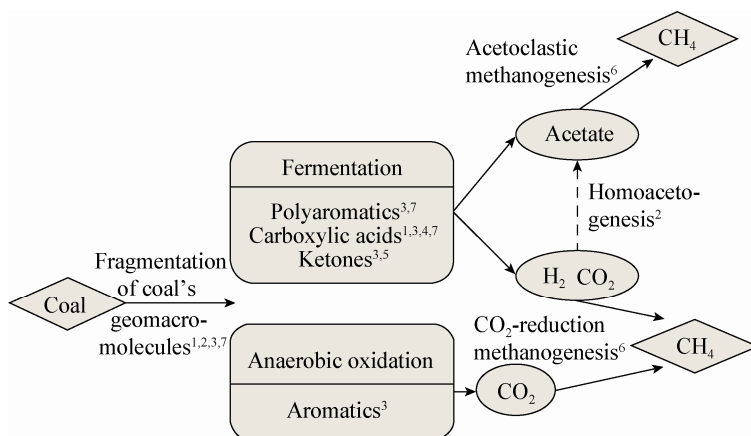
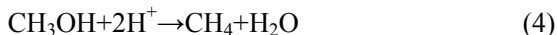


图 1 复杂有机质厌氧发酵产甲烷的代谢途径示意图
Figure 1 Metabolic schematic of methane production via anaerobic fermentation of complex organic matters

图2 煤的生物降解过程及中间产物^[3]Figure 2 Schematic showing the process of coal biodegradation and the intermediates^[3]

Note: 1: *Spirochaeta*; 2: *Sporomusa*; 3: *Cytophaga*; 4: *Acidoaminococcus*; 5: *Flavobacterium*; 6: *Methanocorpusculum*; 7: *Rhodobacter*.

没有获得充足证据。只有最后一步,即甲烷的生成是比较清晰的。产甲烷菌在煤层中生成甲烷的机理与其在其他生境中一致。根据产甲烷菌的产甲烷机理,将生物成因煤层气分为氢气营养型(二氧化碳还原型)、乙酸营养型和甲基营养型(反应式 2-4)。其中,氢营养型产甲烷途径在煤层气田最为常见,乙酸营养型次之,而甲基营养型产甲烷途径最少。到目前为止,仅在日本北海道煤层气田、美国 Cook Inlet Basin 以及中国柳林地区检测到甲基营养型产甲烷途径^[8-10]。虽然甲基型产甲烷途径对 Cook Inlet Basin 和柳林煤层气田的生物成因气贡献非常大,但对于甲基型产甲烷途径所需底物(如甲醇、甲胺等)的产生路径,我们仍然知之甚少。



2 微生物增产煤层气实验研究进展

微生物在增产煤层气中的关键作用是毋庸置疑的。由于煤分子的复杂性,煤的厌氧生物降解产甲烷过程需要多种功能微生物协同完成,如发酵细菌、水解细菌、纤维素降解菌、产氢产乙酸菌、产甲烷菌等。一般来说,增产煤层气的功能微生物按其来源可分为本源微生物和外源微生物。本源微生物是煤层气田原位煤层生存着的土著微生物;外源

微生物多来源于湿地、沼气池等非煤层气田的生境。国内外研究学者利用实验室模拟煤的生物降解过程,研究了微生物的降解煤产甲烷能力,通过测定产气过程中微生物的群落特征及影响产气的相关因素,寻找高效降解煤的功能微生物菌群以及提高产甲烷效率的方法。

2.1 国外微生物增产煤层气的实验模拟研究进展

国外研究学者致力于将本源微生物应用于微生物增产煤层气技术当中。Green 等从粉河盆地煤层气田产出水中富集了降解煤产甲烷的微生物菌群,他们研究发现,温度从 22 °C 升高到 38 °C 时,产甲烷速率提高 300%;培养液 pH 从 7.4 降低到 6.4 时,产甲烷速率提高 680%;煤颗粒粒径从 1 700 μm 缩小到 106 μm 时,产甲烷速率提高 200%^[11]。Harris 等通过模拟实验研究了粉河盆地和 Fort Yukon 地区煤样的生物产甲烷,他们发现,乙酸和甲烷在产生过程中的竞争代谢会影响甲烷的生成量;煤中的氯仿抽提物的浓度与甲烷生成量存在一定正比关系;由此得出,煤中的有效生物底物和不同微生物菌群之间的竞争是煤层产甲烷的两大影响因素^[12]。Ünal 等同样富集了粉河盆地产出水中的产甲烷菌群,研究了 8 种微量元素(铁、镍、钴、钼、锌、锰、硼和铜)对产甲烷、*mcrA* 基因表达水平和产甲烷菌群结构的影响,发现适当添加微量元素能够促进煤层气

产出水中产甲烷菌活性,甲烷生成量增加 37%,缺少或是过量都会抑制甲烷生成;培养后的产甲烷菌主要为 *Methanobacterium subterraneum* 和 *Methanobacterium formicicum*^[13]。Fallgren 等通过采集澳大利亚、印尼和中国的褐煤煤样进行了本源微生物降解煤产甲烷试验,结果证实,通过添加营养物质激活褐煤中的本源微生物以产生甲烷是可行的^[14]。Gupta 等认为矿井水中的微生物群落更适合用于煤的生物降解;并分析了矿井水中微生物群落生物降解煤的影响因素,得出最佳固液比、pH、煤粒度和培养温度分别为 1:10, 7.0–7.5, –60+25 μm 和 35 $^{\circ}\text{C}$, 在最佳条件下的甲烷产生量为 479.3 cc/100 g 煤^[15]。此外,部分学者研究了外源微生物的降解煤产甲烷潜能。Jones 等从现代湿地中富集获得了产甲烷的微生物聚合体(WBC-2),该聚合体在模拟实验中能够产生 80 $\mu\text{mol/g}$ 煤的甲烷^[16]。同时,该聚合体被证实具有促进停产煤层气井再生产的潜能,主要微生物菌群是 *Geobacter* sp., 甲烷的生成与 *Methanosaeta concilii* 的生长具有相关性^[17]。

2.2 国内微生物增产煤层气的实验模拟研究进展

国内研究学者更多关注外源微生物对煤的生物降解研究,近年来也取得了可喜成果。林海课题组从厌氧污泥中富集了产甲烷菌群,并以煤为碳源对其进行了驯化,证实该菌群可以利用乙酸盐和甲醇产甲烷,也可以利用煤产甲烷,最佳产气 pH 值为 7.0, 煤的粒径越小,产气量越大^[18-19]。苏现波课题组对微生物降解煤产甲烷进行了一系列实验模拟研究。研究发现,盐度、pH 和氧化还原电位都会影响低煤阶煤的生物甲烷生成。随盐度升高,甲烷生成量和浓度都逐渐减少;甲烷生成的最佳 pH 为 8.0;较低的氧化还原电位有利于产甲烷菌的生长,甲烷生成的最适氧化还原电位是 –284 mV^[20-21]。此外,该课题组的研究还发现,白腐真菌能够降解煤,降解后的煤中 C 含量减少, H 和 O 的含量增加^[22];产甲烷菌-白腐真菌联合培养是生物降解瘦煤产甲烷的最佳优化方案^[23-24]。王爱宽等从褐煤中富集得到了厌氧微生物菌群,生物气生成模拟实验证

实该菌群能够降解褐煤产甲烷;在培养过程中,纤维素酶始终保持较高活性,辅酶 F420 活性有两个高峰期;同时,产气也经历两个高峰期;生物源甲烷主要通过乙酸发酵途径生成,培养后期部分甲烷具有二氧化碳还原成因^[25-27]。

综合已有研究结果,微生物增产煤层气的实验研究主要针对生物降解煤的影响因素开展,包括煤的表观特性、微生物的营养成分等。研究工作发现,本源和外源微生物在实验室研究中都表现出煤的降解、产甲烷能力,本源微生物菌群更加适合用于微生物增产煤层气技术。同时,已有研究也提供了一些提高生物降解煤能力的方法,如提供适宜的营养成分(微量元素等)、适宜的培养条件(温度、pH、固液比、氧化还原电位等等)。详细阐明这些方法对微生物增产煤层气的实际影响还需要模拟煤层原位情况以深入分析、研究。

3 微生物增产煤层气技术的现场试验研究进展

实验室的模拟研究证实了本源和外源微生物都能够降解煤产生甲烷,说明微生物增产煤层气技术在理论和实验上具有可行性。同时,已有研究显示煤层原位能够实现生物降解煤产甲烷,如:生物成因气在煤层气田普遍存在,更是某些煤层气田煤层气的一个重要来源^[4,8];新的生物成因煤层气也被报道产生于废弃煤矿中^[28];在煤层气田原位煤层及产出水、生产煤矿井和废弃煤矿中都检测到产甲烷菌及相关细菌的存在^[8,28-29]。这些研究都为实际生产中利用微生物降解煤来再生、增产煤层气奠定了基础。

与实验室模拟条件相比,煤层原位情况要复杂得多。为此,美国的一些煤层气公司已经开展了微生物增产煤层气的现场试验研究,并申请了相关专利(表 1)。Luca Technologies 公司在美国的粉河盆地成功进行了微生物增产煤层气的现场试验。该公司的 Pfeiffer 等分离培养了降解煤产甲烷菌群,确定了能够促进微生物降解煤的化合物,并提出相应的

表 1 微生物增产煤层气技术相关美国专利统计表
Table 1 The statistics of United States patents associated with microbially enhanced coalbed methane

专利号 Patent No.	专利名称 Patent title	第一发明人 The first-named inventor	专利权人 Assignee
US7640978	Biogenic fuel gas generation in geologic hydrocarbon deposits	Robert S. Pfeiffer	Luca Technologies Inc.
US8067223	<i>Thermacetogenium phaeum</i> consortium for the production of materials with enhanced hydrogen content	Robert S. Pfeiffer	Luca Technologies Inc.
US7696132	Chemical amendments for the stimulation of biogenic gas generation in deposits of carbonaceous material	Robert S. Pfeiffer	Luca Technologies Inc.
US8479813	Biogenic fuel gas generation in geologic hydrocarbon deposits	Verlin Dannar	Luca Technologies Inc.
US7832475	Biogenic methane production enhancement systems	Song Jin	University of Wyoming Research Corporation
US8127839	Formation pretreatment with biogenic methane production enhancement systems	Song Jin	University of Wyoming Research Corporation
US7556094	Method for converting coal to biogenic methane	Michael A. Urynowicz	University of Wyoming
US8448702	Methods of enhancing biogenic production of methane from hydrocarbon-bearing formations	Gerardo Vicente Toledo	Synthetic Genomics, Inc.
US7977056	Methods of identifying stimulants for biogenic methane production from hydrocarbon-bearing formations	Gerardo Vicente Toledo	Synthetic Genomics, Inc.
US8176978	Method for optimizing in-situ bioconversion of carbon-bearing formations	Robert A. Downey,	Ciris Energy, Inc.
US5424195	Method for in situ biological conversion of coal to methane	Jon C. Volkwein,	Secretary of the Interior
US8247009	Biological methane production from coal, manure, sludge, wastes, or other carbonaceous feedstocks with simultaneous sequestration of CO ₂	Rathin Datta	UChicago Argonne, LLC
US6143534	Microbial process for producing methane from coal	William M. Menger	Reliant Energy Incorporated

微生物增产煤层气实施方案,以此申请了专利(EP1877201B1、US7640978、US8067223和US7696132)。同时,在如何激活原位微生物群落、优化微生物增产煤层气技术、微生物增产煤层气技术的具体实施方案等方面,多家企业和研究机构进行了相关研究,并申请了专利。

综合已有专利,用于增产煤层气的微生物菌群主要通过分离和富集两个途径获得。如,分离获得的 *Thermacetogenium phaeum* 能够降解有机物产生乙酸,从而与产甲烷菌相互配合,实现降解煤产甲烷的过程。其他微生物的加入能够增强 *Thermacetogenium phaeum* 降解煤的能力,如 *Gelria*、*Clostridia*、*Moorella*、*Pseudomonas* 等属的细菌。对煤层气田原位产出水或地下水进行富集培养,能够增大其中的微生物丰富度,也可以实现煤的降解产甲烷。此外,产出水经浓缩、回注煤层后,可以有效增强微生物降解煤的能力;10倍浓缩产出水后能够提高甲烷产量近5倍。同时,通过添加营养物,如添加含磷化合物(如磷酸二氢钾)和羧化合物(如乙酸盐)、添加C、N、P以及维生素、微量元素等,能够刺激、激活煤层气田原位微生物群落的活性,从而促进生物降解煤,提高甲烷产量。此外,多种煤的前处理方法被提出,以提高煤对微生物的亲合力,促进微生物降解煤产甲烷。如,碱水解和木质酶前处理结合产酸菌和产甲烷菌能够有效提高褐煤的生物降解产甲烷。利用酸、碱、氧化剂和溶解剂来前处理煤,能够提高煤中溶解碳的有效含量,增强生物甲烷的产生。在微生物增产煤层气的具体实施中,有研究学者提出,将煤层气井分为微生物注入井和甲烷生产井,利用微生物菌液的注入将煤层保持在一定压力之内。考虑到温度对微生物活性的影响,在微生物菌液注入之前,可注入一定温度的热水以提高煤层温度,使得微生物菌群能够在最适温度下实现煤的高效降解。

目前公布的相关专利主要描述了微生物增产煤层气的实施技术、生物降解煤的增强方法等。非

常遗憾的是,这些技术和方法对微生物增产煤层气的现场作用效果如何还是未知,各专利中均未对其效果进行说明和验证。更进一步的现场验证研究还有待开展。

4 存在问题及研究方向

综上所述,微生物增产煤层气技术的可行性已被证实,且具有诱人的应用前景,已引起国内外研究学者和相关企业的普遍关注。然而,微生物增产煤层气的实际应用还非常有限,增产煤层气的效果还不够显著。因而,微生物增产煤层气技术的相关研究还需进一步深入、加强,主要表现在以下几个方面:

(1) 微生物增产煤层气技术的原理、机理,也即生物降解煤产甲烷的认识仍然不足。虽然已有研究学者提出了生物降解煤产甲烷的代谢框图,但在代谢细节上仍存在灰色地带。生物降解煤产甲烷的代谢过程中,有哪些微生物参与,功能如何,各微生物在代谢过程中的地位如何等问题还未得到满意回答。因此,微生物增产煤层气技术的机理研究需要加强关键微生物的分离、代谢特征分析、生物降解煤的中间代谢产物分析等研究。

(2) 微生物增产煤层气技术实施效果的提高有赖于生物降解煤关键步骤、限速步骤的快速化。因此,微生物增产煤层气实验研究应加强对于煤分子的初始断裂、大分子的降解等关键步骤的影响因素分析、高效微生物菌群的获取等。对于关键微生物还可以采用基因工程方法、新型突变技术等手段,构建、获取高效功能菌。同时,煤体预处理方法应绿色、环保、对微生物无害,以增强实际应用价值。

(3) 现阶段关于微生物增产煤层气的研究多处于实验模拟研究阶段。在实验模拟中,为微生物提供了丰富的营养资源、良好的生存环境。而现场煤层环境相对恶劣,以煤为主要物质,有机质和营养物质偏少,且微生物菌液的注入需要加压进行。因此,在实验模拟过程中应考虑煤层原位及技术实施过程中的环境因子,以利于更加真实地反映现场条件。

参考文献

- [1] Scott AR. Improving coal gas recovery with microbially enhanced coalbed methane[C]//Mastaletz M, Glikson M, Golding S. Coalbed Methane: Scientific, Environmental, and Economic Evaluations[R]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999: 89-111
- [2] Su JC, Xiao G. A proposed pathway to stimulate biogenic methane production from coal and injected carbon dioxide[J]. Coal Conversion, 2013, 36(4): 90-93 (in Chinese)
苏佳纯, 肖钢. 利用微生物促进煤层间 CO₂甲烷化的新方法[J]. 煤炭转化, 2013, 36(4): 90-93
- [3] Strapoc D, Picardal FW, Turich C, et al. Methane-producing microbial community in a coalbed of the Illinois Basin[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(8): 2424-2432
- [4] Strapoc D, Mastalerz M, Dawson K, et al. Biogeochemistry of microbial coal-bed methane[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2011, 39: 617-656
- [5] Orem WH, Voytek MA, Jones EJ, et al. Organic intermediates in the anaerobic biodegradation of coal to methane under laboratory conditions[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(9): 997-1000
- [6] Orem WH, Tatu CA, Lerch HE, et al. Organic compounds in produced waters from coalbed natural gas wells in the Powder River Basin, Wyoming, USA[J]. Applied Geochemistry, 2007, 22(10): 2240-2256
- [7] Ulrich G, Bower S. Active methanogenesis and acetate utilization in Powder River Basin coals, United States[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 25-33
- [8] Shimizu S, Akiyama M, Naganuma T, et al. Molecular characterization of microbial communities in deep coal seam groundwater of northern Japan[J]. Geobiology, 2007, 5(4): 423-433
- [9] Strapoc D, Ashby M, Wood L, et al. Significant contribution of methyl/methanol-utilising methanogenic pathway in a subsurface biogas environment[C]//Whitby C, Skovhus TL. Applied microbiology and molecular biology in oilfield systems[R]. Springer, 2010: 211-216
- [10] Guo H, Yu Z, Liu R, et al. Methylophilic methanogenesis governs the biogenic coalbed methane formation in Eastern Ordos Basin, China[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 96(6): 1587-1597
- [11] Green MS, Flanagan KC, Gilcrease PC. Characterization of a methanogenic consortium enriched from a coalbed methane well in the Powder River Basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 34-45
- [12] Harris SH, Smith RL, Barker CE. Microbial and chemical factors influencing methane production in laboratory incubations of low-rank subsurface coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 46-51
- [13] Ünal B, Perry VR, Sheth M, et al. Trace elements affect methanogenic activity and diversity in enrichments from subsurface coalbed produced water[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3: 175
- [14] Fallgren PH, Zeng C, Ren Z, et al. Feasibility of microbial production of new natural gas from non-gas-producing lignite[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 115: 79-84
- [15] Gupta P, Gupta A. Biogas production from coal via anaerobic fermentation[J]. Fuel, 2014, 118: 238-242
- [16] Jones EJ, Voytek MA, Warwick P, et al. Bioassay for estimating the biogenic methane-generating potential of coal samples[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 138-150
- [17] Jones EJ, Voytek MA, Corum MD, et al. Stimulation of methane generation from nonproductive coal by addition of nutrients or a microbial consortium[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(21): 7013-7022
- [18] Lin H, Sui M, Wang H. Domestication of microbially enhanced coalbed methane microorganism[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1359-1363 (in Chinese)
林海, 隋梦琪, 汪涵. 微生物增产煤层气菌种的驯化[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1359-1363
- [19] Wang H, Lin H, Dong Y, et al. Experiments on the gas production of brown coal degraded by exogenous methanogens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 764-768 (in Chinese)
汪涵, 林海, 董颖博, 等. 外源产甲烷菌降解褐煤产气实验[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 764-768
- [20] Su XB, Xu Y, Wu Y, et al. Effect of salinity and pH on biogenic methane production of low-rank coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1302-1306 (in Chinese)
苏现波, 徐影, 吴昱, 等. 盐度、pH 对低煤阶煤层生物甲烷生成的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1302-1306
- [21] Xia DP, Chen X, Su XB, et al. Impact of oxidation-reduction potential on the generation of biogenic methane in low-rank coals[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 107-110 (in Chinese)
夏大平, 陈鑫, 苏现波, 等. 氧化还原电位对低煤阶煤生物甲烷生成的影响[J]. 天然气工业, 2012, 32(11): 107-110
- [22] Su XB, Chen X, Xia DP, et al. Study on degradation of different rank coals by white-rot fungus[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2013, 32(3): 281-284 (in Chinese)
苏现波, 陈鑫, 夏大平, 等. 白腐真菌对不同煤阶煤的降解作用研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 32(3): 281-284
- [23] Su XB, Wu Y, Xia DP, et al. Experimental study on the simulated biological methane production process with lean coal[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1055-1059 (in Chinese)
苏现波, 吴昱, 夏大平, 等. 瘦煤制取生物甲烷过程模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1055-1059
- [24] Su XB, Wu Y, Xia DP, et al. Experimental design schemes for bio-methane production from coal and optimal selection[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 132-136 (in Chinese)
苏现波, 吴昱, 夏大平, 等. 煤制生物甲烷实验方案设计及优选[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 132-136
- [25] Wang AK, Qin Y. Performance of indigenous bacteria during the biogenic gas generation from brown coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 40(6): 888-893 (in Chinese)
王爱宽, 秦勇. 褐煤本源菌在煤层生物气生成中的微生物学特征[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 40(6): 888-893
- [26] Wang AK, Qin Y, Lan FJ. Processes and possible pathways of biogenic coalbed methane generation from lignites based on parent methanogen[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 485-489 (in Chinese)
王爱宽, 秦勇, 兰凤娟. 基于本源菌的褐煤生物气生成过程与可能途径[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 485-489
- [27] Wang AK, Qin Y, Lin YC, et al. Enrichment and cultivation of natural methanogen and simulation of biogenetic gas generation from brown coal samples[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 80-85 (in Chinese)
王爱宽, 秦勇, 林玉成, 等. 褐煤中天然产甲烷菌富集培养与生物气产出模拟[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 80-85
- [28] Beckmann S, Lueders T, Kruger M, et al. Acetogens and acetoclastic methanosarcinales govern methane formation in abandoned coal mines[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(11): 3749-3756
- [29] Wei M, Yu Z, Zhang H. Microbial diversity and abundance in a representative small-production coal mine of Central China[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(7): 3821-3829