

消溶剂在采煤工作面瓦斯治理的研究与应用

郭凯¹, 田世祥^{1*}, 李鹏^{2,3}, 林华颖¹, 许石青¹, 江泽标¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中煤科工集团 沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122;

3. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要:为揭示消溶剂对煤层消突的可行性,基于甲烷氧化菌与瓦斯之间的关系,以青菜塘煤矿 11703 采区为研究对象,选用甲烷氧化菌作为消溶剂,运用注液系统将消溶剂注入煤层试验孔,通过效验孔观察消溶剂注入前后煤层瓦斯浓度、二氧化碳体积分数、瓦斯压力和瓦斯含量的变化。结果表明:在注入瓦斯消溶剂后,由于甲烷氧化菌的分解作用,11703 工作面煤层瓦斯压力有效降低,稳定至 0.3~0.6 MPa;瓦斯浓度从 10.07% 降为 1.07%;二氧化碳体积分数有所上升;瓦斯含量由 12.73 m³/t 降为 4.61 m³/t。注液前后的变化,证明了微生物治理瓦斯在工程实践中的可行性。

关键词:消溶剂;甲烷氧化菌;瓦斯压力;残余瓦斯;瓦斯浓度

中图分类号:X948 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)02-0062-06

Study and Application of Gas Ablating Agent for Gas Control at Coal Face

GUO Kai¹, TIAN Shixiang¹, LI Peng^{2,3}, LIN Huaying¹, XU Shiqing¹, JIANG Zebiao¹

(1. College of Mining Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Shenyang Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Fushun 113122, China;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: In order to reveal the feasibility of gas ablation agent as coal seam gas outburst elimination technology, based on the relationship between methane-oxidizing bacteria and gas, this paper takes 11703 mining area of Qingcaitang Coal Mine as the research object, selects methane-oxidizing bacteria as gas ablation agent, and uses liquid injection system to inject gas ablation agent into test hole of coal seam. The changes of coal seam gas concentration, carbon dioxide concentration, gas pressure and gas content before and after ablation agent injection is observed by effect holes. Results show that after injecting gas antisol, due to the decomposition of methane oxidizing bacteria, the methane gas pressure of the 11703 working surface is effectively reduced and stabilized to 0.3~0.6 MPa. Gas concentration decreases from 10.07% to 1.07%. CO₂ levels have risen. The gas content decreases from 12.73 m³/t to 4.61 m³/t. The changes before and after liquid injection proves the feasibility of microbial gas control in engineering practice.

Keywords: gas ablation agent; methane oxidizing bacteria; gas pressure; residual gas; gas concentration

煤与瓦斯突出是煤体受到采动影响^[1],瓦斯压力超出煤岩体强度,致使煤岩体及瓦斯大量涌出,给煤矿造成人员财产损失^[2].其中瓦斯含量与瓦斯压力是煤与瓦斯突出的关键指标^[3].因此,研究如何有效降

收稿日期:2021-06-05

基金项目:贵州科技计划资助项目(黔科合支撑[2019]2887号;黔科合支撑[2020]4Y050号)

*通信作者, E-mail: husttsx@163.com

低瓦斯含量与瓦斯压力对于煤与瓦斯突出的防治具有重大意义。

随着生物技术的不断进步,利用微生物治理瓦斯成为一种具有创新性的方法,并取得了一定成效。1906年,荷兰科学家 Sohngen^[4]第一次分离出甲烷氧化菌;1970年,Whittenbury^[5]第一次将甲烷氧化菌的种类详细划分超过100种,也标志着甲烷氧化菌第一次开始了详细研究;陈东科等^[6]将甲烷氧化菌放入煤体中,研究了微生物降解瓦斯规律,通过实验验证了微生物降解瓦斯的可行性;韩冰等^[7]围绕甲烷氧化菌及甲烷单加氧酶在应用过程中存在的问题进行了研究,利用同位素探放针解析甲烷氧化菌的组分与活性,为甲烷氧化菌的研究做了进一步的理论支持;韩亚涛^[8]从淮南片组煤矿中筛选出富集甲烷氧化细菌,研究了甲烷氧化菌的群落组成和纯化菌株,不同培养条件下甲烷氧化菌对煤表面吸附的影响,揭示了煤吸附表面的应变规律以及煤吸附后表面性质的变化;郭爱军、孟秀峰等^[9]在寺家庄矿石门运用瓦斯消融技术进行了3次工程试验,结果显示,瓦斯平均含量分别下降3.64,2.24,3.81 m³/t,消溶剂逐渐开始了工程运用。目前,国内外对微生物治理瓦斯都集中在理论研究方面,缺乏在煤矿现场利用微生物治理瓦斯的工程研究。

为了进一步研究微生物治理瓦斯在现场的实际使用效果,本文拟采用消溶剂治理煤层瓦斯,通过对比消溶剂治理前后煤层瓦斯参数变化说明其实际应用效果,为微生物治理瓦斯技术提供工程依据。

1 消溶剂治理瓦斯原理

甲烷是碳源的最高存在形式,而甲烷氧化菌是以碳源为唯一能源的生物^[10]。消溶剂是通过生物技术筛选,从自然界中提取培养出甲烷氧化菌,通过特种生物酶的参与,在煤层打注液钻孔,使用高压注液泵将消溶剂注入煤体,通过一系列的生化反应^[11],在短时间内吞噬煤层中的瓦斯,形成无毒无害且对煤质无影响的有机物,从而大幅度降低煤层瓦斯含量,消除瓦斯突出动力源、减少瓦斯涌出量,达到治理瓦斯和安全生产的目的。

在自然界中,甲烷氧化菌分布广泛,包括稻田、沼泽、垃圾场、淡水和淡水沉积物、山地和森林等瓦斯聚集的地点。科学家从这些地方提取,通过 NMS 及 ANMS 等无机盐培养基进行富集培养^[12]。根据培养的菌种类型、种类数量、赋存环境、使用环境的不同将甲烷氧化菌分为 Type I 型、Type II 型这 2 种类型^[13],详细参数见表 1,结合矿井使用环境及使用用途将 Type II 型甲烷氧化菌确定为消溶剂的菌种类型。

表 1 甲烷氧化菌分类及特征

	Type I 型	Type II 型
菌种类型	Methylococcaceae	Methylocystaceae 和 Beijerinckiaceae
种类数量	少	多
赋存环境	高氧,富营养	低氧,寡营养
使用环境	低甲烷浓度	高甲烷浓度

在甲烷氧化菌与瓦斯作用过程中^[14],甲烷氧化菌是生物催化剂,它具有其他催化剂所不具备的特殊物质,而这种生物酶经过改性处理后,会有选择性地对某些生化反应起催化作用。其重要性在于它特有的结构是多维形状且与基团某一部分相匹配,一旦这两部分相结合,基团分子中特定的化学键就像锁被打开了一样发生改变。甲烷氧化菌反应机理如图 1 所示,其中甲烷单加氧酶(MMO)在分子作用下将甲烷氧化为甲醇,甲醇再与甲醇脱氢酶(MDH)反应生成甲醛,继而通过丝氨酸循环或戊糖磷酸途径进行细胞合成,最后甲醛在甲醛脱氢酶(FADH)和甲酸脱氢酶(FDH)的作用下生成甲酸、二氧化碳和水。在生物催化剂正常环境条件

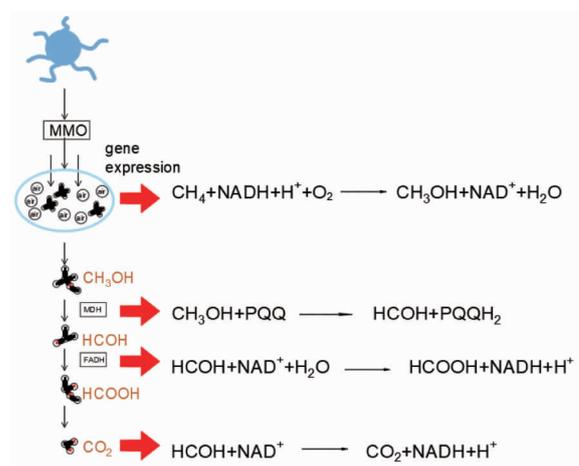


图 1 甲烷氧化菌反应机理

下,酶所产生的酶化反应是化学反应速度的10万~20万倍,为有机生物快速反应奠定了基础,而采用生物酶方法,再通过靶向嗜瓦斯菌的参与,可以在没有高温条件下,促进瓦斯消溶、化合、转化。

因此初步认定,将消溶剂在煤矿上运用,可以通过降低瓦斯含量来降低瓦斯压力,达到防治煤与瓦斯突出的问题。

2 工程试验

2.1 煤矿概况

青菜塘煤矿^[15]位于六枝特区郎岱镇辖区.煤矿呈单斜构造,走向北西 60° ,倾向北东 63° ,属于突出矿井.煤矿开采深度+1 470~+1 000 m,开采分为2个水平,6个采区,采区布置为双翼开采,采用走向长壁后退式俯伪斜柔性掩护支架采煤法.煤矿煤层特征如表2所示^[16].

表2 青菜塘煤矿煤层特征表

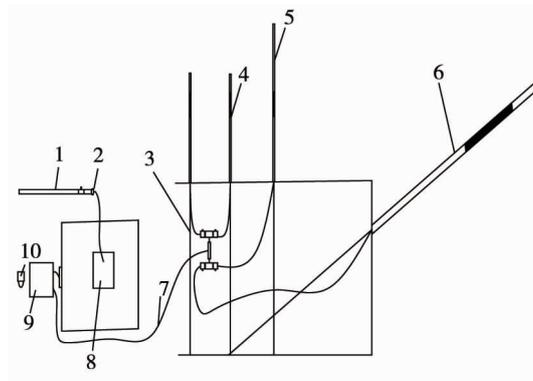
煤层编号	煤层厚度/m	夹石层数	顶板岩性	底板岩性	煤层间距/m
1 [#]	0.82	0~2	泥岩或泥灰岩	泥岩或粉砂岩	11
2 [#]	0.71	0~1	泥岩或泥灰岩	泥岩或粉砂岩	13
3 [#]	1.49	1~2	泥岩或细砂岩	泥岩或粉砂岩	44
7 [#]	4.52	3~5	泥岩或细砂岩	泥岩或细砂岩	133
17 [#]	0.71	2	泥岩或细砂岩	泥岩或细砂岩	11
18 [#]	2.21	0~1	泥岩或细砂岩	泥岩或粉砂岩	14
19 [#]	1.18	0~1	泥岩或细砂岩	泥岩或粉砂岩	16

7[#]煤层是主采煤层,煤层平均煤厚为4.52 m,煤层倾角为 55° 左右,工作面顶底板由泥岩和细粒砂岩构成.选取11703工作面为研究对象,工作面长150 m,选取65 m的推进距离.11703工作面最大瓦斯压力为1.68 MPa,瓦斯浓度为10.07%,二氧化碳体积分数为0.04%,瓦斯含量为 $12.73 \text{ m}^3/\text{t}$.

2.2 工程设备

消溶剂包括基础液和干粉小料2部分,基础液通过一次性防漏桶携带至试验地点,干粉小料用袋装运至试验地点.一袋干粉小料与一桶基础液混合使用,在煤层注液处注入水箱中.为达到消溶剂的最佳使用要求^[17],运输平巷回风平巷温度尽量保持 32°C ,井下水的 $\text{pH}<8$.

消溶剂注液系统具体装置如图2所示,主要由水箱、喷雾泵、高压输液管、封孔器等组成,将消溶剂注液系统在11703作业现场将施工设备连接起来.将配置好的消溶剂注入水箱,搅拌均匀,使用支撑杆将高压输液管连接至提前打好的实验孔.喷雾泵的作用是为了降低作业时产生的粉尘,以达到消溶剂的最佳使用效果.



1-巷道水管;2-井下水表;3-支撑杆;4-封孔器;5-试验孔;6-高压输液管($\phi 10 \text{ mm}$);7-高压输水管($\phi 19 \text{ mm}$);8-水箱;9-BPW250/10型喷雾泵;10-隔爆开关

图2 消溶剂注液系统

2.3 工程钻孔参数及布置方式

为达到工程使用的最佳效果,要求使用消溶剂的煤层属于原始应力状态.钻孔布置的平面图和剖面图如图 3 所示,在 11703 运输平巷、11703 回风平巷腰线布置钻孔,孔距 10 m.在回风平巷布置 1[#],2[#],4[#],5[#],7[#]钻孔,在运输平巷布置 3[#]和 6[#]钻孔.1[#]孔距离工作面 25 m,2[#]孔与 1[#]孔相隔 10 m,3[#]孔距离工作面 30 m,将 1[#],2[#],3[#]设置为试验孔,为对使用消溶剂的前后效果进行对比,在 1[#],2[#],3[#]试验孔下方 500 mm 处设置 4[#],5[#],6[#]注液效验孔,7[#]未注液效验孔距离 2[#]孔 20 m,.钻孔布置具体参数如表 3,孔深为 70 m,孔径 75 mm.钻孔周围压力趋于稳定后,将传感器放置在效验孔底端,封孔采取两堵一注的方式,用囊袋封孔,封孔长度为 20 m,封孔承受压力需为 15 MPa,当消溶剂从返浆管流出时停止注液.

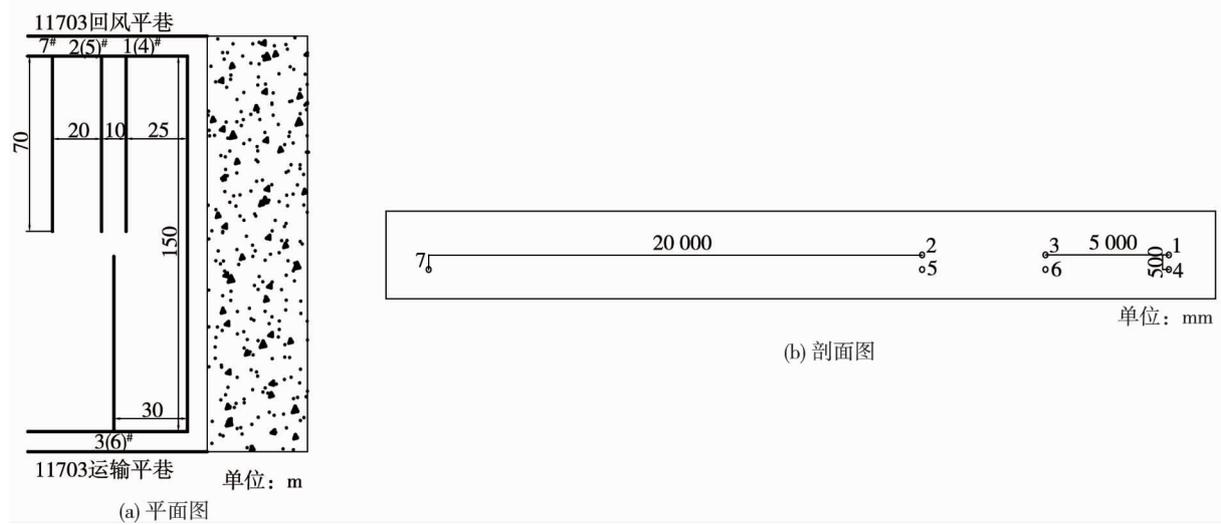


图 3 11703 钻孔布置

表 3 11703 试验孔效验孔参数

钻孔性质	孔号	角度/(°)	钻孔深度/m
试验孔	1 [#]	-27	70
试验孔	2 [#]	-27	70
试验孔	3 [#]	63	70
效验孔	4 [#]	-27	70
效验孔	5 [#]	-27	70
效验孔	6 [#]	63	70
效验孔	7 [#]	-27	70

2.4 结果分析

在青菜塘煤矿 11703 工作面钻孔施工完毕后,封孔等待各实验孔压力稳定,确保钻孔的有效性后按照要求对相应钻孔使用甲烷氧化菌,通过 24 h 瓦斯浓度和二氧化碳体积分数的变化观察消溶剂的使用情况,再观测 24 h 内的瓦斯压力变化和施工前后的瓦斯含量来评估煤与瓦斯突出的可能性,确定消溶剂的有效性.

瓦斯浓度变化如图 4 所示,消溶剂在注入初始 3 h 内,瓦斯浓度几乎没有太多改变,4[#],5[#],6[#],7[#]钻孔瓦斯浓度都在 10% 左右.随着反应的进一步进行,4[#],5[#],6[#]钻孔瓦斯浓度开始大幅度降低,在 24 h 后,瓦斯浓度从之前的 10.07% 下降到 4.07%,降解率达到 59.6%.在初步使用消溶剂时,甲烷氧化菌落数量有限,甲烷消耗受到限制;另一方面,钻孔周围煤体在未受到甲烷氧化菌影响时,瓦斯处于高浓度平衡状态,在初始消耗时,周围煤体能快速进行补给,使得初始 3 h 瓦斯浓度变化不大,随着反应的不进行,钻孔周围煤体瓦斯浓度大面积降低,以至于后期瓦斯浓度降幅明显.

4[#],5[#],6[#],7[#]钻孔二氧化碳体积分数变化如图 5 所示,初始 3 h 内,4[#],5[#],6[#],7[#]钻孔二氧化碳体积分数

变化不大,维持在0.05%左右.随着反应的逐渐进行,二氧化碳体积分数逐渐上升,24 h后在0.25%左右逐渐稳定.由于甲烷氧化菌的反应机理,钻孔内部二氧化碳体积分数应该随甲烷氧化菌反应速率增加而增加,但在封孔3 h内甲烷氧化菌处于大量繁殖阶段,该阶段氧化速率受到影响,因此体积分数上升不明显.3 h后甲烷氧化菌充分分布在钻孔中,并且达到相应数量,甲烷氧化菌与甲烷快速反应,生成物中二氧化碳大量产生,故图5中在反应初始的3 h后,4[#],5[#],6[#]钻孔所测体积分数的快速增长.由于后期受到瓦斯浓度影响,氧化菌规模上升减缓,处于稳定状态.所以24 h后,所测二氧化碳体积分数趋于稳定.在经过甲烷氧化菌的充分反应后,在24 h后4[#],5[#],6[#]钻孔二氧化碳体积分数是7[#]钻孔的5倍左右.

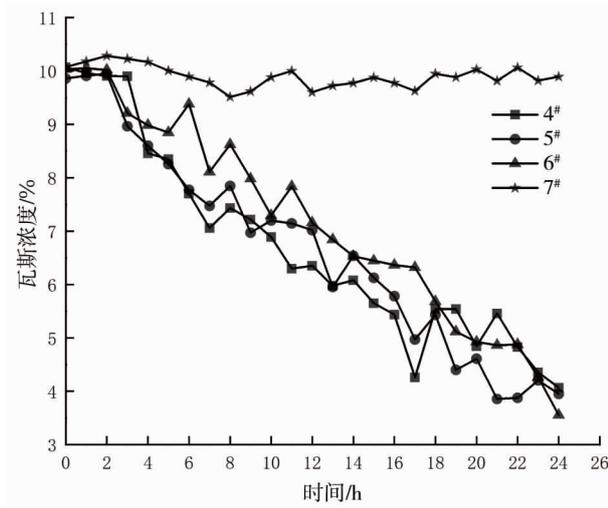


图4 瓦斯浓度变化

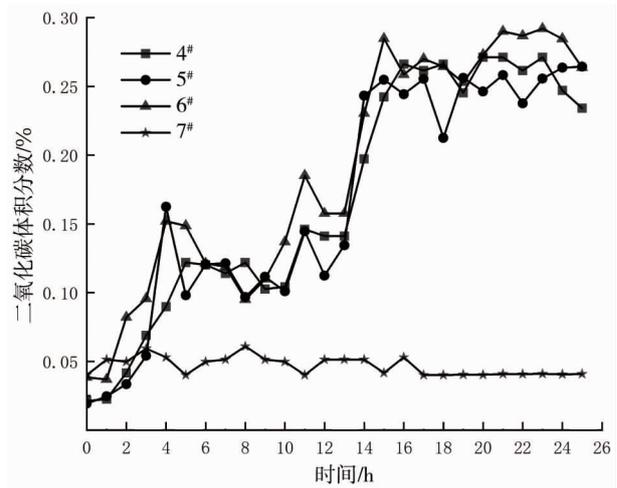


图5 二氧化碳体积分数变化

4[#],5[#],6[#]钻孔,瓦斯压力从注入消溶剂开始,瓦斯压力大幅度降低,前3 h内从1.68 MPa左右降至0.8 MPa左右,此时甲烷分子被甲烷氧化菌大量反应,随着反应的进一步继续,到8 h后,瓦斯压力从0.8 MPa降到了0.3~0.6 MPa,经过24 h后达到安全指标并趋于稳定;7[#]钻孔瓦斯压力一直维持在1.6 MPa上下波动.说明了消溶剂的有效性,瓦斯压力随时间变化见图6.瓦斯压力在初始3 h降低幅度大是受到甲烷氧化菌大量繁殖和注入消溶剂的共同破坏作用,后期减缓可能是由于甲烷氧化菌与煤层瓦斯含量共同影响使菌落数量维持在某范围内造成压力减小速率减缓.

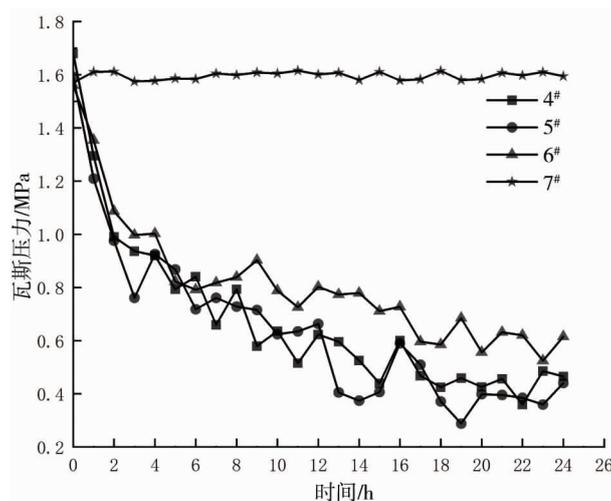


图6 瓦斯压力变化

为了进一步研究使用效果,在注液前后各取一段煤样进行分析处理,测得注液前瓦斯含量为 $12.73 \text{ m}^3/\text{t}$,注液后瓦斯含量为 $4.61 \text{ m}^3/\text{t}$,降解率达到63.8%.为甲烷氧化菌的工程运用进一步提供了参数支持.

3 结论

1) 消溶剂注入煤层,消溶剂与煤层中的瓦斯经过生化反应,使瓦斯压力从 1.68 MPa 左右降到了 0.3~0.6 MPa,瓦斯含量也在注液后的 24 h 内从 12.73 m³/t 下降到 4.61 m³/t,有效降低了煤矿煤与瓦斯突出的可能性,验证了消溶剂的有效性。

2) 瓦斯压力与瓦斯浓度成正比,与二氧化碳体积分数成反比,可以通过参数变化观察甲烷氧化菌使用情况。

3) 消溶剂可以运用于采煤工作面瓦斯的治理,为治理采煤工作面的煤与瓦斯突出提供了新思路。

参考文献:

- [1] 王刚,程卫民,谢军,等.瓦斯含量在突出过程中的作用分析[J].煤炭学报,2011,36(3):429-434.
- [2] 李长兴,关金锋,李回贵,等.煤与瓦斯突出预测的 Bayes-逐步判别分析模型及应用[J].中国矿业,2020,29(2):117-123.
- [3] 田世祥,马瑞帅,邹义怀,等.钻孔瓦斯连续流量法测定煤巷卸压带宽度研究[J].中国安全科学学报,2020,30(3):82-86.
- [4] Sohngen N L. Uber bakterien, welche methan ab kohlen-stoff nahrung and energiequelle gebrauchen [J]. Parasitenkd Infectionskr Abt, 1906, 15: 513-517.
- [5] Whittenbury R, phillips K C. Enrichmen , isolation and some properties of methane utilizing bacteria [J]. Gen Microbial, 1970, 61: 205-218.
- [6] 陈东科,王璐,金龙哲,等.微生物降解煤矿瓦斯的研究[J].煤炭学报,2006,31(5):607-609.
- [7] 韩冰,苏涛,李信,等.甲烷氧化菌及甲烷单加氧酶的研究进展[J].生物工程学报,2008,24(9):1511-1519.
- [8] 韩亚涛.甲烷氧化菌的分离鉴定及在煤表面吸附特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [9] 郭爱军,孟秀峰,令狐建设,等.微生物瓦斯消溶剂在石门揭煤中的研究与应用[J].能源与环保,2018,40(2):48-53.
- [10] 毛飞.微生物技术治理煤层瓦斯理论及应用研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [11] 王璐,金龙哲,陈东科.利用微生物技术治理煤矿瓦斯的研究展望[J].中国安全科学学报,2005,15(10):101-103.
- [12] 王秋颖,王娜,刘颖,等.松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构[J].环境科学,2021,42(10):4968-4976.
- [13] 负娟莉,王艳芬,张洪勋.好氧甲烷氧化菌生态学研究进展[J].生态学报,2013,33(21):6774-6785.
- [14] 郭树奇,费强.甲烷生物利用及嗜甲烷菌的工程改造[J].生物工程学报,2021,37(3):816-830.
- [15] 窦新钊,姜波,秦勇,等.黔西地区晚二叠世煤层变质规律及机理研究[J].煤炭学报,2012,37(3):424-429.
- [16] 杜博,孙凯,高林生.瓦斯涌出量预测方法及实践应用[J].煤炭与化工,2014,37(4):28-30.
- [17] 张瑞林,任学清.不同压力及氧环境条件下微生物降解煤层瓦斯实验研究[J].煤矿安全,2014,45(11):1-4.