

doi: 10.11799/ce202109013

超高压水力割缝和 CO₂ 相变致裂 联合增透技术研究与应用

秦江涛¹, 陈 婧¹, 谢文波², 张从国²

(1. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260; 2. 四川省川南煤业有限责任公司, 四川 筠连 615251)

摘要: 针对鲁班山北矿 14 采区 8# 煤层地质构造复杂、瓦斯抽采难的问题, 提出了超高压水力割缝和 CO₂ 相变致裂联合增透技术, 并分析其泄压增透原理, 同时进行了不同增透方案条件下的现场抽采效果对比试验。结果表明, 该联合增透方案的平均单孔瓦斯体积分数分别是普通抽采和超高压水力割缝的 1.79 倍和 1.20 倍; 单孔瓦斯抽采平均纯量分别是普通抽采和超高压水力割缝的 3.2 倍和 1.9 倍, 90d 抽采时间瓦斯抽采影响半径分别是普通抽采和超高压水力割缝的 4.58 倍和 1.38 倍, 在同等条件下施工钻孔时间分别比普通抽采和超高压水力割缝缩短 50.5% 和 40.6%, 瓦斯达标抽采时间分别比普通抽采和超高压水力割缝缩短了 66.7% 和 50%。相较于常规治理技术方案, 超高压水力割缝和 CO₂ 相变致裂联合增透技术对瓦斯灾害治理的应用效果更为理想。

关键词: 超高压水力割缝; CO₂ 相变致裂; 联合增透技术; 瓦斯灾害

中图分类号: TD712+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2021)09-0061-05

Combined permeability-enhancing technology of ultra-high pressure hydraulic cutting and CO₂ phase change cracking

QIN Jiang-tao¹, CHEN Jing¹, XIE Wen-bo², ZHANG Cong-guo²

(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;

2. Sichuan South Sichuan Coal Industry Co., Ltd., Junlian 615251, China)

Abstract: Aiming at the complex geological structure of No. 8 coal seam in No. 14 mining area of north Lubanshan Coal Mine and the problems of poor gas permeability, the combined permeability-enhancing technology of ultra-high pressure hydraulic cutting and CO₂ phase change cracking is proposed. And its pressure relief and permeability-enhancing principle is analyzed, the extraction effects under different permeability-enhancing schemes are compared. The results show that, the average volume fraction of single-hole gas in the scheme is 1.79 times and 1.20 times of conventional technologies (ordinary extraction and ultra-high hydraulic cutting), respectively. And the average pure volume of single-hole gas extraction is 3.2 times and 1.9 times, the influence radius of gas extraction is 4.58 times and 1.38 times of that in conventional technologies. Under the same conditions, the drilling time is 50.5% and 40.6% shorter, and the gas extraction time is 66.7% and 50% shorter than that of conventional technologies. Compared to conventional technologies, the combined permeability-enhancing technology of ultra-high pressure hydraulic cutting and CO₂ phase change cracking is better for gas control.

Keywords: ultra-high pressure hydraulic cutting seam; CO₂ Phase change crack; Gas volume fraction; Coal permeability; pressure relief

目前, 我国煤矿瓦斯灾害治理的最有效手段之一就是采用施工钻孔预抽煤层瓦斯^[1-3]。随着可开

采煤炭资源逐步向深部转移, 煤层瓦斯的抽采难度随之增大。众所周知, 煤层的透气性是影响其瓦斯

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204217); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201803405); 重庆工程职业技术学院级课题(KJB201908)

作者简介: 秦江涛(1982—), 男, 陕西榆林人, 副教授, 高级工程师, 主要从事矿井灾害防治技术研究工作, E-mail: 441308841@qq.com。

引用格式: 秦江涛, 陈 婧, 谢文波, 等. 超高压水力割缝和 CO₂ 相变致裂联合增透技术研究与应用 [J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 61-65.

抽采效率及效果的主要因素,因此,如何提高煤层的透气性,解决低透气性煤层的瓦斯抽采难的问题已成为制约煤矿安全生产、提高煤矿安全高效的关键因素^[4,5]。近年来,随着煤矿瓦斯治理技术的不断发展,各种瓦斯增透措施被广泛地应用于瓦斯灾害的治理^[6],主要包括水力冲孔、CO₂相变致裂以及水力割缝等。其中,水力冲孔主要是利用高压水射流冲刷钻孔内壁,增加抽采钻孔的半径、增加原始煤体的暴露空间面积^[7,8];CO₂相变致裂增透技术是利用CO₂相变瞬间产生的高压气体来增强煤体的孔隙和裂隙发育^[9];水力割缝技术则是利用高压射流水作为介质对钻孔内的煤体进行切割,从而在钻孔内形成新的缝槽,实现增加煤层透气性、降低原岩煤层应力的目的^[10,11]。以上三种煤层增透措施均有各自的优势,但也存在一定的不足。其中,水力冲孔压力较小,通常在5~20MPa之间,容易造成垮孔、堵孔现象,且形成的孔洞具有不可控性,易形成瓦斯积聚,同时对巷道的顶底板易造成破坏,导致掘进过程支护困难,此外,对坚固系数比较大的煤层增透效果不理想;相比之下,水力割缝的压力较大,可达到30~60MPa,但割缝的深度一般不超过1m,在中硬煤层中割缝深度更小,因而对煤层的增透效果较差^[12-14];最后,CO₂相变致裂增透技术往往只适用于局部的瓦斯治理,而在硬度较大煤层中的增透效果相对较差。

通过以上分析可知,采用单一的煤层增透措施可实现的现场瓦斯预抽效果往往十分有限,在硬度大、低透气性煤层中这一现象尤为突出。因此,为了解决这一难题,本文提出了一种新型联合增透技术,即超高水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术,以期有效增加抽采钻孔的影响半径,提高煤层瓦斯的抽采效率,防止煤矿瓦斯事故的发生。

1 联合增透技术原理

超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术是一种将超高压水力割缝技术和CO₂相变致裂技术进行耦合作用的煤层卸压增透技术。首先,运用超高压水力割缝技术对原始煤体进行切割。超高压水力割缝技术是通过高压泵组将射流介质水压力提高到100MPa,利用超高压射流介质对原始煤体进行切割,可在煤层中形成半径大小为1.6~2.0m的缝槽,实现人为扩充裂隙,从而有效地增加原始煤体的暴露表面积和煤层中瓦斯流通的微通道,为瓦斯抽采

创造有利的条件。同时,还能够改变原始煤体的原应力,使其得到初步卸压,原始煤层透气性系数和瓦斯释放能力也将得到初步提升^[15,16];之后,采用CO₂相变致裂技术进一步对煤体增透处理。CO₂相变致裂技术产生的高压冲击波可使介质的质点产生径向位移,由此在煤体当中产生切向拉伸和径向压缩。当切向拉伸应力超过煤体抗拉强度时煤体将发生破坏,从而使煤层中的瓦斯流通微通道向深部扩展。爆生气体紧随其后进入由应力波产生的新扩增微通道,并再次发生相变致裂。如此循环往复,瓦斯流通的微通道便不断向煤层深部转移。随着煤体内部微裂纹的不断扩展和延伸,瓦斯流通微通道进一步发育贯通,从而实现了煤层透气性系数的进一步提高,同时瓦斯压力达到二次释放,瓦斯抽采效率将大幅度提高。

2 现场试验方案

2.1 煤层赋存情况

本次试验地点为川南煤业鲁班山北矿143底板巷,预揭煤层为14采区的8#煤层,8#煤层埋深450m,平均厚度3.5m,平均倾角23°,实测原始的瓦斯应力为0.94MPa,原始瓦斯含量18.34m³/t,坚固系数为1~2,煤层透气性系数为0.0624m²/(MPa²·d),瓦斯抽采衰减系数0.16~0.26d⁻¹。8#煤层地质赋存条件比较稳定,顶板主要为砂岩或泥质岩、砂岩类组合,有一层0.02~0.20m的伪顶;底板个别地方为砂岩,其它以泥质岩组成;8#煤层地质构造复杂,原生构造裂隙不发育,区域内正逆断层较多,主要受F₅₄、F₆₇、F₁₀₀断层影响比较大,局部区域不可采。综上可知,川南煤业鲁班山北矿8#煤层属于高构造应力、低透气透出危险性煤层。

2.2 方案设计

2.2.1 抽采设计方案

143底板揭煤工作面距14采区法向距离为10m,巷道上下两帮的轮廓线控制范围为15m,巷道下帮距离控制区域距离为6m,如图1所示。根据现场实际情况,本次试验共设计了3种抽采方案进行对比分析,依次为:方案I超高水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术抽采,共布置12个增透钻孔;方案II普通技术抽采,共布置12个普通抽采钻孔;方案III为超高水力割缝技术抽采,共布置12个抽采钻孔。三个方案中的钻孔间排距均保持相同参数,其中,钻孔上下间距为8.7m,水平间距为7.5m,如

图 2 所示。

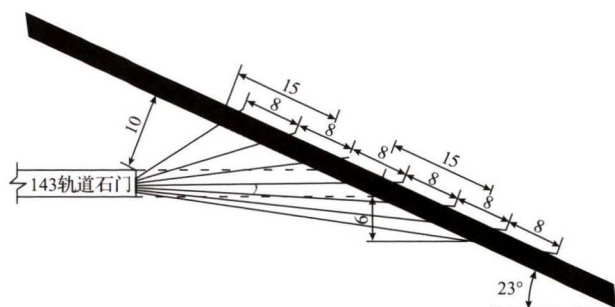


图 1 143 轨道石门揭煤抽采钻孔布置 (m)

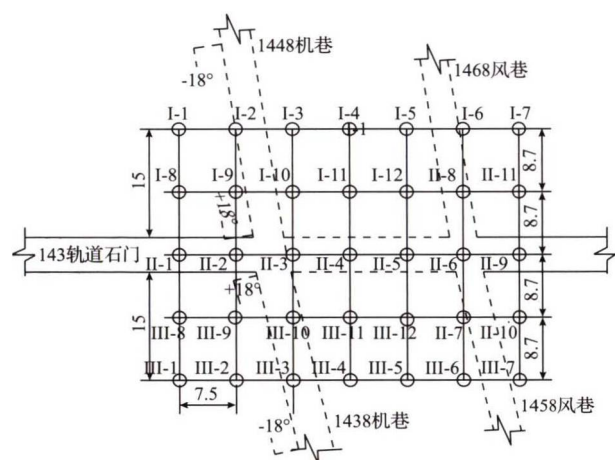


图 2 143 轨道石门揭煤抽采钻孔终孔布置 (m)

为增强现场试验的对比性,现场对比试验实行分区同步抽采,即每一种抽采方案均对应特定的抽采区域,抽采区域面积相同,并进行同步钻孔抽采。

2.2.2 抽采钻孔施工情况

所有设计钻孔均采用 ZDY-750D 型钻机进行施工,钻杆的直径为 $\varnothing 50\text{mm}$,采用 $\varnothing 90\text{mm}$ 的钻头。所有钻孔穿过 8# 煤层的顶板 0.5m 停止施工,采用水力排渣,并做好所有的试验设计钻孔施工参数记录。抽采钻孔两端采用马丽散进行封孔,中间则采用水泥和砂浆比例 1:3 的混合物进行封孔。当返浆管有大量粘稠的浆液返出的时候,停止注浆。封孔长度不小于 8m,钻孔凝固 7d 以后进行接抽。

2.2.3 钻孔增透及抽采工艺

1) 方案 I: 依据方案设计要求进行钻孔,并同步进行超高压水力割缝。采用浅螺旋高强度无缝钢管作为超高压水力割缝钻杆,钻杆长度为 1m,直径为 $\varnothing 50\text{mm}$,壁厚 13mm,抗拉强度 $\sigma > 7.2\text{kN} \cdot \text{m}$,高压水泵的工作压力为 100MPa,最小流量不低于

4.8m³/h,使用远程高压操作系统对现场设计的钻孔进行水力割缝操作,为了达到增透卸压的效果,缝槽的半径控制 $R = 1.6 \sim 2.0\text{m}$,割缝以后形成缝槽可以等效为 2~5cm 厚度环形缝槽,单孔控制流速时间不小于 5min,单孔割缝煤屑量不小于 0.3t。随后,对所有设计钻孔进行 CO₂ 相变致裂爆破增透,相变致裂爆破管长度为 1m,根据现场施工钻孔穿透煤层的实际长度来确定 CO₂ 相变致裂管爆破的数量,CO₂ 相变致裂爆破后应及时封孔接抽。抽采钻孔终端抽采负压不低于 13kPa。

2) 方案 II: 依据设计要求进行钻孔、封孔和接抽,确保钻孔抽采终端负压不低于 13kPa。

3) 方案 III: 依据方案设计要求进行钻孔施工,所有钻孔采用和方案 I 相同的超高水力割缝增透措施,割缝完毕以后及时进行封孔和抽采。抽采钻孔终端抽采负压不低于 13kPa。

2.3 钻孔瓦斯流量监测方法

按照设计方案要求钻孔施工完毕以后,将所有设计钻孔接入瓦斯抽采系统进行瓦斯流量参数测定,利用多功能瓦斯参数测定仪对瓦斯流量进行测定,而单孔瓦斯体积分数变化则采用高浓度光学瓦斯监测仪进行测定。同时,对 3 种不同抽采方案中的监测结果进行对比分析,监测内容包括单孔日平均抽采体积分数、瓦斯抽采流量和瓦斯的有效抽采半径。

3 试验结果分析

3.1 单孔日抽采体积分数对比分析

三种不同抽采方案试验区域的单孔日平均瓦斯体积分数统计结果如图 3 所示。从图 3 中可知,在 92d 抽采时间内,所有方案的单孔日平均瓦斯抽采体积分数均为先增大后减小的变化趋势,且均在第 30d 左右达到最大值。其中,方案 I 的单孔日平均瓦斯体积分数在 68.3%~88.6% 区间,平均为 77.03%;方案 II 的单孔日平均瓦斯体积分数分布在 30.5%~55.9% 区间,平均为 43.1%;方案 III 的单孔日平均瓦斯体积分数分布区间为 47.9%~79.6%,平均 64.2%。

经对比分析可得,方案 I 的单孔日平均瓦斯体积分数分别是方案 II 和方案 III 的 1.79 倍和 1.20 倍,所以方案 I 的瓦斯抽采效果最为理想,其次为方案 III,方案 II 的效果最差。分析其原因主要为:方案 I 同时采用了超高压水力割缝技术和 CO₂ 相变致裂技术,可使原始煤层实现二次增透,并促进煤体瓦

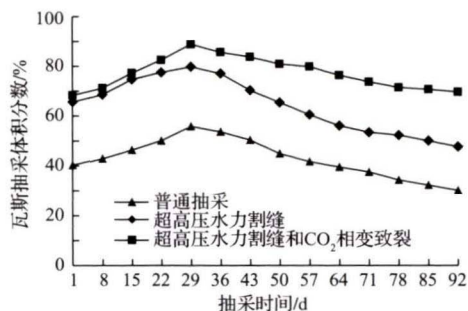


图3 三种不同抽采方案单孔日平均瓦斯体积分数曲线

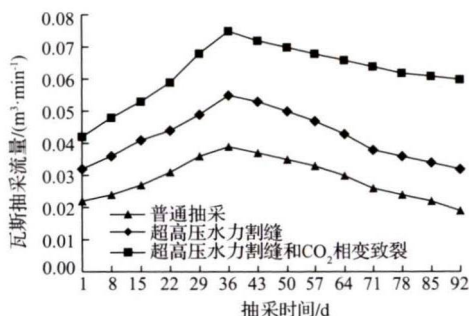


图4 三种不同方案单孔日平均瓦斯抽采流量监测情况

斯压力进行二次卸压释放,可极大地增加原始煤层的暴露表面积和瓦斯流量微通道,从而使瓦斯压力达到充分的卸压,有效解决瓦斯抽采体积分数低和瓦斯梯度压力大的难题。因此,方案I的单孔日平均瓦斯体积分数最大;方案III虽然也采用超高压水力割缝技术,在一定程度上增加了原始煤层的裂缝,增加瓦斯抽采的微通道,但是缺少了CO₂相变致裂技术的作用,其瓦斯微通道尚未达到充分的延展和扩展,所以单孔日平均瓦斯体积分数小于方案I,但大于方案II。

3.2 瓦斯抽采流量对比分析

三种不同方案的单孔日平均瓦斯抽采流量如图4所示。从图4中可知,与瓦斯抽采体积分数类似,所有方案的单孔日平均瓦斯抽采流量也均呈先增大后减小的变化趋势,且均在第36d左右达到最大值。其中,方案I的日平均单孔瓦斯抽采流量变化区间为0.42~0.72m³/min,平均为0.062m³/min;方案II的日平均单孔瓦斯抽采流量在0.19~0.39m³/min区间变化,平均为0.029m³/min;方案III的日平均单孔瓦斯抽采流量变化区间0.32~0.55m³/min,平均为0.042m³/min。对比分析可得:方案I的日平均单孔瓦斯抽采流量最大,分别是方案II和方案III的3.2倍和1.9倍。这进一步说明方案I中的超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透设计瓦斯衰减程度小于其余2种方案,抽采效果最为理想。

3.3 瓦斯抽采有效影响半径对比分析

为了测定瓦斯抽采的有效影响半径,分别在抽采期的第15天、30天、45天、60天、75天以及90天对3种方案进行煤层残余瓦斯含量的测定。按照《煤矿安全规程》规定,煤层瓦斯残余含量降到8m³/t以下,为抽采达标,因此,通过实测14采区抽采钻孔有效影响半径的瓦斯含量以8m³/t以下为标准。不同方案条件下的瓦斯抽采有效影响半径测定情况如图5所示。

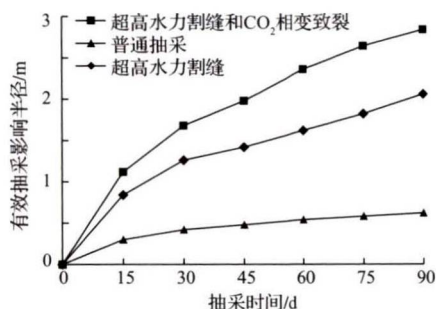


图5 三种不同方案的瓦斯抽采有效影响半径测定情况

由图5可知,三种方案的瓦斯抽采有效影响半径均随抽采时间的增加而逐步增大,但增大速率逐渐减小。其中,方案I在15d、30d、45d、60d、75d以及90d的瓦斯抽采有效影响半径分别是1.12m、1.68m、1.98m、2.36m、2.64m和2.84m,方案II在15d、30d、45d、60d、75d以及90d的瓦斯抽采有效影响半径分别是0.30m、0.42m、0.49m、0.54m、0.58m和0.62m,方案III在15d、30d、45d、60d、75d以及90d的瓦斯抽采有效影响半径分别是0.84m、1.26m、1.42m、1.62m、1.82m和2.06m;当抽采时间增至90d时,方案I的瓦斯抽采有效影响半径是方案II和方案III的4.58倍和1.38倍,这表明联合增透技术的瓦斯抽采有效影响半径明显大于普通抽采和单一的超高压水力割缝,从而能够有效减少区域瓦斯抽采的钻孔布置数量,提高钻孔瓦斯抽采效率,同时还可大幅度缩短瓦斯抽采治理达标时间。

3.4 抽采工效对比分析

1) 钻孔施工时间对比。按照施工抽采200m条带巷工程量计算,方案I中的超高压水力割缝和CO₂相变致裂钻孔间距7.5m,钻孔施工个数为54个,打孔、割缝和CO₂相变致裂、封孔、接抽所需要平均时间为11h,则200m条带巷瓦斯治理施工时间为594h;方案II中的普通施工钻孔间距2m,钻孔施工

个数200个,打孔、封孔、接抽所需的平均时间为6h,则200m的巷道共需要总时间为1200h;方案Ⅲ中的超高压水力割缝200m条带巷道钻孔施工半径为4m,钻孔施工个数为100个,钻孔平均施工时间10h,则200m的巷道共需要总时间为1000h。对比分析可得,在同等抽采效果条件下,方案Ⅰ超高水力割缝和CO₂相变致裂增透技术比方案Ⅱ普通抽采和方案Ⅲ超高水力割缝技术钻孔施工时间缩短50.5%和40.6%。

2) 抽采达标时间对比。依据试验设计区域瓦斯抽采达标条件的要求,现场对瓦斯抽采结果进行实时监测,所得结果显示,方案Ⅰ联合增透技术的抽采达标时间为4个月,方案Ⅱ普通抽采达标时间为12个月,方案Ⅲ超高水力割缝抽采的达标时间为8个月。对比可知,采用超高水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术比普通抽采和超高水力割缝技术的抽采达标时间缩短了66.7%和50%。

4 结论

1) 超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术可使原始煤层实现二次增透,并促进煤体瓦斯压力进行二次卸压释放,从而极大地增加原始煤层的暴露表面积和扩展瓦斯流量微通道,有效地提高瓦斯的抽采效果。

2) 超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术的平均单孔瓦斯体积分数为77.03%,是普通抽采和超高水力割缝的1.79倍和1.20倍;单孔瓦斯抽采平均流量为0.062m³/min,是普通抽采和超高压水力割缝的3.2倍和1.9倍;90d抽采时间瓦斯抽采有效影响半径为2.84m,是普通抽采和超高压水力割缝的4.58倍和1.38倍。

3) 超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术在同等抽采效果情况下可极大地减少钻孔施工数量,有效缩短钻孔施工时间,显著减少瓦斯达标抽采时间。因此,超高压水力割缝和CO₂相变致裂联合增透技术在瓦斯灾害治理应用效果显著,有效解决了瓦斯抽采难和达标时间漫长的问题。

参考文献:

- [1] 秦江涛,杨春,庞成,等. A-B胶封孔工艺在煤矿顺层抽采钻孔中的应用性试验[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(6): 77-78.
- [2] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(7): 1370-1379.
- [3] 秦江涛. 微生物技术治理瓦斯可行性分析及应用研究[J]. 工业安全与环保, 2017(43): 16-18.
- [4] 袁亮,郭华,沈宝堂,等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 357-365.
- [5] 卢平,袁亮,程桦,等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 580-585.
- [6] 袁亮,林柏泉,杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45-49.
- [7] 王晓平. 新景矿水力造穴快速掘进技术研究[J]. 科技创新与应用, 2017(17): 119-120.
- [8] 林柏泉,张其智,沈春明,等. 钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1425-1430.
- [9] 秦江涛,陈玉涛. 液态CO₂相变致裂增透技术在低透性突出煤层的应用研究[J]. 工业安全与环保, 2017(8): 18-20.
- [10] 王瀚. 水力压裂垂直裂缝形态及缝高控制数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [11] 林柏泉,赵洋,刘厅,等. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 662-667.
- [12] 童碧,王力. 下向穿层孔水力割缝施工工艺研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 177-180, 188.
- [13] 秦江涛,陈玉涛,黄文祥. 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 80-84.
- [14] 张永将,孟贤正. 高压水射流水力扩孔抽采半径考察研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(S1): 45-46, 188.
- [15] 黄振飞. 煤层水力割缝影响因素及割缝深度预测模型研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2017.
- [16] 张东明,白鑫,尹光志,等. 低渗煤层液态CO₂相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3154-3168.

(责任编辑 张宝优)