

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2019.02.034

石门揭煤区液态 CO₂ 致裂增透 加速消突技术

苏伟伟^{1,2}

(1.煤科集团沈阳研究院有限公司,辽宁 抚顺 113122;2.煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁 抚顺 113122)

摘要:针对低透气强突出煤层在石门揭煤过程中消突工程量大、作业环节复杂及揭煤周期长等特点,在揭煤前布置的瓦斯抽采孔内实施液态 CO₂ 相变致裂增透卸压技术,经理论计算和现场考察确定 4 号煤层的增透半径为 6 m。该技术在-650 运输巷揭穿 4 号煤层的工作面进行了试验,结果表明:致裂前后,钻孔平均抽采瓦斯浓度从 20.2% 提升至 42.6%,单孔平均日抽采量从 1.56 m³/d 提升至 3.76 m³/d,且近 20 d 内保持高效抽采,在 1 个月内完成抽采达标和消突任务,抽采率为 48.16%,缩短抽采时间 43%;在揭煤区取样测试煤体的残余瓦斯含量平均值为 5.41 m³/t,反演残余瓦斯压力平均值 0.27 MPa,采用钻屑解吸指标法测试钻屑量 S 最大值 4.7 kg/m,钻屑解吸指标 Δh_2 最大为 140 Pa,所有测值均小于突出临界值;煤层揭穿期间回风流瓦斯浓度仅有 4%,实现安全高效快速揭煤。

关键词:液态 CO₂;增透半径;揭煤;低透气突出煤层;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:1003-496X(2019)02-0144-04

Technology of Rapid Outburst Elimination by Liquid CO₂ Fracturing in Region of Coal Uncovering

SU Weiwei^{1,2}

(1.China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China;2.State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of the larger outburst elimination amount, complex working link and the long cycle of uncovering coal in the process of crosscut coal uncovering in low permeability outburst seam, the technology of liquid CO₂ phase transition fracturing was used in gas drainage hole. The permeability increase radius of No.4 coal seam is 6 m by theoretical calculation and field investigation. The technology was tested in the face of -650 transport lane which would uncover the No.4 coal seam. The results showed that the average drainage concentration from a single gas borehole increased from 20.2% to 42.6%. The average single hole drainage quantity increased from 1.56 m³/d to 3.76 m³/d before and after fracturing. Gas drainage maintained efficient in the past 20 days. Drainage standards were completed in a month. The extraction rate was 48.16% and the extraction time was shortened by 43%. The average residual gas content was 5.41 m³/t, and the average residual gas pressure was 0.27 MPa. The maximum drilling cuttings volume S was 4.7 kg/m and desorption index of drill cuttings Δh_2 was 140 Pa. All test values were less than the critical value. The return air gas concentration is only 4% after the uncovering coal seam, which achieved safe, efficient and rapid cross-cut coal uncovering.

Key words: liquid CO₂; permeability increase radius; coal uncovering; low permeability and outburst seam; gas drainage

揭煤当属井下较为复杂的作业环节,具有钻孔工程量大、抽采时效差、耗时长等特点^[1-3]。受安全屏障保护,揭煤区的瓦斯和地应力封存比较完好,潜在危险性大,为高效快速化解揭煤区域的危险源,

基金项目:“十三五”国家大型油气田及煤层气开发科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004-001)

人工辅助的增透卸压技术被不断引用到揭煤前的抽采环节,其中水力压裂^[4]、水力割缝^[5]、水力扩孔^[6]等水力化措施均利用高压水冲击破碎煤体,改善煤层透气性,由于该技术工艺复杂、装备体积庞大、封孔难度高等原因,难以发挥便捷的实施空间;深孔控制爆破技术运用火药爆炸后的冲击破和高温高压气体

的膨胀作用使煤体沿钻孔径向形成大量裂隙,提高瓦斯流动能力,然而火工品爆炸后的高温震荡环境极易诱导瓦斯突出、引发瓦斯爆炸,该技术也逐渐被禁用^[7-8]。液态 CO₂ 相变致裂是近年来新兴的物理爆破技术^[9],爆破产物为低温高压的二氧化碳气体,没有火花和震荡波,不会诱发瓦斯爆炸和突出,致裂过程本质安全,且工艺装备轻便。因此,将液态 CO₂ 致裂技术的优势应用到高突煤层揭煤环节中,以提高揭煤区域的透气性和卸压程度,破解揭煤作业复杂的难题,实现快速安全经济性揭煤。

1 试验工作面概况

试验地点位于某矿南采区-650 运输巷 842 m 处,巷道净断面 12.36 m²,为了采区运输便利,-650 运输巷以坡度 14°向上掘进,最终落入距 4 号煤层顶板 20 m 的岩石层位中,此过程需要揭穿 4 号煤层,揭煤区域标高为-638 m。前探资料显示,4 号煤层煤厚 2.2~3 m,平均煤厚 2.6 m,倾角 10°~15°,顶底板均为泥岩。4 号煤层瓦斯压力 1.06 MPa,煤层瓦斯含量达 13.08 m³/t,具有强烈突出危险性。煤的吸附常数 $a=38.91 \text{ m}^3/\text{t}$, $b=1.01 \text{ MPa}^{-1}$,煤的坚固性系数为 0.4,煤层透气性极差,属于典型的低透气性难抽煤层。

2 揭煤区布孔参数确定

2.1 液态 CO₂ 增透卸压原理

液态 CO₂ 致裂器如图 1,主要由注液阀、加热管、储液管、液态 CO₂、定压泄能片、导流孔和释放管组成。

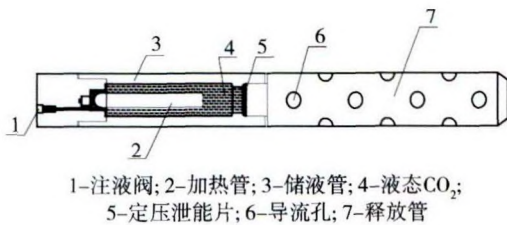


图 1 液态 CO₂ 致裂器

液态 CO₂ 相变致裂技术是液态的 CO₂ (压力 8~10 MPa) 在 20~40 ms 时间内吸收大量热并迅速膨胀,突破 CO₂ 的相态临界点(31 °C、7.4 MPa),发生液升气的相变转化,体积膨胀约 600 倍,产生高能的 CO₂ 气体冲破定压泄能片从释放管中的导流孔冲出,劈裂煤体形成新生裂隙,以及进一步膨胀挤压扩展和延伸原生裂隙,使煤体沿钻孔径向发生位

移,促进周围裂隙相互连通交织成高密度裂隙网,达到增透卸压目的。

2.2 液态 CO₂ 致裂增透半径考察

液态 CO₂ 相变过程中释放出强大的冲击波,孔内气体压力极速膨胀,基于弹性力学和断裂力学理论^[10],爆破后冲击波气体能够对煤岩产生拉深破坏作用,当冲击力大于煤岩的极限抗拉强度后,孔内初始裂隙会不断延伸扩展,增大钻孔影响半径,因此液态 CO₂ 相变致裂作用区可分为冲击波作用区和相变气体的准静应力场区。

冲击波作用区半径:

$$r_c = r_h \times \left(\frac{p_{\max}}{K_b S_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中: r_c 为冲击波作用区半径,具体数值即钻孔初始裂隙长度, m ; r_h 为致裂孔直径, mm ; K_b 为动载作用下抗拉强度提高系数,致裂加载速率下取值 10; S_t 为煤体在静载作用下的抗拉强度, MPa ; p_{\max} 为致裂孔内形成的气态 CO₂ 最高压峰值, MPa ; α 为衰减系数,计算得 1.5。

准静应力场区半径 r 即钻孔的致裂增透半径:

$$\left(\frac{p_{\max}}{2p} \right)^{\frac{1}{K}} = 1 + \left[\left(\frac{r_c}{r_h} \right)^2 - 1 \right] \frac{p}{K_b} \quad (2)$$

$$\sigma_r = p \times \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

$$K_b = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4)$$

$$\alpha = 2 \pm \frac{\mu}{1-\mu} \quad (5)$$

式中: p 为冲击波在初始裂隙内的气体压力, MPa ; K 为气体的绝热指数,取 1.295; K_b 为煤体体积模量, MPa ; E 为煤体弹性模量,取值 2 GPa; μ 为煤体泊松比,0.3; r 为致裂孔的增透半径, m ; σ_r 为在半径 r 处煤体所受径向应力。

该矿预先试验了液态 CO₂ 相变致裂效果,致裂孔直径 r_h 为 94 mm,致裂器和定压泄能片选用 89 规格,致裂孔内形成的气态 CO₂ 最高压峰值 p_{\max} 可达 270 MPa。现场采集 4 号煤层煤样,实验室测试煤样在静载条件下的抗拉强度 S_t 为 5.6 MPa,模拟计算钻孔实施致裂后初始裂隙的气体压力为 1 356 MPa。将获取的参数值代入式(1)~式(5),得到该矿 4 号煤层实施液态 CO₂ 致裂增透半径约为 6.3 m。

液态 CO₂ 相变致裂后,煤层受到高能气体扰动,钻孔裂隙迅速发育,钻孔流量增加显著,为了验证理论计算得到的致裂增透半径,现场预先布置测点并考察致裂前后增透区煤层透气性系数的变化情

况,通过测试距致裂孔不同位置处的煤层透气性系数,直观形象的反应出致裂区增透半径的变化规律。液态 CO₂ 致裂增透影响考察如图 2,在-650 运输巷 320 m 处的非揭煤区布置 1 组测试孔,钻孔布置方式及参数如图 2,致裂孔和考察孔的倾角均为 30°,方位角均为 102°。

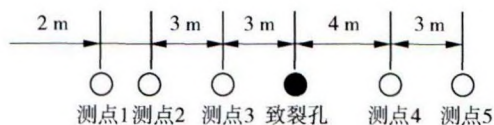


图 2 液态 CO₂ 致裂增透影响考察

采用径向流量法测算了测点 1 至测点 5 在致裂孔实施液态 CO₂ 相变致裂前后的透气性系数,致裂前后煤层透气性变化情况如图 3。致裂前 4 号煤层原始透气性系数仅 0.016 3~0.055 2 m²/(MPa²·d),平均 0.039 4 m²/(MPa²·d);致裂后煤层透气性系数增加到 0.167 0~3.267 3 m²/(MPa²·d),平均 1.798 3 m²/(MPa²·d),较致裂前煤层的透气性系数提高 10.25~71.634 倍,煤层瓦斯抽采难以程度也由原来的难抽煤层发育为可以抽放煤层。

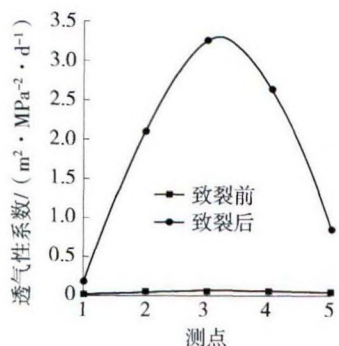


图 3 致裂前后煤层透气性变化情况

围绕致裂孔周围的煤体,煤层透气性由致裂前的“直线型”升级为“抛物线性”。其中,距致裂孔 3 m 处的测点 3 受致裂扰动影响程度最大,处于煤层影响范围的沟通桥梁带,煤层透气性系数最大,其余测点随距致裂孔距离增长,透气性依次逐渐降低,虽然致裂增透影响范围稍大于理论计算值,但当测点距致裂孔大于 6 m 后,煤层透气性呈现骤降规律,下降幅度多达 59.5%~91.9%,该区的煤层透气性改善状况仍不能满足瓦斯抽采需求。可见,在液态 CO₂ 相变致裂影响范围内,6 m 处是煤层致裂后裂隙二次发育较为充分的临界点,验证了理论计算值 6.3 m,考虑现场钻孔布置的经济性和高效性,该

矿 4 号煤层的增透半径设为 6 m。

2.3 揭煤区消突钻孔布置方式

为安全快速揭开 4 号煤层,在-650 运输巷距 4 号煤层底板垂距 7 m 时布置了消突钻孔,钻孔控制范围满足《防治煤与瓦斯突出规定》要求。根据液态 CO₂ 致裂增透技术在 4 号煤层中的考察效果,此次揭煤区消突钻孔的孔底间距均为 6 m,共需布置 5 排,每排 8 个钻孔,致裂孔和控制孔布置方式如图 4。第 2 排和第 4 排采用隔一爆一的布置方式,且第 1 排的第 1 个钻孔和第 5 排最后 1 个钻孔为致裂孔,其余均为控制孔,本区所有致裂孔采用液态 CO₂ 相变致裂技术,起爆方式为并联导通一次性爆破。

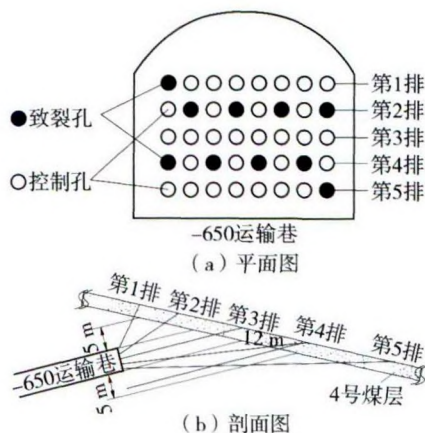


图 4 揭煤区致裂孔和控制孔布置方式

3 揭煤区增透卸压效果考察

3.1 瓦斯抽采效果

致裂孔实施液态 CO₂ 相变致裂后,所有钻孔连接抽采管路进行负压抽采,现场考察致裂前后钻孔抽采瓦斯浓度和单孔日抽采量的变化情况,分析了液态 CO₂ 相变致裂在石门揭煤中的应用效果。

平均抽采瓦斯浓度随时间变化如图 5。在未采取任何增透措施时,钻孔平均抽采瓦斯浓度为 20.2%,随时间延长,吸附瓦斯解吸会引起煤质收缩,降低煤层渗透率,增加抽采阻力,瓦斯浓度也逐渐衰减;经液态 CO₂ 致裂增透后,钻孔平均抽采瓦斯浓度大幅度提升,最大值约 58%,平均值为 42.6%,较致裂前的平均浓度值提高了 1.1 倍,35 d 后仍保持 40%的高浓度持续抽采,且未呈现衰减趋势。

抽采期间统计了单孔日抽采量,平均单孔日抽采量随时间变化如图 6。致裂后单孔平均日抽采量从 1.56 m³/d 增加到 3.76 m³/d,增约 1.4 倍,致裂后约 20 d 内始终保持增长状态,最大值达 5.01 m³/d,

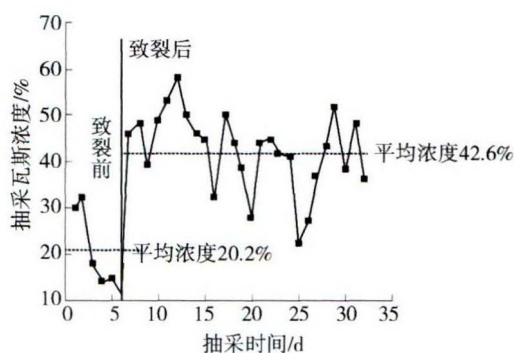


图 5 平均抽采瓦斯浓度随时间变化

之后虽略有降低,但依然接近于平均日抽采量。

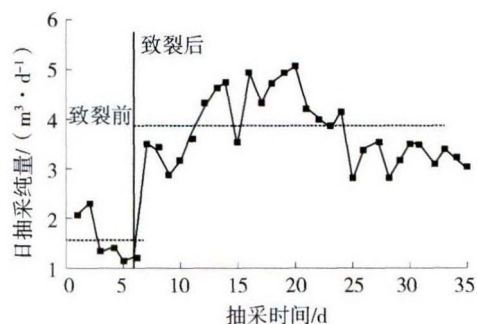


图 6 平均单孔日抽采量随时间变化

采用上述致裂孔和控制孔的分配方式,1 个月内 30 个抽采孔的平均瓦斯抽采浓度稳定在 38.5%~44.6% 之间,日平均抽采量在 3.31~4.08 m³/d 之间,所有钻孔共同控制的揭煤区域均享受到增透卸压效果,实现高效、持久抽采,抽采率为 48.16%,缩短抽采时间 43%。

3.2 煤层消突效果

在揭煤区域的上部、中部和两侧布置 4 组钻孔,每组钻孔分别在见煤 0.5 m 和 1.5 m 处取样测试残余瓦斯含量,并反演残余瓦斯压力。区域效果检验指标考察见表 1。揭煤区残余瓦斯含量平均值为 5.41 m³/t,残余瓦斯压力平均值为 0.27 MPa,煤层的突出危险性已被消除。

-650 运输巷掘进至距煤层底板垂距 2 m 后,采用钻屑解吸指标法进行了局部预测,钻屑量 S 为 3.6~4.7 kg/m,干煤测试钻屑解吸指标 Δh_2 为 120~140 Pa,预测揭煤工作面为无突出危险工作面。

3.3 揭开煤层效果

采用远距离爆破技术一次性揭开煤层断面,之后采用“超前探测、提升支护强度、快速掘进”的方

表 1 区域效果检验指标考察

检验钻孔	残余瓦斯含量/ (m ³ ·t ⁻¹)	反演瓦斯压力 /MPa	有无动力现象
1-1	5.52	0.28	无
1-2	6.12	0.32	无
2-1	5.04	0.25	无
3-1	5.83	0.30	无
3-2	6.95	0.38	无
4-1	3.85	0.18	无
4-2	4.55	0.22	无
平均值	5.41	0.27	

式迅速穿透煤层,过煤门期间的回风流瓦斯浓度最大仅 0.4%,且未发生任何异常现象。

4 结 论

1) 根据 4 号煤层的基本力学参数和相关理论基础,计算得到液态 CO₂ 相变致裂的增透半径为 6.3 m,并通过现场考察致裂后不同影响范围的煤层透气性系数变化规律进行了验证,考虑富余系数,确定井下应用液态 CO₂ 增透半径为 6 m。

2) 揭煤区液态 CO₂ 致裂增透前后的平均瓦斯抽采浓度增约 1.1 倍,单孔日平均抽采量增约 1.4 倍,1 个月内实现抽采达标,抽采率为 48.16%,缩短抽采时间 43%。

3) 揭煤区消突效果检验残余瓦斯含量平均值为 5.41 m³/t,残余瓦斯压力平均值为 0.27 MPa,钻屑量 S 为 3.6~4.7 kg/m,钻屑解吸指标 Δh_2 为 120~140 Pa,均小于突出临界值;揭开煤层过煤门期间的回风流瓦斯浓度最大仅 0.4%,所有揭煤环节安全高效。

参考文献:

- [1] 苏伟伟,李建兵,陈向军.小角度工作面快速揭开高突煤层技术[J].煤矿安全,2015,46(8):61-64.
- [2] 王满.千米深井强突出煤层群井筒快速揭煤技术[J].煤炭科学技术,2015,43(5):71-73.
- [3] 刘震,李增华,杨永良,等.缓斜特厚煤层石门揭煤区域综合防突技术[J].煤矿安全,2010,41(8):23-26.
- [4] 孙大发,陈久福,龙建明,等.高压水力压裂技术在石门揭煤中的试验研究[J].煤炭科学技术,2013,41(S):163-165.
- [5] 卢义玉,尤祎,刘勇,等.脉冲水射流割缝后石门揭煤突出预测指标优选[J].重庆大学学报,2013,36(3):65-69.

(下转第 151 页)

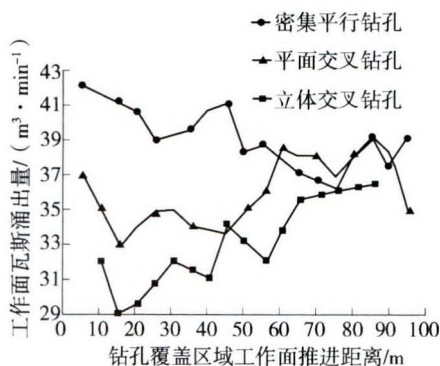


图4 不同钻孔方式工作面瓦斯涌出对比

交叉钻孔塑性区导通通道,可继续抽采瓦斯,抽采钻孔有效长度得到保障,提高了抽采钻孔利用率。

3)在密集平行钻孔、平面交叉钻孔和立体交叉钻孔中,立体交叉钻孔抽采衰减系数最小,平均百米钻孔抽采量最大;在同等钻孔工程量下,立体交叉钻孔的抽采能力是密集平行钻孔和平面交叉钻孔的1.7倍和1.3倍,立体交叉钻孔的抽采效率比密集平行钻孔和平面交叉钻孔分别提高68.9%和25.7%。

参考文献:

[1] 徐景德,杨鑫,赖芳芳,等.国内煤矿瓦斯强化抽采增透技术的现状及发展[J].矿业安全与环保,2014,41(4):100-103.

[2] 张广云.区域密集钻孔抽采技术在高瓦斯矿井煤巷掘进中的应用[J].煤矿开采,2011,16(6):100-101.

[3] 王永安.网状本煤层钻孔瓦斯预抽放技术在屯兰矿的应用[J].山西大同大学学报(自然科学版),2008,24(6):53-55.

[4] 马念杰,郭晓菲,赵希栋,等.煤与瓦斯共采钻孔增透半径理论分析与应用[J].煤炭学报,2016,41(1):

120-127.

[5] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.

[6] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:58.

[7] 薛彦平.低透气性煤层交叉钻孔预抽试验研究[J].煤炭技术,2017,36(5):191-193.

[8] 谢雄刚,李希建,余照阳.顺层钻孔预抽突出煤层瓦斯技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):78-81.

[9] 王京生,贾泉敏,刘丰韬,等.本煤层瓦斯预抽采工艺改进研究[J].现代矿业,2013,529(5):105-106.

[10] 孙英峰,孙晓兀,曹家琳,等.本煤层瓦斯抽放交叉钻孔塑性区分布规律[J].煤矿安全,2014,45(10):4-6.

[11] 孙福龙,富向,张传喜.寺家庄煤矿突出煤层掘进工作面瓦斯治理实践[J].煤矿安全,2014,45(6):118.

[12] 张颐纯,邢玉忠.低透气性煤层交叉钻孔预抽瓦斯合理孔距研究[J].中国煤炭,2016,42(8):109-112.

[13] 张增辉,陈殿赋,黄步青,等.保德煤矿煤层瓦斯合理预抽期及钻孔布置方式的研究[J].矿业安全与环保,2012,39(2):41-44.

[14] 谢雄刚,李希建,余照阳.顺层钻孔预抽突出煤层瓦斯技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):78-81.

[15] 陈开岩,张占国,林柏泉,等.综放工作面抽放条件下瓦斯涌出及分布特征[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):418-422.

[16] 武文浩.矿井瓦斯强化抽采体系在乌兰煤矿的应用[J].煤炭科学技术,2014,42(4):117-119.

作者简介:郝光生(1986—),男,安徽六安人,硕士,2012年毕业于中国矿业大学,主要从事瓦斯抽采工程设计、瓦斯防治与咨询等工作。

(收稿日期:2018-03-29;责任编辑:王福厚)

(上接第 147 页)

[6] 张鹏,程丽,周汝洪,等.水力扩孔技术在深井石门揭煤防突中的应用[J].能源技术与管理,2011(1):18.

[7] 陈鹏,郭金栋,李忠辉,等.高瓦斯低透气性煤层石门揭煤卸压爆破破透试验[J].煤炭科学技术,2009,37(6):49-52.

[8] 刘健,刘泽功,蔡峰.石门揭煤深孔预裂爆破增透效果试验研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6):30-32.

[9] 孙文忠.低渗煤层 CO₂ 预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(1):100-105.

[10] 李守巨,费鸿禄,何庆志,等.讨论爆照气体的爆炸作用[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1992(3):46-49.

作者简介:苏伟伟(1988—),男,河南焦作人,助理研究员,硕士,2015年毕业于河南理工大学,现主要从事瓦斯灾害预测与防治工作。

(收稿日期:2017-05-11;责任编辑:王福厚)