

玉溪煤矿 CO₂ 气相压裂煤巷防突快速掘进技术

李丰亮¹, 曹运兴^{2,3,4}, 刘高峰^{2,3,4}, 曹永森⁵

1. 山西兰花煤炭实业有限公司, 山西 晋城 048000;
2. 河南理工大学瓦斯/煤层气地质工程研究中心, 河南 焦作 454000;
3. 河南省非常规能源与开发国际联合实验室, 河南 焦作 454000;
4. 中原经济区煤层气(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000;
5. 河南神华能源工程有限公司, 河南 焦作 454000)

摘要: 玉溪煤矿首采工作面在煤巷掘进过程中, 突出指标参数频繁超标, 瓦斯异常涌出, 瓦斯超限, 导致被迫停产、掘进速度慢。为解决安全快速掘进的生产技术难题, 玉溪煤矿开展 CO₂ 气相压裂消突快速掘进技术研究和试验。结果显示, 采取气相压裂措施后, 平均每百米巷道掘进 K_1 值超标 0.15 次, 较压裂前降低了 11 倍; 掘进过程中瓦斯涌出趋于均匀化, 瓦斯涌出浓度峰值相对降低, 有效避免了瓦斯超限; 巷道掘进日均进尺 5.38 m, 较气相压裂前(日均进尺 2.79 m)巷道掘进速度提高了 1.92 倍。CO₂ 气相压裂消突快速掘进技术有效保障了矿井安全和高效生产。

关键词: CO₂ 气相压裂; 煤与瓦斯突出; 快速掘进; 消突

中图分类号: TD263.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2020)04-0146-06

Technology of high-speed driving and outburst elimination by CO₂ gas fracturing in Yuxi coal mine

LI Fengliang¹, CAO Yunxing^{2,3,4}, LIU Gaofeng^{2,3,4}, CAO Yongsen⁵

1. Shanxi Lanhua Coal Industry Group Co., Ltd., Jincheng 048000, China;
2. Gas Geology and Engineering Research Center, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
4. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
5. Henan Shenhua Energy Engineering Ltd., Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In the process of coal roadway driving in Yuxi coal mine, gas problems including outburst index parameters exceeding the standard frequently, gas abnormal emission, gas exceeding the limitation, result in forced shutdown and slowly driving. In order to solve this problem, the technology of high-speed roadway driving and outburst elimination by CO₂ gas fracturing in Yuxi coal mine is studied. The results show the good effects as follows. After adopting CO₂ gas fracturing, the average value of K_1 exceeds the standard as 0.15 times per 100 m, which is 11 times lower than that before fracturing. Gas emission tends to be uniform and peak value of gas emission is relatively lower, which avoids gas exceeding the limit effectively. The average daily footage of roadway driving is 5.38 m, which is 1.92 times higher than that before gas fracturing. The technology of high-speed roadway driving and outburst elimination by CO₂ gas fracturing can

收稿日期: 2019-04-08 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 李丰亮(1971—), 男, 山西朔州人, 硕士, 高级工程师, 山西兰花煤炭实业集团有限公司总工程师, 从事矿山工程和煤矿瓦斯治理及综合利用等方面的工作, E-mail: sxlf12283@vip.sina.com。

引用格式: 李丰亮, 曹运兴, 刘高峰, 等. 玉溪煤矿 CO₂ 气相压裂煤巷防突快速掘进技术[J]. 中国矿业, 2020, 29(4): 146-151. doi:10.12075/j.issn.1004-4051.2020.04.008

eliminate outburst effectively and guarantee mine safety and efficient production.

Keywords: CO₂ gas fracturing; coal and gas outburst; high-speed driving; outburst elimination

自 2012 年以来,国内开展了大量的 CO₂ 气相压裂技术理论和瓦斯治理应用研究。实践表明,该技术工艺简单、安全可靠、综合成本较低,可大幅度提高瓦斯抽采率和抽采速度,降低煤层瓦斯含量和瓦斯压力;气相压裂使煤层产生大量裂隙,煤层地应力重新分布,消除局部高应力状态,起到防突消突效果,保障突出工作面安全掘进和回采^[1-13]。

山西兰花煤炭实业有限公司玉溪煤矿首采的 1301 工作面,已采取了底板岩石巷道上行穿层钻孔预抽瓦斯的区域防突措施,区域效果检验结果显示,残余瓦斯含量小于 8 m³/t,为无瓦斯突出危险性。但是,在掘进过程中,发生了多次瓦斯异常涌出现象,瓦斯突出参数 K₁ 值频繁超标,瓦斯浓度超限导致停产,掘进速度慢,严重制约了矿井的安全高效掘进。因此,为加强煤巷掘进工作面防突和防瓦斯超限管理,杜绝煤与瓦斯突出和瓦斯超限事故发生,2018 年初以来开展 CO₂ 气相压裂防突掘进技术研究和试验,降低了 K₁ 值等防突参数,消除了瓦斯异常涌出,保障了煤巷的安全快速掘进。

1 研究区概况

1.1 井田地质概况

玉溪煤矿位于山西省南部、樊庄普查区的东南部,

井田面积 26.147 km²,设计生产能力为 2.40 Mt/a,主采山西组 3 号煤层,服务年限 41.7 a。3 号煤层位于山西组下部,厚度 5.12~7.20 m,平均 5.85 m,纯煤厚度 4.62~7.00 m,平均 5.71 m。煤层顶板为泥岩、砂质泥岩、粉砂岩,局部为细粒砂岩。底板均为泥岩。该煤层厚度大且稳定,结构简单,全区可采,为稳定型可采煤层。下距 15 号可采煤层 82.80~84.54 m,平均 84.34 m。3 号煤层水分 0.86%~4.34%,平均 2.37%;灰分 11.74%~17.76%,平均 14.28%;挥发分 7.43%~9.17%,平均 8.07%;煤质为 3 号无烟煤。

1301 工作面是玉溪煤矿首采工作面,煤层平均厚度 5.85 m,布置两进三回五条顺槽,均为综掘工作面。掘进工作面 3.8 m,宽 5.8 m,工作面走向长度 1 250 m,倾向长度 200 m,工作面采用 U 型通风方式。工作面地质构造简单,位于向西倾斜的大型单斜上,倾角 3°~6°,煤层顶板附近有一层软煤,回风巷 500 m 左右有一陷落柱,北侧有一正断层,掘进工作面布置有两条底抽巷(图 1)。

1.2 瓦斯地质特征

玉溪煤矿 3 号煤层瓦斯基本参数测试结果见表 1。

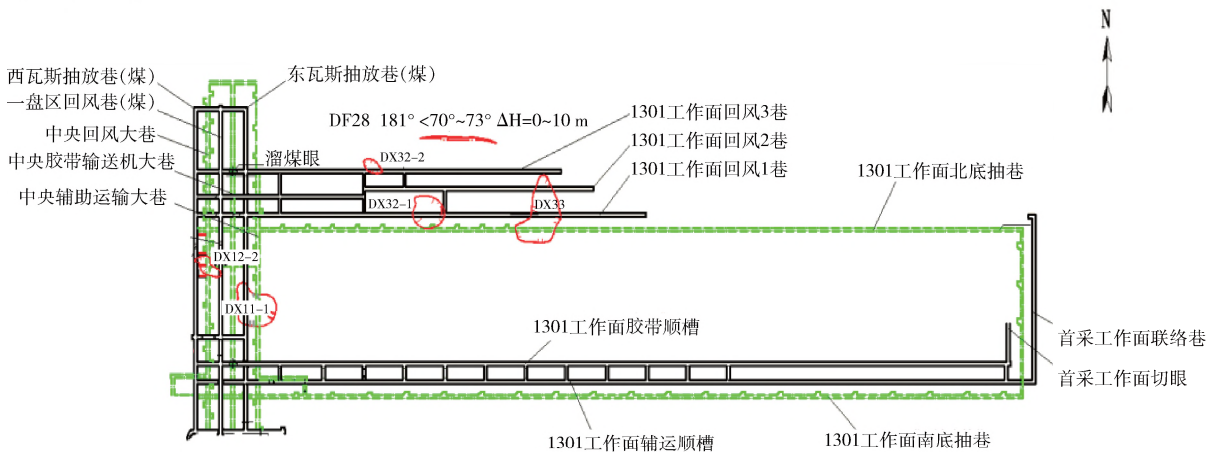


图 1 1301 工作面平面布置图
Fig. 1 Layout of 1301 work face

表 1 玉溪煤矿 3 号煤层瓦斯基本参数

Table 1 Basic parameters of methane in 3# coal seam of Yuxi coal mine

地点	煤层瓦斯压力 P/MPa	煤层瓦斯含量 W/(m ³ /t)	瓦斯放散初速度 ΔP	煤的坚固性系数 f
进风井 3 号煤层上段	1.20	17.63	25.2	1.03
进风井 3 号煤层下段	1.20	16.81	26.4	0.87
进风井 3 号煤层软煤	1.20	-	27.8	0.45
回风井 3 号煤层上段	1.42	18.32	25.7	1.09
回风井 3 号煤层中段	1.42	18.32	26.8	0.74

由表1可知,煤层原始瓦斯压力为1.50~1.65 MPa;甲烷组分96.25%~98.26%,处于甲烷带内,原煤瓦斯含量为15.43~18.68 m³/t;煤层总体上为原生结构,煤体坚硬,煤的坚固性系数 f 值为0.8~1.0,但顶部和底部有两层构造软煤,顶分层软分层厚度为0.3~0.5 m,底分层软分层厚度为0.8 m左右,软分层 f 值较小,一般为0.3~0.5,瓦斯放散初速度 ΔP 较大,为25.2~27.8,1301工作面原始瓦斯含量为16 m³/t,根据《防治煤与瓦斯突出规定》^[14],具有瓦斯突出危险性。

1.3 本项目试验前采取的防突措施及效果检验

玉溪煤矿1301工作面已经完成掘进的巷道是胶带顺槽、辅运顺槽、辅运联络巷。目前正在施工的掘进工作面包括:回风1巷、回风2巷、回风3巷、回风1巷反掘和1301工作面切眼。在本项目试验前,已经采取了底板岩石巷道穿层钻孔预抽煤巷条带煤层瓦斯区域防突措施,对覆盖区域进行了区域消突。效果检验结果表明残余瓦斯含量最大值为7.30 m³/t,小于8 m³/t;区域效果检验为无突出危险性。

1.4 存在的瓦斯问题

顶部构造煤分层具有吸钻、卡钻现象,且瓦斯解吸指标 K_1 值频繁超标,多次出现大于0.5甚至1.0的情况;1301工作面掘进过程中发生过3次瓦斯异常涌出现象,造成瓦斯超限,被迫停产,掘进速度低,严重影响了矿井的安全生产。

2 CO₂ 气相压裂技术与工程应用

2.1 气相压裂技术原理

气相压裂强化增透卸压消突的技术原理是液体

CO₂在加热条件下瞬间气化为高压气体并对煤层做功,压裂煤层,产生裂隙系统,大幅度提高渗透性,均化地应力场和瓦斯压力场,提高瓦斯抽采效率,最终实现卸压消突的目的。高压管内液态CO₂加热后在20~40 ms内迅速转化为气态,其体积瞬间膨胀500~600倍,压力剧增至设定压力,高能CO₂气冲破剪切片后从喷气阀喷出,形成高压射流对煤层做功,从而达到物理爆破造缝、增透、卸压和消突的目的^[15-16]。

2.2 气相压裂技术参数

钻机型号:3200型及以上型号;压裂器材型号:C-74L、C-74;压裂杆直径:72 mm;单根压裂杆长度:1 700~2 000 mm;液态CO₂质量:2.0~2.8 kg/根;反应时间:20~40 ms;控制压力:120~185 MPa。

2.3 气相压裂实施方案

在1301工作面煤巷掘进过程中,采取双孔气相压裂消突措施。压裂钻孔一般位于中部硬煤层,距离顶板1.8 m左右,平行巷道掘进方向钻进,钻头113 mm,钻孔深度60~80 m,压裂施工封孔段15~20 m,压裂管20~30根,压裂段长40~60 m(巷道断面压裂钻孔布置图如图2所示)。掘进段严格控制在压裂段范围内,严禁超深掘进,始终保留安全超前距20 m。

气相压裂施工顺序:施工压裂钻孔→器材检查及下井→压裂器材连接、推进→封孔与打压→压裂→解封→突出效果检验。

截至2018年11月5日,玉溪煤矿共对1301工作面施工27个循环,累计51个钻孔,巷道累计安全进尺653.5 m。

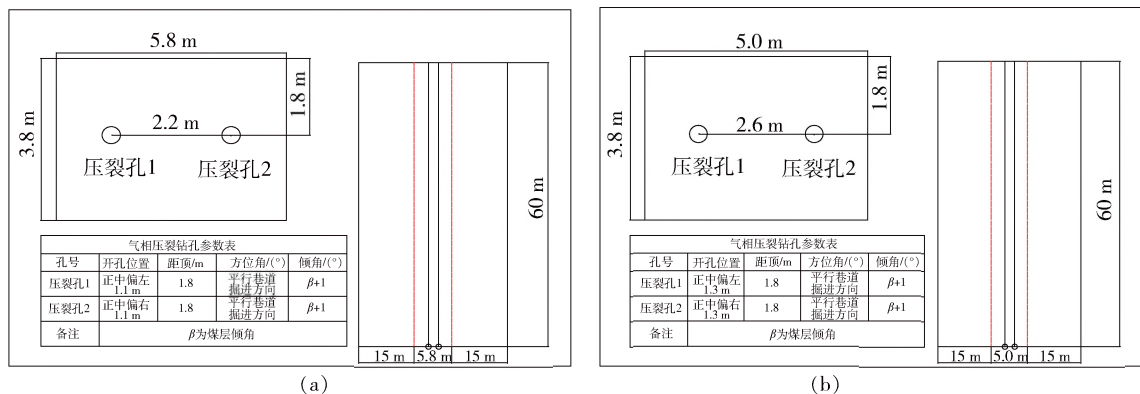


图2 气相压裂防突钻孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gas phase fracturing anti-burst drilling arrangement

3 气相压裂防突效果分析

3.1 突出指标参数测试与分析

玉溪煤矿掘进工作面采用钻屑瓦斯解吸指标 K_1 值进行区域验证、工作面预测和消突检验。采用

“9+2”的布孔方式,即2个气相压力孔和9个瓦斯抽采孔,抽采5 d之后进行效果检验。效果检验采用3个孔测试 K_1 值,即“测10 m掘7 m”方案,孔径42 mm,孔深10 m,当 K_1 值小于0.5时,可以掘进

7 m; K_1 值大于 0.5 时, 重新采取局部防突措施, 完毕后再进行 K_1 值检验。2018 年 8 月恢复生产, 1301 工作面防突检测合格后, 不论工作面迎头或检测过程中是否遇到软分层, 每班接班施工队组必须在工作面上部距顶板 30~50 cm 内位置和其他位置的软分层(其他位置如有则施工, 如无则不施工; 距顶板 30~50 cm 的位置必须施工)都均匀施工 5 个探测钻孔, 探测钻孔孔径 42 mm, 孔深 8 m, 钻孔间距 1.25 m。

1) 1301 工作面切眼巷。截至 2018 年 10 月 17 日, 1301 工作面切眼累计进行双孔气相压裂施工 4 次, 并完成 4 个循环掘进进尺。气相压裂后, 掘进过程中, 28 次参数测试 K_1 值均未超标(图 3)。2018 年 10 月 20 日开始对切眼巷(扩帮段)进行掘进, 截至 2018 年 11 月 19 日, 安全掘进 180 m, K_1 值均未超标(图 4)。

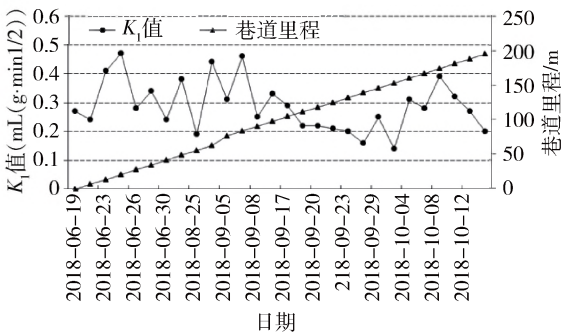


图 3 1301 工作面切眼 K_1 值对比

Fig. 3 K_1 values comparison of cut-off in 1301 work face

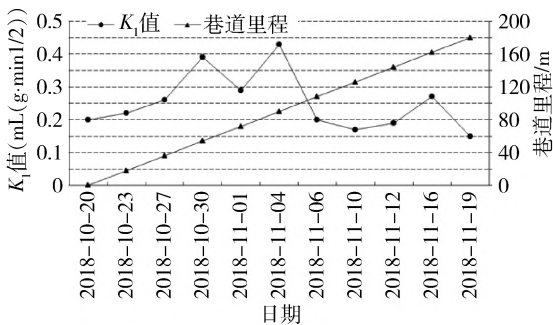


图 4 1301 工作面切眼(扩帮段) K_1 值对比

Fig. 4 K_1 values comparison of cut-off (expansion section) in 1301 work face

2) 1301 工作面回风 1 巷和回风 2 巷掘进工作面。截至 2018 年 11 月 19 日, 1301 工作面回风 1 巷掘进工作面累计进行双孔气相压裂施工 6 次, 且完成 6 个循环掘进进尺。截至 2018 年 11 月 13 日, 1301 工作面回风 2 巷掘进工作面累计进行双孔气相压裂施工 4 次, 且完成 3 个循环掘进进尺。1301

工作面回风 1 巷和回风 2 巷压裂前后 K_1 值趋势变化如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知, 1301 工作面回风 1 巷在气相压裂试验前, 2018 年 3 月 9 日~2018 年 7 月 5 日巷道掘进过程中, 除去陷落柱掘进区域, 在煤巷掘进 196.5 m 范围内 K_1 值超限 2 次, 且最大达到 1.30。2018 年 8 月实施气相压裂技术后, 截至 2018 年 11 月 19 日 1301 工作面回风 1 巷在累计进尺 333.5 m 范围内 K_1 值均未超标, 气相压裂消突效果明显。

由图 6 可知, 实施气相压裂试验前, 1301 工作面回风 2 巷在 2018 年 3 月 10 日~2018 年 7 月 5 日掘进过程中, 累计掘进 205.5 m 范围内(巷道里程 327~560 m, 排除陷落柱掘进区域), K_1 值共计超标 5 次, 平均每百米巷道掘进超标 2.4 次, 且在 K_1 值超限区域, 施工排放孔后仍连续超标, 严重影响掘进速度。2018 年 8 月在回风 2 巷实施气相压裂后, 截至 2018 年 10 月 31 日连续掘进 3 个循环(掘进 140 m), K_1 值仅超标 1 次。

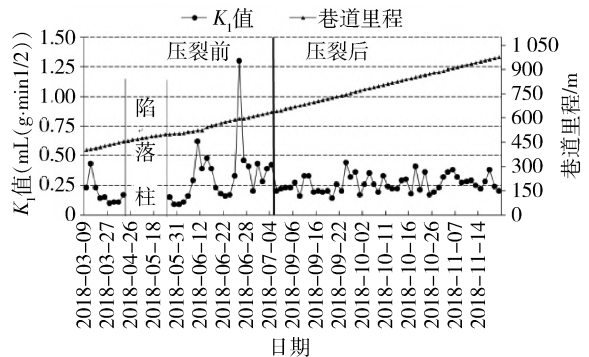


图 5 回风 1 巷压裂前后 K_1 值对比

Fig. 5 Comparison of K_1 values before and after fracturing of return roadway 1

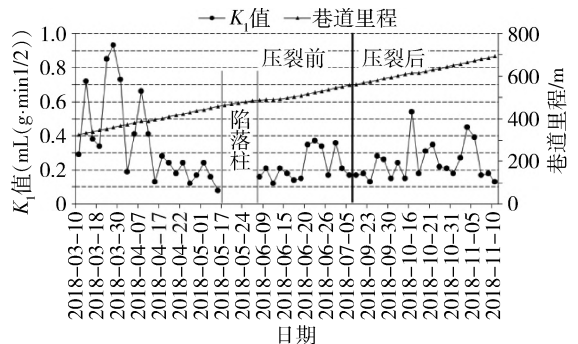


图 6 回风 2 巷压裂前后 K_1 值对比

Fig. 6 Comparison of K_1 values before and after fracturing of return roadway 2

综上所述, 未采取气相压裂措施巷道长度为 402 m, K_1 值超标 7 次, 平均每百米巷道掘进超标 1.7 次; 采取气相压裂措施巷道长度为 653.5 m, K_1

值超标1次,平均每百米巷道掘进超标0.15次,较压裂前降低了11倍,消突效果十分显著。

3.2 瓦斯涌出量效果分析

根据1301工作面回风3巷气相压裂前(2018年3月22日~2018年4月8日)和气相压裂后(2018年4月16日~2018年11月13日,其中,7月、8月为停产时间),掘进期间工作面和回风流瓦斯浓度数据,绘制了回风3巷气相压裂措施前后瓦斯浓度变化曲线对比图(图7和图8)。

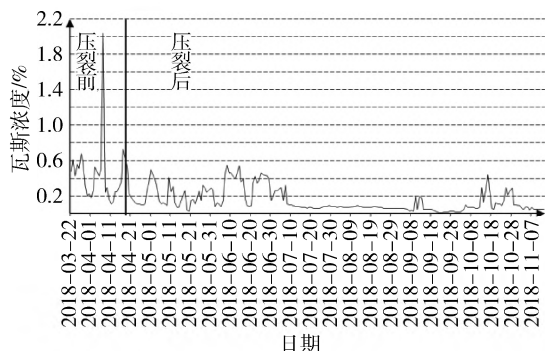


图7 回风3巷压裂前后工作面瓦斯浓度

Fig. 7 Working face methane concentration comparison before and after fracturing of return roadway 3

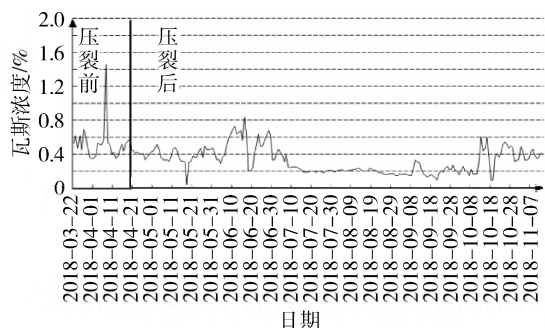


图8 回风3巷压裂前后回风流瓦斯浓度

Fig. 8 Return flow methane concentration comparison before and after fracturing of return roadway 3

由图7和图8可知,1301工作面回风3巷气相压裂前掘进期间,工作面及回风流瓦斯涌出波动性较大,峰值较高,工作面平均达到0.6%左右,发生

了3次瓦斯浓度超限,被迫停产,严重影响掘进速度和生产安全。2018年4月16日起,回风3巷使用双孔压裂施工后,在巷道掘进期间工作面及回风流瓦斯浓度明显稳定,瓦斯涌出趋于均匀化,工作面瓦斯涌出峰值降至0.3%~0.4%,回风流瓦斯涌出峰值降至0.4%左右,保障了安全快速掘进。

3.3 掘进速度效果分析

1) 1301工作面回风1巷掘进速度分析。1301工作面回风1巷气相压裂前后巷道掘进对比情况见表2。分析表明,使用气相压裂之前,1301工作面回风1巷累计掘进里程241.5 m(巷道里程401~642.5 m),排除陷落柱区域(巷道里程458~503.5 m),在连续掘进煤巷196.5 m范围内,有效掘进时间64 d,日均进尺3.12 m。截至2018年11月18日,共计在回风1巷进行双孔压裂6个循环,累计进尺333.5 m,有效掘进时间56 d,平均日进尺5.96 m。相比本项目试验之前日均3.12 m,实施气相压裂措施后的掘进速度提高了1.91倍。

2) 1301工作面回风2巷掘进速度分析。1301工作面回风2巷气相压裂前后巷道掘进情况见表3。由表3可知,1301工作面回风2巷使用气相压裂之前,2018年3月10日~2018年7月5日掘进期间,排除陷落柱区域掘进里程(465~490.5 m)及4月份停产时间,累计煤巷掘进205.5 m,有效掘进80 d,平均日进尺2.6 m,主要原因是2018年3~4月, K_1 值超标严重,实施排放孔措施后依然超标,严重影响掘进速度。回风2巷在2018年8月以来共计进行了4次双孔气相压裂施工,目前已掘进完成3个循环进尺,累计140 m,有效掘进时间32 d,平均日进尺4.4 m,掘进速度提高了1.69倍。

根据表2和表3可以计算得到,使用气相压裂前,巷道掘进累计进尺402 m,有效掘进天数144 d,日均进尺2.79 m;使用气相压裂后,巷道掘进累计进尺473.5 m,有效掘进天数88 d,日均进尺5.38 m,较气相压裂前,巷道掘进速度提高了1.92倍。

表2 回风1巷压裂前后掘进情况统计

Table 2 Excavation situation statistics before and after fracturing of return roadway 1

类别	压裂工艺	巷道里程/m	掘进时间	累计进尺/m	有效掘进天数/d	日均进尺/m
压裂前	无	401~642.5	03-09~07-05	196.5	64	3.12
压裂1	60 m 双孔	642.5~691.5	08-31~09-09	49.0	10	4.90
压裂2	60~66 m 双孔	691.5~747.5	09-14~09-22	56.0	9	6.20
压裂3	70 m 双孔	747.5~796.5	09-27~10-04	49.0	8	6.13
压裂4	70 m 双孔	796.5~852.5	10-09~10-16	56.0	8	7.00
压裂5	70 m 双孔	852.5~906	10-22~10-30	53.5	8	6.69
压裂6	70 m 双孔	906~976	11-05~11-18	70.0	13	5.38
气相压裂合计				333.5	56	5.96

表3 回风2巷压裂前后掘进情况统计

Table 3 Excavation situation statistics before and after fracturing of return roadway 2

类别	压裂工艺	巷道里程/m	掘进时间	累计进尺/m	有效掘进天数/d	日均进尺/m
压裂前	无	327~560	03-10~07-05	205.5	80	2.6
压裂1	60 m 双孔	560~602	09-01~10-02	42	12	3.5
压裂2	60~66 m 双孔	602~651	10-07~10-28	49	10	4.9
压裂3	70 m 双孔	651~700	11-01~11-10	49	10	4.9
气相压裂后合计				140	32	4.4

4 结 论

1) 采取气相压裂措施巷道长度为 653.5 m, K_1 值仅超标 1 次, 平均每百米巷道掘进超标 0.15 次, 较压裂前降低了 11 倍。

2) 使用气相压裂技术之后, 在巷道掘进过程中瓦斯涌出趋于均匀化, 瓦斯涌出峰值相对降低, 有效防止了瓦斯异常涌出, 避免了瓦斯超限, 以及所造成的安全生产灾害。

3) 使用气相压裂后, 巷道掘进累计进尺 473.5 m, 有效掘进天数 88 d, 日均进尺 5.38 m, 较气相压裂前的日均进尺 2.79 m, 巷道掘进速度提高了 1.92 倍。CO₂ 气相压裂消突快速掘进技术有效保障了矿井安全和高效生产。

参 考 文 献

- [1] CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, ZHAI Hong, et al. CO₂ gas fracturing: a novel reservoir simulation technology in low permeability gassy coal seams[J]. Fuel, 2017, 203: 197-207.
- [2] LU Tingkan, WANG Zhaofeng. Improvement of coal seam gas drain-age by under panel cross strata stimulation using highly pressured gas[J]. International Journal of Rock Mechanism & Mining Sciences, 2015, 77: 300-312.
- [3] Introduction to CARDOX International Ltd[EB/OL]. <http://www.cardox.net>.
- [4] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2631-2641. CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, et al. Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2631-2641.
- [5] 苏恒, 曹运兴, 陈莲芳. 气相压裂增透技术在煤巷掘进工作面中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 49-52. SU Heng, CAO Yunxing, CHEN Lianfang. Application of gas phase permeability-enhancing fracturing techniques in driving face of coal roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(5): 49-52.
- [6] 栗磊, 张倩, 栗伟. CO₂ 气相压裂瓦斯综合治理技术在潞安矿区的应用[J]. 煤, 2018, 27(7): 17-19. LI Lei, ZHANG Qian, LI Wei. CO₂ gas fracturing gas control technology using in Lu'an mining area[J]. Coal, 2018, 27(7): 17-19.
- [7] 赵立朋, 石晓红, 秦趣, 等. 气相压裂瓦斯快速抽采技术研究和应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 199-201. ZHAO Lipeng, SHI Xiaohong, QIN Qu, et al. Study and application of rapid gas drainage technology using gas phase fracturing[J]. Coal Technology, 2018, 37(7): 199-201.
- [8] 王志坚. CO₂ 气相压裂技术在高瓦斯掘进工作面的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(4): 157-158. WANG Zhijian. Application of CO₂ gas fracturing technology in high gas mining face[J]. Coal Technology, 2018, 37(4): 157-158.
- [9] 申豹刚, 陈颖辉. 新元煤矿气相压裂前后煤层透气性系数的变化规律[J]. 煤, 2018, 27(3): 41-42, 50, 52. SHEN Baogang, CHEN Yinghui. Change law of coal seam permeability coefficient before and after gas phase fracturing in Xinyuan coal mine[J]. Coal, 2018, 27(3): 41-42, 50, 52.
- [10] 陈颖辉, 白俊杰, 申豹刚. 新元煤矿掘进工作面气相压裂效果分析[J]. 煤, 2017, 26(11): 80-82. CHEN Yinghui, BAI Junjie, SHEN Baogang. Analysis of gas phase fracturing effects in heading face of Xinyuan coal mine[J]. Coal, 2017, 26(11): 80-82.
- [11] 杨明建. 综掘面迎头 CO₂ 气相压裂卸压增透技术研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(08): 195-196, 202. YANG Mingjian. Study on gas-phase fracturing pressure relief and permeability of heading CO₂ [J]. Coal Technology, 2017, 36(8): 195-196, 202.
- [12] 王志豪. CO₂ 气相压裂卸压增透技术在掘进工作面的应用[J]. 现代矿业, 2017, 33(6): 284-285. WANG Zhihao. Application of CO₂ gas phase fracturing pressure relief and anti-reflection technology in heading face[J]. Modern Mining, 2017, 33(6): 284-285.
- [13] 宋显锋. 掘进面迎头 CO₂ 气相压裂卸压增透技术研究[J]. 现代矿业, 2017, 33(2): 186-187, 192. SONG Xianfeng. Study on CO₂ gas phase fracturing pressure relief and anti-reflection technology in heading face[J]. Modern Mining, 2017, 33(2): 186-187, 192.
- [14] 国家安全生产监督管理局, 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [15] 翟红, 曹运兴, 傅国廷, 等. 低渗煤层气相压裂瓦斯综合治理关键技术研究与应[EB/OL]. 2014.
- [16] 曹运兴, 田林, 范延昌, 等. 低渗煤层 CO₂ 气相压裂裂隙圈形态研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 46-51. CAO Yunxing, TIAN Lin, FAN Yanchang, et al. Study on cracking ring form of carbon dioxide gas phase fracturing in low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 46-51.