

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.06.009

低渗透性煤层注液态 CO₂ 置换驱替 CH₄ 试验

马 砾^{1a,1b}, 魏高明^{1a,1b}, 王世斌², 李珍宝^{1a,1b}, 刘新民²

(1.西安科技大学 a.西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室;b.安全与科学
工程学院,西安 710054;2.韩城矿务局,陕西 韩城 715400)

摘要:针对低渗透性煤层瓦斯难以抽采的问题,结合液态 CO₂低温、低黏、渗流阻力小、相变增压等特性,提出低渗透性煤层注液态 CO₂置换驱替 CH₄技术。在韩城矿区桑树坪二号井开展煤层注液态 CO₂置换驱替 CH₄工业性试验,开发了压注工艺系统,确定了压注关键性参数,判定了 CO₂置换驱替 CH₄技术效果。试验结果表明:液态 CO₂压注时压力呈现波动特性,起始升压速率较快,达到 2.5 MPa 左右时趋于稳定;压注管路瞬时流量为 0.6~1.4 m³/h,累计压注液态 CO₂为 6.0 m³;以压注过程中检验孔内 CO₂体积分数为指标,判定试验有效影响半径达到 18 m。试验区域瓦斯抽采体积分数是原始体积分数的 2.5 倍,抽采纯量是原始纯量的 3.5 倍,相比瓦斯抽采效率提高。

关键词:低渗透性煤层;液态 CO₂;影响半径;瓦斯抽采;置换驱替

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)06-076-08

Experimental study of displacing & replacing methane in low permeability coal seam by injecting liquid carbon dioxide

MA Li^{1a,1b}, WEI Gaoming^{1a,1b}, WANG Shibin², LI Zhenbao^{1a,1b}, LIU Xinmin²

(1a. College of Energy Science & Engineering; 1b. Key Laboratory for Coal Exploitation and Disaster Prevention under Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P.R.China; 2. Hancheng Mining Bureau, Hancheng 715400, Shaanxi, P.R.China)

Abstract: This paper is to solve the gas drainage problem of low permeability coal seam. Based on the characteristics of liquid carbon dioxide with low temperature, viscosity, percolation resistance and phase change pressurization, the liquid carbon dioxide enhanced methane recovery technology was proposed to improve the gas drainage efficiency. Liquid carbon dioxide injection test was carried out at Sangshuping No.2 mine shaft, Hancheng mining area, and by which injection process was developed, the key parameters were determined and the methane extraction efficiency influenced by carbon dioxide was examined. The results show that the pressure of injecting is fluctuated. Initially, injecting pressure rises fast and then keeps stable when rising to 2.5 MPa. The flow rate of injection maintains from 0.6 m³/h to 1.4 m³/h and the total cumulant of liquid carbon dioxide is 6.0 m³. The concentration of carbon dioxide in the test borehole is taken as index, and it's found that the influence radius of the test is 18 m. The methane concentration and

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574193,51504186)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51574193, 51504186).

作者简介:马砾(1978—),男,西安科技大学教授,研究生导师,主要从事重大灾害事故防治与应急救援技术研究,
(E-mail)66963729@qq.com。

the purity in the test area are 2.5 and 3.5 times of those in the original data respectively, which proves the proposed technology enhances the gas extraction efficiency.

Keywords: low permeability coal seam; liquid carbon dioxide; influence radius; gas extraction; displacement and replacement

中国有超过 37% 的高瓦斯或者煤与瓦斯突出矿井,而其中 95% 的开采煤层渗透性系数为 0.04 ~ 0.004 m²/(MPa² · d),远低于可抽采 0.1 m²/(MPa² · d) 的要求,煤层瓦斯抽采难度大^[1-2]。采前预抽煤层瓦斯是防治煤与瓦斯突出,实现煤与瓦斯共采的主要措施^[3]。布置密集钻孔抽采煤层瓦斯时有效抽采范围小,瓦斯抽采效果差^[4]。为了增加煤层渗透性,目前国内外主要采用煤层水力压裂、水力割缝、CO₂ 爆破及炸药爆破致裂等技术,这些技术在增加煤体裂隙数量方面起到了良好的效果^[5]。水力压裂技术是利用高压水力冲击作用压裂煤体,施工工艺简单,可操作性强,压裂煤层时能够快速形成垂直最小水平主应力的的大裂隙,但形成的裂隙数量少,增透能力有限^[6-7]。水力割缝技术是利用高压脉动水射流切割作用,迫使煤体沿水力切割方向形成较多的裂缝,但水力切割半径较小,不能起到大范围增透的目的^[8]。CO₂ 爆破致裂技术是利用液态 CO₂ 瞬时升温发生相变,导致体积急剧膨胀,产生高压冲击波,迫使煤体产生大量裂隙,由于爆破工艺复杂且爆破能量有限,不能大范围增透^[9]。炸药爆破致裂是利用爆破高应力冲击波作用,使煤体产生大量短缝,但爆破后孔壁破碎严重,反而降低了煤层渗透率^[10-11]。液态 CO₂ 压裂作为新型增透方法,主要利用液态 CO₂ 低温冻胀、相变增压等特性,促进煤体裂隙发育,已在煤层增透方面开展了工业性试验,并分析了压裂后煤体裂隙扩展、压裂机理^[12]。但针对高瓦斯低渗透性煤层液态 CO₂ 压裂工艺,有效影响半径以及 CO₂ 在煤体裂隙中渗流扩散时与 CH₄ 产生的置换驱替效应未做研究。为了进一步确定低渗透性煤层压注液态 CO₂ 关键性参数,抽采参数及抽采效果,笔者在韩城矿区桑树坪二号井 3# 煤层开展工业性试验,主要从压裂工艺、钻孔布置、瓦斯抽采半径等三方面开展研究。通过钻孔气体监测,检验压裂与瓦斯抽采效果,为完善煤层压注液态 CO₂ 置换驱替 CH₄ 技术提供依据。

1 理论分析

1.1 增透作用

液态 CO₂ 作为一种低温流体,循环注入时瞬时低温作用会使煤层温度场发生变化,迫使煤基质骨架收缩。温度急剧降低时,温差作用对煤体产生的收缩应力大于张拉应力,结构弱面原始裂隙网络失稳,在收缩应力作用下断裂,煤层整体结构破坏,裂隙网络重组^[13]。煤层孔裂隙中含有一定的自由水和结合水,瞬时低温作用使煤体水分结冰体积膨胀,对煤体原生孔裂隙产生挤压应力作用,促使煤体孔隙重组和裂隙扩展延伸^[14]。液态 CO₂ 在孔裂隙通道渗流时会与煤体进行热量交换,煤层内部温度场出现正负交替变化,产生低温冻结-融化效应,损伤煤体孔裂隙结构^[15]。热交换过程中液态 CO₂ 升温相变压力增大,在应力作用下煤基质膨胀,迫使煤体原生裂隙扩张、延伸与新裂隙的产生,增大了裂隙网络面积,煤体渗透性提高^[16]。

1.2 置换驱替作用

煤体中 80% ~ 90% 的 CH₄ 以吸附态存在,其余 CH₄ 以游离态赋存于煤体孔裂隙中。热力学理论认为外界条件相同时不同气体分子运动剧烈程度不同,气体分子的平均自由度方程为^[17]

$$\lambda = \frac{2Z}{P} \sqrt{\pi \frac{Rt}{8M}}, \quad (1)$$

式中: Z 为气体动力粘度; t 为温度; R 为瓦斯气体摩尔常数; P 为气体压力; M 为气体摩尔质量。

CO₂ 置换驱替 CH₄ 过程如图 1 所示,在相同的温度及压力条件下,CH₄ 的动力粘度远大于 CO₂,分子的摩尔质量小于 CO₂ 分子,因此 CH₄ 分子自由度大于 CO₂ 且无规则运动比 CO₂ 剧烈。当温度及压力等因素发生变化时,CH₄ 分子与煤基质之间的范德华力减弱,容易脱附^[18]。研究表明在相同条件下,CO₂ 在煤基质中的吸附能力强于 CH₄,当进入煤体 CH₄ 吸附区域 CO₂ 的量增多时,二者产生竞争吸附^[17]。主要表现为随着进入瓦斯吸附位的 CO₂ 分压增大,降低 CH₄ 分压,煤基质内部气体组分的吸附-解吸平衡被破坏,吸附能力更强的 CO₂ 分子占据 CH₄ 吸附位,使 CH₄ 分子脱附^[19]。随着 CO₂ 的持续注入,煤体裂隙通道两端压差及体积

分数差作用明显,大量的 CH_4 气体被置换驱替至煤体裂隙通道,最终渗流扩散至瓦斯抽采区域。

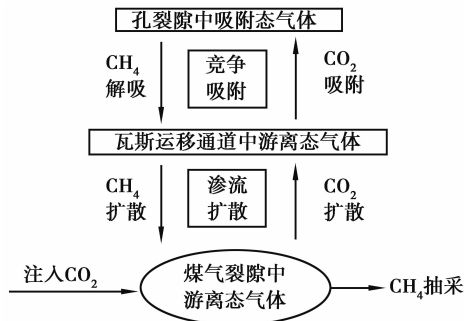


图 1 CO_2 置换驱替 CH_4 示意图

Fig.1 Diagram of displacement of CH_4 by CO_2

2 压注系统工艺

压注工艺系统如图 2 所示,主要由液态 CO_2 槽车、柱塞泵、 T_3 数据采集仪、涡轮流量计、压力变送器、耐压输送管路、控制阀等组成,柱塞泵额定功率 11 kW,流量 1 000 L/h,最大工作压力 15 MPa。压注工艺流程为:从槽车恒定流量输出的液态 CO_2 通过柱塞泵加压后经耐压输送管路压注进入煤体,压力传感器及涡轮流量计分别将压注时孔口压力及压注量通过信号线传输至 T_3 数据采集仪,在线监测试验关键性参数。

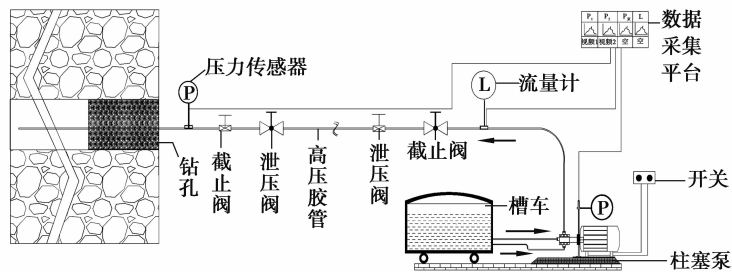


图 2 液态 CO_2 压注系统布置

Fig.2 The system of liquid CO_2 injection

3 现场试验

3.1 工作面概况

试验矿区位于韩城市东北约 48 km 的黄河西岸,目前主采的 3# 煤层为高瓦斯低渗透性煤层,平均厚度 5~7 m,倾角 $3^\circ\sim 5^\circ$ 。煤层不同区域瓦斯含量呈不均匀性,相对瓦斯含量最大值为 $14.15 \text{ m}^3/\text{t}$,实测最大瓦斯压力 0.40 MPa,瓦斯放散初速度 $\Delta P = 17\sim 26 \text{ mL/s}$,坚固性系数 $f_x = 0.22\sim 0.45$ 。二号井扩界区域 3# 煤层为近水平厚煤层,中部存在软分层,瓦斯抽采时钻孔存在喷孔、夹钻等瓦斯动力预兆。3# 煤层巷道掘进期间,采用密集布置钻孔的方法采前预抽煤层瓦斯,钻孔布置间距 1.5 m,孔深 180 m,存在钻孔施工量大、抽采时间长且抽采效率低等难题。因此,试验选择在桑树坪二号井中央辅助运输大巷进行本煤层压注液态 CO_2 置换驱替 CH_4 的对比性试验研究。

3.2 钻孔布置

根据前期在兖州矿区 3 煤层南屯矿井 3302 工作面液态 CO_2 压裂增透试验影响半径及瓦斯抽采效果^[12],本次试验确定在工作面 18 m 的范围内共布置一个压注孔(Y),5 个检验孔($J_1\sim J_5$)。如图 3 所示,钻孔均垂直煤壁,孔深 180 m,孔径 94 mm,沿煤层走向布置,孔口距煤层底板 1.5 m,检验孔 $J_1\sim J_5$ 距压注孔(Y)的距离分别为 7,10,12,15,18 m。

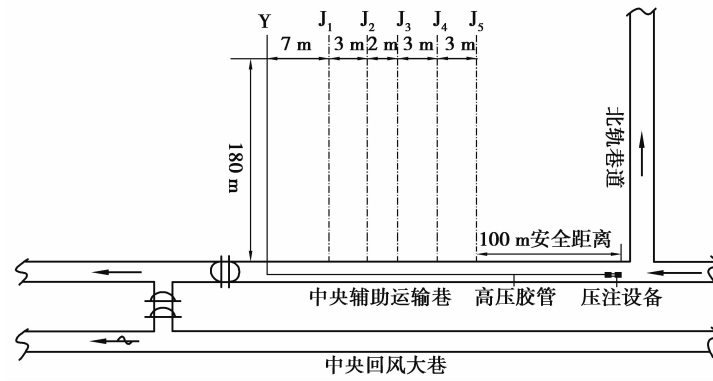


图 3 钻孔布置

Fig.3 The layout of bore hole

3.3 封孔方式

本次试验钻孔封孔采用“两堵一注”方式,如图 4 所示。

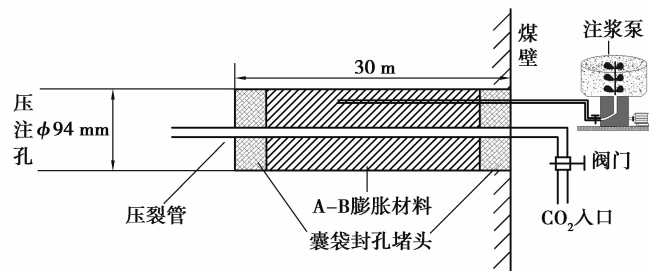


图 4 封孔示意图

Fig.4 Diagrammatic sketch of sealed borehole

封孔深度为 30 m,注浆段布置内径 25 mm 注浆铁管和补浆管,注入水灰比为 0.5 : 1 的水泥浆至密实,注浆过程中压力稳定在 2.0 MPa。为确保压注钻孔气密性,封孔中间段用 A-B 膨胀材料封堵。

3.4 试验过程

本次压注液态 CO₂ 共计 3 d,压注时主要对注液时间、孔口最大压力、单次压注量及最大泵压等关键性参数记录储存,如表 1 所示。

表 1 压注关键参数

Table 1 Key parameters of injection

时间	关键参数			
	注液时间/min	孔口压力 P_{max} /MPa	压注量/m ³	泵压 P_{max} /MPa
第一天	114	1.87	1.0	2.01
第二天	213	2.68	3.2	2.78
第三天	166	2.65	1.8	2.72

注液过程中压注孔(Y)孔口压力曲线如图 5 所示,包含初始压注“气-液”相态平衡建立、注液阶段、保压阶段。

第一天压注过程(注液 114 min):注液 0~32 min 时,孔口压力急剧上升,随注入的 CO₂ 在煤体裂隙渗流扩散,压力逐渐平稳并有衰减趋势;60 min 后加大注液流量时压力升高,孔口最大升至 1.87 MPa;114 min 后停止注液,观察压注结束后钻孔压力变化情况。第一天注液时平均升压速率为 0.018 MPa/min,平均压降速

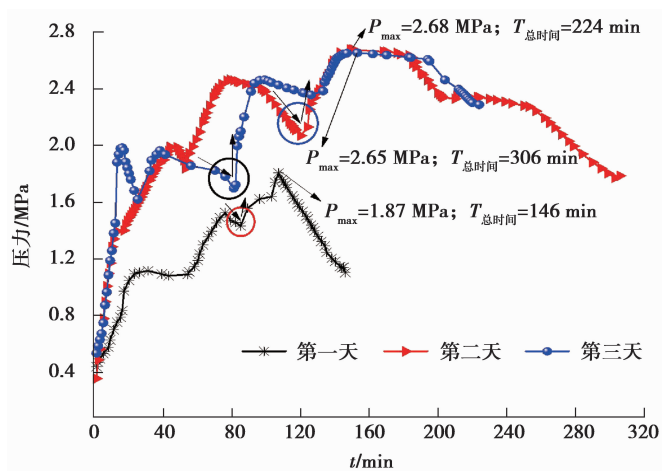


图 5 压注过程中孔口压力变化曲线

Fig.5 The varied curves of orifice pressure in injecting process

率为 0.033 MPa/min,表明第一天注入煤层中的 CO_2 沿煤体裂隙渗流扩散较快。

第二天压注过程(注液 214 min):注液 0~43 min 时,孔口压力急剧上升。44~157 min 时间段内,随着注液时间及注液量的递增,孔口压力出现两次“V”字形波动,最大孔口压力为 2.68 MPa。因为恒定流量向煤层压注液态 CO_2 时,煤体裂隙不断发育, CO_2 渗流通道增多,孔口压力减小;当注液流量大于 CO_2 渗流量时,孔口压力增大。159 min 后停止注液,观察注液结束后钻孔压力变化。第二天注液时平均升压速率为 0.015 MPa/min,平均压降速率为 0.027 MPa/min。表明随着煤层中注液量的增加, CO_2 向煤体裂隙内的渗流速率减小,因此第二天的压力变化速率相比第一天呈减小趋势。

第三天压注过程(注液 166 min):随着压注时间及注液量的增加,孔口压力变化趋势与第二天相似,出现三次“V”字形压力波动,孔口最大压力为 2.65 MPa。第三天注液平均升压速率为 0.011 MPa/min,平均降压速率为 0.024 MPa/min。由第三天压力变化速率进一步说明随着压注时间和注液量的增加,煤体中 CO_2 的渗流扩散逐渐趋于稳定。

4 效果分析

4.1 影响半径

液态 CO_2 压注试验结束后保压 2~3 h,待压力降至 0.7 MPa 以下(主要考虑安全性)时测定检验孔内 CO_2 体积分数,结果如表 2 所示。

表 2 检验孔 CO_2 体积分数实测结果Table 2 Test results of CO_2 concentration

钻孔 编号	距 Y 孔 位置/m	钻孔内 CO_2 体积分数 初始值/%	CO_2 体积分数 (第一天)/%	CO_2 体积分数 (第二天)/%	CO_2 体积分数 (第三天)/%
J ₁	7	0.08	0.60	1.00	1.50
J ₂	10	0.12	0.80	1.50	2.50
J ₃	12	0.00	0.40	0.70	1.60
J ₄	15	0.14	0.80	2.00	2.50
J ₅	18	0.04	0.60	2.00	3.20

试验前测定 J₁~J₅ 检验孔 CO_2 体积分数为 0.00%~0.14%,试验后分析检验孔内 CO_2 体积分数可知:各检验孔 CO_2 体积分数与压注时间、累积压注量正相关,即随着压注时间和压注量的增加,煤体中 CO_2 体积分数也会增大,说明煤层中注入液态 CO_2 时促进了煤体裂隙发育, CO_2 在煤体中的渗流量及渗流范围增大。因

此根据检验孔内 CO₂ 体积分数变化,判定试验有效影响半径达到 18 m。特别地,由于 J₃ 检验孔位于煤层软夹层中,钻孔准备阶段塌孔严重,钻孔内部被煤块压实,CO₂ 运移受阻,试验结束测定 J₃ 检验孔内 CO₂ 体积分数小于其余检验孔。相比于矿井原有瓦斯抽采方法:密集布置瓦斯抽采钻孔影响半径 1.5 m,深孔预裂爆破影响半径 5 m,利用 0.5 MPa 压风向煤层注空气驱替瓦斯的影响半径 8 m,本次试验有效影响半径明显增大。

4.2 检验孔 CO₂ 体积分数变化

瓦斯抽采时测定 30 d 检验孔 J₁~J₅ 的 CO₂ 体积分数如图 6 所示,由于 J₃ 孔塌孔严重,所测数据不能真实反映煤层 CO₂ 运移,故以其余检验孔为准,分析抽采初期、抽采中期及抽采后期的 CO₂ 体积分数变化。

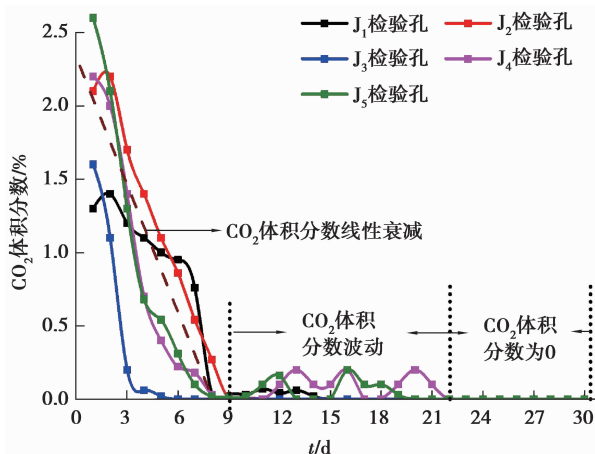


图 6 检验孔 CO₂ 体积分数曲线

Fig.6 The curves of CO₂ concentration in inspection hole

1)在抽采初期(第 0~8 天):各钻孔 CO₂ 体积分数初值在 1.3%~2.6%,抽采 8 d 后 CO₂ 体积分数快速减小为 0。由于钻孔周围煤体裂隙中含有压注的 CO₂ 气体,随着抽采时间增加,煤层裂隙中的 CO₂ 连同解吸的 CH₄ 气体共同抽采。2)抽采中期(第 9~23 天):各钻孔内 CO₂ 体积分数在 0.02%~0.18% 范围内波动,表明吸附在煤基质中的 CO₂ 逐渐解吸,缓慢释放。3)抽采后期(第 24~30 天):钻孔中 CO₂ 体积分数为 0,说明煤层中的 CO₂ 气体分子达到吸附解吸平衡状态。

4.3 瓦斯抽采效果

液态 CO₂ 压注试验前对同一工作面密集钻孔抽采的原始区域煤层瓦斯体积分数及纯量持续 60 d 观测,由图 7(a)可知原始区域煤层瓦斯体积分数均值为 16.8%,抽采 3 d 后瓦斯体积分数达到最大值 27.9%,抽采至第 10 天瓦斯体积分数快速衰减至 10%~12%。图 7(b)可知原始区域抽采瓦斯纯量最大值为 0.4 m³/min,抽采 3 d 以后抽采瓦斯纯量衰减至均值为 0.22 m³/min 并保持稳定。因此,仅靠布置密集钻孔预抽煤层瓦斯抽采效率低。

试验区域液态 CO₂ 压注后对钻孔保压 8 h 进行瓦斯抽采,效果观测时间为 60 d,结果如图 7 所示。由图 7(a)可知抽采前 33 天瓦斯体积分数与纯量相对于原始数据均有大幅度提升,最大瓦斯体积分数为 75%,最大抽采纯量为 1.35 m³/min。前 33 天瓦斯抽采体积分数及纯量如图 7 中 L₁、L₃ 所示,相比原始区域抽采瓦斯体积分数及纯量,试验后的瓦斯抽采维持在较高水平。在第 34~41 天抽采时如图 7(a)中框图标记的瓦斯体积分数出现衰减,由 61% 衰减至 25.2%。如图 7(b)中框图标记的瓦斯纯量也出现衰减,由 0.86 m³/min 衰减至 0.41 m³/min。第 42~60 天的瓦斯体积分数及纯量如图 7 中 L₂、L₄ 所示维持在相对平稳的状态,本阶段瓦斯抽采效率相对较低。即便如此,瓦斯体积分数和纯量也高出原始抽采量的 1 倍。

分析第 60 天的瓦斯体积分数及纯量变化情况可知试验过程中单孔压注量为 6 m³ 时,瓦斯高效抽采的时间段为 33 d。压注后的瓦斯抽采半径为 18 m,在试验有效影响半径范围内。压注后抽采瓦斯体积分数、纯量及日平均抽采量等参数如表 3 所示。

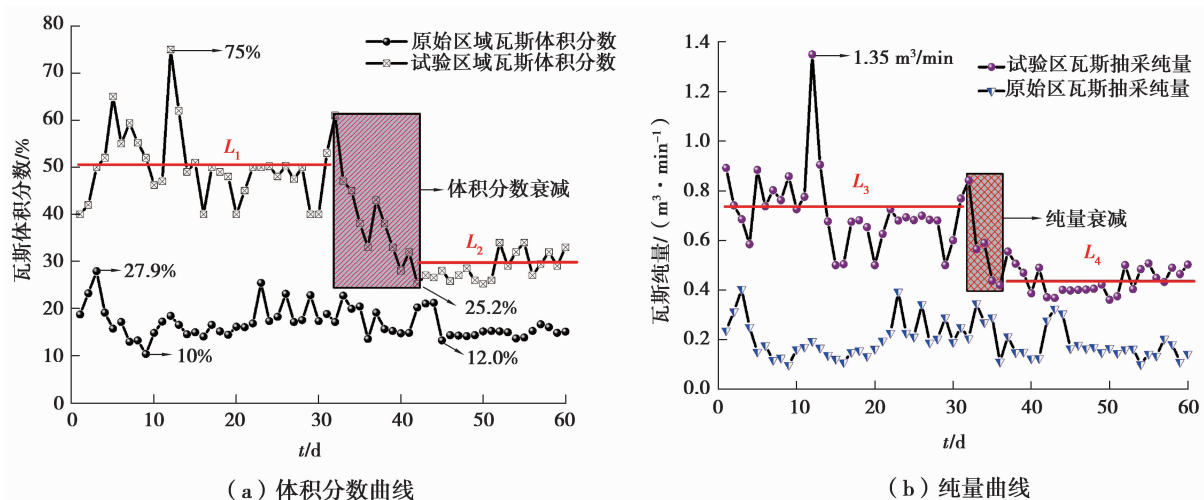


图 7 瓦斯体积分数与纯量随时间变化曲线

Fig.7 The varied curves of gas concentration and purity with time

表 3 压注前后抽采数据

Table 3 Drainage data before and after injection

名称	瓦斯抽采体积分数/%			瓦斯抽采纯量/(m³·min⁻¹)			日平均抽采量/m³
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
原始数据	27.90	10.30	17.5	0.37	0.09	0.17	263.02
试验数据	75.00	25.22	40.22	1.35	0.37	0.59	849.60

分析试验前后抽采瓦斯体积分数与纯量的最大值、最小值及平均值可知:试验后抽采瓦斯体积分数是原始体积分数的 2.5 倍,抽采纯量为原始纯量的 3.5 倍,瓦斯抽采效果明显。

5 结 论

1) 液态 CO₂ 压注过程中孔口压力呈现波动特性,初始压力上升速率较快,最大孔口压力为 2.68 MPa,且压力衰减速率大于升压速率,压入煤体中的 CO₂ 渗流扩散较快。压注管路流量保持在 0.6~1.4 m³/h,单孔累积压注量 6.0 m³。

2) 本次低渗透性煤层压注液态 CO₂ 置换驱替 CH₄ 试验的有效影响半径为 18 m,在该范围内布置钻孔时,瓦斯高效抽采时间为 33 d。

3) 试验后抽采瓦斯体积分数是原始体积分数的 2.5 倍,抽采纯量为原始纯量的 3.5 倍,试验表明向煤层压注液态 CO₂ 能够有效置换驱替煤层瓦斯。

参考文献:

- [1] Yuan L. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 3-11.
- [2] 袁志刚,任梅清,沈永红,等. 穿层钻孔煤巷条带水力压裂防突技术及应用[J]. 重庆大学学报,2016,39(1):72-78.
YUAN Zhigang, REN Meiqing, SHEN Yonghong, et al. Hydraulic fracturing technology by drilling through strata for outburst prevention in coal roadway strips and its application[J]. Journal of Chongqing University, 2016,39(1):72-78. (in Chinese)
- [3] 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 第二版. 徐州:中国矿业大学出版社,2010:253-256.
LIN Baiquan. Gas prevention and control theory and technology of mine[M]. 2nd edition. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 253-256. (in Chinese)
- [4] Lin B Q, Li H, Yuan D S, et al. Development and application of an efficient gas extraction model for low-rank high-gas coalbeds[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2(1): 76-83.
- [5] 赵龙,王兆丰,孙矩正,等. 液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术,2016,44(3):75-79.

- ZHAO Long, WANG Zhaofeng, SUN Juzheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79. (in Chinese)
- [6] 杜春志,茅献彪,卜万奎.水力压裂时煤层缝裂的扩展分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2): 231-234.
DU Chunzhi, MAO Xianbiao, BU Wankui. Analysis of fracture propagation in coal seams during hydraulic fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 231-234. (in Chinese)
- [7] 赵源,曹树刚,李勇,等.本煤层水压致裂增透范围分析[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4): 644-650.
ZHAO Yuan, CAOSHUGANG, LI Yong, et al. The analysis of antireflection range in coal seam hydraulic fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(4): 644-650. (in Chinese)
- [8] 卢义玉,葛兆龙,李晓红,等.自激振荡脉冲水射流割缝新技术在逢春煤矿石门揭煤中的应用研究[J].重庆大学学报,2008,31(suppl1): 98-100.
LU Yiyu, GE Zhaolong, LI Xiaohong, et al. New technology of self-excited oscillation pulsed jet slotting in coal mine of cross-hole FengChun applied research in coal[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(S1): 98-100. (in Chinese)
- [9] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,1(34): 1-5.
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on enhancing gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 1(34): 1-5. (in Chinese)
- [10] 朱帅虎.低渗透性煤层粉乳炸药预裂爆破增透实验及工艺研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
ZHU Shuaihu. The study on permeability increasing experiments and techniques by deep hole pre-splitting blasting with powder-emulsion in explosive in low permeability coal seam[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2014. (in Chinese)
- [11] 黄文尧,颜事龙,刘泽功,等.煤矿瓦斯抽采水胶药柱在煤层深孔爆破中的研究与应用[J].煤炭学报,2012,37(3): 472-476.
HUANG Wenyao, YAN Shilong, LIU Zegong, et al. Research and application of water gel explosive grain on coal mine gas extraction in coal seam deep hole blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 472-476. (in Chinese)
- [12] 文虎,李珍宝,王振平,等.煤层液态 CO₂ 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J].煤炭学报,2016,41(11): 2793-2799.
WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO₂ fracturing process for increasing permeability and the characteristic of crack propagation in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2793-2799.
- [13] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(1): 1-5.
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [14] Wen H, Li Z B, Deng J, et al. Influence on coal pore structure during liquid CO₂-ECBM process for CO₂ utilization[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 21: 543-552.
- [15] Xu J Z, Zhai C, Liu SM, et al. Pore variation of three different metamorphic coals by multiple freezing-thawing cycles of liquid CO₂ injection for coal-bed methane recovery[J]. Fuel, 2017, 208: 41-51.
- [16] Xu J Z, Zhai C, Liu SM, et al. Feasibility investigation of cryogenic effect from liquid carbon dioxide multi cycle fracturing technology in coal-bed methane recovery[J]. Fuel, 2017, 206: 371-380.
- [17] 张遵国.煤吸附/解吸变形特征及其影响因素研究[D].重庆:重庆大学,2015.
ZHANG Zunguo. Study on characteristics of adsorption/desorption-induced deformation and its influencing factors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [18] De Silva P N K, Ranjith P G. Understanding and application of CO₂ adsorption capacity estimation models for coal types[J]. Fuel, 2014, 121: 250-259.
- [19] 马志宏,郭勇义,吴世跃.注入二氧化碳及氮气驱替煤层气机理的实验研究[J].太原理工大学学报,2001,32(4): 335-338.
MA Zhihong, GUO Yongyi, WU Shiyue. Experimental study on the mechanism of injecting carbon dioxide and nitrogen to displace coal-bed methane[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(4): 335-338. (in Chinese)