



移动阅读

樊世星,文虎,程小蛟,等.井下高压液态 CO₂ 压裂增透煤岩成套装备研制与应用[J].煤炭学报,2020,45(S2):801-812.

FAN Shixing, WEN Hu, CHENG Xiaojiao et al. Research and application of a complete set equipment of permeability enhancements induced by high-pressure L-CO₂ fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 801-812.

井下高压液态 CO₂ 压裂增透煤岩成套装备 研制与应用

樊世星^{1,2,3}, 文虎^{2,3}, 程小蛟^{2,3}, 张纯如⁴, 魏高明^{2,3}, 翟小伟^{2,3}, 陈建⁴, 张铎^{2,3}, 刘名阳^{2,3}

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 淮河能源控股集团 煤业分公司, 安徽 淮南 232001)

摘要:我国煤层渗透率低、瓦斯压力高、含量大,原始煤层瓦斯抽采困难。为提高煤层瓦斯抽采率、缩短预抽时间,必须实施人工增透。而众多压裂增透技术中,液态 CO₂ 压裂兼具压裂增透和驱替置换的双重瓦斯强化抽采作用,是当前低渗透煤层压裂改造方法的一个研究热点。为探索液态 CO₂(L-CO₂) 压裂增透技术在高瓦斯低透气性煤层中的应用及效果,类比水力压裂施工工艺,提出了井下高压(30 MPa) 液态 CO₂ 压裂增透煤岩成套装备系统架构,确定了决定装备性能的5个关键参数。基于弹性力学理论、相似模拟实验和装备自身结构特点,综合考虑 L-CO₂ 低黏强渗透性和其相变特征,建立了 L-CO₂ 压裂煤岩起裂压力计算模型,推导了水和 L-CO₂ 压裂注液量的量化表征关系,得到了关键参数的科学确定方法。采用该方法,针对淮南潘三矿 C₁₃₋₁ 煤层地质赋存条件,研发了国内首套井下高压(30 MPa) L-CO₂ 压裂增透煤岩成套装备,进行了井下上向穿层钻孔的 L-CO₂ 压裂增透煤层现场试验。结果表明:L-CO₂ 压裂增透影响半径约 25 m,此范围内单孔瓦斯抽采体积分数提高约 1.47 倍,抽采纯量提高 1.75~3.30 倍;抽采钻孔出现明显的压裂增流效应,且随抽采孔与压注孔间距离的增加,增流效应逐渐减弱。

关键词: 高压; 液态 CO₂(L-CO₂) 压裂; 增透煤层; 装备研制; 工程应用

中图分类号: TD712.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2020)S2-0801-12

Research and application of a complete set equipment of permeability enhancements induced by high-pressure L-CO₂ fracturing

FAN Shixing^{1,2,3}, WEN Hu^{2,3}, CHENG Xiaojiao^{2,3}, ZHANG Chunru⁴, WEI Gaoming^{2,3}, ZHAI Xiaowei^{2,3}, CHEN Jian⁴, ZHANG Duo^{2,3}, LIU Mingyang^{2,3}

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention under Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Coal Mining Company Limited, Huaihe Energy Holding Group, Huainan 232001, China)

Abstract: Coal seams in China have many features, such as low permeability, high gas pressure and large gas content, and it is extremely difficult to extract gas from the original coal seam. The permeability has to be increased in order to improve the efficiency of extracting gas, shorten the time of extracting gas in advance. Among many technologies of in-

收稿日期: 2020-02-16 修回日期: 2020-07-24 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0206

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51974240); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51904234)

作者简介: 樊世星(1989—),男,山西孝义人,讲师,博士。E-mail: fanxust@yeah.net

通讯作者: 文虎(1972—),男,新疆石河子人,教授,博士生导师。Tel: 029-83858205, E-mail: wenh@xust.edu.cn

creasing the permeability by cracking coal rock ,liquid CO₂ can not only contribute to the increase of permeability but also substitute for gas ,which can improve the efficiency of extracting gas significantly.In order to explore the application and effect of the L-CO₂ fracturing technology in high gassy and low permeability coal seams ,referring to the hydraulic fracturing technique ,the technical framework of a complete set equipment of permeability enhancements induced by high pressure (30 MPa) L-CO₂ fracturing is proposed.And then 5 key parameters that determine set equipment performance were identified.At the same time ,based on the elastic mechanics theory ,similar simulation experiments ,and the structural characteristics of the equipment ,considering the low viscosity and strong permeability of L-CO₂ and its phase transition characteristics ,an initiation pressure calculation model for L-CO₂ fracturing was established and the quantitative characterization relationship between the water injection volume of fresh water and L-CO₂ fracturing was derived.As a result ,the scientific determination method of 5 key parameters was obtained.With this method ,in terms of the geological conditions of the C₁₃₋₁ coal seam in Pansan Coal Mine ,Huainan ,the first domestic complete set equipment of permeability enhancements induced by high pressure (30 MPa) L-CO₂ fracturing was developed.And its field test was carried out underground.The results show that the influence radius of L-CO₂ fracturing can be reach to 25 m approximately.Within this range ,the single-hole gas drainage concentration is increased by about 1.47 times ,and the drainage volume is increased by 1.75-3.30 times.There is a significant increase of the flow rate in drainage holes ,induced by the L-CO₂ fracturing.Moreover ,the effect of flowrate increasing is gradually weakened with the increasing of the distance between the drainage holes and the injection hole.

Key words: high pressure; liquid CO₂ fracturing; permeability enhancement; complete set of equipment; engineering application

我国 50%以上的煤层为高瓦斯煤层 ,70%的矿井为高瓦斯矿井^[1]。全国一半以上的煤炭开采受到瓦斯灾害的威胁^[2] ,瓦斯已成为我国煤炭安全高效开采的重大困扰。此外 ,瓦斯会对大气环境造成较大危害 ,其产生的温室效应对臭氧层的破坏分别是 CO₂ 危害量的 21 倍和 7 倍^[3]。与其灾害性相对的 ,瓦斯又是一种清洁、高效、无污染的资源。因此 ,加大煤层瓦斯抽采力度 ,最大限度降低煤层瓦斯含量 ,不仅可以保障矿井安全生产 ,促进大气环境保护 ,还有助于充分利用瓦斯资源 ,提高矿井经济效益。

我国煤层地质构造复杂 ,瓦斯含量高 ,煤层渗透率低 ($<10^{-15} \text{ m}^2$) ,原始煤层瓦斯抽采效果普遍较差^[4-5]。为提高煤层瓦斯抽采率、缩短预抽时间 ,自 20 世纪 70 年代以来 ,国内外学者先后研发了多种煤层增透及瓦斯促抽技术 ,并在诸多矿区进行了现场试验。主要包括以水力压裂、水力割缝、炸药爆破、冲击波致裂、液态 CO₂(L-CO₂) 爆破等为代表的孔裂隙重构技术^[6-9] ,以及注热、微波、声波等为代表的瓦斯强化解吸技术^[10-12]。

与以上众多压裂增透技术相比 ,L-CO₂压裂具有压裂增透和驱替置换的双重瓦斯强化抽采作用 ,是目前低透气性煤层压裂改造方法的研究热点。国内外现阶段关于 CO₂压裂增透的研究主要集中在物理相似模拟和油气增产现场试验。物理相似模拟实验方面: ISHIDA 等^[13]、卢义玉等^[14]、JIANG 等^[15]通过实

验研究了 L-CO₂和超临界 CO₂(SC-CO₂) 压裂花岗岩和页岩试件过程起裂压力特征 ,发现 CO₂压裂的起裂压力要低于水力压裂。刘国军等^[16]综合分析 SC-CO₂致裂页岩试件压力时间演化曲线和声发射计数规律 ,对 ISHIDA 的实验结果进行了验证 ,将页岩压裂过程分为容腔充填、孔隙压力累积、压裂破坏 3 个阶段。王磊等^[17]、DENG 等^[18]研发了类似的真三轴实验装备 ,对比了 SC-CO₂、水对煤岩试件压裂效果的影响 ,结果表明 SC-CO₂压裂更容易起裂 ,起裂压力减小约 28.3% ,随着约束压力的增大 ,减小比例逐渐减小 ,SC-CO₂压裂能生成明显的层理裂缝和分叉裂缝。油气增产现场试验方面: 美国、加拿大等率先开展了 CO₂地质封存与煤层气强化开采先导性试验 (CO₂-ECBM) ,取得了较好的增产效果^[19]。与北美相比 ,我国 CO₂压裂增产技术虽起步较晚 ,但发展很快 ,该技术已在沁水煤田、延长油田和辽河油田等地得到了成功应用^[20]。相关的压裂设备也正逐步实现国产化。

综上所述 ,目前 L-CO₂压裂技术的应用仍主要集中在非常规油气资源开发行业 ,其在井下煤层增透方面的研究仍处于理论和实验探索阶段 ,相关工业试验在国内鲜见报道。究其原因主要是: 油气开发行业所采用的 CO₂压裂技术 ,无论从压裂液、工艺和规模与井下 L-CO₂压裂技术存在一定差别 ,其所能提供的借鉴作用十分有限; 另外井下相对狭小的空间以及

《煤矿安全规程》对机电设备的防爆要求,也同时制约了相关装备的发展与应用。

鉴于此,笔者类比水力压裂工艺,提出了井下高压(30 MPa)液态 CO₂压裂增透煤岩成套装备系统架构,结合理论分析和相似模拟试验确定了决定该装备性能的关键参数及其计算方法,研制了成套装备。针对安徽淮南潘三矿 C₁₃₋₁煤层渗透性低、瓦斯抽采率低等问题,开展了 L-CO₂压裂增透煤岩现场试验,对成套装备的性能进行了测试,并分析了该装备在煤层压裂增透方面的应用效果。

1 压裂增透煤岩成套装备系统架构

根据现场施工需要,本文所设计的井下高压(30 MPa)液态 CO₂压裂增透煤岩成套装备如图 1 所示^[21]。该装备集成机、电、液、气于一体,通过低温 L-CO₂增压泵向煤层钻孔注入 L-CO₂产生高压压裂煤层,增加煤层裂隙发育,提高煤层渗透性促进煤层吸附瓦斯解吸,进而利用煤体对 CO₂较高的吸附性置换驱替煤层瓦斯,提高瓦斯抽采效果。

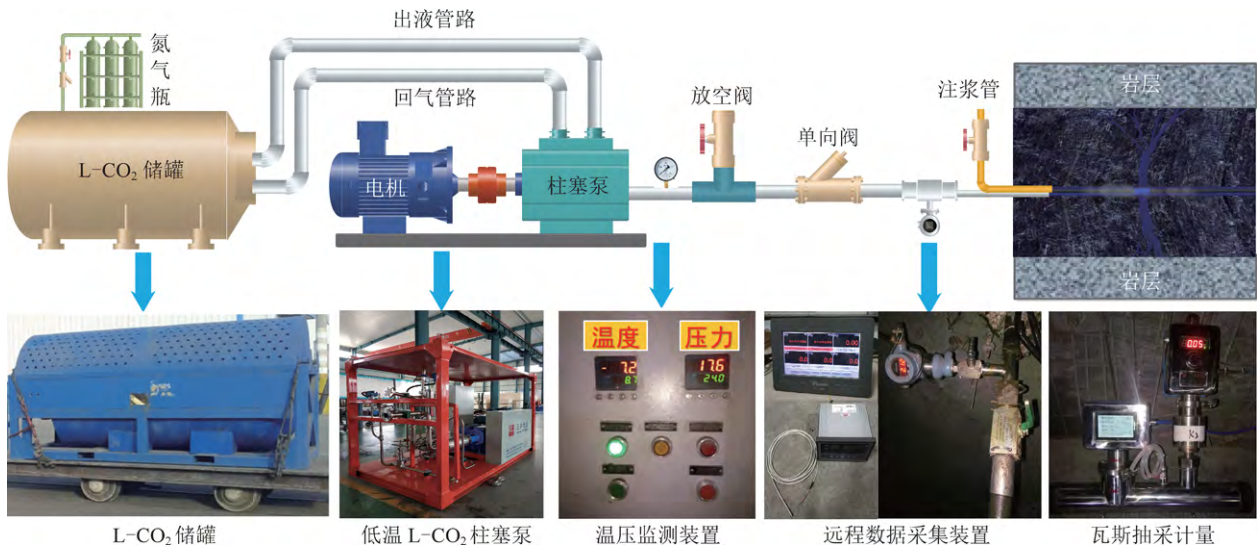


图 1 井下高压(30 MPa)液态 CO₂压裂增透煤岩成套装备示意

Fig. 1 Schematic diagram of set equipment for permeability enhancements induced by high pressure (30 MPa) liquid CO₂ fracturing

该装备主要包括四大部分,即供液装置、增压装置、远程数据采集装置以及连接上述装置的管路和线缆。供液装置由体积 40 L、压力 15.0 MPa 的高压氮气瓶组和西安天河矿业科技有限责任公司 CPW-2.0 型 L-CO₂ 储罐组成(储罐参数见表 1);增压装置由防爆三相变频异步电机、低温 L-CO₂ 增压泵和防爆电控柜组成;远程数据采集装置由厦门宇电 AI-3902M 型数据记录仪、铠装测温光纤、菲尔斯特隔爆 FST800-225 型压力变送器和 FST600-207 型温度变送器组成;连接管路及线缆选用管径不同的 KJ 型高压胶管和双芯电缆线。

仅凭工程经验、类比水力压裂施工工艺,将上述 4 部分装置按照图 1 连接,便组成了 L-CO₂压裂增透煤岩成套装备。但是,由于煤层地质条件和 CO₂相变的复杂性,上述装备应用到现场中需要对低温 L-CO₂增压泵出口压力 P_{out}^f 、出口流量 Q_{out}^c 、进液压力 P_{in} 、回气压力 P_{back} 和 L-CO₂储罐补气压力 P_{sup} 、出液与回气管路直径等关键参数进行科学确定,以提高该装备在煤层压裂中的可靠性。

表 1 CPW-2.0 型矿用 L-CO₂储罐参数

Table 1 Parameters of the CPW-2.0 L-CO₂ storage tank for mine

参数	数值
几何容积/m ³	2.11
有效容积/m ³	2
充满率/%	95
结构型式	卧式
长×宽×高/(m×m×m)	3.0×1.4×1.5
空重/kg	1 895
满重/kg	3 955
工作压力/MPa	2.60
输送介质温度/°C	-19.5

2 关键参数的确定方法

2.1 增压泵出口压力 P_{out}^f 确定

在 L-CO₂压裂煤层工程实践中,钻孔孔壁煤层起裂的条件为孔壁总有效应力 σ_{θ}^i 大于孔壁煤岩的抗拉强度 σ_f ,则孔壁煤岩起裂临界条件为

$$\sigma_{\theta}^i = \sigma_f \quad (1)$$

笔者以水平煤层上向穿层钻孔 L-CO₂ 压裂为模型, 进行低温 L-CO₂ 增压泵出口压力 P_{out}^f 确定。对于任意方向钻孔压裂煤层的情形, 可根据式 (2) 将三维地应力(对应大地坐标系 X, Y, Z) 换算到钻孔笛卡尔坐标系 (x, y, z) [22], 进一步借助上向穿层钻孔压裂模型进行起裂压力的确定 [23]。

$$\begin{cases} \sigma_x = (\sigma_2 - \sigma_1) \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \alpha + \sigma_3 \\ \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \sin^2 \beta + \sigma_2 \\ \sigma_z = (\sigma_2 - \sigma_1) \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + (\sigma_3 - \sigma_1) \cos^2 \alpha + \sigma_1 \\ \tau_{xy} = (\sigma_2 - \sigma_1) \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \\ \tau_{yz} = [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_2) \sin^2 \beta] \sin \alpha \cos \alpha \\ \tau_{xz} = (\sigma_2 - \sigma_1) \sin \alpha \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为钻孔坐标系 x, y, z 方向的应力分量, MPa; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间、最小主应力, MPa; α, β 分别为钻孔相对方位角及钻孔斜角 ($^\circ$); $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 为剪应力分量, MPa。

假设煤层为均匀且各向同性、线弹性多孔介质材料, 对于水平煤层上向穿层钻孔 L-CO₂ 压裂模型, 压注钻孔周围煤层中受力分析如图 2 所示。根据应力叠加原理, 式 (1) 中钻孔周围煤层中周向总有效应力 σ_θ^1 可根据式 (3) 进行计算:

$$\sigma_\theta^1 = \sigma_\theta^1 + \sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^3 \quad (3)$$

式中, σ_θ^1 为水平主应力引起的周向应力, MPa; σ_θ^2 为由钻孔内 L-CO₂ 压力引起的周向应力, MPa; σ_θ^3 为钻孔内 L-CO₂ 渗滤效应引起的附加弹性应力, MPa。

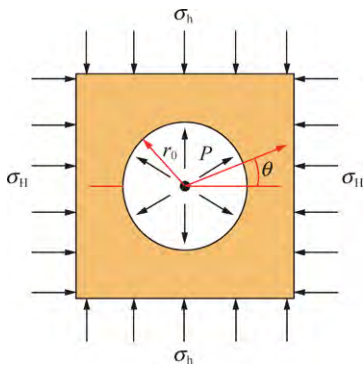


图 2 煤层钻孔周边受力情况

Fig. 2 Stress around borehole in coal seam

根据岩石力学和弹性力学理论, 由式 (3) 中由水平主应力引起的周向应力 σ_θ^1 可按照式 (4) 计算 [24]:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^1 = & \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{r_0^2}{\rho^2} \right) - \\ & \left(\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{3r_0^4}{\rho^4} \right) \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

式中 σ_H 和 σ_h 分别为钻孔周围一定范围煤层中所承受的水平应力; r_0 为钻孔直径; ρ 为自压注钻孔中算起的径向距离。

式 (3) 中由钻孔内流体压力 P 引起的周向应力 σ_θ^2 可按式 (5) 计算:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{r_0^2}{\rho^2} P \quad (5)$$

而式 (3) 中钻孔内 L-CO₂ 渗滤效应引起的周向应力 σ_θ^3 可按式 (6) 计算 [13, 15]:

$$\sigma_\theta^3 = A \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R p \rho d\rho - p \right) \quad (6)$$

其中 $A = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left(1 - \frac{K_B}{K_M} \right)$; ν 为泊松比; K_B 和 K_M 分别为煤体和煤基质的体积模量; A 的取值范围为: $0 \leq A \leq 1$; p 为由 L-CO₂ 渗滤效应在钻孔周围产生的孔隙压力 $p(\rho, t)$, 根据陈立强等 [25] 的研究, 其值可通过式 (7) 求解:

$$p(\rho, t) = C \int_0^t f(\rho, t) dt \quad (7)$$

式中, C 为压裂过程钻孔的增压速率, MPa/s; 被积函数 $f(\rho, t)$ [26] 可根据式 (8) 计算:

$$\begin{cases} f(\rho, t) = 1 + \int_0^\infty \exp(-\kappa u^2 t) F(\mu, \rho) \frac{du}{u} \\ F(\mu, \rho) = \frac{J_0(u\rho) Y_0(ur_0) - Y_0(u\rho) J_0(ur_0)}{J_0(ur_0)^2 + Y_0(ur_0)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 κ 为煤层渗透率, m^2 ; μ 为流体的黏度, $Pa \cdot s$; J_0 和 Y_0 分别为第一类和第二类零阶 Bessel 函数。

此外, 由 Terzaghi 有效应力理论 $\sigma_{eff}^T = \sigma - p$, 当孔周煤层中孔隙压力 p 增大, 煤骨架所承受的有效应力显著减小, 煤层的抗拉强度 σ_f 也降低, 可表示为: $\sigma_f - p$ [27]。

将式 (4) ~ (6) 代入式 (3) 中, 依据式 (1) L-CO₂ 压注孔孔壁的临界条件为

$$\sigma_\theta^1 + \sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^3 = \sigma_f - p \quad (9)$$

即当钻孔压力 P 达到起裂压力 P_f 时, 钻孔周围煤岩总有效应力 σ_θ^1 达到抗拉强度 $\sigma_f - p$ 时, 孔壁发生拉伸破坏。分析式 (4) 和 (5) 可得 σ_θ^2 值与 θ 无关, 而 σ_θ^1 值分别在 $\theta = 0$ 和 $\theta = \pi$ 取得最大值。当 $\rho = r_0$ 时, σ_θ^1 和 σ_θ^2 的取值均大于孔周煤岩中的值, 即在钻孔的孔壁 $\sigma_\theta^1 = (3\sigma_h - \sigma_H)$, $\sigma_\theta^2 = P_f$, $p = P_f$, $\sigma_\theta^3 = -AP_f$, 此时 p 与 σ_θ^3 的大小仅由钻孔压注流体压力 P 确定, 与煤层中的孔隙压力分布无关。将 $\sigma_\theta^1, \sigma_\theta^2, \sigma_\theta^3$ 和 p 分别代入到式 (9):

$$(3\sigma_h - \sigma_H) + P_f - AP_f = \sigma_f - P_f \quad (10)$$

式中 P_f 为煤体的破裂压力。

换算可得:

$$P_f = \frac{\sigma_f - (3\sigma_h - \sigma_H)}{2 - A} \quad (11)$$

当不考虑 L-CO₂ 在压注钻孔孔周的渗滤效应时, 式(11)将转化为式(12):

$$P_f = \sigma_f - (3\sigma_h - \sigma_H) \quad (12)$$

TAKATOSHI 等^[26]通过对不同时刻钻孔孔周有效应力进行归一化运算, 确定式(10)和式(11)可计算压注钻孔起裂压力的下限值 P_f^{\min} 和上限值 P_f^{\max} 。

在此基础上, 通过估算 L-CO₂ 增压泵出口距钻孔孔口的沿程损失 ΔP_λ 和局部损失 ΔP_ξ , 进一步可根据式(13)确定低温 L-CO₂ 增压泵出口压力 P_{out}^f :

$$P_{out}^f = P_f^{\max} + \Delta P_\lambda + \Delta P_\xi \quad (13)$$

2.2 增压泵出口流量 Q_{out}^c 确定

低温 L-CO₂ 增压泵的出口流量 Q_{out}^c 根据真三轴应力条件下清水和 L-CO₂ 压裂相似模拟实验来确定。试验开始前需根据现场地应力的测试结果, 确定煤岩试件的轴压和围压大小。三轴相似模拟实验详细步骤参见参考文献[28], 本节不再赘述。

设定压裂液的增压效率为 $\eta_{eff} = \Delta P / \Delta V$, 表示单位体积压裂液压注过程所产生的压力。相同三轴应力条件下相似模拟实验所获得的清水和 L-CO₂ 压裂增压效率随相对压力 (P/P_0) 的变化如图 3 所示。

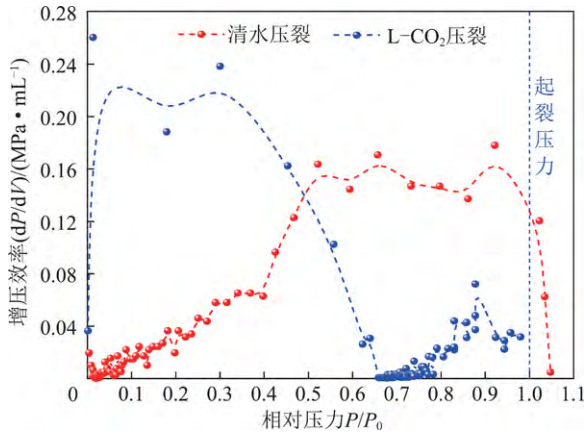


图 3 相同应力条件下清水和 L-CO₂ 压裂增压效率

Fig. 3 Pressurization efficiency for water and L-CO₂ fracturing

由图 3 可知, 选用清水作为压裂液, 钻孔内增压效率 η_w 先缓慢增加, 随后逐渐保持相对稳定, 当煤岩试件被致裂瞬间 η_w 迅速下降。与清水压裂相比, L-CO₂ 增压效率 η_c 随相对压力的变化趋势完全不同, 初期 η_c 值先陡然上升, 在维持短暂平衡后逐渐下降, 此变化趋势对应注液初期高压 L-CO₂ 进入钻孔, 钻孔内压力逐渐增大直至接近初始注液压力的物理过程。当钻孔内压力稳定上升时, η_c 再次缓慢增大。对比 2

种压裂液增压效率平均值, 清水压裂增压效率与 L-CO₂ 增压效率间的量化关系^[29]可表示为

$$\eta_w = \alpha \eta_c \quad (14)$$

由图 3 可得, 此次试验中 $\alpha \approx 3.86$ 。根据增压效率的定义, 借助式(14)可建立清水压裂和液态 CO₂ 压裂注液量 Q_w 与 Q_c 的关系:

$$\frac{P_f^w}{Q_w \Delta t_w} = \alpha \frac{P_f^c}{Q_c \Delta t_c} \quad (15)$$

式中 P_f^w 和 P_f^c 分别为水力压裂和液态 CO₂ 压裂的起裂压力; Q_w 为注水量; Q_c 为液态 CO₂ 注入量; Δt_w 和 Δt_c 分别为煤岩体水力压裂和液态 CO₂ 压裂所需的注液时间。

依据式(15), L-CO₂ 增压泵出口流量可按式(16)计算:

$$Q_{out}^c = \frac{\alpha Q_w \Delta t_w P_f^c}{\Delta t_c P_f^w} \quad (16)$$

2.3 L-CO₂ 增压泵进液压力 P_{in} 与回气压力 P_{back} 确定

由表 1 可得 CPW-2.0 型矿用 L-CO₂ 储罐工作压力 2.6 MPa, 按照图 1 所示的连接方法, L-CO₂ 储罐液相出口与增压泵进液口相连, 考虑一定的压力损失, 确定 L-CO₂ 增压泵的进液压力 P_{in} 为 2.3 ~ 2.5 MPa。

另外, 由于 L-CO₂ 储罐设计最高耐压 4.0 MPa, 且其气相出口与增压泵回气口相连, 为确保增压泵回气压力 P_{back} 应小于 4.0 MPa。再者, 为使 L-CO₂ 保持过冷状态, 柱塞泵回气压力 P_{back} 应为 L-CO₂ 储罐工作压力的 1.2 ~ 1.5 倍(由于 L-CO₂ 储罐工作压力为 2.4 ~ 2.6 MPa, P_{back} 可以取 3.0 ~ 3.5 MPa), 这样回气压力 P_{back} 将促进储罐中的 L-CO₂ 持续稳定地流入增压泵内。

2.4 L-CO₂ 储罐补气压力 P_{sup} 确定

为维持 L-CO₂ 储罐压力约 3.0 ~ 3.5 MPa, 除回气压力 P_{back} 外, 另外还设计了高压氮气瓶对 L-CO₂ 储罐进行补压作为备选。L-CO₂ 储罐规格为: 体积 $V_1 = 2.0 \text{ m}^3$, 压力 P_1 为 3.0 ~ 3.5 MPa, 温度 $T_1 = -16 \text{ }^\circ\text{C}$, 高压氮气瓶规格为: 体积 V_2 , 压力 P_2 , 温度 T_2 。根据理想气体状态方程, 所需氮气瓶数量 N 可按照式(17)进行计算:

$$N = \frac{P_2 V_2 T_1}{T_2 P_1 V} \quad (17)$$

3 试验应用

3.1 试验地点概况

井下高压(30 MPa) 液态 CO₂ 压裂增透煤岩成套

装备的国内首次工业试验选择在淮河能源控股集团煤业分公司潘三矿 2121(1) 运顺瓦斯治理巷 28~31 号钻场范围内进行。该段巷道标高 -742.3~787.2 m, 位于 C_{13-1} 煤层和 C_{11-2} 煤层之间, 巷顶法距 C_{13-1} 煤层底板 32.3~59.6 m, 巷底法距 C_{11-2} 煤层顶板 29.7~32.0 m。通过在该巷道内布置上向穿层钻孔对 C_{13-1} 煤层实施 L- CO_2 压裂增透。 C_{13-1} 煤为突出煤层, 煤厚 3.5~5.8 m, 平均 4.6 m; 倾角 $2^\circ\sim5^\circ$, 平均 3° ; 煤层瓦斯含量 4.3~8.4 m^3/t , 平均 7.57 m^3/t ; 瓦斯压力 2.60~2.98 MPa, 平均 2.81 MPa。煤层直接

顶为泥岩, 局部含砂, 厚 0.5~2.5 m, 平均厚 1.5 m; 直接底为砂质泥岩, 厚 1.0~3.7 m, 平均厚 2.5 m。

3.2 试验方案设计

现场 L- CO_2 压裂试验共设计 2 个压裂孔 (Y1 和 Y2), Y1 和 Y2 孔的开孔位置分别位于 29 号和 30 号钻场内, 两压裂孔相距 40 m。此外, 分别沿巷道轴向和垂直巷道轴向距 Y1 孔 15, 20, 25 m 和 30 m 布置 K1, K4, K3 和 K2 四个考察孔, 钻孔布置如图 4 所示。

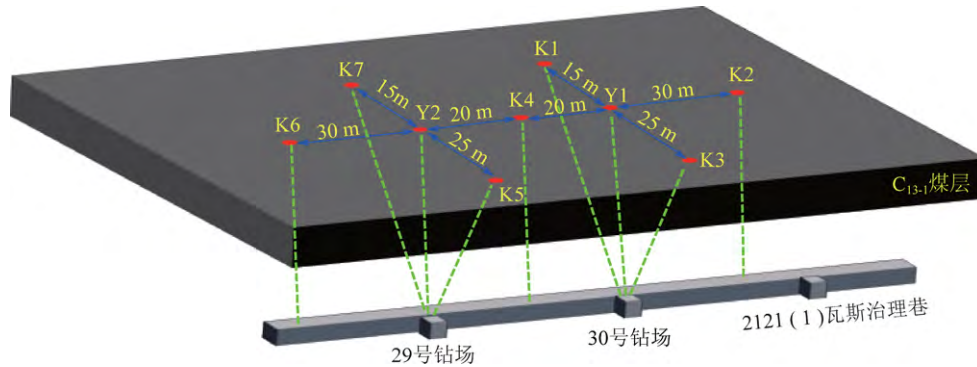


图 4 液态 CO_2 压裂钻孔设计

Fig. 4 Layout of fracturing boreholes of L- CO_2

试验过程中首先对 Y1 钻孔进行 L- CO_2 压注, 压裂结束后, 考察 K1, K2, K3, K4 考察孔中 CH_4 和 CO_2 体积分数、抽采混合量和纯度。然后, 再进行 Y2 钻孔压裂, 和 K7, K6 和 K5 钻孔 CH_4 和 CO_2 体积分数、抽采混合量和纯度的考察, 以验证 Y1 钻孔的压裂过程与效果。2 个压裂孔和 7 个考察孔的设计参数详见表 2。

表 2 液态 CO_2 压裂钻孔和考察钻孔布置参数

Table 2 Parameter of injection boreholes and inspection boreholes

孔号	夹角/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)	见 C_{13-1} 煤深度/m	终 C_{13-1} 煤深度/m	孔径/ mm
Y1	右 0	82	58.6	60.6	94
Y2	右 0	82	58.6	60.6	94
K1	右 0	67	64.0	66.0	94
K2	右 0	75	59.7	61.7	94
K3	右 180	84	55.5	57.5	94
K4	右 0	75	59.7	61.7	94
K5	右 180	84	55.5	57.5	94
K6	右 0	75	55.4	61.7	94
K7	右 0	67	59.5	66.0	94

3.3 高压 L- CO_2 压裂增透煤岩成套装备组装

3.3.1 L- CO_2 增压泵出口压力

2121(1) 瓦斯治理巷压裂试验处标高 -742.3~

787.2 m, 巷顶法距 C_{13-1} 煤层底板 32.3~59.6 m, 因此 Y1 和 Y2 钻孔穿透 C_{13-1} 煤层位置处标高 -710.0~-727.6 m。由于潘三矿未进行过地应力的测试, 查阅相关资料, 与潘三矿临近的顾桥矿地应力测试结果表明煤层标高 -710.0~-727.6 m 时, 垂直应力 $\sigma_v = 18.3$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.25$, 计算 $\sigma_H = \sigma_h = 8.67$ MPa, C_{13-1} 煤抗拉强度取 1.5 MPa。因此根据式 (12) 计算起裂压力的上限值 $P_f = 18.8$ MPa。式 (13) 中的管路沿程损失 ΔP_λ 和局部损失 ΔP_ξ 之和约取 1.0 MPa, 并且考虑 65% 的机械效率, L- CO_2 增压泵出口压力 P_{out}^f 为 29.98 MPa \approx 30.0 MPa。

3.3.2 L- CO_2 增压泵出口流量确定

参考黄炳香等^[30]、蔡峰等^[31] 所开展的水力压裂现场试验, 试验过程中增压泵注水流量 $Q_w = 70$ L/min, 煤岩达到起裂压力所需注液时间约 $\Delta t_w = 4$ min; 确定采用液态 CO_2 压裂, 12 min 内实现煤岩体压裂, 即 $\Delta t_c = 12$ min, 根据式 (16) 计算, L- CO_2 增压泵出口流量 Q_{out}^c :

$$Q_{out}^c = \frac{\alpha Q_w \Delta t_w P_f^c}{\Delta t_c P_f^w} \approx 60.0 \text{ L/min} \quad (18)$$

3.3.3 其他参数确定

除以上 2 个关键参数外, L- CO_2 增压泵进液压力 P_{in} 为 2.3~2.5 MPa, 回气压力 P_{back} 为 3.0~3.5 MPa。

选用补压氮气瓶的规格为: 体积 $V_2 = 40 \text{ L}$, 压力 $P_2 = 15 \text{ MPa}$ 温度 $T_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 根据式 (17) 计算可得: 所需氮气瓶数量 N 为 13~14。

3.3.4 监测设备

为了保证增压泵运行期间, 管路与钻孔内的 CO₂ 始终为液态, 增压泵启动前, 需要对泵腔进行预冷^[32-33] 因此在泵腔上安装温度和压力变送器对腔内的温度和压力进行实时监测, 如图 5 所示。另外, 在 L-CO₂ 压裂孔口安装压力变送器和测温光纤, 在考察孔口安装自动计量系统, 如图 1 所示。钻孔孔口采集到的温度、压力和温度等数据通过线缆传输至增压泵位置处。

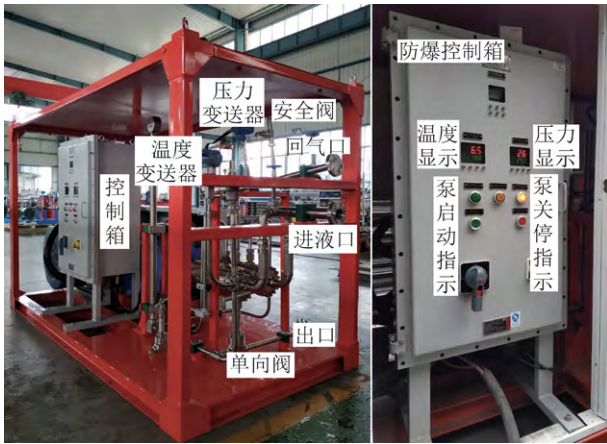


图 5 增压泵出口温度与压力监测

Fig. 5 Temperature and pressure monitoring at the outlet of booster pump

3.3.5 装备调试

根据 3.3.1~3.3.3 节的研究 L-CO₂ 增压泵设计最大压力 30.0 MPa, 流量 3 000 L/h, 进液压力 2.3~2.5 MPa, 回气压力 4.5 MPa, 氮气瓶组补气压力 4.0~4.5 MPa。增压泵泵腔为双列, 采用卧式布置, 泵腔直径 51 mm, 耐低温 -40 °C, 活塞有效行程 50 mm, 泵的往复数为 315 次/min, 增压泵动力由 55 kW 的 YBS-280S-6 防爆三相变频异步电机提供。

将制造好的 L-CO₂ 增压泵与 CPW-2.0 型液态 CO₂ 储罐通过异形连接管件连接, 并将远程数据采集装置嵌入到增压装置防爆电控柜上, 组装成高压 (30 MPa) L-CO₂ 压裂增透煤岩成套装备, 如图 6 所示。为了测试该装备性能, 2018 年 9—10 月, 在潘三矿设备库场地对其进行了调试。测试时采用双储罐并联供液的管路连接方式, 按照“预冷-注液-保压”程序进行操作, 测试过程中 L-CO₂ 增压泵运行正常, 运行至 12 min 时, 压力变送器达到最大压力 17.8 MPa, 由此证明, 按照本文所设计的 L-CO₂ 压裂增透煤岩成套装备运行可靠。

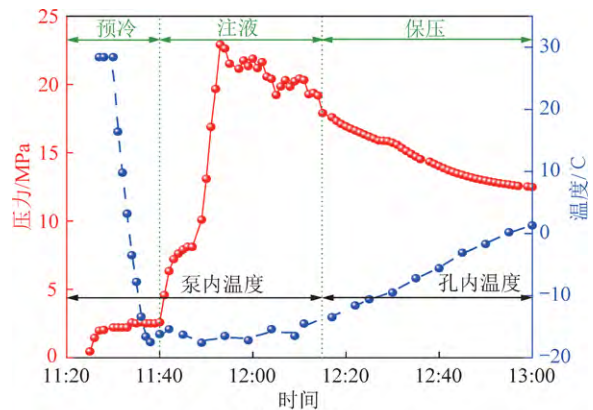


图 6 高压 (30 MPa) L-CO₂ 压裂增透煤岩成套装备

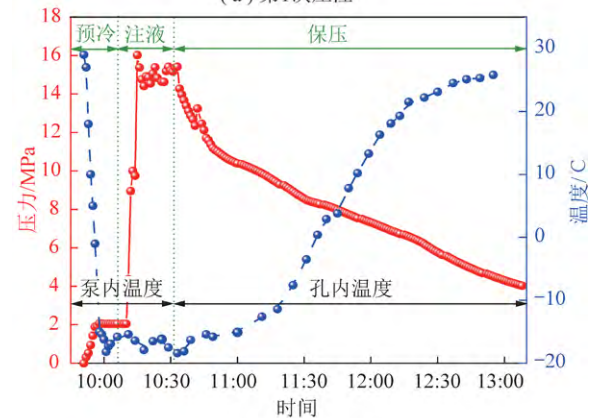
Fig. 6 Set equipment of permeability enhancements induced by high pressure (30 MPa) liquid CO₂ fracturing

3.4 试验过程温度和压力变化曲线

地面测试完成后, 将该装备运至 2121(1) 瓦斯治理巷, 分别对 Y1 和 Y2 钻孔进行 3 次压裂, 现选取每个压裂孔中 2 次有代表性的压裂过程进行分析。图 7 和图 8 分别为 Y1 和 Y2 钻孔 2 次压裂过程中温度和压力变化曲线。需要说明的是图中温度曲线由泵内温度和孔口温度变化连接而成, 即在预冷过程中重点监测泵内 L-CO₂ 温度, 以保证增压泵运行过程中, 压入钻孔的 CO₂ 为液态, 开始注液后重点监测钻孔内



(a) 第1次压注



(b) 第2次压注

图 7 Y1 钻孔压注过程压力-温度变化

Fig. 7 Change of pressure-temperature in Y1 injection borehole

温度,以便分析压裂结束后钻孔中 CO_2 的相态变化。

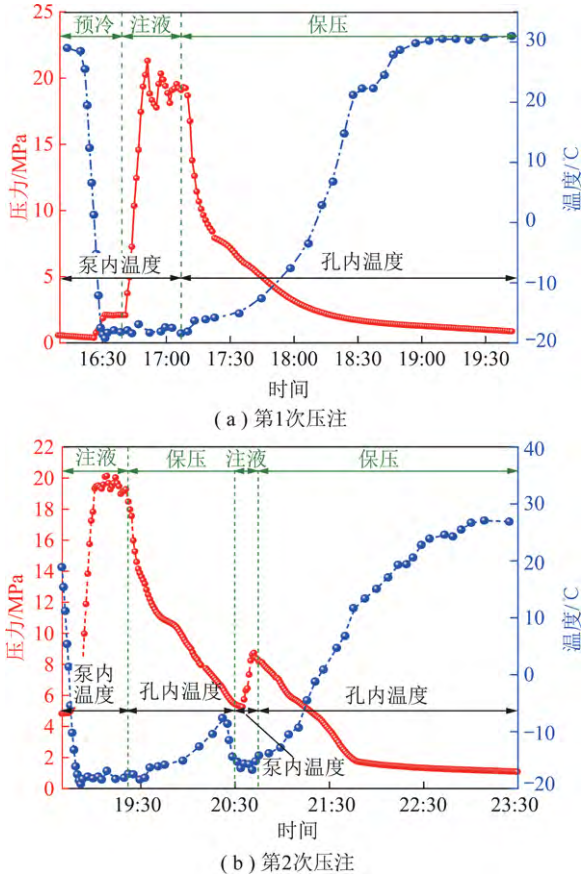


图8 Y2 钻孔压注过程中压力-温度变化

Fig. 8 Change of pressure-temperature in Y2 injection borehole

由图7可知,Y1 钻孔2次压裂过程均按照“预冷-注液-保压”3阶段进行,第1次压裂过程,预冷和注液分别持续约15 min和34 min,共注 L-CO_2 约 1.9 m^3 ,在启动增压泵约13 min后孔口压力达到最大值22.9 MPa,压裂结束后对孔口压力和温度进行了45 min的持续监测。Y1 钻孔第2次压裂过程,预冷和注液2阶段分别持续约19 min和22 min,共注 L-CO_2 约 1.3 m^3 ,在启动增压泵约4 min后钻孔孔口压力达到最大值约16.2 MPa。

分析图8,由于借鉴Y1 钻孔压裂经验,Y2 钻孔的2次压裂“预冷-注液-保压”3阶段时间分别持续约12.29,150,10.55,226 min,2次分别注液 1.6 m^3 和 2.8 m^3 ,最大压力分别达到21.3 MPa和20.1 MPa。需要说明的是,图8(b)中,20:30时钻孔孔口压力突然增大是 L-CO_2 重新启动造成的。

对图7和图8中Y1和Y2压裂孔2次压裂过程中“预冷-注液”阶段压力变化进行提取,绘制成图9。分析图9可知,注液阶段压力先快速上升至最大值,然后略微下降,持续注液压力曲线上下波动,停止注液后钻孔压力逐渐下降。参照孙四清等^[34]、黄炳香等^[30]水力压裂现场试验所获得的压力变化曲线,压

力曲线的峰值称为煤层的起裂压力,曲线波动范围的平均值称为扩展压力。则由图9可知,Y1 钻孔2次压裂的起裂压力值分别为22.9,16.2 MPa,Y2 钻孔2次压裂的起裂压力值分别为21.3,20.1 MPa。两钻孔4次压裂煤层起裂压力值与式(10)和式(12)的计算结果在工程允许的范围内相吻合。

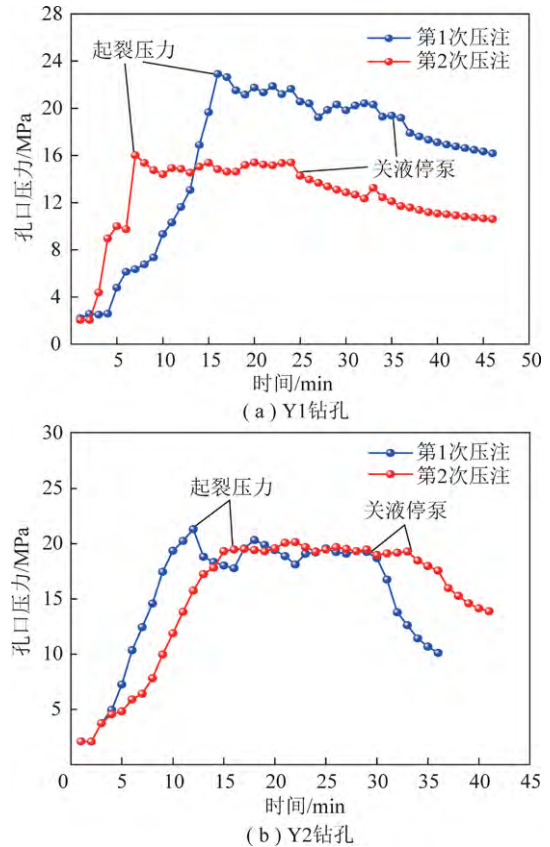


图9 Y1,Y2 孔口压力随时间的变化

Fig. 9 Injection pressure versus time of the Y1 and Y2

4 煤层压裂增透效果

4.1 K3 孔瓦斯抽采效果分析

图10为Y1 钻孔经过3次压裂后,K3 钻孔瓦斯抽采情况。由图10可知,2019-05-14Y1 钻孔压注结束后,K3 孔瓦斯抽采体积分数迅速上升,大约7 d后下降至60%~65%,维持与压裂前几乎相同的水平,并没明显提高;与瓦斯体积分数变化趋势不同, L-CO_2 压裂后瓦斯抽采混合量和纯量显著提高,大约10 d后,抽采混合量达到最大值 $0.035 \text{ m}^3/\text{min}$,随后缓慢下降至 $0.022 \text{ m}^3/\text{min}$,整体上看抽采平均混合量由 $0.00791 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高至 $0.02561 \text{ m}^3/\text{min}$,提升约3.2倍,显示出明显的压裂增流特点;与之类似,压裂后瓦斯抽采平均纯量由 $0.00485 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高至 $0.01604 \text{ m}^3/\text{min}$,提高约3.3倍。压裂后瓦斯抽采混合量和纯量的显著提高,从侧面证明液态 CO_2

压注后,压注孔 25 m 半径范围内,煤层裂隙发育增大,透气性增强。

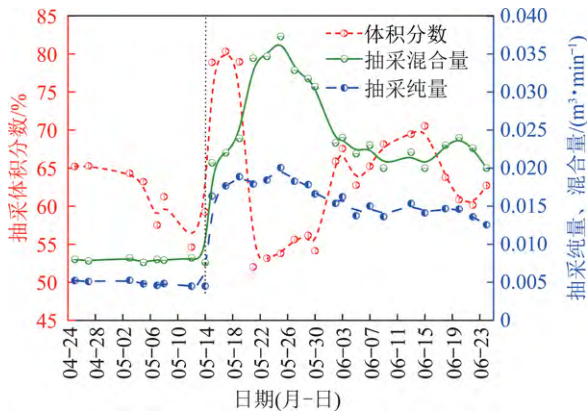


图 10 K3 钻孔瓦斯抽采情况

Fig. 10 Gas drainage cases of K3 borehole

4.2 压裂影响半径分析

Y1 钻孔第 2 次压注过程中,当增压泵启动 15 min 后,安排取样人员每隔 20 min 在 K3 钻孔取气样并进行色谱分析,得到 CO₂和 CH₄体积分数随时间的变化曲线,如图 11 所示。由图 11 可知,随着 L-CO₂的压入,钻孔中 CO₂体积分数逐渐上升,CH₄体积分数逐渐下降,大约持续 120 min;此后,CO₂和 CH₄体积分数分别稳定在 40%和 22%左右,持续时间约 90 min;最后 CO₂体积分数缓慢下降,约在 360 min 后降至约 5%,而 CH₄体积分数持续上升,在压注结束后约 600 min 上升至最大值 82%。K3 钻孔 CO₂气体体积分数的显著增大,结合该钻孔的压裂增流效应,证明 Y1 压裂孔的压裂影响半径约 25 m。

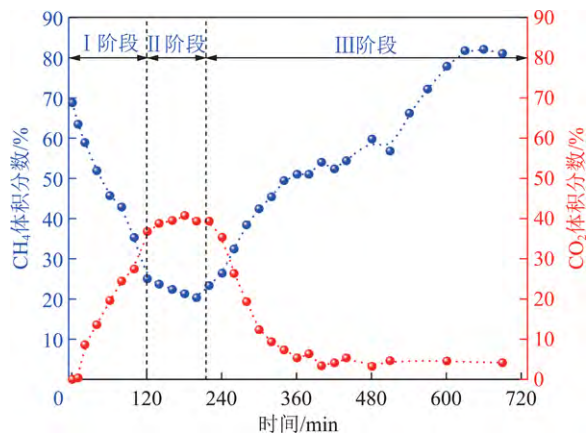


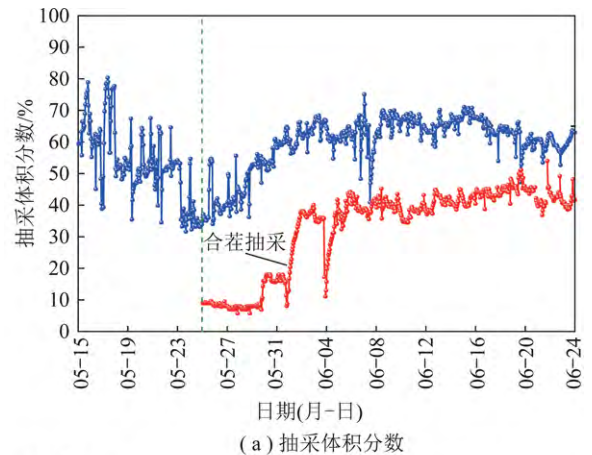
图 11 K3 抽采钻孔 CO₂和 CH₄体积分数变化

Fig. 11 Concentrations of CO₂ and CH₄ in K3 borehole

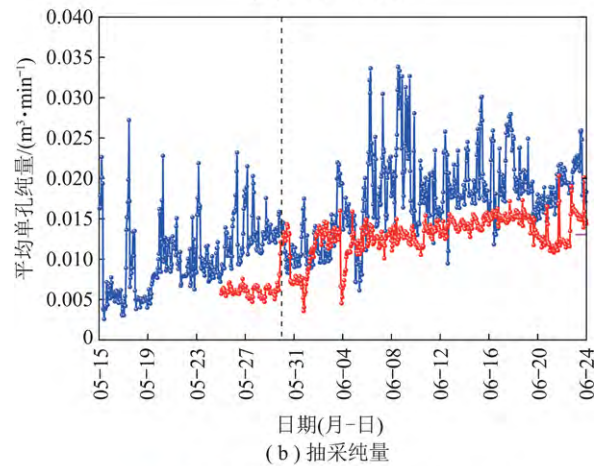
4.3 L-CO₂压裂前后单孔瓦斯抽采效果分析

试验过程中将 K1、K2 和 K3 抽采孔汇流进行瓦斯抽采体积分数和流量的统计,并与 2121(1) 瓦斯治理巷西段未采取任何增透措施区域 115 个上向穿层

钻孔的瓦斯抽采效果进行对比。两者单孔瓦斯抽采体积分数和纯量对比如图 12 所示。由图 12(a) 可知,L-CO₂压裂后 10 d 内,单孔瓦斯抽采体积分数先逐渐衰减后缓慢增加,这是由于此时煤层中 CO₂赋存较多而导致的;整体上看,L-CO₂压裂后相比未采取任何增透措施的区域,单孔瓦斯抽采体积分数提高 1.47 倍。分析图 12(b) 可知,2121(1) 西段单孔瓦斯抽采纯量大致可分为 2 段,前半段单孔瓦斯抽采纯量为 0.005 5 m³/min,后半段单孔纯量为 0.011 4 m³/min;以相同的时间为分割点,L-CO₂压裂后前半段单孔瓦斯抽采纯量为 0.014 1 m³/min,后半段单孔瓦斯抽采纯量为 0.019 9 m³/min,分别提高 2.56 倍和 1.75 倍。



(a) 抽采体积分数



(b) 抽采纯量

— K1, K2和K3钻孔
— 2121(1)瓦斯治理巷西段上向穿层钻孔

图 12 L-CO₂压裂前后单孔瓦斯抽采情况

Fig. 12 Gas drainage cases of single upward borehole before and after L-CO₂ fracturing

4.4 K5、K6 和 K7 钻孔瓦斯抽采效果分析

Y2 钻孔同样也进行了 3 次 L-CO₂压裂,累计注液量约 6 m³。压裂结束后,分别对 Y2 压注孔周围的 K7(15 m)、K6(20 m)和 K5(25 m) 考察孔进行瓦斯抽采效果和 CO₂体积分数的考察。图 13(a) 表

明: L-CO₂压裂后, K5, K6 和 K7 钻孔抽采混合量相比原始抽采混合量均值 0.079 1 m³/min, 分别提高至 0.014 3, 0.020 4, 0.032 9 m³/min; 再次验证了 L-CO₂压裂后, 半径 25 m 范围内, 考察孔均出现增流效应, 且随考察孔与压注孔间距离的增加, 增流效应逐渐减弱。而 CO₂体积分数则呈现相反的变化趋势, 如图 13(b), 这是因为距压注孔较近的考察孔周围裂隙发育较大, 压裂后残存在煤层中的 CO₂体积分数较低, 相反, 距离压注孔较远的抽采孔中, 裂隙发育较小, CO₂在煤层的残存量较多。图

13(c) 显示 L-CO₂压注后瓦斯抽采体积分数的变化趋势与 Y1 钻孔压裂后 K3 钻孔瓦斯抽采体积分数的变化规律相一致, 即压裂前后瓦斯抽采体积分数的变化并不明显。图 13(d) 表明 L-CO₂压裂后, K7, K6 和 K5 钻孔瓦斯抽采纯量平均值分别由 0.004 85 m³/min 提高至 0.021 13, 0.009 91, 0.009 179 m³/min, 提高约 4.35 倍、2.04 倍和 1.89 倍。由此可得, 瓦斯抽采纯量随压注孔与抽采孔距离的增加。

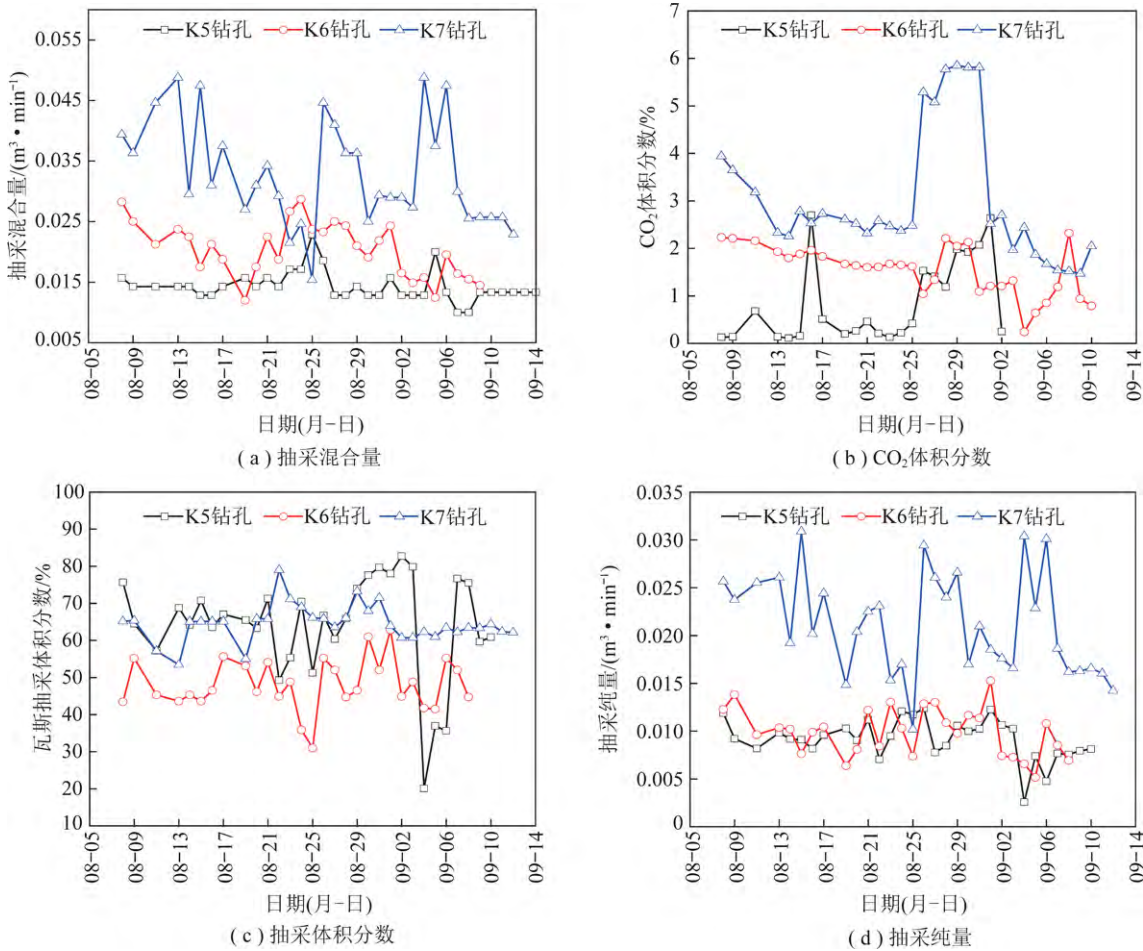


图 13 K5, K6 和 K7 钻孔瓦斯抽采情况

Fig. 13 Gas drainage cases of K5, K6 and K7

5 结 论

(1) 类比水力压裂施工工艺, 提出了井下高压(30 MPa)液态 CO₂压裂增透煤岩成套装备系统架构, 确定了决定成套装备性能上的 5 个关键参数: 低温 L-CO₂增压泵出口压力 P_{out}^f 、出口流量 Q_{out}^c 、进液压力 P_{in} 、回气压力 P_{back} 和 L-CO₂储罐补气压力 P_{sup} 。

(2) 依据弹性力学理论、相似模拟实验和装备自身结构特点, 综合考虑 L-CO₂低黏强渗透性和其相变特征, 建立了 L-CO₂压裂煤岩起裂压力计算模型,

推导了清水和 L-CO₂压裂注液量的量化表征关系, 据此, 确定了低温 L-CO₂增压泵出口压力 P_{out}^f 、出口流量 Q_{out}^c 、进液压力 P_{in} 、回气压力 P_{back} 和 L-CO₂储罐补气压力 P_{sup} 计算方法。

(3) 针对潘三矿 C₁₃₋₁煤层地质赋存, 根据成套装备关键参数确定方法, 确定低温 L-CO₂增压泵出口压力 $P_{out}^f = 30$ MPa、出口流量 $Q_{out}^c = 60$ L/min、进液压力 P_{in} 为 2.3 ~ 2.5 MPa、回气压力 $P_{back} = 4.5$ MPa 和 L-CO₂储罐补气压力 P_{sup} 为 3.0 ~ 3.5 MPa, 通过管路和线缆将供液装置、增压装置、远程数据采集装置

进行了有效连接,研发了井下高压(30 MPa) 液态 CO₂压裂增透煤岩成套装备,进行了井下上向穿层钻孔的 L-CO₂压裂增透煤层现场试验。

(4) 现场压裂试验表明: Y1 钻孔压裂后,距 Y1 孔 25 m 的 K3 钻孔瓦斯抽采混合量和纯量分别提高 3.2 倍和 3.3 倍,CO₂ 体积分数最高达到 40%,推测 L-CO₂压裂影响半径约 25 m; 相比未采取任何煤层增透措施的区域, Y1 钻孔 L-CO₂压裂后半径 25 m 范围内,单孔瓦斯抽采体积分数提高约 1.47 倍,抽采纯量提高 1.75 倍; Y2 钻孔 L-CO₂压裂后半径 25 m 范围内瓦斯抽采孔出现明显的压裂增流效应,且随考察孔与压注孔间距离的增加,增流效应逐渐减弱, K7、K6 和 K5 钻孔瓦斯抽采纯量分别提高 4.35 倍、2.04 倍和 1.89 倍。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,高峰,周宏伟,等.煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究[J].煤炭学报,2013,38(7):3-10.
XIE Heping,GAO Feng,ZHOU Hongwei,et al. On theoretical and modeling approach to mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas[J].Journal of China Coal Society,2013,38(7):3-10.
- [2] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
YUAN Liang.Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J].Journal of China Coal Society,2016,41(1):1-6.
- [3] 武强,李松营.闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J].煤炭学报,2018,43(1):21-32.
WU Qiang,LI Songying.Positive and negative environmental effects of closed mines and its countermeasures[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):21-32.
- [4] ZHOU Fubao,XIA Tongqiang,WANG Xinxin,et al.Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: A review[J].Journal of Natural Gas Science & Engineering,2016,31:437-458.
- [5] LU Ping,LI Ping,CHEN Jian,et al.Gas drainage from different mine areas: Optimal placement of drainage systems for deep coal seams with high gas emissions[J].International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(1):84-90.
- [6] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955.
WANG Yaofeng,HE Xueqiu,WANG Enyuan,et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J].Journal of China Coal Society,2014,39(10):1945-1955.
- [7] 蔡峰,刘泽功,LUO Yi.爆轰应力波在高瓦斯煤层中的传播和衰减特性[J].煤炭学报,2014,39(1):110-114.
CAI Feng,LIU Zegong,LUO Yi.Propagation and attenuation characteristics of stress waves generated by explosion in high-gas coal-beds [J].Journal of China Coal Society,2014,39(1):110-114.
- [8] 张永民,蒙祖智,秦勇,等.松软煤层可控冲击波增透瓦斯抽采创新实践-以贵州水城矿区中井煤矿为例[J].煤炭学报,2019,44(8):2388-2400.
ZHANG Yongmin,MENG Zuzhi,QIN Yong,et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: A case of Zhongjing Mine Shuicheng,Guizhou Province,China[J].Journal of China Coal Society,2019,44(8):2388-2400.
- [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,2015,34(1):1-5.
WANG Zhaofeng,SUN Xiaoming,LU Tingkan,et al. Experiment research on strengthen in gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J].Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),2015,34(1):1-5.
- [10] 何学秋,张力.外加电磁场对瓦斯吸附解吸的影响规律及作用机理的研究[J].煤炭学报,2000,25(6):614-618.
HE Xueqiu,ZHANG Li.Study on influence and mechanism of gas adsorption and desorption in electromagnetic fields exerted [J].Journal of China Coal Society,2000,25(6):614-618.
- [11] 胡国忠,朱怡然,李志强.可控源微波场促进煤体中甲烷解吸的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):874-880.
HU Guozhong,ZHU Yiran,LI Zhiqiang. Experimental study on desorption enhancing of methane in coal mass using a controlled microwave field [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(4):874-880.
- [12] 姜永东,李业,崔悦震,等.声场作用下煤储层渗透性试验研究[J].煤炭学报,2017,42(S1):154-159.
JIANG Yongdong,LI Ye,CUI Yuezhen,et al. Experimental study on characteristics of coal reservoir permeability under acoustic wave [J].Journal of China Coal Society,2017,42(S1):154-159.
- [13] ISHIDA T,AOYAGI K,NIWA T. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO₂ [J].Geophys Res Lett,2012,39:1-6.
- [14] 卢义玉,廖引,汤积仁,等.页岩超临界 CO₂压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J].煤炭学报,2018,43(1):175-180.
LU Yiyu,LIAO Yin,TANG Jiren,et al. Experimental study on fracture initiation pressure and morphology in shale using supercritical CO₂ fracturing [J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):175-180.
- [15] JIANG Yongdong,QIN Chao,KANG Zhipeng,et al. Experimental study of supercritical CO₂,fracturing on initiation pressure and fracture propagation in shale under different triaxial stress conditions [J].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2018,55:382-3954.
- [16] 刘国军,鲜学福,周军平,等.超临界 CO₂致裂页岩实验研究[J].煤炭学报,2017,42(3):694-701.
LIU Guojun,XIAN Xuefu,ZHOU Junping,et al. Experimental study on the supercritical CO₂ fracturing of shale [J].Journal of China Coal Society,2017,42(3):694-701.
- [17] 王磊,梁卫国.超临界 CO₂/清水压裂煤体起裂和裂缝扩展试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2680-2689.
WANG Lei,LIANG Weiguo. Experimental study on fracture initia-

- tion and growth in coal using hydraulic fracturing with supercritical CO₂ and normal water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2019, 38(S1): 2680–2689.
- [18] DENG Bozhi ,YIN Guangzhi ,ZHANG Dongming ,et al. Experimental investigation of fracture propagation induced by carbon dioxide and water in coal seam reservoirs [J]. Powder Technology ,2018 , 338: 847–856.
- [19] SAMPATHA K H S M ,PERERA M S A ,RANJITH P G ,et al. CH₄–CO₂ gas exchange and supercritical CO₂ based hydraulic fracturing as CBM production-accelerating techniques: A review [J]. Journal of CO₂ Utilization 2017 22: 212–230.
- [20] 王香增. 延长石油集团非常规天然气勘探开发进展 [J]. 石油学报 2016 37(1): 142–149.
WANG Xiangzeng. Advances in unconventional gas exploration and development of Yanchang Petroleum Group [J]. Acta Petrolei Sinica 2016 37(1): 142–149.
- [21] 文虎 樊世星 马砺 等. 井下煤层液态二氧化碳致裂增渗系统及方法 [J]. 中国专利: CN108278936A.08 2018–07–13.
- [22] 金衍 陈勉. 井壁稳定力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] 张东明 白鑫 尹光志 等. 低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术及应用 [J]. 煤炭学报 2018 43(7): 1938–1950.
ZHANG Dongming ,BAI Xin ,YIN Guangzhi ,et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO₂ phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2018 43(7): 1938–1950.
- [24] 钱鸣高 石平五 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2010.
- [25] 陈立强 田守增 李根生 等. 超临界 CO₂ 压裂起裂压力模型与参数敏感性研究 [J]. 岩土力学 2015 36(S2): 125–131.
CHEN Liqiang ,TIAN Shouceng ,LI Gensheng ,et al. Initiation pressure models for supercritical CO₂ fracturing and sensitivity analysis [J]. Rock and Soil Mechanics 2015 36(S2): 125–131.
- [26] ITO Takatoshi. Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media: Rock [J]. Engineering Fracture Mechanics 2008 75(7): 1753–1762.
- [27] 卢平 沈兆武 朱贵旺 等. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性 [J]. 中国科学技术大学学报 2001 31(6): 55–62.
LU Ping ,SHEN Zhaowu ,ZHU Guiwang ,et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal [J]. Journal of China University of Science and Technology 2001 31(6): 55–62.
- [28] 樊世星. 液态 CO₂ 压裂增透煤岩及裂缝形成机制研究 [D]. 西安: 西安科技大学 2019: 6–7.
FAN Shixing. Study on the mechanism of fractures propagation and permeability enhancements induced by L–CO₂ Fracturing [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology 2019: 6–7.
- [29] HA Seongjun ,CHOO Jinhyun ,YUN Teacups. Liquid CO₂ Fracturing: Effect of fluid permeation on the breakdown pressure and cracking behavior [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 2018 51: 3407–3420.
- [30] 黄炳香 赵兴龙 陈树亮 等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术 [J]. 岩石力学与工程学报 2017 36(12): 2954–2970.
HUANG Bingxiang ,ZHAO Xinglong ,CHEN Shuliang ,et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2017 36(12): 2954–2970.
- [31] 蔡峰 刘泽功. 深部低透气性煤层上向穿层水力压裂强化增透技术 [J]. 煤炭学报 2016 41(1): 113–119.
CAI Feng ,LIU Zegong. Simulation and experimental research on upward cross-seams hydraulic fracturing in deep and low-permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2016 41(1): 113–119.
- [32] WEN Hu ,CHENG Xiaojiao ,CHEN Jian ,et al. Micro-pilot test for optimized pre-extraction boreholes and enhanced coalbed methane recovery by injection of liquid carbon dioxide in the Sangshuping coal mine [J]. Process Safety and Environmental Protection 2020 136 39–48.
- [33] 文虎 樊世星 马砺 等. 低渗透性煤层井下低压液态 CO₂ 促抽瓦斯工程实践 [J]. 西安科技大学学报 2018 37(4): 530–537.
WEN Hu ,FAN Shixing ,MA Li ,et al. A case study of methane drainage promotion by injecting liquid carbon dioxide into low permeability coal seam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology 2018 37(4): 530–537.
- [34] 孙四清 张群 闫志铭 等. 碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践 [J]. 煤炭学报 2017 42(9): 2337–2344.
SUN Siqing ,ZHANG Qun ,YAN Zhiming ,et al. Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability [J]. Journal of China Coal Society 2017 42(9): 2337–2344.