

煤田地质与勘探
Coal Geology & Exploration
ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目：地面井分层卸压的煤系气合采原理及方式探讨
作者：李瑞，金丽红，夏彬伟，葛兆龙
收稿日期：2023-10-31
网络首发日期：2024-01-11
引用格式：李瑞，金丽红，夏彬伟，葛兆龙. 地面井分层卸压的煤系气合采原理及方式探讨[J/OL]. 煤田地质与勘探.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1155.P.20240109.1607.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

地面井分层卸压的煤系气合采原理及方式探讨

李瑞^{1,2,3}, 金丽红³, 夏彬伟^{1,2}, 葛兆龙^{1,2,3}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 复杂煤层气瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044; 3. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要: 为了进一步认识制约煤系气合采的因素, 提高煤系合层排采各产层的产气贡献, 分别从动力、通道和气源条件出发, 分析了煤系气合采的必备因素。基于改变地应力状态提高储层导流能力以及分层改变储层流体压力, 满足多层合采动力条件的原理, 提出了地面井分层卸压的煤系气合采方式。该方式通过在地面进行定向钻井, 在目标储层中进行高压水射流作业, 人工创造卸压空间(缝、槽、穴等), 改变地应力状态, 降低有效应力伤害, 增加储层导流通道的数量和开度, 提高目标储层压降传递速率。待储层压力降至符合煤系气合采动力条件时进行合层排采, 从而提高煤系合采各产气层的产气贡献。相较于常规增产改造措施, 此方式能够减少煤系气储层在有效应力作用下的储层伤害, 且有助于提高储层压降传递效率, 增强煤系气的解吸和扩散, 降低多层煤系气合采过程中的层间干扰。在以上研究基础上, 认为地面井分层卸压的合采方式主要适用于储层地应力大、产层间距小的煤系气储层, 且有望在薄互层煤系气储层增产改造及层间干扰严重的叠合共生煤系储层开发领域进行应用推广。

关键词: 煤系气; 分层卸压; 多层合采; 高压水射流; 地应力; 有效应力

中图分类号: TD712; P618.11 **文献标志码:** A

Discussion on the coal measure gas co-mining method by the stratified pressure relief in surface wells

LI Rui^{1,2,3}, JIN Lihong³, XIA Binwei^{1,2}, GE Zhaolong^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamic and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to further understand the restrictive factors of coal measure gas co-mining, and to improve the gas production contribution of each production layer of coal measure gas co-mining, based on power, passage and gas source conditions, the necessary factors of coal measure gas co-mining were analyzed. Based on the principle of changing the crustal stress state to improve the reservoir conductivity and changing the reservoir fluid pressure in different layers to meet the dynamic conditions of multi-layer co-mining, the coal measure gas development method by stratified pressure relief in surface wells was proposed. Through directional drilling on the surface, high-pressure water jet operation is carried out in the target reservoir, pressure relief spaces (slots, grooves, holes) are artificially created, the stress state is changed, with the effective stress damage the being reduced, and then the number and opening of reservoir diversion channels are increased, and the fluid pressure drop of the target reservoir is finally induced. When the reservoir pressure drops to meet the dynamic conditions of coal measure gas combined production, the combined layer drainage will be carried out, realize the coordinated multi-layer gas combined production, and improve the gas production contribution of each production layer of coal measure gas combined production. Compared with conventional reconstruction technologies, the method can reduce the damage of coal measure gas reservoirs under the effective stress action, improve the efficiency of inducing the pressure to promote the desorption and diffusion of coal measure gas, and reduce interlayer interference. On the basis of the above research, it is considered that the development mode of surface well delamination relief is mainly suitable for the coal measure gas reservoir with large in-situ stress and small spacing between production layers, and it is expected to be applied in the field of thin interlayer gas reservoir stimulation and the development of symbiotic coal measure reservoir with serious interlayer interference.

Keywords: coal measure gas; stratified pressure relief; multilayer co-mining; high-pressure water jet; crustal stress; effective stress

我国煤系气资源丰富且分布广泛, 开发潜力巨大。煤系气储层类型多样, 多产层叠合共生, 多赋存

态甲烷共存,气水分布关系复杂,产层间能量平衡关系脆弱等特点^[1-3],导致煤系气合采过程中的产能贡献率低甚至某些产层产能受到抑制,严重制约着我国煤系气资源的大规模开发^[4-6]。造成煤系气合采层间干扰的首要原因为煤系气地质条件的复杂性。大部分地区多层煤系气合采发生层间干扰,且层间干扰与层间渗透率差异、储层压力差异等有关^[7]。由数值模拟发现煤系气合采产能与层间压力系统差异、储层渗透率、压裂效果等有关^[8-9]。通过叠置煤层气系统合采物理模拟实验发现,在合采初期流体能量大的储层会抑制流体能量小的储层产气能力,甚至出现能量大的产层流体倒灌进入能量小的产层当中,物理模拟实验表明煤系气合采中可能存在严重的产能抑制现象^[10-12]。

近年来,我国煤系多气合采储层开发深度逐步增大,而深部储层地应力远大于浅部储层。例如,我国煤系气开发规模较大的鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块,煤层埋深达到2000 m,垂直应力达到50 MPa,最大水平主应力超过40 MPa^[13-14]。沁水盆地的榆社-武乡区块,煤系气储层埋深超1600 m^[15]。在深部煤系气排采过程中,随着储层压力的下降,有效应力会显著增大。深部煤系气储层渗透率极低,在有效应力作用下,煤系气储层渗透性将进一步下降,从而限制煤系气的运移和产出。水力压裂是当前普遍应用于煤层气储层的增产改造技术,但以往研究表明,水力压裂存在着主要适用于煤体结构较为完好的煤层,压裂裂缝延伸规模较小,压裂主干裂缝单一,且压裂增能过程在裂缝两侧易形成应力集中区,导致远端煤层渗透性伤害等问题^[16-17]。针对渗透性差、水力压裂造缝效果不佳的低渗煤系储层,桑树勋等^[18-19]基于煤矿采动区卸压增透理论提出了应力释放开发构造煤理论,其原理是通过应力释放改变煤层孔隙率度和渗透率,从而促进煤层气间接降压解吸以及煤层气渗流产出。田守崮^[20]、李根生^[21]等提出了水平井水力喷射分段造穴技术,通过水平井扩孔或诱导塌孔,实现煤层应力释放,通过优化喷嘴类型灵活调控洞穴形状和尺寸,提高储层渗透率从而增加单井产量。针对深部煤层地应力大、渗透率低、储层压力大的地质条件,卢义玉^[22]、郭君^[23]等借鉴矿井下煤层卸压增透理论,提出了地面定向井+水力割缝开发深部煤层气方法,该方法通过水力割缝形成多组缝槽改变应力状态,沟通天然裂隙增加导流通道裂缝,提高深部煤层气开发效率。改造地应力诱导储层压降方式适用于构造煤、深部煤层气等复杂煤层气储层,有望大规模应用推广。然而,多层叠合共生煤系气储层地质条件更加复杂,不同产层地质条件差异极大,如何通过卸压提高多层叠合共生煤系气储层多气协同合采效率,这方面的研究极为欠缺。

为了提高煤系多气合采效率,地质因素分析是煤系气多层协同合采的必备工作。基于改变地应力状态提高储层导流能力以及分层改变储层流体压力,

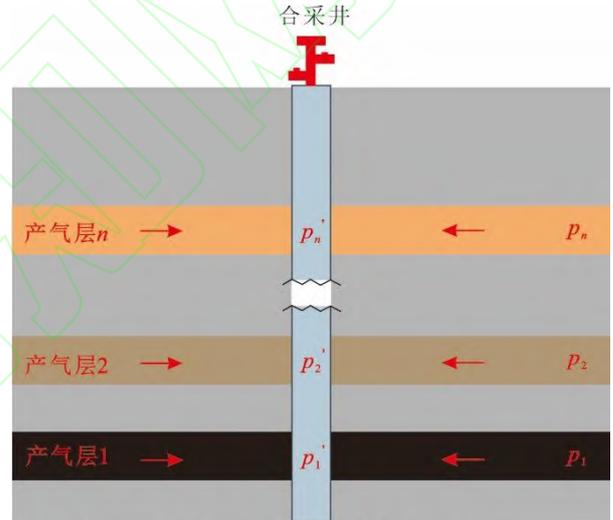
满足多层合采动力条件的原理,笔者提出了地面井分层卸压的煤系气合采方式。在此基础上,分析该开发方式的优势及特点,探讨其地质适用性与应用前景,旨在为我国煤系气储层协同合采提供借鉴。

1 煤系气多层协同合采必备地质因素

煤系气储层地质条件的复杂性导致了煤系气开发的困难程度较大^[24-25]。基于此分析了煤系气多层协同合采过程中的必备地质因素,为针对性的煤系气合采方式优化提供依据。

1.1 动力

煤系气在储层内的运移动力主要为流体压力差。对于同一产气层而言,只有在一定的生产压差(储层压力与井底流压的差值)条件下,煤系气才能顺利产出。然而,对于多层叠合共生的煤系气储层而言,各个产气层与井底流压同时存在一定的生产压差,才能实现多气协同合采,如图1所示。



p_1' 、 p_2' 、 p_n' 分别为对应产气层的井底流压
 p_1 、 p_2 、 p_n 分别为对应产气层的储层压力
① $p_1' > p_2' > p_n'$ ② $p_1 > p_1'$ $p_2 > p_2'$ $p_n > p_n'$

图1 煤系气储层协同合采动力条件

Fig.1 Driving force of coordinated production of coal measure gas reservoirs

由于煤系储层类型以及地质构造等条件差异,某些地区煤系储层地应力随埋深呈非线性变化,常发生局部地层超压或欠压的现象,出现多套含气系统^[26-27],导致煤系气储层的压力梯度与生产井筒的压力梯度不匹配。其结果是各个产气层生产压差差异巨大,甚至出现合采过程中生产压差为负导致流体倒灌的产能抑制现象。因此,需要对不同含气系统煤系储层进行流体压力分层改造才能实现多套含气系统生产压差满足多气合采动力条件,实现煤系气协同合采。动力因素是决定多层叠合共生煤系气储层能否实现合采的先决条件。

1.2 通道

通道是煤系气储层流体运移的途径,同时也是储层压降传递的介质。煤系气储层孔隙和裂隙的发

育特征决定着储层渗透性，从而影响煤系气渗流速率和储层压降速率。

煤系气产出过程中，在有效应力作用下，运移通道可能发生压缩或闭合，从而对储层导流能力产生负效应。煤粉颗粒在煤储层通道内的运移和沉降也会对煤系气的产出产生重要的制约作用。考虑到煤系气运移通道对煤系气产出的重要影响，通道是目前煤系气储层最重要的改造对象。通道因素决定了煤系气储层能否实现高产。

由于煤岩、致密砂岩、泥页岩等岩石力学强度差异显著，导致改造过程中不同类型储层导流通道的改造效果差异显著^[28]。由于非常规油气储层较强的非均质性，同一类型储层岩石力学性质也存在明显的差异，这在客观上给煤系气运移通道的改造造成

了极大的影响，不同产层改造效果差异显著。

1.3 气源

煤层、煤系页岩以及煤系致密砂岩中的天然气赋存状态存在较大差别（图 2），不同赋存态的储层产气机理不同。煤层气主要以吸附态存在基质当中，一般需要通过储层进行排水降压才能实现煤层气的解吸和运移。煤系致密砂岩中主要发育游离态的天然气，依靠排气降压就能实现开采。煤系页岩中吸附气和游离气均较多，开发方式由排水降压与自然降压相结合^[29]。气体赋存状态的差异是阻碍煤系多气合采的重要原因，例如煤层排水降压过程中的产出水进入页岩或致密砂岩将导致严重的水锁伤害，抑制合采效果。

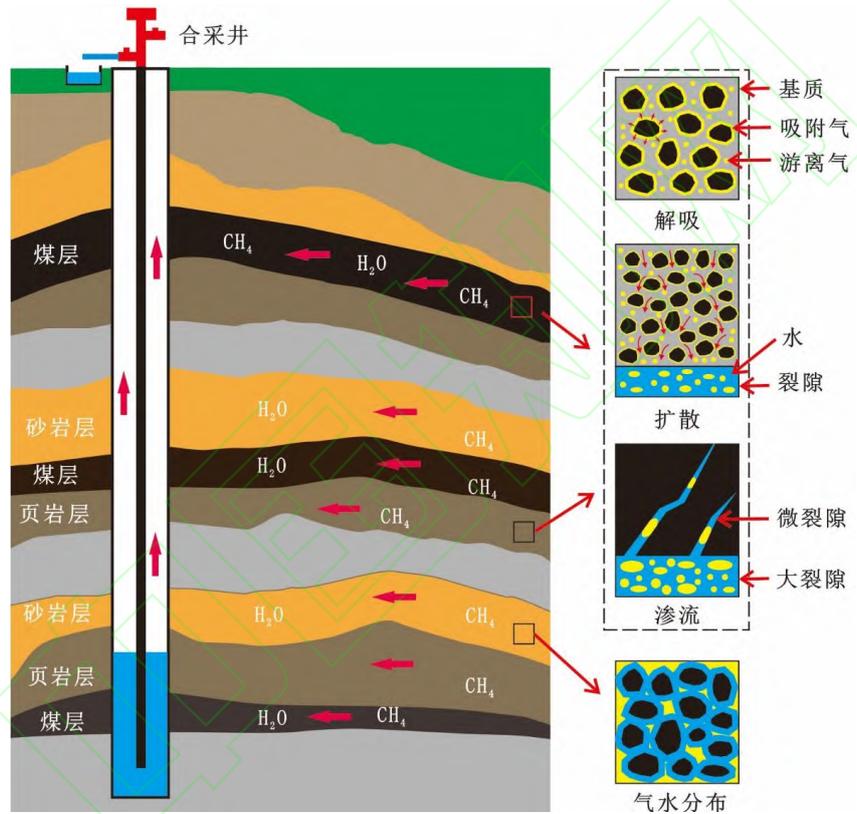


图 2 煤系气储层流体赋存状态

Fig.2 Occurrence state of fluids in coal measure gas reservoirs 的解吸、扩散和渗流。

煤层、煤系页岩以及煤系致密砂岩层均含有不同饱和程度的地层水，气水关系复杂多变^[30]。这导致煤系气井生产峰值以及产气、产水量趋势存在明显差异。煤系气储层的含气饱和度控制着煤系气储层排水阶段的长短，煤系气储层的吸附时间影响着产气峰值的早晚，而煤系气储层含气量则在很大程度上影响煤系气储层生命周期。多类型煤系气储层合采过程中的产气、产水曲线均与煤系气的赋存状态密切相关。气源因素是决定煤系气储层生产周期的关键。

综上，为了提高煤系气各产气层产能贡献，实现煤系气协同、高效合采，合采方式需要达到煤系多层合采动力条件，改善储层流体通道的导流能力，降低有效应力对储层导流能力的伤害，最终增强煤系气

2 地面井分层卸压方式及原理

2.1 方法

分层卸压是指通过地面定向钻井，对选定的能量较高的目标储层进行高压水射流作业，通过人工创造卸压空间（缝、槽、穴等），改变地应力状态，降低有效应力，并诱导岩层膨胀变形，促进储层流体压力下降，强化煤系气解吸，改善煤系各产气层流体运移的动力条件，促使煤系气向裂缝系统和井筒高效运移，如图 3 所示。地面定向井的井型包括水平井、丛式井、多分支井等^[31-32]，高压水射流措施包括水力割缝、水力冲孔、水力造穴等^[33-34]。多层合采是

通过分层卸压待目标储层的流体压力降至符合煤系气合采动力条件后,实现煤系多气多层协同合采。分层卸压方式有助于达到煤系多层合采动力条件,避免多气合采中的产能抑制,提高煤系合采各产层的产气贡献。

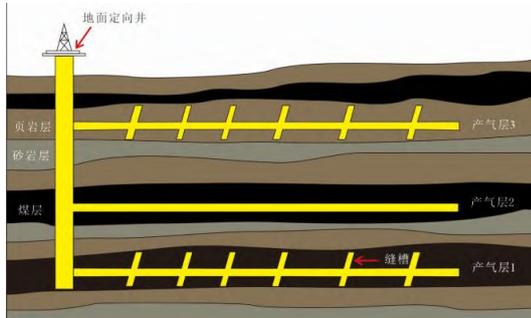


图3 水力割缝分层卸压开发煤系气方式示意

Fig.3 Sketch of stratified pressure relief by hydraulic slotting of coal measure gas

2.2 原理

2.2.1 改变地应力状态,降低有效应力对导流通道的伤害

对于埋深较大的煤系气储层而言,地应力高,煤体压实程度高,储层渗透性极低,流体运移困难。在地应力不变的条件下,煤系气排采过程中随着储层压力的降低,有效应力随之增大,从而对储层裂缝导流能力产生伤害,且随着煤系储层地应力的增加,开采过程中储层导流能力伤害进一步增大。地面井分层卸压合采方式针对煤系气目标储层进行高压水射流作业,在储层中形成卸压空间后,地应力将得到释放。地应力的释放可有效减弱煤系气产出过程中有效应力的增加,降低有效应力作用下储层导流通道的伤害。有效应力 σ_e 与储层压力 p 及初始地应力 σ 之间的相关性^[35]如下:

$$\sigma_e = \sigma - \alpha p \quad (1)$$

为研究分层卸压的效果,运用 Flac^{3D} 数值模拟软件,以山西某矿区9号煤层为例,在长20 m、高20 m的地层中割出一条倾角37°、长5 m、宽0.5 m的缝槽。水力割缝建模参数见表1。采用摩尔库伦模型进行分析,获得纵向上和横向上的卸压范围,结果如图4所示。

表1 水力割缝建模参数

Table 1 Parameters of hydraulic slotting

参数	数值
弹性模量/GPa	1.49
泊松比	0.38
体积模量/GPa	2.08
剪切模量/GPa	0.54
黏聚力/MPa	1.20
内摩擦角/(°)	20
抗拉强度/MPa	0.64
垂直应力/MPa	39.20
水平应力/MPa	35.60

由图4可知,煤层内创造水力缝槽后,垂向上及水平方向上储层应力状态改变效果均较为显著,

单缝槽的垂直卸压范围达16 m,水平卸压范围达15 m。卸压范围与缝槽的长度、宽度、倾角、煤系地质条件、物理力学条件、地应力条件等均存在较好的对应关系,在实际工程实践中应根据具体的储层条件针对性设计卸压空间的形态、数量和规模。

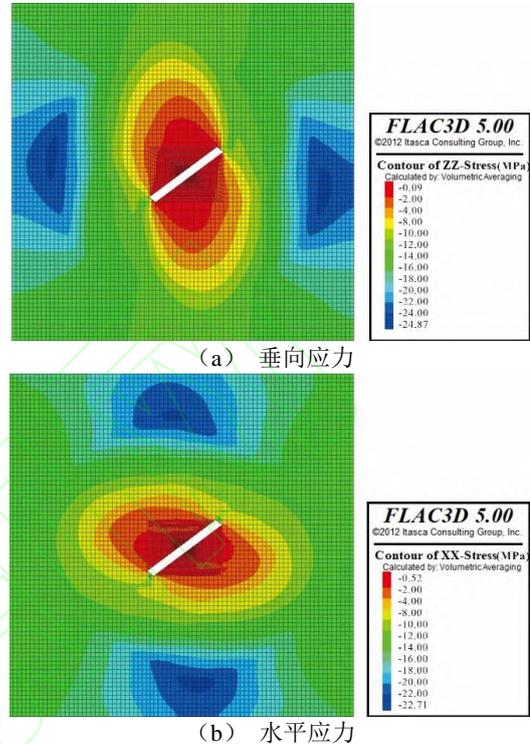


图4 水力割缝应力云图

Fig.4 Stress distribution of hydraulic slotting

2.2.2 诱导裂隙数量和开度增加,提高储层导流能力
高压水射流作业通过切割破碎岩层,创造卸压空间,改变应力状态,导致煤岩向卸压空间移动,煤岩发生膨胀变形。不仅可诱导产生大量新生孔、裂隙,且裂隙的张开度也显著增加。孔裂隙数量的增加以及裂隙张开度增大,极大地增加了流体运移通道,增强了裂隙导流能力,如图5所示。

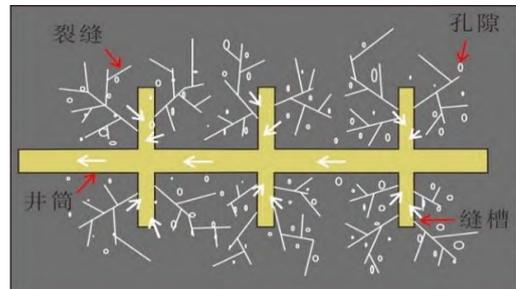


图5 水力割缝卸压诱导产生导流通道

Fig.5 Diversion channel induced by hydraulic slotting

地面井分层卸压的合采方式通过改变储层的应力状态,促使储层的导流能力增加,进而增大储层降压传递速率,气体解吸速率及气体运移速率增大,有利于气体的高效产出,改善煤系气产出效率。煤系气储层卸压增产机理如图6所示。

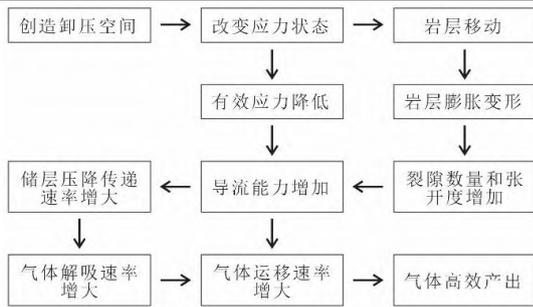
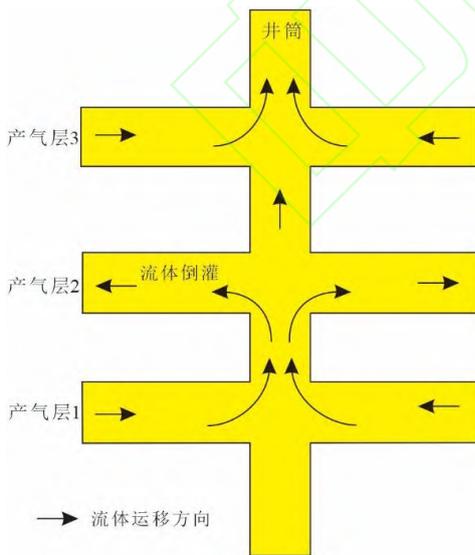


图6 煤系储层卸压增产原理

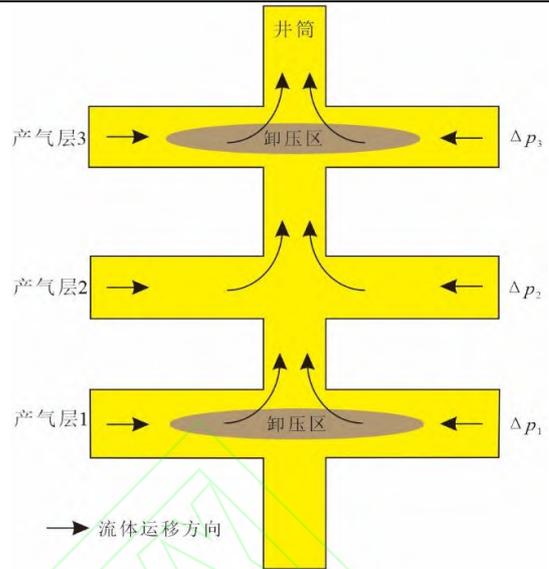
Fig.6 Principle of stress release to increase gas production of coal measure reservoirs

2.2.3 分层改变储层流体压力，达到多层合采动力条件

如前文所述，煤系储层各产气层与井底流压同时存在一定的生产压差是实现叠合共生煤系气储层协同合采的必备动力条件。实际生产中，产气层之间物性条件的巨大差异可能导致各产气层无法与井底流压同时形成生产压差，导致流体倒灌等产能抑制，如图7a所示。通过针对性设计卸压空间的形态、数量和规模，高压水射流创造卸压空间，对能量较高产层进行一定程度卸压，改变储层应力状态，诱导储层压降，使煤系气合采储层的压力梯度逐渐趋于一致，从而达到煤系多层合采动力条件，有效避免产能抑制，提高煤系合采过程中各产层的产气贡献，如图7b所示。创造卸压空间对储层进行卸压是对储层能量的一种弱化处理，这不同于常规水力压裂方法通过注入高压流体对储层进行增能的原理。因此，通过分层改变储层应力状态和储层压力，可为煤系气储层协同、高效合采提供重要保障。



(a) 卸压前



Δp_1 、 Δp_2 、 Δp_3 为对应产气层的储层压力梯度
 $\Delta p_1 \approx \Delta p_2 \approx \Delta p_3$

(b) 卸压后

图7 分层卸压前后效果对比

Fig.7 Contrast of before and after the stratified stress relief

3 分层卸压合采方式的优势

3.1 降低有效应力作用下的储层伤害

煤系气开发过程中，随着流体在储层孔、裂隙系统中的运移，有效应力将进一步增加，引起储层导流能力的伤害。通过改变地应力状态能够避免排采过程中有效应力的增加，保证储层孔、裂隙系统的开度，避免储层导流能力的快速下降。常规水力压裂增产方式通过注入高压流体仅对储层进行造缝，并不能有效释放储层应力，无法充分降低有效应力对储层渗透性的伤害。因此，对于深部煤系气储层而言，地面井分层卸压具有有效降低煤系气排采过程中的储层伤害的优势。

3.2 促进煤系气解吸和扩散

无论是煤层气储层还是煤系页岩气储层均存在大量的吸附态气体，在煤系气开发过程中吸附态气体需要解吸成为游离气才能运移和产出。通过创造卸压空间，改变储层应力状态，能够提高储层压降传递效率，从而促进煤系气的解吸。通过沿定向井分段切割缝槽以及岩层膨胀变形过程中张裂隙的大量生成，使原生煤系储层被分割成更小的基质块体，增加了煤系气扩散运移的路径，从而加快煤系气解吸和扩散的进程，提高煤系气的开发效率。有研究表明，煤系气解吸速率和扩散速率将随着基质颗粒的减小呈指数增长^[36]。常规压裂形成的主要为主干导流裂缝，且主干裂缝形态较为单一，而对储层进行卸压能够在储层内形成立体裂隙网格通道，更有利于促进煤系储层的整体降压，加速吸附气的解吸和扩散。促

进煤系气解吸和扩散是分层卸压在解决气源制约因素方面的显著优势。

3.3 降低层间干扰

通过对煤系气储层进行分层卸压,通过针对性改变目标储层应力状态,促进储层压力传递,平衡各产气层的流体能量,促使目标储层的储层压力与井筒压差满足煤系气储层合采的动力条件。在此条件下,各产气层的流体均能通过导流通道向井筒方向运移,从而避免流体倒灌等层间干扰现象,达到提高各产层产气贡献的目的。常规水力压裂方法通过对各产气层注入高压流体,对储层进行增能,可能加剧煤系各产气层的流体能量不均衡^[37]。降低煤系储层层间干扰是分层卸压合采方式在解决动力制约因素方面的优势。

4 适用地质条件和应用前景

4.1 地质条件适用性

经过数十年的发展,我国高压水射流技术与装备已十分成熟,在油气、煤矿井下增渗增产,石门揭煤等实践过程中,取得了良好的应用效果^[38-39]。这为地面井分层卸压的煤系气合采方式的快速推广应用奠定了良好的技术与装备基础。无论原生结构煤还是构造煤,均能够通过高压水射流措施进行卸压增透改造。此外,对于地应力大、渗透率低的深部煤系气储层而言,通过地面井分层卸压方式可以降低有效应力,减少导流能力伤害,提高储层压降传递效率。通过创造卸压空间,在垂向上也可形成较大的卸压范围,对于煤系气合采层数多且产层间距小的煤系气储层,通过分层卸压可以实现邻近多层的卸压,不仅可以提高煤系多层合采的开发效率,还能有效降低储层的改造成本。

4.2 应用前景

4.2.1 薄互层煤系气储层增产改造

薄互层煤系气储层层数多,层厚薄,层间距离小,含有多套含气系统且各个含气系统之间的动态平衡关系脆弱^[40]。若对含气储层均进行常规改造方式,则不利于平衡各产层间的流体能量,且增加了开发成本;若仅改造部分产层,则难以充分释放所有含气储层的产能,且在目标产层优选上存在较大困难。采用分层卸压的合采方式,地面井创造卸压空间后在垂向和水平方向上均可形成大范围卸压空间,且通过针对能量较高目标层进行储层改造,有助于平衡薄互层各产层的能量。因此,地面井分层卸压方式对薄互层煤系气储层进行增产改造有望取得较好效果。

4.2.2 层间干扰严重的煤系气储层开发

无论是叠合共生煤层气储层还是叠合共生的煤系多类型气储层,合采过程中均可能出现严重的层间干扰问题,制约各产气层的产能贡献,降低多层合采的开发效益。山西晋城矿区、保德地区,河南平顶

山矿区,贵州地区煤层气多层合采结果表明,产层间储层压力梯度、渗透率、临界解吸压力等地质条件差异较大会引起显著的层间干扰,制约煤层气井的合采效果^[9,41]。一般通过优选地质条件差异较小的产层组合来提高煤层气多层合采效果^[42]。地面井分层卸压的方式有助于平衡各产气层的流体能量,促使目标储层的储层压力与井筒压差满足煤系气储层合采的动力条件,降低多气合采中的层间干扰。因此,地面井卸压方式在层间干扰严重的煤系叠合共生储层具有较好的应用价值,且可大大扩展适合煤系气多层合采的储层开发范围。

尽管地面井分层卸压方式在薄互层煤系气储层增产改造以及降低煤系气合采过程中层间干扰方面具有良好的应用前景,但分层卸压目标层位选择,结合各产层地质条件的卸压空间形态、数量及规模的设计以及高压水射流固相颗粒的返排等均影响着该开采方式的应用效果,对此有必要开展更深入的研究。

5 结论

a. 煤系气合采的必备因素包括动力、通道和气源。动力因素是决定多层叠合共生煤系气储层能否实现合采的先决条件,通道因素决定了煤系气储层能否实现高产,气源因素是决定煤系气储层生产周期的关键。

b. 地面井分层卸压的煤系气合采方式是指通过地面定向钻井,对目标储层进行高压水射流作业,待目标储层的储层压力降至符合煤系气合采动力条件时(各个产层与井底流压同时存在一定的生产压差)进行合层排采。其原理是通过人工创造卸压空间,分层改变地应力状态,满足多层合采动力条件,降低有效应力伤害,诱导储层压降,提高各产气层产能贡献。

c. 相比于常规的储层改造方式,地面井分层卸压开发煤系气方式具有降低有效应力作用下的储层伤害,促进煤系气解吸和扩散、提高储层压降传递效率,降低层间干扰等优势。对煤系储层进行卸压在矿井瓦斯抽采领域应用广泛,高压水射流卸压技术与装备成熟,为地面井分层卸压合采煤系气的应用奠定了良好的基础。

d. 地面井分层卸压开发煤系气方式主要适用于地应力大、层间距小的煤系气储层开发,因此,在薄互层煤系气储层增产改造以及层间干扰严重的煤系叠合共生储层开发方面具有重要应用前景。今后有必要对分层卸压的煤系气合采方式开展更深入的研究。

符号注释:

p 为储层压力, MPa; α 为有效应力系数; σ 、 σ_e 分别为初始应力和有效应力, MPa。

参考文献(References)

- [1] OUYANG Yonglin, TIAN Wenguang, SUN Bin, et al. Accumulation characteristics and exploration strategies of coal measure gas in China[J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(5): 444-451.
- [2] QIN Yong. Research progress of symbiotic accumulation of coal measure gas in China[J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(5): 466-474.
- [3] 陈尚斌, 侯晓伟, 屈晓荣, 等. 煤系气叠置含气系统与天然气成藏特征——以沁水盆地榆社—武乡示范区为例[J]. 天然气工业, 2023, 43(05): 12-22.
CHEN Shangbin, HOU Xiaowei, QU Xiaorong, et al. Superimposed gas-bearing system of coal measure gas and its natural gas accumulation characteristics: A case study of Yushe-Wuxiang demonstration area in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(05): 12-22.
- [4] LIU Lingli, WANG Jianjun, SU Penghui, et al. Experimental study on interlayer interference of coalbed methane reservoir under different reservoir physical properties and pressure systems[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2022, 12(12): 3263-3274.
- [5] JIA Li, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Interlayer interference during coalbed methane coproduction in multilayer superimposed gas-bearing system by 3D monitoring of reservoir pressure: An experimental study[J]. Fuel, 2021, 304: 121-472.
- [6] WANG Chaowen, JIA Chunsheng, PENG Xiaolong, et al. Effects of wellbore interference on concurrent gas production from multi-layered tight sands: A case study in eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 707-715.
- [7] 胡进奎, 杜文凤. 浅析煤系地层“三气合采”可行性[J]. 地质论评, 2017, 63(增刊 1): 83-84.
HU Jinkui, DU Wenfeng: Analysis on Feasibility of Three Gas Co-Exploration in Coal Measure Strata Keywords: Coal measure strata; Coalbed methane; Shale gas; Tight sandstone gas; “Three gas co-exploration”[J]. Geological Review, 2017, 63(Sup.1): 83-84.
- [8] 魏虎超, 封蓉, 张亮. 煤系多气合采层间干扰特征数值模拟研究[C]//2020 油气田勘探与开发国际会议. 成都: 2020.
- [9] 许耀波. 煤层气井合层开发层间干扰分析与合采方法探讨——以平顶山首山一矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 112-117.
XU Yaobo. Analysis of interlayer interference in combined development of coalbed methane wells and discussion on combined production methods: A case study of Shoushan No.1 Coal Mine in Pingdingshan[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 112-117.
- [10] 李国璋, 秦勇. 煤系气合采兼容性物理模拟: 以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[C]//第十六届全国古地理学及沉积学学术会议. 西安: 2021.
- [11] DAI Shijie, XU Jiang, JIA Li, et al. On the 3D fluid behavior during CBM coproduction in a multi pressure system: Insights from experimental analysis and mathematical models[J]. Energy, 2023, 283: 129088.
- [12] 全方凯. 叠置含煤层气系统合采储层动态及层间干扰量化判识[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
QUAN Fangkai. Reservoir dynamics and interlayer interference quantification during methane co-production from superimposed CBM system[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2023.
- [13] 张和伟, 申建, 李可心, 等. 鄂尔多斯盆地临兴西区深煤层地应力场特征及应力变化分析[J]. 地质与勘探, 2020, 56(04): 809-818.
Zhang Hewei, Shen Jian, Li Kexin, et al. Characteristics of the in-situ stress field and stress change of deep coal seams in the western Linxing area, Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(4): 809-818.
- [14] 朱光辉, 李本亮, 李忠城, 等. 鄂尔多斯盆地东缘非常规天然气勘探实践及发展方向——以临兴-神府气田为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 16-29+261.
ZHU Guanghui, LI Benliang, LI Zhongcheng, et al. Practices and development trend of unconventional natural gas exploration in eastern margin of Ordos Basin: Taking Linxing-Shenfu gas field as example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 16-29.
- [15] 苏育飞, 宋儒. 沁水盆地榆社武乡区块深部煤层气地质特征研究及可改造性评价[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(5): 46-57.
SU Yufei, SONG Ru. Study on geological characteristics of deep CBM in Yushewu block, Qinshui Basin and evaluation of transformability[J]. China Coal Geology, 2023, 35(5): 46-57.
- [16] LI Rui, WANG Shengwei, LYU Shuaifeng, et al. Geometry and filling features of hydraulic fractures in coalbed methane reservoirs based on subsurface observations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(5): 2485-2492.
- [17] 李瑞, 卢义玉, 葛兆龙, 等. 地面井卸压的煤层气开发新模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(07): 75-84.
LI Rui, LU Yiyu, GE Zhaolong, et al. A new CBM development mode: Surface well pressure relief[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 75-84.
- [18] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(07): 2531-2543.
SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, et al. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2531-2543.
- [19] 郑司建, 桑树勋. 煤层气勘探开发研究进展与发展趋势[J]. 石油物探, 2022, 61(06): 951-962.
ZHENG Sijian, SANG Shuxun. Progress of research on coalbed methane exploration and development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 951-962

- [20] 田守崧, 黄中伟, 李根生, 等. 径向井复合脉动水力压裂煤层气储层解堵和增产室内实验[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 88-94.
TIAN Shouceng, HUANG Zhongwei, LI Gensheng, et al. Laboratory experiments on blockage removing and stimulation of CBM reservoirs by composite pulsating fracturing of radial horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 88-94.
- [21] 李根生, 黄中伟, 李敬彬. 水力喷射径向水平井钻井关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 1-9.
LI Gensheng, HUANG Zhongwei, LI Jingbin. Study of the key techniques in radial jet drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 1-9.
- [22] 卢义玉, 葛兆龙, 陈久福, 等. 煤矿井下割缝复合水力压裂增透技术及应用[R]. 重庆, 重庆大学, 2015.
- [23] 郭君. 低透气性松软煤层高压水力割缝增透机理研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
GUO Jun. Research and application on high pressure hydraulic slitting in soft coal seam with low permeability[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [24] 毕彩芹, 胡志方, 汤达祯, 等. 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题[J]. 中国地质, 2021, 48(02): 402-423.
Bi Caixin, Hu Zhifang, Tang Dazhen, et al. Research progress of coal measure gas and some important scientific problems[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 402-423.
- [25] 桑树勋, 郑司建, 易同生, 等. 煤系叠合型气藏及其勘探开发技术模式[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 13-21.
SANG Shuxun, ZHENG Sijian, YI Tongsheng, et al. Coal measures superimposed gas reservoir and its exploration and development technology modes[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 13-21.
- [26] 陈世达. 黔西多煤层煤层气储渗机制及合层开发技术对策[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
CHEN Shida. Permeable-storage mechanism and the development technical countermeasures for coalbed methane in multi-seams in western Guizhou[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [27] 黄华州, 桑树勋, 毕彩芹, 等. 煤层群煤系多套含气系统特征及其合采效果——以铁法盆地阜新组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(3): 645-655.
HUANG Huazhou, SANG Shuxun, BI Caiqin, et al. Characteristics of multi-gas-bearing systems within coal seam groups and the effect of commingled production: A case study on Fuxin Formation, Cretaceous, Tiefa Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(3): 645-655.
- [28] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2513-2522.
QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, et al. Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7) : 2513-2522.
- [29] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 煤层气合采地质研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 42-57.
GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Review of the progress of geological research on coalbed methane co-production[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 42-57.
- [30] SHEN Jian, LI Kexin, ZHANG Hewei, et al. The geochemical characteristics, origin, migration and accumulation modes of deep coal-measure gas in the west of Linxing block at the eastern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 91: 103965.
- [31] GAO Deli, BI Yansen, XIAN Baoan. Technical advances in well type and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry B, 2022, 9(6): 561-577.
- [32] TAO Shu, PAN Zhejun, TANG Shuling, et al. Current status and geological conditions for the applicability of CBM drilling technologies in China: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 202: 95-108.
- [33] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1-14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1-14.
- [34] 杨增强, 王琛艳, 朱栋, 等. 高压水射流钻割一体化防冲机理分析及其数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(1): 17-22.
YANG Zengqiang, WANG Chenyan, ZHU Dong, et al. Analysis and numerical simulation of high pressure water jet drilling-cutting integration for rock burst prevention mechanism[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(1): 17-22.
- [35] 李瑞. 煤层气排采中储层压降传递特征及其对煤层气产出的影响[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.
LI Rui. Dynamic characteristics of reservoir depressurization during coalbed methane reservoir depletion and its influences on gas output in the Qinshui Basin, Shanxi Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [36] 伊向艺, 吴红军, 卢渊, 等. 寺河煤矿煤岩颗粒解吸—扩散特征实验研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(3): 111-112.
YI Xiangyi, WU Hongjun, LU Yuan, et al. Experiment Study on Desorption—Diffusion Features of Coal and Rock Particles from Sihe Mine[J]. Coal Engineering, 2013, 45(3): 111-112.
- [37] 葛兆龙, 卢义玉, 周哲, 等. 煤层控制水力压裂裂缝导向扩展理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [38] 时亚军, 武沛武, 王佳, 等. 高压水射流卸压增透石门揭煤技术研究[J]. 中国煤炭, 2012, 38(11): 90-93.
SHI Yajun, WU Peiwu, WANG Jia, et al. Research on rock cross-cut coal uncovering via high-pressure water jet to release pressure and improve permeability[J]. China Coal, 2012, 38(11): 90-93.
- [39] 卢义玉, 夏彬伟, 葛兆龙, 等. 水力化煤层增透理论及技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

- [40] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(01): 371-387.
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 371-387.
- [41] 郭涛, 高小康, 孟贵希, 等. 织金区块煤层气合采生产特征及开发策略[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 14-19.
GUO Tao, GAO Xiaokang, MENG Guixi, et al. Combined CBM production behavior and development strategy of multiple coal seams in Zhijin block[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 14-19.
- [42] 张雷, 徐凤银, 李子玲, 等. 煤层气田单/合层开发影响因素分析及应用——以保德区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 68-77.
ZHANG Lei, XU Fengyin, LI Ziling, et al. Analysis on influencing factors of single/multi-layer development of coalbed methane field: A case study of Baode Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 68-77.

(责任编辑 范章群)

