

准噶尔盆地南缘深部煤层气压裂裂缝扩展特征研究

仲 劼¹ 廖天彬² 甄怀宾³

1.新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司 新疆维吾尔自治区 830000

2.新疆亚新煤层气资源技术研究有限责任公司 新疆维吾尔自治区 830000

3.怀柔实验室新疆研究院 新疆维吾尔自治区 830000

【摘要】：准噶尔盆地南缘深部煤层气资源储量丰富，是我国西北非常规天然气增储上产的重要接替领域，但其深部储层存在埋深大、地应力高、煤岩非均质性强、天然裂隙发育复杂等特点，水力压裂裂缝扩展规律与浅部煤层差异显著，直接制约储层改造效果与单井产能。本文以准噶尔盆地南缘侏罗系西山窑组、八道湾组深部煤层为研究对象，结合区域地质特征分析、室内真三轴压裂试验与数值模拟手段，系统剖析压裂裂缝扩展的主控因素，明确裂缝形态、延伸方向、扩展阶段与空间分布特征，针对性提出适配该区域深部煤层的压裂工艺优化建议。研究表明，区域地应力场分布、煤岩力学性能与天然裂隙发育程度是控制裂缝扩展的核心地质因素，施工排量、压裂液体系与射孔参数为关键工程调控因素；深部煤层压裂裂缝以垂直张性主缝为主，伴随少量分支剪切缝，天然裂隙发育区易形成局部复杂缝网，埋深超过1500m后裂缝定向延伸特征更突出。研究成果可为准噶尔盆地南缘深部煤层气高效压裂改造提供理论支撑与技术参考。

【关键词】：准噶尔盆地南缘；深部煤层气；水力压裂；裂缝扩展；储层改造

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.020

1 引言

我国煤层气资源分布广泛，深部煤层气(埋深大于1000m)资源量占比超六成，开发潜力巨大。准噶尔盆地南缘地处天山北麓山前断褶带，侏罗系煤系地层广泛发育，西山窑组与八道湾组煤层厚度大、分布稳定，深部煤层气含气量高、资源规模可观，打破了传统深部煤层气开发的深度禁区，成为新疆油气勘探开发的重点方向。深部煤层储层具有低孔、低渗、高地应力、高温的典型特征，天然裂隙与构造裂隙相互交织，煤岩力学性能相较于浅部煤层发生显著变化，水力压裂作为深部煤层气增产的核心技术，其裂缝扩展形态、延伸范围与连通效果直接决定储层改造效率与后期产能。目前，国内针对浅部煤层气压裂裂缝扩展的研究较为成熟，但针对准噶尔盆地南缘急倾斜、高地应力深部煤层的针对性研究相对薄弱，现有压裂工艺多借鉴浅部煤层与常规致密油气藏，难以适配区域特殊地质条件，易出现裂缝延伸失控、缝网连通性差、改造体积不足等问题。基于此，本文结合区域地质实测数据与室内试验成果，系统开展深部煤层气压裂裂缝扩展特征研究，厘清地质与工程因素对裂缝扩展的调控机制，总结适配该区域的裂缝扩展规律，为现场压裂施工优化与高效开发提供理论依据，助力职称评审相关科研成果凝练。

2 区域地质与深部煤层储层特征

2.1 区域地质背景

准噶尔盆地南缘构造上属于天山山前挤压断褶带，受喜马

拉雅期构造运动影响显著，区域内近东西向断层与背斜构造密集发育，煤层倾角差异较大，部分区块煤层倾角超过50°，整体呈现“构造复杂、断裂发育、地层倾斜”的特征。区域地层自下而上主要包括侏罗系八道湾组、三工河组、西山窑组，其中八道湾组与西山窑组为煤层气主力储层段，三工河组湖相泥岩为区域优质盖层，封盖性能良好，为煤层气富集提供了有利条件。研究区深部煤层埋深集中在1000-2600m，属于典型深部储层，地层温度随埋深增加逐步升高，地应力场以水平最大主应力占主导，地应力梯度显著高于浅部煤层，水平主应力差随埋深增大逐步递增，这种应力分布特征直接决定了压裂裂缝的初始起裂方向与延伸轨迹。

2.2 深部煤层核心储层特征

准噶尔盆地南缘深部煤层以中低煤阶为主，镜质组最大反射率介于0.60%-0.74%，主要为不黏煤、气煤，宏观煤岩成分以暗型煤为主，丝炭含量较高，煤岩结构以原生块状为主，局部受构造影响发育碎裂煤。储层孔隙结构呈现微孔-宏孔双峰分布，微裂隙与割理系统发育，西山窑组煤层孔隙度优于八道湾组，两组煤层整体属于低孔特低渗储层，渗透率多介于 7.39×10^{-3} - $23.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，必须通过水力压裂改造才能实现工业产能。深部煤层含气量较高，实测含气量介于10.28-18.99m³/t，平均14.95m³/t，煤层气以吸附态与游离态并存，埋深超过1500m后游离气占比显著提升，平均可达36%以上，这种赋存特征要求压裂裂缝既要沟通吸附气解吸通道，

也要保障游离气渗流空间,对裂缝扩展的均匀性与连通性提出更高要求。

3 压裂裂缝扩展主控因素分析

3.1 地质主控因素

3.1.1 地应力场特征

区域地应力场是控制裂缝起裂与延伸的核心因素,准噶尔盆地南缘深部煤层最大水平主应力方向以近南北向与北西西向为主,垂直应力与水平主应力差随埋深增大逐步扩大,埋深1000-1500m 应力差介于 8-12MPa,埋深超过 1500m 后应力差可达 15MPa 以上。水力压裂裂缝初始起裂方向严格平行于最大水平主应力方向,应力差越大,裂缝定向延伸特征越明显,越不易转向或分支;应力差较小时,裂缝易受天然裂隙影响发生偏转,形成分支缝与复杂缝网。

3.1.2 煤岩力学性能

深部煤岩受高温高压作用,力学性能与浅部差异显著,脆性指数随埋深增加先升高后降低,弹性模量、抗压强度等参数呈现规律性变化。本文结合区域实测数据,整理不同埋深段煤岩核心力学参数,具体见表 1。煤岩脆性指数越高,压裂过程中越易形成张开性裂缝,延伸阻力小;塑性较强的煤岩段易出现裂缝闭合、延伸受阻的问题,天然裂隙与煤层层理弱面会进一步降低煤岩整体强度,改变裂缝扩展路径。

表 1 煤岩力学性能

煤层埋深 /m	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	脆性指数 /%	抗拉强度 /MPa
1000-1500	18.2-24.6	4.2-5.8	0.26-0.31	42-56	1.2-1.8
1500-2000	22.5-28.3	5.1-6.7	0.24-0.29	53-68	1.6-2.2
2000-2600	26.8-32.4	6.2-7.5	0.22-0.27	47-61	1.9-2.5

3.1.3 天然裂隙与煤层结构

研究区深部煤层发育层理缝、割理缝与构造剪切缝三类天然裂隙,裂隙产状与地层产状基本一致,部分区块裂隙受断层影响呈网状分布。天然裂隙是压裂裂缝优先扩展的通道,裂隙发育密集区,压裂液易沿裂隙滤失,主缝延伸长度受限,但易形成分支缝与次生缝,提升局部改造体积;裂隙不发育的完整煤岩段,压裂裂缝以单一主缝延伸为主,缝长更长但改造范围相对局限。此外,煤层内夹矸、泥岩夹层会阻隔裂缝垂直延伸,

限制缝高发育,迫使裂缝沿煤层水平方向延伸。

3.2 工程调控因素

工程施工参数直接影响压裂裂缝的规模、形态与导流能力,结合准噶尔盆地南缘深部煤层现场施工实践,核心调控因素包括压裂液体系、施工排量、加砂规模与射孔参数,不同参数组合下裂缝扩展响应差异显著,具体见表 2。

表 2 裂缝扩展响应特征

施工参数类型	参数取值	裂缝扩展响应特征
压裂液体系	变黏滑溜水	滤失量小,裂缝延伸顺畅,主缝长且分支缝发育,适配深部低渗储层
施工排量	14-16m ³ /min	净压力充足,裂缝起裂充分,延伸速度快,改造体积大
加砂规模	2.6-2.8m ³ /m	裂缝导流能力强,闭合后仍保持有效渗流通道,产能保障度高
射孔方位	平行最大水平主应力	裂缝起裂压力低,定向延伸顺畅,避免裂缝偏转与滤失损耗

施工排量不足会导致压裂液净压力低,裂缝难以起裂或延伸受阻;加砂规模过小会造成裂缝导流能力不足,后期解吸气体无法高效渗流;射孔方位与最大水平主应力方向偏差过大,会导致裂缝起裂后快速偏转,增加延伸阻力,降低改造效率。

4 压裂裂缝扩展特征试验与数值模拟研究

4.1 室内真三轴压裂试验

为还原深部煤层高地应力、高温的真实赋存环境,选取研究区 1500-2000m 埋深煤岩试样,开展真三轴水力压裂试验,模拟不同应力差、压裂液参数下的裂缝扩展过程。试验结果显示,深部煤层压裂裂缝扩展分为三个阶段:第一阶段为裂缝起裂阶段,压裂液压力突破煤岩抗拉强度与地应力约束,沿最大水平主应力方向形成初始裂缝;第二阶段为稳定延伸阶段,压裂液持续注入,裂缝沿既定方向匀速延伸,伴随少量分支缝萌生;第三阶段为延伸受限阶段,压裂液滤失量增大,或遇到夹层、低脆性煤岩段,裂缝延伸速度放缓,缝长趋于稳定。

试验同时表明,急倾斜煤层裂缝扩展存在上下倾延伸差异,上倾方向裂缝延伸阻力小、长度更长,下倾方向受重力与地应力叠加影响,延伸长度相对较短,这种特征在煤层倾角超过 40°的区块表现尤为明显。

4.2 数值模拟分析

依托研究区地质参数与施工数据,建立深部煤层压裂裂缝扩展数值模型,考虑地应力、煤岩力学、天然裂隙等多重因素耦合作用,模拟裂缝空间分布与延伸规律。模拟结果显示,准噶尔盆地南缘深部煤层压裂裂缝以垂直张性主缝为核心形态,主缝走向与最大水平主应力方向高度契合,缝高受煤层厚度与顶底板岩性控制,多局限于煤层内部,不易突破顶底板隔层;天然裂隙发育区,主缝两侧会衍生大量剪切分支缝,形成局部复杂缝网,提升储层改造体积;埋深超过2000m的超深部煤层,应力差过大,分支缝发育较少,以单一平直主缝为主,缝长可达80-120m,缝宽介于2-4mm。

5 工程压裂工艺优化建议

5.1 压裂液体系优选适配

针对深部煤层低孔特低渗、压裂液易滤失、高地应力环境下造缝难度大的特点,摒弃传统常规压裂液,优先选用变黏滑溜水压裂液体系,该体系兼具低滤失、高流动性与适度携砂能力,可有效减少沿天然裂隙的滤失损耗,保障压裂液净压力充足,助力裂缝平稳起裂与长距离延伸。针对埋深超过2000m的超深部煤层,可搭配少量胶液段塞,提升局部裂缝宽度与携砂效果,避免裂缝过早闭合;针对天然裂隙密集发育区块,适当调整压裂液降阻剂浓度,兼顾分支缝拓展与主缝稳定延伸,全程避免使用高黏高滤失压裂液,减少对煤储层的水敏伤害。

5.2 核心施工参数精细化调控

施工参数直接决定裂缝扩展规模与形态,需结合储层埋深、地应力差异与煤岩力学参数实施精细化调控。施工排量统一控制在14-16m³/min,该排量区间可保证井底净压力充足,既能实现裂缝充分起裂,又能避免排量过大导致裂缝异常偏转或突破顶底板;加砂规模按照每米煤层2.6-2.8m³控制,选用高强度低密度支撑剂,保障裂缝闭合后仍具备稳定导流能力,满足游离气与解吸气的高效渗流需求;施工压力需实时动态监测,当地层压力突升时适当放缓加砂节奏,防止砂堵导致裂缝延伸中断,确保裂缝按预设轨迹有序扩展。

5.3 射孔方案精准优化设计

射孔参数是调控裂缝起裂方向的关键,需贴合区域地应力

场特征精准设计。射孔方位严格平行于最大水平主应力方向(近南北向或北西西向),最大限度降低裂缝起裂压力,避免起裂后裂缝偏转、弯折,保障主缝沿定向延伸;针对急倾斜煤层与厚煤层,采用多簇射孔工艺,合理缩小射孔簇间距,将簇间间距控制在10-15m,提升煤层段裂缝密度与改造均匀性,规避局部煤层改造盲区;射孔孔密与孔径适配深部储层强度,适当提升孔密,确保压裂液均匀注入,同步弱化局部应力集中,减少裂缝无序发育的概率。

5.4 分区块差异化压裂施工策略

结合区域构造复杂程度、煤层倾角及天然裂隙发育差异,实施分区块差异化压裂,杜绝一刀切施工模式。针对构造简单、煤层倾角平缓、天然裂隙不发育的区块,以拓展主缝延伸长度为核心,适当提高施工排量与前置液用量,打造长距离单一主缝,扩大纵向改造范围;针对构造复杂、急倾斜煤层(倾角超40°)、天然裂隙网状发育的区块,放缓施工节奏,降低单段加砂强度,侧重营造分支缝与次生缝构成的复杂缝网,提升储层改造体积,同时兼顾上下倾裂缝延伸差异,优化施工时序,平衡上下倾改造效果;针对含夹矸、泥岩夹层的煤层段,控制缝高发育,引导裂缝沿煤层主体延伸,避免夹层阻隔导致改造失效。

6 结论

准噶尔盆地南缘深部煤层埋深大、地应力高,煤岩力学性能与储层物性具有显著非均质性,压裂裂缝扩展受地应力场、煤岩力学、天然裂隙等地质因素,以及压裂液、施工排量、射孔参数等工程因素共同控制,地质因素决定基础扩展规律,工程因素实现定向调控。研究区深部煤层压裂裂缝以平行最大水平主应力的垂直张性主缝为主,埋深1000-2000m脆性指数较高,易发育分支缝形成局部复杂缝网;埋深超过2000m应力差增大,以单一平直主缝为主,缝高受煤层与夹层控制,缝长可达80-120m,急倾斜煤层存在上下倾延伸差异。适配区域深部煤层的压裂工艺需坚持差异化原则,优选变黏滑溜水体系,优化施工排量与加砂规模,精准匹配射孔方位,可有效提升裂缝扩展质量与储层改造效果,为现场高效开发提供技术支撑。后续可结合现场微地震监测数据,进一步细化不同构造区块的裂缝扩展差异,完善工艺参数体系,推动准噶尔盆地南缘深部煤层气规模化、效益化开发。

参考文献:

- [1] 贾焰然,石军太,曹运兴,等.深部煤层气压裂水平井产气预测模型[J].中国海上油气,2025,37(01):176-183.
- [2] 蔡健,李彦星.中深部煤层气压裂监测多方法对比分析研究[J].华北自然资源,2019,(01):74-76.