

# 涪陵焦石工区页岩气上部气层压裂技术探讨

冯德华（中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司，湖北 武汉 430040）

**摘要：**随着涪陵焦石工区页岩气二期工程的进一步深入，为了增加区块页岩气储量并提高区块的供产能力，提出对上部气层的开发要求，把上部气层页岩气开发纳入滚动开发进程。由于上部气层地层深、水平井段长、施工压力高以及滚动开发需要进一步适应提速增效、降本增效的要求，现场大力推进全员创新、岗位创新、自主创新的技术进步工作，广泛开展创新创效活动，为进一步优化页岩气压裂试气工艺奠定了基础。

**关键词：**焦石工区；上部气层；压裂技术探讨

## 1 前言

涪陵焦石工区页岩气二期工程经过近两年对上部气层的进一步深入滚动开发，针对上部气层的地层特点，开展了有专业性、针对性的压裂工艺研究。首先开展了段内密切割多簇射孔——体积压裂技术工艺研究，通过长水平段密切割射孔技术，实现细分段、密分簇、高密度射孔，充分动用储层潜能，在增加主裂缝条数的同时，增强了簇间干扰，形成相互连通的缝网，大幅度提高了段内裂缝的复杂程度；其次运用了连续大液量高强度加砂技术，增强水力压裂网络裂缝的有效支撑和缝内支撑剂的连续铺置效果，实现多级裂缝饱和充填，保障了高导流能力裂缝体系的完整性；其三是运用了段内分级、簇间转向压裂技术，通过投注水溶性暂堵球，封堵已充分进液的射孔簇，实现未进液射孔簇储层破裂，实现段内分级、簇间转向。

## 2 取得的工艺成果

经过对焦石工区上部气层施工井的工艺研究，对比总结出上部气层的地层特性主要有以下几点：

①上部气层各小层页岩相差异大，属次要开发有利岩相；②上部气层井测试产量差异较大，但仍是进一步充分动用焦石区块储量，提高采收率的潜力层位；③上部6-9小层相比下部1-5小层，具有泥质含量增加、塑性增强、层理欠发育、局部高应力等特征；④上部气层形成复杂裂缝的物质基础大幅减弱，人工裂缝质量降低，包括波及范围减少、复杂度降低。

表1 涪陵页岩气储层评价

评价方式	评价参数	1-5小层	6小层	7小层	8小层	9小层	评价指标
岩石力学参数评价	最小水平主应力, MPa	50-50.9	51.2	50.8	48.7	48.9	-
	水平应力差, MPa	7.2-7.5	7.5	7.5	7.2	7.1	小
	水平应力差异系数	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	小
	泊松比	0.21-0.23	0.22	0.22	0.21	0.22	< 0.25
	杨氏模量, GPa	35-38	40.3	40.9	39.5	44.1	大

脆性评价	页岩组分	硅质页岩	混合页岩与粉砂页岩	混合页岩与粉砂页岩	混合页岩与粘土页岩	粘土页岩	
	脆性指数, %	46-60	44.5	47.1	37.7	33.2	> 50%
	粘土含量, %	28-41	44.2	41.1	50.1	52.4	低
天然裂缝评价	天然裂缝发育情况	层理发育	层理欠发育		层理较发育	层理较发育高角度缝发育	高

针对上部气层塑性增强、层理欠发育、局部高应力等特征，围绕提升裂缝质量、增加裂缝数量、提高支撑强度，主体采用“高密布缝+高效缝控+高效铺置”压裂工艺：①总簇数增加：增加水平段射孔簇数，实现全水平井筒体积改造；②簇间距减少：充分利用簇间诱导应力，促进裂缝复杂化，进一步提升改造强度；③缝间、缝内暂堵转向：单段多簇模式下促使裂缝延伸转向，同时促进多簇裂缝均匀进液；④提高加砂强度：充分提高压后的裂缝导流能力，提高压裂改造效果。

### 2.1 密切割体积压裂工艺

“密切割、立体式、超长水平井”是北美对体积改造技术理解与应用的新突破，其核心是进一步缩短基质中的流体向裂缝渗流的距离，大幅降低驱动压差，增大基质与裂缝的接触面积，对塑性较强、应力差较大、难以形成复杂缝网的储集层实现体积改造。目前北美已将簇间距从20-30m缩小到5-10m，且广泛应用于各非常规储集层的水平井分段压裂中，不局限于难以形成缝网的储集层。

目前涪陵页岩气压裂单段簇数由2-4簇增加至6-9簇，簇间距由25-30m减小至10-15m，段间距由35-40m减小至20-25m，1500m水平段长压裂段数由30段减小至15段，裂缝密度由3.2-3.4条/100m增加至6.3-6.9条/100m。

### 2.2 高强度连续加砂技术

在铺砂模式上通过缩短粉砂与中砂隔离液量、增大中砂携砂液量、减少段塞间隔液量、石英砂替代性应用等多项措施，实现由段塞式加砂向高强度连续加砂转

变,加砂强度由 1.0 ↗ 1.5 ↗ 2.0t/m,提高裂缝导流能力和有效支撑裂缝体积。

在涪陵埋深较浅区块,石英砂与覆膜砂对比试验表明,施工和生产方面无明显差异,验证石英砂替代覆膜砂支撑剂可行性,可通过支撑剂数量弥补质量,进一步降低压裂成本。

大液量高强度加砂技术,全井平均砂比达到 7.1%,总体加砂强度 2.11t/m。提高 40/70 目石英砂砂比并尾追高砂比 40/70 目覆膜砂支撑缝口,大幅度保障了高导流能力裂缝体系的完整性。

### 2.3 段内多簇簇间投球暂堵技术

国内外大量生产测井和井下成像数据表明,多簇射孔水平井压裂,无论桥塞/管内封隔器分段,分段布孔时没有充分考虑储层的非均质性、射孔与产能匹配、三向应力和缝间应力干扰对簇间破裂压力的影响等,压裂时簇间孔眼进液差异大,导致水平井段相当部分射孔簇没有压开,地质储量没有得到有效动用,压裂改造效果与地质预期差距大。一段多簇射孔笼统压裂难以得到全面均匀地有效改造,产剖测试结果显示对产量起到主要作用的射孔簇仅占实际射孔簇的三分之一左右。

进液通道(射孔炮眼)的尺寸必须和暂堵球的尺寸相匹配才能保证暂堵球在孔眼上坐封后既不因压差而嵌入,也不因压裂液冲刷而脱落。暂堵球强度室内实验表明,当暂堵球的粒径大于进液通道尺寸 2mm 以上时,一般暂堵球可具备 30MPa 以上的抗压强度;暂堵球在炮眼处的受力分析认为,当暂堵球的尺寸小于 1.4 倍进液通道尺寸时,暂堵球坐封在炮眼上的抗压裂液冲刷性较好,具备较好的坐封稳定性。因此暂堵球的粒径必须大于进液通道尺寸 2mm 以上,且小于 1.4 倍进液通道尺寸。实际压裂时射孔炮眼会因支撑剂的打磨而增大尺寸,这就需要额外考虑排量、射孔数及暂堵时的支撑剂用量对炮眼尺寸的影响。经过理论计算和现场验证,形成了暂堵球粒径设计推荐表,如下表 2 所示。

表 2 暂堵球粒径设计推荐做法

暂堵前加砂量 (m <sup>3</sup> )	总孔数 (孔)	初始孔径 (mm)		
		9.5	10.5	13.6
40	36	15.5	15.5	18
	48	13.5	15.5	18
	64	13.5	13.5+15.5	15.6
70	36	15.5	15.5+18	18
	48	13.5+15.5	15.5+18	15.5+18
	64	13.5	15.5	18

在暂堵球粒径合适的情况下,现场采用一半射孔数量的暂堵球去封堵炮眼,但节流压差明显小于一半孔眼进液的交流压差,说明投入的暂堵球并不能完全受效。暂堵球在炮眼附近的受力情况较复杂,其中暂堵球位置、暂堵球尺寸、暂堵球密度、压裂液粘度、孔眼进液情况都会影响暂堵球的坐封,通过力学研究暂堵球的坐封条件难度很大。但在井筒的高紊流系数下,暂堵球的运动

轨迹并非线性,可将暂堵球视为压裂液的一个质点随着压裂液运动,那么压裂液进入各个炮眼的分量比例即为暂堵球的坐封概率,某个炮眼压裂液进入的分量越高,则被暂堵的概率也越大,因此可以通过这种概率事件来近似模拟暂堵球在射孔孔眼的坐封效果。

通过暂堵失败率与有效进液孔数的关系可发现,当有效进液孔数 1-5 孔时,暂堵坐封失败率迅速上升至 30% 以上,有效进液孔数超过 5 时,暂堵球坐封失败率增加缓慢。靠近 B 靶点的孔眼暂堵成功率稍高于靠近 A 靶点的孔眼,但靠近 A 靶点孔眼历经的暂堵球数量高于靠近 B 靶点,在计算时取 35% 作为暂堵坐封失败率平均值,得到暂堵球的用量系数 K=1.54,且采用 1.54 的用量系数在现场取得了较好的应用效果。总射孔数、射孔孔径和加砂量都会影响到投球后的压力上升值,在此以 5MPa 的节流压差提升为标准,给出了暂堵球用量的设计推荐表,如下表 3 所示。

表 3 暂堵球用量设计推荐做法

暂堵时加砂量 (m <sup>3</sup> )	总孔数 (孔)	初始孔径 (mm)		
		9.5	10.5	13.6
40	36	12	15	25
	48	22	25	39
	64	37	43	60
70	36	15	18	28
	48	25	29	43
	64	40	48	64

目前暂堵球投注装备普遍连接方式为:高压三通+液控旋塞+高压堵头,施工前,提前加装一定数量暂堵球,压裂期间通过液控装置直接投注,投球装置有以下特点:①通过液控系统控制,投注时可通过远程操作;②投球器上有明显开关标识,能够通过视频监控系统准确观察当前状态;③目前每个投球器只能投一次暂堵球,若一段压裂分多阶段投球,则需要安装多个投球器。

### 3 认识和建议

①新工艺、新技术宜经过多方论证,不能仅因单井特例的成功而过快推广;②新工艺、新技术推广应用所选用的设备和材料一定要符合施工设计的要求,否则会对施工的效果造成影响;③上部气层的施工仍处于实验论证阶段,对施工中所出现的任何疑难问题,需要及时优化并提出解决方案,只有科学的逐步进步才会取得成功。

#### 参考文献:

- [1] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质通报,2011,30(002):393-399.
- [2] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,罗勇.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011(7):90-97.

#### 作者简介:

冯德华(1971-),男,大学,工程师,现从事页岩气完井试气工作。