

# 水力喷砂射孔压裂的工艺设计

王新强<sup>1</sup> 杨震<sup>2</sup> 金向平<sup>3</sup>

青海油田井下作业公司 青海 海西蒙古族藏族自治州茫崖市 816499

**摘要:** 油气田勘探开发进入中后期, 必须加大低压低孔低渗油藏和前期不考虑的差层薄层的勘探开发力度。但在“三低”油藏和差层薄层通过常规压裂工艺进行压裂施工时, 主要存在如: 主裂缝不能顺利在储层内延展、固井质量不合格的井压裂时易窜槽、套管存在变形的井压裂困难等难点。水力喷砂射孔压裂工艺通过将水力喷砂射孔压裂工具下至预定井深, 将携带磨料的高压流体经油管泵送至井下, 达到击穿套管壁、切割套管、冲击水泥环、地层并在孔道顶端产生微裂缝, 同时进行压裂施工。

**关键词:** 水力喷砂射孔; 水力压裂; 喷嘴; 压裂液; 支撑剂

## 1 引言

油气田勘探开发进入中后期, 必须加大低压低孔低渗油藏和前期不考虑的差层薄层的勘探开发力度<sup>[1]</sup>。但在“三低”油藏和差层薄层通过常规压裂工艺进行压裂施工时, 主要存在以下几个方面的难点:

(1) 目的层靠近水层或隔层较差的井, 采用常规水力压裂时, 由于油藏破裂压力高, 缝高、压力控制困难, 在压裂过程中, 主裂缝不能顺利在储层内延展, 容易压开水层或压窜。

(2) 目的层附近固井质量不合格的井, 当压裂施工压力较高时, 常常发生层间窜槽、管外窜槽等情况, 采用常规水力压裂时, 难以实现对储层进行改造的目的。

(3) 目的层附近套管存在变形的井, 由于脱扣、变形、磨损等原因, 套管强度降低, 封隔器在通过变形井段时也有可能因各种原因出现卡阻、不能坐封、密封不严、压裂过程中失封等工程问题。

## 2 水力喷砂射孔压裂工艺原理

### 2.1 工艺现状

在国内, 水力喷砂压裂的研究重点偏向于对水力射孔技术的研究。早期主要针对水射流技术, 石油大学和石油研究院两家单位进行了相对应研究<sup>[2]</sup>, 中石化石油勘探开发研究院进行了室内试验研究<sup>[5]</sup>。其研究的主要内容: 携砂液水力射孔技术在射穿套管和水泥环过程的数理分析; 中石化胜利油田采油工艺研究院做了现场试验研究, 其主要研究内容为: 固定式多孔水力射孔技术现场应用。

### 2.2 工艺原理

水力喷砂射孔压裂工艺是水力喷砂射孔和水力压裂两种工艺的联作工艺技术。其工艺原理是: 将水力喷砂射孔压裂工具下至预定井深, 携带磨料的高压流体经

油管泵送至井下; 高压流体通过喷射工具上的喷嘴高速喷射而出; 高速流体裹挟磨料冲击在套管内壁上, 使套管产生破坏, 达到击穿套管壁、切割套管的效果; 击穿套管后, 高速流体依然携带大量动能, 进而继续冲击水泥环、地层; 在高速流体的冲击下, 地层产生脆性开裂, 在孔道顶端产生微裂缝; 喷砂射孔完毕, 关闭套管闸门, 进行压裂施工, 使裂缝继续延展、支撑剂进入孔道, 直至完成压裂施工。

### 2.3 工艺特点

水力喷砂射孔压裂应用水动力学原理, 完成整个射孔压裂过程, 其主要工艺特点有:

(1) 较好的适应性: 水力喷砂射孔压裂技术可以用于套管完井、筛管完井、裸眼完井等多种完井方式的储层改造; 也可以用于直井、大斜度井、定向井、水平井; 该技术不受固井质量的影响, 仅需避开套管接箍;

(2) 射孔准确: 水力喷砂射孔可通过校深手段准确射孔, 且形成的孔道可以引导压裂主裂缝的扩展方向、形成延伸度更深的裂缝;

(3) 污染低: 水力喷砂射孔较常规射孔相比, 孔道无破碎、无压实带, 有利于减少井筒附近油气流动阻力; 水力喷砂射孔不受近井带地层污染影响, 在完成射孔作业的同时还可以起到解堵的作用;

(4) 提高施工效率: 水力喷砂射孔压裂工艺只需一趟管柱, 即可完成射孔压裂工序, 简化了施工流程、缩短了施工时间、提高了作业效率、降低了施工风险;

(5) 管柱结构简单: 水力喷砂射孔压裂工艺管柱结构相对简单, 且在压裂过程中, 基于伯努利原理实现水力动态封隔, 不需要封隔器的机械密封, 较传统封隔器水力压裂工艺, 规避了封隔器施工带来的风险;

(6) 管柱可扩展性强: 水力喷砂射孔压裂工艺管柱

可扩展性强,能与排液工具联作,实现射孔-压裂-排液三联作工序,更好的满足低渗透储层措施改造;该管柱能与各类压控式反循环阀配合使用,以满足反循环需求。

### 3 水力喷砂射孔压裂的工艺设计

水力喷砂射孔压裂设计与常规射孔和水力压裂略有不同。水力喷砂射孔压裂设计主要包含两个部分,分别是:水力喷砂射孔设计、水力加砂压裂设计。

#### 3.1 设计原则

(1) 根据井筒与裂缝呈现方位,优选水力喷砂射孔加砂压裂工艺进行压裂改造;

(2) 根据该井全烃显示以及储层应力、脆性等研究成果,优选水力喷射压裂喷点位置、排量;

(3) 根据岩性、储层温度等,优选压裂液体系,保证措施后压裂液彻底破胶,提高措施残液的返排率,降低压裂液对地层的伤害;

(4) 根据地层闭合压力、脆性,优选压裂支撑剂;

#### 3.2 管柱组合

不动管柱水力喷射射孔分段压裂工具串下井时,管柱组合自下而上连接顺序为:引鞋+筛管+单流阀+喷枪+扶正器+油管短节+油管+校深短节+油管+双公接头+油管挂至井口。

设计管柱组合中还需明确喷嘴大小、喷嘴数量、校深方式、接箍位置等。

#### 3.3 施工工序优化

##### 3.3.1 水力喷射压裂优化

(1) 低替一个油管容积,使油管充满基液,投喷枪球阀;低替送球到位。油管排量稳定在水力喷砂射孔设计排量,混砂车开始加石英砂,砂比稳定,尽量保证排量稳定,不出现大的波动。

(2) 停止加砂后,排量稳定在水力喷砂射孔设计排量,继续泵入基液顶替油管内石英砂。

(3) 降低油管排量到压裂初始排量,关闭套管阀门,开始水力压裂。油管泵注前置液,环空压力开始上升直到压开地层,前置液压开地层后,开始从油管加入液氮泡沫,施工排量进行相应的增减。

(4) 油管按照泵注程序泵入携砂液,环空泵入基液,随时调整环空排量,保证环空压力略小于上一段压裂时的环空压力。

(5) 油管泵注适量顶替液。

(6) 停泵,等待裂缝闭合,待到井口压力不再降低时,开套管阀门控制放喷。

##### 3.3.2 施工泵注程序优化

水力喷砂射孔压裂工艺泵注程序可大体分为水力射

孔、水力加砂压裂两个阶段,起泵注程序可采用以下方式优化:

(1) 小排量油管低替基液,使油管和目的层环空充满基液;

(2) 用设计射孔排量稳定泵注,水力喷砂射孔;

(3) 采用油套合压方式加砂压裂,逐步提高砂比;

(4) 采用压裂排量顶替油管,避免砂堵

#### 4 现场应用

近年来,青海油田先后在冷东平1井、牛6井、切六9-15井等井使用水力喷砂射孔压裂工艺施工,取得了较好效果,下面主要结合冷东平1井施工情况具体评价水力喷砂射孔压裂工艺。

##### 4.1 冷东平1井施工简况及效果对比

###### 4.1.1 冷东平1井基本情况

冷东平1井是青海油田部署在青海省柴达木盆地北缘块断带赛昆断陷亚区冷东1号构造的一口预探井,该井完钻斜深2662.00m,其中A靶点:2564.00m/84.88°/683.54m,B靶点:2662.00m/96.00°/781.32m;完井油层套管:P110\*139.70mm\*9.17mm\*2658.55。该井设计试油IV层组,其中对第I层组2566.00-2594.00m射孔后采用水力喷砂射孔压裂方式补孔压裂。

###### 4.1.2 试油层位基本情况

冷东平1井第I层组测井解释孔隙度为12.3-23.0%,平均孔隙度为16.7%,测井解释渗透率为0.21-1.59mD,平均渗透率为0.62mD,录井岩性以细砾岩为主。根据该区探井实测资料,得到本区地层孔隙压力23.41MPa,预测地层温度为60.27℃。冷东平1井试气层段上下30m均无水层。该层段上隔层1987.0-1989.0m为泥岩,厚度2.0m;下隔层1892.3-1893.5m为泥岩,厚度1.2m。通过地应力剖面回归,该井水平段最小主应力为25.00-31.00MPa,测井资料计算脆性指数在46-57%之间。

###### 4.1.3 工艺优化及参数优选

若采用套内封隔器多段压裂或是双封单卡多段压裂工艺,存在管外窜的风险,因此采用对井况、裂缝方位等适应性强的水力喷射改造工艺进行压裂改造,返排工艺考虑液氮泡沫助排工艺。

设计采用P110-73mm外加厚油管,喷枪位置:2566.38±0.5m,采用自然伽马-磁定位方式校深,避开套管接箍,水力喷枪采用6mm\*6孔喷枪,井口安装KQ105/65型采油树;

基液配方:0.25%低分子聚合物稠化剂+0.5%粘土稳定剂+0.5%破乳助排剂+2%氯化钾+0.1%低分子聚合物交联剂;交联剂:25%低聚物交联剂,交联比100:1.8;

要求配制压裂液480.0m<sup>3</sup>（油管用液360.0m<sup>3</sup>、套管用液120.0m<sup>3</sup>）、交联液15.0m<sup>3</sup>、氧化解堵液10.0m<sup>3</sup>、活性水80.0m<sup>3</sup>、另配过硫酸铵200公斤、氧化解堵剂400kg在混砂车上加入。

#### 4.1.3 效果评价

本层前期采用常规射孔工艺，抽汲定产，产水3.44m<sup>3</sup>/d，见油花；采用水力喷砂射孔压裂工艺改造后，抽汲定产，产水5.84m<sup>3</sup>/d，微量气。

### 5 结论及建议

#### 5.1 本文结论

（1）设计了压裂液配方并对配方性能进行了评价，室内试验和现场施工效果表明该压裂液体系能够满足现场要求。

（2）设计了水力喷砂射孔压裂的技术方案及工艺步骤，并在青海油田多口井进行了现场施工。施工效果表明，水力喷砂射孔压裂技术方案、工艺步骤设置合理，工具性能可靠，有效提升了现有技术水平。

（3）结合水力喷砂射孔压裂工艺前后产能对比，表明水力喷砂射孔压裂技术增产效果明显。

（4）水力动态封隔代替了机械封隔和化学封隔，该技

术实现了一趟管柱完成两层射孔和压裂。

#### 5.2 下步施工建议

青海油田目前还没有系统分析喷嘴结构、材料对水力喷砂射孔质量的影响，亦没有分析水力喷砂射孔工艺中流体的能量、冲击力、冲击速度、最大阻力随射孔时间的变化规律，建议在后续设计中进一步完善喷嘴结构、材料以及流体能量、冲击速度随射孔时间的变化规律；为更好改善储层提供技术支持。

#### 参考文献

- [1]万仁薄.现代完井工程[M].北京：石油工业出版社，2008.
- [2]赵绍伟.水平井水力喷射分段压裂技术的研究与应用[J].油气工程,2015,34(6).
- [3]唐巨鹏等.水力喷射布置方式对页岩水力压裂效果的影响[J].辽宁工程技术大学学报,2017(2).
- [4]邹皓.水力喷射压裂关键技术分析[J].石油机械,2010, 38(6).
- [5]范薇等.井下水力喷砂压裂工具典型结构及应用[J].石油钻探技术,2009,37(6).