脉冲式加砂压裂控制装置研制及试验

郭淑芬（中石化西南石油工程有限公司，四川　德阳　618000）

摘　要：脉冲式加砂压裂技术成功的关键因素之一是能否保证支撑剂和纤维的脉冲注入。研制了支撑剂流向转换机构、纤维输送装置和配套控制软件，能够实现压裂液与携砂液脉冲加入、纤维与支撑剂配合脉冲加入，能与现有常规混砂车配合使用，提高保障脉冲式加砂压裂的顺利实施。为了测试自主研发的脉冲式加砂压裂控制装置整体性能，开展了模拟测试和现场试验，结果表明，脉冲式加砂压裂控制装置及配套控制软件可实现加砂和循环模式快速切换、脉冲时间间隔自动可控，能够满足脉冲式加砂压裂技术有效实施的需要。

关键词：脉冲式压裂；控制装置；模拟测试；时间间隔

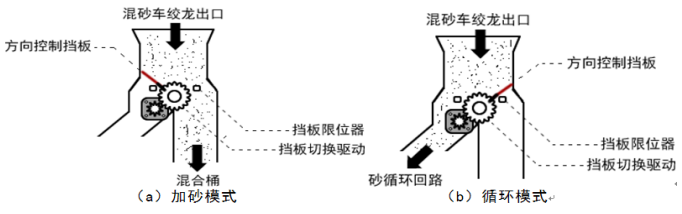
0 引言

脉冲式加砂压裂是在致密砂岩气藏开发中应用广泛的新型压裂技术，它通过特殊的控制装置将纯液体和纤维携砂液以一定的脉冲间隔交替注入地层，实现纤维支撑剂团对地层的柱状支撑，从而大幅提高支撑裂缝导流能力[1-2]。近年来，针对脉冲式加砂压裂技术国内外主要在室内实验评价、理论建模、工艺参数优化等方面开展了大量的研究[3-14]，但是在脉冲式加砂控制配套技术方面研究较少。该技术有效实施的关键是加砂脉冲时间间隔的控制和纤维加入的匹配，笔者通过研制能够与国内主流的混砂车相匹配脉冲式加砂控制装置，有效控制加砂脉冲时间间隔，为实现脉冲式加砂压裂施工提供必要的支撑。

1 结构设计

脉冲式加砂压裂控制装置以现有常规压裂混砂车作为基础平台，通过控制支撑剂流向及循环回输以实现携砂液与压裂液的脉冲式加入，主要由支撑剂流向转换机构、纤维输送装置及配套控制软件三部分构成。

1.1 支撑剂流向转换机构



（a）加砂模式　　（b）循环模式

图 1　支撑剂流向转换装置

国外公司采用专门的混砂车进行脉冲式加砂压裂，携砂液段与纯液段的最小间隔时间可达 12 秒，频率高有利于支撑剂分散与段塞的形成。国内采用开、停混砂车输砂器的方式进行近似脉冲式加砂压裂，由于输砂器的开启一般需 2–3min 才能达到预定砂浓度要求，因此不利于人工裂缝内支撑剂柱状段塞的形成；同时，频繁开关混砂车输砂器必然加剧输砂器的磨损，减少使用寿命。因此，设计开发了一套辅助装置，在原有输砂器的基础上，通过调整输砂器砂出口的方向控制进入混合桶中砂的瞬间起停，实现脉冲加砂的目的。

脉冲加砂阶段，需要进行加砂时，通过控制部分使切换装置切换到加砂模式，进入加砂状态；不需要加砂时，通过控制部分使切换装置切换到循环模式，进入循环状态，此时混砂车输砂器依然保持恒定的运行和固定的输砂量，只是支撑剂通过旁路回到砂斗，不再进入混合桶，这样就能确保再次切换进入加砂状态时，避免了砂比的变化渐进过程。

1.2 纤维输送装置

加砂过程伴随纤维材料的添加，添加纤维与砂量按一定比例进行添加，脉冲加砂同时要求纤维也必须是按脉冲方式进行添加，在支撑剂流向转化机构的基础上设计了一套脉冲纤维加砂控制系统，如图 2 所示。脉冲式纤维加入装置，设置在纤维泵出装置和混合筒之间，设计了螺旋输料部分、转阀控制部分和风送部分，上述三个部分的壳体内部贯通、依次连接，所述螺旋输料部分水平设置，其壳体顶部设置纤维进料口、对应纤维泵出装置的出料口，转阀控制部分竖直设置、其壳体末端开口设置在风送部分壳体前端顶部，风送部分壳体向上倾斜设置，前端侧面对应送风装置的出风口、末端对应混合筒上方开口。能实现纤维分散、计量、风送的脉冲式纤维加入控制，能与脉冲式加砂同步，实现纤维加入的精确控制，满足脉冲式加砂压裂施工作业要求。

1.3 配套控制软件

设计了脉冲加砂系统配套软件，是压裂过程中加砂脉冲时间间隔和纤维脉冲加入的主要控制程序。软件程序启动运行时，软件界面如图 3 所示；整个界面分为三大部分：菜单控制、阶段显示、数据显示区域。按设计要求设置好脉冲加砂的阶段液量、砂量、阶段时间等参数，并能自动按设置的阶段砂量、阶段时间进行自动脉冲加砂。

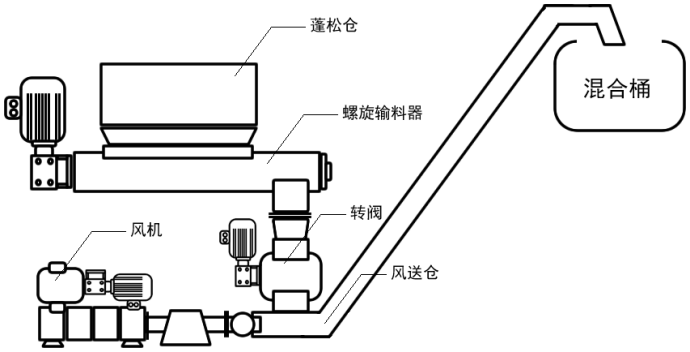


图 2　纤维输送装置



图 3　配套控制软件主界面

2　模拟测试及现场试验

2.1　模拟测试

采用混砂车、仪表车、脉冲式压裂控制装置及配套控制软件，模拟测试脉冲控制系统的可靠性、切换响应时间及砂浓度最快稳定时间、最大上砂量等主要技术参数。模拟参数：砂比 90 ↑ 500kg/m^3，脉冲间隔分别为 10s、15s、20s、40s，排量 4.0m^3/min。

模拟测试曲线如图 4 所示。从测试情况来看，支撑剂流向转换机构在加砂和砂循环两种模式下的切换时间 ≤ 2 秒，满足快速切换要求；最大上砂量满足 500kg/m^3 需求；控制系统、数据传输及软件系统稳定可靠；模拟测试结果表明脉冲式加砂压裂技术具备实施现场试验的基本条件。

2.2　现场试验分析

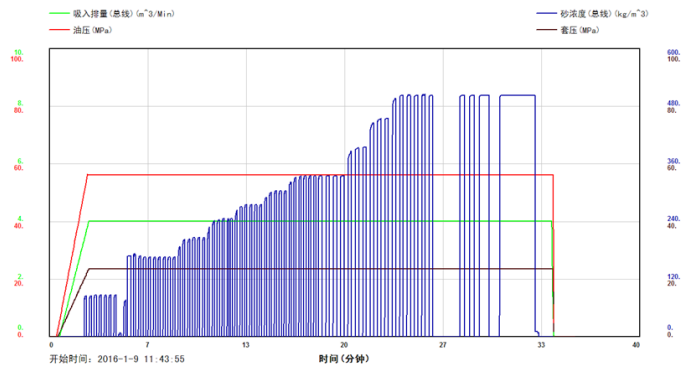


图 4　模拟测试曲线

在 GS307-2HF 井实施了脉冲式加砂压裂现场试验，施工曲线如图 5 所示。第 1-15 阶段按照常规加砂压裂方式进行压裂施工，第 16-18 阶段实施脉冲式加砂压裂试验。其中第 16 阶段以 420kg/m^3 砂比进行施工，时间间隔 30s、阶段时长 5min，整个过程装置切换良好，施工正常；第 16 阶段以 420kg/m^3 砂比进行施工，时间间隔 30s、阶段时长 5min，整个过程装置切换良好，施工正常；第 17 阶段继续以 420kg/m^3 砂比进行施工，脉冲间隔 20s、阶段时长 5min，施工正常；第 18 阶段继续以 420kg/m^3 砂比进行施工，脉冲间隔缩短为 10s、阶段时长 5min；整个脉冲式加砂阶段的施工曲线清晰地显示了脉冲间隔变化，砂比、排量、油套压等参数也正常显示，表明脉冲式加砂压裂控制系统、信号传输系统及软件系统处于正常运转状态；现场试验表明脉冲式加砂压裂控制装置满足现场施工需要。

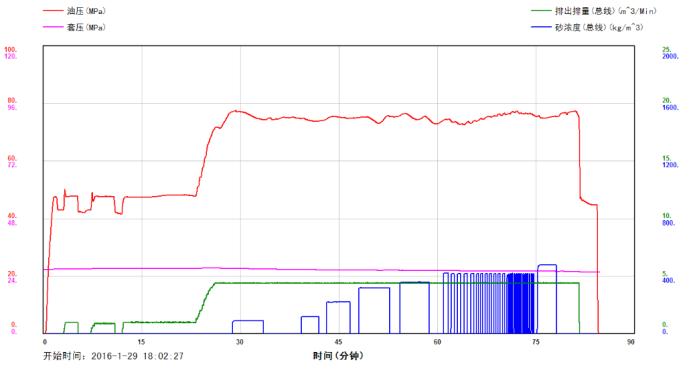


图 5　GS307-2HF 井脉冲式压裂施工曲线

3　结论及建议

①研制的支撑剂流向转换机构在加砂和砂循环两种模式下的切换时间小于 2 秒，满足快速切换要求；②研制的脉冲式加砂压裂控制装置及配套控制软件能够实现 10s 以上脉冲时间间隔可控，能够满足脉冲式加砂压裂不同脉冲时间的需要；③研制的脉冲式加砂压裂控制装置及配套控制软件顺利通过模拟测试和现场试验，建议进一步开展现场试验检验其性能并改进。

参考文献：

[1] 斯伦贝谢公司 . 高速通道压裂新技术 [J]. 油田新技术，2011,23(3):4-17.

[2] 周忠全，张星斗 . 脉冲式纤维加砂压裂工艺应用及效果分析 [J]. 化工管理 ,2018,21(9):190-191.

[3]JOHNSON J, TURNER M,et al.Channel fracturing-a Paradigm Shift in sight gas stimulation[C].SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference.24-26January 2011,The Woodlands,Texas,USA.

[4]Medvedev A, et al. On the Mechanisms of Channel Fracturing[C]. The 2013 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. 4-6 February.2013,Woodlands,

Texas, USA.
[5]Altman R, et al. Understanding the Impact of Channel Fracturing in the Eagle Ford Shale through Reservoir Simulation[C].The SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference.16-18April 2012,Mexico City, Mexico.
[6] 刘平礼，李珍明，宋雨纯，等 . 通道压裂过程中主裂缝支撑剂铺置影响因素实验研究 [J]. 油气藏评价与开发 ,2018,8(05):42-47+55.
[7] 贾光亮，李晔旻，郑道明 . 大牛地气田纤维脉冲加砂压裂工艺技术研究及应用 [J]. 复杂油气藏 ,2018,11(03):77-80.
[8] 陈星宇，何昀宾，何封，等 . 非连续铺砂裂缝动态闭合实验 [J]. 断块油气田 ,2018,25(03):398-403.
[9] 卢聪，陈滔，毕曼，等 . 通道压裂中顶液脉冲时间优化模型研究 [J]. 油气地质与采收率 ,2018,25(02):115-120.
[10] 苏国辉，高伟，李达，等 . 致密砂岩气藏脉冲纤维加砂压裂工艺参数优化 [J]. 钻采工艺 ,2018,41(01):46-48+4.
[11] 杜现飞，张翔，唐梅荣，等 . 薄互层定点多级脉冲式压裂技术研究 [J]. 钻采工艺 ,2018,41(01):65-68+5-6.
[12] 李凌川，张永春，李月丽 . 脉冲加砂压裂支撑剂铺置状态的 CFD 模拟 [J]. 长江大学学报 (自科版),2017,14(19):90-96+120-121.
[13] 郭建春，马健，张涛，等 . 通道压裂中流动通道形态影响因素实验研究 [J]. 油气地质与采收率 ,2017,24(05):115-119+126.
[14] 戚斌，杨衍东，任山，等 . 脉冲柱塞加砂压裂新工艺及其在川西地区的先导试验 [J]. 天然气工业 ,2015,35(01):67-73.

作者简介：
郭淑芬（1974- ），工程师，1996 年毕业于中国地质大学（武汉）计算机及应用专业，获学士学位，现从事压裂酸化技术研究和科技管理工作。

基金项目：中石化重大科技攻关项目“川西须五砂页岩气藏开发关键工艺技术研究”(JP14006)

（上接第 89 页）后，导入三维数据处理软件 Polyworks 中进行相关特征的创建及数据测量工作。在 Polyworks 中为生成的工件模型创建 3 个相邻的平面特征建立坐标系，对于工件表面的圆孔特征数据通过其内表面点进行圆柱拟合创建圆柱特征，从而可以得到圆孔的直径信息。对于圆孔的空间位置，选择各圆孔所在工件平面上的点拟合平面特征，然后由拟合的圆柱的中轴线跟平面相交得到该圆孔表面圆的圆心坐标，得到对应的表面圆孔特征测量数据。

表 1　表面圆孔特征测量数据

圆孔编号	拟合直径	千分尺测得直径	X	Y	Z
圆孔 1	22.075	22.063	-38.577	42.917	-16.887
圆孔 2	22.154	22.162	-38.297	58.672	-71.052
圆孔 3	22.114	22.115	-38.236	43.337	-125.383
圆孔 4	4.831	4.845	0.304	15.217	-44.199
圆孔 5	4.389	4.388	0.543	15.2	-98.409
圆孔 6	4.812	4.804	-77.779	15.946	-98.474
圆孔 7	4.932	4.942	-77.826	15.785	-44.198
圆孔 8	4.98	4.962	-15.285	58.425	-43.935
圆孔 9	5.006	5.021	-15.135	58.619	-98.132

为了检验点云数据拟合计算得到的圆孔直径的精度，利用千分尺（精度 0.01mm）对工件表面各圆孔的直径进行了实际测量，其测量结果见表 1，x、y、z 为各圆柱对应圆孔表面圆的圆心坐标。通过对比，点云数据拟合得到的各圆孔的直径与千分尺测量得到的直径之差均保持在 0.02mm 以内，验证了利用手持式三维激光扫描仪获取工件的特征数据的精度。同时，若有该工件的设计模型数据，则可通过公共点将点云数据拟合得到各圆孔表面圆的圆心坐标转换到设计坐标系下，对工件的空间位置等信息进一步进行检测。

4 结语

综上所述，三维激光扫描技术可以获得高精度扫描数据，同时可以获得被扫描物体的色彩信息。如果对于纹理细节要求不高，可以采用点云色彩信息直接生成纹理贴图。三维激光扫描技术通过采集 STL 数据可以直接生成 STL 三角网格面，能够实现对结构复杂以及纹理多样物体的扫描。同时三维激光扫描技术操作简单方便，在未来具有广阔发发展前景。

参考文献：

[1] 陈俊英，夏宝莹，谷丰恺，等 . 三维激光扫描技术在海洋石油生产中的应用分析 [J]. 中国造船 ,2012,53(S2):347-354.
[2] 罗建，孙德鸿，蒋涛 . 三维激光扫描在自升式钻井平台桩腿变形测量中的应用 [J]. 测绘通报 ,2013(05):50-53.
[3] 饶毅，徐丙立 . 基于三维激光扫描的快速建模方法研究 [J]. 电脑与信息技术 ,2017,25(01):8-10.
[4] 于明旭 . 提高三维激光扫描点云数据配准精度研究 [J]. 测绘与空间地理信息 ,2020,43(05):47-50+55.