定向射孔在致密储层改造中的应用

史雪枝　戚斌　陈琛　雷炜　李玉梅
（中国石化西南油气分公司工程技术研究院）

史雪枝等.定向射孔在致密储层改造中的应用.天然气工业,2008,28(9):92-94.

摘　要　川西地区低渗透致密砂岩气藏经过常规聚能射孔后进行压裂改造时,普遍存在破裂压力高、弯曲摩阻大的问题,这在对斜井进行压裂时问题就更加突出。介绍了马蓬49D井定向射孔技术应用情况,并重点阐述了定向仪的选择、射孔器材的设计、施工设计和操作。通过对比该井三层射孔段不同射孔工艺对后续压裂的影响效果,并对比同一区块内目的层为同一小层的井压裂施工情况,从现场实践证实了定向射孔技术有利于降低地层破裂压力和近井摩阻,提高了斜井的压裂效果。

主题词　致密砂岩　定向射孔　水力压裂　定向井　破裂压力

一、引　言

射孔后压裂投产是川西地区致密砂岩气藏的主要投产方式,在川西致密气藏的长期勘探开发中,常规聚能射孔发挥了重要作用,随着技术的不断发展,射孔弹打靶深度已达1 080 mm,地层条件下射孔穿深达到700 mm,能够穿过污染带进入地层,形成地层和井筒之间的有效渗流通道,在中浅层天然气勘探开发中取得良好效果。但聚能射孔器也有局限性:一是容易对地层造成压实污染,由于聚能射孔弹的挤压成孔作用在射孔孔道周围形成一个压实区域,区域平均厚度1.2～1.3 cm,孔隙度下降13%～22%,渗透率下降72%～78%,可见射孔压实带的形成,增大了地层流体流向孔眼的流动阻力,从而降低了油气井的产能,而且随着射孔弹药量的增加压实伤害加重;另一个是不能有效地降低地层破裂压力,川西地区的相当一部分中深井常规射孔后水力压裂启动压力达到70 MPa仍不能压开地层,有的地层甚至达到90 MPa仍然压不开,这与常规聚能射孔穿透深度有限,不能有效疏通裂缝有关。

在川西坳陷中深层的致密天然气储层中,有效裂缝网络在很大程度上决定了油气井的产能,单纯依靠射孔弹形成的孔道进入地层不足以在井筒周围形成裂缝渗流网络,并且如果射孔孔道与裂缝走向不一致,使压裂弯曲摩阻增加,不能有效降低地层破裂压力。因此,常规聚能射孔的局限性和川西深层天然气资源开发的需要,促使了定向射孔、多脉冲复合射孔等新射孔技术的发展和应用,并在消除压实损害、疏通裂缝、降低地层破裂压力,提高气井产能等方面发挥了作用。

二、原理及关键技术

定向射孔是近年发展起来的一种新型的油管传输射孔技术,是对常规射孔工艺的完善和补充,该技术可以解决裂缝性油气层常规射孔孔眼有效率低和压裂弯曲摩阻大的问题[1-7]。

定向射孔是在常规的油管输送式射孔管柱的基础上,在起爆器与深度定位短接之间接入一定方位短接,该定方位短接有一与射孔弹穿孔方位相同的定方位键,该键即是陀螺仪所要测定的方位;射孔枪与射孔枪之间定向连接,保持每支射孔枪的射孔弹方位一致,定深后,用电缆将下部带有导向装置的陀螺定方位仪下入油管中,待导向装置的导向键与定方位短节的定向键坐键后,进行方位测量,此时测得的定位键方位即是射孔弹穿孔的方位。若测量的方位与目标方位不一致,则需要在井口转动管柱调整方位,直到测量方位与目标方位相同或误差在允许范围内,然后起出仪器进行射孔点火。

地应力的测定、最佳方位的确定、准确定向、射孔参数的设计是定向射孔工艺的技术关键。为了保

作者简介:史雪枝,女,1978年生,工程师,博士;主要从事完井、采气研究工作。地址:(618000)四川省德阳市龙泉山北路298号。电话:(0838)2550390。E-mail:shixuezhide@163.com

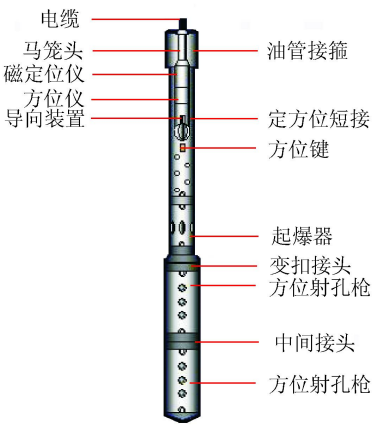

图 1　油管传输式定向射孔的工艺原理图

证精确定向，定向仪的选择、射孔器材的设计及正确的施工设计和操作都非常重要。

三、应用实例

1.马井蓬莱镇组气藏简介

根据 2004 年的资料，马井气田蓬莱镇组气藏共进行了 30 层次的施工，有 7 层次施工失败，其中 5 井次是由于施工压力高于井口设计压力而失败，2 井次是在施工过程中出现砂堵，造成施工失败。分析原因主要是由于井弯曲摩阻效应较强，近井地带复杂情况较多，施工风险大。近 2 a 来提高了井口压力级别后压裂施工成功率增大，但没有从根本上解决破裂压力高、弯曲摩阻效应强的问题。随着斜井应用数量的增加，调研发现目前大多斜井压裂效果总体并不理想。

马井蓬莱镇组气藏地层压力在 15～30 MPa 之间，压力系数 1.3～1.74 范围内，属于高压—异常高压气藏；气藏温度在 41～55 ℃之间，地温梯度在 1.93～2.23 ℃/100 m 之间。通过区域地应力研究，确定区域最大水平主应力方向为 NE108°，地层破裂压力梯度在 3.0 左右。

2.马蓬 49D 井施工概况

马蓬 49D 是部署的 1 口定向开发井，该井完钻井深 2 133.0 m，该井油层套管尺寸 139.7 mm，完井方式采用后期射孔完井。该井最大井斜角 36.26°，位于井深 2 125 m 处。设计要求一次性射开 $J_3p_2^3$（1 640.0～1 645.0 m）、$J_3p_2^5$（1 733.0～1 737.0 m）、$J_3p_3^9$（2 065.0～2 070.0 m）。

根据射孔设计，上段为主要目的层段，井斜角 22.83°，方位 350.77°，采用定向射孔，射孔方向对准 NE108°，相位 180°，孔密 13 孔/m；中段和下段采用常规螺旋式布弹聚能射孔工艺，相位 90°，孔密 16 孔/m；对上段、中段采用 SYD102 射孔枪、SDP43RDX-52-102 射孔弹；由于井斜角变大，方位角变化较大，对下部射孔段采用 YD89 射孔枪、DP35RDX-46-102 射孔弹；为了防止下层先爆影响上层定向，上层起爆时间设置为 3 min，下面两层起爆时间设置为 6 min；为了防止打压过快引起压力波动，从而影响定向的准确性，要求采用环空缓慢加压；两根定向射孔枪的连接设计了限位销钉（图 2-a），一是保证射孔弹对准盲孔，二是保证两根射孔枪的盲孔处于同一方位；从定方位短节到上部射孔枪之间的连接全部采用螺纹连接与限位销钉结合的方式，上扣时本体没有旋转，以保证定方位短节中的键与射孔弹的方向一致，在不影响定方向的条件下螺纹连接又能保证连接的强度（图 2-b、c）。

(a)　(b)　(c)

图 2　定向射孔器示意图

施工时，在地面组装射孔枪；下射孔器、油管；定深度，装较深短节、双公短节和锥管挂；下电子陀螺仪，通过地面仪器监测射孔枪的方位，井口旋转管柱进行方位调整，直到射孔弹对准 NE108°方位，座锥管挂，安装井口；加压引爆射孔器。考虑该井为斜井，且油管柔韧性较强，要求在定方位调整井口管柱过程中，保证定方位时间足够，做到随时监测方位，并且在旋转管柱过程中多次上提下放管柱，保证油管力矩或形变及时传递到井底，以防止射孔方位发生再次改变，调整完毕后必须静止观察 20 min。

然后对下、中、上层进行分层压裂，加砂规模分别为 30 m^3、15 m^3、35 m^3，增产后产量为 3.05×10^4 m^3/d，压裂施工曲线如图 3 所示。

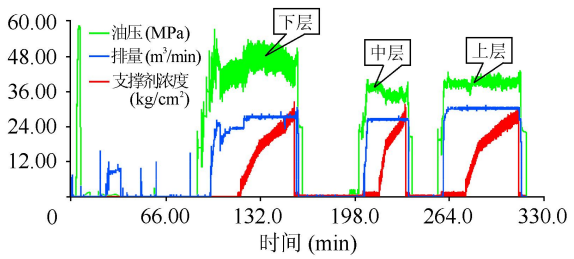

图 3　马蓬 49D 压裂施工曲线图

3.定向射孔效果分析

对马蓬 49D 井压裂施工曲线用 FracproPT 软件进行分析,并用自行开发的软件计算压裂施工管柱的摩阻,综合分析的结果见表 1。

表 1　马蓬 49D 井分层压裂施工曲线分析表

井深(m)	破压梯度(MPa/100 m)	近井摩阻(MPa)	备　注
2 065～2 070	3.50	7.04	16 孔/m,89 枪、DP35RDX-46-102 弹
1 733～1 737	2.68	0.64	16 孔/m,102 枪、SDP43RDX-52-102 弹
1 640～1 645	2.45	0.11	定向,13 孔/m,102 枪、SDP43RDX-52-102 弹

从表 1 可以看出,采用定向射孔技术的目的层具有相对较低的破裂压力梯度,从近井摩阻和施工曲线的形态看消除弯曲摩阻的效果显著。为了进一步说明这一点,将马井地区目的层为 $J_3p_2^3$ 的井与马蓬 49D 井进行对比分析,其结果见表 2,再次证实了定向射孔有利于降低地层破裂压力和近井摩阻。

表 2　不同射孔工艺对压裂施工的影响分析(施工小层均为 $J_3p_2^3$)

井号及井别	油套尺寸(mm)	射孔工艺			破压梯度(MPa/100 m)	近井摩阻(MPa)
		射孔方式	枪	弹		
马蓬 41(直)	177.8	常规聚能	SQ127-16-90	SDP43RDX-55-127	未压开	
马蓬 41-1(定)	139.7	常规聚能	SQ89-16-90	DP35RDX-46-102	2.47	6.58
马蓬 42(定)	177.8	常规聚能	SQ127-16-60	SDP43RDX-55-127	2.60	5.75
马蓬 42-1(定)	139.7	常规聚能	SQ89-16-90	DP35RDX-46-102	3.10	8.16
马蓬 49D(定)	139.7	定向射孔	SQ102-13-180	SDP43RDX-52-102	2.45	0.11

四、几点认识

(1)准确定向是定向射孔技术的关键。采用电子陀螺仪及定向键槽定向技术能满足精度要求;射孔器材采用螺纹与限位销钉结合的接头方式能够保证盲孔、弹以及定向键处于同一方向;同时正确的施工设计和操作也非常重要。

(2)通过现场试验,证实了定向射孔有利于降低地层破裂压力和近井摩阻,提高了斜井的压裂效果。

成文中参考了以下内部资料:《中国石油化工股份有限公司西南油气分公司 2006 年天然气开发工作年报》;《中国石油化工股份有限公司西南油气分公司 2005 年天然气开发工作年报》。

参　考　文　献

[1]李海涛.压裂施工井的射孔优化设计方法[J].天然气工业,1998,18(2):43-46.

[2]陈勉.大斜度井水压裂缝起裂研究[J].石油大学学报,1995,19(2):30-35.

[3]郭大立,王祖文,胡广军,等.射孔层位优化方法与分层压裂技术研究[J].西南石油大学学报,2007,29(6):116-118.

[4]张广清.射孔对地层破裂压力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):40-44.

[5]罗钟鸣.斜井压裂射孔设计研究[D].成都:西南石油学院,2005.

[6]王祖文,郭大立,邓金根,等.射孔方式对压裂压力及裂缝形态的影响[J].西南石油学院学报,2005,27(5):47-50.

[7]阳友奎.不同地应力状态下水力压裂的破裂模式[J].重庆大学学报,1993,16(3):30-36.

(修改回稿日期　2008-04-18　编辑　韩晓渝)