

文章编号: 1001-6112(2011)S1-0125-04

深层凝析气井射孔工艺技术及其应用

李建伟, 黄 成, 蔡 洪

(中国石化 西北油田分公司 雅克拉采气厂, 新疆 库车 842017)

摘要: 雅克拉、大涝坝等凝析气藏属中小型边底水碎屑岩凝析气藏, 具有埋藏深、凝析油含量高、储层敏感性强、非均质性强、隔层厚度大、中低渗等特点。1984 年投入试采, 2005 年全面投入开发, 在凝析气藏开采工艺方面积累了丰富的经验, 特别是在凝析气藏射孔完井方面经过多年的优化应用, 形成了一套适用于各气藏不同储层特征、不同开发阶段的射孔完井工艺技术体系, 提高了凝析气藏开发效果。

关键词: 射孔工艺; 完井; 凝析气藏; 深层; 雅克拉; 大涝坝; 塔河油田

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Perforating technology application in deep gas condensate well

Li Jianwei, Huang Cheng, Cai Hong

(Yakela Gas Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Kuche, Xinjiang 842017, China)

Abstract: The gas condensate reservoirs in Yakela and Dalaoba regions are middle and small sized elastic rock reservoirs with edge and bottom water, characterized by deep burial depth, high condensate oil content, strong reservoir sensibility, strong heterogeneity, big barrier thickness and medium—low permeability. Production tests were made in 1984 and fully developments were carried out in 2005, resulting in experiences in condensate oil exploration. Perforating technology has been practiced and improved for years. A set of perforating technology system suitable for different reservoir characteristics and exploration stages was proposed, improving gas condensate reservoir exploration effects.

Key words: perforating technology; well completion; gas condensate reservoir; deep layer; Yakela; Dalaoba; Tahe Oilfield

凝析气井在投入生产后可能发生反凝析污染和压井漏失引起的水锁、水敏污染等; 当压力下降到露点压力以下, 将发生反凝析, 从而在井筒周围形成凝析油堵塞, 形成反凝析污染区, 降低油气产能; 在作业过程中, 压井液的漏失可能在井筒周围形成一个污染区, 水锁、水敏效应等降低油气产能, 甚至使油气层无法启动恢复生产。

在凝析气井后期的修完井过程中, 完井能否解除这 2 种污染, 直接关系到措施效果及凝析气藏的油气采收率。

对于凝析气藏, 由于钻井、固井过程中易形成的化学堵塞、界面张力作用易形成水锁污染、以及后期生产过程中反凝析作用易使污染加剧, 因此, 对凝析气藏完井要求较高。雅克拉、大涝坝等凝析气藏大多为深层中—低渗、中—低储量丰度和高含凝析油的碎屑岩凝析气藏, 完井时大部分采用下套管固井方式来封隔油、气、水层, 需要射孔来建立油

气流通道。为此射孔作业能否解除前期的污染、射孔表皮的大小直接关系着凝析气井的产能, 影响着凝析气藏的开发效果。

1 深层凝析气井射孔工艺技术现状

2005 年西北油田分公司凝析气藏陆续投入开发, 经过近 5 年的研究和开发实践, 深层凝析气井射孔完井技术实现了 3 个方面的进步: 一是由单一的电缆正压射孔向多种方式的负压油管传输射孔转变, 大大降低了射孔作业污染, 缩短了作业周期; 二是由穿深小于 1 m 的普通弹射孔向穿深大于 1 m 的 StimGun 增效复合射孔、OWEN 超深穿透射孔等射孔技术转变, 增加了射孔穿深距离, 大大地恢复了压井液漏失严重、污染半径大的凝析气井产能; 三是射孔液由普通压井液向低伤害压井液、ADG077 储层保护液等转变, 降低了射孔作业前后漏失的压井液对储层的伤害。目前油管传输超深

穿透负压射孔和低伤害射孔液完井技术已成为西北油田分公司深层凝析气藏高效开发的重要手段。

2 深层凝析气井射孔参数优化

要获得较好的射孔效果,首先应当具有最优的射孔参数。射孔参数主要是指穿深、孔径、孔密、相位、方位、布孔格式等,各参数相互影响,为获得最好的射孔效果,在雅克拉、大涝坝等气田的射孔完井中,对各参数进行了优化研究。

射孔参数中穿深和孔径直接由射孔弹的结构类型和所装药量决定;是评价射孔弹性能的基础指标。而孔密、相位、方位、布孔格式则是衡量射孔器性能的综合指标。穿深是整个射孔过程中的前提指标,孔径是影响井筒渗流面积的重要参数之一,孔密是衡量射孔器综合性能指标的一个关键参数。孔密的高低不仅决定了井筒内总泄流面积的大小,而且还对地层流体向井筒流动的状态产生影响。穿深和孔密对于自然完井是最重要的 2 个参数,随着穿深的增加,其影响成比例增加;当不能实现深穿透时采用高孔密尤为重要;自然完井中,孔径是最不重要的射孔参数,增加孔径通常是以损失穿深为代价;孔径增加 10% 约牺牲 20% 的穿深。

总的来说气井产能随孔深的增加而增加。刚射开钻井污染带后,射孔穿深对产率比的影响十分显著,基本上呈指数增长,此时提高射孔穿深最能提高气井产能。充分射开污染带后,随射孔穿深的增加,产率比的增加十分有限,而此时孔密对产率比贡献增加。

通过各射孔参数的组合模拟优化(图 1—图 3),在雅克拉、大涝坝等凝析气田射孔作业中各射孔参数为孔密 16~20 孔/m,相位角取 45°,60°,90°

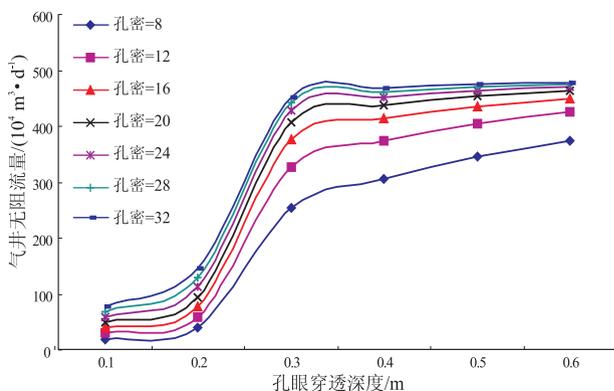


图 1 不同孔密下的凝析气井无阻流量曲线

Fig. 1 Curves of unimpeded flow volume in gas condensate wells with different perforating densities

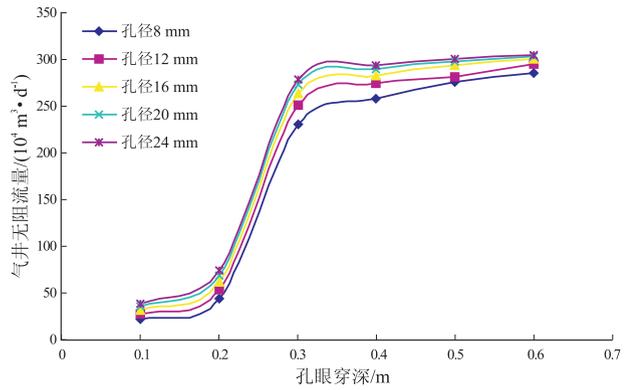


图 2 不同孔径下的凝析气井无阻流量曲线

Fig. 2 Curves of unimpeded flow volume in gas condensate wells with different apertures

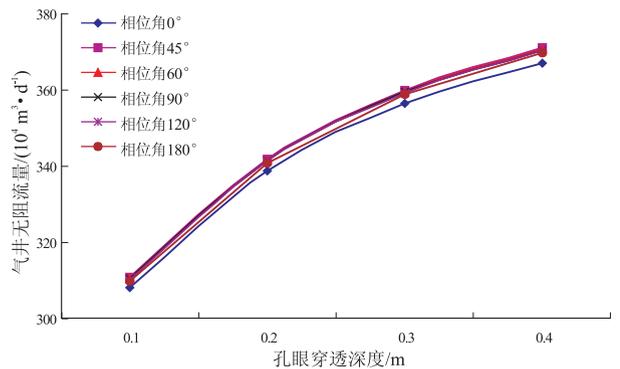


图 3 不同相位角下的凝析气井无阻流量曲线

Fig. 3 Curves of unimpeded flow volume in gas condensate wells with different phase angles

中的一种,采用孔眼直径为 12~16 mm 的常规射孔弹,螺旋布孔格式。

3 深层凝析气井射孔工艺优化

在雅克拉、大涝坝等气田的射孔完井工艺技术优化中经历了以下发展历程:电缆传输正压射孔→油管传输负压射孔→油管传输深穿透负压射孔。

3.1 电缆传输正压射孔技术

在 2005 年以前,主要采用电缆传输正压射孔,它是在下油管前,用电缆把射孔器输送到目的层,进行定位射孔。射孔器可以采用有枪身射孔器或无枪身射孔器,施工简单、成本低,但由于其井控要求高必须实行正压射孔,射孔液漏失造成储层污染难以避免,射孔后需要人工举升诱喷,一次射孔厚度受限,且由于射孔后井内无管柱,井控风险大。为此从 2005 年开始在雅克拉、大涝坝等凝析气藏完井过程中开始推行油管传输射孔。

3.2 油管传输负压射孔技术

相对电缆传输射孔,油管传输射孔由于采用油

管连接,射孔厚度大大提升,可实现一次多层大跨度射孔,可达数百米,易于实现负压射孔,利用负压冲刷作用降低射孔表皮,解除射孔对储层的伤害;可用于斜井、水平井等电缆难下入的井;还可与测试、酸化、压裂联作,缩短作业周期,降低施工费用,提高完井效率;由于射孔前后井内有完井管柱,井口装有采油气树,井控安全得到了保证。

负压射孔具有减少射孔漏失、排除射孔碎屑、清洁射孔孔眼、解除射孔污染从而提高气井产能的优势。在雅克拉、大涝坝等气田的射孔完井过程中,重点对负压射孔进行了优化应用,形成多种油管传输负压射孔技术。

当射孔完井前没有打开的井段时,选用液压封隔器,利用轻油作传压流体进行打压坐封,并启动压力延时启爆器,迅速泄压后,启爆器引爆射孔弹,实现负压射孔;该射孔方式主要应用于凝析气藏开发前期,地层压力保持程度较高的情况。

当射孔完井前有打开的井段时,采用机械封隔器下带投棒开孔器的完井管串,完井管串下入过程中根据需要的负压值灌液,管串下到位坐封封隔器后,进行投棒打开开孔器建立封隔器以下油管内外连通通道,并引爆射孔枪,实现负压射孔;该射孔方式主要应用于气藏开发中期,地层压力保持程度不高、需要大负压射孔的情况。

随着气藏压力下降,在部分气井取消封隔器的情况下,采用带筛管的投棒射孔完井管柱,利用连续油管气举掏空部分井筒使井筒内液柱压力低于地层压力后,进行投棒引爆射孔弹实现负压射孔,该射孔方式主要应用于气藏开发后期,地层压力保持程度低,需要大负压射孔的情况。

通过以上 3 种负压射孔方式能够实现各种情况下的负压射孔,为负压射孔完井技术的推广应用奠定了基础。

在优化负压射孔方式的同时,对负压值进行优化设计。负压射孔的瞬间,由于负压差的存在,可使地层流体产生一个反向回流,冲洗射孔孔眼,避免孔眼堵塞和射孔液对储层的损害;但负压过大会引起地层出砂并损害套管,负压值过低又不能起到负压作用。为此根据雅克拉、大涝坝等凝析气藏的储层特征,按照美国 Conoco 公司计算公式进行负压值的优化,并通过实践应用确定雅克拉、大涝坝等凝析气藏的油管传输负压射孔值在 10~20 MPa,可获得较好的射孔效果,同时又不引起地层出砂。

油管传输负压射孔技术在雅克拉、大涝坝等气田使用取得很好的效果,与常规正压射孔相比,射

表 1 雅克拉、大涝坝等气田常规射孔与负压射孔对比
Table 1 Comparison between normal perforating and negative pressured perforating in Yakela and Dalaoba gas fields

井号	射开层位	射孔方式	射孔油压变化情况	诱喷方式	开井最大压差/MPa
DLK2	巴什基奇克	电缆射孔	0 MPa	连续油管气举(下深 1 800 m)	21.5
	苏维依	投棒负压射孔	30 MPa/40 min	无油嘴放喷	负压 20
DLK4	巴什基奇克	电缆射孔	0 MPa	连续油管气举(下深 1 200 m)	15.9
	苏维依	打压负压射孔	26 MPa/13 h	无油嘴放喷	负压 15.9
S4	亚格里木	电缆射孔	0 MPa	无油嘴放喷开井产少量气	10
YK11	亚格里木	投棒负压射孔	32 MPa/4 h	射孔后迅速起压,针阀控制开井成功	负压 30
DLK11	巴什基奇克	打压负压射孔	0 MPa	气举至 1 800 m 诱喷见产	负压 17.1

孔后起压快,更易见产(表 1),表皮系数可为负,可实现凝析气井超完善,例如,TP12-8X 井采用油管传输负压射孔后,压力恢复试井解释表皮系数为-4.84;而投棒负压射孔又较打压负压射孔形成的负压高,射孔后起压快,见产时间短,效果更好。

3.3 深穿透射孔技术

对凝析气藏在钻井和固井过程中,泥浆漏失一方面可能与地层岩石不配伍形成污染,另一方面还可形成水锁,使凝析气井启动困难,产能降低(表 2)。另外若在井筒周围的污染无法解除,随着凝析气藏开发,很容易在井筒周围发生反凝析,形成凝析油堆积,扩大污染半径,堵塞渗流通道^[1],进一步降低气井产能(表 3)。

所以在射孔完井作业中,射孔能否穿透污染带,

表 2 泥浆漏失导致的水锁污染数据
Table 2 Data of water-blocking damage resulted from mud leakage

侵入深度/m	最大反渗吸启动压力梯度/(MPa·m ⁻¹)	无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		
		YK8 井	DLK5 井	THN1 井
0	—	7.75	26.05	37.96
1.5	9.882 4	0.91	2.37	2.06
无阻流量变化率/%		88.26	90.90	94.57

表 3 井筒周围污染导致的反凝析污染数据
Table 3 Data of retrograde condensate damage resulted from pollutions around wellbore

井名	r_a/m	$\ln(r_a/r_w)$	表皮系数
DLK1X	2.63	72	4.3
DLK3	13.85	379	5.9

表 4 StimGun 增效复合射孔效果对比

Table 4 Effect of StimGun perforating

井号	孔隙度/%	渗透率/md	含油饱和度/%	地层密度/(g·cm ⁻³)	射孔方式	射孔后产量/m ³
BK8	8~14	0.7~27	31~54	2.51~2.63	StimGun	日产油 62.3
BK2	7~8	0.6~10	48~54	2.23~2.54	127 枪 大 1 m	供液不足
BK7	4~10	0.2~4	15~55	2.5~2.58	筛管完井	日产水 26.55

将极大影响气井的产能和凝析气藏的开发效果。从 2009 年开始,引进了多种深透射孔技术,目前射孔穿深最大已达 1.6 m,可有效的穿透污染带,解除前期钻井过程中形成的污染,最大程度地释放油气井的产能。

目前使用的深穿透射孔技术主要有 StimGun 增效复合射孔工艺、OWEN 超深穿透射孔工艺、JRC 超深穿透射孔工艺等^[2-3]。

StimGun 增效复合射孔工艺能够改善近井地带渗透性,可实现超完善,达到改造低孔低渗储层的目的。从表 4 可见,BK8 井采用 StimGun 增效复合射孔后,日产油量达到 62.3 m³,生产效果明显好于邻井。

OWEN 超深穿透射孔能有效地释放凝析气井的产能。例如,DLK5 井和 DLK7 井产层为同一构造同一层段,井距 250 m,分别采用常规 127 射孔弹和 127SDPOWEN 弹射孔。DLK7 井采用 OWEN 超深穿透射孔后日产油量 36 m³,日产气量 27 221 m³。与 DLK5 井相比,日产油量提高了 76%,日产气量提高了 97%。

从试油情况来看,JRC 超深穿透射孔工艺增产效果十分显著,AT11-1 井采用 JRC 超深穿透射孔后日产油量 19.2 m³,日产气量 1.2×10⁴ m³。与同区块同层位的 AT11-2 井初期试油结果相比,日产油量提高 83%,日产气量提高 237%。

以上分析表明,雅克拉、大涝坝等凝析气藏深穿透射孔技术能有效的解除了钻井、固井过程中的污染,保证了凝析气藏的高效开发。

3.4 低伤害射孔液射孔完井技术

在射孔作业过程中,特别是在正压射孔作业

表 5 不同射孔液射孔效果对比

Table 5 Comparison between perforating effects using different perforating liquids

井号	射孔方式	射孔液	油嘴/ mm	油压/ MPa	油量/ t	气量/ m ³
DLK6	油管传输 负压射孔,负 压值 20 MPa	—	5	25.1	34	53 770
DLK9	电缆传输 射孔, YD- 127 射孔枪, 127 弹	低伤 害储层 保护液	5	24.6	33	52 018

注:DLK6 井和 DLK9 井产层为同一构造同一层段,构造位置相当,井距 1 000 m。

中,射孔液的漏失会使凝析气井的产能降低,为此通过对储层敏感性的研究,研制了适合雅克拉、大涝坝等凝析气藏射孔完井作业中保护储层的射孔液,降低了射孔作业中污染。

通过大涝坝气田低伤害射孔液的使用情况可看出,使用低伤害射孔液在电缆正压射孔作业中可较大程度保持气井的产能,可达 95%以上(表 5)。

4 结论与建议

1)经过技术研究和开发实践,形成了深层凝析气井油管传输超深穿透负压射孔和低伤害射孔液完井技术,为该类凝析气藏的高效开发提供了技术支撑。

2)通过现场实践应用表明,油管传输的深穿透负压射孔和低伤害射孔液完井技术在开发深层凝析气藏具有较大的优势,能大幅提高气井产能和开采效益。

3)随着凝析气藏开发进入中后期,地层压力不断下降,反凝析污染加重,应当进一步推广应用油管传输的深穿透负压射孔和低伤害射孔液完井技术。

参考文献:

- [1] 李士伦,王鸣华,何江川. 气田与凝析气田开发[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
- [2] 白锡忠,常熹. 油气井射孔弹及其应用[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [3] 牛超群,张玉金. 油气井完井射孔技术[M]. 北京:石油工业出版社,1994.

(编辑 黄 娟)