

· 试油试采技术 ·

文章编号: 1004-4388(2025)01-0028-07

水平井同步回转增压排水采气技术在临兴中区的应用

李强, 杨宇光

中联煤层气有限责任公司晋西分公司 山西吕梁 033000

通讯作者: Email: 823958127@qq.com

项目支持: 中联煤“十四五”重大科技项目“陆上非常规天然气勘探开发关键技术”(KJGG-2021-1000)

引用: 李强, 杨宇光. 水平井同步回转增压排水采气技术在临兴中区的应用[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 28-34.

Cite: LI Qiang, YANG Yuguang. Application of synchronous rotary pressurized drainage and gas recovery technology of horizontal wells in Linxing central district[J]. Well Testing, 2025, 34(1): 28-34.

摘要 随着临兴中区开发时间的延长,气井携液能力变差,越来越多的水平井出现井筒积液甚至水淹,导致减产或停产的问题。基于水平井井身结构、排液特点,对比分析了水平井常规排水采气措施适用性,开展了水平井同步回转增压排水采气技术研究,结合典型井的现场试验,分析了抽吸、回注、干管补能三种组合工艺模式下的生产数据,从工艺特点、增产效果、经济性进行了工艺评价,同步回转排水采气工艺技术将抽吸降压、注气增压相结合,提高气井携液能力。在 LX-X 井初次试验中排水及增产效果明显,试验阶段增产 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该技术对低压、低产水平井的积液难题提供了一种新的解决途径,为其在临兴中区后期的应用提供了技术支撑。

关键词 临兴中区;水平气井;排水采气工艺;同步回转泵;井筒积液;抽吸;干管补能

中图分类号: TE375 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.005

Application of synchronous rotary pressurized drainage and gas recovery technology of horizontal wells in Linxing central district

LI Qiang, YANG Yuguang

Jinxi Branch of China United Coalbed Methane Co., Ltd., Luliang, Shanxi 033000, China

Abstract: With the extension of development time in Linxing central district, the liquid carrying capacity of gas wells has deteriorated, and more and more horizontal wells have accumulated liquid or even flooded the wellbore, leading to production reduction or shutdown. Based on the wellbore structure and liquid discharge characteristics of horizontal wells, the applicability of conventional horizontal well drainage and gas production measures such as bubble drainage, gas lift, and velocity tube was compared and analyzed. Research on synchronous rotary boosting drainage and gas production technology for horizontal wells was carried out. Combined with a typical gas well in Linxing central district, production data under three combination process modes of suction, reinjection, and dry pipe energy supplementation were analyzed. The process evaluation was conducted from the process characteristics, production increase effect, and economy. The synchronous rotary drainage and gas production technology combines suction pressure reduction and gas injection boosting to improve the liquid carrying capacity of gas wells. In the initial experiment of the horizontal well in Linxing central district, the drainage and production increase effects were significant, The LX-X experimental stage increased production by $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. This process has the advantage of promoting drainage and gas production in low-pressure and low yield horizontal wells, providing technical support for its application in the later stage of Linxing central district.

Keywords: Linxing central district; horizontal wells; drainage and gas recovery technology; synchronous rotary pump; wellbore effusion; suction; dry pipe energy

临兴中区水平井从自喷生产期进入到生产后期,产能逐渐下降,携液能力逐渐变差,加之区域地形条件复杂等因素影响,管网汇压高,造成水平井井筒积液甚至水淹。国内开展水平井泡排、气举、

速度管等工艺措施已取得一定效果^[1-3],但受限于井身结构,斜井段及水平段积液难以排出。同步回转增压装置具备油管抽吸降压、套管注气增压、气液混输的特点,国内外很多致密气气田已经开



始不断引进该技术,很多学者进行了深入的研究,并取得了丰富的成果,刘岳龙等^[4]对同步回转泵结构、降压采气机理开展了充分研究;丁景晨^[5]对同步回转增压排水采气技术在水淹井、积液减产井中的应用效果开展了评价分析;翟中波等^[6]对同步回转压缩机排水采气工艺在丛式气井中的适应性进行了研究;张云等^[7]对同步回转压缩机在不同处理量下的实施效果进行了详细分析。但上述研究多局限于常规积液井,而针对水平井特殊的井身结构开展适用性分析、效果评价较少。同时,对抽吸、回注与干管补能的组合工艺也缺少深入分析。现结合临兴中区 1 口典型气井的现场试验,分析了抽吸、回注、干管补能三种组合工艺模式下的生产数据,从工艺特点、增产效果进行了工艺评价,为低压、低产水平井的排液提供一种新思路。

1 临兴气田水平井现状及存在问题

由于水平井井身结构、集输条件的复杂性,使得水平井排水采气方式多样化且又具有一定的针对性。

1.1 临兴气田水平井开发现状

截止 2021 年底,临兴中区投产水平井 28 口,平均油压 2.7 MPa,平均套压 3.1 MPa,单井平均日产气 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。水平井普遍产水,单井平均日产水 $5 \text{ m}^3/\text{d}$,水气比约 $3 \text{ m}^3/10^4 \text{ m}^3$ 。

水平井投产后稳产时间较短,油压普遍较低,目前油压低于 2 MPa 的水平井占比 54%,大部分水平井生产 1 年以后即开始受积液影响^[8],根据气液监测,当水平井油压与外输压力持平^[9],产气量低于 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,普遍存在产液量偏低或不产液现象,低压、低产井携液能力不足已成为限制水平井产能发挥的重要因素,并且该类气井逐年增多,给气田稳产带来巨大挑战。

1.2 地面集输工艺面临的问题

临兴中区地势起伏较大,高度差最大达 140 m,地势起伏导致管线易发生积液,增大井口回压,气井生产进入中后期后,当井口压力低于集输管网压力时,部分气井产气“无法入干”,不得不关井恢复压力,制约了气井产能发挥。

1.3 现有工艺存在问题

1.3.1 水平井泡沫排水采气工艺

水平井不仅存在直井段、斜井段,还存在水平

段。油管下入到斜井段或水平段深处,若积液较多,起泡剂难以流入到管鞋处,斜井段含气率低,气体搅动弱,起泡困难^[10],泡排只能带出井筒上部部分积液,另外水平井泡沫在井筒内时间长,泡沫破裂容易回落井底,水平井泡沫排水采气工艺对泡排剂的稳定性要求较高,泡排工艺对于井底积液不是特别严重的水平井效果较好,若积液严重,举升效果差。

1.3.2 水平井气举排水采气工艺

水平井中的气举排水采气工艺与直井相同,均使用垂直管流方法对油套的环空以及油管内压力损失进行计算^[11]。不同在于水平井积液存在于垂直段、斜井段和水平段。临兴气田的致密砂岩完井方式以裸眼封隔器滑套和悬挂器为主,悬挂器以下无法气举,水平段的大部分积液很难排出。如果气井产水量较大,气举后仍有再次水淹的风险,且随着地层能量的衰减,气举措施有效期不断缩短,反复气举,成本较高。

1.3.3 水平井速度管柱排水采气工艺

水平井速度管柱排水采气工艺为在原有井下的生产管柱不动的情况之下^[12],将连续油管从原生生产管柱下到产层中部,通过增加天然气流速,提高携液能力,达到带水生产的目的,可配套采用速度管柱与泡排复合排水采气技术,一般适用于气井的中后期地层压力较低的气井,但不适用于产水量较大的气井。另外速度管柱直径较小,流体的摩阻相应变大,地层能量的损耗相应增大,开采难度加大。同时对于出砂、产油地层,速度管柱存在易堵塞问题。

泡沫排水采气、气举排水采气、速度管排水采气都有一定效果,但如果水平井压力较低、产水量较大,无法解决水平段积液难题,工艺适用范围有一定的局限性。

2 同步回转增压工艺

同步回转增压排水采气工艺实质是连续气举的一种特殊形式,同时兼顾了降压开采稳产增产的优势,以“一进两出”智能调节功能,边抽吸边回注,有效稳定地层压力,使产气量高于临界携液流量,避免积液。

2.1 主体结构及工艺流程

同步回转装置核心设备为多相混输泵,由外壳、气缸、转子等主要部件构成,转子在泵壳内同步回转,与泵壳内壁形成多个密封工作腔,运转时工

作腔容器发生周期性增大和减小,实现了流体的吸入或排出(见图 1)。

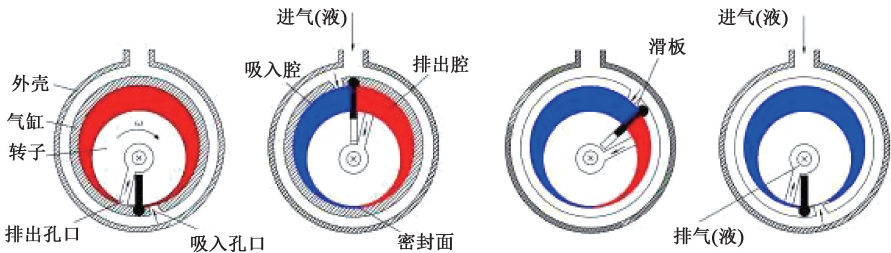


图 1 同步回转多相混输泵结构

Fig. 1 Structure of the synchronous rotary multiphase mixed transport pum

同步回转设备具有油管连续抽吸降压、增压外输至管网、套管连续注气增压气举的“一进两出”功能,可同时实现抽吸及气举两种工艺,具有干管气快速补能功能(见图 2),同步回转装置相关技术参数(见表 1)。

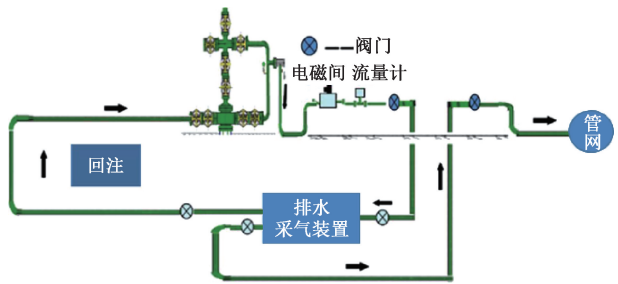


图 2 同步回转多相混输工艺流程图

Fig. 2 Synchronous rotary multiphase mixed transport process flow chart

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameters

主要技术参数	
吸入压力	0~3.5 MPa
排出压力	1.5~8.5 MPa
吸入温度	-15℃~45℃
排出温度	≤70℃
压缩机排量	≤33 480 m ³ /d
电机功率	2×75 kW
主机转速	100~200 r/min
装置尺寸	6 m×2.4 m×4.9 m
理论重量	约 23 t

2.2 排液理论

同步回转装置通过实施“抽吸+气举”工艺,从油管中吸天然气,注入油管与套管的环形空间,降低油压的同时,增大套压,回注的高压气体将环空内液体不断驱使进入油管,迅速降低油管内液柱密度,气体上升过程中随着压力的降低,气泡膨胀变大,利用气体膨胀能将液体以一段气一段液的段塞流形式举升至地面,有效卸载井底积液^[13]。

气井内积液基本排空后,生产压差增大,气井产量提升,持续抽吸可使气井产量始终达到临界携

液流量,气井理论上不再积液,达到连续稳产的效果(见图 3)。

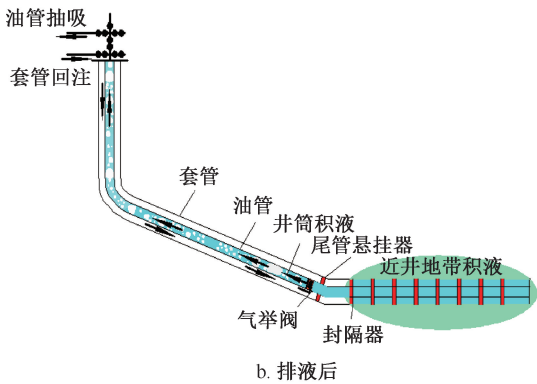
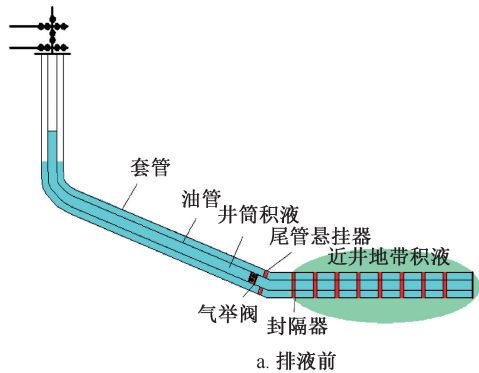


图 3 “抽吸+气举”示意图

Fig. 3 Schematic diagram of “suction + air lift”

2.3 同步回转排水采气工艺特点与优势

(1)采用“多相混输泵”替代压缩机,采气装置具有无气阀等易损件,能实现任意气液比混输抽吸,连续吸气和排气^[14]。

(2)同步回转装置主要由多相混输泵(主机)、防爆电机、进气缓冲系统、中间缓冲罐、排气缓冲罐、冷凝器、阀门管线及橇座等组成,装置具有单机组模块化设计的优点,各设备及配件成组套安装、拆卸,在转运时能够节省拆装时间,时间成本低^[15-18]。

(3)自动化程度高,可实现后台监控。设备自带信号发射装置,通过无线局域网信号及 4G 信号

传输数据,智能排采控制系统与同步回转排水采气装置对接,通过油管压力、套管压力、油套压力差的监测,智能判断是否启动排采装置进行抽吸;通过仪器探测及气液两相流状态、油管/套管压力差综合判断积液高度,智能切换流程选择回注或抽吸/回注操作,延长生产周期。

3 工艺技术实施及效果评价

区别于直、定向井,单一排液方式下水平井的斜井段和水平段排液较为困难^[19],选取临兴中区水平井 LX-X,分抽吸、回注+抽吸、干管补能+抽吸 3 个阶段开展试验,LX-X 试验阶段增产 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,增产效果明显。

3.1 试验井基本情况

LX-X 压后无阻流量约 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,2020 年 10 月 1 日投产,投产初期气产量约 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,日产水 $28\text{ m}^3/\text{d}$,稳产 9 个月后油压由 8 MPa 逐步降低至 3 MPa,套压由 0 MPa 逐步升高至 5 MPa,产量逐步递减至 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。试验前,LX-X 井已因水淹停产,截止 2021 年 12 月 8 日,生产时间 433 d,该井随着开发时间延长,地层压力降低,气井携液能力变差且外输压力高的影响,产量下降。

该井自 2020 年 10 月投产以来,共发生过水淹四次,在 2020 年 12 月至 2021 年 10 月份采取氮气

气举、井口放喷、泡排等措施。介入措施后效果明显,但随着生产时间的推移,地层压力不断下降,措施有效期逐渐缩短,分别维持了 154 d、84 d、49 d、18 d,且目前油压与管网汇压基本持平,一旦调产或关井,易再次水淹。

3.2 试验效果

3.2.1 抽吸试验

抽吸是整个循环周期的开始,2021 年 12 月 18 日,开井试运行,开井油/套压:3.4 MPa/4.5 MPa,因井口油、套压稳定在 3 MPa 以上,地层能量较充足,暂未开启回注流程阀门。试验初期,同步回转一号罐观察窗显示试生产期间均出现产液。由于排出液量波动较大,造成了产气量、压力大幅波动,排液后趋于稳定生产,该阶段平均产气量 $26\,578\text{ m}^3/\text{d}$,生产 5 d 后,瞬时产水增加,导致油套压降低,产气量降低。

抽吸起到降压采气的作用,随着生产压差增大,气体携液能力变强,井筒积液排出后,近井地带储存气得到释放,气井能恢复自喷能力,抽吸作用取得了明显的效果。分析后期效果下降的原因是:对于致密气低渗气藏,渗流能力有限,长时间的抽吸,导致地层能量供给不足,近井地带液体流速较慢,井底及近井地带积液仍然存在(见图 4)。

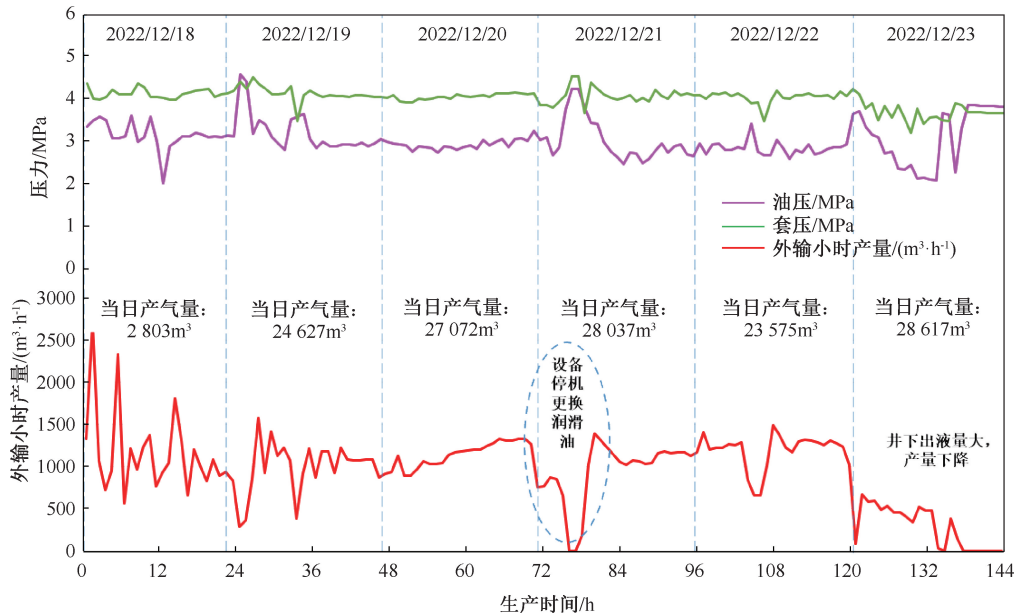


图 4 抽吸生产曲线
Fig. 4 Suction production curve

3.2.2 回注+抽吸试验

2022 年 1 月 3 日,开井油/套压:5.1 MPa/5.2 MPa,开井生产初期,油压较套压下降较快,油套压

差增大,说明油套环空内积液未排出。2022 年 1 月 4 日切换至回注+抽吸流程,试验初期,产液量明显增大,该阶段产气量维持在 $19\,546\text{ m}^3/\text{d}$,随着回注

时间的延长,回注压力及油套压均下降,返出液量降低(见表 2)。

表 2 回注试验过程统计表
Table 2 Statistical table of the backinjection test process

时间	油压/MPa	套压/MPa	进气压力/MPa	外输压力/MPa	回注压力/MPa	外输产量/m ³ ·h ⁻¹
9:00	3.54	4.38	3.17	2.49	4.45	2 156
10:00	3.17	4.46	2.90	2.40	4.56	2 023
11:00	2.93	4.28	2.72	2.40	4.36	2 009
12:00	3.10	4.23	3.03	2.28	4.26	1 231
13:00	2.89	4.14	2.83	2.26	4.22	1 136
14:00	2.87	4.13	2.81	2.25	4.17	891
15:00	2.83	4.12	2.70	2.27	4.19	1 034
16:00	2.69	4.16	2.58	2.24	4.23	1 136
17:00	2.59	4.21	2.52	2.24	4.25	1 167
18:00	2.63	4.13	2.56	2.25	4.22	1 003
19:00	2.51	4.01	2.45	2.24	4.10	812
20:00	2.40	3.97	2.35	2.26	4.06	634
21:00	2.42	3.81	2.41	2.29	3.90	615
22:00	2.41	3.83	2.38	2.31	3.91	520
23:00	2.47	3.61	2.41	2.29	3.67	486
0:00	2.40	3.64	2.38	2.27	3.72	400
1:00	2.32	3.58	2.30	2.21	3.64	402
2:00	2.31	3.47	2.27	2.19	3.61	354
3:00	2.25	3.37	2.24	2.15	3.44	348
4:00	2.22	3.44	2.21	2.13	3.56	285
5:00	2.23	3.25	2.21	2.15	3.35	296
6:00	2.20	3.28	2.17	2.11	3.35	250
7:00	2.18	3.21	2.17	2.12	3.29	252
8:00	2.21	3.19	2.18	2.15	3.32	106

分析回注压力及油套压下降原因:该井悬挂器上部的油管开孔段是油套连通的通道,回注的高压气体将环空内液体不断驱使进入油管,迅速降低油管内液柱密度,直至液位降至油管开孔段处,该井油管开孔眼深度(垂深)1 001 m,储层中深(垂深)1 375 m,可判断出液面位于油管开孔段下方,液柱高度最高为 374 m,回注+抽吸对油管开孔段上部井筒积液排液效果显著,但油管开孔段下方的斜井段及水平段积液作用有限。

3.2.3 干管补能+抽吸试验

根据前两个阶段的试验效果分析,抽吸、回注+抽吸对油管开孔段以上井筒积液起到了良好排液效果,但油管开孔段以下仍有较长的斜井段、水平段,井筒底部及近井地带大部分积液未完全排出,2022 年 1 月 5 日-1 月 6 日,进入干管补能阶段。将同步回转设备导通生产外输流程,从采气干管内抽取气,经过增压,注入套管,经油管开孔段补充井底能量,干管补能共实施 3 个周期,该阶段产气量维持在 3×10⁴ m³/d 以上(不含补能气量)。

采取干管补能,回注气与井底气快速结合,近井地带能量快速补充,在开井的瞬间,积蓄的能量得到释放,瞬时气量达到峰值,远高于气井的临界携液流量,近井地带流动性改善,在抽吸的辅助下,

该阶段产气量明显高于前两个阶段,说明水平段大部分积液及近井地带积液被逐步带出,地层远端供气速度提高(见图 5)。

3.3 试验结果分析

3.3.1 排液效果分析

同步回转技术对水淹井 LX-X 实现了油管抽吸降压,套管注气增压,一级增压进管网的工艺流程,抽吸、回注、干管补能三种模式,均取得了一定排液效果,通过产气、产液情况判断出,受限于管柱结构,回注气举针对油管开孔段以上的井筒积液有效,因此,油套循环的通道尽量接近储层中深位置。干管补能,通过向井底补充能量,压力恢复速度快,开井瞬间可将大部分井底积液带出,适用于启动排液阶段,随着近井地带的液体密度降低,流动性改善,抽吸可保持产量高于气井的临界携液流量,适用于后期的稳产阶段。

3.3.2 工艺措施对比分析

LX-X 井产水高、地层压力低。为排出井筒积液,以往采用氮气气举和泡排等工艺。同步回转工艺灵活,抽吸、回注、干管补能三种模式可以随意切换,适用于多种工况条件。与传统工艺相比表现出了较强的优势:抽吸通过降低气体临界携液流量,可以代替泡排、速度管柱等排水采气工艺。自产气

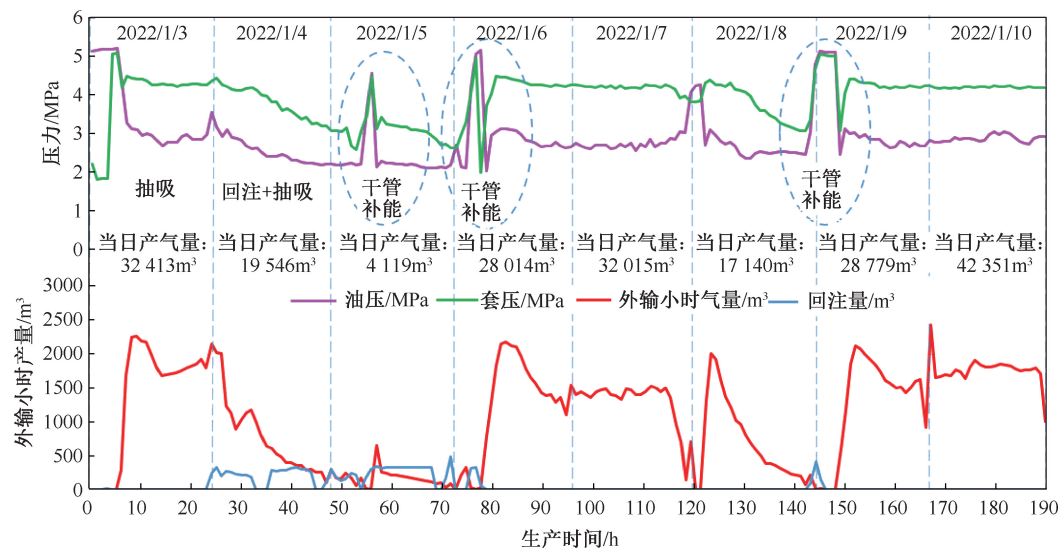


图 5 干管补能+抽吸生产曲线

Fig. 5 Dry pipe energy replenishment + suction production curve

经压缩机实施回注,可实现间歇、连续气举,提高天然气流速与携液能力,该方式无需额外气源且简化了常规气举流程。干管补能可代替关井恢复压力,快速向井底补充能量,缩短关井时间。

4 结论

(1)同步回转排水采气工艺技术,实现了油管抽吸降压,套管注气增压,增压入管网的工艺流程,在临兴气田水平井初次试验中排水及增产效果明显,LX-X 试验阶段增产 $3\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,对低压、低产水平井的积液难题提供了一种新的解决途径。

(2)针对 LX-X 的井况特征,采用了抽吸,回注+抽吸,干管补能+抽吸三项工艺措施,通过产气、产液情况分析,该工艺需要对地层能量、积液程度综合分析,组合应用,才能实现增产稳产的效果。

(3)根据试验结果,回注气举对油管开孔段以上的积液起到了明显的排液效果,为保证回注气举工艺最大限度的发挥,同步回转排水采气措施选井时,气井油套循环的通道应尽量接近储层中深位置。

致谢:感谢中联煤层气有限责任公司晋西分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 李晓辉,王喆,陈修龙. 苏 48 井区排水采气工艺探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(9): 282-283.

LI Xiaohui, WANG Zhe, CHEN Xiulong. Discussion on drainage and gas recovery technology in well area of Su 48

[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 33(9): 282-283.

[2] 王利花. 浅论水平井排水采气工艺优化应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(19): 166-167.

WANG Lihua. A brief discussion on the optimization and application of horizontal well drainage gas recovery technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(19): 166-167.

[3] 潘登殿,王俊奇. 水平井排水采气工艺优化研究与应用探讨[J]. 石化技术, 2016, 23(9): 113.

PAN Dengdian, WANG Junqi. Optimization for drainage gas recovery in horizontal well [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(9): 113.

[4] 刘岳龙,刘玉祥,隋冬梅,等. 同步回转泵降压排水采气工艺应用及改进[J]. 石油机械, 2017, 45(6): 67-71.

LIU Yuelong, LIU Yuxiang, SUI Dongmei, et al. Application and improvement of synchronous rotary pump depressurized drainage gas recovery process [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(6): 67-71.

[5] 丁景辰. 致密气藏同步回转增压排水采气工艺[J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 145-149.

DING Jingchen. Synchronal-rotary drainage gas recovery technology for tight gas reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 145-149.

[6] 翟中波,王睿峰,田明山,等. 同步回转压缩机排水采气工艺在丛式气井中的适应性分析[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 37-42.

ZHAI Zhongbo, WANG Ruifeng, TIAN Mingshan, et al. Adaptability of drainage gas recovery process with synchronous rotary compressor in cluste[J]. Well Testing, 2024, 33(1): 37-42.

[7] 张云,王志刚,朱礼明,等. 同步回转排水采气技术改进及试验分析[J]. 石油化工应用, 2019, 38(11): 70-74.

ZHANG Yun, WANG Zhigang, ZHU Liming, et al.



- Improvement and experiment analysis on the synchronous rotary drainage and gas recovery technology [J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38 (11): 70-74.
- [8] 丁万贵,刘金海,刘世界,等. 临兴先导试验区泡沫排水采气实践及认识[J]. 非常规油气,2020,7(2):68-74.
DING Wangui, LIU Jinhai, LIU Shijie, et al. Practice and understanding of foam drainage gas recovery technology in pilot area of Linxing [J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(2): 68-74.
- [9] 匡建超,王玉兰,何春蕾,等. 中坝须二气藏工艺排水规模的论证[J]. 矿物岩石,2002,23(3):72-75.
KUANG Jianchao, WANG Yulan, HE Chunlei, et al. The demenstration of water displacement scale in Zhongba T₃x² gasfield[J]. Mineralogy and Petrology, 2002, 23(3): 72-75.
- [10] 刘通,郭新江,王世泽,等. 水平井泡沫排液采气井筒流型实验研究[J]. 钻采工艺,2017,40(1):69-73.
LIU Tong, GUO Xingjiang, WANG Shize, et al. Experimental study on the flow pattern of the wellbore of foam drainage gas production in horizontal wells [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 69-73.
- [11] 程旭明,顿昊龙. 气举排水采气技术在苏里格南区块水淹井的应用及效果评价[J]. 石油工业技术监督,2021,37(2):7-11.
CHENG Xuming, DUN Haolong. Application of gas lift drainage gas recovery technology in water flooded wells in south Sulige block and evaluation of application effect[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(2): 7-11.
- [12] 苗亮. CT 速度管柱排水采气系统设计与技术研究[D]. 西安:西安石油大学,2016:15-18.
MIAO Liang. Design and study on drainage gas recovery through CT velocity string[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016:15-18
- [13] 张春,任振华,张金波,等. 苏里格气田同步回转增压工艺技术应用研究[J]. 石油机械,2017,45(2):88-92.
ZHANG Chun, REN Zhenhua, ZHANG Jinbo, et al. Research on the application of synchronous rotary boosting process technology in Sulige gas field[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 88-92.
- [14] 廖锐全,曾庆恒,杨玲. 采气工程:第2版[M]. 北京:石油工业出版社,2012:45-69.
- [15] 屈宗长. 同步回转式压缩机的几何理论[J]. 西安交通大学学报,2003,37(7):731-733.
- QU Zongchang. Geometric theory of synchronous rotary compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(7): 731-733.
- [16] 杨旭,屈宗长,吴裕远. 同步回转式混输泵的工作原理与动力特性研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(5):60-65.
YANG Xu, QU Zongchang, WU Yuyuan. Research on working principle and dynamic characteristics of synchronous rotary mixed pump[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 60-65.
- [17] 王维,刘翔周,牛国萍,等. 同步回转压缩机排水采气技术适应性研究及应用效果分析[C]//宁夏回族自治区科学技术协会. 第十四届宁夏青年科学家论坛石化专题论坛论文集. 宁夏石油化工应用杂志社,2018:450-455.
WANG Wei, LIU Xiangzhou, NIU Guoping, et al. Research on adaptability and application effect analysis of synchronous rotary compressor drainage and gas recovery technology [C]//Ningxia Hui Autonomous Region Science and Technology Association. Proceedings of the 14th Ningxia Young Scientists Forum on Petrochemical Topics. Ningxia Petrochemical Application Journal, 2018: 450-455.
- [18] 刘鹏超,贺宇晖,王志刚. 两级同步回转压缩机排水采气技术应用研究[J]. 石油工程建设,2019,45(1):50-55.
LIU Pengchao, HE Yuhui, WANG Zhigang. Drainage and gas recovery technology of two-stage synchronous rotary compressor [J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(1): 50-55.
- [19] 白晓弘,王晓荣,赵彬彬,等. 长庆气田水平井排水采气技术研究[J]. 焊管,2019,42(5):45-50.
BAI Xiaohong, WANG Xiaorong, ZHAO Binbin, et al. Research on drainage and gas recovery technology of horizontal wells in Changqing gas field[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(5): 45-50.

编辑 方志慧

第一作者简介:李强,男,1993年出生,工程师,硕士,2020年毕业于中国矿业大学(北京)采矿工程专业,主要从事天然气开发生产工作。电话:18810401767, Email: 823958127@qq.com。通信地址:山西省吕梁市临县中联公司,邮政编码:033000。