◀油气田开发工程▶

高含硫气井速度管柱作业工艺实施与改进*

张福杰 黄生松 王德有 于铁峰 侯明明 刘涛涛
（中国石油长城钻探工程公司）

张福杰，黄生松，王德有，等. 高含硫气井速度管柱作业工艺实施与改进[J]. 石油机械，2026，54（9）：102-110.

Zhang Fujie，Huang Shengsong，Wang Deyou，et al. Implementation and improvement of velocity string technology for high-sulfur gas wells [J]. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：102-110.

摘要：中亚某气田处于生产中后期，部分生产井出现气层产水、井筒积液等问题。该气田储层高含硫化氢（体积分数4.5%）、高含二氧化碳（体积分数6%）、高氯离子（质量浓度52 000 mg/L），且井口关井压力高（24 MPa），速度管柱工艺面临管柱腐蚀、硫化氢泄漏、井口改造施工难度大及施工井控风险高等难题。为此，开展了室内腐蚀与应力腐蚀试验以优选速度管柱材质；基于摩阻压降计算与系统节点分析确定速度管柱尺寸，并结合携液能力模拟确定下入深度；改进了悬挂器卡瓦锁紧结构和防上顶法兰密封套结构，优选了铰链式环切工具，设计了自平衡式堵塞器；制定了全程无动火的井口改造方案，并采用井口分流泄压方法降低井口压力。研究结果表明：优选的TS-80CRT（2205）双相不锈钢连续管腐蚀速率由2.191 mm/a降至0.022 mm/a，720 h应力腐蚀试验未发现裂纹；确定速度管柱尺寸为ø44.45 mm、下入深度为3 150 m；改进后的卡瓦消除了轴向错位，胶筒受力均匀、密封可靠，密封套安装时间由5.5 h缩短至1.5 h，28 HRC高硬度速度管柱井口切割用时5 min，堵塞器地面开启压力由33 MPa以上降至13 MPa；井口改造实现全程无动火作业，井控安全得到保障；3口井作业一次性成功率100%，投产后增产稳产效果明显。该工艺可为同类井速度管柱作业提供借鉴。

关键词：速度管柱；排水采气；高含硫；管柱腐蚀；井口改造；悬挂器
中图分类号：TE37 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202505010

Implementation and Improvement of Velocity String Technology for High-Sulfur Gas Wells

Zhang Fujie Huang Shengsong Wang Deyou Yu Tiefeng Hou Mingming Liu Taotao
（*CNPC Greatwall Drilling Company*）

Abstract: In a gas field in Central Asia, which is in the mid-late stage of production, some active wells have demonstrated complexities such as water production from gas layers and liquid accumulation in wellbore. High H2S content (4.5 vol.%), high CO_2 content (6 vol.%) and high Cl- mass concentration (52,000 mg/L) of reservoirs, as well as high wellhead shut-in pressure (24 MPa), bring significant challenges to the velocity string technology, such as string corrosion, H_2S leakage, difficulty in wellhead modification, and high well control risks. To address these challenges, laboratory corrosion and stress corrosion tests were conducted to select the optimal material of velocity string. The velocity string size was defined by friction pressure drop calculations and system nodal analysis, and the landing depth was determined through liquid-carrying capacity simulation. The slip locking mecha-

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司青年科技专项“高含硫强边底水碳酸盐岩气藏控排水采气关键技术研究”（2024DQ03059）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

nism of the hanger and the sealing sleeve structure of the hold-down flange were improved, a hinged ring-cutting tool was selected, and a self-balancing plug was designed. A wellhead modification scheme involving no hot work throughout the entire process was developed, and a wellhead pressure diversion method was adopted to reduce the wellhead pressure. The results show that the TS-80CRT (2205) duplex stainless steel coiled tubing (CT) selected for the velocity string indicates a corrosion rate reducing from 2.191 mm/a to 0.022 mm/a, and with no crack observed at 720 h during stress corrosion test. The velocity string size and landing depth are determined to be ø 44.45 mm and 3,150 m, respectively. Through improvements, the slip avoids axial misalignment, and the rubber packer achieves uniform force distribution and reliable sealing; moreover, the sealing sleeve installation time reduces from 5.5 hours to 1.5 hours, the wellhead cutting of the 28 HRC high-hardness velocity string is completed in 5 minutes, and the plug opening pressure at the surface drops from above 33 MPa to 13 MPa. The wellhead modification is accomplished without any hot work, ensuring well control safety. Application in three wells achieved a 100% success rate in one-time operation, with significant efficacy in subsequent production increase and stabilization. This technology provides a reference for velocity string operations in similar wells.

Keywords: velocity string; drainage gas recovery; high-sulfur; tubing corrosion; wellhead modification; hanger

0　引　言

中亚某天然气田经长期开发，气田储层压力衰减严重，部分井储层压力系数降至0.9左右，边底水逐步上升，导致产层出水增加，日产水量由低于5 m^3快速增加至30 m^3以上。分析认为：气田生产管柱为ø88.9和ø114.3 mm油管，携液能力不足，井筒积液增多，导致气产量和井口压力不断降低。为实现该类井的控水稳产，延长自主持续生产周期，2024年在中国石油海外项目开展速度管柱排水采气工艺技术研究及应用，同时为后续的“速度管柱+泡排/气举”排水采气工艺建立循环通道[1-4]。因储层高含硫、高含二氧化碳、高氯离子、关井压力较高及井口完整性需要，速度管柱工艺面临管柱腐蚀甚至断裂、硫化氢泄漏、井口改造施工难度大及施工井控风险高等难题。目前国内速度管柱作业主要针对低压气井[5-10]，在高含硫和高含二氧化碳工况下应用较少，可借鉴的经验有限。为此，笔者主要探讨在高含硫、高含二氧化碳、高氯离子及高井口关井压力工况下速度管柱工艺技术的应用，并对作业中遇到的速度管柱井口切割耗时、悬挂器密封套安装困难及堵塞器地面操作压力高等问题给出改进方案。该工艺已在3口井成功应用，取得了明显的增产稳产效果，可为同类井速度管柱作业提供借鉴。

1　工艺实施难点

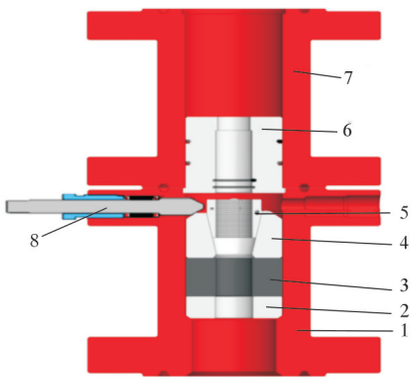
相比于国内常规的速度管柱作业，在高含硫、高含二氧化碳、高氯离子及较高井口关井压力气井中的速度管柱工艺施工难度更大，井况更复杂，面临的挑战更多，工艺实施的主要难点如下。

（1）作业井控风险高。不同于国内的低压气井，速度管柱施工井地层压力超过28 MPa，井口关井压力超过24 MPa，在井口拆装、速度管柱下入和悬挂作业期间会面临更高的压力泄漏风险，对井控和作业安全提出了更高要求。

（2）高酸性腐蚀环境[11-13]。该气田高含硫化氢和二氧化碳，硫化氢体积分数达4.5%，二氧化碳体积分数达6%，氯离子质量浓度达52 000 mg/L，对速度管柱材料提出了更高的耐腐蚀性能要求，井下工具和井口改造设备也须满足上述腐蚀环境的使用要求。

（3）井口改造难度大。不同于国内简单的速度管柱井口改造，出于井口功能完整性、后续增产措施可操作性及井控安全的考虑，井口改造不但要保留现有井口生产设施，而且要具备后续气举、泡排措施通道，且全程不得进行焊接、切割等动火作业，因此需要设计全新的井口改造方案。

（4）悬挂器密封不严[14-15]。该气田是在完井管柱中下入速度管柱，选择卡瓦式悬挂器作为速度管柱的悬挂方式，结构如图1所示。悬挂器坐挂后依靠自身管柱重力来挤压胶筒，实现密封速度管柱，配套的防上顶法兰可消除连续管因井口压力或激动压力过大上顶造成的影响。卡瓦式悬挂器原设计卡瓦为4瓣式，用卡箍固定，由于卡瓦上卡槽间隙过大，坐挂时存在4瓣卡瓦轴向位移问题，导致各卡瓦瓣对下部密封胶筒挤压力不一致，胶筒受力不均、膨胀不充分，造成胶筒密封不严。



1—本体；2—下密封管；3—密封胶筒；4—上卡瓦座；5—卡瓦；6—密封套；7—防上顶法兰；8—顶丝。

图 1　卡瓦式悬挂器结构

Fig. 1　Structure of the slip-type hanger

（5）速度管柱切割困难。速度管柱坐挂后需在操作窗内进行切割，而操作窗均匀内分布着 3 根支撑柱（互成 120°），操作空间狭小，常规切割方式是通过锯条手工切割，因锯条的钢级低，切割高强度的速度管柱效率极低，增加了井控风险。

（6）防上顶法兰密封套安装。使用的耐蚀合金连续管强度高，硬度大，连续管在井口坐挂割断后，会保持原来的弯曲状态，如图 2 所示。由于密封套内径与连续管外径间隙小且处于垂直安装状态，防上顶法兰内的密封套安装困难，导致井口安装作业时间延长，增加井控风险，同时也易损伤密封件，造成连续管与小环空连通风险。



图 2　井口连续管弯曲状态

Fig. 2　Bending state of coiled tubing at wellhead

（7）堵塞器操作压力高[16-17]。常规的可回收式堵塞器结构如图 3 所示。地面剪切操作压力取决于内外压差和销钉剪切值，一般采用制氮泵车泵注氮气进行剪切，不仅避免泵注液体造成返排困难，而且注入的氮气有利于后续排液生产[18-23]。对于低压井，内外压差小，地面操作压力不高；但对于高压气井，井底压力高，造成地面操作压力高，普通制氮车难以满足作业需求。

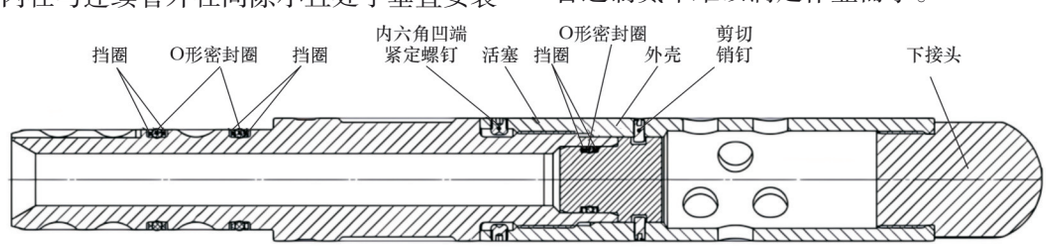


图 3　可回收式堵塞器结构

Fig. 3　Structure of a retrievable plug

2　工艺优化与改进

针对上述施工难点，为保障速度管柱作业高效、安全实施，制定工艺优化和改进措施，具体如下。

2.1　井控安全措施

针对作业期间井口压力大，井控风险高的问题，进行了工艺优化。对于预测的最高关井压力，选用额定压力 70 MPa 的井控设备，并在作业前对防喷盒和防喷器开展功能试验和压力试验；在地面对悬挂器和操作窗进行压力试验。速度管柱下入前通过采气树的放喷管线开井分流泄压，降低井口压力。

2.2　速度管柱材质优选

作业气田高含硫化氢、高含二氧化碳、高氯离子，为保障速度管柱能够长期可靠地在井筒内服役，对耐腐蚀性能提出了更高要求。目前含硫化氢酸性环境的速度管柱一般选择 80 钢级及以下，常用可选材质有 3 种，其型号和化学成分如表 1 所示。其中 TS-80 为常规低碳合金钢，TS-80CRT（2001）为双相不锈钢，添加了铬、镍和锰等耐腐蚀元素；TS-80CRT（2205）同为双相不锈钢，添加了铬、镍、锰和钼，且抗腐蚀元素含量更高。

对 3 种材质试样开展模拟工况腐蚀试验，试验溶液如下：钠离子+钾离子（质量浓度 20 072 mg/L），钙离子（质量浓度 719 mg/L），镁离子（质量浓度 36 mg/L），硫酸根离子（质量浓度 215 mg/L），碳酸氢根离子（质量浓度 6 247 mg/L），氯离子（质量浓度 28 541 mg/L）。pH 为 7.2，硫化氢分压 6 MPa；二氧化碳分压 4 MPa，总压 25 MPa。试验

结果如表2所示。TS-80试样腐蚀速率较大，不满足腐蚀环境使用要求。TS-80CRT（2001）试样具有良好的耐腐蚀性能，适用于含硫化氢与二氧化碳工况环境，在氯离子含量不高的环境下具有良好的抗点蚀能力，但在氯离子含量较高的环境下，因材质中镍含量不高，耐腐蚀保护膜易被破坏，容易发生点蚀。TS-80CRT（2205）不锈钢具有更好的耐腐蚀性能，在氯离子含量较高的环境中，仍然具有稳定的耐腐蚀能力，因此推荐在该气田选用TS-80CRT（2205）双相不锈钢连续管作为速度管柱。

为验证TS-80CRT（2205）双相不锈钢在高含硫化氢、高含二氧化碳及高氯离子质量浓度环境中的抗应力腐蚀性能，进行了模拟工况应力腐蚀试验。在腐蚀试验的基础上给样品两端施加应力，观察其开裂情况，试样在720 h内未发现裂纹（见表3）。

表1　不同材质连续管化学成分对比

Table 1　Chemical composition of CTs of different materials

牌号	化学成分(质量分数)/%							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
TS-80	≤0.16	≤1.2	≤0.020	≤0.005	≤0.5	—	—	—
TS-80 CRT(2001)	≤0.03	4.00~6.00	≤0.030	≤0.003	≤1.0	19.5~21.5	1.00~3.00	—
TS-80 CRT(2205)	≤0.03	≤2.0	≤0.030	≤0.003	≤1.0	22.0~23.0	4.50~6.50	≤3.0

表2　不同材质连续管腐蚀试验结果

Table 2　Results of corrosion test on CTs of different materials

牌号	测试温度/℃	测试时间/h	试样面积/cm^2	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	试验前质量/g	试验后质量/g	腐蚀速率/($mm\cdot a^{-1}$)	点蚀评价
TS-80	90	168	12.121 0	7.98	7.184 3	6.777 8	2.191	点蚀严重
TS-80CRT(2001)	90	168	12.154 7	7.98	7.167 2	7.155 4	0.063	轻度点蚀
TS-80CRT(2205)	90	168	12.216 1	7.98	7.156 9	7.152 8	0.022	无点蚀

表3　TS-80CRT(2205)模拟工况应力腐蚀试验结果

Table 3　Results of stress corrosion test on TS-80CRT(2205) under simulated conditions

试验条件									试验结果
Ca^{2+}质量浓度/($mg\cdot L^{-1}$)	Mg^{2+}质量浓度/($mg\cdot L^{-1}$)	Na^++K^+、SO_4^{2-}质量浓度	Cl^-质量浓度/($mg\cdot L^{-1}$)	H_2S分压/MPa	CO_2分压/MPa	试验温度/℃	pH	加载应力/MPa	
719	36	无强制性要求，保证阴阳离子平衡即可	100 000	3	3	200	3.5（乙酸调整）	496	720 h未断裂，未发现裂纹

2.3　井口改造方案

为保证井口设施完整、后续增产措施可实施及改造作业安全，采用全新的井口改造方案，如图4所示。具体改造步骤如下。

（1）将原四通更换成五通，在新通道上增加1个闸板阀、法兰薄板和盲板。

（2）在新的7#阀门与采气树新五通之间由下向上依次安装卡瓦式悬挂器、防上顶法兰总成、新闸板阀和原四通。

（3）在原四通两侧分别安装1个平板阀和带盲板的三通，在生产侧的平板阀和带盲板的三通之间增加1个法兰薄板。

（4）将10#、11#阀门拆掉，更换成标准规格三通，再将原10#、11#阀门安装在新增的标准规格三通上部。

（5）在更换位置后的10#、11#阀门和带盲板的定制三通之间各增加1个法兰短节。

井口改造各部件均采用法兰连接，现场无需进行焊接或切割等动火作业，同时为油管环空和速度管柱内的压力监测预留了通道；在保留原井口结构的同时，为速度管柱构建新的放喷和生产通道；垂直方向上新增闸板阀，为新采气树增加了一道安全屏障。

2.4　悬挂器密封

为消除卡瓦轴向错位问题，对卡瓦紧固机构进行了重新设计，在每瓣卡瓦边缘设计1个直径3 mm的圆形锁销，其略微小于卡槽宽度，确保锁紧相连的每一片卡瓦，使卡瓦座和胶筒整体受力均匀，有效避免了错位，如图5所示。

2.5　密封套改造

密封套安装困难的主因是高硬度的速度管柱井口切割后存在弯曲状态，加之密封套上部非密封段与速度管柱的间隙较小。如增大密封套非密封段的内径，既可增强通过性，又不影响密封能

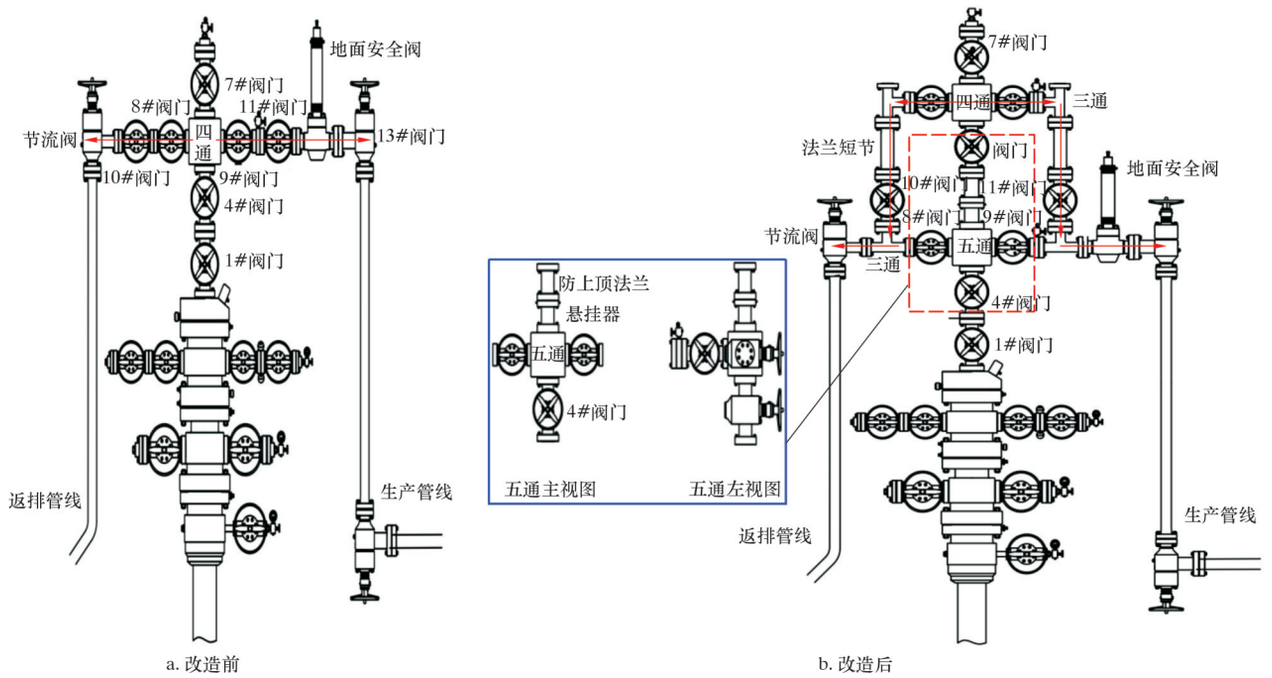


图 4　井口改造示意图

Fig. 4　Illustration of wellhead modification

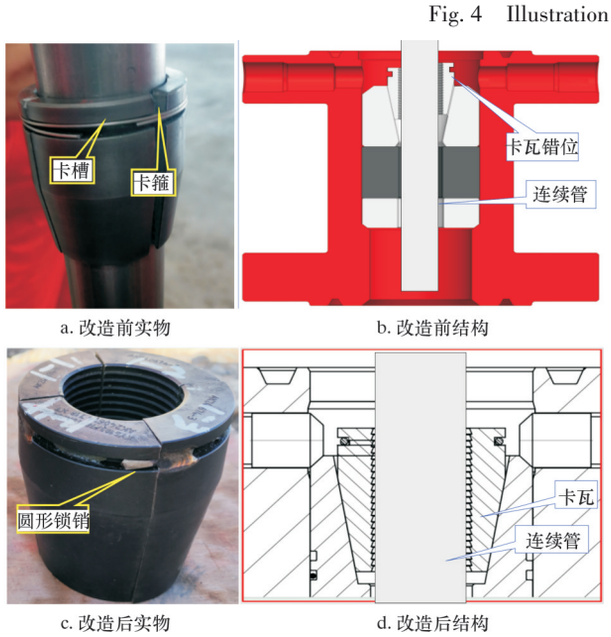


图 5　卡瓦改造示意图

Fig. 5　Illustration of slip transformation

力。为此对密封套进行了改造，改造前后如图 6a 所示。保留底部密封段与上部防上顶段内径不变，对中部非密封段扩径 3 mm（由 45 mm 改为 48 mm）；下部保留 5 mm 不扩径，保障下部密封件的密封性能。经过现场试验密封套可顺利安装，安装时间由改进前 5.5 h 缩短至 1.5 h，试压 35 MPa 无泄漏。

2.6　速度管柱切割

常规锯条方式手工切割普通连续管耗时达 1.5 h 以上。而优选的速度管柱材质硬度超过

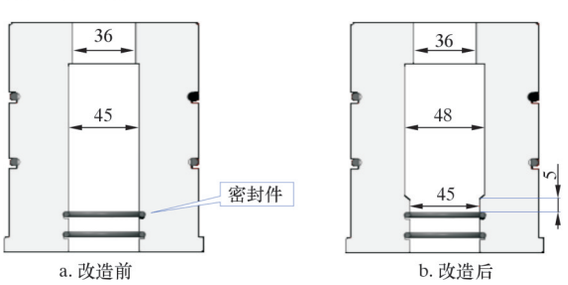


图 6　ø44.45 mm(1.75 in)连续管密封套改造

Fig. 6　Transformation of ø44.45 mm (1.75 in) CT sealing sleeve

28 HRC，锯条无法切割。为此，借鉴其他工程圆管切割的经验，优选铰链式手动环切工具，如图 7 所示。其拥有 4 片硬质合金钢刀片，只需旋转 90° 即可实现环切 1 圈，有效规避了操作窗支撑柱导致的无法环切的问题。经现场测试，5 min 即完成切割，且切口平整无毛刺，有效降低了井口风险，缩短了施工时间。

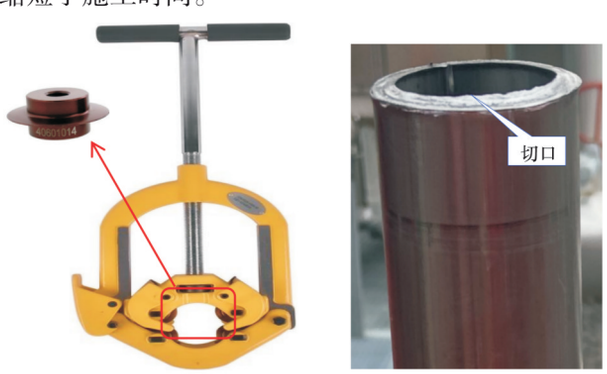
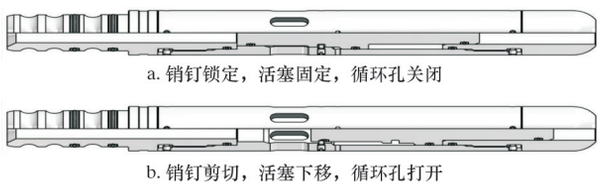


图 7　铰链式切割工具结构及切口形貌

Fig. 7　Structure and operation drawing of hinged cutting tool

2.7　堵塞器操作压力

针对常规可回收式堵塞器地面操作压力高（33 MPa以上）的问题，设计自平衡式堵塞器（见图8）。其活塞上下受力面积差较小，因此受井底压力影响很小，其剪切压力主要取决于堵塞器的销钉剪切值，可有效降低堵塞器开启时的地面操作压力，特别适合井底压力高的速度管柱作业。现场实践表明，堵塞器地面操作压力可降至13 MPa。



a. 销钉锁定，活塞固定，循环孔关闭

b. 销钉剪切，活塞下移，循环孔打开

图8　自平衡式堵塞器

Fig. 8　Self-balancing plug

3　实例应用

3.1　井况介绍

X-21井是海外某天然气田的一口直井，2009年8月4日完钻，完钻井深3 422 m，最大井斜6.12°，井身结构如图9所示。该井为射孔+完井一体化管柱，完井管柱如图10所示。完井管柱下深3 269.31 m，生产油管外径88.9 mm，内径76.0 mm，生产管柱最小通径在3 223.6 m处，即减震器位置，内径48.0 mm，点火头及以下射孔枪串不能通过。2023年10月探得液面深度3 200 m，地层压力系数由生产初期的1.85降为0.92，日产气4.50×10^4 m³，日产水37.7 m³，日产油0.3 m³，井口关井压力24 MPa。

按照第三方的地质设计结论，预测该井于2024年6月产气量将低于临界携液流量，会出现明显的井筒积液问题。如不提前采取排水采气工艺措施，预测将在2024年9月份出现停喷和水淹。为降低临界携液流量，提高井筒携液能力，延长自主持续生产周期，最终选择在现有生产管柱内下入小直径连续管作为速度管柱，同时为后续泡排/气举排水采气工艺建立加注和循环通道。

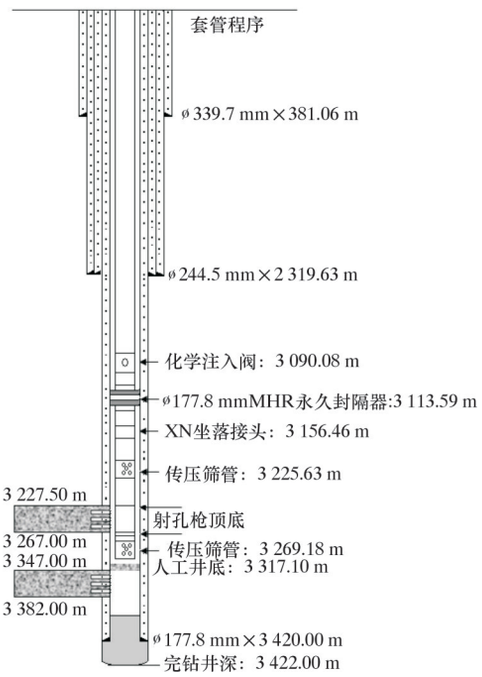


图9　井身结构图

Fig. 9　Casing program

3.2　连续管尺寸选择

在当前地层压力和井口压力下，不同尺寸连续管的摩阻损失如图11所示。由图11可知，模拟计算ø38.10 mm速度管柱的摩阻损失明显高于ø44.45和ø50.80 mm速度管柱，并且随着产气量升高，摩阻损失差值增大。综合考虑临界携液流量、预测产气量和管柱结构等因素，最终选用ø44.45 mm连续管作为速度管柱，具体原因如下。

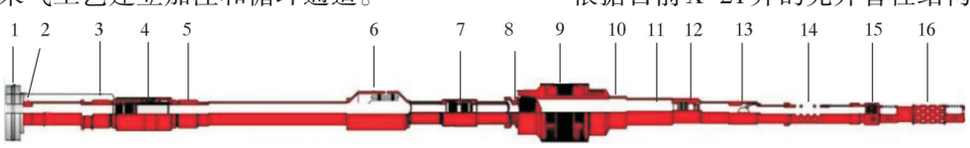
（1）下入速度管柱后，气井有一定的增产效果。

（2）生产中后期，随着地层压力和产气量逐渐降低，速度管柱有较强的稳产和排液能力。

（3）当前ø88.90 mm生产管柱中有多处变径，速度管柱尺寸应当与当前生产管柱间留有适当的环空间隙，便于速度管柱更好地下入通过；同时为后期泡排、气举等其他排采工艺的实施留有足够的空间。

3.3　速度管柱下深确定

根据目前X-21井的完井管柱结构及最小通径，



1—油管挂；2—双外短节；3—上流动接箍；4—井下安全阀；5—下流动接箍；6—化学注入阀；7—SSD循环滑套；8—棘齿锁定密封；9—MHR永久封隔器；10—磨铣延伸管；11—校深短节；12—XN坐落接头；13—球座；14—带孔管；15—减震器；16—射孔枪+夹层枪。

图10　完井管柱图

Fig. 10　Completion string

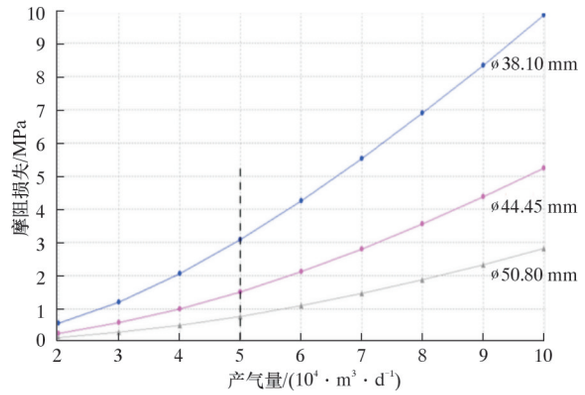


图 11　不同尺寸连续管的摩阻损失分析

Fig. 11　Analysis of friction loss for CTs with different sizes

ø44. 45 mm速度管柱最大下深应不超过3 220 m。对速度管柱不同下入深度的携液生产能力进行模拟分析，结果如表4所示。由表4可知，速度管柱下入越深，其产气量越高，携液生产能力越强。当下到3 000 m深度后，随着下入深度增加，气井产量无明显增加。综合考虑速度管柱的携液能力、预测产气量等因素，确定速度管柱下深3 150 m。

综合速度管柱安全与经济性，最终选用的连续管及其强度校核如表5所示。

表 4　ø44. 45 mm速度管柱不同下入深度模拟结果

Table 4　Simulation results of ø44. 45 mm velocity string at different setting depths

序号	下入深度/m	模拟产气量/(10^4 m^3·d^{-1})	模拟产液量/(m^3·d^{-1})
1	2 000	5.06	41.56
2	2 500	5.15	42.32
3	3 000	5.24	43.02
4	3 100	5.25	43.15
5	3 150	5.26	43.22
6	3 220	5.27	43.31

表 5　连续管参数和强度校核

Table 5　CT parameters and strength check

外径/mm	壁厚/mm	内径/mm	线质量/(kg·m^{-1})	屈服强度/MPa	管内屈服压力/MPa	下深/m	预估作业最大拉伸载荷/kN	抗拉强度安全系数
44.45	3.68	37.09	3.77	889	87.32	3 150	139.39	2.12

3.4　施工过程

2024年5月开始施工，主要施工程序如下。

（1）更换井口设备。对生产侧的闸板阀和放喷侧节流阀进行更换，将生产侧闸板阀更换成压井和试压用三通。

（2）开井控压，将井口压力控制在10 MPa左右，待返出气液稳定后下连续管进行通洗井作业，至设计深度以下15 m后泵注清水3 m^3，清洗设计深度附近后起连续管至地面。

（3）安装卡瓦式悬挂器、操作窗和堵塞器，对井口设备及堵塞器试压40 MPa，对操作窗进行功能调试，确认在60 s内实现快速开关。

（4）开井控压，下入速度管柱至设计深度以下15 m后，再上提至设计深度后停车，其间监测速度管柱内压力，观察堵塞器密封性是否正常。

（5）上紧悬挂器顶丝，密封速度管柱。

（6）安装卡瓦，坐挂速度管柱至悬挂器上，验封，泄压，开操作窗，割管。

（7）拆卸操作窗、防喷器和注入头等井口设备，安装密封套、防上顶法兰短节和速度管柱主阀，然后按照井口改造方案安装其他井口设备。

（8）打开堵塞器，开井放喷排出井筒积液，试生产确认适合生产的最佳井口压力。

（9）转生产流程，恢复井场，交井。

X-21井的速度管柱作业历时3 d，顺利完成全部施工，随后又开展了2口井的速度管柱作业，均实现了控水稳产，实施效果如表6所示。3口井措施后的增产或稳产效果都比较明显，实现了控水稳产的目的，取得了良好的经济效益。

表 6　速度管柱措施效果对比

Table 6　Results of treatments with velocity string

井名	下入深度/m	速度管柱尺寸/mm	产气量/(10^4 m^3·d^{-1})		产油量/(m^3·d^{-1})		产水量/(m^3·d^{-1})		油压/MPa	
			作业前	作业后	作业前	作业后	作业前	作业后	作业前	作业后
X-21	3 150	44.45	4.5	4.62	0.3	0.2	37.7	35	7.02	8.74
Y-22	3 300	44.45	3.0	3.2	0.1	0	112	100	10.00	9.54
Z-106	3 700	44.45	0.9	2.2	0.7	0.4	11.3	8.2	8.55	7.54

4　结论与认识

（1）3口井速度管柱措施效果证明，速度管柱对高产水气井同样适用，即使是产水量超过35 m^3/d的井也能充分携液，可有效延长气井的自主持续生产周期，实现控水稳产增产目的。

（2）优选的TS-80CRT（2205）双相不锈钢连

续管具有较强的耐腐蚀性能，满足高含硫化氢、高含二氧化碳及高氯离子井筒环境使用要求。

（3）设计的井口改造方案实现了改造全程无动火作业，并满足井口功能完整性要求，为类似井速度管柱作业井口改造提供了借鉴。

（4）通过工艺优化及悬挂器密封套、堵塞器等关键工具改进，作业实现了28 HRC高硬度速度管柱井口5 min快速切割、密封套1.5 h顺利安装及堵塞器地面开启压力降至13 MPa。

（5）高含硫、高含二氧化碳、高压气井速度管柱工艺在中国石油海外应用尚属首次，国内类似井况作业也不多见，井口改造施工难度大、作业工况复杂、井控风险较高，工艺的顺利实施为今后类似井施工提供了经验，具有一定的指导意义。

参　考　文　献

[1] 刘通，朱江，卢志明. 速度管排液采气减产原因分析及预防对策[J]. 石油机械，2020，48（10）：136-141.
Liu Tong，Zhu Jiang，Lu Zhiming. Cause analysis and preventive strategy of gas production reduction by velocity string deliquification[J]. China Petroleum Machinery，2020，48（10）：136-141.

[2] 刘磊，刘书炳，杨萍，等. 带压起下速度管柱工艺优化及应用[J]. 石油化工应用，2022，41（10）：63-67.
Liu Lei，Liu Shubing，Yang Ping，et al. Improvement and application of velocity string pull out or run in under pressure[J]. Petrochemical Industry Application，2022，41（10）：63-67.

[3] 白晓弘，李旭日，刘凯文，等. 速度管柱排水采气技术的应用及改进[J]. 石油机械，2011，39（12）：60-62.
Bai Xiaohong，Li Xuri，Liu Kaiwen，et al. Application and improvement of velocity string drainage technology in gas production[J]. China Petroleum Machinery，2011，39（12）：60-62.

[4] 徐云喜，于志军，王海江，等. 连续管尺寸及作业深度对速度管柱的影响研究[J]. 石油机械，2020，48（2）：97-103.
Xu Yunxi，Yu Zhijun，Wang Haijiang，et al. Influence of coiled tubing size and lowering depth on velocity string operation[J]. China Petroleum Machinery，2020，48（2）：97-103.

[5] 周舰，张凌筱. 大牛地水平井速度管排液技术应用及改进[J]. 油气藏评价与开发，2015，5（6）：41-45.
Zhou Jian，Zhang Lingxiao. Application and improvement of velocity string drainage technology of horizontal wells in Daniudi gas field[J]. Reservoir Evaluation and Development，2015，5（6）：41-45.

[6] 王博，王东，靳锁宝，等. 苏里格南区气井速度管柱适用条件分析[J]. 断块油气田，2017，24（2）：264-268.
Wang Bo，Wang Dong，Jin Suobao，et al. Applicability of velocity string for southern Sulige cooperation area gas wells[J]. Fault-Block Oil and Gas Field，2017，24（2）：264-268.

[7] 张赟新，张锋，陈晓明，等. 带压起下速度管柱工具研制及其在滴西18X井的应用[J]. 钻采工艺，2016，39（1）：122-123.
Zhang Yunxin，Zhang Feng，Chen Xiaoming，et al. Development of velocity string tool with pressure trip and its application in Dixi 18X well[J]. Drilling & Production Technology，2016，39（1）：122-123.

[8] 李剑秋，李源源，罗鹏. 连续管速度管柱带压起管工艺在川渝地区的应用[J]. 焊管，2020，43（1）：36-39.
Li Jianqiu，Li Yuanyuan，Luo Peng. Application of process of pulling out string under pressure for coiled tubing velocity string in Sichuan-Chongqing region[J]. Welded Pipe and Tube，2020，43（1）：36-39.

[9] 钟宝库，简家斌，何秀萍，等. 海上产水气井速度管柱排采工艺改进与实践[J]. 石油机械，2018，46（5）：54-59.
Zhong Baoku，Jian Jiabin，He Xiuping，et al. Improvement of water drainage and gas production technology by velocity string in offshore gas well[J]. China Petroleum Machinery，2018，46（5）：54-59.

[10] 翟中波，房伟，俞天军，等. 鄂尔多斯盆地南缘X井区连续油管速度管柱工艺及其应用[J]. 大庆石油地质与开发，2022，41（4）：82-89.
Zhai Zhongbo，Fang Wei，Yu Tianjun，et al. Technique and its application of drainage gas recovery by coiled tubing velocity string in well block X in southern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing，2022，41（4）：82-89.

[11] 白晓弘，王晓荣，赵彬彬，等. 含硫气井速度管柱管材优选及试验[C]//第31届全国天然气学术年会（2019）论文集. 北京：中国石油学会天然气专业委员会，2019：97-101.
Bai Xiaohong，Wang Xiaorong，Zhao Binbin，et al. Pipe selection and test of velocity string in sour gas wells[C]//Proceedings of the 31st National Natural Gas Academic Annual Meeting（2019）. Beijing：Natural

Gas Committee of chinese petroleum society, 2019: 97-101.

[12] 赵俊，余晗. 国产已服役3 a的连续速度管柱的耐蚀性评价[J]. 腐蚀与防护，2018，39（7）：506-510.
Zhao Jun, Yu Han. Evaluation of corrosion resistance on domestic coiled velocity pipe string serviced for 3 years [J]. Corrosion and Protection, 2018, 39 (7): 506-510.

[13] 周忠城，曹和平，兰建平，等. 速度管柱带压起管技术研究与管材性能评价[J]. 石油机械，2015，43（7）：101-103.
Zhou Zhongcheng, Cao Heping, Lan Jianping, et al. Velocity string tripping out under pressure and coiled tubing performance evaluation [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43 (7): 101-103.

[14] 胡苗，冯利军，王军锋，等. 延北113-133致密气藏水平井速度管柱安装策略研究[J]. 非常规油气，2022，9（2）：85-93.
Hu Miao, Feng Lijun, Wang Junfeng, et al. Study on velocity string installation strategy of horizontal well in Yanbei 113-133 tight gas reservoir [J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9 (2): 85-93.

[15] 付悦，吕维平，陈波，等. 坐落短节悬挂速度管柱技术的研究与应用[J]. 石油机械，2019，47（11）：99-103.
Fu Yue, Lü Weiping, Chen Bo, et al. Research of the locating-sub hanging technology for velocity string [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47 (11): 99-103.

[16] 吕维平，辛永安，盖志亮，等. 连续管内堵塞器的研制与应用[J]. 石油机械，2016，44（8）：58-61.
Lü Weiping, Xin Yongan, Gai Zhiliang, et al. Development and application of CT inner blanking plug [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44 (8): 58-61.

[17] 张士彬，左挺，祝叶，等. 连续管速度管柱带压起出封堵工具的研究与应用[J]. 石油机械，2023，51（10）：101-106.
Zhang Shibin, Zuo Ting, Zhu Ye, et al. Research and application of plugging tool for pulling out under pressure from coiled tubing velocity string [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51 (10): 101-106.

[18] Turner R G, Hubbard M G, Dukler A E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21 (11): 1475-1482.

[19] Solomon F A, Falcone G, Teodoriu C. Critical review of existing solutions to predict and model liquid loading in gas wells [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, SPE, 2008: SPE-115933-MS.

[20] 曹彩云，刘毅，王小佳. 苏里格气田小直径油管排水采气试验及效果分析[J]. 石油化工应用，2011，30（6）：31-35.
Cao Caiyun, Liu Yi, Wang Xiaojia. Effect analysis of dewatering gas recovery test by small-diameter coiled tubing in Sulige gas field [J]. Petrochemical Industry Application, 2011, 30 (6): 31-35.

[21] 刘广峰，何顺利，顾岱鸿. 气井连续携液临界产量的计算方法[J]. 天然气工业，2006，26（10）：114-116.
Liu Guangfeng, He Shunli, Gu Daihong. Calculation method of critical continuous liquid-carrying production rate of gas well [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (10): 114-116.

[22] 曹和平，张书平，白晓弘，等. 速度管柱系统研制与应用[J]. 石油机械，2011，39（10）：113-115.
Cao Heping, Zhang Shuping, Bai Xiaohong, et al. Development and application of the velocity string system [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39 (10): 113-115.

[23] Gu H. Transient aspects of unloading oil and gas wells with coiled tubing [C]//SPE Production Operations Symposium. Oklahoma City, Oklahoma, 1995: SPE-29541-MS.

第一作者简介：张福杰，高级工程师，生于1973年，1997年毕业于江汉石油学院石油地质勘查专业，现从事连续管工艺技术研究与应用相关工作。地址：（100101）北京市朝阳区。email：jlzhangfj@cnpc.com.cn。

修改回稿日期：2026-03-04
（本文编辑　刘海森）