

引用格式:张宁,曹飞,李宗宇,等. 顺北超深断控凝析气藏流体非平衡相变对开采效果影响[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(3): 471-478.

ZHANG Ning, CAO Fei, LI Zongyu, et al. Impact of non-equilibrium phase transition of reservoir fluid on production performance in Shunbei ultra-deep fault-controlled condensed gas reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 471-478.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.03.014

## 顺北超深断控凝析气藏流体非平衡相变 对开采效果影响

张宁<sup>1</sup>, 曹飞<sup>1</sup>, 李宗宇<sup>1</sup>, 张云<sup>1</sup>, 孙扬<sup>2</sup>, 潘毅<sup>2</sup>, 孙雷<sup>2</sup>

(1. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**受超深超高温超高压成藏控藏机制影响,顺北超深层断控体凝析气藏地层流体呈现出超临界凝析气复杂相态特征,而其复杂相态演化行为对开发动态会产生怎样的影响,是顺北超深层断控体凝析气藏开发过程亟待探索和解决的问题。以顺北4号断裂带高含凝析油超临界凝析气为研究对象,首先运用高温高压可视化实验观测方法开展顺北凝析气藏近临界凝析油气流体临界乳光现象、非平衡相变现象、雾状反凝析沉降临界慢化现象,以及反凝析过程流体分层等特殊相态演化实验观测研究,而后分析高温超高压条件下近临界凝析气流体所产生的非平衡相态演化特征,初步揭示了非平衡相变及渗流对气井衰竭开采过程反凝析早期雾状反凝析沉降弛豫慢化现象等对凝析油采出程度的影响,得到在PVT(压力-容积-温度)釜中一定气柱高度中从露点压力开始降压至最大反凝析压力的雾状凝析油重力沉降弛豫时间累计可达1 193 s,转换到顺北凝析气藏大纵深缝洞体流动空间可达7 026 s,通过合理控制采速则可提高雾状反凝析油采出程度为4.99%;基于长岩心非平衡渗流实验测试得到合理控制采速可使反凝析油的采出程度提高了7.14%。结合顺北4号带典型气井生产曲线的变化规律,探讨了非平衡相变和雾状反凝析沉降弛豫效应对凝析气井反凝析阶段凝析油采出程度的影响。实际开采动态显示,目前凝析油采出程度较天然气高出5%以上,研发的高温高压原位相态观测系统已成功应用于塔里木、四川盆地等超深层气藏,可为顺北超深层凝析气藏开发动态特征分析及开发对策调整提供一定的参考。

**关键词:**超深断控体凝析气藏;超临界凝析气;非平衡相变;反凝析沉降;弛豫慢化现象;非平衡渗流

中图分类号:TE372

文献标识码:A

### Impact of non-equilibrium phase transition of reservoir fluid on production performance in Shunbei ultra-deep fault-controlled condensed gas reservoir

ZHANG Ning<sup>1</sup>, CAO Fei<sup>1</sup>, LI Zongyu<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>2</sup>, PAN Yi<sup>2</sup>, SUN Lei<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** Under the influence of the ultra-deep, ultra-high temperature, and ultra-high pressure reservoir formation and control mechanism, stratum fluid in the Shunbei ultra-deep fault-controlled condensate gas reservoir exhibits complex phase characteristics of supercritical condensate gas. The impact of the complex phase evolution behavior on the development dynamics is an urgent issue to be addressed in the development process of the Shunbei ultra-deep fault-controlled condensate gas reservoir. Using the supercritical condensate gas with high condensate oil content from the Shunbei No. 4 fault zone as the subject of study, high-temperature and high-pressure visual experimental observation methods were first used to study the near-critical condensate oil and gas fluid's critical opalescence, non-equilibrium phase transition, mist retrograde condensation sedimentation, critical slow-down phenomenon, and special phase evolution behavior such as fluid stratification in the retrograde condensation process. Subsequently, the non-equilibrium phase evolution characteristics of near-critical condensate gas fluid under high-temperature and ultra-high pressure conditions were analyzed, revealing the impact of non-equilibrium phase transition and seepage on early-stage mist retrograde condensation, sedimentation and relaxation slow-down phenomenon during gas well depletion, ultimately affecting the recovery degree of condensate oil. The relaxation time

收稿日期:2024-04-30。

第一作者简介:张宁(1969—),男,硕士,高级工程师,主要从事油气藏开发方面的研究工作。地址:新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区长春南路466号中国石化西北石油科研生产园区,邮政编码:830011。E-mail: zhangn.xbsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“顺北断溶体凝析气藏流动机理与开发对策研”(P22030)。

for mist condensate oil gravitational settling from the dew point pressure to the maximum retrograde condensation pressure in the PVT (pressure-volume-temperature) apparatus could reach 1 193 s, which when scaled to the deep fracture-cavity flow space of the Shunbei condensate gas reservoir, could correspond to 7 026 s. By reasonably controlling the production rate, the recovery degree of mist retrograde condensate oil could be increased by 4.99%. Based on long-core non-equilibrium seepage experiments, it was found that reasonably controlling the production rate could increase the recovery degree of retrograde condensate oil by 7.14%. Combining the the production curve patterns of typical gas wells in the Shunbei No. 4 zone, the influence of non-equilibrium phase transition and mist retrograde condensation sedimentation relaxation effect on condensate oil recovery degree during the retrograde condensation stage was explored. Actual production data showed that the current condensate oil recovery degree was more than 5% higher than that of natural gas. The developed high-temperature and high-pressure in-situ phase observation system has been successfully applied to ultra-deep gas reservoirs in Tarim Basin and Sichuan Basin, and can provide a reference for the analysis of the development dynamics and the adjustment of development strategies for the Shunbei ultra-deep condensate gas reservoir.

**Keywords:** ultra-deep fault-controlled condensate gas reservoir; supercritical condensate gas; non-equilibrium phase transition; retrograde condensation sedimentation; relaxation slow-down phenomenon; non-equilibrium seepage

顺北超深层断控体凝析气藏开发实践已证实,受下部寒武系生烃类型以及纵向大纵深缝洞体储层所形成的超高温超高压快速充注成藏的影响,顺北区域平面上和沿断裂带自北向南油气藏流体的类型呈现出其特有的多样性<sup>[1-7]</sup>。如已投入开发的顺北1号、4号、5号断裂带,其油气藏流体具有与常温常压油气藏流体不同的特征,呈现出超高温超高压近临界挥发油、超临界凝析气所特有的奇异相态演化特征<sup>[8-9]</sup>,而这些特有的现象和行为对顺北超深层断控体油气藏开发动态会产生怎样的影响,对开发调整会产生怎样的控制作用,应是我们深入分析和亟待解决的问题。

国内外业界内有关凝析气藏、近临界凝析气藏流体常规相态变化研究的文献较多<sup>[10-15]</sup>,但对超高温超高压超临界凝析油气流体更为显著的亚稳态非平衡“过热”相变现象、临界乳光现象、雾状反凝析沉降弛豫慢化现象,压降反凝析过程流体分层现象的研究以及对开发动态的影响开展深入研究的早期文献相对较少,近年来已开始得到关注。1993年, Мирзажанзаде<sup>[16]</sup>基于PVT(压力-容积-温度)筒和多孔介质,对反凝析沉降过程存在的松弛(弛豫)现象进行了研究,认为在一定的条件下,孔隙介质中烃类系统的相变和渗流具有非平衡的特点,并通过模拟气井衰竭开采过程的开放式定容衰竭实验,给出了由松弛效应引起的反凝析油的减少程度的计算公式,进一步分析了凝析气体系的非平衡渗流对反凝析油开采的影响<sup>[15]</sup>。1999年,罗凯等<sup>[17]</sup>通过文献和实验现象分析,认为受近临界流体的等温压缩性增强以及重力沉降的影响凝析气流体呈现出较大的密度涨落现象,并会呈现出分层现象。2015—2022年,部分学者针对雅克拉凝析气藏,开展了反凝析雾状流态重力沉降弛豫现象控制机制研究,并分析了对凝析油开采效果的影响<sup>[18-24]</sup>。但针对超深层超高温超高压状态下超临界凝析气特殊相变行为的深入研究尚未多见,胡伟等<sup>[25]</sup>针对塔里木盆地超深油气藏开展的流体相行为变化特征研究,观测到在压力下降过

程中,反凝析油析出过程可出现较明显的分层现象。超临界流体非平衡相变热力学理论研究取得进展<sup>[26-29]</sup>,但对油气藏开采过程近临界和超临界多组分凝析气体系相变行为的分析研究鲜有报道,而开展这方面的研究和探索,有助于我们对超深超高温超高压超临界凝析气藏的开发动态特征形成更为深入的认识。

为进一步探索超高温超高压状态下超临界凝析气的特殊相变行为对顺北超深层断控体凝析气藏开发动态的影响及控制机制,以顺北4号带凝析气藏44X井高含凝析油地层凝析油气流体为样本,运用高温高压可视化实验观测方法开展了超临界凝析油气流体临界乳光现象、非平衡相变现象、雾状反凝析沉降临界慢化现象,以及压降反凝析过程流体分层等特殊相态演化过程的实验观测研究,并进一步借鉴超临界流体萃取、耗散结构与非平衡相变热力学分析方法,分析顺北超深层超高温超高压条件下超临界凝析气流体的组成分布特征以及所产生的特殊相态演化特征,同时,结合顺北4号带典型气井生产曲线的变化规律,分析其对顺北超深层断控体凝析气藏开发动态的影响,进而为顺北超深层断控体凝析气藏开发调整提供一些借鉴和参考。

## 1 顺北超深断控体凝析气藏超临界流体非平衡相变特征

### 1.1 实验装置和测试流程

#### 1.1.1 实验装置的选择

采用加拿大DBR公司生产的JEFRI全观测无汞超高温超高压多功能地层流体分析仪开展顺北超临界凝析气非平衡相变和临界乳光现象的实验观测。该装置的测试温度介于-30~200℃,精度为0.10℃;测试压力介于0.1~70.0 MPa,精度为0.01 MPa。装置中的PVT高压釜中安装有一个底部紧密配合的锥体柱塞,通过外部摄像系统

对相界面位置变化的光学观测,可以测定样品的气液相体积。实验过程中,基于釜体内流体对背景光源散射程度的变化,可由外置的摄像系统连续观测流体相态变化过程产生的“临界乳光”现象,然后再通过计算机图像及数据自动采集和处理,可以记录非平衡相变过程临界慢化的弛豫时间。

### 1.1.2 非平衡相变弛豫时间观测

将一定体积的顺北地层凝析气样品转入 DBR 仪 PVT 高压釜中,将恒温箱的温度、压力分别加载至地层温度为 165 °C 和实验起始压力为 45 MPa (高于露点压力),对样品进行搅拌使其达到单相稳定状态。从所设定的起始实验压力开始缓慢逐级降低 PVT 高压釜的测试压力,进行反凝析相变行为测试,压降级次以每次压降开始出现临界乳光现象为准。同时采用摄像和计算机自动采集系统对凝析气流体样品的相态演化、临界乳光现象、雾状流体重力沉降(直到乳光现象消失)所需弛豫时间进行观测以及图像和实验数据采集。

## 1.2 反凝析雾状流重力沉降涨落过程弛豫时间分析

### 1.2.1 近露点压力开始到最大反凝析压力不同压降阶段临界乳光及弛豫时间观测

顺北 44X 井地层温度为 165 °C,原始地层压力为 90.55 MPa,露点压力为 40.12 MPa。观察研究样品在实验压力降低到露点压力开始的第一级和第二级压降过程

临界乳光和雾状流重力沉降弛豫时间,实验观测结果显示(图 1):当压力处于高于露点压力的超临界区域,凝析气为单相流体,呈单相透明状态;当压力缓慢降低到露点压力时,凝析气中开始有一定量的重质组分以微小液滴析出,体系开始出现雾状反凝析,对透射光产生一定的散射,出现微弱的橘红色乳光现象(图 1a);随着压力进一步降低,在刚刚低于露点压力的一个较小的压降步长,雾状反凝析突然急剧增强,体系突然变成完全不透光的暗黑状态,呈现出暗黑色乳光现象(图 1b);随后停止降压,让体系中的雾状微小反凝析液滴自行通过密度涨落效应产生非平衡重力沉降,得雾状液滴逐渐沉降到 PVT 高压釜的底部,体系则从暗黑色乳光状态逐渐变为弱透光暗橘红色、半透光橘红色、完全透光橘红色(图 1c—图 1e);当非平衡重力沉降达到涨落平衡,该过程产生的时间效应称为弛豫时间,继续降低一个压力级,体系会呈现出周期性变化(图 1f—图 1i),但临界乳光的颜色会变浅,密度涨落沉降的弛豫时间会缩短。在纵向向上流体有效观测高度为 12 cm 的情况下,从近露点压力开始的第一级雾状反凝析液的沉降过程弛豫时间测定为 215 s,第二级压力为 100 s。观测发现:从近露点压力开始观测到的降压过程临界乳光及弛豫时间要长一些,后续到最大反凝析压力过程的雾状反凝析乳光现象和弛豫时间会逐渐缩短,这有利于通过合理控制近井地层凝析气的渗流速度提高早期雾状反凝析油的采出程度。

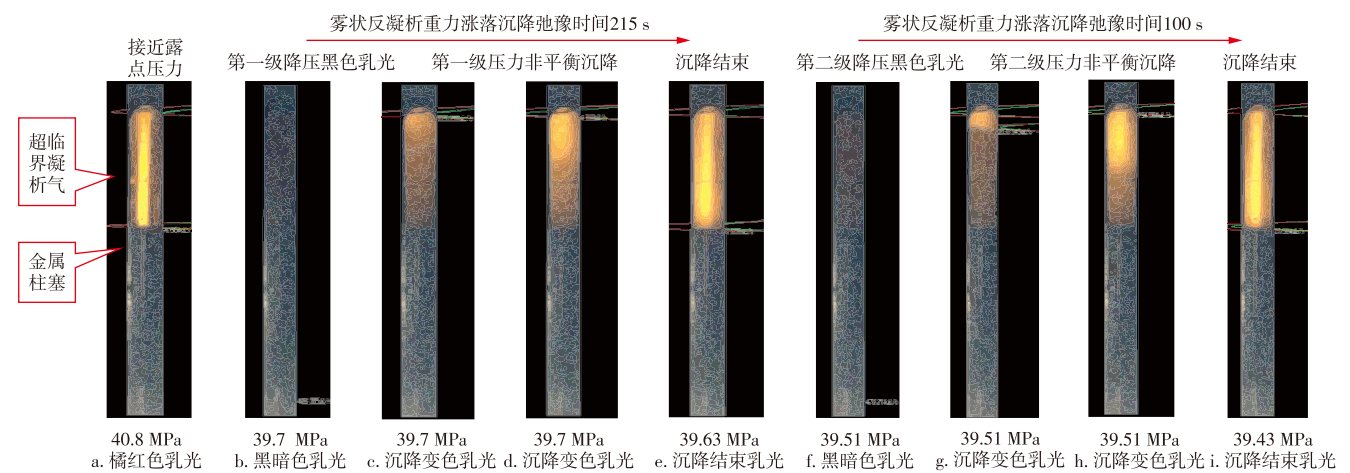


图 1 顺北 44X 井第一级压降和第二级压降过程临界乳光和雾状流重力沉降弛豫时间测定

Fig. 1 Determination of critical opalescence and mist flow gravitational settling relaxation times during the first and second pressure drop processes in Shunbei 44X well

继续依次逐级降压,直到压力降到最大反凝析压力点,每缓慢降一个压力级次,都会出现雾状临界乳光现象,而乳光的颜色是不断变化的,从不透光暗黑色逐渐变亮,逐渐演化为有一定透光度的浅黑色、暗橘红色,橘黄

色等;同时,每降一个压力级,流体的雾状反凝析非平衡重力沉降的弛豫时间会逐渐减少。这是因为随着压降过程反凝析液析出程度和组分类型不同的影响,处于超临界态的凝析气中携带的气态凝析油组分含量越来越少,

进一步压降过程雾状反凝析液微粒数量的密度逐渐降低,光的折射减弱,临界乳光特征减弱,同时重力沉降涨落弛豫时间也随之减少。基于上述观测结果,在可视PVT釜中12 cm的气柱高度中,从露点压力40.12 MPa开始,按2 MPa台阶分级降压至最大反凝析22 MPa过程,雾状反凝析到重力沉降过程的弛豫时间累计约为1 193 s。

弛豫时间的存在有利于通过合理控制渗流速度提高凝析气井近井地层初期反凝析阶段的凝析油采出程度。对于顺北断控体大纵深缝洞体凝析气藏,纵向上存在的高角度裂缝和孔洞渗流空间,如果能充分利用雾状反凝析重力沉降的累计弛豫时间,合理控制渗流速度,使其大于非平衡沉降速度,可以更有效地提高凝析油的采出程度。

### 1.2.2 超临界凝析气非平衡相变过程流体分层现象

顺北44X井地层凝析气压力降低到最大反凝析压力时,从相变过程出现的超临界分层现象观测结果可知(图2):图中方框箭头所指流体分布区域,从上到下出现明显的分层现象,上层为轻质凝析气,中间层为超临界乳光凝析气,下层为反凝析油。基于耗散结构的流体密度涨落原理<sup>[30]</sup>,近临界凝析气藏流体由不同密度的多分子组分构成,在近临界和超临界区,不同密度的组分构成的分子团热运动程度不同,导致轻的分子团向上运动,重的分子团向下运动,产生非平衡对流运动即涨落,从而出现分层现象。出现分层现象对顺北凝析气藏开发后期降压再蒸发开采和注气开采可能会产生不利影响,这是因为沉降在最下部分的重质凝析油组分再次反蒸发的程度会减弱。

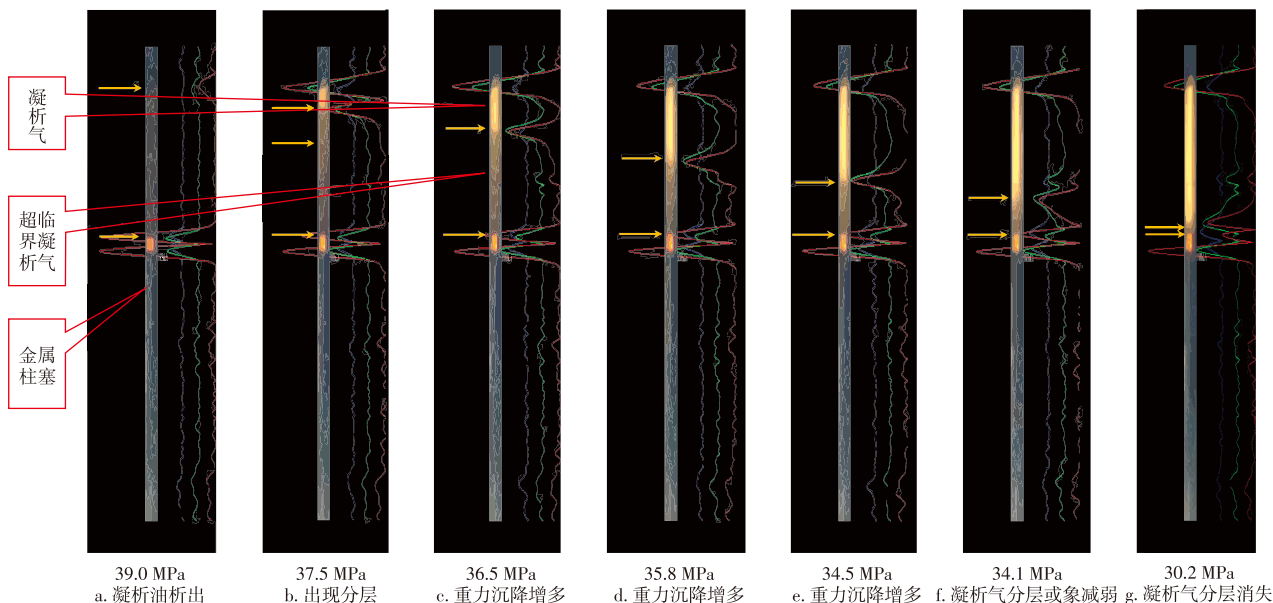


图2 顺北44X井压力降低到最大反凝析压力时凝析气相态演化过程出现的分层现象

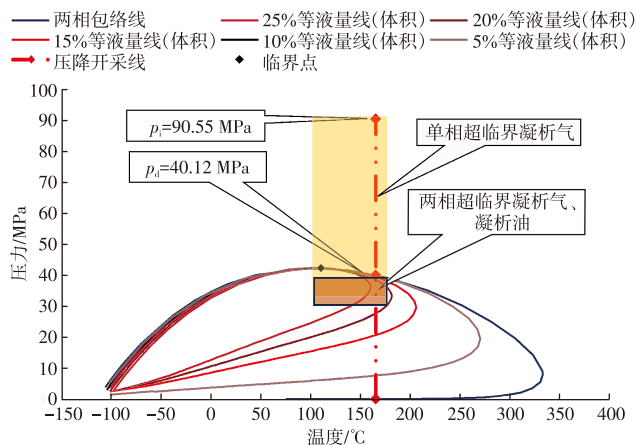
Fig. 2 Stratification phenomenon in condensate gas phase evolution process when pressure in Shunbei 44X well drops to maximum retrograde condensate pressure

## 2 超临界凝析气非平衡相态特征对顺北凝析气藏开发动态的影响

### 2.1 高压下超临界类液体凝析气压降开采过程对凝析油采出程度的贡献

从图3可以看出:在地层凝析气降压开采轨迹线(双点虚线)上,原始地层压力为90.55 MPa,露点压力为40.12 MPa,地露压差达到50.43 MPa。结合前述凝析气临界乳光分析,可知在露点压力以上区域,SHB44X井地层凝析气处于高压及超高压的超临界状态,在该压力

区间,凝析气具有类液体高密度特征的单相状态<sup>[25-27]</sup>,这有利于单相流动开采阶段提高凝析油采出程度。实验观测显示,当地层压力从原始地层压力90.55 MPa降低到露点压力40.12 MPa的衰竭开采阶段,地层单相凝析气膨胀后体积增加量可达27%。从体系相平衡角度考虑,这表明地层凝析气单相开采阶段采出井流体中凝析油、气的采出程度可同时达到原始储量的27%(图4)。显然,对于顺北超高压凝析气藏,利用超大地露压差提高凝析油的采出程度,明显优于常规地露压差的凝析气藏。这也是顺北超深超高压凝析气藏早期高效开采的一个优势。



注:  $p_i$  为原始地层压力, 单位 MPa;  $p_d$  为露点压力, 单位 MPa。

图3 SHB44X井地层凝析气P-T相图

Fig. 3 P-T phase diagram of condensate gas in formation of SHB44X well

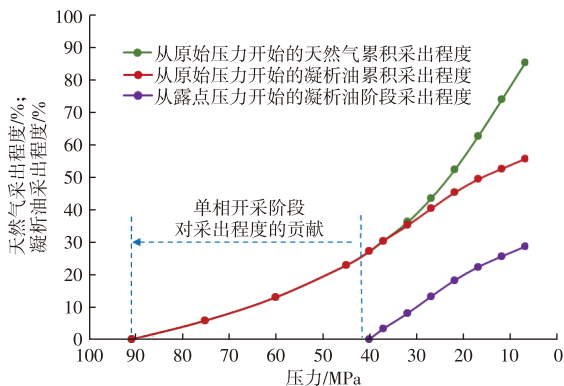


图4 基于相平衡的SHB44X井衰竭开采凝析油和天然气采出程度

Fig. 4 Condensate oil and gas recovery degrees during depletion exploitation of SHB44X well based on phase equilibrium

## 2.2 超临界凝析气非平衡相态特征对顺北凝析气藏开发政策的影响

通常在实验室中按行业标准所开展的恒温定容衰竭实验通常是基于平衡态过程进行的,即衰竭过程每一压力级下析出的雾状凝析油重力沉降完全达到平衡后才开始排出平衡后的凝析气,这相当于雾状凝析油沉降的弛豫时间远远小于地层凝析油气向井流动的渗流时间,即相当于雾状凝析油重力沉降是在瞬间完成的。但如果模拟凝析气并向井流动过程进行恒温定容衰竭实验,在每一压力衰竭过程中按一定压降速度排出凝析气,则受弛豫时间的影响,一部分雾状凝析油也会同时被排出,从而使相转变出现非平衡现象,显然,在非平衡条件下,流体的流动或渗流速度会大于雾状凝析油的重力沉降速度。

Мирзажанзаде<sup>[10]</sup>针对非平衡定容衰竭反凝析过程做了较为系统的研究,给出了以下公式分析,对于凝析油

气体系,温度恒定,衰竭过程中凝析油体系的状态可由压力变化速度来决定。在平衡状态下,压降引起的反凝析液量满足下式:

$$A = q_{\max} / (p_d - p_{\max}) \quad (1)$$

$$q = A \left[ p_d - p + \int_0^t K(T - t) \frac{dp(t)}{dt} dt \right] \quad (2)$$

式中:  $A$  为平衡态条件下单位压差的反凝析油量,单位  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $p$  为目前压力,单位 MPa;  $q$  和  $q_{\max}$  分别表示目前压力下的反凝析油量和最大反凝析油量,单位  $\text{m}^3$ ;  $p_d$  为体系露点压力,单位 MPa;  $p_{\max}$  表示最大反凝析压力,单位 MPa;  $K$  为凝析油体系中雾状反凝析完成沉降所需弛豫时间函数,可表示为  $K(T - t) = K_0 e^{-t/T}$ , 遵守  $K(T - t) > 0$ ,  $\frac{dK(T - t)}{dt} < 0$ ,  $K(\infty) = 0$  的条件,  $T$  和  $K_0$  分别为弛豫时间和重力系数,可通过实验加以测定;  $t$  为压力变化时间,单位 s。

$K_0$  的意义反映了微纳米雾状凝析油滴在凝析气中悬浮的分子重力稳定性。当  $K_0 = 1$  时,表示微纳米雾状反凝析油滴在热运动作用下与重力达到平衡,处于悬浮状态而不产生重力沉降。故将  $K_0$  理解为悬浮系数更为形象。当  $\frac{dp(t)}{dt} \rightarrow 0$  时,即  $t = T$ , 此时近似取  $\frac{dp(t)}{dt} = 0$ , 上式则变为  $q = A(p_d - p)$ , 即回到平衡态条件下反凝析油量与目前地层压力的关系。从上式可以得到,非平衡条件下,即  $\frac{dp(t)}{dt} < 0$ , 凝析气体系在非平衡条件下析出凝析油量要比平衡条件析出油量少。当压力变化无限小时,  $dp/dt = 0$ , 将不存在非平衡偏差,即为凝析平衡。

根据上述凝析气体系在非平衡条件下的凝析油含量方程式(1),得到非平衡相变条件下瞬时凝析油含量摩尔分数关系式:

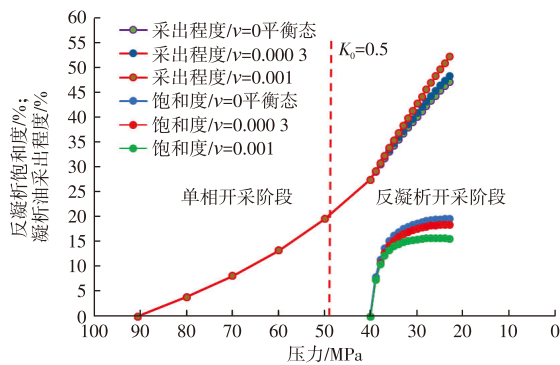
$$L' = L + L \frac{\int_0^t K(T - t) [dp(t)/dt] dt}{p_d - p} \quad (3)$$

式中:  $L'$  为非平衡相变条件下瞬时凝析油含量摩尔分数;  $L$  为平衡相变条件下凝析油含量摩尔分数。

根据公式(3),分别将凝析气体系实验测定过程的  $A$ 、 $K_0$ 、 $T$ 、 $p_d$  等参数代入公式(2)即可得到  $q$  数据,进而由公式(3)可得到亚稳态非平衡相变的反凝析液量和对凝析油采收率的影响曲线,然后,改变重力系数和压降系数值即可得到亚稳态非平衡相变反凝析液图版和对凝析油采收率影响的图版。

针对顺北凝析气藏所具有的高角度大纵深缝洞体为主的储层流动空间,其中,平衡态条件下单位压差的反凝析油量为 1.140 2,  $K_0$  取值 0.5, 雾状反凝析液沉降过程

弛豫时间为7 026 s;改变衰竭过程的压降速度,得到非平衡反凝析饱和度及凝析油采出程度(图5)。图中6条曲线分别为压降速度趋于0的平衡衰竭过程,压降速度分别为0.000 3 MPa/s和0.001 MPa/s的非平衡衰竭实验过程反凝析饱和度曲线和凝析油采出程度曲线,研究发现压力从原始地层压力降低到露点压力衰竭过程为单相流体开采过程,该阶段凝析油采出程度与压降速度无关,故曲线重合。压降速度为0.000 3 MPa/s的凝析油采出程度相对于平衡态可增加1.19%,压降速度为0.001 MPa/s的凝析油采出程度可增加4.99%,可以看出,压降速度对非平衡反凝析饱和度和非平衡凝析油采出程度的影响是不应被忽视的。因此,在气井生产过程中可以通过合理控制采速,来改善反凝析开采初期近井地带雾状反凝析油的采出程度。



注: $K_0$ 为重力系数。

图5 非平衡反凝析饱和度和凝析油采出程度与压力衰竭关系  
Fig. 5 Relationship between non-equilibrium retrograde condensation saturation and condensate oil recovery degree with pressure depletion

### 2.3 非平衡相变及渗流对顺北凝析油采出程度的影响

为了进一步认识顺北缝洞体储层开采过程反凝析过程非平衡相变对凝析油采出程度影响,设计了直径为25.4 mm的组合岩心模型凝析气衰竭开采过程不同压降速度对凝析油采出程度影响的实验研究。模型由6个短岩心组合而成,总长度为30.37 cm,平均孔隙度为1.77%,平均渗透率为 $111.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。开展了两次衰竭开采实验,分别以每5 MPa和每8 MPa一个台阶进行降压衰竭采油和采气,每降一个台阶,记录采出凝析油、气体积,记录时间,直到压力衰竭到预设的最低压力25 MPa为止。

对比图5和图6在不同条件下的采出程度可知:合理控制衰竭开采压降速度,可以利用非平衡相变及渗流过程改善凝析气井凝析油的采出程度,其中每次按5 MPa降幅衰竭实验,凝析油采出程度相对于平衡态可增加

2.10%;每次按8 MPa降幅,凝析油采出程度可增加7.13%。但需要强调的是,根据渗流力学压降漏斗分布特征,衰竭开采过程合理压降的选择尽可能限制在近井地带,气流才能有效携带雾状凝析油采出,如果压降过大,反凝析向远井地层扩展,反而会降低气流携带雾状凝析油的效果,降低非平衡渗流凝析油的采出程度。

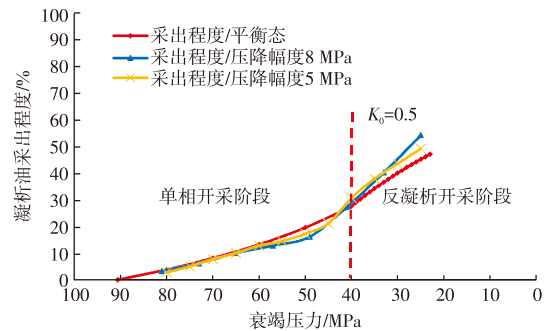


图6 长岩心模型非平衡相变及渗流对顺北凝析油采出程度的影响

Fig. 6 Influence of non-equilibrium phase transition and seepage in long-core model on condensate oil recovery degree in Shunbei

### 3 非平衡相变及渗流对顺北凝析油采出程度的实际影响分析

通过分析顺北4号带顺北4-1H井衰竭开采过程油压、流压、凝析油气采出程度变化特征可知(图7):顺北4-1H井生产达到近300 d之前,处于井底压力高于地层凝析气的露点压力的开采阶段,地层中不会发生反凝析,呈现出的生产特征是气油比相对稳定,凝析油、气的采出程度趋于一致;生产到300 d之后井底压力开始降到露点压力以下,由图可以看出,该阶段凝析油、气采出程度仍能趋于接近一致,生产到500 d后凝析油采出程度开始出

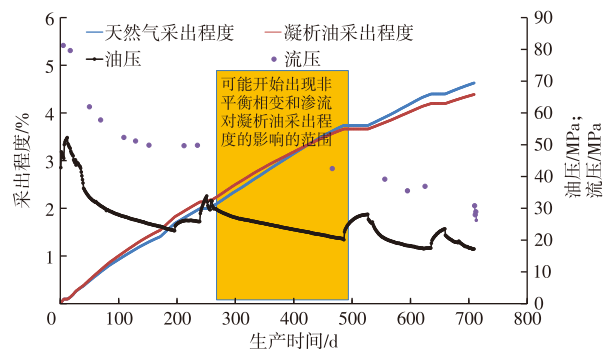


图7 顺北4号带顺北4-1H井凝析油和气采出程度变化  
Fig. 7 Changes in condensate oil and gas recovery degrees of Shunbei 4-1H well in Shunbei No. 4 zone

现低于天然气采出程度的情况。可以推算在生产介于300~500 d之间的生产阶段,应存在雾状凝析油被气流驱替带出气井的生产状态。对于顺北凝析气藏所特有的高角度大纵深贯穿型缝洞体渗流空间,充分利用非平衡相变和渗流控制机制,可以在反凝析初期衰竭开采阶段开采更多的凝析油。截至2024年底,对比顺北4号带凝析气藏开采的实际凝析油采出程度与方案设计,目前实际生产过程凝析油采出程度大于开发方案设计的结果,这也进一步显示顺北4号带凝析气藏实际开发过程凝析油采出效果比较理想。

## 4 结论

1) 顺北超深超高温超高压凝析气藏地层凝析气具有超临界流体特征,在压力低于露点压力到最大反凝析压力区间会出现临界乳光现象。在压降过程中雾状反凝析流体会呈现出从黑色乳光状态逐渐变为弱透光暗橘红色、半透光橘红色、完全透光橘红色的乳光现象。显示出明显雾状反凝析特征。

2) 顺北地层凝析油气体系,从露点到最大反凝析压力区间的不同压降阶段,雾状反凝析会产生非平衡重力沉降弛豫慢化现象,达到沉降平衡需要一定的弛豫时间。在可视PVT釜中12 cm气柱高度中,从露点压力40.12 MPa开始,按2 MPa台阶分级压降至最大反凝析压力的过程中,雾状反凝析到重力沉降过程的弛豫时间累计可达到1 193 s。有利于利用重力沉降慢化现象提高凝析油采出程度。

3) 受不同密度分子非平衡涨落重力沉降速度不同影响,顺北超临界凝析气非平衡相变过程会出现超临界流体分层现象,上层呈现为轻质凝析气,中间层为超临界乳光凝析气,下层为反凝析油,越靠近底部凝析油组分越重。分层现象对凝析油地再蒸发开采和注气开采会产生不利影响。

4) 充分利用雾状反凝析重力沉降的累计弛豫时间和分层现象,在气井生产过程中合理控制采速,可以在反凝析开采初期更有效提高凝析油的采出程度。对于顺北凝析气藏所特有的高角度大纵深贯穿型缝洞体渗流空间,充分利用非平衡相变和渗流控制机制,在反凝析初期衰竭开采阶段开采更多的凝析油是可行的动态调整技术对策。

### 参考文献

[1] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.  
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum

Exploration, 2020, 25(1): 102-111.  
[2] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142.  
YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.  
[3] 陈烈, 邵皓枫, 尹贝, 等. 顺北油气田超深井目的层测井施工技术探讨[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(3): 117-121.  
CHEN Lie, SHAO Haofeng, YIN Bei, et al. Exploration of logging construction technology for target layers in ultra deep wells in Shunbei oil and gas field[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(3): 117-121.  
[4] 王轲, 慈兴华, 杜焕福, 等. 塔里木盆地顺北碳酸盐岩元素地球化学特征与油气富集机制[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 55-64.  
WANG Ke, CI Xinghua, DU Huanfu, et al. Geochemical characteristics and oil & gas enrichment mechanisms of carbonate rocks in Shunbei area of Tarim Basin[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 55-64.  
[5] 胡来东, 张志林, 徐雷良, 等. 塔里木盆地顺北地区碳酸盐岩断控储集体连通性量化表征[J]. 世界石油工业, 2024, 31(6): 30-37.  
HU Laidong, ZHANG Zhilin, XU Leiliang, et al. Internal connectivity quantitative characterization of fault-controlled grid reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(6): 30-37.  
[6] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975-984.  
CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975-984.  
[7] 黄越义, 廖玉宏, 陈承声, 等. 塔里木盆地顺南1井和顺南4井油气相态演化的数值模拟与预测[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 138-149.  
HUANG Yueyi, LIAO Yuhong, CHEN Chengsheng, et al. Numerical simulation and prediction of hydrocarbon phase evolution of wells Shunnan 1 and 4, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 138-149.  
[8] 朱莲花, 徐珊. 塔里木盆地顺北地区1号、5号断裂带奥陶系原油地球化学特征及控藏因素[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 58-68.  
ZHU Lianhua, XU Shan. Geochemical characteristics and reservoir controlling factors of Ordovician ultra-deep crude oil in No.1 and No.5 fault zones in Shunbei area, Tarim Basin[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 58-68.  
[9] 于禄, 郝柏林, 陈晓松. 边缘奇迹: 相变和临界现象[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
YU Lu, HAO Bailin, CHEN Xiaosong. Edge miracle: Phase transition and critical phenomenon[M]. Beijing: Science Press, 2005.  
[10] 吴蕾, 袁士义, 胡永乐, 等. 凝析油蒸发动态特征[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 122-124.  
WU Lei, YUAN Shiyi, HU Yongle, et al. Re-vaporization and retrograde vaporization of the liquid condensate[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 122-124.

- [11] 傅秀娟, 孙志道, 刘菊, 等. 花场近临界油气藏流体相态和开采特征[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 96-98.  
FU Xiujian, SUN Zhidao, LIU Ju, et al. Phase behavior of fluid and development characteristics of Huachang near-critical hydrocarbon reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 96-98.
- [12] 张雷, 李宏远, 吴浩君, 等. 高倾角近临界油气藏流体及开发特征研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 100-104.  
ZHANG Lei, LI Hongyuan, WU Haojun, et al. Fluid and development characteristics of near critical oil and gas reservoirs with high dip angle[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 100-104.
- [13] 陈卫东, 郭天民. 近临界油气藏流体相行为研究的现状[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(1): 76-79.  
CHEN Weidong, GUO Tianmin. A review of experiment and classical model for near-critical point fluid phase action in reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(1): 76-79.
- [14] 李二鹏, 唐永亮, 李鹏冲, 等. 近临界凝析气藏相态特征与开发方式研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(5): 223-226.  
LI Erpeng, TANG Yongliang, LI Pengchong, et al. The research on phase behavior and development scheme of near-critical gas condensate reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(5): 223-226.
- [15] 郜国喜, 袁士义, 宋文杰, 等. 超压凝析气藏的流体相态和物理性质[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 71-74.  
GAO Guoxi, YUAN Shiyi, SONG Wenjie, et al. Phase behavior and properties of high pressure gas condensate[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 71-74.
- [16] Мирзажанзаде А. X. 天然气开采工艺[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.  
Мирзажанзаде А. X. Natural gas extraction process[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [17] 罗凯, 钟太贤. 试论近临界凝析气在PVT筒中的分层现象[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 68-70.  
LUO Kai, ZHONG Taixian. A discussion on the layering of near-critical gas condensate in PVT cell[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 68-70.
- [18] 马龙杰, 胡文革, 何新明, 等. 顺北油气田二区断控缝洞结构凝析气藏重力分异特征: 以4号断裂带为例[J]. 油气地质与采收率, 2025, 32(1): 1-16.  
MA Longjie, HU Wenge, HE Xinming, et al. Gravitational differentiation characteristics of condensate gas reservoir with fault-controlled fracture-cavity structure in second block of Shunbei Oil and Gas Field: A case study of No.4 fault zone[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(1): 1-16.
- [19] 袁锦亮. 凝析气藏非平衡压降相态实验研究[J]. 石化技术, 2019, 26(8): 104-105.  
YUAN Jinliang. Experimental study on non-equilibrium pressure drop phase behavior of condensate gas reservoir[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(8): 104-105.
- [20] 王武超, 吴克柳, 陈掌星, 等. 缓解凝析气井反凝析污染的非平衡压降法[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 719-726.  
WANG Wuchao, WU Keliu, CHEN Zhangxing, et al. Non-equilibrium pressure drop method for alleviating retrograde condensate effect on gas condensate well deliverability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 719-726.
- [21] 朱忠谦. 牙哈凝析气藏二次注气抑制反凝析机理及相态特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(5): 60-65.  
ZHU Zhongqian. Mechanism and phase behavior of retrograde condensation inhibition by secondary gas injection in the Yaha condensate gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(5): 60-65.
- [22] 孙扬. 天然气藏超临界CO<sub>2</sub>埋存及提高天然气采收率机理[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.  
SUN Yang. Mechanism of supercritical-CO<sub>2</sub> storage with enhanced gas recovery in the natural gas reservoirs[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [23] 侯大力, 罗平亚, 孙雷, 等. 近临界凝析气藏动态相态行为[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(1): 86-91.  
HOU Dali, LUO Pingya, SUN Lei, et al. Dynamic phase behaviors of a near-critical condensate gas reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(1): 86-91.
- [24] JIA Y, SHI Y Q, HUANG L, et al. The vapour-vapour interface observation and appraisalment of a gas-condensate/supercritical CO<sub>2</sub> system[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-12.
- [25] 胡伟, 徐婷, 杨阳, 等. 塔里木盆地超深油气藏流体相行为变化特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 1044-1053.  
HU Wei, XU Ting, YANG Yang, et al. Fluid phases and behaviors in ultra-deep oil and gas reservoirs, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 1044-1053.
- [26] 王艳, 徐进良, 李文. 不同种类超临界流体异质结构及相变分析[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 1906-1919.  
WANG Yan, XU Jinliang, LI Wen. Heterogeneous structure and phase change analysis of different kinds of supercritical fluids[J]. CIESC Journal, 2021, 72(4): 1906-1919.
- [27] 刘旻昀, 黄彦平, 唐佳, 等. 超临界流体物性畸变特性的多尺度研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(11): 1921-1929.  
LIU Minyun, HUANG Yanping, TANG Jia, et al. Multi-scale study on property distortion mechanism of supercritical fluid[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(11): 1921-1929.
- [28] 赵一凡, 吴笛, 王佳, 等. 二氧化碳超临界相变过程中 Rayleigh - Bénard 对流的实验研究[J]. 实验流体力学, 2023, 37(5): 101-110.  
ZHAO Yifan, WU Di, WANG Jia, et al. Experimental study on Rayleigh - Bénard convection during supercritical phase transition of carbon dioxide[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(5): 101-110.
- [29] 朱自强. 超临界流体技术: 原理和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.  
ZHU Ziqiang. Supercritical fluid technology: Principle and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [30] 王传远, 杜建国, 刘巍, 等. 超临界流体的地质意义[J]. 西北地质, 2005, 38(2): 49-53.  
WANG Chuanyuan, DU Jianguo, LIU Wei, et al. Geological applications of supercritical fluids[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(2): 49-53.