◀油气田开发工程▶

# 超深井气致管柱动力学特性研究*
## ——以顺北4号带某超深井为例

祝效华[1] 曾 理[1] 李冬梅[2] 李林涛[2]
（1. 西南石油大学机电工程学院 2. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司）

祝效华，曾理，李冬梅，等. 超深井气致管柱动力学特性研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：83-92.

Zhu Xiaohua，Zeng Li，Li Dongmei，et al. Gas-Induced dynamic characteristics of tubing strings in ultra-deep wells：a case study of an ultra-deep well in the Shunbei No. 4 Belt［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：83-92.

**摘要：**顺北4号带凝析气藏属于一超、四高气藏，极端恶劣的管柱服役环境已导致多口井发生管柱断脱事故。为了从生产管柱变形量、应力阐释方面提出优化管柱组合，针对顺北4号带某失效井，基于混合有限元-计算流体力学数值方法，用RNG $k$-$\varepsilon$ 湍流模型模拟高压气体流动，考虑高压气体与采气管柱之间的流固耦合，建立了全井气致管柱振动响应模型，使用交错积分耦合法实现模型求解。研究结果表明：导致S1井第5根油管横向破裂的原因是第5根油管刚好处于脱离井口约束保护的临界位置，同时在交变应力作用下$\delta_1$段管柱产生剧烈的横向变形；导致第236根油管断裂的原因是几何突变引起的应力集中及纵向弹跳；使用提出的优化管柱组合后，小幅增加了成本，但横向、纵向变形量大幅降低，同时因壁厚突变造成的应力集中现象得到了有效控制。研究方法可用于计算不同产量和不同油管组合中的管柱动态行为，对管柱安全预警和管柱设计优化具有重要意义。

**关键词：**超深高温高压气井；管柱断脱；流固耦合振动；变形量；螺纹气密封失效；应力集中

**中图分类号：**TE931 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202505044

# Gas-Induced Dynamic Characteristics of Tubing Strings in Ultra-Deep Wells： a Case Study of an Ultra-Deep Well in the Shunbei No. 4 Belt

Zhu Xiaohua[1] Zeng Li[1] Li Dongmei[2] Li Lintao[2]
（1. *School of Mechanical Engineering*, *Southwest Petroleum University*; 2. *Sinopec Northwest Oilfield Company*）

**Abstract**: The condensate gas reservoir in the Shunbei No. 4 belt is an ultra-deep accumulation with high temperature, high pressure, high corrosive fluids, and high productivity. The extremely harsh service environment has caused string breakage and falling in several wells. It is necessary to optimize string configuration by interpreting the deformation and stress of the production string. Taking an incident well S1 in the Shunbei No. 4 belt as an example, the RNG $k$-$\varepsilon$ turbulence model was used to investigate the high-pressure gas flow, with the support a hybrid finite element-computational fluid dynamics (FE-CFD) numerical simulation method. Considering the fluid-solid interaction (FSI) between the high-pressure gas and the production string, a full-well gas-induced tubing string vibration response model was established and solved using the staggered integral coupling method.

* 基金项目：国家自然科学基金杰出青年基金项目“钻井提速理论与方法”（52225401）。

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

The results show that the transverse rupture of the 5th tubing in Well S1 occurred because it was just located at the critical position beyond the constraint protection of the wellhead, while the $\delta_1$ section of the tubing string underwent severe transverse deformation under alternating stress. Moreover, the breakage of the 236th tubing was caused by the combined effect of stress concentration induced by geometric changes and longitudinal bouncing. When the optimized string configuration was used, the cost increased slightly, but the transverse and longitudinal deformations were mitigated greatly. Furthermore, stress concentration induced by sudden change in wall thickness was effectively controlled. The proposed method can be used to calculate the dynamic behaviors of strings under different production rates and tubing configurations. The study provides certain reference for string safety warning and design optimization.

**Keywords**: ultra-deep, high-temperature and high-pressure gas well; string breakage and falling; fluid-solid interaction; deformation; gas seal failure of threads; stress concentration

## 0　引　言

天然气开发过程中超深高温高压气井管柱失效问题在近10年引起广泛关注[1-3]。顺北4号带凝析气藏属于一超（超深）、四高（高温、高压、高含腐蚀流体、高产）气藏，恶劣的服役条件给生产管柱安全带来巨大挑战。目前，顺北4号带数口井已出现管柱断脱事故，气井被迫停止生产数月，造成较大的经济损失。技术人员对失效断脱油管开展了材质与力学性能检测，涵盖拉伸性能、内外压承载能力、冲击韧性、化学成分、洛氏硬度及金相组织等多项指标，检测结果均满足产品规格书要求，排除了管材本体性能缺陷引发静态失效的可能性。这一工程现象表明，该类超深气井的管柱失效并非由静态强度不足或材质缺陷主导，而与生产过程中的动态载荷作用高度相关。高压气井生产过程中，瞬时开关井操作、管柱结构截面变化、气层压力波动等均会引发天然气流动压力的动态波动，进而诱发管柱串的强迫振动。同时，流体与管柱结构交互作用产生的自激振动机理更为复杂，属于流固耦合振动（FSI）范畴，其对管柱的累积疲劳损伤作用同样不可忽视。在管柱静态性能全部达标的背景下，动态振动诱发的疲劳失效极有可能是顺北4号带管柱断脱事故的核心诱因，因此开展超深高温高压气井管柱动力学研究，揭示流固耦合作用下的管柱振动响应规律与失效机制，对遏制管柱断脱事故、保障气井长期安全稳产具有极强的工程必要性与现实紧迫性。

目前，关于生产管柱动态特性的研究大部分没有考虑气体与管柱之间的流固耦合作用，Adachi等[4]在比较经典水锤、非耦合和耦合的计算结果后，甚至认为非耦合计算的结果是错误的。而Tijselingp[5]认为流固耦合计算对于某些危险行业和领域很必要。输流管道流固耦合（FSI）理论源自Joukowsky[6]提出的水锤理论，后续发展出线性四方程至十四方程等系列经典模型[7-10]，但均未涵盖流体-管道非线性自激振动特性。现有输流管道非线性动力学研究多采用“半耦合”模型[11-16]，仅考虑流体对管柱的单向作用；Lee等[17]首次推导了双向运动耦合的四方程模型，但忽略了离心力、科氏力及纵横运动耦合等非线性项；张立翔等[18]基于哈密顿变分与变形流体N-S方程补充相关非线性项，完善了该类模型。国内针对高压气井气致管柱振动的研究，多将线性耦合模型组合为多方程形式后以特征线法求解[19-22]；部分学者采用商用有限元软件开展管柱非线性屈曲分析，但普遍将气致振动简化为静载或集中力作用，未充分考虑流固耦合效应[23-25]。

总体而言，超深高压气井气致管柱振动研究仍处于起步阶段，现有方法存在明显局限：线性模型无法表征自激振动的非线性特征，多数耦合模型将管柱简化为单一截面，轴向屈曲分析则忽略流固耦合作用，难以准确反映超深变径管柱的真实动力学响应。

目前，基于任意拉格朗日-欧拉（ALE）方法的混合有限元-计算流体力学技术，为变径长细比管柱的双向流固耦合振动分析提供了可行路径[26]。为此，笔者建立全井气致管柱振动响应模型，通过ALE动态网格实现气体与管柱的双向流固耦合，采用RNG $k-\varepsilon$湍流模型模拟高压气体流动；以顺北4号带S1失效井为对象，从节点应力、横纵向变形维度开展分析，揭示管柱断脱主控机制，并初步探讨管柱组合优化方案。研究结果对管柱安全预警和管柱优化设计具有一定的参考意义。

# 1　数值模拟方法

## 1.1　模型建立

对油管、流体、套管做如下基本假设：①流体处理为单相湍流，不考虑流体运动过程中相态变化；②套管处理为离散刚体，作为管柱变形的边界条件。

将完井管柱视为两端铰接支撑的流体输送管道，通过有限元软件前处理模块建立套管、油管、流体数值模型，依据现场配产参数设置可压缩流动边界条件[27]，后处理使用超算平台进行长时间的计算。通过流体力学、结构动力学前处理模块建立连续的套管、油管、流体模型。使用有限体积法、有限单元法对连续体进行网格（结构化六面体单元）离散，设置流固耦合交界面。在动力学结构离散中，耦合界面要求尽量使用均匀网格形式，不使用加密网格，同时对交界面划分 ALE 动态网格，数据传递采用双向耦合法[28]。

同时，将任一工作制度（产量）下现场套压数据添加在管柱外壁。有限元模型网格划分如图 1 所示。

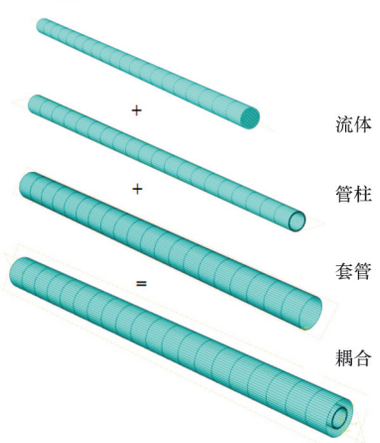



图 1　全井气致管柱振动模型网格划分

Fig. 1　Meshing of the full-well gas-induced tubing string vibration model

为保障流体数值模型求解精度，还需要选择合理的湍流模型模拟气体流动。一般来说，湍流模拟分为直接模拟（DNS）、LES 模型、RANS 模型 3 种方式。RANS 模型计算时间远短于 DNS 模型和 LES 模型，同时保障了较高的计算精度，因此在工程中被广泛采用。表 1 描述了常用 RANS 模型的适用范围。高压气体从井底到井口流动过程中，流动压力逐渐降低，属于正压梯度流动。同时由于压力对气体的压缩性，气体流动属高雷诺数状态，所以 Realizable $k$-$\varepsilon$ 模型、K-W（K-omega）模型、SST K-W 模型不适合。而 RNG $k$-$\varepsilon$ 湍流模型涵盖了天然气流动的低雷诺数效应和高雷诺数效应，适用于各种流动情况和复杂几何结构，同时占用的计算机资源较低，因此选用 RNG $k$-$\varepsilon$ 湍流模型。

表 1　RANS 模型适用范围

Table 1　Application of the RANS model

| 模型名称 | 适用范围 |
|---|---|
| S-A 模型 | 航空领域 |
| Realizable $k$-$\varepsilon$ 模型 | 旋转流动、强逆压梯度的边界层流动 |
| K-W（K-omega）模型 | 低雷诺数 |
| SST K-W 模型 | 逆压梯度流动、分离流动 |
| RNG $k$-$\varepsilon$ 模型 | 低雷诺数、高雷诺数 |

## 1.2　模型求解

研究采用 ALE 方法在流体和固体域之间传递信息，将管柱内腔视为流固耦合信息交界面，在动力学结构离散中，耦合界面要求尽量使用均匀网格形式，不使用加密网格，数据传递采用双向耦合法。使用交错积分耦合法求解，即流体和管柱用各自求解器在时域积分，交错时间推进，其典型过程是：先在流体力作用下结构响应进行积分，推进至下一时刻，再将结构边界位移和运动传递给流体系统，然后更新动态网格，流体积分，计算新的流体压力和应力场，最后将流体压力和应力转换成结构载荷，传递给管柱（见图 2）。全井气致管柱振动模型如图 3 所示。

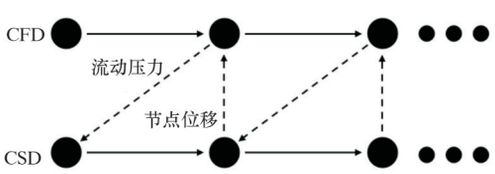



图 2　双向耦合数据传递

Fig. 2　Two-way coupling data transmission

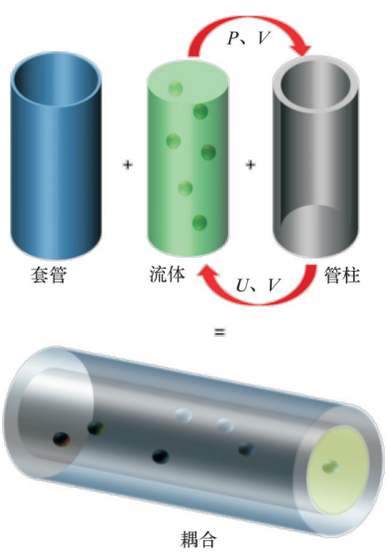



图 3　全井气致管柱振动模型

Fig. 3　Full-well gas-induced string vibration model

稳定性条件仅是对数值格式的要求，不涉及微分方程。Ritchtmyer 和 Morton 提出的稳定性准则可表示为：

$$\begin{cases} \|A^n\| \leqslant K \\ 0 \leqslant \Delta t \leqslant \tau \\ 0 \leqslant n\Delta t \leqslant T \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\tau$、$T$、$n$ 为定值；$A$ 为算子，是时间步长 $\Delta t$ 和网格大小 $\Delta x$ 的函数，它通过变换将变量 $U^n$、$U^{n+1}$ 的值联系起来。

$$U^{n+1} = AU^{n+1} \quad n = 0, 1, 2\cdots\cdots \tag{2}$$

收敛性需要当 $\Delta x$、$\Delta t$ 趋近于 0 的时候，数值解 $u_l^n$ 要逼近微分方程精确解 $\tilde{u}(x, t)$，收敛性条件可表示为：

$$\lim_{\Delta t \to 0, \Delta x \to 0} \left\| \left[ A(\Delta t) \right]^n U(0) - \tilde{U}(t) \right\| = 0 \quad t = n\Delta t \tag{3}$$

### 1.3　数值模型对比

除前文谈到的笔者模型相较于四方程模型、十二方程模型的优势，也可以和现有文献数值模型[27-28]（三维有限元模型、轴向屈曲模型）进行对比，进而论证笔者模型的优越性，如图 4、图 5 所示。模拟输入参数如下：管柱长度为 100 m，油管壁厚为 6.45 mm，井口压力为 45 MPa，压力梯度为每 100 m 1 MPa，支承方式为两端铰接，油管外径为 88.9 mm，套管内径为 152.5 mm，井底压力为 46 MPa，产量为 100×10$^4$ m$^3$/d（对应轴向力 14 kN），模拟时间为 1 s。

图 4 选用管柱 70 m 以深节点，展现了 3 种模型节点应力时程曲线，体现应力特性差异。

由图 4a 可知，三维有限元模型由于直接添加静态内压，所以该点的应力值几乎不变；由图 4b 可知，轴向屈曲模型随着轴向压力的增加，应力逐渐增大，最终管柱失稳；由图 4c 可知，笔者模型实时反映了在高压气体冲击下应力的交变特性。同时，应力值的趋于稳定也反映了管柱刚度对振动变形的阻尼作用。

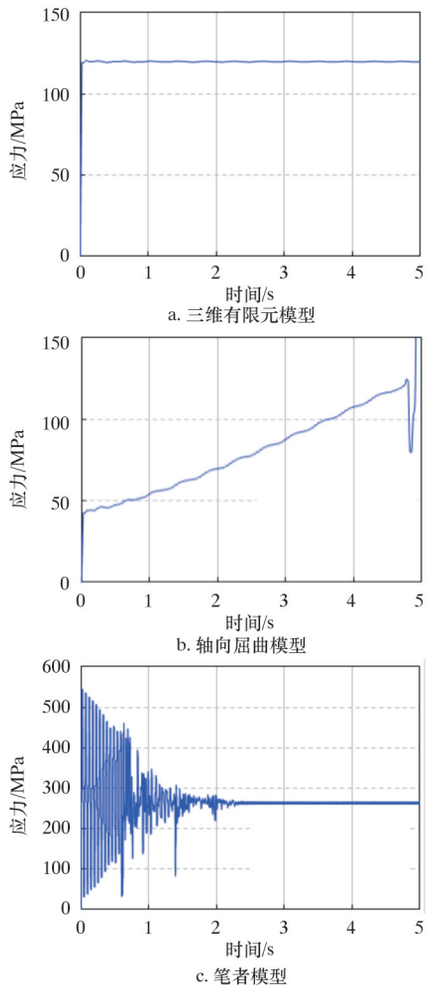



图 4　节点应力对比

Fig. 4　Comparison of node stresses

图 5 描述了 3 种模型在不同时刻横向变形量曲线。

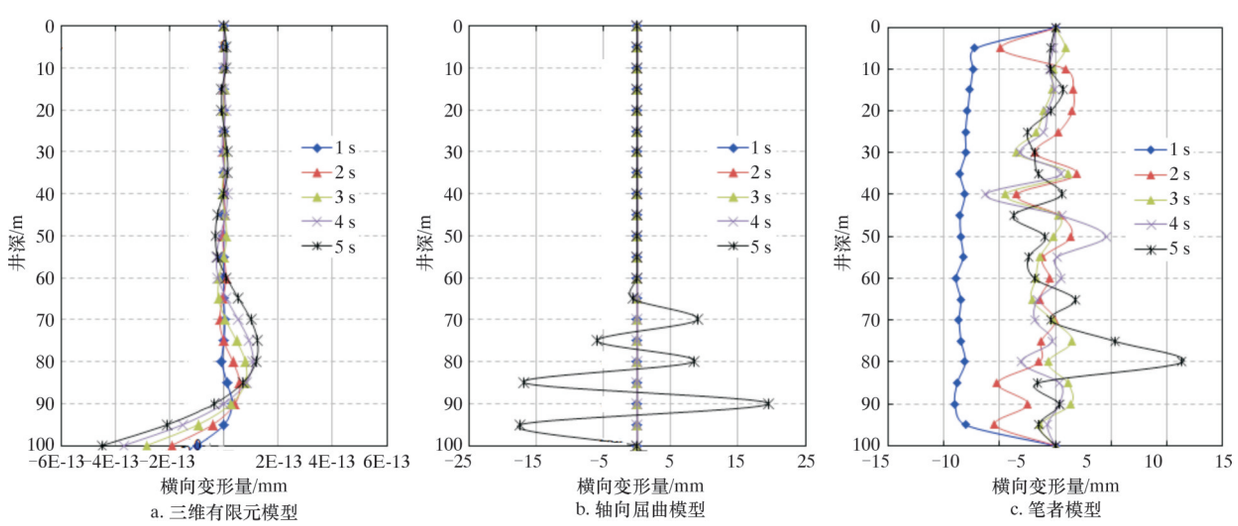



图 5　横向变形量对比

Fig. 5　Comparison of transverse deformation

由图 5a 可知，静态压力下管柱横向变形量极小。由图 5b 可知，轴向屈曲模型由于在底部增加集中力，所以屈曲仅出现在中下段。由图 5c 可知，笔者模型的横向变形量在不同时刻、不同井段的数值正负交替变化，这反映了在气体冲击下管柱的轻微弯折，即“鞭振效应”[27]。因此，笔者模型能够反映管柱在高压流体冲击下的应力非线性、几何非线性特征，更符合现场实际。

## 2　案例分析

### 2.1　S1 井基础数据及断裂情况

S1 井是顺北油气田二区 4 号断裂带北段的一口评价井。完井管柱采用 ø88.9 mm（3.5 in）油管组合，将壁厚 9.52 mm 的管柱段简称为 $\delta_1$ 段，将壁厚 6.45 mm 的管柱段简称为 $\delta_2$ 段，井身结构如图 6 所示。2022 年 8 月 31 日出现第 5 根油管破裂但未断脱，2023 年 1 月 12 日第 236 根油管（壁厚改变后第 1 根）断裂，断脱后管柱串下落，致使第 236 根油管撞击油管接箍分开劈成 2 部分。2023 年 1 月 14 日第 5 根油管横向断裂，断口呈现收缩状。检查断面后发现均有明显塑性变形，属于韧性断裂。将管柱串提出后发现第 1 ~ 5 根油管轻微变形，第 6 ~ 200 根油管剧烈变形，第 201 ~ 235 根油管轻微变形，预测是管柱串断脱后下落与变壁厚端面碰撞导致。

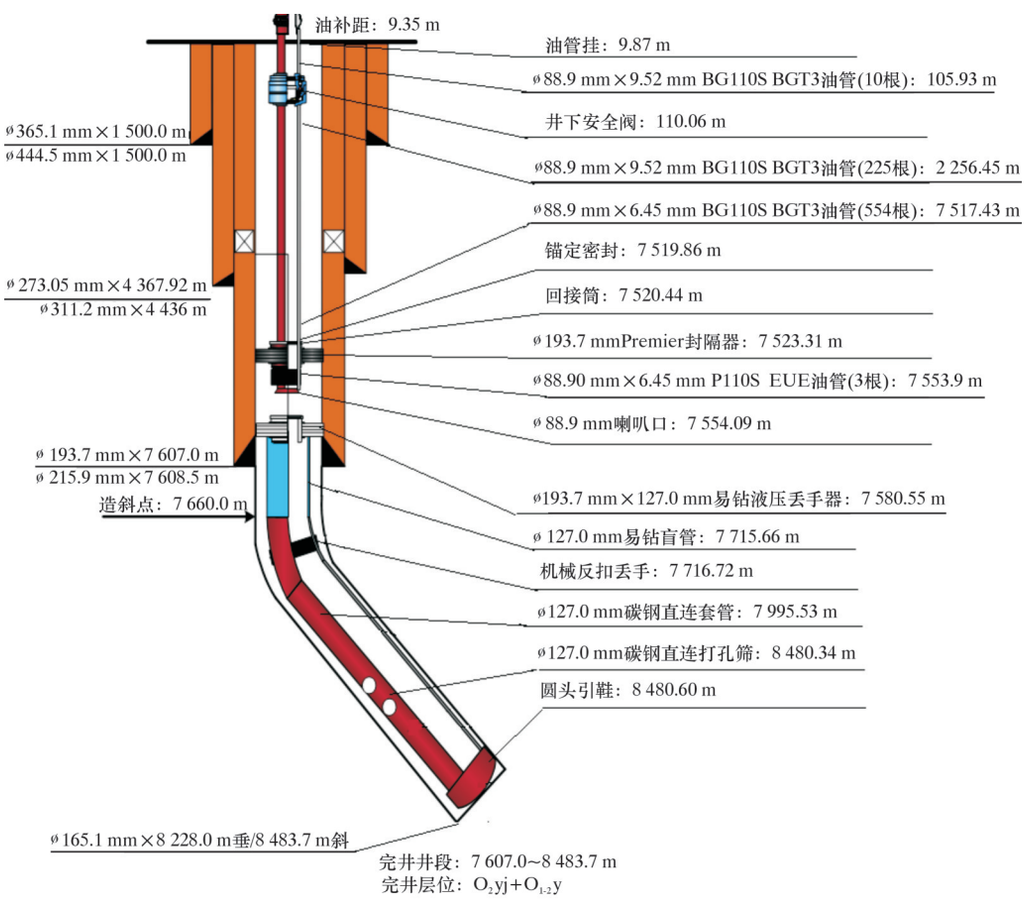



图 6　S1 井井身结构图

Fig. 6　Casing program of Well S1

### 2.2　网格无关性验证

从井口至井底选取了等距的 5 个节点，命名为 $N1 \sim N5$。计算参数为：跨距长度 7 516 m，管套内径 152.5 mm，井口油压 32 MPa，P110 油管平均屈服强度 873 MPa，P110 油管弹性模量 210 GPa，套压 25 MPa，管柱组合（两段式变壁厚）为 ø88.9 mm（$\delta_1$ = 9.52 mm）×2 256.45 m，ø88.9 mm（$\delta_2$ = 6.45 mm）×5 261 m，流压梯度每 100 m 0.43 MPa，井口温度 46 ℃，P110 油管平均抗拉强度 913 MPa，日产量为 $100\times10^4$ $m^3$，模拟时间 10 s，探讨管柱不同网格层数、不同网格数量对节点应力均值的影响，结果如表 2、表 3 所示。

从表 2 可以看出，层数改变对应力均值的影响很小。一般来说，相邻 2 次计算的误差在 10% 以内

即认为网格对结果的影响可接受。从计算时间成本的角度考虑，管柱壁厚选择3层网格。

**表2　网格层数无关性**

Table 2　Grid layer independence

| 层数 | 节点压力/MPa | | | | | 改变率均值/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *N*1 | *N*2 | *N*3 | *N*4 | *N*5 | |
| 2 | 251.73 | 295.01 | 339.78 | 363.07 | 445.79 | — |
| 3 | 241.49 | 292.94 | 332.24 | 336.35 | 458.46 | 2.84 |
| 4 | 234.21 | 308.64 | 324.16 | 330.79 | 426.58 | 7.47 |
| 5 | 231.24 | 310.59 | 334.56 | 334.05 | 380.94 | 11.98 |
| 6 | 219.47 | 318.14 | 346.87 | 317.55 | 360.53 | 2.27 |

**表3　网格数量无关性**

Table 3　Grid quantity independence

| 网格数量 | 节点压力/MPa | | | | | 改变率均值/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *N*1 | *N*2 | *N*3 | *N*4 | *N*5 | |
| 491 036 | 292.97 | 312.71 | 329.17 | 345.59 | 544.87 | — |
| 736 512 | 241.49 | 292.94 | 332.25 | 336.35 | 458.47 | 10.12 |
| 1 052 156 | 236.99 | 298.81 | 338.12 | 337.04 | 438.01 | 2.11 |
| 1 473 024 | 235.41 | 302.94 | 337.23 | 351.08 | 438.05 | 1.31 |
| 1 893 892 | 232.24 | 299.43 | 334.11 | 330.47 | 435.21 | 2.07 |
| 2 314 760 | 220.88 | 308.24 | 346.82 | 329.86 | 425.37 | 2.87 |

从表3可以看出，网格数量在491 036～736 512区间，节点压力改变率均值高于10.12%，网格数量在736 512～2 314 760区间，节点压力改变率均值均小于3%。根据网格无关性判据，改变率均值小于5%可接受。从计算时间成本角度考虑，选择全局网格数量为1 052 156个。

## 2.3　数值结果

在进行流固耦合动态分析前，首先需要判断第5根油管断脱是不是整体悬重过大导致。经计算后得到第5根油管处的轴向应力为268.54 MPa，计算抗拉安全系数为3.39，远高于设计抗拉安全系数1.6。因此，第5根油管断脱原因并不是管柱串悬重过大，需从流固耦合动力学角度分析及阐释。

为了解管柱变形历程，按照图7建立油套管横截面坐标。图8描述了管柱在$x$、$z$方向的变形。

从图8可以看到管柱在高速气体冲击下的变形

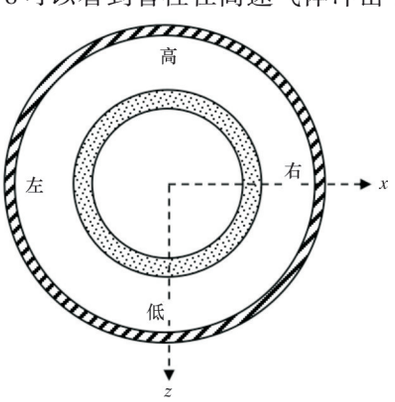



图7　油套横截面坐标

Fig. 7　Cross-sectional coordinates of tubing and casing

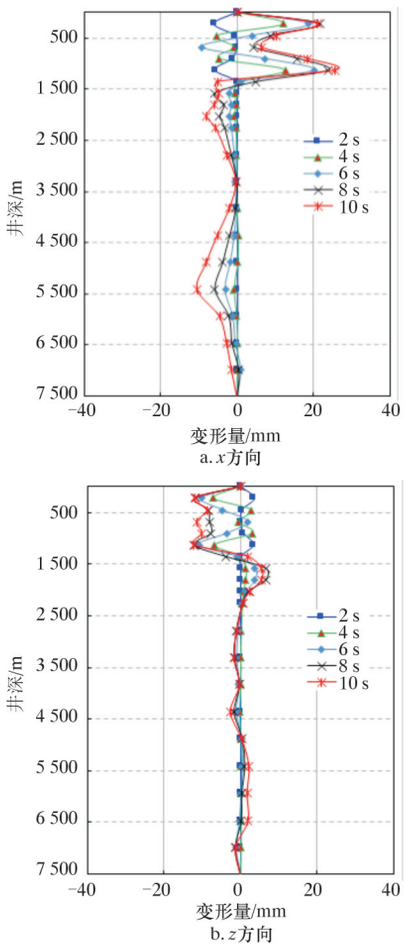



图8　管柱变形曲线

Fig. 8　Transverse deformation of string

历程。管柱率先在$\delta_1$段出现轻微弯曲，当高压高速流体向上流过变截面管道时，根据伯努利连续性方程，由于管道截面积的减小，高压气体流速显著增加，形成高频脉动压力作用在管柱上，当该激励作用超过局部刚度的抑制效果，该段管柱就可能发生抖动变形。同时，壁厚的突变也会导致局部应力集中，放大变形幅值。随后$\delta_1$段变形量持续增大，$\delta_2$段也出现变形。而井口法兰刚度约为$K_{\text{flange}}=10^{12}\ \text{N}\cdot\text{m}^2$，根据约束影响长度公式$L_c=\sqrt[4]{\dfrac{EI}{K_{\text{flange}}}}$计算，可得法兰约束影响长度约为50 m，而第5根油管正好处于脱离井口约束保护的临界位置。井口法兰–悬挂器系统通过摩擦耗能、应力屏蔽和位移抑制三重机制保护第3～4根油管。因此，第5根油管横向变形高于第3～4根油管，断脱概率更高。

图9描述了管柱纵向的变形。从图9可以看出，纵向变形量的上下往复变化反映了管柱在轴向存在跳动，同时变壁厚端面纵向变形量处于高位（11.57 mm）。其原因是$\delta_1$段发生横向变形后，释放的轴向载荷通过壁厚突变点传递至下部，由于

下部刚度更低，同等载荷增量在下部产生的变形量更大。

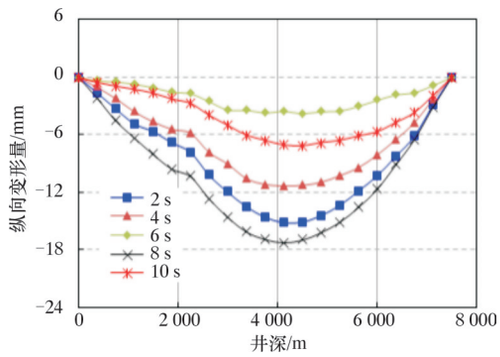



图 9　管柱纵向变形

Fig. 9　Longitudinal deformation of string

图 10 选取了管柱上等距离 5 个内部节点（$N1$ ~ $N5$）及 2 个断脱点进行应力分析，以期揭示管柱周向应力变化规律。

从图 10 可以看出，管柱 6 个节点周向应力处于交变状态，同时 $N1$、断脱点 1、$N2$ 应力降低至恒定值。其原因是上部管柱变形稳定后，弯曲应力稳定，而周向应力受到泊松比和弯曲应力的控制，当弯曲应力稳定时，周向应力也稳定。$\delta_2$ 段断脱点 2、$N3$、$N4$ 节点周向应力持续稳定在高位波动。其原因是 $\delta_2$ 段管柱在持续高压下的应力锁止，同时可能存在动态硬化，使得应力始终处于高位震荡状态。第 5 根油管断脱点应力均值、峰值占屈服强度的 23.61%、44.26%。第 236 根油管断脱点应力峰值存在激增，为 $N2$ 节点的 1.5 倍（见表 4），其原因是 $\delta_2$ 段壁厚远小于 $\delta_1$ 段，高速高压气体流过时在几何突变处造成应力集中。第 5 根油管断脱点、第 236 根油管断脱点应力峰值占屈服强度的 44.26%、78.29%。在交变应力作用下，第 5 根、第 236 根油管也可能出现低应力高周疲劳失效。

从横向、纵向变形量及节点应力分析中可以

**表 4　节点应力及波动量**　MPa

Table 4　Node stresses and fluctuation　MPa

| 节　点 | 应力均值 | 应力峰值 | 应力波动量 |
|---|---|---|---|
| $N1$ | 123.67 | 165.52 | 9.64 |
| 第 5 根油管断脱点 | 178.94 | 335.48 | 22.18 |
| $N2$ | 213.16 | 396.56 | 24.88 |
| 第 236 根油管断脱点 | 297.65 | 593.47 | 31.27 |
| $N3$ | 359.31 | 768.26 | 149.47 |
| $N4$ | 354.19 | 765.85 | 131.39 |
| $N5$ | 367.62 | 468.63 | 36.21 |

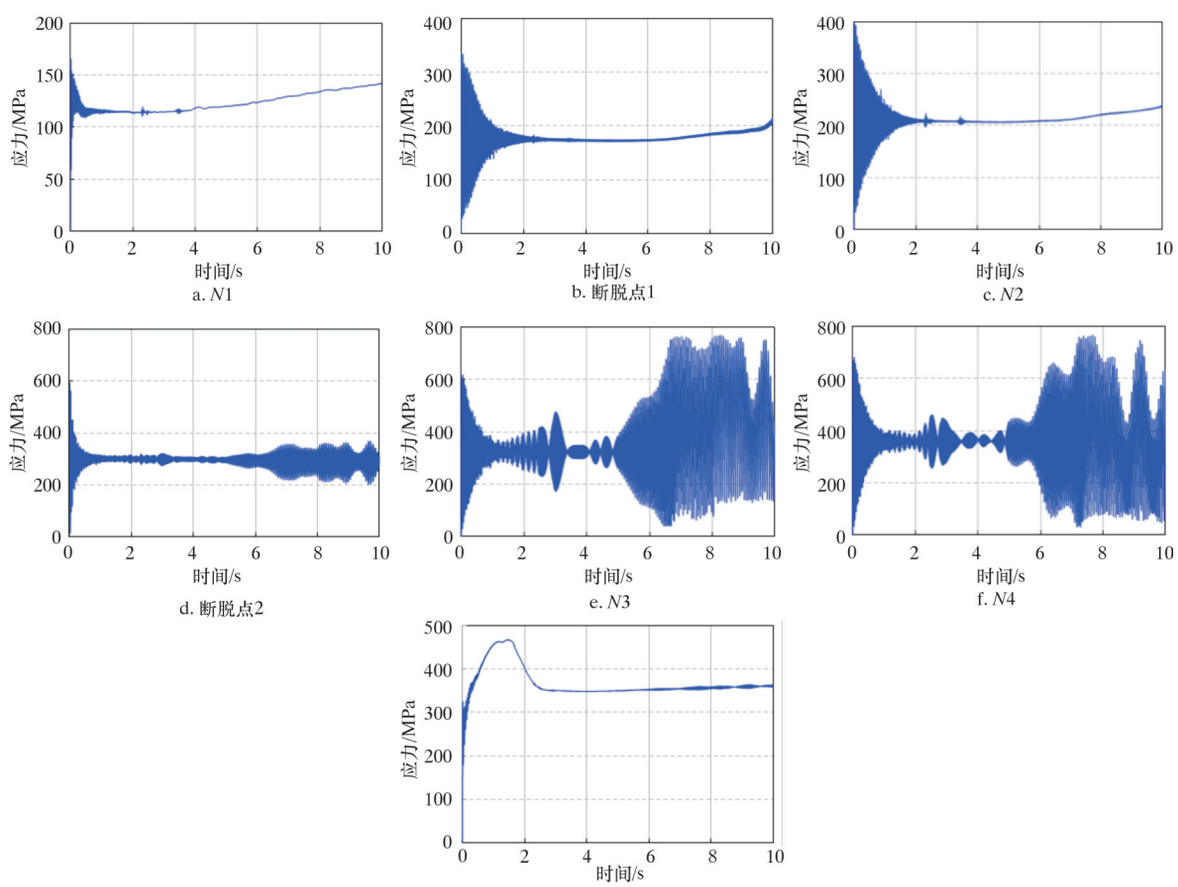



图 10　节点应力

Fig. 10　Node stresses

发现：导致S1井第5根油管横向破裂的主要原因可能是第5根油管刚好处于脱离井口约束保护的临界位置，同时在交变应力作用下$\delta_1$段管柱剧烈的横向变形；导致第236根油管断裂的主要原因是几何突变引起的应力集中及纵向弹跳。

### 2.4　管柱组合优化方案初探

根据前文研究得到的断脱原因，避免类似管柱断脱事故再次发生的重点是增加$\delta_1$段关键区域的抗弯刚度，以及减轻$\delta_2$段变壁厚第1根油管因壁厚突变造成的应力集中。因此，在保持管柱外径88.9 mm不变的情况下，拟将0～300 m井段替换为壁厚11.43 mm油管，将2 256～2 356 m井段替换为壁厚8.05 mm油管，其余井段油管规格保持不变。图11～图13为优化后管柱组合与原始组合的横向、纵向变形量及应力均值对比。

由图11可知，优化管柱$x$、$z$方向变形量最值显著减小，仅在$\delta_2$段存在约3.65 mm的变形。$\delta_1$段较大的横向变形得到了良好的抑制，其变形由25.67 mm降低为0.32 mm。

由图12可知，优化组合纵向变形量最大值显著减小，由原始的17.25 mm减小为8.33 mm，同时纵向弹跳得到抑制。

由图13可知，使用优化组合后有效缓解了原始组合壁厚突变造成的应力集中现象，然而应力均值在$\delta_1$段有小幅上涨，其原因是原始管柱通过变形释放部分能量，而优化的高刚度管柱结构将更多的冲击载荷以内力形式吸收，而非通过变形耗散，导致了局部应力的升高。优化组合应力均值为337.38 MPa，远小于屈服强度。

从上述分析可知，虽然使用优化管柱后小幅增加了成本，但是横向、纵向变形量大幅降低，同时因壁厚突变造成的应力集中现象得到了有效控制。

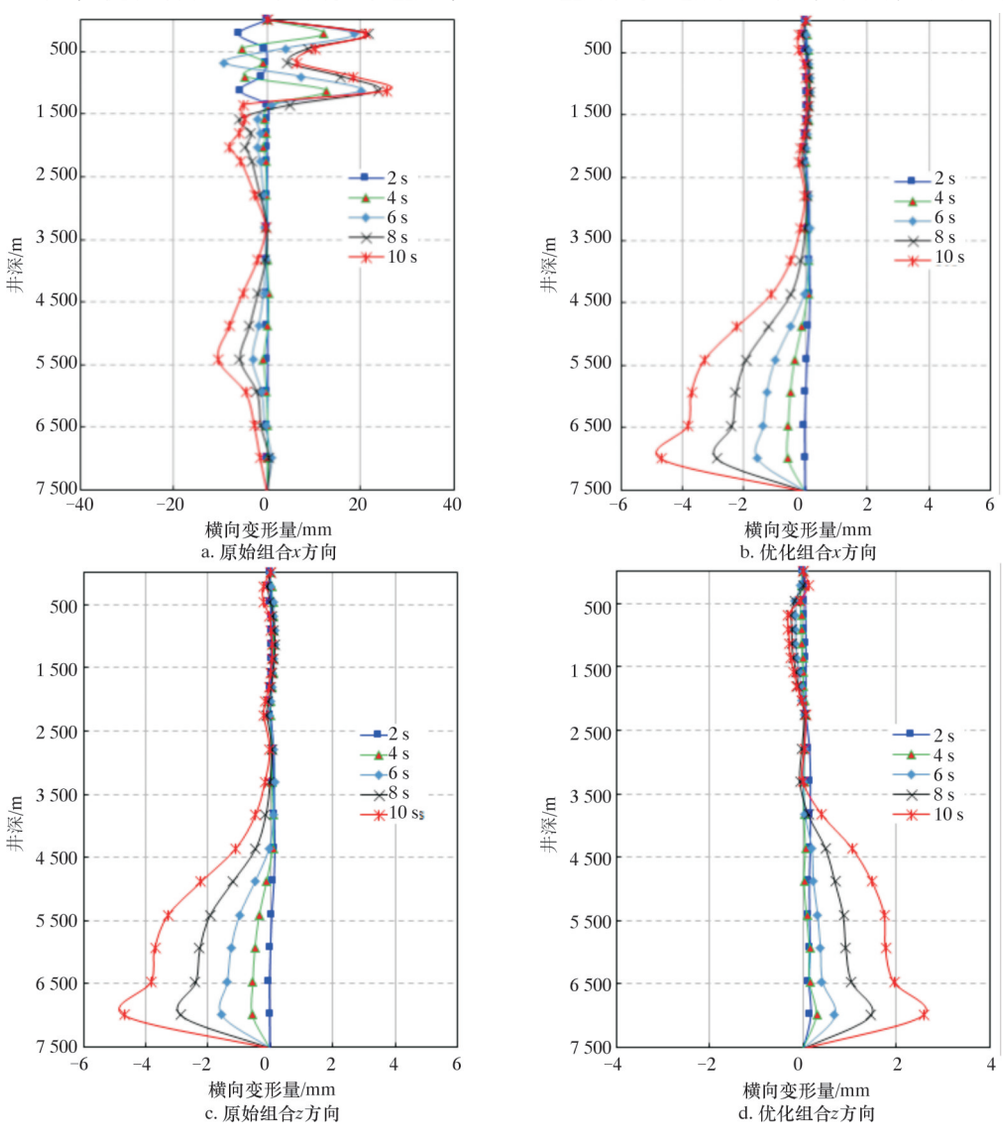



图11　横向变形量对比

Fig. 11　Comparison of transverse deformation

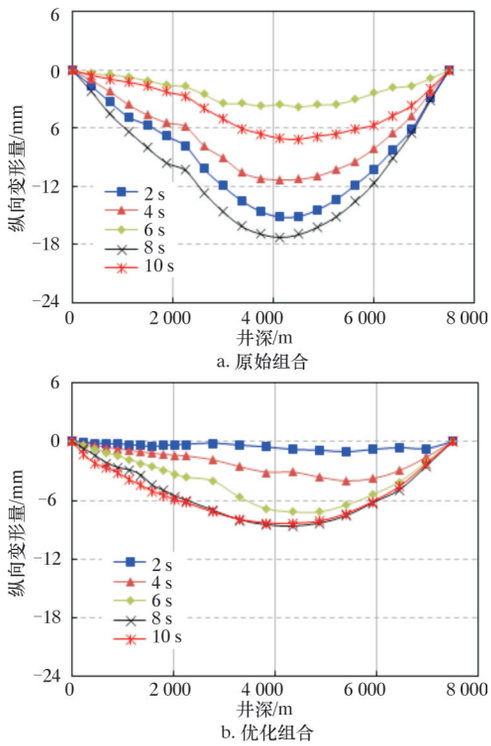



图 12　纵向变形量对比

Fig. 12　Comparison of longitudinal deformation

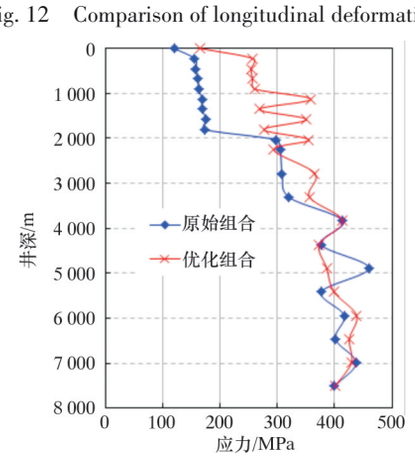



图 13　应力均值对比

Fig. 13　Comparison of stress mean values

## 3　结　论

（1）基于混合有限元-计算流体力学数值方法，通过 ALE 动态网格实现气体与采气管柱双向流固耦合，使用 RNG $k$-$\varepsilon$ 湍流模型模拟高压气体流动建立了垂直管柱全井气致管柱振动响应模型。

（2）该方法能够实时反映采气管柱应力非线性、几何非线性特点；克服了线性四方程模型只能处理轴向线性分析的局限，能够实现轴向、径向的瞬态分析；解决线性十二方程、非线性四方程模型将管柱串处理为等截面模型的局限，使得模型更加贴合现场管柱变壁厚组合的需求。

（3）通过对失效案例井研究发现，导致S1井第5根油管横向破裂的原因是第5根油管刚好处于脱离井口约束保护的临界位置，同时在交变应力作用下 $\delta_1$ 段管柱剧烈的横向变形；导致第236根油管断裂的原因是几何突变引起的应力集中及纵向弹跳。

（4）使用提出的优化管柱组合后，虽小幅增加了成本，但横向、纵向变形量大幅减小，同时因壁厚突变造成的应力集中现象得到了有效控制。

## 参　考　文　献

[1] 杨向同，吕拴录，闻亚星，等. 塔里木油田特殊倒角接箍油管的应用分析［J］. 石油钻采工艺，2015，37（4）：127-130.
Yang Xiangtong，Lü Shuanlu，Wen Yaxing，et al. Application analysis of tubing with specially chamfer collar in Tarim Oilifeld［J］. Oil Drilling & Production Technology，2015，37（4）：127-130.

[2] 周鹏遥，杨向同，刘洪涛，等. 连续管在塔里木油田高温高压深井复杂作业的应用［J］. 钻采工艺，2016，30（2）：116-118.
Zhou Pengyao，Yang Xiangtong，Liu Hongtao，et al. Application of coiled tubing in complicated operations of deep high temperature and high pressure well of Tarim oil field［J］. Drilling & Production Technology，2016，30（2）：116-118.

[3] 丁亮亮，杨向同，刘洪涛，等. 超深水平井尾管悬挂器下部环空压力预测及其应用［J］. 石油钻采工艺，2015，37（5）：10-13，27.
Ding Liangliang，Yang Xiangtong，Liu Hongtao，et al. Prediction and application of lower annular pressure of hanger of ultra-deep horizontal well［J］. Oil Drilling & Production Technology，2015，37（5）：10-13，27.

[4] Adachi T，Ujihashi S，Matsumoto H，et al. Impulsive responses of a circular cylindrical shell subjected to Waterhammer waves［J］. Journal of Pressure Vessel Technslogy，1991，113（4）：517-523.

[5] Tijsseling S A. Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems：a review［J］. Journal of Fluids and Structures，1996，10（2）：109-146.

[6] Joukowsky N. On the hydraulic hammer in water supply pipes［J］. Proc. Am Water Works Assoc，1904，24：341－424.

[7] Skalak R. An extension of the theory of water hammer［J］. ASME，1956，78（1）：105－116.

[8] Walker J S，Phillips J W. Pulse propagation in fluid-filled tubes［J］. Journal of Applied Mechanics，1977，44（1）：31－35.

[9] Davidson C L, Samsury D R. Liquid-structure coupling in curved pipes [J]. Journal of Shock and Vibration, 1969, 40: 197 - 207.

[10] Zhang L, Tijsseling S A, Vardy E A. Fsi analysis of liquid-filled pipes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 224 (1): 69-99.

[11] Bourrieres F J. Sur un phenomenon D, oscillation autoentretennue en mecaniques des fluids reels [J]. Publications Scientifiques et Techniques du Ministere de I, Air, 1939, 147: 57-65.

[12] Païdoussis M P, Issid N T. Dynamic stability of pipes conveying fluid [J]. Journal of Sound and Vibration, 1974, 33 (3): 267-294.

[13] Thurman A L, Mote C D Jr. Free, periodic, nonlinear oscillation of an axially moving trip [J]. Journal of Applied Mechanics, 1969, 36: 83-91.

[14] Thurman A L, MOTE C D Jr. Nonlinear oscillation of cylindrical containing flowing fluid [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1969, 91: 1147-1155.

[15] Semler C, Li G X, Paidoussis M P. The non-linear equations of motion of pipes conveying fluid [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169 (5): 577-599.

[16] Jensen J S. Fluid transport due to nonlinear fluid - structure interaction [J]. Journal of Fluids and Structures, 1997, 11 (3): 327-344.

[17] Lee U, Pak C H, Hong S C. The dynamic of a piping system with internal unsteady flow [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 182: 297-311.

[18] 张立翔，黄文虎. 输流管道非线性流固耦合振动的数学建模 [J]. 水动力学研究与进展，2000，15 (1)：116-128.
Zhang Lixiang, Huang Wenhu. Nonlinear dynamical modeling of fluid-structure interaction of fluid-conveying pipes [J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 15 (1): 116-128.

[19] 樊洪海，王宇，张丽萍. 高压气井完井管柱的流固耦合振动模型及其应用 [J]. 天然气工业，2011，32 (3)：547-550.
Fan Honghai, Wang Yu, Zhang Liping. A fluid-solid coupled oscillation model for completion string and its application in high pressure gas well [J]. Natural Gas Industry, 2011, 32 (3): 547-550.

[20] Wang Y, Fan Hanghai, Zhang Liping, et al. An analysis of axial tubing vibration in a high-pressure gas well [J]. Petroleum Science and Technology, 2011, 29: 708-714.

[21] 康志磊，郭蒲，文小勇，等. 高压高产气井完井管柱振动特性及安全分析 [J]. 石油机械，2022，50 (1)：41-47.
Kang Zhilei, Guo Pu, Wen Xiaoyong, et al. Vibration characteristics and safety analysis of completion string in high pressure and high gas rate well [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50 (1): 41-47.

[22] Luo Tong, Lian Zhanghua, Zhang Qiang, et al. Fluid-structure interaction characteristics between natural gas fluid and tubing string in high-pressure high-temperature high-production gas wells [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 236: 212621.

[23] 刘祥康，丁亮亮，李玉飞，等. 超深气井完井管柱屈曲行为研究 [J]. 石油机械，2020，48 (2)：29-34，41.
Liu Xiangkang, Ding Liangliang, Li Yufei, et al. Study of the buckling behavior of completion strings for ultra-deep gas wells [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48 (2): 29-34, 41.

[24] Xing Jingtang. Fluid-solid interaction dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021: 409-410.

[25] 张丽萍. 气井内高速流体诱发生产管柱振动机理与规律研究 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2011.
Zhang Liping. Research on the mechanism and law of production string vibration induced by high-speed fluid in gas wells [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2011.

[26] 祝效华，曾理，李冬梅，等. 高压高产气井完井管柱气致振动规律研究 [J/OL]. 振动工程学报，2025-02-25. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20250224.1616.004.
Zhu Xiaohua, Zeng Li, Li Dongmei, et al. Study on gas-induced vibration of completion string in high pressure gas wells [J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2025-02-25. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20250224.1616.004.

[27] Blevins R D. Flow-induced vibration [M]. Beijing: Science Press, 2022: 301-304.

[28] 郑有成，陈刚，李杰. 安岳气田龙王庙组气藏钻完井技术 [M]. 北京：石油工业出版社，2020.
Zheng Youcheng, Chen Gang, Li Jie. Research on the mechanism and law of production string vibration induced by high-speed fluid in gas wells [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.

**第一作者简介：**祝效华，教授，生于 1978 年，2005 年毕业于西南石油大学机械设计与理论专业，获博士学位，现从事科研与管理工作。地址：(610500) 四川省成都市。email：zxhth113@163.com。

**修改回稿日期：**2026-03-24
（本文编辑　刘　锋）