◀油气田开发工程▶

利用低熔点合金层提高井筒密封完整性数值模拟研究*

席 岩[1,2] 宁惠令[1] 李 军[2,3] 柳贡慧[1] 连 威[2,3] 郭少坤[2]
（1. 北京工业大学建筑工程学院 2. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室
3. 中国石油大学（北京）克拉玛依校区）

席岩，宁惠令，李军，等. 利用低熔点合金层提高井筒密封完整性数值模拟研究[J]. 石油机械，2026，54（10）：90-100.

Xi Yan，Ning Huiling，Li Jun，et al. Numerical simulation study on low-melting-point alloy layer to improve wellbore sealing integrity[J]. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：90-100.

摘要：页岩气井多级压裂或者储气库循环注采过程中，套管内载荷的交替变化是井筒产生微环隙，进而导致环空带压的主要原因。针对此，提出了在套管外部采用低熔点合金增加柔性层的思路，基于水泥石损伤理论建立了套管-合金层-水泥环-地层数值模型；考虑实际工程中的循环加卸载条件，计算了套管-合金层、合金层-水泥环界面处累积塑性应变，展示了其发展规律，量化了微环隙宽度的变化规律；研究了合金层厚度、井筒开次对微环隙产生与发展的影响规律。研究结果表明：在套管外部增加低熔点合金层后，套管-合金层、合金层-水泥环界面处产生的累积塑性应变显著小于常规井筒套管-水泥环界面处的累积塑性应变，有利于井筒密封完整性的保护；相同开次下，随着合金层厚度的增大，套管-合金层及合金层-水泥环界面的微环隙宽度显著减小；在同等厚度的合金层下，随着井深和井筒开次的增加，套管-合金层及合金层-水泥环界面的微环隙宽度不断增大。将覆有低熔点合金层的套管设置在井筒浅部地层，有利于建立井屏障，进而降低环空带压的风险。研究结果可为低熔点合金新材料在井筒密封完整性的应用及井屏障的建立方面提供理论支撑。

关键词：低熔点合金；循环载荷；累积塑性应变；微环隙；密封完整性；井筒开次
中图分类号：TE256 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202507082

Numerical Simulation Study on Low-Melting-Point Alloy Layer to Improve Wellbore Sealing Integrity

Xi Yan[1,2] Ning Huiling[1] Li Jun[2,3] Liu Gonghui[1] Lian Wei[2,3] Guo Shaokun[2]
（1. *College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing)*; 3. *China University of Petroleum (Beijing) at Karamay*）

Abstract: The alternating change of load in casing during multi-stage fracturing of shale gas wells or cyclic injection and production in gas storages is the main cause for the generation of micro-annulus in the wellbore, which in turn leads to sustained casing pressure (SCP). To address this issue, a novel approach was proposed to add a flexible layer of low-melting-point alloy on the external surface of the casing. Based on the cement damage

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目“CCUS工程多场耦合及跨时空尺度条件下井筒密封完整性失效机理及控制方法研究”（52374001）；国家自然科学联合基金项目“金属封隔层井下原位生成机理与控制方法研究”（U23B200103）；油气资源与工程全国重点实验室开放课题“CCUS井密封完整性失效演化机制与控制方法研究”（PRE/open-2408）。

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

theory, a casing-alloy layer-cement sheath-formation numerical model was established. Considering the cyclic loading and unloading conditions in actual engineering operations, the cumulative plastic strain at the casing-alloy layer or alloy layer-cement sheath interface was calculated, and its evolution was demonstrated; also, the variation of micro-annulus width was quantified. Furthermore, the effects of alloy layer thickness and well spudding cycle on the generation and growth of micro-annulus were identified. The results show that adding a low-melting-point alloy layer on the external surface of the casing allows the cumulative plastic strain at the casing-alloy layer or alloy layer-cement sheath interface to be much smaller than that at the casing-cement sheath interface in conventional wellbores, which is beneficial for protecting wellbore sealing integrity. Under the same spudding cycle, as the alloy layer thickness increases, the micro-annulus width at the casing-alloy layer and alloy layer-cement sheath interfaces decreases significantly. Under the same alloy layer thickness, as well depth and spudding cycles increase, the micro-annulus width at these interfaces continuously increases. Placing the casing with a low-melting-point alloy layer in shallow formations helps establish a well barrier and thereby reduces the risk of SCP. These findings provide theoretical support for the application of low-melting-point alloy as a new material in ensuring wellbore sealing integrity and establishing well barrier.

Keywords: low-melting-point alloy; cyclic loading; cumulative plastic strain; micro-annulus; sealing integrity; spudding cycle

0　引　言

多级压裂或者油气循环注采过程中，套管都会承受内压的循环加卸载作用。在循环加卸载作用下，套管承受的内压同时也会向水泥环传递，使得套管-水泥环界面出现塑性变形，且随着循环加卸载次数的不断增多最终产生微环隙，导致水泥环密封完整性失效[1-4]。因此，加强对微环隙的检测及井筒完整性的保护具有重要意义[5-6]。针对循环加卸载过程中套管-水泥环-地层井筒组合体微环隙的产生与发展，国内外学者采用室内试验和数值模拟的方法开展了一系列研究：Chen 等[7]、Deng 等[8]、Lian 等[9]研发了循环加卸载条件下微环隙产生和发展监测试验装置，通过开展室内试验，证明循环加卸载是微环隙产生与发展的主要原因，同时指出套管-水泥环界面是微环隙产生的主要位置。Xi 等[10]建立了循环加卸载条件下井筒组合体数值模型，基于岩石损伤理论计算了循环加卸载条件下套管-水泥环、水泥环-地层界面累积塑性应变，验证了套管-水泥环界面容易出现微环隙的结论，同时量化了微环隙的发展规律。文献[11-14]研究了循环加卸载作用下、不同井筒组合体条件下微环隙产生和发展的规律，指出采用减小套管内压、降低水泥环的弹性模量、提升水泥石屈服强度和套管-水泥环界面胶结强度均有利于降低微环隙产生的风险，同时还可以减缓微环隙的发展速度。综上，循环加卸载作用下套管-水泥环界面是微环隙产生和发展的主要区域，以往预防和控制微环隙产生和发展的方法集中在工程参数的控制及水泥环材料特性的优化方面。

针对水泥环密封完整性问题，部分学者指出可以通过在套管外部加入柔性层建立井屏障的方式，阻断流体在微环隙中窜流的路径。管志川等[15]提出在套管外部加入橡胶层，形成套管-橡胶层-水泥环-地层组合体，分析了水泥环内壁的受力及位移，指出在循环加卸载条件下，套管外部加入橡胶层有利于减小水泥环内壁的最大径向应力和塑性应变，进而达到降低微环隙产生风险的目的。但是当井筒处于温度、压力及腐蚀共同作用下，套管外部加入的橡胶层寿命较为有限，需要新材料来建立套管外部的柔性层，以达到降低微环隙产生风险的目的。Hmadeh 等[16]、Manataki 等[17]和 Zha 等[18]等通过室内试验指出，低熔点合金具有较好的力学性能且熔点较低，能够在井底实现熔化-凝固操作且最终形成合金塞，在弃置井中实现对井筒的密封。由此可以看出，低熔点合金具有密封井筒微环隙的潜力，但是目前尚未有研究指出利用低熔点合金降低套管-水泥环界面微环隙产生风险的方法。

考虑循环加卸载条件下套管-水泥环界面处微环隙产生和发展导致井筒密封完整性失效的问题，笔者提出了采用低熔点合金材料建立井屏障实现预防和控制微环隙产生与发展新思路，基于岩石力学损伤理论建立了套管-合金层-水泥环-地层组合体数值模型；分析了循环加卸载条件下套管-合

金层和合金层–水泥环界面微环隙的产生和发展规律；研究了合金层厚度、井筒开次和井深对微环隙产生与发展的影响规律，提出了采用低熔点合金建立井屏障的具体方法。研究结果可为复杂载荷作用下井筒密封完整性的控制与保护提供理论借鉴。

1　工程模型

常规井筒由套管–水泥环–地层组合体构成。多级压裂或者循环注采过程中，套管内压不断升高和降低，使得井筒组合体承受循环加卸载作用。在该过程中，套管内壁承受流体压力作用发生弹性变形，同时压力通过接触传力机制沿径向传递至水泥环内壁，使其产生弹塑性变形。在弹性变形阶段，套管和水泥环遵循胡克定律，应力–应变呈线性关系。当流体压力达到一定值时，由于套管为高强度金属材质依然处于弹性阶段，水泥环受力会超过屈服极限，导致材料进入塑性变形阶段。当井口压力卸载时，套管会恢复到原始状态，而套管–水泥环界面会出现法向拉力。随着加卸载次数的不断增加，累积塑性不断增大，界面处的拉力也会不断增大，当超过胶结强度时就会导致微环隙产生。针对此，前人提出在套管外壁加入柔性层用以降低水泥环微环隙产生与发展风险的思路[19]，考虑到橡胶在套管下入过程中不耐摩擦、容易被腐蚀等缺点，结合低熔点合金容易在套管外进行喷涂形成合金层的特点，提出了采用低熔点合金降低微环隙产生与发展的新思路。

低熔点合金是以铋锡合金（熔点为 137 ℃）、铋银合金（熔点为 270 ℃）为代表的熔点较低的合金，常温下其弹性模量和屈服强度相对于水泥环较高，具有更好的弹性性能[20]。由于合金熔点较低，易于采用喷涂的方式在套管外壁形成不同厚度的合金层，进而利用低熔点合金的弹性力学特性，吸收因循环加卸载产生的部分位移载荷，作用机理如图 1 所示。具体施工工艺为：套管下入前在其外部喷涂不同厚度的低熔点合金层，形成套管–合金层组合体，下入井底后形成套管–合金层–水泥环–地层组合体，利用合金层的弹性恢复能力抵抗循环加卸载过程中套管传递的作用力，进而达到减小水泥环微环隙宽度的目的。

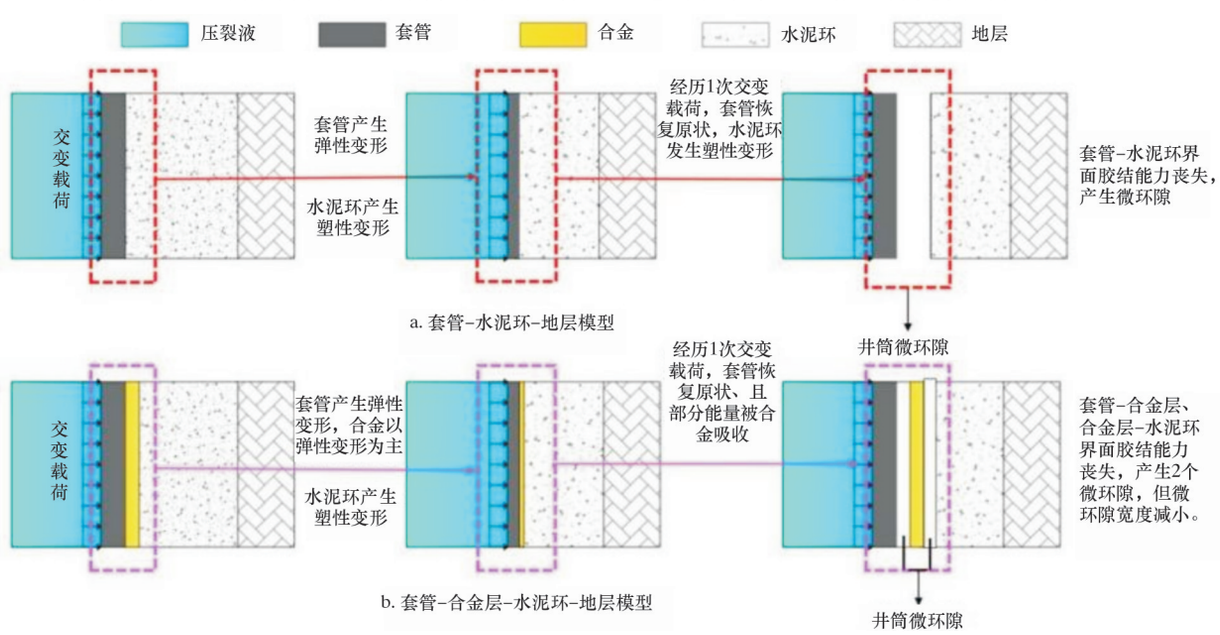


图 1　作用机理图

Fig. 1　Mechanism diagram

目前尚未有研究对方法的有效性进行分析，因此需要考虑实际工况对加入低熔点合金层前、后微环隙产生与发展的规律进行研究。考虑到套管–水泥环–地层组合体微环隙产生的风险区域为套管–水泥环界面，而加入低熔点合金层后的套管–合金层–水泥环–地层组合体则形成了套管–合金层、合金层–水泥环界面，需要对比在同等循环加卸载条件下，传统井筒组合体界面处与新井筒组合体处微环隙产生与发展的规律。

2　数值模拟

2.1　数值模型

选择某油田页岩气井实际井眼尺寸进行设定，

分别取一开（600 m处）、二开（1 200 m处）、三开（3 000 m处）的井筒作为研究对象。一开、二开、三开井眼直径分别为444.5、313.6和215.9 mm。表层套管、技术套管和生产套管的壁厚和外径分别为13.84、13.06、9.17 mm和339.7、244.5、139.7 mm。

模型建立过程中，分别考虑油层套管外壁不存在和存在不同厚度低熔点合金层的实际，建立相应的数值模型。为分析不同合金层厚度对井筒微环隙宽度的影响，套管外壁合金层厚度分别设为5、10、15和20 mm。为避免边界效应对水泥环应力-应变产生畸变影响，将模型的尺寸设置为最大井眼直径的10倍以上，具体尺寸为5 m×5 m×5 m。

在边界条件设置上，采用零位移、零转角来模拟井筒组合体在地层中的稳定条件。在载荷设置上，套管内壁均匀布置内压，采用Predefined Field功能对模型施加地应力。模型采用扫掠网格和变密度方法进行网格划分，单元类型为四结点双线性平面应变四边形单元。不同开次下数值模型如图2所示。此外，在套管-合金层、合金层-水泥环界面处加入Cohesive内聚力单元，用以分析循环加卸载过程中累积塑性应变的发展规律。

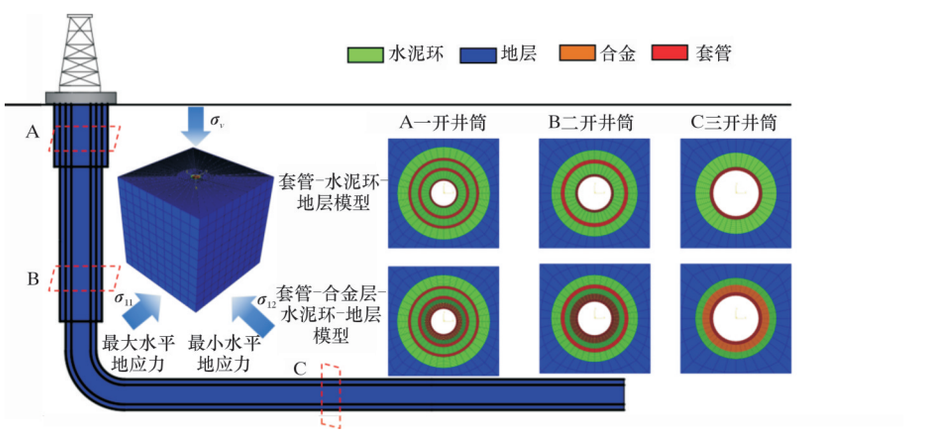


图2　不同开次下的数值模型

Fig. 2　Numerical models under different spudding cycles

2.2　破坏准则

多级压裂过程中循环加卸载作用下，材料的塑性应变不断累积，达到一定程度时会超过套管-水泥环之间的胶结强度，水泥从套管外壁上剥离最终形成井筒微环隙。针对该情况，基于Cohesive内聚力损伤进行数值模拟，分析套管-水泥环、套管-合金层及合金层-水泥环界面处的累积塑性应变。

该过程采用基于能量准则的BK损伤模型进行计算[21]：

$$G_{Cn}+\left(G_{Cs}-G_{Cn}\right)\left(\frac{G_{Cs}}{G_T}\right)^{\gamma}=G_C \tag{1}$$

$$\begin{cases} G_S=G_s+G_t \\ G_T=G_n+G_s+G_t \\ G_C=G_{Cn}+G_{Cs}+G_{Ct} \end{cases} \tag{2}$$

式中：G_{Cn}、G_{Cs}和G_{Ct}分别为法向和第1、第2切向上的临界能量，J；G_n、G_s和G_t分别为法向和第1、第2切向上的能量耗散，J；γ为节点位移复合比，无量纲。

Cohesive单元相关参数设置如下：法向刚度4.5 MPa，切向刚度0.2 MPa，临界能量100 J/m^2，结胶强度8.5 MPa。

微环隙的宽度根据有限单元模型计算的塑性应变结果得出，将塑性应变计算为微环隙宽度的公式如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_t=\ln(1+\varepsilon_n) \\ \sigma_t=\sigma_n(1+\varepsilon_n) \\ \varepsilon_{t,pl}=\varepsilon_{t,l}-\varepsilon_{t,el} \\ L=D\varepsilon_{t,pl} \end{cases} \tag{3}$$

式中：ε_t、ε_n分别为真实应变和名义应变，%；σ_t、σ_n分别为真实应力和名义应力，MPa；$\varepsilon_{t,pl}$、$\varepsilon_{t,el}$和$\varepsilon_{t,l}$分别为真实塑性应变、真实弹性应变和总应变，%；L为微环隙宽度，D为水泥环厚度，mm。

2.3　参数设置

在井筒组合体材料参数设置上，套管的弹性模量为206 GPa，泊松比为0.3。水泥环力学性能符合Mohr-Coulomb准则，弹性模量为8 GPa，泊松比为0.16，内摩擦角和膨胀角分别为26°和12°，黏聚力为8 MPa。

考虑到低熔点合金层处于套管与水泥环之间，合金层的弹性模量、屈服强度等相关力学参数根

据文献[17]和[20]的试验数据进行设置，合金层在数值模拟计算中采用理想的弹塑性模型。为了反映不同井筒开次下合金的力学性能，采用热力耦合的方式对不同井筒开次下对应的地层设置相应的温度，使合金层在不同地层环境下表现出不同的力学性能，体现合金层对微环隙产生与发展的抑制作用。

套管的有效内压计算考虑在压裂过程中井口压力、静液柱压力及压裂过程中的摩擦阻力。取井口压力为 85 MPa，压裂液密度为 1.05×10^3 kg/m^3，摩阻系数取 2.648×10^{-3} MPa/m。井口压力、地应力及地层力学特性参数基于实际井所处的条件进行设置。为了简化计算，井筒压裂时间采用 4 h，加卸载速率为 14 MPa/min，压裂级数设置为 20 次。不同开次地层和合金的力学性能参数如表 1 所示。

表 1　不同井筒开次下地层力学性能参数

Table 1　Mechanical property parameters of formations under different spudding cycles

开次	弹性模量/GPa		泊松比		合金屈服强度/MPa	水平地应力/MPa	
	地层	合金	地层	合金		最大	最小
一开	15.51	43.79	0.315	0.331	67.25	17.89	6.67
二开	19.57	43.12	0.287	0.332	59.88	32.29	19.27
三开	31.76	41.40	0.202	0.337	45.14	75.49	57.07

3　结果与讨论

3.1　数值模型验证

为了验证数值模型的正确性，首先对压裂 10 次后的套管-水泥环界面进行分析。取一开（600 m 处）井筒进行模型验证，在参数设置上参照前人研究过程中的井筒几何和力学参数[22]，在计算条件上均假定套管未产生微变形。模型计算结果如图 3 所示。

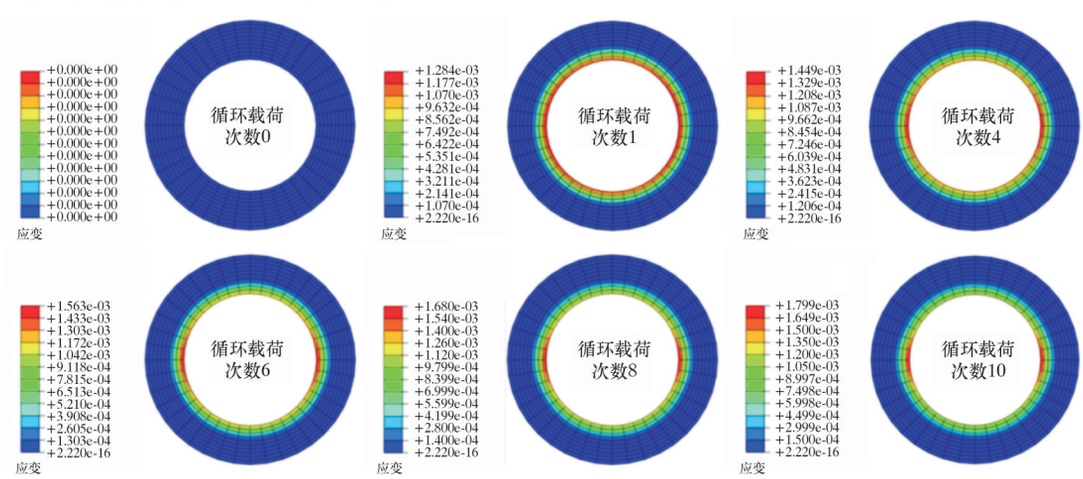


图 3　循环加卸载条件下水泥环塑性应变分布规律

Fig. 3　Plastic strain distribution of cement sheath under cyclic loading and unloading

由图 3 可以看出：初始状态下没有塑性应变，套管-水泥环界面紧密结合。初次加卸载完成后，水泥环出现塑性应变，主要分布在内壁的左右两侧；随着循环加卸载次数的不断增多，累积塑性变形程度不断加剧，且影响范围有所增大。第 1 次循环加卸载后塑性应变为 0.128%，经历 6 次和 10 次循环加卸载后，等效塑性应变为 0.156% 和 0.179%，分别增长 21.8% 和 39.8%。

为进一步对比微环隙产生和发展的规律，计算每次循环加卸载后微环隙的宽度，结果如图 4 所示。由图 4 可知，水泥环在初次加卸载后形成微环隙，并且随着循环加卸载次数呈线性增大的规律，该结果与文献[22]保持一致，平均误差为 6.97%，证明本研究模型的正确性。

3.2　微环隙发展规律对比

基于前述模型，分析套管-水泥环-地层组合体和套管-合金层-水泥环-地层组合体在循环加卸载作用下微环隙产生和发展的规律。为了准确反映合金层对井筒微环隙的影响，套管-水泥环-地层组合体和套管-合金层-水泥环-地层组合体在网格划分、边界条件设置及加载方式等方面均采用相同的设置。考虑到在套管外壁增加低熔点合金

层后，原来的套管–水泥环界面变为了套管–合金层界面和合金层–水泥环界面，因此，对常规井筒的套管–水泥环界面处的累积塑性应变进行分析，对加入合金层的套管–合金层界面和合金层–水泥环界面处的累积塑性应变进行分析。计算过程中取三开井筒，套管外壁喷涂 5 mm 低熔点合金层，计算结果如图 5 所示。

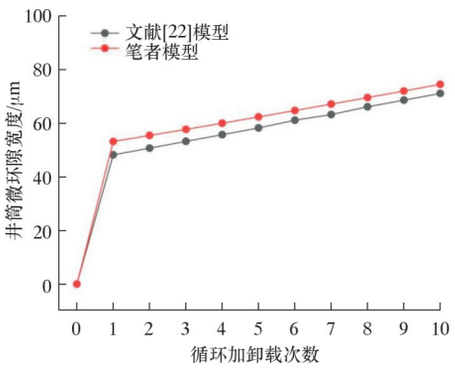


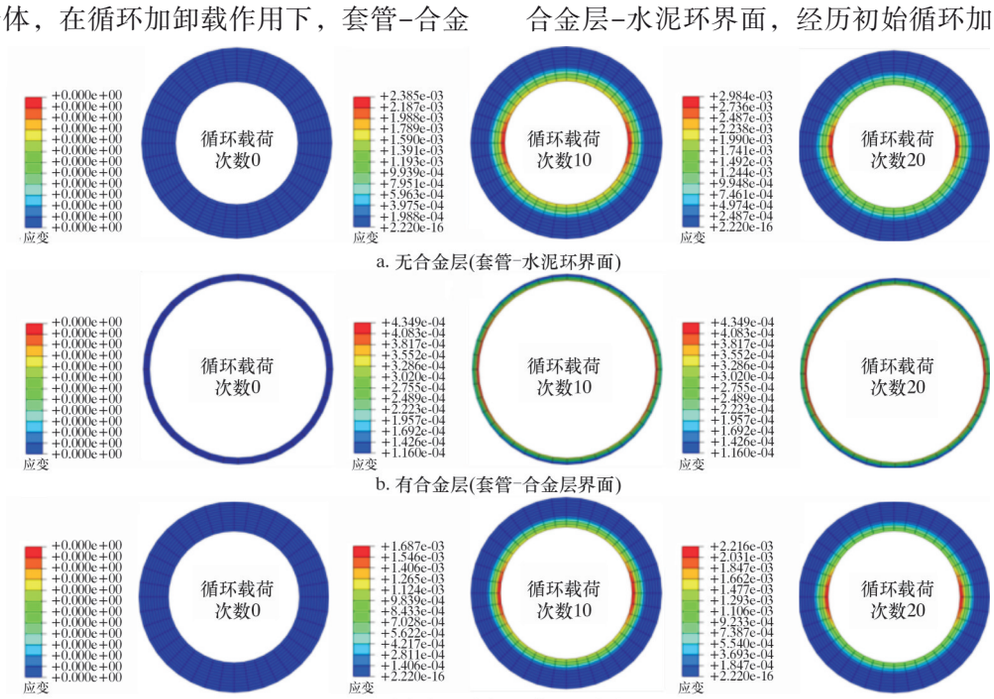
图 4　循环加卸载下水泥环等效塑性应变变化曲线

Fig. 4　Equivalent plastic strain curves of cement sheath under cyclic loading and unloading

由图 5 以看出：①对于套管–水泥环–地层井筒组合体，在循环加卸载作用下，等效塑性应变区域主要分布在水泥环内壁的左右两侧；随着循环加卸载的进行，累积塑性应变不断增大；当循环加卸载达到 10 次和 20 次时，累积塑性应变分别为 0. 24% 和 0. 30%。②对于套管–合金层–水泥环–地层井筒组合体，在循环加卸载作用下，套管–合金层界面和合金层–水泥环界面处也出现了累积塑性应变，但是相比常规井筒明显较小；当进行 10 次压裂时，套管–合金层界面、合金层–水泥环界面等效塑性应变分别为 0. 043%、0. 17%，相比于套管–水泥环–地层井筒组合体分别减小了 83. 33% 和 29. 17%；当进行 20 次压裂时，套管–合金层界面、合金层–水泥环界面等效塑性应变分别为 0. 043% 和 0. 22%，相比于套管–水泥环–地层井筒组合体分别减小了 85. 16% 和 26. 67%。

由此可知，在套管外壁增加低熔点合金层后，可有效降低井筒界面处累积塑性应变产生的风险，有利于井筒密封完整性的保护。

为进一步量化循环加卸载条件下界面处微环隙产生与宽度的发展规律，计算不同模型界面处微环隙的宽度，结果如图 6 所示。由图 6 可知：①对于套管–合金层界面，经过第 1 次循环加卸载后，初始塑性应变导致微环隙产生（宽度为 16. 57 μm），相比于常规条件下套管–水泥环界面微环隙（宽度 73. 41 μm）减小了 77. 43%；随着循环加卸载次数的不断增多，套管–合金层界面的微环隙宽度不再发生变化，而常规条件下套管–水泥环界面微环隙则呈线性增大的趋势；经历 20 次循环加卸载后，套管–合金层界面微环隙宽度仍为 16. 57 μm，相比于常规条件下套管–水泥环界面微环隙（宽度 113. 71 μm）减小了 85. 42%。②对于合金层–水泥环界面，经历初始循环加卸载后，初



a. 无合金层(套管–水泥环界面)

b. 有合金层(套管–合金层界面)

c. 有合金层(合金层–水泥环界面)

图 5　不同井筒条件下累积塑性应变分布规律

Fig. 5　Cumulative plastic strain distribution under different wellbore conditions

始塑性应变导致微环隙产生（宽度为49.30 μm），相比于常规条件下套管–水泥环界面微环隙（宽度73.41 μm）减小了32.84%；随着循环加卸载次数的不断增多，合金层–水泥环界面的微环隙呈现线性增加的规律（增速为2.24 μm/次），这与常规条件下套管–水泥环界面微环隙的增速（为2.02 μm/次）相近；经历20次循环加卸载后，合金层–水泥环界面微环隙宽度为84.43 μm，相比于常规条件下套管–水泥环界面微环隙（宽度113.71 μm）减小了25.75%。

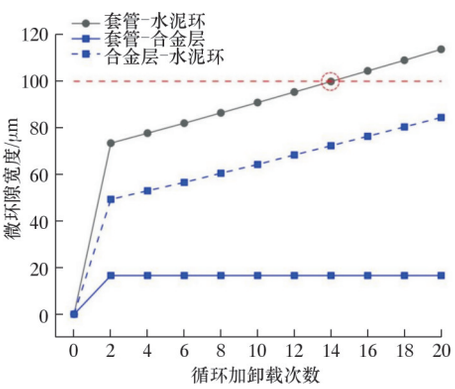


图6　不同井筒条件下微环隙宽度变化曲线

Fig. 6　Micro-annulus width variation under different wellbore conditions

由此可见，采用套管–合金层–水泥环–地层组合体模型后，套管–合金层界面、合金层–水泥环界面处产生的初始微环隙的宽度及微环隙宽度的变化趋势都得到了有效降低。之所以出现这种情况，是因为当套管外壁附着一层合金层后，应力传递方式变为由套管传递至合金层再传递至水泥环，应力传递路径发生了改变。当应力波经过合金层时，由于合金层具有良好的弹性性能，能够吸收因循环加卸载产生的部分位移载荷，对水泥环起到了缓冲作用，减小了水泥环受力，抑制了井筒内微环隙的发展。基于前人分析，如果微环隙流体窜流临界宽度在100 μm，多级压裂在14次时常规条件下的井筒密封完整性已经失效，而加入合金层的井筒依然可以保持较好的密封完整性。

4　敏感性因素分析

4.1　合金层厚度

基于前述分析，套管外壁合金层可以有效拟制水泥环微环隙产生和发展。为进一步量化低熔点合金层厚度δ对微环隙的影响规律，取一开井筒600 m处组合体进行研究，设定套管外壁低熔点合金层厚度分别为5、10、15和20 mm，套管内压循环加卸载20次，模拟结果如图7所示。由图7可知：①对于套管–合金层界面，随着合金层厚度的不断增大，累积塑性应变不断减小；当套管外壁合金层厚度δ分别为5、10、15和20 mm时，累积塑性应变分别为0.043%、0.031%、0.030%和0.029%，相比套管–水泥环条件下（累积塑性应变0.30%）分别减小了85.66%、89.67%、90.00%、90.33%。②对于合金层–水泥环界面，随着合金层厚度的不断增大，累积塑性应变不断减小；当套管外壁合金层厚度分别为5、10、15和20 mm时，累积塑性应变分别为0.22%、0.16%、0.11%和0.073%，相比套管–水泥环条件下（累积塑性应变0.30%）分别减小了26.67%、46.67%、63.33%、75.67%。

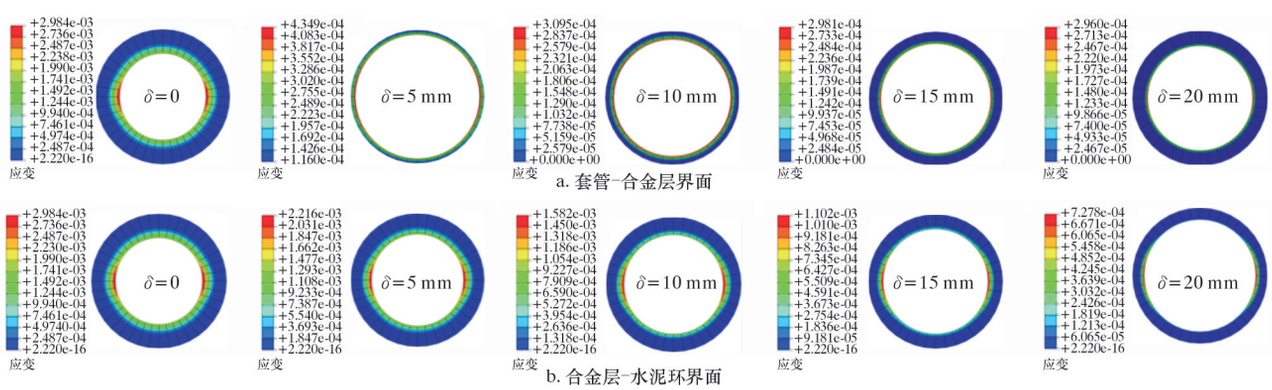


图7　不同合金层厚度下累积塑性应变分布规律

Fig. 7　Cumulative plastic strain distribution under different alloy layer thicknesses

基于累积塑性应变的计算分析微环隙的宽度，结果如图8所示。由图8可以看出：①合金层厚度越大，同等条件下合金层–套管及合金层–水泥环之间的微环隙宽度越小。②对于套管–合金层之间的微环隙，在合金层厚度小于10 mm条件下，套管–合金层之间的微环隙经历初次加卸载后不再增

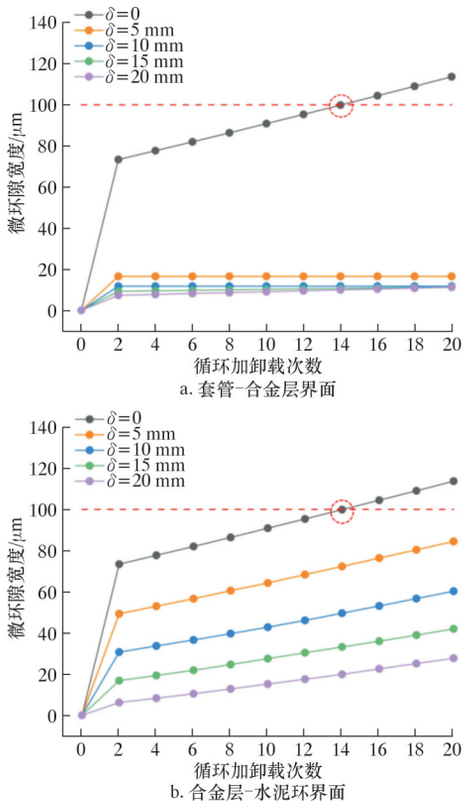


图 8　不同合金层厚度下井筒微环隙宽度变化曲线

Fig. 8　Wellbore micro-annulus width variation under different alloy layer thicknesses

大；当合金层厚度大于 10 mm 时，随着循环加卸载的进行微环隙宽度呈线性发展规律，但增长缓慢；当合金层厚度分别为 5、10、15 和 20 mm 时，微环隙宽度分别为 16. 57、11. 79、11. 36 和 11. 28 μm，相比套管–水泥环条件下（微环隙宽度 113. 71 μm）分别减小了 97. 14、101. 92、102. 35 和 102. 43 μm。③对于合金层–水泥环之间的微环隙，经历初次循环加卸载后，微环隙增宽度与压裂次数呈线性关系，且增长趋势几乎保持不变；套管外壁附着合金层厚度分别为 5、10、15 和 20 mm 时，微环隙宽度为 84. 43、60. 26、41. 98 和 27. 73 μm，相比于套管–水泥环条件下（微环隙宽度 113. 71 μm）分别减小了 29. 28、53. 45、71. 73、85. 98 μm。

之所以出现这样的规律，主要是因为合金层相比水泥环具有良好的弹性性能，在循环加卸载作用下主要以弹性变形为主，在卸载后能够较高程度地恢复到原状；当合金层厚度增大时，合金层吸收塑性应变能的能力增强，使微环隙宽度减小。

4.2　井筒开次

不同开次下的井筒组合体结构不同，且所处的地层深度、地质力学环境及套管内压不同，进而加入合金层对于微环隙产生和发展的抑制作用也可能不同。针对此，分析不同井筒开次下、不同厚度的低熔点合金层对井筒微环隙产生和发展的影响规律，用以评价和判断低熔点合金层套管所适用的最佳井筒开次。

图 9 和图 10 分别为不同井筒开次下套管–合金层、合金层–水泥环界面处累积塑性应变分布。由图 9 和图 10 可知：①对于套管–合金层界面，当套管外壁合金层厚度相同时，随着井筒开次的增加，套管–合金层界面的塑性应变增大。这主要是因为合金层受到的井筒内压和地应力差值不断增加，导致套管–合金层界面的塑性应变增大。常规条件下一开、二开、三开井筒套管–水泥环界面累积塑性应变分别为 0. 30%、0. 28% 和 0. 32%。当合金层

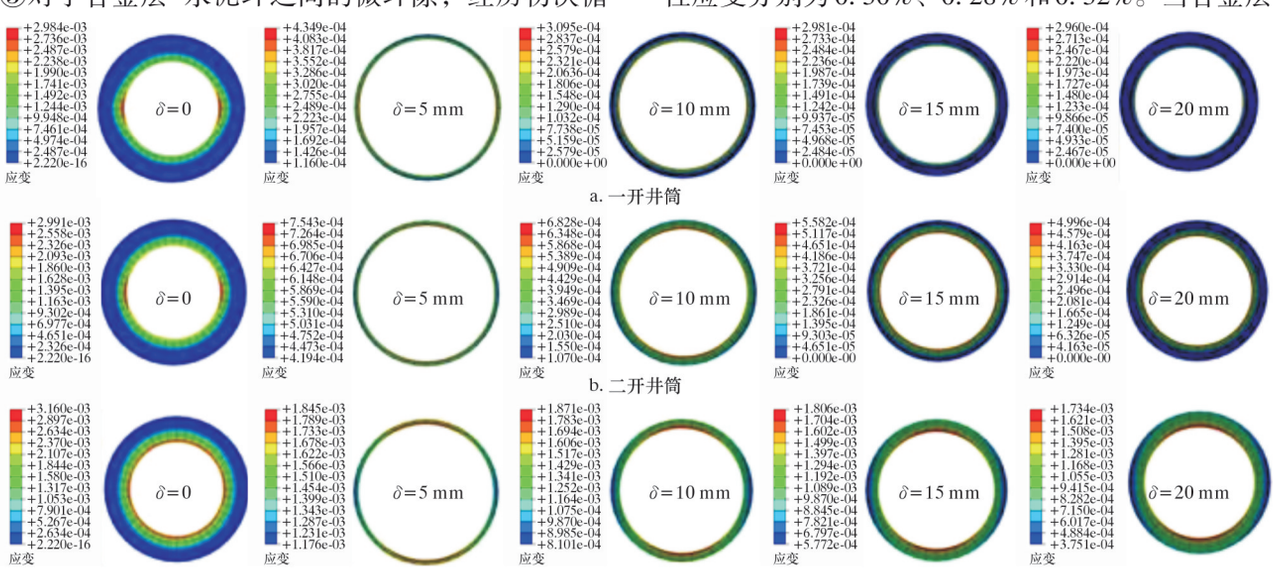


图 9　不同开次下套管–合金层界面累积塑性应变

Fig. 9　Cumulative plastic strain at casing – alloy layer interface under different spudding cycles

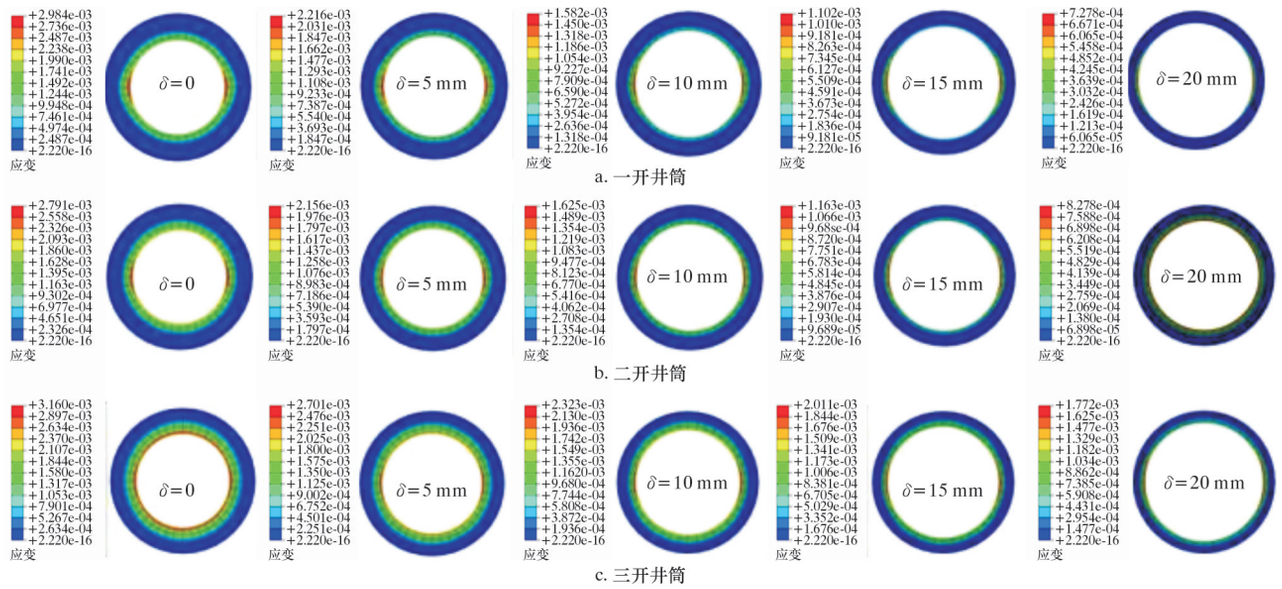


图 10　不同开次下合金层–水泥环界面累积塑性应变

Fig. 10　Cumulative plastic strain at alloy layer – cement sheath interface under different spudding cycles

厚度为 10 mm 时，一开、二开、三开套管–合金层界面累积塑性应变分别为 0.031%、0.068% 和 0.19%，相对套管–水泥环界面分别减小 89.67%、86.73% 和 40.53%。②对于合金层–水泥环界面，当套管外壁合金层厚度相同时，随着井筒开次的增加，合金层–水泥环界面的塑性应变同样增大；当合金层厚度为 10 mm 时，一开、二开、三开合金层–水泥环界面累积塑性应变分别为 0.15%、0.16%、0.23%，相对套管–水泥环界面分别减小 50.00%、42.86% 和 28.13%。

基于前述结果进一步计算井筒微环隙的宽度，结果如图 11 所示。由图 11 可知：

（1）对于套管–合金层之间的微环隙，一开、二开、三开条件下初始微环隙要比常规条件下小，且随着循环加卸载次数的增多，增长速率也要显著小于常规条件下；此外，随着开次的不断增加，初始微环隙宽度在增大。以合金层厚度 20 mm 为例，在套管–水泥环条件下，一开、二开、三开井筒套管–水泥环界面微环隙宽度分别为 113.71、106.32、120.61 μm，在套管–合金层–水泥环条件下，一开、二开、三开套管–合金层界面的微环隙宽度分别为 11.28、19.03、66.12 μm，相对套管–水泥环界面分别减小 102.43、87.29、54.49 μm。

之所以出现这种情况，主要因为当井筒开次增多时，地应力与套管内压的差值增大，随着地层的深入，地温逐渐升高，合金层自身的屈服强度及弹性模量降低，力学性能劣化，对井筒的保护性能减弱。

（2）对于合金层–水泥环之间的微环隙，一开、二开、三开条件下初始微环隙要比常规条件下小，且随着循环加卸载次数的增多，一开、二开的增长速率与常规条件下保持相同；三开条件下随着合金层厚度的不断增大，微环隙的增长速率逐步增加并且超过了常规条件。以合金层厚度

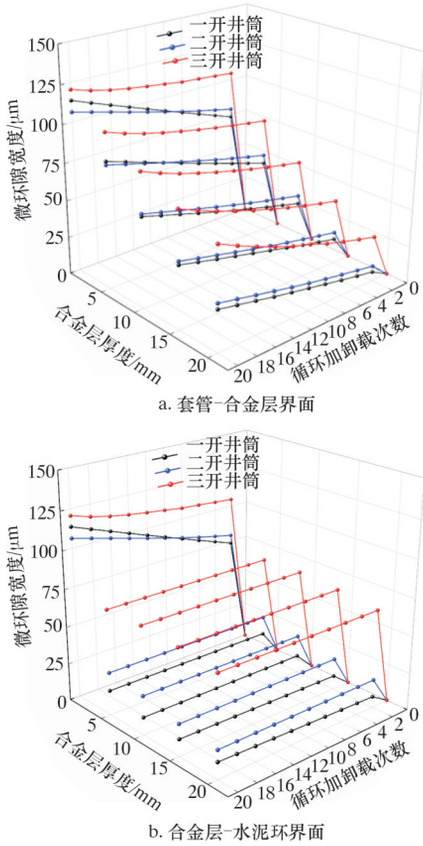


图 11　不同井筒开次下微环隙宽度变化规律图

Fig. 11　Micro-annulus width variation under different spudding cycles

20 mm为例，在套管-水泥环条件下，一开、二开、三开井筒套管-水泥环界面微环隙宽度分别为113.71、106.32和120.61 μm，在套管-合金层-水泥环条件下，一开、二开、三开合金层-水泥环界面的微环隙宽度分别为11.28、19.03、66.12 μm，相对套管-水泥环界面分别减小102.43、87.29、54.49 μm。此外，在三开条件下，当合金层厚度分别为5、10、15、20 mm时，随着循环加卸载的进行，微环隙宽度的平均增长率分别为1.29、1.60、1.84、2.06 μm/次。

之所以出现这种情况，是因为在三开井筒下温度过高，合金层力学性能劣化，自身弹性模性能降低，合金塑性变形明显。当合金层厚度增加时，合金自身的力学性能缺陷进一步放大，在循环加卸载下微环隙宽度增速增大。

5　结论及建议

（1）基于损伤力学理论建立了套管-水泥环-地层及套管-合金层-水泥环-地层累积塑性应变模型，验证了套管-水泥环-地层模型的正确性，对比了不同合金层厚度和不同井筒开次下微环隙的发展规律。研究结果表明，套管外部增加合金层后有利于降低微环隙产生和发展的风险。

（2）在相同井筒开次下，随着合金层厚度的增大，套管-合金层界面和合金层-水泥环层界面的微环隙宽度减小，合金层对微环隙发展的抑制能力越强。当合金层厚度相同时，随着井深和井筒开次的不断增加，套管-合金层界面和合金层-水泥环界面之间的微环隙宽度不断增大，井筒窜流的风险不断增大。这是因为低熔点合金力学特性受温度影响，导致弹性模量及屈服强度降低。

（3）在套管外部增加一定厚度的低熔点合金层有利于微环隙产生与发展的预防和控制，能够显著降低环空带压的风险。此外，建议将喷涂了低熔点合金层的套管设置在一开或者二开井段的浅部地层。

参　考　文　献

[1] 赵效锋，管志川，史玉才，等. 固井界面微环隙产生机制及计算方法[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2017，41（5）：94-101.
Zhao Xiaofeng，Guan Zhichuan，Shi Yucai，et al. An assessment method for occurrence of micro-annular fractures on cementing interfaces of oil and gas well casing [J]. Journal of China University of Petroleum （Edition of Natural Science），2017，41（5）：94-101.

[2] 王捷力，董雪林，高德利. 超深气井环空带压分析与控制研究[J]. 钻采工艺，2024，47（4）：65-73.
Wang Jieli，Dong Xuelin，Gao Deli. Research on analysis and control of annular pressure in ultra-deep gas wells[J]. Drilling & Production Technology，2024，47（4）：65-73.

[3] 郭辛阳，吴涌泉，步玉环，等. 变内压条件下井筒完整性的弹塑性分析[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2018，42（3）：64-69.
Guo Xinyang，Wu Yongquan，Bu Yuhuan，et al. Elastoplastic analysis of wellbore integrity under varying internal casing pressure[J]. Journal of China University of Petroleum （Edition of Natural Science），2018，42（3）：64-69.

[4] 王典，李军，张伟，等. 吉木萨尔页岩油井水泥环性能评价[J]. 新疆石油天然气，2023，19（4）：49-55.
Wang Dian，Li Jun，Zhang Wei，et al. Performance evaluation of the cement sheath in Jimsar shale oil wells [J]. Xinjiang Oil & Gas，2023，19（4）：49-55.

[5] 宋学锋，李志彬，刘金铭，等. 深层深井井筒完整性检测技术发展现状[J]. 新疆石油天然气，2024，20（4）：8-18.
Song Xuefeng，Li Zhibin，Liu Jinming，et al. Development status of wellbore integrity inspection technology for deep strata and deep wells[J]. Xinjiang Oil & Gas，2024，20（4）：8-18.

[6] 于永金，夏修建，王治国，等. 深井、超深井固井关键技术进展及实践[J]. 新疆石油天然气，2023，19（2）：24-33.
Yu Yongjin，Xia Xiujian，Wang Zhiguo，et al. Progress and application of the key technologies of deep and ultra-deep well cementing [J]. Xinjiang Oil & Gas，2023，19（2）：24-33.

[7] Chen Shuo，Jin Jianzhou，Shen Jiyun，et al. Experimental study on cement sheath integrity based on fiber Bragg grating technology [J]. Earth and Environmental Science，2021，816（1）：107226.

[8] Deng Kuanhai，Yuan Yue，Hao Yi，et al. Experimental study on the integrity of casing-cement sheath in shale gas wells under pressure and temperature cycle loading [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2020，195：107548.

[9] Lian Wei，Li Jun，Tao Qian，et al. Formation mechanism of continuous gas leakage paths in cement sheath during hydraulic fracturing[J]. Energy Science & Engineering，2020，8（7）：2527-2547.

[10] Xi Yan, Yao Yu, Guo Xueli, et al. Failure evaluation mechanism of cement sheath sealing integrity under casing eccentricity during multistage fracturing [J]. Petroleum Science, 2024, 21 (5): 3428-3445.

[11] Jiang Jiwei, Li Jun, Liu Gonghui, et al. Numerical simulation investigation on fracture debonding failure of cement plug/casing interface in abandoned wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 192: 107226.

[12] Ren Zhenkun, Xi Yan, Jiang Hailong, et al. Experimental and numerical simulation on the generation and development of cumulative plastic strain of cement sheath in salt cavern gas storage well [J]. Energy Science & Engineering, 2024, 8 (7): 2427-2547.

[13] Li Jun, Xi Yan, Tao Qian, et al. Experimental investigation and numerical simulation of the emergence and development of micro-annulus in shale gas wells subjected to multistage fracturing [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 78: 103314.

[14] 闫炎，管志川，徐申奇，等. 体积压裂过程中固井界面微环隙扩展的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2020，44 (3)：66-73.
Yan Yan, Guan Zhichuan, Xu Shenqi, et al. Numerical simulation on micro-annulus propagation of cementing interface during hydraulic fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44 (3): 66-73.

[15] 管志川，李成，赵效锋，等. 一种带保护层的套管及其环空密封性[J]. 中国石油大学学报（自然科学版)，2021，45 (3)：75-81.
Guan Zhichuan, Li Cheng, Zhao Xiaofeng, et al. A new casing with protective layer and its annular sealing performance [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45 (3): 75-81.

[16] Hmadeh L, Manataki A, Jaculli M A, et al. A sealability study on bismuth-tin alloys for plugging and abandonment of wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 2024, 29 (7): 3500-3515.

[17] Manataki A, Hmadeh L, Sørensen B E, et al. The effect of well temperature on the microstructure and the mechanical performance of bismuth-based plugs in well plugging and abandonment operations [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 242: 213245.

[18] Zha Chunqing, Cui Tengfei, Wang Wei, et al. Study on the influence of casing surface morphology on the plugging performance of downhole CO_2 plugging with Sn58Bi [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (20): 9249.

[19] 中国石油大学（华东）. 气井套管环空密封完整性失效预防装置及预防方法：CN201710700567.3[P]. 2017-11-07.
China University of Petroleum (East China). Preventive device and method for integrity failure of casing annulus seal in gas wells: CN201710700567.3 [P]. 2017-11-07.

[20] Hmadeh L, Jaculli M A, Vedvik N, et al. The effect of temperature on the sealability of bismuth - tin alloy plugs [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 241: 213107.

[21] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56 (4): 439-449.

[22] 席岩，李军，陶谦，等. 循环载荷作用下微环隙的产生及演变[J]. 断块油气田，2020，27 (4)：522-527.
Xi Yan, Li Jun, Tao Qian, et al. Emergence and evolution of micro-annulus under cyclic loading [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27 (4): 522-527.

第一作者简介：席 岩，副教授，生于1985年，2019年毕业于中国石油大学（北京）油气井工程专业，获博士学位，现从事井筒完整性方面的研究工作。地址：(100124) 北京市朝阳区。email：xiyan@bjut.edu.cn。

通信作者：李 军，教授。email：lijun446@vip.163.com。

修改回稿日期：2026-04-05

（本文编辑 王刚庆）