◀专题论文▶

套管变形井压裂用超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦结构设计*

喻成刚[1] 杨 建[1] 付玉坤[1] 王 康[1] 姜 杰[1] 石昌帅[2] 梅 蕾[1]
（1. 中国石油西南油气田分公司工程技术研究院 2. 西南石油大学机电工程学院）

喻成刚，杨建，付玉坤，等. 套管变形井压裂用超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦结构设计［J］. 石油机械，2025，53（10）：72-78.

Yu Chenggang，Yang Jian，Fu Yukun，et al. Spiral slip structural design for ultra-small diameter dissolvable bridge plug in hydraulic fracturing of casing deformation wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：72-78.

摘要：随着四川盆地页岩气勘探开发逐步向深层迈进，地层温度压力更高、水平段更长、施工压力更大，套管变形井数量显著增加，套管变形程度也愈发严重。传统可溶桥塞受外径大小限制，在套管变形井下入时存在遇阻、遇卡等问题，导致不能顺利下放至目的层段，影响正常层段压裂施工作业。为此，设计了一种螺旋式卡瓦机构，建立小直径可溶桥塞+螺旋卡瓦+套管组合的有限元模型，并对螺旋卡瓦的螺距、圈数、旋向进行数值模拟分析与室内验证。研究结果表明：随着螺旋卡瓦螺距和圈数的增加，螺旋卡瓦最大锚定力均呈现减小趋势，螺旋卡瓦螺距推荐40 mm、螺旋卡瓦圈数推荐1圈；螺旋卡瓦旋向与螺旋胀锥旋向相反时，超小直径可溶桥塞的锚定性能更好；螺旋卡瓦最大锚定力为502.3 kN，可满足套管变形井条件下小直径锚定大环空的分段压裂需求。所得结论可为超小直径可溶性桥塞设计提供参考。

关键词：套变井；超小直径可溶桥塞；螺旋卡瓦；结构设计；仿真模拟
中图分类号：TE925 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202503087

Spiral Slip Structural Design for Ultra-Small Diameter Dissolvable Bridge Plug in Hydraulic Fracturing of Casing Deformation Wells

Yu Chenggang[1] Yang Jian[1] Fu Yukun[1] Wang Kang[1] Jiang Jie[1] Shi Changshuai[2] Mei Lei[1]
（1. *Engineering Technology Research Institute*, *PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company*; 2. *School of Mechanical Engineering*, *Southwest Petroleum University*）

Abstract: As shale gas exploration and development in the Sichuan Basin progressively advances into deeper formations, the formation temperature and pressure become higher, the horizontal sections grow longer, and the operational pressures increase significantly. Consequently, there has been a notable rise in the number of casing deformation wells, and the degree of casing deformation is becoming more and more serious. Traditional dissolvable bridge plugs often encounter obstruction and sticking issues when running in casing deformation wells due to the limitation of their outside diameter, resulting in difficulties in smoothly lowering them to the target section and affecting normal staged fracturing operations. To address this issue, a spiral anchoring mechanism was designed, a finite element model of small-diameter dissolvable bridge plug + spiral slip + casing was established, and numerical simulation analysis and laboratory validation were conducted on the pitch, number of turns and thread orientation of the spiral slip. The study results show that as the pitch and number of turns of the spiral slip increase, the

* 基金项目：中国石油西南油气田分公司科技项目“多参数实时监控可溶桥塞先导性研究”（202517203）。

maximum anchoring force of the spiral slip shows a downward trend. The pitch of spiral slip is recommended to be 40 mm, and the number of turns of spiral slip is recommended to be 1. Meanwhile, when the thread orientation of the spiral slip is opposite to that of the spiral expansion cone, the anchoring performance of the ultra-small diameter dissolvable bridge plug is better. The maximum anchoring force of the spiral slip reaches 503.2 kN, meeting the requirements of staged fracturing in casing deformation wells where small-diameter anchoring in large annulus is needed. The conclusions drawn provide references for the design of ultra-small diameter dissolvable bridge plugs.

Keywords: casing deformation well; ultra-small diameter dissolvable bridge plug; spiral slip; structural design; simulation

0　引　言

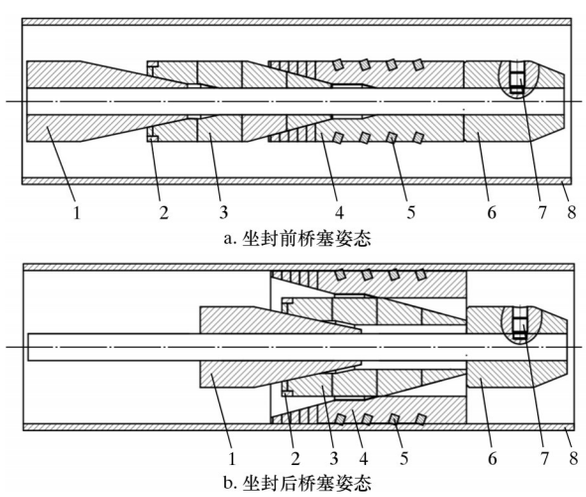
随着页岩气勘探开发向深层迈进，井底温度压力更高、水平段更长、施工压力更大，井下套管变形现象逐渐增多。常规桥塞受结构和外径大小限制，往往难以有效地通过严重变形井段，影响整个压裂改造作业。为解决这一问题，小直径桥塞的攻关研究成为国内学者研究的重点。李修文等[1]研究发现套管变形严重，需要采用小直径桥塞通过套管变形油水井封堵底部层。王旭等[2]针对井下套管出现变形情况及套管补贴后导致内径减小情况，设计出小直径桥塞，直径比标准桥塞减小8~10 mm。张晓燕等[3]研究小直径桥塞在分层治理工作时，减少套管变形对于桥塞性能的重要性。金平等[4]研究了小直径桥塞，解决了套管出现损伤时高压堵水、低压堵漏问题。卢新甫等[5]研究了小直径桥塞在不同井下环境的应用情况，并通过现场试验进行了验证。李晓龙[6]研究了小直径桥塞技术在油田注水开发过程中，桥塞在套管变形井封堵效果差及作用时间短的问题。苗玉礼等[7]针对油水井的套管破漏、缩径变形、错断等问题，提出采用小直径可取式桥塞可以有效降低套管内径变化的影响。LIU Q. Y. 等[8]设计的小直径桥塞具有内部通道大、材料可溶解等技术优势。王方明等[9]研究小直径可溶桥塞的结构对于桥塞锚定效果及承载能力的影响，并对锚定部分进行优化设计。雷群等[10]指出小直径可溶桥塞是高效改造页岩气套管变形井的关键工具。何明舫等[11]研究了侧钻水平井固井压裂技术，对小直径桥塞的结构和材料进行了研究。但均未对用于严重套管变形井的超小直径可溶桥塞的锚定卡瓦结构进行攻关研究。

为此，笔者通过设计一种螺旋式卡瓦机构，建立小直径可溶桥塞+螺旋卡瓦+套管组合的有限元模型，并对螺旋卡瓦的螺距、圈数、旋向进行数值模拟分析与室内验证，以期为超小直径可溶桥塞设计提供一定参考。

1　工作原理与受力分析

1.1　工作原理

图1为超小直径可溶桥塞工作原理示意图。将超小直径可溶桥塞与坐封工具下放到套管指定位置后，利用坐封工具推动膨胀锥轴向移动。螺旋胀锥在箍环的限位作用下，与膨胀锥同时移动直至与接头接触。螺旋卡瓦在螺旋胀锥作用下径向均匀扩张，直至卡瓦齿吃入套管内壁完成锚定，并通过螺旋卡瓦的螺旋密封段与套管内部紧密接触实现密封。



1—膨胀锥；2—箍环；3—螺旋胀锥；4—螺旋卡瓦；5—卡瓦齿；6—接头；7—销钉；8—套管。

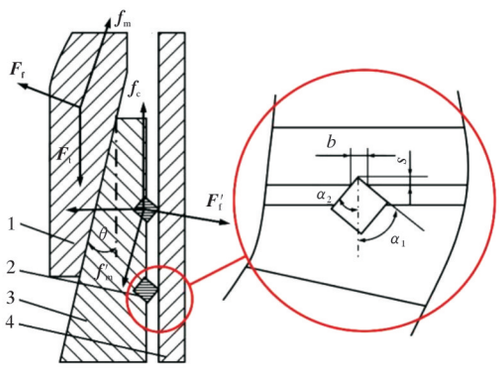
图1　超小直径可溶桥塞工作原理示意图

Fig. 1　Working principle of ultra-small diameter dissolvable bridge plug

1.2　力学分析

桥塞在工作过程中，只有足够的径向力才能保证卡瓦与套管锚定的可靠性，因此有必要深入分析径向作用力如何影响卡瓦齿吃入深度的具体

情况[12]。图2为卡瓦受力分析图。由图2可知，卡瓦锚定后锥体受到卡瓦基座的反力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}$，坐封工具作用于上锥体的推力$\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}$，锥体与卡瓦基座之间的摩擦力$\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}$的共同作用。



1—锥体；2—卡瓦齿；3—卡瓦基座；4—套管。

图2　卡瓦受力分析图

Fig. 2　Slip force analysis diagram

在锚定后，各部件处于静止状态，根据静力平衡原理可得到：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}\sin\theta+\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}\cos\theta=\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}\cos\theta=\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}\sin\theta \tag{2}$$

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}\tan\varphi \tag{3}$$

式中：θ为锥体与卡瓦基座接触面的倾斜角，(°)；φ为锥体与卡瓦基座之间的摩擦角，(°)；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}$为卡瓦锚定后锥体受到卡瓦基座的反力，N；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}$为坐封工具作用在锥体上的推力，N；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}$为锥体与卡瓦基座的摩擦力，N。

联立式（1）、式（3）可得：

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}}{\sin\theta+\cos\theta\tan\varphi} \tag{4}$$

以卡瓦齿为研究对象开展受力分析，可得：

$$\boldsymbol{f}'_{\mathrm{m}}\cos\theta+\boldsymbol{F}'_{\mathrm{f}}\sin\theta=\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{F}'_{\mathrm{f}}\cos\theta-\boldsymbol{f}'_{\mathrm{m}}\sin\theta=\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{f}'_{\mathrm{m}}=\boldsymbol{F}'_{\mathrm{f}}\tan\varphi \tag{7}$$

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}}\tan\varphi_{\mathrm{t}} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{f}'_{\mathrm{m}}$为锥体与卡瓦齿的摩擦力，N；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}$为卡瓦齿受到套管的内壁的摩擦力，N；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}}$为套管对坐封卡瓦齿的反作用力，N；$\boldsymbol{F}'_{\mathrm{t}}$为卡瓦受到锥体的反作用力，N；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}}$与$\boldsymbol{f}'_{\mathrm{m}}$互为一对作用力；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}$与$\boldsymbol{F}'_{\mathrm{t}}$互为一对作用力；$\varphi_{\mathrm{t}}$为套管内壁与卡瓦齿的摩擦角，(°)。

联立式（5）~式（8）可得：

$$\tan\varphi_{\mathrm{t}}=\frac{\tan\varphi\cos\theta+\sin\theta}{\cos\theta-\tan\varphi\sin\theta}=\frac{\tan\varphi+\tan\theta}{1-\tan\varphi\tan\theta}=\tan(\varphi+\theta) \tag{9}$$

由式（9）可知卡瓦齿与套管无相对滑动的自锁条件，套管内壁与卡瓦齿的摩擦角φ_{t}需大于锥体与卡瓦基座的摩擦角φ同锥体与卡瓦基座接触面的倾斜角θ之和，即有：

$$\varphi_{\mathrm{t}}>\varphi+\theta \tag{10}$$

既定材料下，增大摩擦角的有效方法有：增大卡瓦齿与套管接触力，调整卡瓦齿硬度促进局部形变和增强攻击力，确保其在压力下稳定吃入套管。

将式（4）和式（7）代入式（6）可得卡瓦径向扩张力：

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}(\cos\theta-\tan\varphi\sin\theta)}{\sin\theta+\cos\theta\tan\varphi}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}}{\tan(\varphi+\theta)} \tag{11}$$

卡瓦齿吃入套管内壁时，A为卡瓦齿与套管内壁之间的接触面积，两者间的接触压力为：

$$\boldsymbol{\sigma}=\frac{\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}}}{A} \tag{12}$$

$\varphi+\theta<45^{\circ}$时，增加径向力可促使卡瓦扩径，强化锚定。在径向扩张力的作用下，卡瓦齿吃入套管的深度决定了桥塞坐封后的承压性能。

则卡瓦齿吃入齿深与齿长关系如下：

$$b=s(\tan\alpha_1+\tan\alpha_2) \tag{13}$$

式中：b为坐封销钉作用长度（齿长），mm；α_1为坐封销钉接触后倾角，(°)；s为坐封销钉作用深度（齿深），mm；α_2为坐封销钉接触前倾角，(°)。

卡瓦齿对应的接触角度为θ'，所以得：

$$A=\frac{\pi d\theta' b}{360^{\circ}} \tag{14}$$

式中：d为桥塞直径，m。

代入式（12）得接触应力表达式为：

$$\boldsymbol{\sigma}=\frac{\boldsymbol{N}_{\mathrm{t}}}{A}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}}{\tan(\varphi+\theta)}\frac{360^{\circ}}{\pi d\theta' b}=\frac{\boldsymbol{F}_{\mathrm{t}}}{\tan(\varphi+\theta)}\frac{360^{\circ}}{\pi d\theta' s(\tan\alpha_1+\tan\alpha_2)} \tag{15}$$

2　模型建立

超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦最大外径为60 mm，适用于内径为114.3 mm的套管，扩张率近100%。桥塞采用可溶金属材料；卡瓦齿采用硬质合金材料，其弹性模量为1 500 MPa，泊松比为0.29。桥塞三维模型如图3所示。为便于计算分析，在螺旋结构优化设计时，将中心杆设置为刚体并施加全约束，对套管两端面施加全约束，膨胀锥施加轴向位移载荷，接头施加轴向约束，整体采用通用接触，摩擦因数为0.3，部件网格类型均为C3D8R。桥塞有限元网格划分如图4所示。

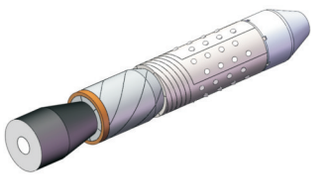


图 3　桥塞三维模型图

Fig. 3　3D model diagram of bridge plug



图 4　桥塞有限元网格划分图

Fig. 4　Finite element model diagram of bridge plug

3　结构设计

螺旋卡瓦是小直径可溶桥塞最重要的部件，其螺距、圈数和旋向直接影响桥塞的坐封性能。

3.1　螺距设计

分别对 40、45、50、55 和 60 mm 螺距的螺旋卡瓦进行最大锚定力分析，结构如图 5 所示。由图 5 可知，随着螺旋卡瓦的螺距增加，桥塞最大锚定力分别为 193.2、171.5、153.7、141.0、135.2 kN，整体呈现逐渐减小趋势。图 6 为不同螺距卡瓦应力和接触应力云图。由图 6 可知，由于螺旋卡瓦右端与接头配合，且在胀锥的锥面处，导致螺旋卡瓦右端的接触应力较小。随着卡瓦螺距增加，螺旋卡瓦的应力和接触应力区域减小，螺距较大的卡瓦的螺旋段与套管的接触区域较多，螺旋段的应力也越大（红色区域越多），螺旋段断裂的可能性越大；螺距较小的螺旋卡瓦变形最为均匀，与套管的接触区域也最大，断裂可能性最小。

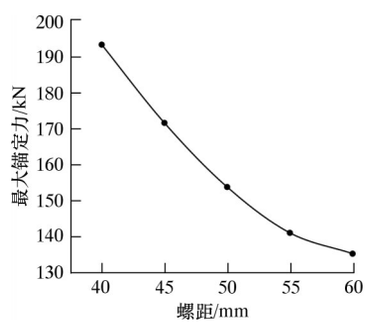


图 5　不同卡瓦螺距时最大锚定力曲线

Fig. 5　Anchoring force curves of slips with varying pitch

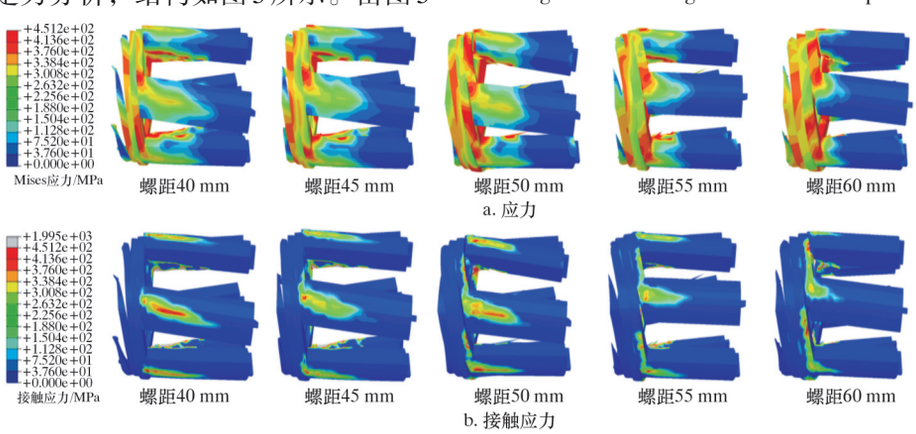


图 6　不同螺距卡瓦应力和接触应力云图

Fig. 6　Slip stress and contact stress contour plots at different slip pitches

图 7 和图 8 分别为不同卡瓦螺距时套管环向应力图及 Mises 应力云图。从图 7 和图 8 可以看出，螺距分别为 40、45、50 mm 的卡瓦所接触的套管环向应力相差不大，当螺距增加到 55 mm 以上时，套管应力出现明显减小且不均匀，因此推荐螺旋卡瓦的螺距为 40 mm。

3.2　螺旋圈数设计

图 9 为不同卡瓦圈数锚定力曲线。由图 9 可知，螺旋卡瓦圈数为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 时，桥塞最大锚定力分别为 193.2、165.3、143.2、134.6、123.5 kN，随着螺旋卡瓦的圈数增

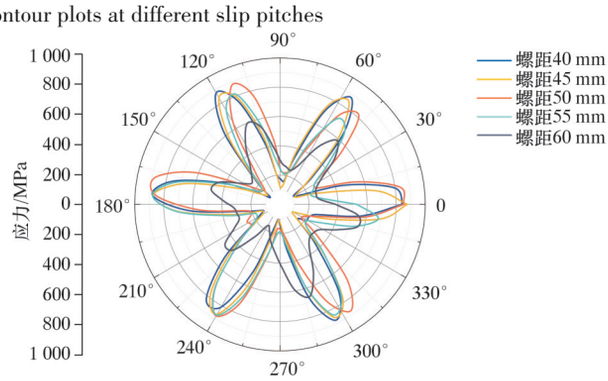


图 7　不同卡瓦螺距时套管环向应力图

Fig. 7　Circumferential stress diagram of casing at different slip pitches

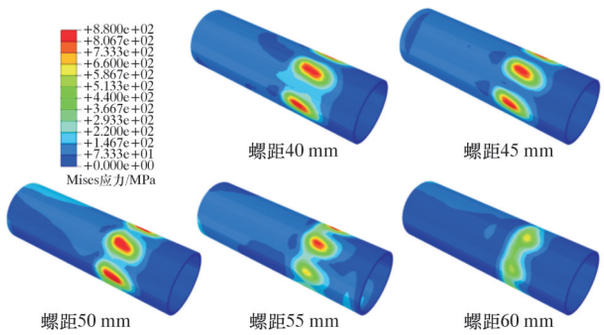


图 8　不同卡瓦螺距时套管应力云图

Fig. 8　Casing stress contour plots of different slip pitches

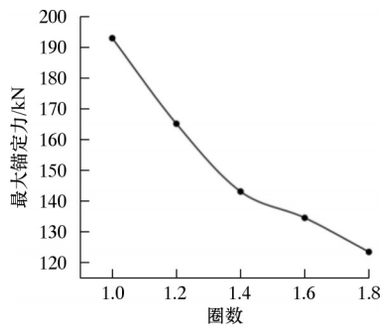


图 9　不同卡瓦圈数时最大锚定力曲线

Fig. 9　Anchoring force curves of slips with varying number of turns

加，最大锚定力整体呈现逐渐减小趋势。图 10 为不同卡瓦圈数卡瓦应力和接触应力云图。从图 10 可以看出，随着卡瓦圈数增加，螺旋卡瓦的应力和接触应力区域减小，桥塞的锚定能力逐渐减弱，其中圈数较多的螺旋段与套管的接触区域较多，螺旋段的应力也越大（红色区域越多），螺旋段断裂的可能性越大；圈数较小的螺旋卡瓦变形最为均匀，与套管的接触区域也最大，发生断裂的可能性最小。

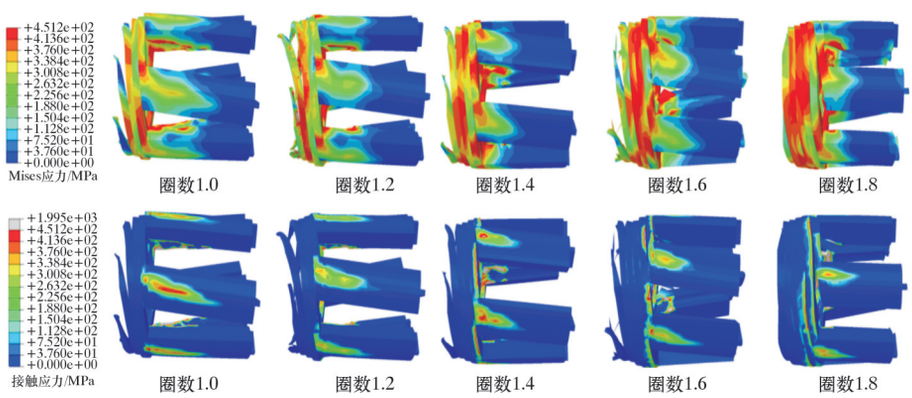


图 10　不同卡瓦圈数时卡瓦应力和接触应力云图

Fig. 10　Slip stress and contact stress contour plots at different numbers of turns of slip

图 11 为不同卡瓦圈数套管环向应力图。图 12 为不同卡瓦圈数套管应力云图。由图 11 和图 12 可以看出，随着卡瓦螺旋圈数的增加，螺旋卡瓦变形不均匀，与套管的接触面逐渐减弱，套管壁面应力分布区域逐渐减小且不均匀。因此推荐螺旋卡瓦的螺旋段圈数为 1.0。

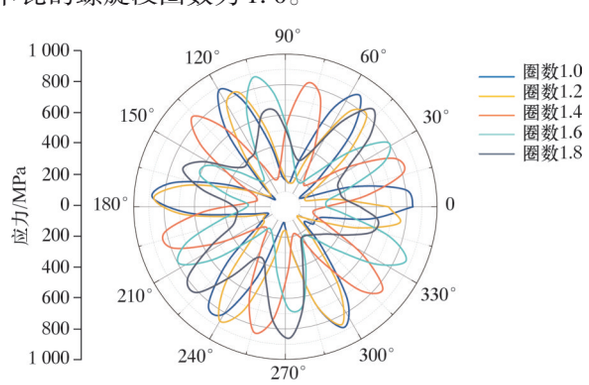


图 11　不同卡瓦圈数套管环向应力图

Fig. 11　Circumferential stress diagram of casing at different numbers of turns of slip

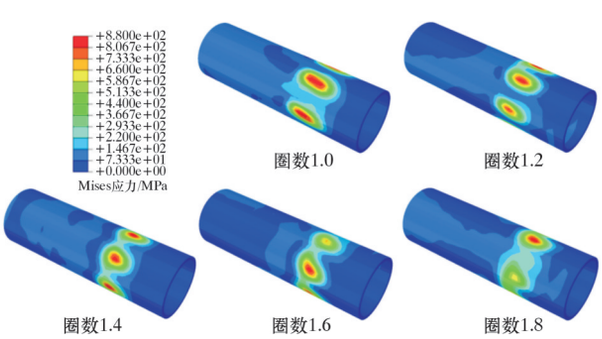


图 12　不同卡瓦圈数套管应力云图

Fig. 12　Casing stress contour plots of different numbers of turns of slip

3.3　旋向设计

螺旋胀锥和螺旋卡瓦旋向不同，桥塞的锚定性能也不相同。图 13 为不同旋向卡瓦应力和接触应力图。由图 13 可知，螺旋胀锥和螺旋卡瓦旋向不同时，卡瓦接触应力明显增大，接触应力分布区域也更广；卡瓦与套管壁面的接触应力明显增高、分布区域更广。图 14 为不同旋向下套管应力

图。由图 14 可知，反向螺旋卡瓦套管内壁的最大应力约 790 MPa，同向螺旋卡瓦套管内壁的最大应力约 610 MPa，同向螺旋结构的桥塞在套管上的应力分布明显小于反向螺旋结构。因此，推荐螺旋胀锥和螺旋卡瓦的旋向不同。

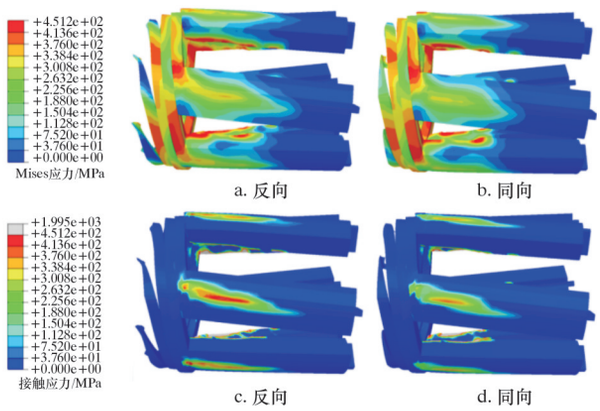


图 13　不同旋向卡瓦应力和接触应力

Fig. 13　Slip stress and contact stress under different thread orientations

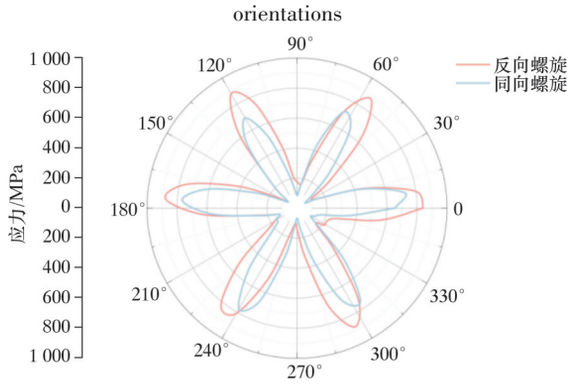


图 14　不同旋向下套管应力

Fig. 14　Casing stress diagram under different thread orientations

3.4　整体方案设计

基于数值模拟结果，确定螺旋卡瓦结构的最优参数组合：螺距 40 mm、单圈螺旋配置，且旋向与螺旋胀锥形成反向配合。图 15 为整体仿真模拟结果。由图 15 可知：螺旋卡瓦直段均匀胀至套管内壁，卡瓦齿吃入套管；螺旋卡瓦螺旋段和螺旋胀锥胀开后与套管壁形成有效密封，计算得出的最大锚定力为 555. 9 kN，满足设计要求。

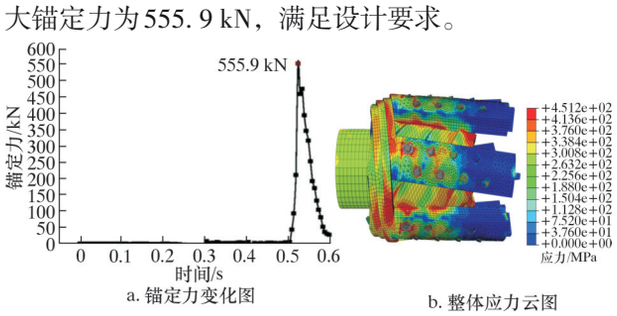


图 15　整体仿真模拟结果

Fig. 15　Overall simulation analysis results

4　试验验证

4.1　锚定力测试

图 16 为超小直径可溶桥塞及螺旋卡瓦结构示意图。基于优化结果，完成了超小直径可溶桥塞的加工试制，外径 60 mm、内径 20 mm、长度 392 mm，并按照 GB/T 20970—2015《石油天然气工业井下工具封隔器和桥塞》要求，测试桥塞螺旋卡瓦的锚定能力。

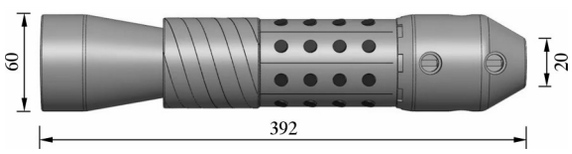


图 16　超小直径可溶桥塞及螺旋卡瓦结构示意图

Fig. 16　Ultra-small diameter dissolvable bridge plug and spiral slip

4.2　测试流程

（1）将超小直径可溶桥塞样机坐封在套管内，并固定在电液式压力试验机上。

（2）试验机空载运行 3 min，确认压力表零位，漂移不超过满量程的 0. 2%，完成系统校准。

（3）进行一级加载，以 5 kN/s 的速率将试验机压力预加载至 50 kN 并保持 30 s，消除装配间隙。

（4）进行二级加载，以 10 kN/s 的速率将试验机压力加载至 100 kN 并保持 60 s，随后加载至 300 kN 并保持 60 s，监测压力波动，允许波动阈值设定为≤1% 满量程。

（5）进行三级加载，以 10 kN/s 的速率将试验机压力加载至 450 kN 时转入保压稳定性测试，通过 120 s 持续监测确认压力衰减率≤0. 02 min。

（6）进行临界加载，采用 2 kN/s 的速率将试验机压力缓慢加载至最大载荷（502. 3 kN），随后通过观察压力连续下降 5% 并伴随高频振动现象，综合判断螺旋卡瓦的锚定效果。

4.3　结果分析

通过试验测试结果分析可知，超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦的最大锚定力为 502. 3 kN，与数值模拟结果相近，验证了超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦设计的合理性和锚定的可靠性。

5　结　论

（1）随着螺旋卡瓦螺距和圈数的增加，超小直径可溶桥塞的最大锚定力均呈现减小趋势，且

螺旋段断裂风险呈现逐渐增加趋势，螺旋卡瓦螺距推荐 40 mm、螺旋卡瓦圈数推荐 1 圈；同时，螺旋卡瓦旋向与螺旋胀锥旋向相反时，超小直径可溶桥塞的锚定性能更好。

（2）通过试验结果分析，超小直径可溶桥塞螺旋卡瓦最大锚定力为 502.3 kN，与数值模拟结果（555.9 kN）相近，验证了螺旋卡瓦设计的合理性，满足套管变形井条件下小直径锚定大环空的分段压裂需求。

参　考　文　献

[1] 李修文，黎文才，张胭脂，等. 小直径桥塞及注灰一体化工艺管柱设计与应用［J］. 石油机械，2002，30（8）：54-55.
LI X W，LI W C，ZHANG Y Z，et al. Design and application of integrative technical string with small diameter bridge plug and cement injecting tool［J］. China Petroleum Machinery，2002，30（8）：54-55.

[2] 王旭，张弘韬，李泰浩，等. 套管变形井小直径桥塞的研制与应用［J］. 钻采工艺，2003，26（5）：83-84.
WANG X，ZHANG H T，LI T H，et al. Development and application of small-diameter bridge plug in casing deformarion well［J］. Drilling & Production Technology，2003，26（5）：83-84.

[3] 张晓燕，陈国强，宋守权，等. 小直径工具研究与应用［J］. 内蒙古石油化工，2007，33（5）：34-37.
ZHANG X Y，CHEN G Q，SONG S Q，et al. Research and application of small-diameter tools［J］. Inner Mongolian Petrochemical Industry，2007，33（5）：34-37.

[4] 金平，刘惠军，李英，等. 套铣捞取小直径桥塞的研制与应用［J］. 石油机械，2009，37（9）：108-110.
JIN P，LIU H J，LI Y，et al. Development and application of small diameter bridge plugs for milling and fishing［J］. China Petroleum Machinery，2009，37（9）：108-110.

[5] 卢新甫，庄栋，迟洪利. 河口油田分层开采工艺技术的现状及应用［C］//胜利油田北区堵水调剖技术研讨会. 济南：山东石油学会. 2012：111-117.
LU X F，ZHUANG D，CHI H L. Current status and application of stratified mining technology in Hekou Oilfield［C］//Seminar on Water Blocking and Profile Control Technology in the North Area of Shengli Oilfield. Jinan：Shandong Petroleum Society. 2012：111-117.

[6] 李晓龙. 油井堵水提高油气井产量技术研究［J］. 辽宁化工，2013，42（5）：467-470.
LI X L. Research on improving the yield of oil and gas wells by the water plugging technology［J］. Liaoning Chemical Industry，2013，42（5）：467-470.

[7] 苗玉礼，李生莉，杨玉山，等. 侧钻小套管井开采工艺中常见问题分析与对策［J］. 新疆石油天然气，2017，13（1）：39-41，53.
MIAO Y L，LI S L，YANG Y S，et al. Problem analysis and countermeasure research on oil production technology of sidetracking small cased well［J］. Xinjiang Oil & Gas，2017，13（1）：39-41，53.

[8] LIU Q Y，ZHAO J G，ZHU H Y，et al. Review，classification and structural analysis of downhole robots：core technology and prospects for application［J］. Robotics and Autonomous Systems，2019，115：104-120.

[9] 王方明，张勇，陈晓军，等. 分瓣式卡瓦结构优化设计与试验分析［J］. 石油机械，2021，49（10）：71-77.
WANG F M，ZHANG Y，CHEN X J，et al. Optimum design and experimental analysis of split slip structure［J］. China Petroleum Machinery，2021，49（10）：71-77.

[10] 雷群，翁定为，才博，等. 中国石油勘探压裂技术进展、关键问题及对策［J］. 中国石油勘探，2023，28（5）：15-27.
LEI Q，WENG D W，CAI B，et al. Progress，key challenges and countermeasures of reservoir stimulation technology of Petro China［J］. China Petroleum Exploration，2023，28（5）：15-27.

[11] 何明舫，周长静，梁凌云，等. 长庆气田老井侧钻水平井钻完井压裂技术研究与应用［J］. 内蒙古石油化工，2024，50（7）：68-72.
HE M F，ZHOU C J，LIANG L Y，et al. Research and application of the horizontal well drilling and completion fracturing technology for the old wells in Changqing gas field［J］. Inner Mongolia Petrochemical Industry，2024，50（7）：68-72.

[12] 王林，平恩顺，李楠，等. 可降解桥塞坐封过程卡瓦力学分析［J］. 石油机械，2017，45（12）：48-52.
WANG L，PING E S，LI N，et al. Slip force analysis during setting of degradable bridge plug［J］. China Petroleum Machinery，2017，45（12）：48-52.

第一作者简介：喻成刚，高级工程师，生于 1981 年，2004 年毕业于西南石油大学机械制造专业，现从事油气井开采井下工艺技术研究、井下工具研发、新工艺新工具评价筛选工作。地址：（610017）四川省成都市。email：yucg@petrochina.com.cn。

通信作者：付玉坤，高级工程师。email：fuyukun@petrochina.com.cn。

收稿日期：2025-03-24　　**修改稿收到日期：**2025-06-15

（本文编辑　刘海森）