文章编号:1673-2677(2026)01-0040-09 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.005
引用:丁建新,孙汶玥,杨志国,等.射孔过程中套管-水泥环界面损伤演化规律数值模拟[J].新疆石油天然气,2026,22(1):40-48.
Cite:DING Jianxin,SUN Wenyue,YANG Zhiguo,et al. Numerical simulation on the damage evolution law of casing-cement interface during perforating[J]. Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):40-48.

射孔过程中套管-水泥环界面损伤演化规律数值模拟

丁建新[1],孙汶玥[2],杨志国[1],王建华[1],王海涛[1],席岩[2,3]
(1.昆仑数智科技有限责任公司,北京石景山 100043;2.北京工业大学,北京朝阳 100124;3.北京工业大学重庆研究院,重庆渝北 401100)

摘 要:射孔作业过程中高速射流侵彻套管-水泥环-地层组合体,在导致水泥环本体损伤的同时也会造成套管-水泥环界面的胶结损伤,容易引发井筒内的流体沿着套管-水泥环界面发生窜流,进而严重缩短油气井的生命周期。采用流固耦合方法建立了射孔弹爆炸后高速射流侵彻套管-水泥环-地层的数值模型,分析了侵彻过程中套管-水泥环胶结面损伤动态演化规律,研究了不同水泥环材料参数(剪切模量)、内聚力单元参数(断裂能)以及套管类型对胶结面损伤面积和最大损伤半径的影响规律。研究结果表明,随着射流侵彻的进行,套管-水泥环胶结面出现了损伤且范围不断扩大,当射流侵入到地层后损伤面积达到最大值。随着水泥环剪切模量或断裂能的不断增加,胶结面的损伤程度不断减小,增加井眼清洁或者采用含纤维水泥浆有利于降低射流侵彻对胶结面的损伤。采用铝合金、钛合金、镍基合金等耐受性强的套管时,射孔侵彻过程中套管-水泥环胶结面的损伤面积和最大损伤半径会显著增加。研究成果可为射孔侵彻过程中井筒完整性的保障以及工程参数的优化提供理论支撑。

关键词:射孔作业;流固耦合;套管-水泥环界面;损伤;数值模拟
中图分类号:TE257 **文献标识码**:A

Numerical Simulation on the Damage Evolution Law of Casing-Cement Interface During Perforating

DING Jianxin[1],SUN Wenyue[2],YANG Zhiguo[1],WANG Jianhua[1],WANG Haitao[1],XI Yan[2,3]
(1. Kunlun Digital Technology Co.,Ltd.,Shijingshan 100043,Beijing,China;2. Beijing University of Technology, Chaoyang 100124, Beijing,China;3. Chongqing Research Institute of Beijing University of Technology,Yubei 401100,Chongqing,China)

Abstract: During perforating, the high velocity jet penetrates the casing-cement-formation assembly. This not only causes damage to the cement sheath but also leads to bonding damage at the casing-cement interface. Such degradation tends to cause cross-flow of well-bore fluids along channels in the casing-cement interface, ultimately severely shortening the lifespan of oil and gas wells. Given this, a numerical model of high velocity jet penetration into the casing-cement-formation after perforating charge explosion is established us-

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与控制方法研究"(52374001);重庆市自然科学基金项目"CCUS地质封存井气体泄露复杂路径形成机制与演化规律研究"(CSTB2024NSCQ-MSX0882);中国石油天然气集团有限公司数智中国石油重大专项"石油石化工业软件-钻井安全控制软件"(2024ZZ46-05)。
第一作者:丁建新(1980-),2002年毕业于江汉石油学院计算机科学与技术专业,工程硕士,高级工程师,现为中国石油昆仑数智科技有限公司技术总监,长期从事油田技术服务行业数字化转型的技术研究工作。(E-mail)dingjianxin@cnpc.com.cn
通讯作者:席岩(1985-),2019年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业,博士,副教授,主要从事岩石动力学方面的研究。(E-mail)xiyan@bjut.edu.cn

ing the fluid solid coupling method. The dynamic damage evolution law of the casing-cement bonding interface in the process of penetration is analyzed, and the effects of the cement sheath material parameter (shear modulus), cohesive unit parameter (fracture energy) and casing types on the damage area and maximum damage radius of the bonding interface are investigated. The results show that with the penetrating of jet, damage appears at the casing-cement sheath bonding interface, and the damage zone continuously expands. When the jet penetrates into the formation, the damage area reaches the maximum. With the increasing of shear modulus or fracture energy of cement sheath, the damage degree of the bonding interface decreases. Increasing borehole cleaning or using fiber containing cement slurry can reduce the damage of jet penetration to the bonding interface. When aluminum alloy, titanium alloy, nickel base alloy and other highly resistant casings are used, the damage area and maximum damage radius of the casing-cement bonding interface increase significantly during perforation penetration. The findings of this research provide theoretical support for wellbore integrity protection and engineering parameters optimization during perforating.

Key words: perforating; fluid solid coupling; casing-cement interface; damage; numerical simulation

水泥环的完整性包含水泥环本体的完整性以及套管-水泥环胶结面、水泥环-地层胶结面的完整性[1]。射孔作业过程中，高速流体侵彻套管-水泥环-地层组合体，使得水泥环的本体和组合体胶结面的完整性出现损伤，导致水泥环密封完整性失效[2]。前人采用室内实验、数值模拟和理论分析等方法开展了一系列研究，尤其是对套管-水泥环胶结面的损伤开展了相关分析。Yan等[3]建立了射孔弹侵彻井筒的三维数值模型，指出射孔过程中的异形射流会对井筒组合体胶结面造成破坏，套管-水泥环胶结面的损伤程度与水泥环剪切模量呈对数函数关系。Yan等[4]采用有限元数值模拟方法建立了射流形态仿真模型，分析了射孔动态冲击载荷作用下的套管-水泥环胶结面的损伤，研究了套管材料参数及射孔弹装药量对损伤程度的影响规律。Zhang等[5]讨论了Cohesive内聚力单元在套管-水泥环-地层有限元模型中的应用，指出套管内压的波动会导致套管-水泥环胶结面出现损伤。Yan等[6]通过射孔实验结合计算机图像分析技术认为，低剪切模量、高强度的水泥环可以有效降低套管-水泥环胶结面的破坏范围。一旦井筒组合体的套管-水泥环界面出现损伤，形成胶结弱面，在后续的增产作业或者注采过程中井筒内的流体会沿着弱面侵入，导致胶结面出现开裂，使得井筒内流体沿着井筒胶结面窜流，严重的甚至导致流体沿着井筒胶结面窜流较长距离，从而弱化增产措施的效果[7-8]。基于以上研究认为，射孔侵彻井筒过程中套管-水泥环胶结面的损伤会显著影响井筒完整性。但以往的研究主要集中于定性分析胶结面的损伤程度，对于侵彻过程导致的胶结面损伤动态过程及范围并未实现量化，且缺乏对不同工程参数影响规律的分析。因此，开展射孔侵彻井筒组合体过程中套管-水泥环胶结面损伤的研究，并且分析相关工程参数的影响规律具有重要意义。

本文考虑井下射孔作业工程实际，结合聚能射流侵彻过程中套管-水泥环-地层井筒组合体复合材料损伤理论，采用Cohesive内聚力单元有限元数值模拟方法，建立了射孔侵彻井筒组合体数值模型。分析了高速流体侵彻过程中套管-水泥环胶结面动态力学响应特征，研究了胶结面在不同工程条件下（水泥环剪切模量、断裂能及套管类型）的损伤变化规律，量化了胶结面损伤面积和最大损伤半径。研究成果可为射孔侵彻过程中井筒完整性的保障以及工程参数的优化提供理论支撑。

1　数值模型建立

1.1　几何模型及网格划分

射孔作业过程中，高速射流会侵彻套管-水泥环-地层组合体。为进一步降低井筒几何形态对射孔侵彻分析的影响，建立射孔弹和金属板-水泥环-岩体圆柱靶体模型，用以模拟射孔侵彻井筒组合体的过程，以充分量化射孔侵彻对套管-水泥环胶结面的影响，如图1所示。

数值模型的建立以长庆油田某井油层段位置处套管-水泥环-地层组合体为参考依据。考虑到射孔侵彻是复杂的复合材料动力学动态响应过程，为提升计算效率，建立射孔弹和井筒组合体$\frac{1}{4}$对称数值模型[9]。考虑工程中套管、水泥环的规格参数，金属板-胶结面-水泥环-地层直径均设置为160 mm，其中金属板厚度设定为6.98 mm、水泥环厚度为38.1 mm、模拟地层厚度为100 mm。在金属板与水泥环界面处，插入单层Cohesive内聚力单元，厚度0.5 mm。射孔弹总高度48 mm，药型罩直径30 mm，厚度2 mm，锥角60°，外壳直径40 mm，采用黑索今（RDX）炸药[10]。

在网格设置方面，采用结构化六面体网格方式划分，采用局部加密方式，模型最终网格数收敛至39 311个。在边界条件设置方面，为消除边界反射波干扰，模型外圆柱面施加非反射边界条件，以模拟应力波在无限域的传播特征，避免应力波在界面处反射带来的影响。

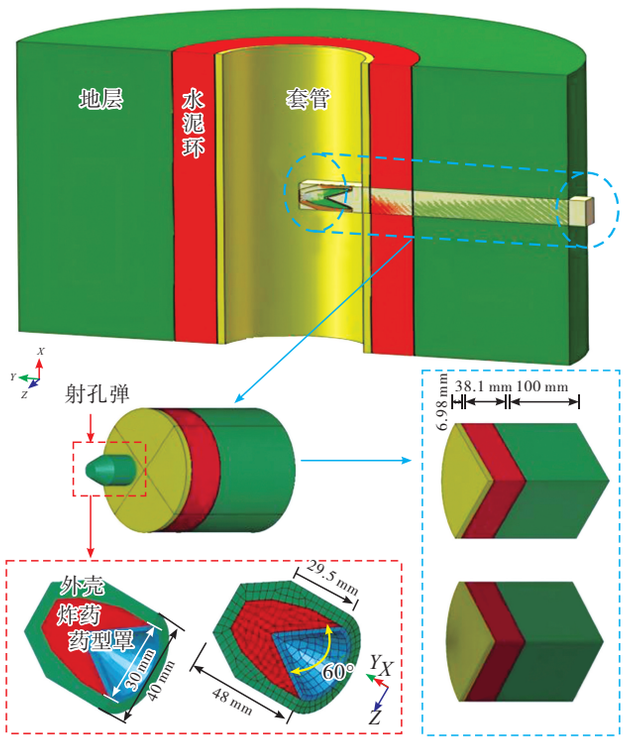


图1 射孔弹侵彻井筒组合体模型

Fig. 1 Model of perforating charge penetrating the welbore assembly

1.2 胶结面损伤设置

为了更好地研究射孔过程中套管-水泥环胶结面的损伤机理，本文采用Cohesive内聚力单元来模拟胶结面。其中Cohesive单元是基于牵引-分离位移准则模拟材料的粘结失效的[11-12]。牵引-分离双线性本构模型如图2所示，第1段为弹性阶段，曲线的斜率K为Cohesive单元的刚度；第2阶段为损伤演化阶段。图2中纵坐标表示牵引力，即单元损伤所需要的应力，横坐标表示在应力作用下产生的相应位移。曲线与横轴所围成的面积为材料断裂的临界能量释放率（即断裂能G_c）。在弹性阶段，Cohesive单元的位移随应力增加而线性增大，当应力达到Cohesive单元的法向抗拉强度t_n^0或切向抗剪强度t_s^0、t_t^0时，对应的位移为损伤起始位移（δ_n^0、δ_s^0、δ_t^0）。在第2阶段，即损伤演化阶段，随着位移继续增加，材料的刚度逐渐退化，其应力逐渐减小，损伤不断积累。当Cohesive单元完全损伤时，位移达到临界值（δ_n^f、δ_s^f、δ_t^f），应力减小为0。其中Cohesive单元材料参数如表1所示。

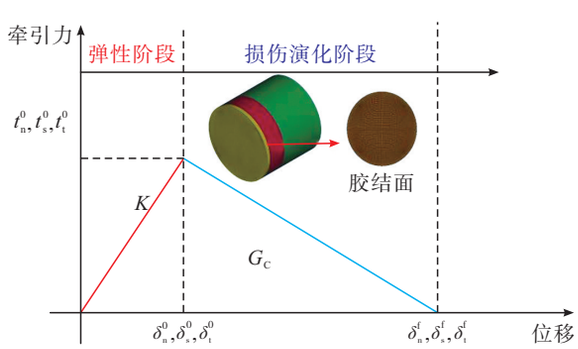


图2 牵引-分离双线性本构模型

Fig. 2 Bilinear constitutive model of traction-separation

表1 Cohesive单元材料参数

Tab. 1 Material parameters of cohesive elements

刚度/(GPa·cm^{-1})	法向峰值牵引力/MPa	切向峰值牵引力/MPa	法向断裂能/(J·m^{-2})	切向断裂能/(J·m^{-2})
34.5	2.66	2.02	730	860

1.3 控制方程

在数值模拟建模过程中，将射孔弹组件（包括药型罩、RDX炸药和外壳）以及空气域单元定义为拉格朗日-欧拉（ALE）单元。鉴于ALE网格能够支持物质在计算域内的自由迁移和形态变化，因此可以有效模拟射孔弹爆炸后金属射流的动态行为。与之相对应的是，套管、水泥环和地层单元被定义为拉格朗日单元，因为这些结构在射孔冲击过程中主要承受有限变形，且其材料边界清晰。该建模方法在保证计算精度的同时，能够进一步提高数值模拟的效率和稳定性。

射孔弹中炸药部分采用High Explosive Burn材料模型[13]，对爆炸产生的爆轰波采用Jones-Wilkinne-Lee（JWL）状态方程，而药型罩和外壳部分均使用Johnson Cook材料模型和Mie Gruneisen状态方程。其中JWL状态方程用于计算爆轰产物产生的压力p_{eos}，其计算公式如下[14]：

$$p_{eos}=A_{bomb}\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v}+B_{bomb}\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v}+\frac{\omega E}{v} \tag{1}$$

式中：p_{eos}为爆轰压力，GPa；E为单位体积炸药爆炸内能，kJ/cm^3；v=1/ρ，为爆炸产物相对体积，cm^3/g；A_{bomb}、B_{bomb}、R_1、R_2、ω为待定的炸药材料参数，通过实验测得。这些参数的含义及取值见表2。

Mie Gruneisen方程表示如下：

$$p=\frac{\rho_0 C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{2}$$

式中：p为压缩状态时的压力，Pa；C为剪切-压缩波速度（V_s-V_p）曲线的截距，m/s；S_1、S_2、S_3为V_s-V_p曲线的无量纲斜率系数；γ_0为Mie Gruneisen状态方程的一个无量纲常数；a为γ_0与$\mu=\rho/\rho_0-1$的一阶体积修正项，无量纲；ρ_0为正常状态下的介质密度，kg/m；ρ为介质压缩后的密度，kg/m；μ为体积应变，无量纲。炸药、药型罩和外壳的力学性能参数含义及取值见表2[15]。

表2　射孔弹材料模型及状态方程参数

Tab. 2　Parameters of material model and equation of state for the perforating charge

炸药	炸药的密度ρ/（g·cm^{-3}）	爆速/（m·s^{-1}）	C-J爆轰压力Peos/GPa	炸药材料参数A_{bomb}/GPa	炸药材料参数B_{bomb}/GPa	炸药材料参数R_1	炸药材料参数R_2	炸药材料参数ω
	1.89	9 110	42	748.6	13.38	4.5	1.2	0.38
药型罩、外壳	药形罩、外壳正常状态下的密度ρ_0/（kg·m^{-3}）	剪切模量/GPa	初始屈服应力A_{gu}/MPa	应变硬化系数B_{gu}/MPa	应变率敏感系数C_{gu}	温度软化指数m	应变硬化指数n	熔化温度/K
	8 960	47.6	90	292	0.025	1.09	0.31	1 360

水泥环和地层均采用材料本构模型（HJC）。该模型能够有效模拟岩石类材料在动态载荷作用下的力学响应特性，特别适用于模拟爆炸冲击、侵彻等极端工况下岩石材料的大变形、高应变率变形过程和渐进损伤演化规律。其归一化等效应力如下：

$$\sigma^*=f_c'\left[A_c\left(1-\sum\frac{\Delta\varepsilon_P+\Delta\mu_P}{D_1(P^*+T^*)^{D_2}}\right)+B_c P^{*N}\right]\left[1+C_c\ln(\dot{\varepsilon}^*)\right] \tag{3}$$

式中：σ^*为等效应力，无量纲；f_c'为准静态单轴抗压强度，MPa；$P^*=P/f_c'$为压力值，无量纲；$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$为应变率，无量纲；$A_c$、$B_c$、$C_c$为水泥环和地层的材料参数，无量纲；$\Delta\varepsilon_P$和$\Delta\mu_P$分别为等效塑性应变和塑性体积应变，无量纲；$D_1$、$D_2$为材料损伤常数，无量纲；$T^*=T/f_c'$为最大拉伸静水压力，无量纲；$N$为压力硬化指数，无量纲。水泥环和地层与本构材料模型及状态方程相关的具体参数见表3。

表3　水泥环、岩层本构材料模型及状态方程参数

Tab. 3　Parameters of constitutive material model and equation of state　for the cement sheath and formation

材料	密度/（g·cm^{-3}）	剪切模量/GPa	胶结强度系数	压力硬化系数	压力硬化指数N	准静态单轴抗压强度f_c'/MPa
水泥环	1.50	12.00	0.79	1.60	0.61	24.00
岩层	2.61	10.49	0.32	1.76	0.79	76.13

2　模拟结果与分析

2.1　胶结面损伤演化过程

射孔作业是油气井完井过程中的关键环节。通过射开油气层，可以建立储层和井筒之间的流动通道，使地层中的油气能够有效流入井筒，并沿着井筒流向地面油气采输管道。射孔产生的高速金属射流依次穿透套管、水泥环和地层[16-17]，在导致套管、水泥环本体产生损伤的同时也会导致套管-水泥环胶结面产生损伤，在胶结面处形成弱面，容易引起沿井筒界面的窜流，进而会弱化增产措施的效果。图3为金属射流速度与胶结面有效应力的动态变化规律。

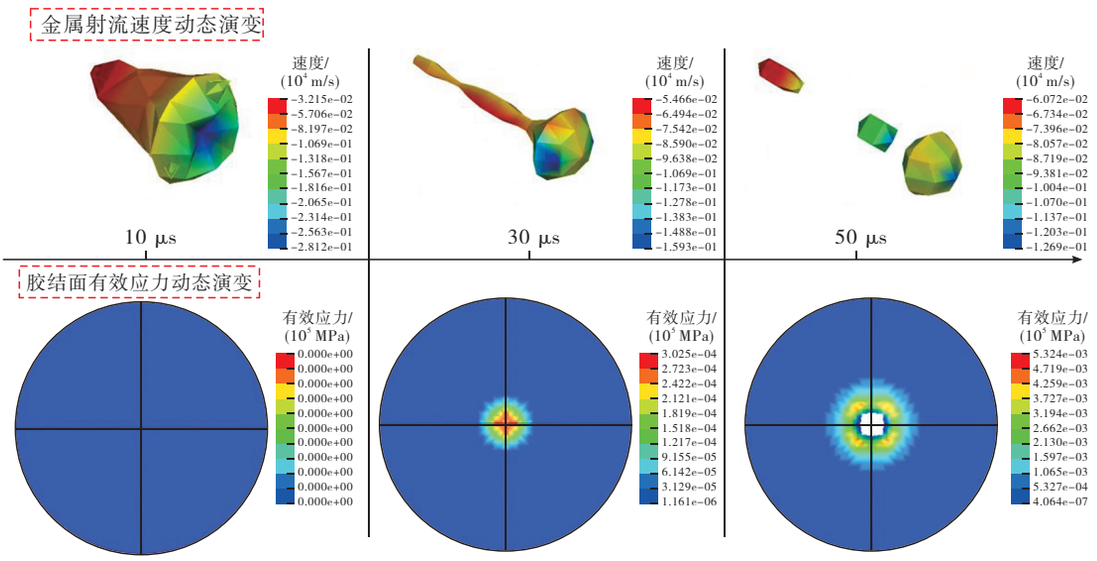


图3 金属射流速度与胶结面有效应力历史图

Fig. 3 Metal jet velocity vs. effective stress history at the bonding interface

炸药引爆后，药型罩在高温高压下发展成金属射流，射流侵彻套管-水泥-岩石组合体，形成射孔孔眼。图3中，在10 μs时，射流在爆轰力的作用下逐渐形成，最大射流速度2 812 m/s。由于高速流体的端部仍在井筒中没有接触到套管，此时套管-水泥环胶结面有效应力0 MPa，未受到任何的损伤。在30 μs时，高速射流速度已逐渐减小至峰值1 593 m/s，其端部位置开始与套管内壁接触并开始侵彻。由于套管材料自身具有强度，射流在侵彻过程中受到阻力挤压而发生径向压缩，同时套管内部传递的作用力持续累积，导致套管-水泥环界面的有效应力不断上升。在50 μs时，金属射流的速度最高达1 269 m/s。射流穿透套管直接影响套管-水泥环胶结面，靠近射孔端位置处应力集中显著，应力从射孔孔眼中心呈放射状减小。胶结面的损伤区域显著扩大，直到射孔过程结束。

为了进一步量化套管-水泥环胶结面损伤动态演化规律，可基于射孔侵彻过程中胶结面处的损伤面积来定量分析动态演化过程。胶结面损伤面积动态演化规律如图4所示。射孔孔眼处胶结面的损伤面积(D_a)随着射流的动态侵彻时间(t)呈增长趋势，但增长幅度逐渐减小，在接近400 μs时达到最大损伤面积并趋于稳定，整体呈现出二次函数变化关系。在侵彻到400 μs时损伤面积为26.2 cm^2，损伤面积占整个模型面积的13%。由此可以证明，射孔作业会对套管-水泥环胶结面造成损坏，且损伤面积随着侵彻的进行不断扩大并且趋于稳定。

鉴于此，水力压裂过程的高压流体很容易从射孔侵彻产生的弱面处发生窜流，最终导致压裂段之间的连通，弱化压裂效果。此外，在部分碳封存井中，一旦

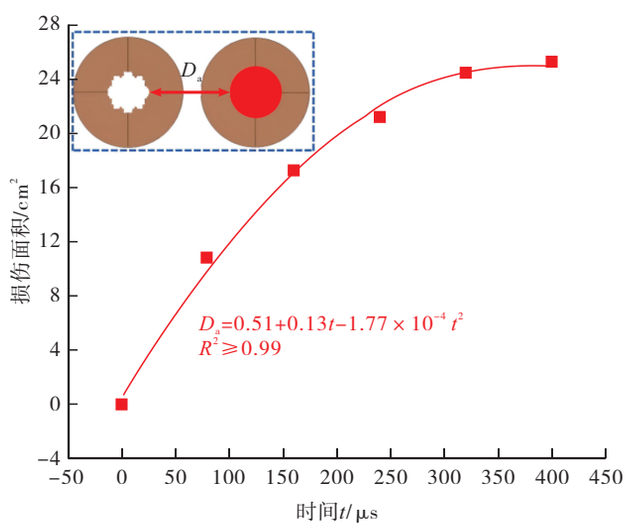


图4 胶结面损伤面积动态演化规律

Fig. 4 Dynamic evolution law of damage area at the bonding interface

在射孔孔眼处出现弱面，二氧化碳的侵入也会使胶结面处受到腐蚀，在长期地质封存中容易导致井筒密封完整性失效，带来显著的安全问题。因此，分析不同套管、水泥环特性对明确射孔作业对胶结面损伤的影响规律极为必要。

2.2 参数敏感性分析

2.2.1 水泥环剪切模量

作为表征材料抵抗剪切变形能力的关键参数，水泥环剪切模量的数值变化会显著影响射孔作业对水泥环的损伤程度[18]。水泥环剪切模量的改变也会显著影响套管-水泥环胶结面的完整性。为了研究剪切模量对套管-水泥环胶结面损伤的影响，分别采用剪切模量为8 GPa、12 GPa、16 GPa和20 GPa的水泥环来计算套管-水泥环胶结面的损伤程度，如图5所示。可

以发现，射孔孔眼周围的损伤最为显著，随着径向距离的增大，损伤程度呈放射状递减趋势。随着剪切模量的增加，胶结面损伤程度减小，这主要是因为剪切模量较高时材料刚性增强，能有效减少界面处的应力集中，从而降低了胶结面损伤的风险，胶结面的损伤程度相应有所减小。

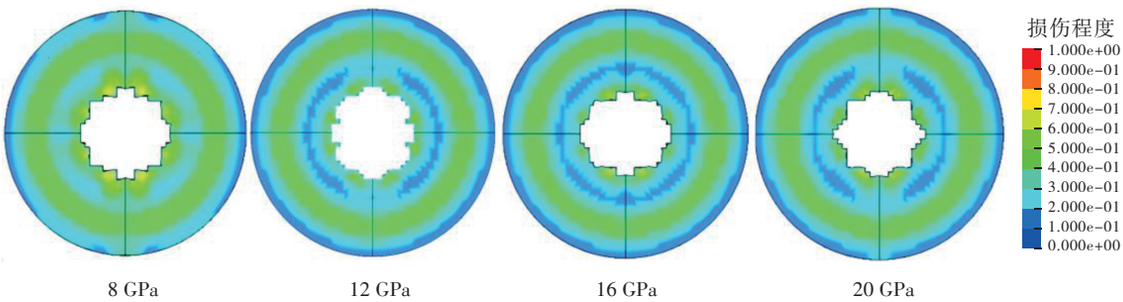


图5　不同剪切模量下胶结面损伤云图

Fig. 5 Damage contour map at the bonding interface with different shear modulus

选取套管-水泥环胶结面损伤面积(D_a)来定量分析损伤程度随剪切模量(G)的变化规律，如图6所示。可以看出，胶结面损伤面积和水泥环的剪切模量呈二次函数关系，随着水泥环剪切模量的增加胶结面损伤面积逐渐减小。当剪切模量为8 GPa时，最大损伤面积25.27 cm^2；当剪切模量增加至20 GPa时，损伤面积降低了3.64 cm^2，降低14.4%。射孔侵彻时胶结面的损伤呈圆形，考虑到圆形界面上任何一处损伤都会成为井底流体窜流的初始路径，选择胶结面损伤区域最大损伤半径(D_r)进行分析，其中$D_r = \max\{a,b\}$，式中a、b分别为胶结面轴向及横向上的最大损伤半径。如图6所示，水泥环剪切模量与最大损伤半径之间表现为负相关性，即随着剪切模量的增大，最大损伤半径从2.96 cm下降到2.66 cm，下降10.14%。这主要是因为当剪切模量增大，材料抵抗变形的能力增强，金属射流下胶结面的剪切应变减小，损伤减少。因此，在射孔段应尽可能选择能形成较高剪切模量水泥环的水泥浆[19]，或者在水泥浆中加入纤维等有利于提升水泥环剪切模量的添加剂，有利于在射孔过程中进一步减少损伤区域、保护胶结面的完整性。

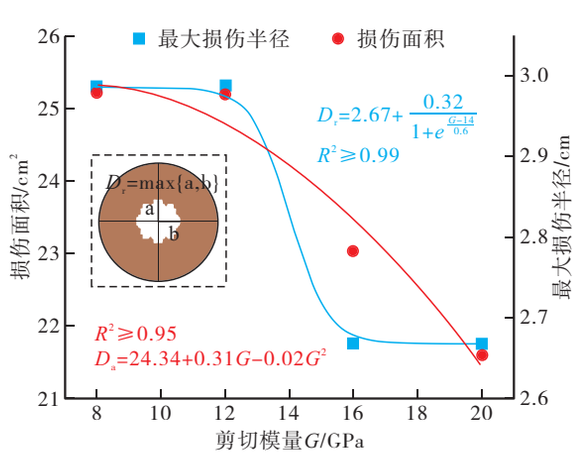


图6　胶结面损伤面积与最大损伤半径随剪切模量变化关系

Fig. 6 Damage area and maximum damage radius at the bonding interface with different shear modulus

2.2.2　胶结面断裂能

能量释放率(g)是断裂力学中描述裂纹扩展能量驱动力的关键参数，与内聚力模型(CZM)中的断裂能(G_c)相关[20]。当能量释放率g达到材料的临界值(即断裂能G_c)时，裂纹开始扩展，即：

$$g \geqslant G_C \tag{4}$$

在射孔作业中，当套管-水泥环胶结面的能量释放率g超过断裂能G_c时，界面会发生损伤。为了研究断裂能对胶结面损伤的影响，分别采用断裂能为630 J/m^2、680 J/m^2 、730 J/m^{2}和780 J/m^{2}的内聚力单元来计算射孔对胶结面的损伤影响。考虑到胶结面在切向和法向上的损伤都会影响胶结面的完整性，因此分析不同胶结面断裂能条件下的切向和法向分离变化规律，如图7所示。当内聚力单元的切向或法向上的应力达到损伤起始临界应力时，内聚力模型开始进入损伤演化阶段，且随着位移的增加裂纹沿着内聚力单元不断扩展。从图7还可以看出，在混合模式作用下，内聚力单元同时发生切向和法向变形，随着胶结面断裂能的增加切向和法向分离区域形状呈现越来越不规则的趋势，且破坏区域不断减小。当断裂能为630 J/m^{2}时，套管-水泥环胶结面损伤形状近似为圆形；当断裂能增加到780 J/m^{2}时，损伤为不规则的裂纹扩展形状。由计算结果可知断裂能的大小对切向和法向损伤的半径影响很小，二者都保持相对一致的半径。

为更准确描述胶结面的损伤变化，建立了胶结面损伤面积(D_a)及最大损伤半径与断裂能(G_c)之间的关系，如图8所示。可以看出，套管-水泥环胶结面的损伤面积与断裂能呈线性关系。当断裂能从630 J/m^{2}增加至780 J/m^{2}时，损伤面积由27.0 cm^{2}线性递减至

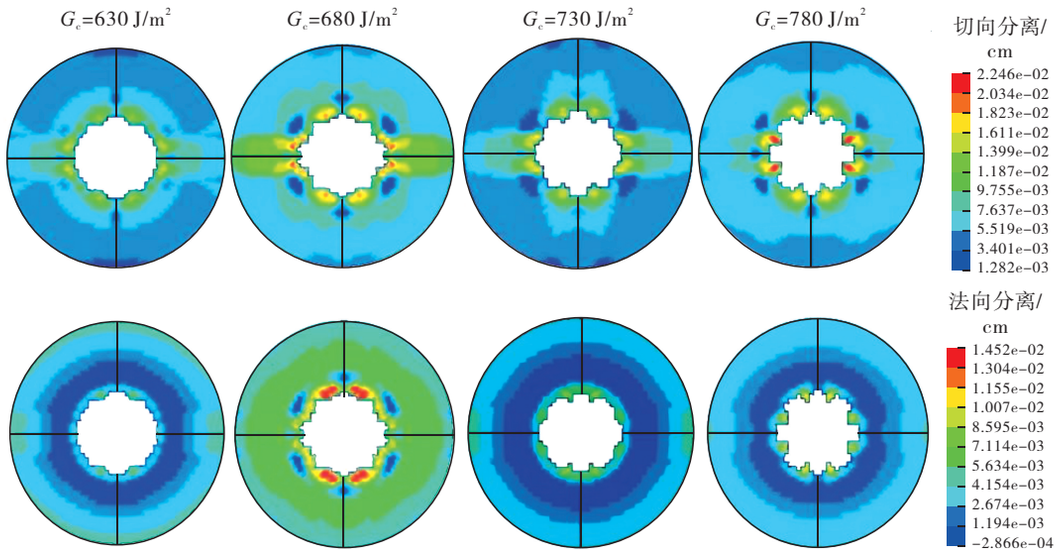


图7 胶结面在不同断裂能下损伤变化规律

Fig. 7 Damage evolution law at the bonding interface with different fracture energy

24.18 cm²，降幅达10.44%，这表明材料断裂能的提升能有效抑制损伤扩展。但最大损伤半径不受断裂能变化的影响，在不同断裂能条件下基本保持不变（约为2.98 cm）。

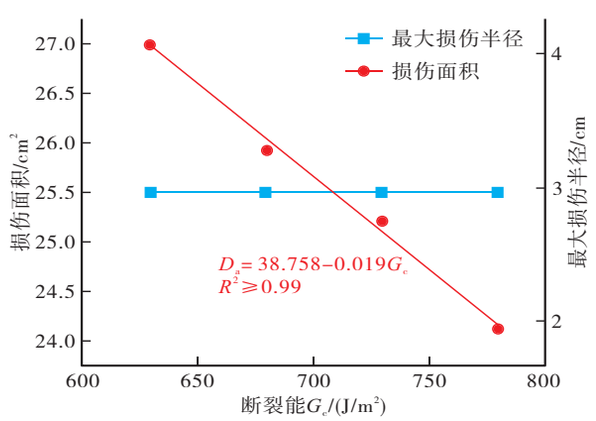


图8 胶结面损伤面积与最大损伤半径随断裂能变化规律

Fig. 8 Evolution law of damage area and maximum damage radius at the bonding interface with different fracture energy

综上所述，提升胶结面的断裂能是增强其抗冲击能力、抑制损伤扩展的有效途径。为实现这一目标，可从三个方面采取措施。首先，采用缓释酸型驱油冲洗剂优化水泥浆前置液体系[21]，利用酸液的梯度释放与表面活性剂的协同作用有效清除井壁与套管表面的污染物[22]，为良好胶结创造前提。其次，在钻井液中添加含钙铝矿物纤维等增强剂[23]，通过纤维的桥接与增韧作用直接提升界面的断裂能。最后，通过优化水泥浆配方（如采用高强水泥与高效减水剂）来提升水泥石本体强度与致密性，为界面提供坚固的支撑基体。通过采取上述措施来增强胶结面的断裂能，可显著降低射孔作业带来的损伤风险。

2.2.3 套管类型

随着高温高压井及超深井的不断钻探，套管所面临的工况日益严苛。铝合金、钛合金和镍基合金等新型材料制成的套管因其优异的性能正逐步成为备选。其中，铝合金由于其高强度-重量比、优异的耐腐蚀性能满足了深水钻井平台及高腐蚀性油气藏对套管材料的需求；钛合金材料具有突出的比强度、低弹性模量和优异的低温性能[24-25]；而镍基合金套管虽然成本较高，但在极端工况下展现出不可替代的优势，其超强的耐高温、抗腐蚀和高强度特性使其成为深井、地热井和高含硫油气井的理想选择[26-27]。目前，尚缺乏关于不同套管类型下射孔侵彻对套管-水泥环胶结面损伤演化影响的研究。

在射孔弹侵彻套管-水泥环-地层组合体时，高速的金属射流会优先穿透套管，而不同材料的套管强度各不相同，传递给胶结面的应力也各不相同，损伤程度各异。为了研究不同套管材料对射孔后胶结面损伤程度的影响，分别采用7075-T6铝合金、Ti-6Al-4V钛合金、Inconel 718镍基合金和普通碳钢来计算套管-水泥环胶结面的损伤程度，如图9所示。不同类型套管在射孔作业中的损伤变化规律具有明显的差异性。从损伤面积来看，普通碳钢的损伤面积最小，原因是碳钢的弹性模量较高，材料的刚度较大，在射孔冲击载荷作用下的变形较小，能够更有效地将能量传递给水泥环和地层。相比之下，铝合金的损伤面积最大，因其弹性模量较低，刚度较低，导致其抗变形能力较差，在高速射流冲击下套管会过早地进入塑性变形，无法有效分散能量，从而引发胶结面的大面积损伤。

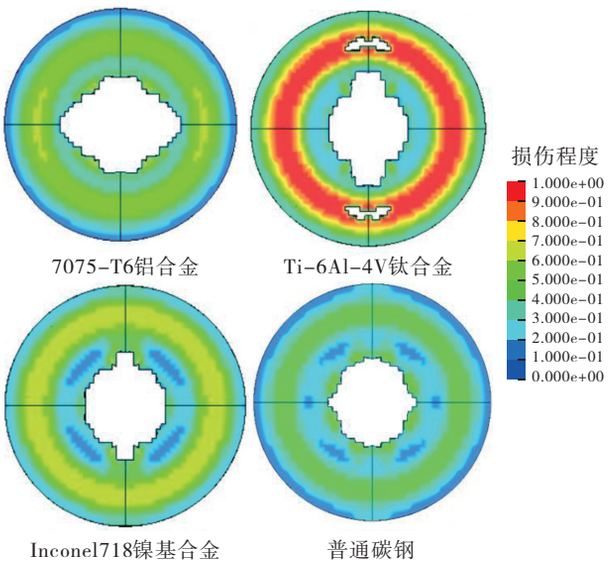


图9　胶结面在不同套管材料下损伤变化规律

Fig. 9　Damage evolution law at the bonding interface with different casing materials

为更清楚地对比不同套管材料对胶结面损伤程度的影响，绘制胶结面损伤面积与最大损伤半径随套管材料变化的关系曲线，如图10所示。普通碳钢的损伤面积和最大损伤半径都为最小值，分别是25.36 cm^2和2.97 cm，镍基合金次之。镍基合金虽然与碳钢的弹性模量接近，但具有较高的屈服强度，更倾向于通过塑性变形吸收能量，这会导致在射孔周围积累更多的塑性应变，从而引发较大的胶结面损伤。铝合金虽然最大损伤半径和普通碳钢相差不多，但二者损伤面积相差显著。由此可知，采用耐受性较好的套管时，射孔侵彻组合体产生的界面损伤程度显著增加，应该通过优选水泥浆类型予以降低影响。

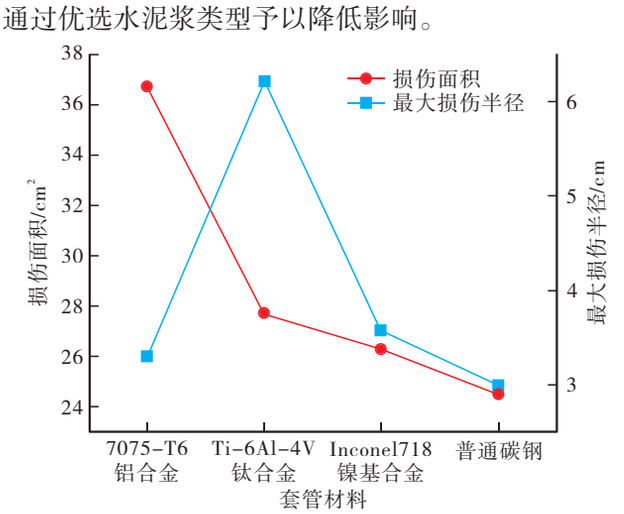


图10　胶结面损伤面积与最大损伤半径随套管类型变化规律

Fig. 10　Evolution law of damage area and maximum damage radius at the bonding interface with different casing types

3　结论

考虑射孔作业过程中高速射流侵彻井筒组合体的工程实际，基于流固耦合算法建立了射孔弹爆炸侵彻组合体数值模型。分析了不同水泥环参数（剪切模量）、内聚力单元参数（断裂能）以及套管类型对套管-水泥环界面损伤的影响规律。

1）建立了射孔弹爆炸后高速射流侵彻金属板-水泥环-岩体圆柱靶体模型，分析了射孔侵彻过程中套管-水泥环界面的动态破坏过程。研究结果表明，随着射流侵彻的进行，套管-水泥环胶结面出现了损伤且范围不断扩大，当射流侵入到地层后损伤面积达到最大值，占整个模型面积的13%。

2）研究了射孔侵彻过程中，水泥环剪切模量和胶结面断裂能对套管-水泥环胶结面损伤的影响规律。研究结果表明，随着水泥环剪切模量或者断裂能的不断增加，胶结面的损伤程度不断减小。

3）分析了采用不同类型套管时套管-水泥环胶结面损伤程度变化规律。研究结果表明，采用铝合金、钛合金、镍基合金等耐受性强的套管时，射孔侵彻过程中套管-水泥环的胶结面损伤面积和最大损伤半径会显著增加。

参考文献

[1]LAI C X，FENG Y C，SU F Y，et al. Study on fracture propagation law of cement sheath interface during fracturing process [C]//The 58th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium，Golden，Colorado，USA，2024：ARMA-2024-0861.

[2]顾军，高德利，石凤歧，等. 论固井二界面封固系统及其重要性[J]. 钻井液与完井液，2005，22(2)：7-10.
GU Jun，GAO Deli，SHI Fengqi，et al. The two contacts cementing system in cementing job and its importance[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2005，22(2)：7-10.

[3]YAN Y，GUAN Z C，Xu Y Q，et al. Numerical investigation of perforation to cementing interface damage area[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2019，179：257-265.

[4]YAN Y，GUAN Z C，YAN W，et al. Analysis method of cement sheath damage zone after perforation[C]//SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition，Bali，Indonesia，2023：SPE-196556-MS.

[5]ZHANG Y. Evaluation of cement ring sealing under cyclic loading conditions[C]//Proceedings of the 2024 2nd International Conference on Applied Statistics，Modeling and Advanced Algorithms，Harbin，China，2024：IOP Publishing 012037.

[6]YAN Y，GUAN Z，YAN W，et al. Mechanical response and damage mechanism of cement sheath during perforation in oil and gas well[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2020，188：106924.

[7]GU C，FENG Y，MOSLE M H，et al. Fluid-driven debonding of cement interfaces of an injector well：A coupled thermo-hydro-mechanical approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2024，57(7)：4513-4531.

[8]FENG Y，LI X，GRAY K E. Development of a 3D numerical model for quantifying fluid-driven interface debonding of an

injector well[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2017,62:76-90.
[9]XI Y,YAO Y,CHEN P H,et al. Investigation of casing stress distribution and parameter optimization during the transient impact process of multi-hole perforation operations[J]. Engineering Failure Analysis,2024,155:107761.
[10]汪长栓,王海洲,李刚,等. Stimstream等孔径深穿透射孔弹在页岩气井中的应用[J]. 爆破器材,2017,46(5):38-42、47.
WANG Changshuan,WANG Haizhou,LI Gang,et al. Application of Stimstream shaped charge providing equal aperture and deep penetration in shale gas reservoir[J]. Explosive Materials,2017,46(5):38-42,47.
[11]王成文,杨乐,薛毓铖,等. 南海天然气水合物地层固井二界面胶结特性模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(3):933-941.
WANG Chengwen,YANG Le,XUE Yucheng,et al. Simulation on the second cementing interface bonding characteristics of nature gas hydrate formation in South China Sea[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(3):933-941.
[12]付盼,王江帅,刘天恩,等. 老井封堵段水泥塞-地层界面剥离失效数值模拟[J]. 新疆石油天然气,2023,19(4):69-74.
FU Pan,WANG Jiangshuai,LIU Tianen,et al. Numerical simulation for peeling failure of cement plug-formation interface in plugged section of old wells[J]. Xinjiang Oil & Gas,2023,19(4):69-74.
[13]YAN Y,GUAN Z C,XU Y Q,et al. Study on debonding issue of cementing interfaces caused by perforation with numerical simulation and experimental measures[J]. SPE Drilling & Completion,2020,35(4):684-695.
[14]LSTC. LS-DYNA keyword user's manual,volume II:Materials[S/OL]. Livermore:Livermore Software Technology Corporation,(2012-08-24)[2025-09-28]. http://www.dynasupport.com/manuals.
[15]ELSHENAWY T,LI Q M. Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator[J]. International Journal of Impact Engineering,2023,54:130-137.
[16]李辉,姚宇,丁建新,等. 射孔作业条件下水泥环损伤变化规律研究[J]. 石油机械,2025,53(4):80-87.
LI Hui,YAO Yu,DING Jianxin,et al. Damage of cement sheath under perforation conditions[J]. China Petroleum Machinery,2025,53(4):80-87.
[17]闫炎,管志川,赵效锋,等. 固井水泥射孔力学响应规律及损伤特征[J]. 东北石油大学学报,2019,43(3):101-108、11.
YAN Yan,GUAN Zhichuan,ZHAO Xiaofeng,et al. Mechanical response laws and damage characteristics of cement sheath during perforating[J]. Journal of Northeast Petroleum University,2019,43(3):101-108,11.
[18]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.
[19]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.
[20]夏晔,彭惠芬,王玥. 基于内聚力界面单元的变厚度双悬臂梁裂纹扩展研究[J]. 价值工程,2016,35(21):77-78.
XIA Ye,PENG Huifen,WANG Yue. Research on crack growth of double cantilever beam with variable thickness based on cohesive interface element[J]. Value Engineering,2016,35(21):77-78.
[21]郑知晗,吕会强. 一种缓释酸型高效驱油冲洗液研究[J]. 中外能源,2023,28(S1):104-108.
ZHENG Zhihan,LV Huiqiang,et al. Study on a slow-release acid-type efficient oil-displacing flushing fluid[J]. Sino-Global Energy,2023,28(S1):104-108.
[22]吴彦先,赵增新,巩加芹,等. 清除井壁滤饼提高固井质量的冲洗液性能影响研究[J]. 钻井液与完井液,2025,42(3):398-405.
WU Yanxian,ZHAO Zengxin,GONG Jiaqin,et al. Study on factors affecting properties of flushing fluids for removing mud cakes to improve well cementing quality[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2025,42(3):398-405.
[23]汪瑞. 适用于油基钻井液的微乳型固井前置冲洗液研究[D]. 四川成都:西南石油大学,2024.
WANG Rui. Research on a microemulsion type spacer fluid suitable for oil-based drilling fluids[D]. Chengdu,Sichuan:Southwest Petroleum University,2024.
[24]刘强. 钛合金套管首次在我国海域天然气水合物试采中成功应用[J]. 石油管材与仪器,2020,6(2):68.
LIU Qiang. First successful application of titanium alloy casing in natural gas hydrate trial production in China's Offshore Waters[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments,2020,6(2):68.
[25]奚运涛,刘星辰,黄晓江,等. 钛合金材料在石油工业中的应用及其抗腐蚀性能研究进展[J]. 焊管,2023,46(11):1-8、13.
XI Yuntao,LIU Xingchen,HUANG Xiaojiang,et al. Application and corrosion properties of titanium alloys in petroleum industry[J]. Welded Pipe and Tube,2023,46(11):1-8,13.
[26]张庆生,吴晓东,魏风玲,等. 普光高含硫气田采气管柱的优选[J]. 天然气工业,2009,29(6):91-93.
ZHANG Qingsheng,WU Xiaodong,WEI Fengling,et al. The optimum selection on gas producing pipe string in Puguang Gas Field with high sulfur content[J]. Natural Gas Industry,2009,29(6):91-93.
[27]孙金声,王熙,曾德智,等. 高温高压高含硫气井镍基合金油套管适用性评价方法[J]. 天然气工业,2024,44(11):1-10.
SUN Jinsheng,WANG Xi,ZENG Dezhi,et al. A method for evaluating the applicability of nickel-based alloy tubing/casing in high-temperature,high-pressure,and high-sulfur gas wells[J]. Natural Gas Industry,2024,44(11):1-10.

(修改回稿日期:2025-12-10 编辑:何园)