

砂岩储层射孔压实伤害评价

朱秀星¹, 张 林², 薛世峰¹, 仝兴华³, 滕岳珊¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 胜利石油管理局测井公司, 山东东营 257000;
3. 山东大学威海校区, 山东威海 264209)

摘要:基于应变率对砂岩孔隙度演化的敏感性分析,建立砂岩储层射孔压实伤害评价力学模型。对射孔冲击载荷作用下近孔道砂岩的动力学响应进行数值分析,获得模型中关键力学参数,量化分析砂岩径向孔隙度与渗透率分布,评价射孔压实伤害程度。研究结果表明:数值分析数据与试验数据能够较好地吻合,验证了射孔压实伤害评价方法的有效性;由于破碎带与网状微裂缝的产生,射孔后孔道内壁表层砂岩孔隙度要高于初始值;压实带内砂岩的渗透率明显降低,严重影响孔道流动性能;距孔道入口端轴向距离越远,砂岩的压实带厚度、孔隙度与渗透率伤害程度越小;随冲击载荷强度的增加或岩石强度的降低,射孔压实伤害程度将增大。

关键词:应变率; 孔隙度; 渗透率; 伤害评价; 砂岩

中图分类号:TE 37 **文献标志码:**A

Evaluation of perforating damage for sandstone

ZHU Xiu-xing¹, ZHANG Lin², XUE Shi-feng¹, TONG Xing-hua³, TENG Yue-shan¹

(1. College of Pipeline & Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Well Logging Company, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257000, China;
3. Weihai Branch of Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on the sensitivity analysis of deformation rate effect on porosity evolution, the mechanical model for evaluating perforating damage of sandstone was developed. Combining with mechanical parameters at different time, which were obtained by dynamic response analysis of sandstone around the perforation tunnel, the distributions of radial porosity and permeability were studied. Then, the perforating damage degree was evaluated. The results were compared with experimental data, and the validity of the evaluation method was proved to be effective. The results also show that the porosity near the tunnel is even somewhat higher than undamaged average porosity because of crushing of grains or tensile fractures around the perforation wall. In addition, porosity and permeability of sandstone in crushed zone reduce significantly, which impairs the flow performance of perforating tunnel severely. Furthermore, the more distance from the entrance of the tunnel, the smaller the reducing amplitude of crushed zone thickness, porosity and permeability will be. When the shock load intensity increases or the strength of sandstone decreases, the damage degree will be severe.

Key words: deformation rate; porosity; permeability; damage evaluation; sandstone

射孔作业过程中,高速金属射流穿透地层的同时也在孔眼附近形成压实带,降低了近孔道岩石渗透率与孔隙度,严重影响油气井产能^[1-3]。为此,分析射孔压实带孔隙度与渗透率的分布,评价射孔压实伤害程度,为射孔参数优化设计提供依据,对于改善孔道流动性能,提高射孔效果有重要意义。基于准静态加载试验,科研人员对低应变率砂岩的伤害

机制有了比较清楚的认识^[4-6],在此基础上, Morris 等^[7-8]提出了低应变率砂岩孔隙度与渗透率演化模型,模型中采用塑性应变、有效应力和损伤变量等宏观力学参数来描述孔隙度与渗透率的演化,可以很容易地嵌入到现有岩石力学程序中,因此被广泛应用。对于射孔冲击载荷作用下高应变率砂岩伤害的

研究,国内外学者依据 API RP 19B 标准^[9],开展射孔流动效率测试,采用核磁共振、电镜等手段分析射孔后压实带结构及物性特点,评价孔隙度和渗透率伤害程度^[10,14]。由于试验方法费时费力,且受到试验材料与条件的限制,不利于射孔压实伤害规律的系统研究,因此建立一种合理的射孔压实伤害评价数值分析方法显得尤为必要。笔者基于应变率对砂岩孔隙度演化的敏感性分析,建立射孔压实伤害评价力学模型,并通过近孔道砂岩的动力学响应数值分析,获得模型中关键力学参数,量化压实带孔隙度与渗透率的分布,实现射孔压实伤害评价。

1 应变率对砂岩孔隙度演化的敏感性分析

应变 ε 是度量材料受力后变形大小的无量纲量,应变率 $\dot{\varepsilon}$ 则是度量变形快慢的物理量。当 $\dot{\varepsilon} < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时,为低应变率;当 $10^{-1} \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^2 \text{ s}^{-1}$ 时,为中应变率;当 $\dot{\varepsilon} > 10^2 \text{ s}^{-1}$ 时,为高应变率^[15]。射孔冲击载荷作用下砂岩应变率的数量级为 10^4 s^{-1} ,为高应变率,因此描述低应变率条件下砂岩孔隙度与渗透率演化的 Morris 模型能否适用于射孔压实伤害的分析,还须进一步验证。

Rubin^[16]在建立多孔黏弹性介质大变形条件下孔隙度演化连续性方程的基础上,分析了岩石膨胀变形和单轴压缩变形时应变率对孔隙度演化的敏感性。研究表明,当应变率 $\dot{\varepsilon} \leq 10^4 \text{ s}^{-1}$ 时,无论是膨胀变形还是单轴压缩变形,砂岩孔隙度的演化规律基本一致,只有当 $\dot{\varepsilon} \geq 10^5$ 时,应变率对孔隙度演化的影响才会变得敏感。射孔冲击载荷作用下砂岩的应变率量级为 10^4 s^{-1} ,因此,射孔冲击载荷作用下砂岩孔隙度的演化规律与准静态加载条件下砂岩孔隙度的演化规律相似,Morris 模型可推广应用于射孔压实伤害分析。

2 射孔压实伤害评价力学模型

根据射孔冲击载荷作用下砂岩的力学响应特性,修正 Morris 等^[7]提出的低应变率砂岩孔隙度与渗透率演化方程,建立砂岩储层射孔压实伤害评价力学模型。模型以岩石单元有效应力、塑性应变和损伤变量为计算参数,这些参数可通过数值分析等手段获取,便于孔隙度与渗透率演化的分析。

$$\varphi = \varphi_d + \varphi_c, \quad (1)$$

其中

$$\dot{\varphi}_d = \frac{m_d \sigma_{vm} \varepsilon_p (\varphi_d^{\max} - \varphi_d)}{\max(p_m, p_{\min})},$$

$$\varphi_c^0 = \begin{cases} \varphi_1 - p_{\text{eff}} (\varphi_1 - (\varphi_* + C p^*)) / p^*, & (p_{\text{eff}} < p^*), \\ \varphi_* + C p_{\text{eff}}; \end{cases}$$

$$\varphi_c = \frac{\varphi_c^0}{1+A},$$

$$\dot{A} = c_1 \varepsilon_p \min(p_{\text{eff}}, p_s^*) + c_2 H(p_{\text{eff}} - p^*) \times H(p_{h2} - p_{\text{eff}}),$$

$$k = k_0 \exp \{ K_1 \varphi_c (p_{\text{eff}}, A) - B \min(A, A^{\max}) \}.$$

式中, $\varphi_d^{\max}$ 为最大膨胀孔隙度; p_m 为平均应力, GPa; $p_{\min}$ 为最小膨胀应力, GPa; φ_c^0 为砂岩伤害前孔隙度; φ_1 为参考流体孔隙度; φ_* 为流体孔隙度截距; C 为孔隙度衰减速率, GPa^{-1} ; p_{eff} 为有效压力, GPa; A 为损伤变量; c_1 为塑性应变损伤因子, GPa^{-1} ; c_2 为静水压力损伤因子; p_s^* 为塑性应变最大损伤应力, GPa; p_{h2} 为静水压实最大损伤应力, GPa; $H(\cdot)$ 为阶跃函数; k 、 k_0 分别为渗透率和初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_1 为渗透率相对指数; B 为渗透率伤害衰减因子; $A^{\max}$ 为最大损伤变量。

在 Morris 模型中,参数 φ_* 是指在静态加载过程中有效应力达到临界静水应力时砂岩的孔隙度。在射孔冲击载荷加载过程中,砂岩有效应力将会迅速超过临界静水应力,因此流体孔隙度截距 φ_* 与参考流体孔隙度 φ_1 相比变化不大,可认为 $p_{\text{eff}} \geq p^*$ 且 $\varphi_* = \varphi_1$,因此式(1)中

$$\varphi_c^0 = \varphi_1 + C p_{\text{eff}}.$$

根据以上分析,建立砂岩储层射孔压实伤害程度评价力学模型为

$$\varphi = \varphi_1 - \exp \left\{ \frac{m_d \sigma_{vm} (\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})}{\max(p_m, p_{\min})} t \right\} + \frac{\varphi_1 + C p_{\text{eff}}}{1+A}, \quad (2)$$

$$k = k_0 \exp \left\{ \frac{K_1 (\varphi_1 + C p_{\text{eff}})}{1+A} (p_{\text{eff}}, A) - B \min(A, A^{\max}) \right\}. \quad (3)$$

其中,损伤变量 A 可推导出

$$A_2 = A_1 + c_1 (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1}) \min(p_{\text{eff}}, p_s^*) + c_2 H(p_{\text{eff}} - p^*) \times H(p_{h2} - p_{\text{eff}}).$$

式中, A_2 、 A_1 、 ε_{p2} 、 ε_{p1} 、 ε_{r2} 、 ε_{r1} 分别为 t_2 和 t_1 时刻岩石的损伤变量、塑性应变和体积应变。

3 射孔压实伤害评价

由式(2)~(3)可得,不同时刻砂岩有效应力、塑性应变与体积应变是砂岩储层射孔压实伤害评价力学模型的基础参数,为获取这些力学参数,实现射孔压实伤害程度的评价,本文采取以下方法:

建立射孔冲击载荷作用下砂岩数值模型,采用动力学程序 LS-DYNA 分析近孔道砂岩动力学响应,

获得每一时间步对应的单元有效应力、体积应变和塑性应变,并将这些参数引入射孔压实伤害力学模型,量化分析近孔道砂岩孔隙度与渗透率的分布,评价射孔压实伤害程度。

3.1 砂岩数值模型

由于本文重点研究近孔道砂岩的孔隙度与渗透率分布,因此可不考虑金属射流穿孔过程,而将射流产生的压力脉冲载荷作为边界条件施加到砂岩孔道内壁,分析砂岩动态响应。

考虑到射孔砂岩靶的轴对称性,建立射孔冲击载荷作用下砂岩二维数值模型,如图 1 所示。模型中假设存在一个沿孔道轴向运动的刚性单元块体,边界 E 施加压力脉冲载荷,边界 F 与孔道内壁接触。设定刚性块体运动速度 v_0 为射流冲击波传播速度,从而模拟冲击载荷传播过程中对孔道内壁砂岩的挤压和剪切摩擦作用。

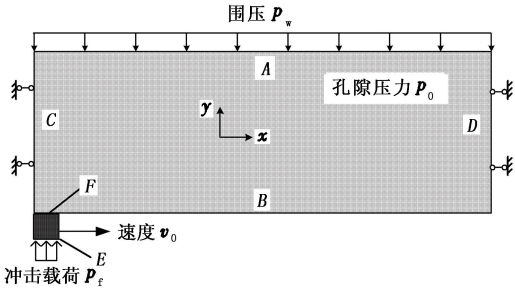


图 1 冲击载荷作用下砂岩数值模型

Fig. 1 Numerical model of sandstone under shock load

3.1.1 基础参数

为了将分析结果与 Karacan 等^[12]的试验结果进行对比,砂岩模型参数的取值与试验参数相同。其中,孔隙度衰减速率 C 和塑性应变损伤因子 c_1 分别为 -0.1 和 27 GPa^{-1} ;静水压力损伤因子 c_2 为 27 ;最小膨胀应力为 0.01 GPa ;最大膨胀孔隙度 $\varphi_d^{\max}$ 为 0.25 ;塑性应变最大损伤应力 p_s^* 为 0.2 GPa ;静水压实最大损伤应力为 0.4 GPa ;最大损伤变量 $A^{\max}$ 为 0.11 ;渗透率相对指数为 65.7 ;渗透率伤害衰减因子为 13 ;初始渗透率为 $129 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;初始孔隙度为 0.2 ;静态屈服应力 σ_y 为 0.085 GPa ;弹性模量 E 为 12 GPa ;密度 ρ 为 2320 kg/m^3 ;泊松比 μ 为 0.35 ;模型围压 p_w 为 0.0069 GPa ;孔隙压力 p_0 为 0.0138 GPa ;孔眼平均直径 D_k 为 6 mm ;孔道长度 L_x 为 140 mm ;模型长度 L_s 为 185 mm ;模型宽度 D_s 为 50 mm 。

3.1.2 射孔冲击载荷

聚能射孔弹引爆后,形成的高速金属粒子流撞击岩石,形成一个很大的冲击载荷,在孔道入口处压力峰值达到 GPa 量级,持续时间为微秒量级,孔道

底端压力峰值衰减为入口处的 $1/10$,金属粒子流速度约为 2000 m/s ^[2]。

Karacan 试验采用常规聚能射孔弹,炸药类型为 HMX,装药量为 6 g ,药罩类型为紫铜,可估算孔道入口处压力峰值约为 10 GPa ^[2]。图 2 为射孔冲击载荷沿孔道轴向的分布(假设为线性衰减)。

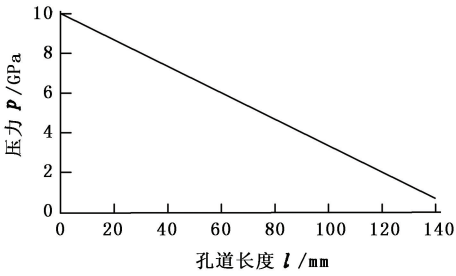


图 2 压力脉冲载荷沿孔道轴向的分布

Fig. 2 Distribution of pressure impulse load along perforating tunnel

由图 2 可得

$$p_f = -\frac{9}{140}L_d + 10 \quad (4)$$

式中, p_f 为压力峰值, GPa ; L_d 为距离孔道入口端距离, mm 。

3.2 砂岩孔隙度与渗透率分布

根据冲击载荷作用下近孔道砂岩动力学响应分析结果,提取每一时间步单元压力、塑性应变和体积应变,由式(2)~(3)定量分析砂岩径向孔隙度与渗透率的分布。将数值分析结果与试验数据进行对比,验证射孔压实伤害评价方法的有效性。

3.2.1 砂岩径向孔隙度分布

图 3 为孔道轴向不同位置处砂岩径向孔隙度分布。由于孔眼平均直径 $D_k=6 \text{ mm}$,因此孔道内壁表面距孔道中心径向距离为 3 mm 。

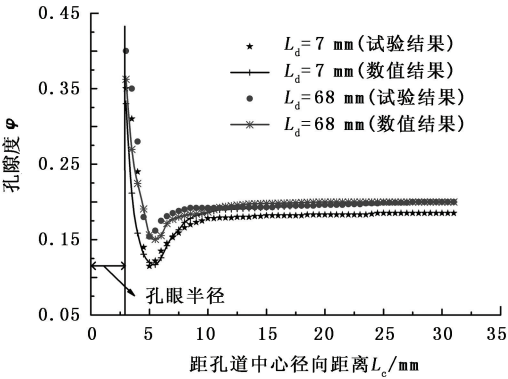


图 3 孔道轴向不同位置处砂岩径向孔隙度分布

Fig. 3 Distribution of radial porosity at different position along perforation tunnel

由图 3 可得,数值分析结果与试验结果吻合较好。由于射孔冲击载荷的剪切摩擦作用,孔道内壁表层砂岩破裂,形成网状微裂纹,增加了砂岩孔隙度,因此距孔道内壁约 1 mm 范围内,砂岩孔隙度比初始孔隙度还要高。受射孔压实伤害的影响,压实带内孔隙度降低,当 $L_d=7$ mm 时,压实带厚度约 6.5 mm,压实带平均孔隙度为 0.156,相比原始孔隙度降低了 22%;当 $L_d=68$ mm 时,压实带厚度约为 3 mm,压实带平均孔隙度为 0.178,相比原始孔隙度降低了 11%。

3.2.2 砂岩径向渗透率分布

图 4 为孔道轴向不同位置处砂岩径向渗透率分

布。由图 4 可知,数值分析结果与试验数据显示的砂岩径向渗透率分布规律相似,最严重的损害发生在孔道内壁表面,损害程度随径向距离扩大而减轻。当 $L_d=33$ mm 时,压实带平均渗透率为 2.2×10^{-3} μm^2 ,相比原始渗透率降低了 98.3%;当 $L_d=68$ mm 时,压实带平均渗透率为 5.5×10^{-3} μm^2 ,相比原始渗透率降低了 95.8%。由于砂岩膨胀变形产生的网状微裂纹不仅狭窄,而且比原始孔隙结构阻力大,流通性差,因此孔道内壁表层砂岩渗透率并未表现出如同孔隙度一样的变化规律。

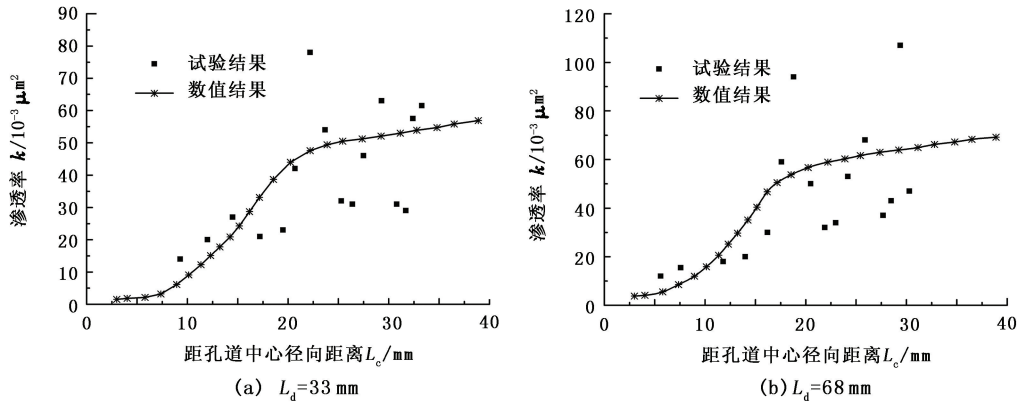


图 4 孔道轴向不同位置处砂岩径向渗透率分布

Fig. 4 Distribution of radial permeability at different position along perforation tunnel

3.3 压实伤害程度定量评价

选取距孔道入口端不同距离的 11 个测点,分析测点处砂岩径向孔隙度与渗透率的分布,获得孔道压实带厚度、孔隙度与渗透率下降幅度(表 1),从而

定量评价射孔压实伤害程度。由表 1 可得,射孔孔道的平均压实厚度约为 3.2 mm;压实带平均孔隙度为 0.173,相比原始孔隙度下降幅度为 13.8%;压实带平均渗透率为 8.3×10^{-3} μm^2 ,相比原始渗透率下降幅度为 93.5%。由于压力脉载荷沿孔道轴向的衰减,距孔道入口端距离越远,砂岩压实带厚度、孔隙度与渗透率的伤害程度都将减小。

4 关键因素影响规律

4.1 射孔冲击载荷强度

随聚能射孔弹装药量的增加,射孔冲击载荷强度将增大。图 5 为不同压力峰值时, L_d 为 5 mm 处砂岩径向孔隙度与渗透率分布。

由图 5 可得,随冲击载荷强度的增加,射孔压实带范围不断扩大,孔隙度与渗透率损害程度增大,特别当 $p_f \geq 15$ GPa 时,孔道内壁表面砂岩渗透率接近于零。这是由于射孔冲击载荷的剪切摩擦和压实作用改变了孔道周围岩石的力学特性,降低了岩石的强度和孔隙流通能力,且冲击载荷强度越大,岩石破损带范围及压实程度越大,造成射孔伤害程度越大。

表 1 射孔压实带厚度、孔隙度及渗透率下降幅度

Table 1 Compaction zone thickness and decrease amplitude of porosity and permeability

距孔道入口端长度 L_d/mm	压实带厚度 h/mm	压实带平均孔隙度 φ_{ave}	孔隙度下降幅度/%	压实带平均渗透率 $k_{\text{ave}}/10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率下降幅度/%
1	7.5	0.148	26.0	1.8	98.6
14	6.0	0.159	20.5	1.9	98.5
28	4.5	0.162	19.0	2.1	98.4
42	3.5	0.165	17.5	2.7	97.9
56	3.0	0.168	16.0	4.1	96.8
70	2.8	0.173	13.5	5.6	95.6
84	2.5	0.177	11.5	8.4	93.5
98	2.0	0.181	9.5	12.3	90.5
112	1.5	0.185	7.5	15.4	88.1
126	1.2	0.188	6.0	16.7	87.1
140	1.0	0.192	4.0	20.8	83.9
平均值	3.2	0.173	13.8	8.3	93.5

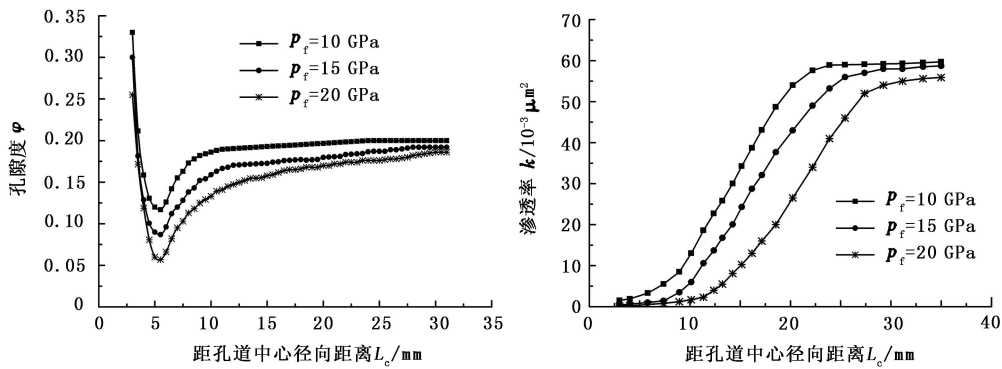


图 5 不同压力峰值作用下砂岩径向孔隙度与渗透率分布

Fig.5 Distribution of radial porosity and permeability under different peak pressure

4.2 砂岩强度

图 6 为不同砂岩屈服强度时,距孔道入口端 5 mm 处砂岩径向孔隙度与渗透率分布。

射孔冲击载荷作用下孔道内壁砂岩的有效应力超过了屈服强度,引起颗粒破碎与压实,在这个过程

中,伴随着冲击载荷能量的损失,且当冲击载荷能量不足以引起砂岩强度破坏时,压实带厚度也将不再增加。因此,砂岩屈服强度越低,冲击载荷能量损失速率越慢,颗粒破碎带越宽,孔隙度与渗透率伤害程度随之增加。图 6 说明了这个问题。

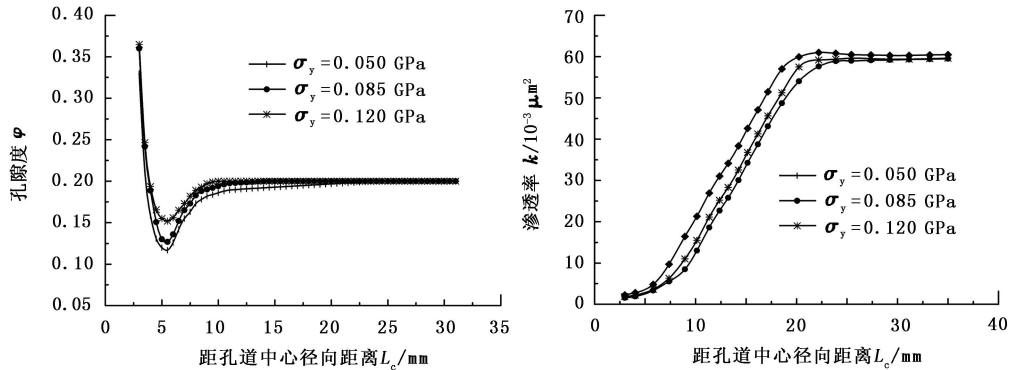


图 6 不同强度时砂岩径向孔隙度与渗透率分布

Fig.6 Distribution of radial porosity and permeability with different strength of sandstone

5 结 论

- (1) 数值分析结果与试验数据能够较好地吻合,验证了射孔压实伤害评价方法的有效性。
- (2) 由于射孔冲击载荷的剪切摩擦作用,孔道内壁表层砂岩破裂,形成网状微裂缝,增加了砂岩孔隙度,但网状微裂缝不仅狭窄,而且比原始孔隙结构阻力大,流通性差,因而砂岩渗透率明显降低。
- (3) 随着压力脉冲载荷沿孔道轴向的衰减,砂岩压实带厚度、孔隙度与渗透率伤害程度逐渐变小。
- (4) 射孔冲击载荷的剪切摩擦和挤压作用改变了孔道周围岩石力学特性,形成压实带,降低了孔隙流通能力,且冲击载荷强度越大、岩石屈服强度越低,破损带范围越广,造成的射孔压实伤害程度越大。

参考文献:

[1] SWIFT R P. Micro-mechanical modeling of perforating shock damage[R]. SPE 39458, 1998.

[2] 黄风雷,孙新波,罗晓娟,等. 贝雷砂岩射孔损害区核磁共振试验研究[J]. 北京理工大学学报,1999,19(s1):33-37.

HUANG Feng-lei, SUN Xin-bo, LUO Xiao-juan, et al. An investigation of Berea sandstone damage zone using nuclear magnetic response (NMR)[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999,19(s1):33-37.

[3] 李东传,唐国海,孙新波,等. 射孔压实带研究[J]. 石油勘探与开发,2000,27(5):112-114.

LI Dong-chuan, TANG Guo-hai, SUN Xin-bo, et al. A study on perforation crushed-zone[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(5):112-114.

[4] VERONIKA Vajdova, ZHU Wei, CHEN Tzu-Mo Natalie, et al. Micromechanics of brittle faulting and cataclysmic

- flow in tavel limestone[J]. Journal of Structural Geology, 2010,32(1):1158-1169.
- [5] THURMAN E, SCOTT K C Nielsen. The effects of porosity on the brittle-ductile transition in sandstones[J]. Journal of Geophysical Research, 1991,96(B1):405-414.
- [6] WONG Teng-fong, CHRISTIAN David, ZHU Wen-lu. The transition from brittle faulting to cataclysmic flow in porous sandstones: mechanical deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102(B2):3009-3024.
- [7] MORRIS J P, LOMOV I N, GLENN L A. A constitutive model for stress-induced permeability and porosity evolution of Berea sandstone[J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(B10):2485-2496.
- [8] MORRIS J P, LOMOV I N, GLENN L A. Simulating perforation permeability damage and cleanup[J]. Society of Petroleum Engineers, 2001,23(4):120-137.
- [9] API RP 19B-2006. Recommended practices for evaluation of well perforators[S]. Washington: API Publishing Services, 2006.
- [10] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 储层岩石微观结构性质的分析方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(1):80-87.
- YAO Jun, ZHAO Xiu-cai, YI Yan-jing, et al. Analysis methods for reservoir rock's microstructure[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007,31(1):80-87.
- [11] HILTL M, HAGELBERG C R, SWIFT R P. Dynamic response of Berea sandstone shock-loaded under dry, wet and water-pressurized conditions[C]. International Conference on High Pressure Science and Technology Honolulu, National Technical Information Service, 1999.
- [12] KARACAN C Ozgen, HALLECK P M. Comparison of shaped-charge perforating induced formation damage to gas and liquid-saturated sandstone samples[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003,40(3):61-75.
- [13] 孟万斌, 吕正祥, 唐宇, 等. 基于砂岩组构分类评价的储层渗透率预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2013,37(2):1-6.
- MENG Wan-bin, LÜ Zheng-xiang, TANG Yu, et al. Reservoir permeability prediction based on sandstone texture classification[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013,37(2):1-6.
- [14] 赵伦, 吴欣松. 砂岩储集层孔隙度评价的热解失重方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(5):18-20.
- ZHAO Lun, WU Xin-song. Evaluation method of sandstone reservoir porosity through thermal decomposition weightlessness[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007,31(5):18-20.
- [15] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1994:114-116.
- [16] RUBIN B, VOROBIEV O Y, GLENN L A. Mechanical and numerical modeling of a porous elastic-viscoplastic material with tensile failure[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000,37(7):1841-1871.

(编辑 沈玉英)