

# 水泥石气密封性实验研究

杜金龙<sup>1,2</sup>, 金衍<sup>1,2\*</sup>, 李坤朝<sup>1,2</sup>, 王世永<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, jiny@cup.edu.cn

收稿日期: 2018-05-11

**摘要** 固井水泥在各种复杂载荷的共同作用下, 易发生气密封失效, 针对该问题, 本研究开展了不同加载方式下水泥石的力学特性分析实验, 结合渗透率和声发射监测, 对复杂载荷条件下水泥石损伤及渗透性变化进行研究, 并分析了它们对水泥环气密封性的影响。研究发现, 当水泥石所受应力低于其扩容屈服应力时, 水泥石被压缩, 渗透率降低, 气密封性增强; 当水泥石所受应力超过其扩容屈服应力时, 水泥石损伤严重, 渗透率增大, 气密封性下降。循环加载过程中, 水泥石损伤、裂缝的出现和发展主要发生在首次循环加卸载过程中。

**关键词** 水泥石; 扩容损伤; 渗透率; 气密封性; 三轴实验; 循环加载

## 0 引言

对固井水泥环性能的研究始于20世纪60年代, 当时主要研究水泥与套管及地层之间胶结面的性质, 在此过程中产生了界面胶结力<sup>[1]</sup>、界面剪切力<sup>[2]</sup>等概念。水泥环力学密封失效特性受到重点关注是在20世纪90年代, 真正从力学密封角度对水泥环开展研究的是Goodwin<sup>[3]</sup>等人。他们基于水泥环密封特性受温度和压力影响这一特性, 以套管内水泥环的应力状态为变量, 监测水泥环与套管结构体的渗透性变化, 分析水泥环结构体的密封性能。他们的研究使行业内意识到固井水泥的完整性和固井水泥与套管、地层组成的结构体的密封性对于井筒安全的重要性, 水泥环力学密封性的研究开始进入到人们的视线并逐步发展起来。Krusche<sup>[4]</sup>利用与Goodwin等人类似的实验装置和方法, 也得到了同样的压力对水泥环力学影响规律。Bosma<sup>[5]</sup>等人提出了一种有限元分析模型来模拟水泥环的行为, 相对于理论分析, 有限元分析中允许使用

更有效的岩石和水泥的本构关系, 但其中并没有考虑水泥的渗透特性。

对于变载荷作用下材料的力学特性研究, 主要集中在金属材料、混凝土材料和岩石材料, 并形成了一些较为成熟的理论和实验方法。但对于固井水泥, 相关的研究成果较少, 可以借鉴混凝土和岩石材料的理论和方法来研究水泥石疲劳载荷下的力学特性。对混凝土疲劳载荷的研究较多<sup>[6-11]</sup>。Ravi<sup>[12]</sup>对水泥石进行了循环加载实验, 发现非发泡水泥在循环加载应力超过其抗压强度的50%之后, 其应变曲线不再呈现线性, 而且对高应力循环抵抗能力差。Shadravan<sup>[13]</sup>在不同的内外套管压差情况下进行水泥环疲劳破坏实验, 得出结论: (1) 径向裂缝总是最先出现; (2) 水泥环内外套管压差越大, 疲劳失效周期越小。

目前, 对于水泥环密封完整性研究, 主要集中在水泥环本体破坏和胶结面失效, 对于水泥环损伤的研究较少, 基于损伤导致的与渗透率相关的密封失效研究基本处于空白, 而现场出现的水泥环完整性失效,

引用格式: 杜金龙, 金衍, 李坤朝, 王世永. 水泥石气密封性实验研究. 石油科学通报, 2018, 03: 313-319

DU Jinlong, JIN Yan, LI Kunchao, WANG Shiyong. Experimental study of air sealing of cement. Petroleum Science Bulletin, 2018, 03: 313-319. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.028

在很多情况下,水泥环既没有发生本体破坏,胶结面也属完整。因此,对于水泥环损伤及其导致的气密封性失效的原因和机理开展研究,具有实际的现场意义。

## 1 实验设备及样品

实验使用美国GCTS公司RTR-1500测试系统(图1)。RTR高温高压岩石综合测试系统是一套闭环数字伺服控制装置,用于简便、快速地进行岩石试样三轴实验。能够模拟地层,在各种复杂条件下对岩石材料进行单轴或三轴动态岩石力学参数、原始地应力、超低渗透率等参数的测试。快速脉冲衰减渗透率控制器可在高温、高压、三轴条件下测量小于 $1\ \mu\text{D}$ 的液体或气体的渗透率,测试样品两端最大承受压差是 $20\ \text{MPa}$ 。声发射设备采用了美国物理声学公司生产的2/4/6差分式前置放大器,增益选择为 $20/40/60\ \text{dB} \pm 0.5\% \text{ dB}$ (图2)。

实验样品由中海油田服务有限公司油田化学研究院提供,其配方为:G级水泥+25.00%硅粉+10.00%

微硅+4.00%降滤失剂+1.00%缓凝剂+1.00%分散剂+0.20%消泡剂,水泥浆的液固比为0.43,在常温常压条件下养护30天,样品尺寸为 $50\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ ,见图3。

### 1.2 实验方案及流程

固井水泥环在经历压裂、注汽、生产、停产或者其他的一些操作后,可能会导致水泥环失效。一般认为水泥石失效的主要原因有:(1)水泥石产生残余变形,造成水泥环与套管、地层脱粘,形成微环隙。(2)水泥石在循环加载过程中产生微裂缝,造成渗透率增大。本文主要研究残余变形和渗透率。实验分为两部分,(1)观察循环加载过程中,水泥石的残余应变特性,研究残余应变的产生规律和影响因素。(2)应力加载过程中,水泥石的形变和渗透率变化,以及它们对水泥石气密封性的影响。在加载过程中测量渗透率,辅以声发射监测来判断水泥石内部结构的变化状况。具体流程和方法如图4所示。

由于克氏渗透率在测量致密岩石时有很大误差,



图1 RTR-1500测试系统及控制面板

Fig. 1 RTR-1500 test system and control panel



图2 声发射设备

Fig. 2 Acoustic emission equipment

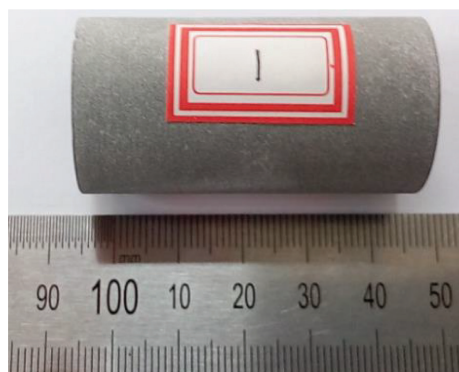


图3 实验样品

Fig. 3 Experimental samples

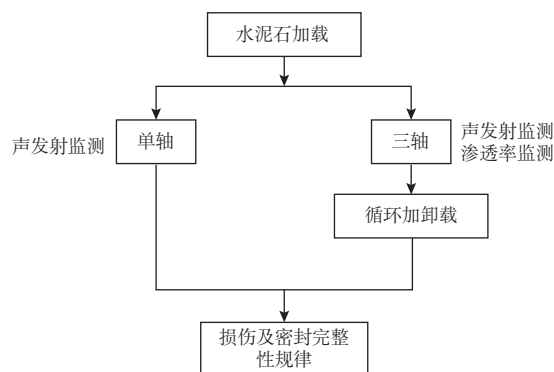


图4 实验方案

Fig. 4 Experimental scheme

Brace等<sup>[14]</sup>在1968年提出脉冲衰减渗透率测试法。与稳态法渗透率测试不同<sup>[15]</sup>，脉冲渗透率的测试不需记录岩样出口流速和驱替压差，而是在测试岩样入口端施加一定的压力脉冲，记录该压力脉冲在岩样中的衰减数据，然后结合相应的理论公式计算渗透率，测量效率比稳态法更高，本文的渗透率测量采用了脉冲衰减法。

## 2 实验结果

### 2.1 扩容与渗透性关系

在应力加载作用下，随着应力增大，岩石材料体积应变由最初的压缩而变成膨胀的现象，称之为扩容。岩石从应力加载开始到最终破坏，扩容是重要现象，是岩石的一种普遍的体积内性质，而非仅仅是表面变形的现象，宏观上的扩容是由于微观裂缝引起的。由实验结果可知，水泥石具有明显的扩容现象(图5)，水泥石出现扩容，标志着内部已产生微裂缝，而微裂缝的产生影响水泥石渗透率，进而影响其气密封性能，最终导致整个井筒完整性失效。在不同围压条件下，对水泥石进行三轴实验发现，围压不仅能提高其峰值应力，扩容屈服应力也有所提高(表1)。

如图6所示，应力加载初期，随着应力增大，水泥石内部孔隙受到压缩，渗透率降低，水泥石气密封

性能增强，该阶段几乎没有声发射计数，说明内部结构完整，除孔隙被压缩外，没有裂缝产生。继续加载，在水泥石体积压缩到达体积应变峰值点(A点)前，体积压缩速率降低，进入扩容阶段，此时声发射计数出现且较多，说明内部出现裂缝，渗透率明显增大。再继续加载，扩容量继续增大，内部裂缝继续发展和贯通，渗透率持续增大。由实验可知：水泥石在加载过程中存在一个产生损伤的阈值点。扩容损伤导致水泥石渗透性增大，从整个加载过程来看，渗透率初始值为45 μD，在A点处增大到90 μD，实验结束时，增大至228 μD，整个过程中水泥石没有发生宏观破坏，但渗透率的增大最终导致水泥石气密封失效。

### 2.2 循环加载条件下水泥石气密封失效特性

在循环加卸载实验阶段，水泥石渗透率随加载和卸载过程降低或增加，这是由于水泥石内部孔隙被压缩或释放导致的。但是在整个循环加载阶段，当循环加载峰值低于扩容屈服点时(即体积应变由压缩转为膨胀的拐点)，随着加载次数的增加，渗透率降低。也就是说在这个阶段，渗透率是下降的。在应力卸载后，虽然有一部分变形由于受损未能恢复，但这部分不能恢复的形变，几乎没有声发射数据，说明水泥石内部没有形成可以让气体流通的裂缝(图7)。

由图8和图9可以看出：当循环加载峰值超过扩容屈服点时，在单次加载阶段(第二次循环)，水泥石

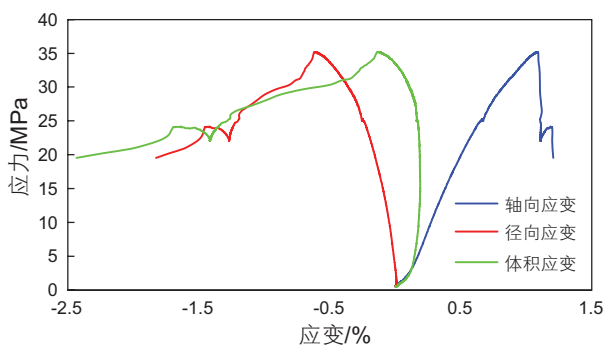


图5 单轴加载条件下水泥石应力应变曲线及实验材料  
Fig. 5 Stress-strain curve of cements and cement samples



2-11 实验前

2-11 实验后

表1 不同围压扩容屈服应力及强度结果

Table 1 Dilatancy yield stress and strength results in confining pressure

样品编号	1	2	3	4
围压/MPa	5	10	20	25
扩容屈服应力/MPa	42	48	52	57
最终强度/MPa	48	53	61	66

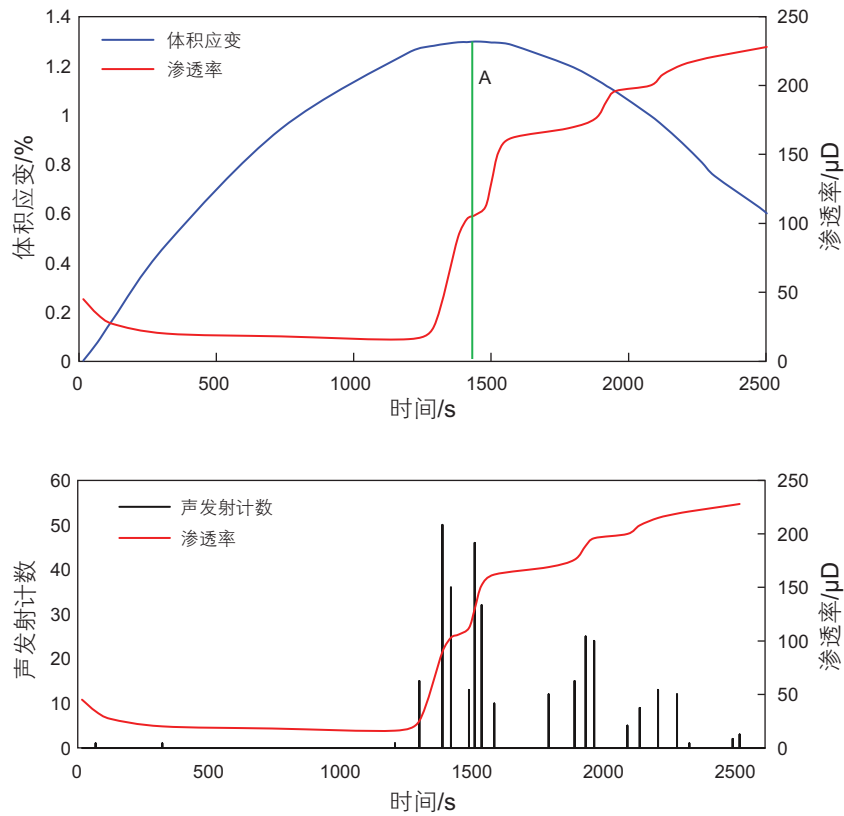


图6 2号水泥石体积应变、声发射计数与渗透率关系  
Fig. 6 The volume strain, AE counts and permeability

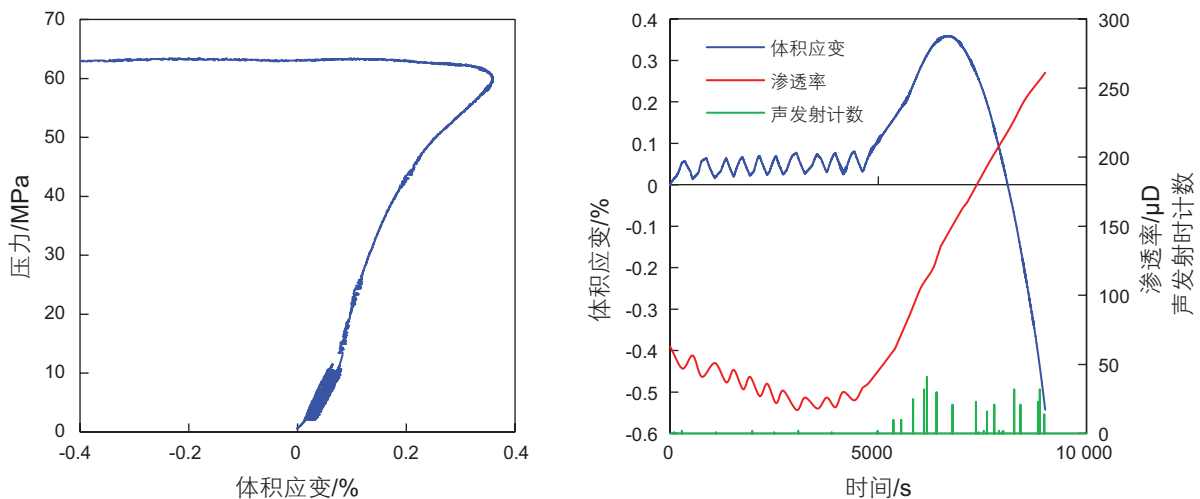


图7 加载峰值10 MPa循环加载实验  
Fig. 7 Cyclic loading experiment with load peak 10 MPa

开始出现扩容, 体积应变由压缩转为膨胀。由于损伤, 水泥石的渗透率随加载过程升高, 随卸载过程降低。但整体来看水泥石渗透率是升高的, 也就是说, 每次加卸载的渗透率最大和最小值都比上次加卸载的高。这是因为水泥石加载峰值较高, 已经超过了其扩容损

伤应力, 水泥石受到损伤, 且产生了不可恢复的损伤, 在应力卸载后, 水泥石的渗透率因为裂缝的产生和沟通而升高, 声发射信号的数据可以证明这一点。每次加载过程中, 也会出现比较明显的声发射信号, 这是水泥石内部出现裂缝导致的。循环加载过程中, 水泥

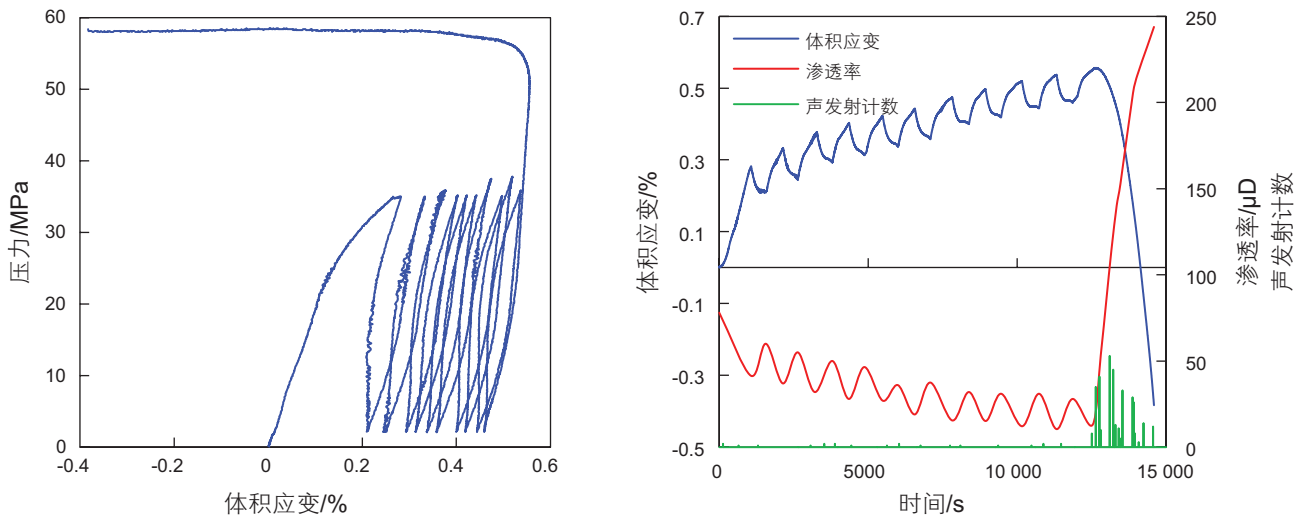


图 8 加载峰值 35 MPa 循环加载实验  
 Fig. 8 Cyclic loading experiment with load peak 35 MPa

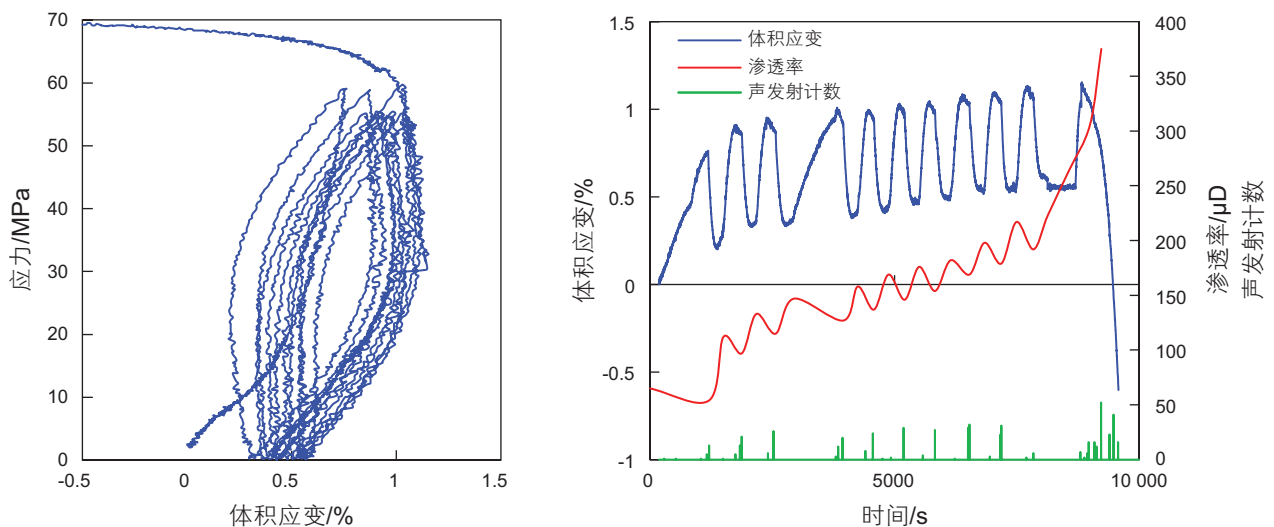


图 9 加载峰值 55 MPa 循环加载实验  
 Fig. 9 Cyclic loading experiment with load peak 55 MPa

石岩样不断受到损伤，内部裂缝不断产生、发展甚至贯穿，导致产生了渗流通道，所以渗透率会随着加卸载次数而升高。

由每次卸载后的残余变形和渗透率可以看出，最严重损伤发生在第一次循环中。由图 10 可知，在应力值超过损伤阈值的加卸载过程中，最严重损伤发生在第一次循环中，首次卸载后，水泥石残余变形占整个加卸载过程总残余变形的 50% 以上。

### 3 结论

(1) 水泥石在加载过程中存在扩容现象，扩容是水

泥损伤，内部产生微裂缝而导致的体积膨胀反应出来的宏观现象。扩容可以使水泥石在被未破坏的情况下，渗透率急剧增加，气密封性能失效。

(2) 扩容损伤对水泥石气密封性能影响很大：当水泥石所受应力低于其扩容屈服应力时，水泥石渗透率降低，水泥石气密封性能增强；而当水泥石所受应力超过其扩容屈服应力时，应力加载对水泥石造成严重损伤，水泥石渗透率上升，气密封性能下降。

(3) 循环加载过程中，水泥石损伤、裂缝出现和发展主要发生在首次循环加卸载过程中，残余应变量最大。单次加卸载循环造成的损伤、残余变形及渗透率的增加都会随加载次数降低。

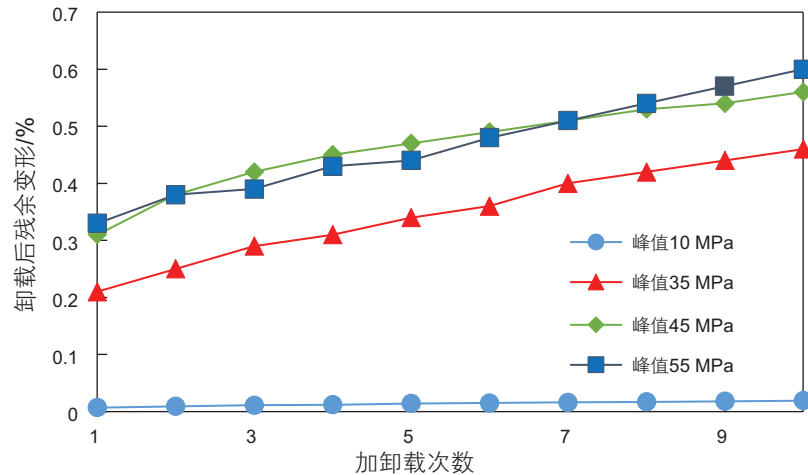


图 10 水泥石残余应变与加卸载次数之间关系

Fig. 10 Cement residual strain and cycles

## 参考文献

- [1] BEARDEN W G, SPURLOCK J W, HOWARD G C. Control and prevention of interzonal flow[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17(5): 579–584.
- [2] CARTER L G, EVANS G W. A study of cement-pipe bonding[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(2): 157–160.
- [3] GOODWIN K J, CROOK R J. Cement sheath stress failure[J]. SPE Drilling Engineering, 1992, 7(04): 291–296.
- [4] KRUSCHE K, JOHNSON C R, BRAUD N Y, et al. Application of engineered cementing solution to solve long-term cement integrity issues in Tunisia[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [5] BOSMA M, RAVI K, VAN DRIEL W, et al. Design approach to sealant selection for the life of the well[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [6] GRAY W H. Fatigue properties of lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Aci, 1961, 58(8): 149–162.
- [7] MURDOCK, JOHN WASHBUM. A critical review of research on fatigue of plain concrete[R]. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station, 1965.
- [8] MUIR S E S J, BENNETT E W. Some Fatigue tests of high-strength concrete in axial compression[J]. Magazine of Concrete Research, 1967, 19(59): 113–117.
- [9] KIM J K, KIM Y Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete[J]. Cement & Concrete Research, 1996, 26(10): 1513–1523.
- [10] GORDON R B, DAVIS L A. Velocity and attenuation of seismic waves in imperfectly elastic rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(12): 3917–3935.
- [11] HOLCOMB D J. Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2012, 86(B7): 6235–6248.
- [12] RAVIK K, MCMECHAN D E, Reddy B R, et al. A comparative study of mechanical properties of density-reduced cement compositions[J]. Spe Drilling & Completion, 2007, 22(2): 119–126.
- [13] SHADRIVAN A, SCHUBERT J, AMANI M, et al. HPHT cement sheath integrity evaluation method for unconventional wells[M]. Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [14] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. J Geophys Res, 1968, 73(6): 2225–2236.
- [15] 孙军昌, 杨正明, 郭和坤, 等. 致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 001009–1016. [SUN J C, YANG Z M, GUO H K, et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods[J]. Rock & Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1009–1016.]

## Experimental study of air sealing of cement

DU Jinlong<sup>1,2</sup>, JIN Yan<sup>1,2</sup>, LI Kunchao<sup>1,2</sup>, WANG Shiyong<sup>1,2</sup>

*1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

*2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing, 102249, China*

**Abstract** Cement is prone to seal failure under complex load conditions. For oil and gas wells, such as hydraulic fracturing, steam injection or other operation, the stress situation of the cement sheath will change. The cement sheath and the casing and the formation in the stress-strain relation change, forming a micro ring gap, or cause internal damage in the cement to form micro cracks and increasing permeability, resulting in the loss of the sheath seal, which affects the safety and life of oil and gas wells. The failure of cement sheath seals not only increases the cost of subsequent drilling, completion and production increase, but also affects the period of well construction, the safe exploitation of oil and gas and the production capacity of the oil field, which may cause complete well rejection and even the loss of personnel and environmental damage. In order to deal with this problem, the industry has studied the failure of cement sheaths under various loads, and some mature theories have been obtained for the study of conventional cement. The damage of cement and the change of permeability under the condition of cement load are relatively rarely studied. Based on the experiments on the stress and strain relationship of cement under different loading methods, the failure mechanism of cement is explored and studied in combination with permeability and acoustic emission monitoring.

**Keywords** cement; dilatancy damage; permeability; airtightness; triaxial test; cyclic loadin

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.028

(编辑 马桂霞)