

# 碳酸盐岩声发射地应力测量方法实验研究

卢运虎<sup>1</sup>, 陈 勉<sup>1</sup>, 金 衍<sup>1</sup>, 潘东兴<sup>2</sup>, 侯 冰<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油化工集团国际石油工程有限公司, 北京 100728)

**摘 要:** 在碳酸盐岩 Kaiser 效应实验研究的基础上, 分析了不同加载应力和岩芯放置时间对碳酸盐岩 Kaiser 效应点的影响规律, 得出预加载应力为单轴强度的 (25%~70%)、放置时间为 4 个月左右时岩石的 Kaiser 效应记忆性最好; 讨论了 Felicity 效应比值的分布特征, 获得了应力、时间耦合下碳酸盐岩地应力的计算公式, 形成了碳酸盐岩地层地应力确定方法。该法应用于西部某油田地应力测量, 解释出的地应力结果精度满足工程应用的要求, 解决了时间、应力敏感性带来的碳酸盐岩地应力测量精度低的难题, 完善了地应力的测量体系, 为碳酸盐岩地层高效开发提供了基础数据。  
**关键词:** 碳酸盐岩; 地应力; Kaiser 效应; 时间敏感性; 应力敏感性

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)08-1192-05

**作者简介:** 卢运虎(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事地应力、岩石力学参数测试方法和钻井过程中井壁稳定力学中的有效应力、岩石本构关系、岩石动态特性、岩石屈服与破坏等基本问题研究。E-mail: luyunhu20021768@163.com。

## Experimental study on stress measurement for sound emission in carbonate formation

LU Yun-hu<sup>1</sup>, CHEN Mian<sup>1</sup>, JIN Yan<sup>1</sup>, PAN Dong-xing<sup>2</sup>, HOU Bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. International Petroleum Engineering Ltd., SINOPEC, Beijing 100728, China)

**Abstract:** Based on the experimental study on the Kaiser effect for carbonate formation, the effect of different loading stresses and the time of core storage on Kaiser effect points for carbonate formation are analyzed. It is concluded that when the pre-loaded stress is 25% -70 % of the uniaxial strength and the time of core storage is 4 months, the Kaiser effect memory is the best. The distribution characteristics of the ratio of Felicity effect are discussed, the in-stress formula for carbonate formation which couples time and stress is obtained, and the method for stress determination in carbonate formation is generated. This method is applied to the stress measurement in an oil field in western China. The precision of the explained stress meets the requirements of engineering application. The problem of low precision of in-stress measurement for carbonate formation caused by time and stress sensitivity is solved. The proposed method improves stress measurement system and provides basic data for the efficient exploitation of carbonate formation.

**Key words:** carbonate formation; in-situ stress; Kaiser effect; time sensitivity; stress sensitivity

## 0 引 言

C&C 公司 2000 年的统计表明, 在世界范围内, 碳酸盐岩中的油气储量约占油气总储量的 38%, 大油气田中海相碳酸盐岩中的油气储量约占 60%, 说明碳酸盐岩是一个重要的勘探领域<sup>[1]</sup>。碳酸盐岩地层孔缝洞发育、非均质性强给钻井过程中的井壁稳定和增产措施的优化设计带来了巨大的挑战, 上述问题的关键技术难题在于如何准确测量地层地应力<sup>[2]</sup>。目前地应力测量方法多种多样, 岩石声发射 Kaiser 效应是一种简捷的地应力测量方法<sup>[3]</sup>。自从 1963 年 Goodman 通过实验发现在岩石材料中存在 Kaiser 效应, 认为岩石

对所经历的最大应力或应变具有记忆的特性, 从此 Kaiser 效应被广泛应用于测试原岩地应力<sup>[4]</sup>。利用声发射 Kaiser 效应测量地应力受多种因素的影响, 如围压、岩性、岩石强度、含水饱和度、岩芯放置时间、加载速率和加载路径等<sup>[5-8]</sup>。1989 年, Michihiro 等在室内试验中发现了不同岩性岩石加载时间对 Kaiser 效应的影响, 提出了岩石对先前最大应变的记忆准确程度大于对应力的记忆<sup>[9]</sup>。Li 等在 1997 年发现不同取芯

基金项目: 973 项目 (2010 CBN2267002008); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0840)

收稿日期: 2010-08-07

角度对 Kaiser 效应的影响<sup>[10]</sup>。邓金根等认为 Kaiser 效应与岩石性质有关, 试样取出地面后应立即密封, 并尽快进行试验, 放置时间应不超过 1 a 且试样必须是高强度、致密岩石<sup>[11]</sup>。Lavrov 在 2002 年发现脆性岩石在多级加载过程中加载速率对 Kaiser 效应有影响<sup>[8]</sup>。2004 年金衍等提出了深部地层复合地应力测量的方法, 解决了困扰 Kaiser 实验对岩芯的高标准要求<sup>[12]</sup>。2008 年陈勉等研究了加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应的影响, 认为不同加载速率对灰岩 Kaiser 效应影响不明显, 而对砂岩、泥岩等岩石, Kaiser 效应点应力值随加载速率的增加而增大, 测量过程中应合理确定加载速率<sup>[13]</sup>; 2009 年金衍等提出了灰岩 Kaiser 效应的时间敏感性, 进一步完善了声发射 Kaiser 效应地应力测量理论<sup>[14]</sup>。上述研究表明, 岩石 Kaiser 效应测量地应力的方法主要在于如何提高实验过程中的测量精度。对于碳酸盐岩地层, 岩芯放置时间和加载应力对地应力测量是否有影响? 如何准确确定 Kaiser 效应点的应力值是碳酸盐岩地层地应力测量的一大难题。

在碳酸盐岩 Kaiser 效应实验研究的基础上, 分析了不同加载应力、时间对碳酸盐岩声发射 Kaiser 效应点的影响规律, 讨论了 Felicity 效应比值分布特征, 得到了地应力的计算公式, 形成了碳酸盐岩地层地应力确定方法。该方法解决了时间、应力敏感性带来的碳酸盐岩地应力测量精度低的难题, 完善了地应力的测量体系, 为碳酸盐岩地层高效开发提供了基础数据。

## 1 地应力测试方法

### 1.1 试件准备

实验岩样为碳酸盐岩岩芯, 选取试样应注意岩芯的完整性, 避免预加载时较低载荷的情况下岩芯发生破坏。根据岩石力学试样标准, 将全尺寸岩芯加工成  $\phi 25$  mm、长度为 50 mm 的标准圆柱形 (图1)。试样两端的平行度满足要求, 避免过程中产生过多的噪音。



图1 碳酸盐岩标准试样

Fig. 1 Standard samples of carbonate rock

### 1.2 实验装置

实验仪器是由 MTS816 岩石测试系统 (图2) 和美国 SAMOS<sup>TM</sup> 声发射检测系统 (图3) 组成。MTS816 岩石测试系统是全数字计算机自动控制系统, 可实时

记录荷载、应力、位移和应变值, 并同步绘制荷载—位移、应力—应变曲线。SAMOS<sup>TM</sup> 声发射检测系统是美国 PAC 公司研制的第三代数字化系统, 其核心是并行处理 PCI 总线的 PCI-8 声发射功能卡, 在一块板上具有 8 个通道的实时声发射特征提取、波形采集及处理的能力。它采用现代数字信号处理技术 (DSP), 是目前国际上先进的声发射处理系统。



图2 MTS816 岩石测试系统

Fig. 2 MTS816 rock test system



图3 SAMOS<sup>TM</sup> 声发射检测系统

Fig. 3 SAMOS<sup>TM</sup> acoustic emission detection system

### 1.3 实验原理与方法

岩石 Kaiser 效应的力学本质是岩石受原地应力作用所形成的特定的微裂缝在达到原地应力的载荷作用下重新活动和延展的反映。由于碳酸盐岩岩芯受放置时间、应力状态的影响, 导致地应力测量过程中 Kaiser 效应点超前 (Felicity 效应) 和滞后 (Kaiser 效应)。Kaiser 效应记忆的准确性可用 Felicity 比值来衡量, 即重复加载时的声发射起始载荷与原先所加最大载荷之比<sup>[15]</sup>。显然, Felicity 比值越接近 1 表示记忆越准确。根据 Felicity 比值对 Kaiser 效应点应力进行修正, 从而获得真实地应力值:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_K(t, \lambda)}{FR}, \quad (1)$$

$$\lambda = \sigma_c / \sigma_U, \quad (2)$$

式中,  $\sigma_T$  为真实 Kaiser 效应点应力值 (MPa),  $\sigma_K(t, \lambda)$  为实验 Kaiser 效应点应力值 (MPa),  $\lambda$  为岩石预加载应力与岩石单轴抗压强度的比值,  $t$  为岩芯的放置时间,  $FR$  为 Felicity 比值,  $\sigma_c$  为岩石预加载应力 (MPa),  $\sigma_U$  为岩石单轴抗压强度 (MPa)。

实验首先确定碳酸盐岩单轴抗压强度, 对试样预加载不同的应力 ( $\lambda \sigma_U$ ), 预加载后放置 3 h 后进行重复加载并记录声发射信号, 确定 Kaiser 效应点应力值; 同时, 对预加载后的试样放置不同的时间进行声发射

Kaiser效应实验，记录Kaiser效应应力值。所有试样均采用MTS816岩石测试系统进行加载，实验加载速率为0.002 MPa/s。

2 实验结果分析与讨论

2.1 碳酸盐岩的 Kaiser 效应的应力敏感性分析

实验测的碳酸盐岩岩芯的单轴抗压强度为63.75 MPa，预加载应力分别为单轴强度的5%~90%（以5%的增量增加），实验测试的具体结果见表1。

表 1 不同加载应力条件下岩石的 FR 值

Table 1 FR values of rock under different loading stresses				
岩芯编号	预加载应力/MPa	$\lambda$ /%	Kaiser点应力/MPa	FR
H1	3.19	5	2.90	0.91
H2	6.38	10	5.61	0.88
H3	9.56	15	10.04	1.05
H4	12.75	20	11.86	0.93
H5	15.94	25	17.22	1.08
H6	19.13	30	18.36	0.96
H7	22.31	35	23.20	1.04
H8	25.50	40	24.74	0.97
H9	28.69	45	29.26	1.02
H10	31.88	50	31.24	0.98
H11	35.06	55	33.31	0.95
H12	38.25	60	39.40	1.03
H13	41.44	65	41.03	0.99
H14	44.63	70	41.95	0.94
H15	47.81	75	43.51	0.91
H16	51.00	80	45.90	0.90
H17	54.19	85	50.40	0.93
H18	57.38	90	51.07	0.89

从图4得知，岩芯放置时间一定不同加载应力的情况下Felicity比值的变化特征大概可以分为3个阶段：

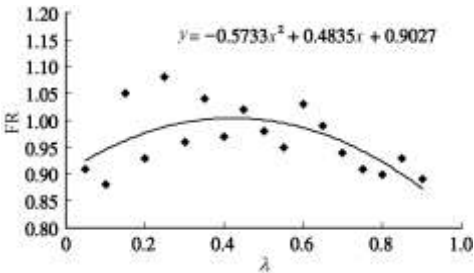


图 4 不同的加载应力对 Felicity 比值的影响规律  
Fig. 4 Effect of different loading stresses on Felicity ratio

- (1) 当  $\lambda \leq 25\%$  时，Felicity 比值波动较大，整体呈上升趋势，波动范围为 0.88~1.05。此阶段预加载应力水平比较低，为弹性变形，因此，重复加载时试样主要表现为滞弹性恢复现象。波动点一般为操作不当等外界因素干扰的结果。
- (2) 当  $25\% < \lambda \leq 70\%$  时，Felicity 比值波动范围比较小，平均值接近 1。预加载应力水平适中，微裂缝也比较稳定，岩石 Kaiser 效应记忆应力水平比较高。
- (3) 当  $70\% < \lambda$  时，Felicity 比值最大值为 0.93，呈逐渐减小的趋势。预加载应力水平比较高并接近试

样单轴强度，致使试样内部产生了大量微破裂。重复加载时，裂缝极度不稳定，裂缝摩擦滑动产生的声发射信号较多，导致了Kaiser点的超前出现。

将表1中的数据点进行回归拟合，即可得到岩芯在一定放置时间不同加载应力情况下Felicity比较的关系式：

$$FR = -0.5733\lambda^2 + 0.4835\lambda + 0.9027 \quad (3)$$

2.2 碳酸盐岩的 Kaiser 效应的时间敏感性分析

碳酸盐岩岩芯预加载应力后放置不同的时间，试验测得了岩石的 Kaiser 效应点（图 5（a）~（d））。图中箭头指示的位置为各曲线的 Kaiser 点。

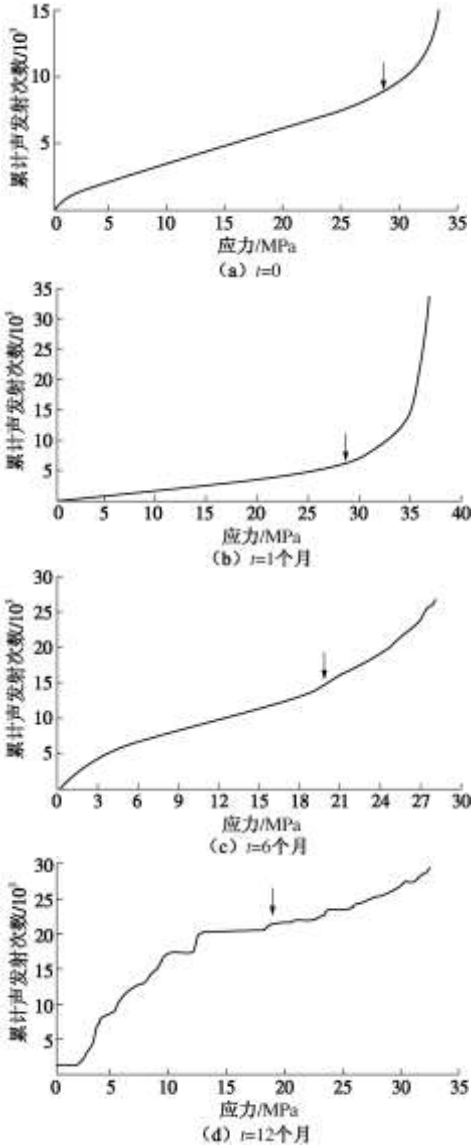


图 5 不同放置时间下岩石的 Kaiser 效应点

Fig. 5 Kaiser effect points of rock under different storage time

根据实验获得了不同放置时间下岩石 Kaiser 效应点的应力值，计算了相应的 FR 值，结果见表 2。从图 6 可以看出，FR 值随时间的变化规律大致可以分为 3 个阶段：

- (1) 当  $t < 1$  个月时，FR 值随时间的增长呈现逐

渐减小。由于预加载对试样造成了损伤, 岩石内部形成了一定的微裂缝, 加载后的短时间内 (1 个月), 损伤未完全恢复, 一部分微裂缝处于张开状态, 导致 Kaiser 效应点超前。

(2)  $1 \leq t < 4$  个月时, FR 值增大, 在四个月左右时达到最大值。重复加载时, 在微裂缝处会产生应力集中, 从而 Kaiser 点会提前出现。随着时间的增长, 损伤逐渐恢复, 重复加载达到预加载造成损伤程度时所需要克服的阻力增加, FR 值逐渐增大, 在 4 个月左右后达到最大值, 出现 Kaiser 效应。

(3)  $t \geq 4$  个月时, FR 值逐渐减小, 且其减小的速率远小于前一个月减小的速率。

表 2 不同放置时间下岩石的 FR 值

Table 2 FR values of rock under different storage time					
岩芯 编号	时间 隔/月	加载应力 20 MPa		加载应力 30 MPa	
		Kaiser 点应力 /MPa	Felicity 比值 FR	Kaiser 点应力 /MPa	Felicity 比值 FR
H19	0	18.4	0.92	28.5	0.95
H20	0.5	17.8	0.89	28.2	0.94
H21	1	18.6	0.93	28.8	0.96
H22	2	18.2	0.91	31.2	1.04
H23	4	22.6	1.13	35.1	1.17
H24	6	19.6	0.98	33.3	1.11
H25	8	20.2	1.01	32.7	1.09
H26	10	19.4	0.97	31.5	1.05
H27	12	18.8	0.94	31.2	1.04

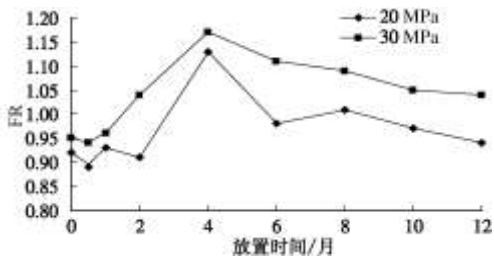


图 6 不同放置时间对岩石 FR 值的影响规律

Fig. 6 Effect of different storage time on Felicity ratio

将表 2 中的数据进行回归拟合, 获得了不同放置时间与岩石 FR 值的关系式

$$FR = -0.0042t^2 + 0.0567t + 0.9358 \quad (5)$$

2.3 碳酸盐岩 Kaiser 效应的时间应力敏感性耦合分析

通过上述实验数据分析, 在不同时间和加载应力的情况下, Felicity 比值与时间、应力的关系式为

$$FR(t, \lambda) = at^2 + b\lambda^2 + ct\lambda + dt + e\lambda + f \quad (6)$$

式中,  $a, b, c, d, e, f$  为实验拟合参数, 数值分别为  $-0.5832, -0.004, 0.00413, 0.04297, 0.4835$  和  $0.8945$ 。不同地区、深度的碳酸盐岩拟合参数不同。

从式 (6) 看出, 确定了岩芯放置时间、单轴抗压强度和不同的加载应力, 即得相应的 FR 值, 校正实验测得的 Kaiser 应力值, 消除碳酸盐岩地应力测量过程中的时间、应力敏感性, 提高地应力计算的精度。

3 现场应用

对西部某油田 TZX 井取芯进行实验, 取芯深度为 1958.6 m, 按图 7 所示方法在全尺寸岩芯上进行取芯, 方位分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 。实验岩芯单轴抗压强度为 68.42 MPa, 孔隙压力为 20.13 MPa, 有效应力系数为 0.85。

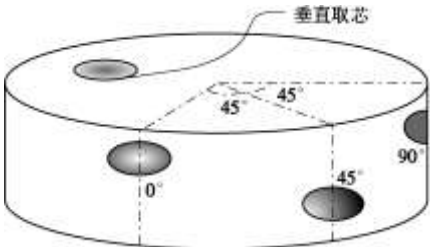


图 7 取芯示意图

Fig. 7 Schematic diagram of coring

对上述所取岩芯进行实验测得相应方向的正应力, 根据式 (6) 修正 Kaiser 效应点应力值, 利用式 (7) 计算出地应力的真实值<sup>[3]</sup>。计算结果见表 3。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} + \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} (1 + \tan^2 2\theta)^{1/2} + \alpha p_p, \\ \sigma_h &= \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} - \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} (1 + \tan^2 2\theta)^{1/2} + \alpha p_p, \\ \tan 2\theta &= \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ} - 2\sigma_{45^\circ}}{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $\sigma_H$  为最大水平主地应力 (MPa), 校正前  $\sigma_H=54.40$  MPa, 校正后  $\sigma_H=54.26$  MPa, 水力压裂  $=54.25$  MPa; 校正前  $\sigma_h=47.29$  MPa;  $\sigma_h$  为最小水平主地应力 (MPa), 校正后  $\sigma_h=47.53$  MPa; 水力压裂  $=47.42$  MPa,  $\alpha$  为有效应力系数;  $p_p$  为地层孔隙压力 (MPa);  $\sigma_{0^\circ}, \sigma_{45^\circ}$  和  $\sigma_{90^\circ}$  分别为  $0^\circ, 45^\circ$  和  $90^\circ$  3 个水平向岩芯 Kaiser 效应点应力。

表 3 TZX 井碳酸盐岩地应力测试结果

Table 3 Test results of stress of Well TZX in carbonate formation

取芯 方向	Kaiser 点应力/MPa	
	校正前	校正后
$0^\circ$	34.82	34.83
$45^\circ$	37.12	36.98
$90^\circ$	32.65	32.74

表 4 水平地应力解释结果

Table 4 Explaining results of horizontal stress

井号	井深 /m	水平最大地应力/MPa			水平最小地应力/MPa		
		新方 法	水力压 裂法	误差 /%	新方 法	水力压 裂法	误差 /%
LGX	5626~ 5632	122.58	119.5	2.60	106.2	102.6	3.51
LGY	5822~ 5830	137.18	134.3	2.17	93.32	90.82	2.75
TZF	4749~	117.62	113.5	3.59	75.15	70.24	6.99
	4758	114.10		0.49	76.57		9.01
	4749~	117.90	110.8	6.45	77.47	75.42	2.72
	4758	112.18		1.28	80.81		7.15
TZG	4864~ 4872	115.23	112.9	2.10	75.41	76.89	1.92

4872~	112.58		2.53	80.42		2.73
4881	116.78	109.8	6.36	83.23	78.28	6.32

为了验证实验的有效性,与现场小型压裂的试验结果进行了对比,发现校正后的结果更接近于水力压裂值。利用新方法对该地区其它几口井进行地应力解释,地应力解释精度满足工程需要,进一步证明了该方法确定碳酸盐岩地层地应力的合理性与准确性(表4)。

## 4 结 论

(1) 碳酸盐岩Kaiser效应的应力记忆精度随着预加载应力的改变而改变,其规律可以归结为:当 $\lambda \leq 25\%$ 时 $FR$ 值波动比较大;当 $25\% < \lambda < 70\%$ 时, $FR$ 值波动范围比较小,平均值与1比较接近;当 $70\% \leq \lambda$ 时, $FR$ 近似趋于逐渐减小的趋势。也就是说,当 $25\% < \lambda < 70\%$ 时,岩石的应力记忆精度比较高。

(2) 碳酸盐岩Kaiser效应存在时间敏感性:在放置时间一个月以内, $FR$ 值随时间的增长呈现逐渐减小的趋势;一个月后, $FR$ 值增大,在四个月左右时达到最大值;随后, $FR$ 值逐渐减小,且其减小的速率远小于前一个月减小的速率。随着搁置时间的变长Kaiser点变得越来越不清晰、越来越不容易识别。

(3) 获得了应力、时间耦合下碳酸盐岩地应力的计算公式并开展了现场应用,测量的地应力精度满足工程需要,形成了碳酸盐岩地层地应力确定方法。

## 参考文献:

- [1] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地质前缘, 2005, **12**(3): 15 - 22. (JIN Zhi-jun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins[J]. Earth Science Frontiers, 2005, **12**(3): 15 - 22. (in Chinese))
- [2] 刘建中, 张金珠, 张 雪. 油田应力测量[M]. 北京: 地震出版社, 1993. (LIU Jian-zhong, ZHANG Jin-zhu, ZHANG Xue. Oil field stress measurement[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 陈 勉, 金 衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guang-qing. Petroleum engineering related rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [4] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geo Soc Am Bull, 1963, **74**: 487 - 490.
- [5] 张广清, 金 衍, 陈 勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 360 - 363. (ZHANG Guang-qing, JIN Yan, CHEN Mian. Measurement of in-situ stresses by Kaiser effect under confining peressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 360 - 363. (in Chinese))
- [6] KOERNER RM, LORD AE. AE detection of prestress in soil and rock[C]// Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 73 - 86.
- [7] KURITA K, FUJII N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission[J]. Geophys Res Lett, 1979, **6**(1): 9 - 12.
- [8] LAVROV A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates[J]. Mechanics of Materials, 2001, **33**(11): 669 - 677.
- [9] MICHIIHIRO K, YOSHIOKA H, HATA K, et al. Strain dependence of the Kaiser effect for various rocks[C]// Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 87 - 95.
- [10] Yongyi Li, Douglas R.Schmitt. Effects of Poisson's ratio and core stub length on bottom hole stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, **34**(5): 761 - 773.
- [11] 邓金根, 黄荣樽, 田效山. 油田深部地层地应力测定的新方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, **21**(1): 32 - 35. (DENG Jin-gen, HUANG Rong-zun, TIAN Xiao-shan. A new method for measuring in situ stress in deep formation[J]. Journal of the University of Petroleum, 1997, **21**(1): 32 - 35. (in Chinese))
- [12] 石 林, 张旭东, 金 衍, 等. 深层地应力测量新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(14): 2355 - 2358. (SHI Lin, ZHANG Xun-dong, JIN Yan, et al. New method for measurement of in-situ stresses at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(14): 2355 - 2358. (in Chinese))
- [13] 陈 勉, 张 艳, 金 衍, 等. 加载速率对不同岩性岩石Kaiser效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **28**(1): 2599 - 2604. (CHEN Mian, ZHANG Yan, JIN Yan, et al. Experimental study of influence of loading rate on Kaiser effect of different lithological rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **28**(1): 2599 - 2604. (in Chinese))
- [14] JIN Yan, CHEN Mian. Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress[J]. Petroleum Science, 2009, **6**: 176 - 180.
- [15] LI Chun-lin, NORLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rock[J]. Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(4): 333 - 351.



