

# 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力

张广清 金 衍 陈 勉  
(石油大学岩石力学室 北京 102200)

**摘要** 随着地层深度的增加, 岩石 Kaiser 效应相对的应力会接近并且超过岩石的单轴抗压强度。此时无法再利用常规岩石 Kaiser 效应测定地应力, 而利用围压作用下岩石的 Kaiser 效应可测定深部地层地应力。通过对同一深度地层的岩样施加一组递增的围压, 研究了围压对岩石 Kaiser 效应的影响, 提出了利用围压下岩石 Kaiser 效应测定地应力的实验室方法, 并且论述了其测定原理。通过系统的实验研究, 发现岩石的 Kaiser 效应相对应的应力与所受的围压呈线性关系, 并得到了统计回归直线。将实验结果应用于现场的地应力计算, 地应力实验测量结果与现场水力压裂实验结果具有较好的吻合度。从而解决了深部地层中地应力的室内实验测定问题。

**关键词** Kaiser 效应, 地应力, 围压

**分类号** TU 459<sup>+</sup>.4

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)03-0360-04

## 1 引言

测定地应力的方法有多种, 利用岩石声发射 Kaiser 效应测定地应力是其中之一。考虑经济和测量精度等方面的综合因素, 目前, 声发射法测量地应力在国内外普遍受到重视。文[1]首先观察到金属具有 Kaiser 效应。将 Kaiser 效应用于研究地应力开始于 20 世纪 70 年代<sup>[2]</sup>。如果第二次加载载荷接近第一次加载过程的最大值, 声发射数急剧增加, 人们以此来确定岩石材料所受到的最大载荷值, 这就是 Kaiser 效应。

根据岩石对所受载荷的最大值具有“记忆”效应, 将取自地下的岩样在实验室条件下加载, 观察岩样在加载过程中发出的声信号变化, 找出声发射数剧烈变化的点, 即 Kaiser 点, 然后就可以确定岩样在地下所受的地应力。

随着声发射 Kaiser 效应测定地应力技术的广泛应用, 人们发现, 在测定深部地层地应力时, Kaiser 效应还没有出现, 试件已经破坏, 所测到的声发射信号实际上是试件的破裂信号。并且, 当地应力接近岩石的单轴抗压强度时, 不能正确分辨出 Kaiser 点, 否则会有 20% 左右的误差<sup>[3]</sup>, 这样就无法正确

测定地应力了。

因此, 要解决这一问题, 应该设法提高岩石的抗压强度。当作用于岩样的围压增加时, 岩样的抗压强度随之增加<sup>[4]</sup>。利用围压提高岩样的抗压强度后, 再施加轴向载荷, 并观察声发射信号变化, 确定 Kaiser 点, 从而计算出地层的地应力。但同时出现了两个问题: 围压对 Kaiser 效应有何影响? 如何根据围压条件下测得的 Kaiser 效应相对应的应力求得零围压下对应的 Kaiser 效应相对应的应力?

针对这一情况, 本文利用围压下岩石的 Kaiser 效应来测定地应力, 即通过对同一深度地层的岩样施加一组围压, 研究了深部地层地应力的测定方法、测定原理、实验结果及分析。

## 2 实验装置

图 1 为实验装置流程图, 包括 MTS 电液伺服控制加载系统, LOCAN-AT14Ch 声发射仪、声发射探头和围压装置等。MTS 电液伺服控制加载系统以 0.05 MPa/s 的加载速率给试样施加轴向载荷, 同时均匀增加围压值。等到围压升至某一预定值后, 保持围压值不变, 继续增加轴向载荷。两个声发射探头用于探测岩样受载过程中产生的声发射信号, 其

2000 年 5 月 22 日收到初稿, 2000 年 7 月 7 日收到修改稿。

作者 张广清 简介: 男, 25 岁, 硕士, 1996 年毕业于石油大学(华东)机电系机械理论及设计专业, 现为石油大学(北京)石油工程系博士研究生, 主要从事岩石力学及工程应用等方面的研究工作。

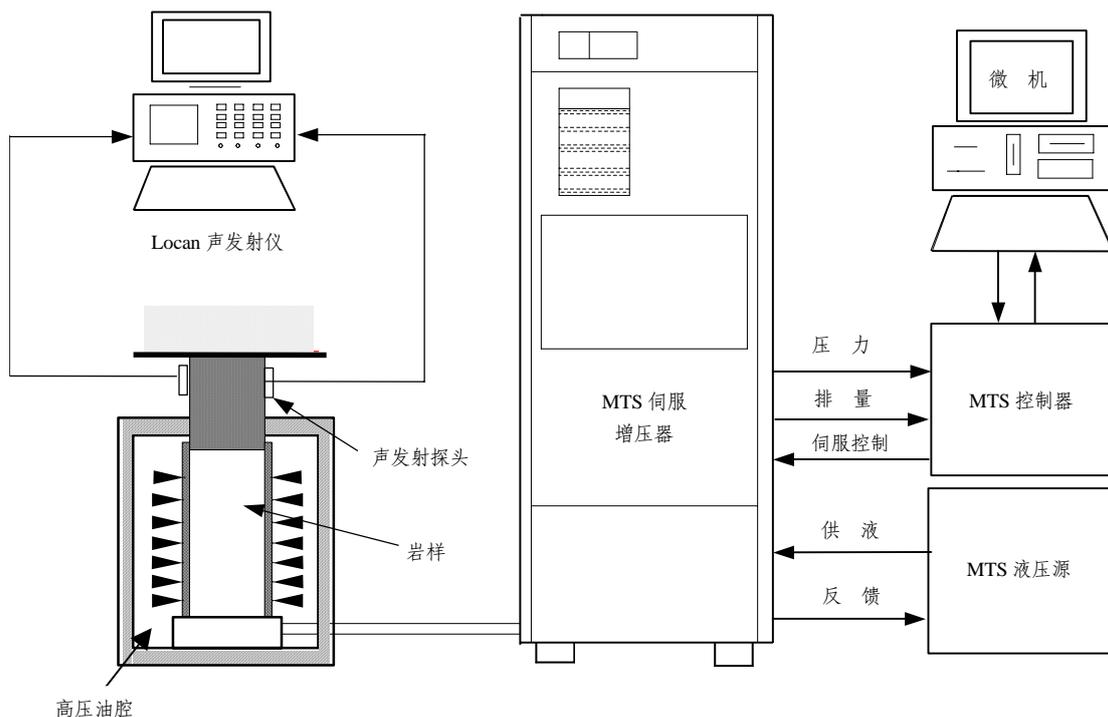


图 1 围压下声发射法测地应力流程图

Fig.1 Flow chart of in-situ stress measurement by acoustic emission under confining pressures

感应频率为 40~100 kHz。由于岩样在高压油腔内，将声发射探头直接置于试样两侧进行实验存在相当的难度，所以，将两个声发射探头置于与试样密切接触的垫块上，此垫块经过特殊加工，可以将岩样产生的声发射信号真实地传递给声发射探头。声发射信号经放大后被送至 LOCAN-AT14Ch 声发射仪进行记录和处理，声发射仪可以给出声发射数、声发射能量及其变化率随载荷的变化曲线。

实验中的试件为圆柱体，直径为 25 mm，高度为 50 mm。在试件两端面与垫块之间垫有薄片及定向块，用以减少端面摩擦和保证试件承受轴向均布载荷。所取试件均取自同一深度地层岩芯的垂直方向。

### 3 测量原理及步骤

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纹在达到原地应力的载荷作用下重新活动和延展的反映。当微裂纹在外载作用下生成和扩展时，发射出较强的声信号。根据这些声信号，判断微裂纹是否生成或扩展。假定铅垂向地应力为地应力场中的一个主应力，因此，只在原始尺寸岩芯 4 个方向上(1 个垂直方向，3 个各相隔 45°水平方向)取试样进行实验，就可以确定相应

深度地层的地应力。由实验测得的围压与地应力的关系曲线，将围压下测得的 4 个方向的正应力分别换算到零围压下的应力值，再利用式(1)~(4)即可求得试件在地下所受的三个主地应力<sup>[5]</sup>：

$$\sigma_v = \sigma_{\perp} + \alpha P_p \quad (1)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} + \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} (1 + \tan^2 2\beta)^{\frac{1}{2}} + \alpha P_p \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} - \frac{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}}{2} (1 + \tan^2 2\beta)^{\frac{1}{2}} + \alpha P_p \quad (3)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ} - 2\sigma_{45^\circ}}{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}} \quad (4)$$

式中： $\sigma_v$  为上覆地层应力； $\sigma_H$ ， $\sigma_h$  分别为最大、最小水平主地应力； $\sigma_{\perp}$  为垂直方向岩芯 Kaiser 效应对应的应力； $\alpha$  为有效应力系数； $P_p$  为孔隙压力； $\sigma_{0^\circ}$ ， $\sigma_{45^\circ}$ ， $\sigma_{90^\circ}$  分别为 0°，45°，90° 三个水平方向岩芯 Kaiser 效应对应的应力。

在本文实验中，将取自现场的岩芯在室内重新加工，共加工 10 组试件，围压每增加 5 MPa 对应一组试件，包括零围压下的试件。将加工好的试样在室内进行加载实验，测出并记录每个围压下岩样受载过程中的声发射信号随载荷的变化曲线。根据声发射信号随载荷的变化曲线，找出每组实验与 Kaiser 效应相对应的应力值，以备处理，如图 2 所示。

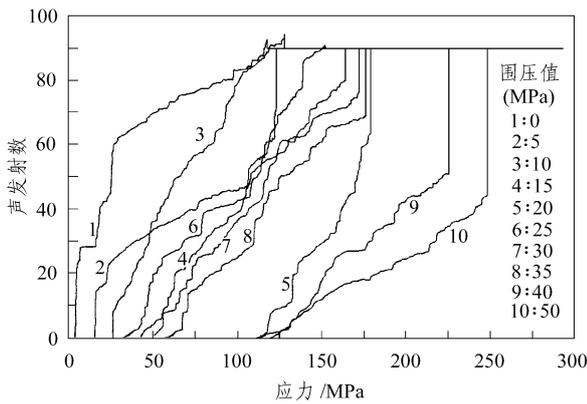


图 2 围压下各组试件声发射数与 Kaiser 效应相对应的应力关系

Fig.2 The relationship between the stresses corresponding to Kaiser effect and acoustic counts of the specimens under confining pressures

一种实验情况进行多次重复加载实验，以便利用抹录不尽点技术<sup>[3]</sup>快捷而准确地确定 Kaiser 点。

### 4 实验结果及分析

实验岩芯选自塔里木油田某井，岩性为紫红色砂泥岩，井深约为 4 500 m，全尺寸岩芯直径约为 100 mm，单轴抗压强度为 90.67 MPa。

由图 3 可以看出，Kaiser 效应相对应的应力与围压呈直线关系，并且具有较高的回归精度。用实验测得的 Kaiser 效应对应的应力减去由现场测井资料得到的垂向主应力，可以得到两者差值随围压的变化曲线，将 Kaiser 效应对应的应力减去回归得到的直线表达式，就可以得到围压下 Kaiser 效应对应的应力与零围压下应力的转换关系式，以确定零围压下相应方向的应力值：

$$\sigma^0 = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2.7456\sigma_3 - 8.41 \quad (5)$$

式中： $(\sigma_1 - \sigma_3)$  为实验测定的 Kaiser 效应相对应的应力， $\sigma_3$  为围压值， $\sigma^0$  为零围压下相应方向的正应力。

此时得到了  $\sigma_{0^\circ}$ ， $\sigma_{45^\circ}$ ， $\sigma_{90^\circ}$  和  $\sigma_{\perp}$ ，再利用式 (1)~(4) 计算出主地应力。

### 5 应用与结论

将所得出实验结论用于塔里木油田的多口井的地应力测量。下面仅取三口井的地应力测量为例进行说明。

已知参数和测量结果见表 1，按照石油工业的

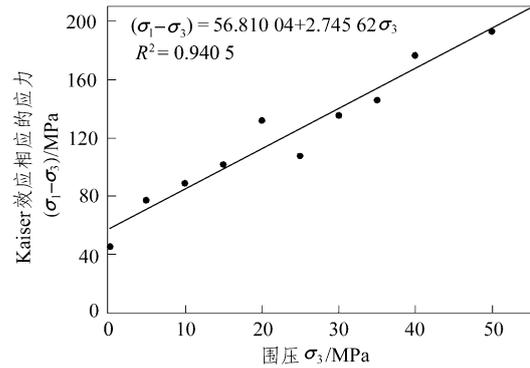


图 3 Kaiser 效应相对应的应力与围压关系

Fig.3 The relationship between the stresses corresponding to Kaiser effect and confining pressures

表 1 现场地应力测量结果

Table 1 The measurement results of in-situ stresses

井号	井深 /m	实验围压 /MPa	最大水平主应力梯度		最小水平主应力梯度		垂向应力梯度
			Kaiser 效应法	水力压裂法	Kaiser 效应法	水力压裂法	
DB1	5 880	30	2.85	2.80	2.01	1.98	2.77
YN5	4 590	27	2.66	2.65	2.05	2.01	2.45
KL201	3 100	18	2.87	2.83	2.08	2.07	2.36

注：应力梯度单位：MPa/100 m

惯例，一般以应力梯度表示主地应力的大小，单位为 MPa/100 m。

为了验证实验结果的准确性，与现场进行的微型水力压裂试验的结果进行了比较。由水力压裂法得到的地应力与实验测量结果基本一致，说明利用围压下岩石的 Kaiser 效应测定深部地层地应力的室内实验方法不但可行，而且精度满足要求。

围压下岩石的 Kaiser 效应作为测定深部地层地应力的一种有效方法，克服了单轴岩石 Kaiser 效应测定地应力的局限性。研究表明，围压下岩石的 Kaiser 效应相对应的应力与所受的围压呈线性关系。所得出的关系式能够成功地应用于现场深部地层地应力的测量。

### 参考文献

- 1 Kaiser E J. A study of acoustic phenomena in tensile test [Doctoral Thesis][D]. Munchen: Technische Hochschule, 1959
- 2 Tanimoto K, Nakamura J, Fudo R. Application of acoustic emission in in-situ test[A]. In: Proc. 10<sup>th</sup> Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1978, 2: 573~576
- 3 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

5 李志明, 张金珠. 地应力与油气田勘探开发[M]. 北京: 石油工业出

4 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学

出版社, 1997

研究所译. 北京: 科学出版社, 1981

## MEASUREMENT OF IN-SITU STRESSES BY KAISER EFFECT UNDER CONFINING PRESSURES

Zhang Guangqing, Jin Yan, Chen Mian

(Petroleum University of China, Beijing 102200 China)

**Abstract** The Kaiser effect of rock can be employed to measure the in-situ stresses. The stresses corresponding to Kaiser effect of rock will approach and even exceed the uniaxial strength of rock with increment of strata depth. And when this happens, the rock collapses, then it is impossible to use the conventional Kaiser effect to measure the in-situ stresses. So under the above conditions the conventional Kaiser effect of rock becomes ineffective. The in-situ stress measurement using Kaiser effect of rock samples under confining pressures is carried out, in order to offset the unsatisfactory property of the uniaxial Kaiser effect measurement of rock sample stresses. The influence of the confining pressure on the Kaiser effect of rock is systematically studied by applying a group of varied confining pressures to the rock samples with the same depth. And an experimental measuring method of in-situ stresses with Kaiser effect of rock samples under confining pressure is proposed, as well as the experimental principles. The conclusion is that the relationship between the stresses corresponding to Kaiser effect of rock and the confining pressures is linear, and the statistical regression relationship is obtained. The calculated results based on the experiments are in good accordance with the hydro-fracture results.

**Key words** Kaiser effect, in-situ stresses, confining pressure

---

## 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会会讯

(1) 主题: 迎接西部大开发对岩土力学与工程的挑战和机遇。

(2) 主办单位: 中国岩石力学与工程学会。

承办单位: 陕西省岩石力学与工程学会, 西安理工大学, 西安交通大学, 西安科技学院, 长安大学, 国电公司西北勘测设计研究院。

协办单位: 中国岩石力学与工程学会测试专委会、地面工程专委会、软岩专委会。

(3) 时间: 2002年9月。

会议地点: 西安(大会拟定在著名自然保护区——秦岭的太白山召开)。

(4) 征文内容: ① 岩土力学性质, ② 岩土工程数值分析, ③ 岩土动力学, ④ 岩土边坡工程, ⑤ 岩土地下洞室工程, ⑥ 岩土加固理论与技术。凡与岩石力学、岩土工程有关的一切富有新意之论文均受欢迎, 与西部岩土力学与工程相关的论文更受重视。

论文要求: ① 会议论文按《岩土工程学报》格式排版, 最好以电子邮件形式提交。② 论文征集截止2002年4月底, 寄来的论文经评审后由中国科学技术出版社正式出版高质量论文集。③ 版面费400元, 超过4页, 每页加收100元。

(5) 大会拟组织考察西部正在施工的青藏铁路冻土路基工程及新疆中阿、中巴边境的塔里木水利工程。

(6) 联系地址: 西安市金花南路5号西安理工大学211信箱, 岩土工程研究所, 李宁; 邮编: 710048;

电话: 029-3293863; FAX: 029-3293863; E-mail: ningli@xaut.edu.cn。