

岩石 Kaiser 效应测地应力原理中的若干问题研究

刘 峥^{1,2} 巫 虹³

(¹ 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室 上海 200092

² 上海市地震局 上海 200062 ³ 上海市岩土地质研究院有限公司 上海 200072)

摘 要 该文通过对几种不同类型岩石的实验研究,提出了关于在围压条件下影响岩石 Kaiser 效应的若干问题,分析了它们的声发射特征,为深部地应力测量提供了一种新的解决方法。

关键词 岩石 Kaiser 效应 记忆能力 地应力

1950 年德国物理学家 Kaiser. J 首先发现经过一次应力作用的磁滞性材料如金属等,当再次加载到先前经受过的应力水平之后,其声发射活动将突然增加,人们称这种现象为声发射 Kaiser 效应。岩石 Kaiser 效应的研究和发展是根据金属材料的声发射试验研究而发展起来的,大部分物质的声发射的重要特征之一是不可逆的,对于岩石也同样具有这种特性。从微观破裂的力学观点分析,声发射的不可逆性是岩石微观破裂和塑性变形不可逆的反映。当将在地壳中受地应力作用的岩体取出后,重新加载,研究其声发射与应力的关系则可发现:如果所加荷载小于以前所受地应力值,很少观察到声发射信号;当所加荷载等于或超过原先在地壳中所受的地应力值时,才有声发射信号发生。这说明岩石对过去所受的应力有记忆功能。因此,可以利用这一特性研究地层中任意深度的岩石所受的应力大小,这就是用 Kaiser 效应测地应力的原理。

1 岩石 Kaiser 效应存在性试验证明

岩石材料与金属都有磁滞性,他们的差异之在于岩石具有复合材料的属性,即岩石由多种矿物组成。矿物内部、矿物与矿物之间、矿物集合体与矿物集合体之间的连接形式受岩石成因控制,它们之中既有结晶连结又有胶结连结,更主要的是其内部存在许多天然缺陷,在荷载作用下,这些缺陷会发生闭合、张开、扩展、错位等各种力学行为,并同时产生声发射现象。

我们选用了与岩石材料相似,而没有应力历史的试件进行岩石 Kaiser 效应试验机理研究。试件取

自人工制作的混凝土块,骨料为花岗岩,颗粒粒径为 1~2cm,粘结物为水泥砂浆。试验中首先测得其单轴抗压强度大约为 20MPa,然后据此对研究的其它试件分三或四组,逐级增加,进行循环加荷。当第一级预加荷载至 10MPa 时,只在加荷初期产生一些频数较少的声发射且很快消失,之后并无声发射产生。当稳定荷载约五分钟后,卸荷再加荷,在达到 10MPa 以前的再加荷过程中并无声发射,至 10MPa 时,试件出现明显的声发射。如超过此应力值继续加荷至 14MPa,此间则无声发射产生。依照第一级循环方法卸荷再加荷时,整个第三次加荷在试件所受应力未达到 14MPa 之前不产生声发射,而当超过了 14MPa 时,即产生声发射。过此值继续加压至 18MPa,同第二级循环加荷过程一样,在此阶段无声发射产生。卸荷再加荷在达到 18MPa 之前,同第一、第二循环在该阶段的特征一样,试件无声发射产生。而达 18MPa 时,试件开始出现明显的声发射,继续加荷至 20MPa 时,试件开始产生剧烈的声发射,并达极限荷载完成破坏。由上可见,在岩石中 Kaiser 效应是存在的。

2 不同岩性岩石的 Kaiser 效应特征

岩石的变形与破坏,不仅与作用力的大小和方式有关,更与岩石本身的力学性质及受力条件有关。

收稿日期:2004-05-21

第一作者简介:刘峥,男,1966 年生,工程师,在读博士生,主要从事岩土工程及地震工程的应用与研究。

若不考虑受力条件时,岩石的力学性质主要取决于其成分结构、构造等内在因素。岩石由于组成成分、结构不同,其强度也不一样。岩石的 Kaiser 效应是通过记忆应力来得到反映的,岩石记忆的研究是研究岩石材料受力后的力学行为与应力状态之间的记忆关系。不同强度的岩石对不同应力水平的记忆功能是否一样,是岩性问题的集中反映。考虑到岩石结构对强度的影响,我们取了三组不同结构、不同强度的岩石进行试验研究。

2.1 致密结构、高强度岩石的 Kaiser 效应特征

橄榄玄武岩取自第四纪火山群中。覆盖于玄武岩层之上的上覆第四系粘土土层薄,可以认为该玄武岩尚未经过构造应力作用,自重应力也小。

岩石为隐晶质结构,致密坚硬,无晶内及晶间缺陷,微裂纹不发育,强度高达 165MPa。对这类岩石 20 余个试件的试验研究发现,在按其单轴抗压强度分三至四级循环加荷条件下,该类岩石在各个循环过程中并无声发射产生,只是当所加荷载达到其抗压强度 90% 以上后才集中产生大量的声发射,岩样很快达到极限荷载而破坏。该类岩石的应力—应变($\sigma-\epsilon$)曲线线性良好,曲线斜率较大,岩石变形以弹性变形为主,代表了致密高强度岩石的一种特定类型,如图(1)所示。

这类岩石,由于岩性致密,结构连接强而又无原始缺陷,受压时,虽然压力逐渐增大,但并无微裂发生和扩展,也就无声发射出现,直至压力接近极限荷载时才出现微裂纹并迅速扩展、贯通,致成宏观破裂,导致声发射集中,频数很大。

由上述可见,致密坚硬的玄武岩,对低于其抗压

强度 80—90% 的应力水平并无记忆能力,它只记忆高的应力水平。

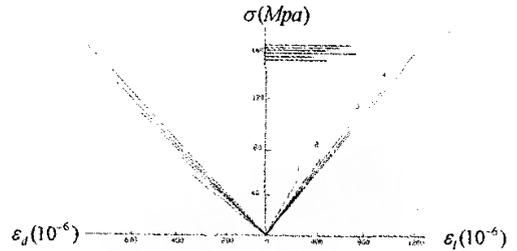


图 1 橄榄玄武岩 AE- $\sigma-\epsilon$ 曲线

Fig. 1 AE- $\sigma-\epsilon$ curve of olivine basalt

2.2 中、高强度岩石的 Kaiser 效应特征

花岗岩试件取自一电站址区海西期花岗岩,岩石主要由石英、长石、角闪石等矿物组成,内部结构呈镶嵌结晶连接,存在着许多不定向、不连续的微开显型微裂隙。岩石单轴抗压强度一般为 90MPa,属高强度岩石。

试验采用分级循环加荷方式,四个级别荷载分别为 15 Mpa、40 Mpa、60 Mpa、70 Mpa,其试验结果如图(2)所示。当再加荷载时,每级荷载处均出现了明显的声发射,图中 1、2、3、4 各点为对应的声发射集中点。同时,试验过程加荷 40 Mpa 和 60 Mpa 两级荷载时,试件分别在 30 Mpa、50 Mpa 两个应力处出现了集中声发射,见图中 a、b 各线。这两个应力值为花岗岩在地质历史中所受的构造应力作用的表现,分级加荷的结果说明花岗岩对高低应力水平都具有记忆性。

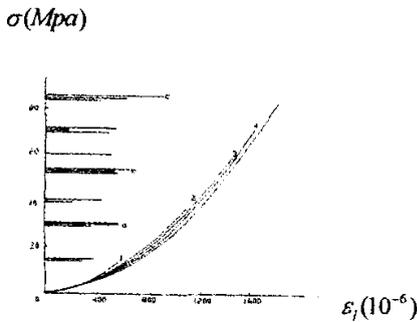


图 2 花岗岩 AE- $\sigma-\epsilon$ 曲线

Fig. 2 AE- $\sigma-\epsilon$ curve of granite

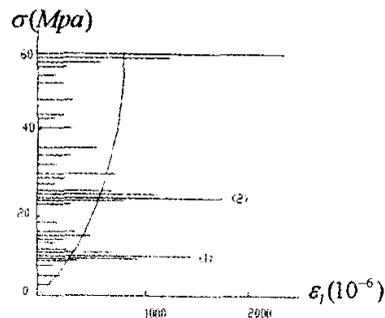


图 3 砂岩 AE- $\sigma-\epsilon$ 曲线

Fig. 3 AE- $\sigma-\epsilon$ curve of sandstone

中等强度的代表岩石如砂岩,砂岩为某油田第三系细砂或中砂岩,主要矿物成分为石英、长石。胶结质为钙质、泥质,单轴抗压强度为 50 - 60MPa,为中偏低到中等强度岩石,试验方法采用直接加荷至破坏的方式,所做岩样的普遍结果如图(3)所示。

2.3 低强度岩石的 Kaiser 效应特征

泥岩取自某煤矿井下围岩,单轴抗压强度为 20 Mpa 以下,属低强度岩石,应力 - 应变 - 声发射曲线如图(4)所示。

从图上可以看出,应力 - 应变曲线基本平缓。岩石在外加应力较低的作用下,主要为延性变形,很少出现脆性裂纹扩展,故无声发射出现。其后在应力增加的情况下,其中出现一些声发射,但较弱而不集中,说明存在少量裂纹行为。到强度到达极限时,声发射较多,岩石已接近破坏。由此可以看出,低强度的岩石如泥岩以延性破坏为主, Kaiser 效应特征不明显。且由于强度低,难以记忆高水平应力。

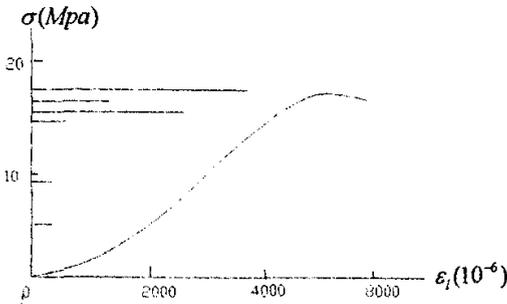


图 4 泥岩 AE - σ - ε 曲线
Fig. 4 AE - σ - ε curve of mudstone

从以上这些不同结构、不同强度的岩石 Kaiser 效应试验,我们可以得到:致密结构、高强度的岩石主要记忆高应力,中高强度的花岗岩、石英砂岩等这类岩石在其强度范围内,能同时记忆不同应力水平的应力,低强度的岩石如泥岩等记忆应力水平很弱,甚至很难表现是否有记忆现象。

3 围压对岩石 Kaiser 效应的影响

目前,测定岩石 Kaiser 效应多采用现场获取的岩样,进行单轴压缩试验,实际岩样位于地下一定深度处,受自重应力和构造应力的联合作用而处于三向应力状态,那么,根据单轴压缩试验所获得的岩石

声发射特征点应力值是否能代表岩石所处位置所受的地应力?在以往的研究成果中尚无充分的考虑和说明。尤其是当被测岩石取自千米甚至几千米以上深度时,岩石受的自重应力已达数十以至上百兆帕,加上构造应力显然高于这样的量值。特别是对于象砂岩、泥质砂岩这样强度不很高的岩石,单轴抗压强度一般低于千米以下所受的自重应力值,故用单轴压缩所测得的 Kaiser 效应特征点应力值必然小于岩石在其深度处实际所受的地应力值。也就是说,单轴压缩条件下测定的岩石 Kaiser 效应特征点应力值与岩石实际所受的地应力值之间存在一定程度的误差,这种误差会随深度增加而加大。

根据前面分析,岩石的 Kaiser 效应的本质乃是岩石受原地应力作用所形成的特定的微裂纹在达到原应力的荷载作用下重新活动和延展的客观反映,那么在围压条件下岩石受地应力作用形成的微裂纹在围压消除后的单轴压缩状态更易扩展则是毫无疑问的,反映在声发射特征上,单轴压缩条件下 Kaiser 效应特征点应力值必然较之实际地应力值低。因此,要获得地壳岩体内一定深度处的地应力值必须通过合乎该点岩石实际所受的围压进行的三轴 Kaiser 效应测试方能得到。但是,岩石三轴声发射试验工序繁多,方法复杂,价格昂贵,在实际中用岩石 Kaiser 效应测定地应力必然受到极大的限制而不利于该方法的推广使用。故如何利用单轴压缩条件下所获得的岩石 Kaiser 效应特征值按一定规律修正为实际地应力值,不仅在理论上具有重要意义,而且也有重要的实用价值。为此,我们选用了中高强度范围内,强度不同的砂岩试样,分别在单轴和三轴试验机上进行岩石 Kaiser 效应对比试验,来观察同种岩样在单、三轴条件下声发射岩石 Kaiser 效应的情况,从而对比分析,总结规律。

在大量试验的基础上,对比同种单轴压缩与围压条件下三轴试验,发现岩石三轴声发射特征点应力值与单轴声发射特征点应力值有如下关系:

$$\left(\frac{\sigma_{3A}}{\sigma_{1A}}\right)^2 = \frac{\sigma + \sigma_1}{\sigma_1}$$

式中 σ_{3A} —— 岩石三轴状态下声发射特征点应力值 (Mpa);

σ_{1A} —— 岩石单轴古发射特征点应力值 (Mpa);

σ_1 —— 岩石抗拉强度 (Mpa);

σ —— 岩石所受的围压 (Mpa)。

4 岩石记忆的多期性及记忆衰退问题

有关岩石 Kaiser 效应多期性,目前国内外研究者所持观点不一样,有的研究者从岩石 Kaiser 效应最基本原理出发认为:Kaiser 效应是对最大应力的特征反应。理所当然,岩石 Kaiser 效应是记忆岩石历史上所受的最大应力。有的研究者考虑到岩石材料不同于金属材料,岩石是漫长地质历史作用的结果,经过漫长的地质历史作用,这样岩石内部结构变化,认为岩石仅能记忆现今地应力。还有研究者认为,岩石能对多期性应力作用具有记忆功能,这些观点的不统一,使利用岩石 Kaiser 效应确定地应力遇到了极大的困难。我们从大量试验出发对不同时代及不同岩性的试件的声发射特征进行对比分析,使以上问题有了明确的结果,即岩石 Kaiser 效应多期性存在,岩石记忆具有衰退现象。

4.1 岩石 Kaiser 效应多期性及记忆衰退事实

试验所用的花岗岩试件取自一电站坝址区海西期花岗岩。该期的花岗岩经历了地质历史时期的多期构造作用,通过对该组试样试验,无论是采取循环加荷方式还是直接受力破坏,多个岩石试样,分别在 30 Mpa 和 55 Mpa 左右两个应力值都出现了集中声发射,岩石破坏强度一般为 90 Mpa,其应力—应变—声发射图见图(2)。两个集中的声发射应力值,说明了该花岗岩记忆了两期构造作用的应力,对海西期的花岗岩,经历了两期以上的构造作用,从而又说明了记忆衰退的存在。

另取几种不同地方不同类型的岩石,岩石形成历史不一样,都表现出相似的特性,科学归纳可以知道,岩石 Kaiser 效应多期性和记忆衰退同时存在。

这里需要指出的是,多期性的出现,是岩石经受多次构造运动的结果,产生多期性的条件是岩石在每一期构造应力的作用下形成的微裂纹在下一次受力前能得到充填胶结而部分愈合,如果不存在这种地质条件,则岩石只能记忆在历史上所受到的最大应力。

4.2 岩石记忆衰退现象分析

以某油田砂岩为例,所做试样为该区沙三期岩石,该层岩石上有第四纪地层,下为古老的太古界和元古界基底鞍山群混合岩和花岗岩片麻岩系组成。此盖层所经历的构造运动期次为新生代以来的构造运

动。据万天丰对我国东部中生代构造期的划分,本区盖层新生代以来经历了四个构造期,它们自上而下依次为:(1)四川构造期,135—52Ma,本期构造应力场方向为 NNE 向,应力水平高,达 160MPa 以上,(2)华北构造期,52—23.3Ma,该区在此时间段内,受太平洋板块的挤压,本期构造应力场的主压应力场方向为 SEE—NWW 向。应力水平较高,达 180MPa 以上,在东营末期,受华北构造事件的影响,地壳抬升并使顶部遭受明显剥蚀,盆地经历了短时间的准平原化过程。(3)喜马拉雅构造期,23.3—0.7Ma,为晚第三纪至早更新世,受印度—澳大利亚板块向北运移的影响,本期构造应力场的主压应力方向为近 SN 向。(4)新构造期,0.7Ma—现在。对于现今构造的应力场,根据地震机制解的压应力主轴方向分析资料及原地应力测量资料,该油田区的现今总体地应力场的主压应力方向为 NEE—EW 向,其作用力来自太平洋板块对大陆的挤压。

由上面新生代以来构造分期的情况看,该区沙三期经历的四个构造期的主压应力方向具有明显的突变性,应力场的主压应力方向变化的周期也是不相等。由岩石 Kaiser 效应的测定结果,岩石仅记忆了两个构造期应力的作用,那么记忆的是哪两期构造应力的作用呢?衰退的又是哪两期构造应力?

由实验对 8 组 24 块岩石进行试验,结果表明:岩石记忆的两个突发群中,高应力水平比为一组,其主应力方向为近南北向;低应力水平比为一组,其主应力方向为近东西向。将实验结果对比构造历史,前者与四川期、华北期应力方向不符,而后者与四川期、华北构造期应力大小不符。可见沙河街组岩石虽然经受过华北期构造应力的作用,从应力水平来看,可以说是历史上最大的应力。但是它在所有的岩石试样中都没有被记忆,而只是记忆了(3)和(4)两期的应力,这种现象有力地说明岩石记忆在一定条件下是会衰退的。

4.3 岩石记忆衰退的理论解释

一般说来,一种岩石是由几种不同矿物组成的,矿物是由许多大小、形状与取向都不相同的晶粒所组成,不同颗粒,多矿物岩石的晶粒大小对岩石性质的影响较大。岩石在某期构造应力作用下产生的微裂纹,在后期沉积作用、热液作用或充填冷凝作用下,裂纹消失或部分消失,而再受力到原应力水平时,裂纹行为的表现不具突变性, (下转 56 页)

Application of High - density Resistivity Method in Soft Subsoil Investigation of Tianjin

Liu Wan En

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying , Tianjin , 300191)

Abstract: It introduces the application of High - density Resistivity Method in soft subsoil investigation in Tianjin and analyses the feature of soft subsoil in Tianjin and the prerequisite of geophysics. It presents the possible usages of High - density Resistivity Method via case study : probing underground pipes of city , exploring stratum undulation , searching changes of gully and pit , prospecting subsoil homogeneity, etc. . It reveals correlative characteristic between apparent resistivity and subsoil physical - mechanical index in Tianjin and also estimates possible using fields of High - density Resistivity Method.

Key word: High - density Resistivity Method, soft subsoil investigation, subsoil homogeneity

(上接 41 页)

即岩石 Kaiser 效应不明显,这些先由地质作用开始,接着进行的物理化学变化在长时间的作用下,正是岩石记忆衰退的原因。记忆衰退的条件是:岩石经受某一期构造应力作用形成的微裂纹在后期一定的地质条件下得到完全愈合,而与未受力的情况一样,这时岩石就失去对这一期构造应力的记忆。失去对原来所受应力的记忆,即是出现记忆衰退现象。

参考文献:

[1] M·蒙托托 H. R 哈迪,完整岩石中的 Kaiser 效应:作为估计热和机械的加荷的可行性手段的现状,第七届国际岩石力学会议论文选译,1993. 9.

[2] 肖树芳,不同岩石的变形破坏机制及其声学特征,长春

地质学院学报,1980(3).

[3] 王逢俊等,岩石 Kaiser 效应测定地应力原理及应用,长春地质学院学报(增刊)1995.

[4] V. A. Mansurov "Technical note Acoustic emission from failing rock behavior " rock mech. Rock engineering ,1994. 3

[5] Tang Chunan, Xu xiaohu, " Evolution and Propagation of material effects and Kaiser affect function, " Journal of Seismological Research, 1990, 4.

[6] 黄润秋、王士天,用 Kaiser 效应测定地应力的认识,全国第三次工程地质大会论文集 成都科技大学出版社,1988

[7] 升景和等,利用岩石声发射 Kaiser 效应测定地应力的新方法,岩石力学与工程学报 1987(4)

[8] 孙永联等,泥岩的声学特性与其力学特性的相关关系,应用声学,1991. 3

Several Key Problems Research on the Crustal Stress Measuring Based on the Kaiser Effect

Liu Zheng^{1,2} Wu Hong³

(¹ National Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 20092

² Seismological Bureau of Shanghai Municipality, Shanghai, 200062

³ Shanghai Institute of Geo - technical Engineering Co. Ltd. Shanghai, 200072)

Abstract: This paper has studied the AE feature about several rocks with different composition by experiment. And some questions that affect the rock Kaiser effect in confining pressure was presented and characters of sound emission were analyzed. And it has offered a new way of measuring the deep crustal stress.

Keywords: rock kaiser effects, memory ability, crustal stress

岩石Kaiser效应测地应力原理中的若干问题研究

作者: [刘峥](#), [巫虹](#)
作者单位: [刘峥\(同济大学, 土木工程防灾国家重点实验室, 上海, 200092; 上海市地震局, 上海, 200062\)](#), [巫虹\(上海市岩土地质研究院有限公司, 上海, 200072\)](#)
刊名: [上海地质](#)
英文刊名: [SHANGHAI GEOLOGY](#)
年, 卷(期): 2004, ""(3)
引用次数: 2次

参考文献(8条)

1. M·蒙托托, H. R哈迪 [完整岩石中的Kaiser效应: 作为估计热和机械的加荷的可行性手段的现状](#) 1993
2. 肖树芳 [不同岩石的变形破坏机制及其声学特征](#) 1980(03)
3. 王连俊 [岩石Kaiser效应测定地应力原理及应用](#) 1995(z1)
4. V A Mansurov ["Technical note Acoustic emission from failing rock behavior" rock mech](#) 1994
5. Tang Chunan. Xu xiaohe [Evolution and Propagation of material effects and Kaiser affect function](#) 1990
6. 黄润秋, 王士天 [用Kaiser效应测定地应力的认识](#) 1988
7. 升景和 [利用岩石声发射Kaiser效应测定地应力的新方法](#) 1987(04)
8. 孙永联 [泥岩的声学特性与其力学特性的相关关系](#) 1991(03)

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [岩石单轴压缩试验Kaiser效应实质的研究](#) -现代地质2000, 14(1)
岩石Kaiser效应具有记忆先前应力、纵向应变和横向应变的能力, 记忆的准确程度随加载阶段不同而不同。为了解Kaiser效应的记忆实质, 通过岩石单轴压缩试验确定Kaiser效应对体积应变、弹性模量和泊松比三项物性参数的记忆能力。结果表明, 岩石Kaiser效应具有记忆先前物性参数的能力, 其中尤以对弹性模量的记忆能力表现为最好, 而且受时间因素影响不大, 说明岩石Kaiser效应的实质是对其内部物理特性的记忆。

引证文献(2条)

1. CHENG Yun-hai, JIANG Fu-xing, ZOU Yin-hui [Research on inversion high mining pressure distribution and technol-ogy of preventing dynamic disasters by MS monitoring in longwall face](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) (英文版) 2009(3)
2. 阎南, 余贤斌, 张志雄, 李林锋 [岩石Kaiser效应若干问题探讨](#)[期刊论文]-[陕西煤炭](#) 2008(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_shdz200403009.aspx

下载时间: 2010年6月2日