

地壳岩石的渗透性状及孔隙水对 岩石力学性质的影响

吴景浓

(广东省地震局)

提要 本文概述地壳岩石渗透性状和孔隙水对岩石力学性质影响的研究现状及已取得的成果;指出孔隙压的形成及分布,孔隙度、渗透率与孔隙压的关系。孔隙压的有效应力,孔隙压对岩石形变、破裂机制的影响以及从断裂力学观点考察孔隙压的作用等系今后该领域研究的主要课题和发展方向。

关键词: 岩石渗透性状 孔隙压 有效应力 破裂机制

一、研究现状及已取得的成果

众所周知,水的作用将使岩石的力学性质发生变化,在工程实用上,往往采用干、湿岩石单向抗压强度之比求得软化系数,作为设计的依据。实际上,在自然界水对岩石力学性的影响要复杂得多,远非一个软化系数所能表达。因此,国内外学者都很重视这一领域的实验研究。1987年9月在甘肃武都召开的全国第二届构造物理学术讨论会上,水岩石力学被列为一个专题讨论。它不仅在工程上具有实际意义,对地壳构造物理、诱发地震的研究也是十分重要的。

考察水对岩石力学性质的影响,首先应了解水是如何进入岩石以及它的存在和扩散条件,这就必须研究岩石的渗透性状。在工程上习惯地把岩石分为透水的和不透水的,或者把地层分为透水层和隔水层,它们的界限并不十分明确,而且只限于一定的时间和空间范围而言。广义上来说,地壳中不存在绝对不透水岩石,换句话说,水对地壳岩石是无孔不入的。问题在于我们如何使用科学的手段去揭示岩石的渗透性状。随着地下能源的开发,核废料的深埋处理,地下大型工程的建设及水库蓄水和深井注水诱发地震事件的出现,近年来,国际上关于岩石渗透性状的研究十分活跃。我们国内这方面也做了一些实验观测工作,但还存在较大的差距。岩石渗透性状的研究,大体上包括三种途径:一是原地测量,这是工程上常用的,其优点是包括的范围较大,可以较好地结合地质构造条件,但费用高昂,技术复杂,精度较差,而且测量深度受到限制(目前最深只能测到3 km)。二是实验室测定,对各种因素进行控制,可以模拟地壳深部围压、温度等条件,但由于尺寸效应,裂缝影响等因素,测定结果直接用于原地条件还受到很大的限制。三是在上述观测资料基础上,通过调查研究,分析影响岩石渗透性状的各种因素以及它们之间的内在联系,进行理论计算和推断,寻

求更深部的、各种构造条件下的岩石的渗透特征。看来，除了工程上的需要有针对性地进行一些原地测量外，实验室方法是研究地壳深部渗透性状的可行途径。

实验室测定岩石渗透性，通常使用两种方法：一是稳态法，即在一定的压力梯度下测量单位时间通过岩石试件的流体稳定流量，此法对于K值在毫至微（ 10^{-3} — 10^{-6} ）达西的高、中等渗透率岩石较适用。二是瞬态法，由于K值在毫微（ 10^{-9} ）达西以下的低渗透率岩石，在短时间内准确地测量通过岩石试件的流体流量是很困难的，1966年Brace等人最先提出用瞬态法测量花岗岩的渗透率，即观测其施加在试件一端的流体压力随时间的衰减变化来计算K值。据报道，目前用瞬态法已能测到 10^{-12} 达西那样微小的渗透率。作者在研究水库地震诱发机制中，曾经用稳态法，在常温常压下成功地测定花岗岩、大理石的渗透率。即采用带有中心孔的圆柱形试件，通过中心孔施加水压，测量辐射渗出流量；或采用实心试件，从一端施加水压，测量另一端排出流量。结果得到完整的花岗岩的渗透率K值 10^{-5} — 10^{-7} 达西，完整的大理岩为 10^{-7} 达西。含有裂面的情况下，K值要增大3~4个数量级。其测定结果如表1所示。上述实验方法均建立在液体在多孔介质中流动的达西（Darcy）定律（1856）基

表1 实验室测定K值（达西）
Table 1 K value determined in the Lab.

K 值 实验方式 试验材料	中 孔 注 水			端 部 注 水		
	完 整	自然裂面	填充裂面	完 整	自然裂面	填充裂面
新丰江花岗岩	1.7×10^{-8}	$1.3 \sim 2.2 \times 10^{-3}$		$0.3 \sim 7 \times 10^{-7}$	$1.1 \sim 7 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-6}$
大冶大理岩	$1.1 \sim 6.1 \times 10^{-7}$		$3 \sim 21 \times 10^{-4}$			
刘家峡变质岩		$0.5 \sim 5.1 \times 10^{-3}$			$7 \sim 20 \times 10^{-3}$	
水泥砂浆	8.2×10^{-8}					

础之上。然而对于极松散且非均匀结构的破碎带及地壳深部极致密的岩石介质，达西定律的适用是有局限性的。值得指出的是围压和温度对岩石的渗透影响不容忽视，国内外学者都开始致力于这方面的实验研究。

水渗入地壳岩石之后，无论是储集于孔隙、裂缝、断层和洞穴之中，或是继续扩散流动，都将形成孔隙水压力或引起原有孔隙水压力的变化。这种孔隙水压力将对岩石产生力学的和物理化学方面的影响。物理化学作用指的是水改变矿物或结晶的表面性质以及水与岩石矿物的化学反应。例如湿润、溶解、风化等等，造成岩石或结构面的“软化”作用。作者曾对新丰江花岗岩干、湿试样进行实验研究，结果（图1、2）表明，水的饱和作用无论在强度或变形特性方面都发生明显的变化⁽²⁾。关于地壳深部高温高压条件下作用的或流动着的水对岩石的物（理）化（学）作用，至今还研究得不够，也是水致地震所关心的课题。

关键问题仍在于研究孔隙水压对岩石的力学作用。在这方面，前人已经进行过大量的实验研究，提出过丰富的资料和论著。但对解决问题还相距甚远，而且往往是各抒己见，没有

统一的认识, 因此也无法找到确切的判据。概括起来, 可以包括下面一些课题:

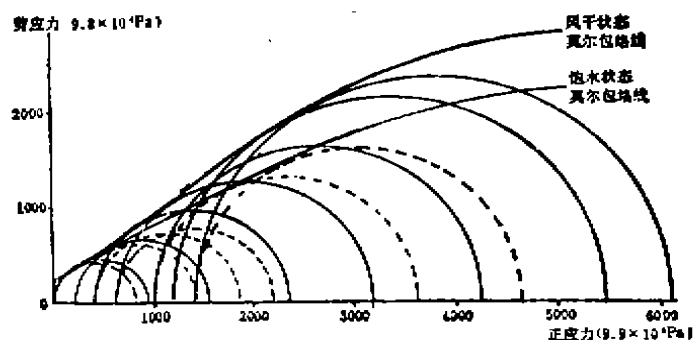


图1 风干和饱水岩石的莫尔圆

Fig. 1 Mohr's circle of air-dry and water-saturated rock

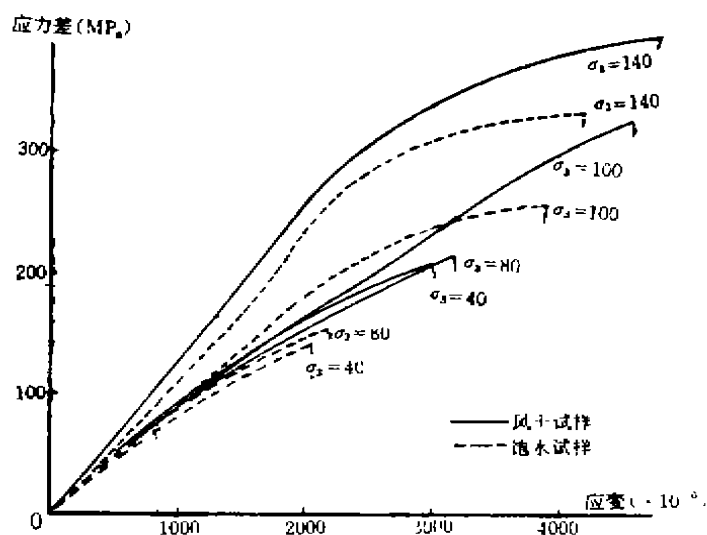


图2 风干和饱水岩样在不同围压作用下的应力—应变关系

Fig. 2 Relations between stress and strain of air-dry and water-saturated rock under the different confinement pressure

二、今后研究的方向和课题

1. 孔隙压的形成及分布

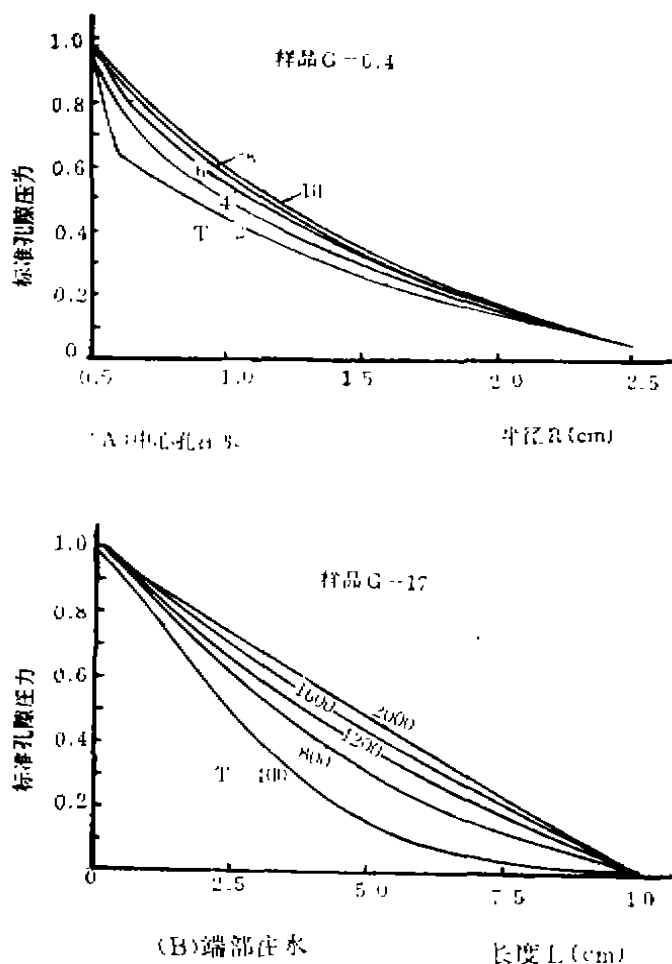
迄今为止, 在这方面还未找到可靠的规律, 特别是在地壳深部更是如此。一般认为岩石中裂缝的闭合、通道的阻塞是形成孔隙压的主要原因, 并且假定在一定范围内, 不同深度、不同层位上孔隙压是线性分布的。但实际情况并非如此, 由于岩石结构、构造的复杂性及动水压力的作用, 造成孔隙水压的千变万化。如小至试样内部, 大至同一断层带的不同部位,

孔隙压的大小都不会是线性分布的。作者根据室内实验结果,绘出图3,图3说明压力分布并非线性,随着时间而变化^[6]。文献〔5〕给出切割裂面的压力分布曲线也相类似。当然,

这些通过小试件短时间测定的结果是很初步的,必须采用先进技术手段,进行大量的长时间的室内及现场实验观测,并通过理论计算分析,才能找到它的分布规律和动态变化。

2. 孔隙度、渗透率与孔隙压的关系

一般来讲,多孔介质的孔隙大小与渗透率有密切关系,但实验结果表明,孔隙度相同的岩石有着截然不同的渗透率。因此孔隙度与渗透率之间相关函数就不会是唯一的,它还受孔隙的几何尺寸、贯穿程度及方向等诸因素的影响。与此同时,渗透率与孔隙水压力之间也不是一个简单的函数关系。它们之间既有藕联关系又有互相制约作用。一方面高孔隙压使固体物质压缩,引起孔隙通道扩大,使得渗透性也增大了;另一方面,为了形成和保持异常高的流体压力,流体的流动必须在各个方向都受到限制,这样,只有低渗透率的岩石才有利于形成高的孔隙压。如果能通过实验和理论计算,找到不同岩石中三者之间的相互关系,将是研



化如此之大，实在难以捉摸，而且又把主要矛盾引到研究孔隙度上面去。还有人提出一种极端情况，对于破裂过程出现体积膨胀的岩石，当应变速率够大时，可能诱生负的孔隙压，这样一来，问题变得更加复杂化。尽管如此，在研究含水的震源机制中，有效应力定律仍然有其普遍意义。理由是：①自然界的应变速率毕竟是很缓慢的，使孔隙压有足够的时间调整；②地震往往发生于活动断层上，断层面上的渗透率一般要高于完整岩石（断层泥的渗透率极低，填充极好的情况除外）。有人将压力水注入花岗岩试样的切割裂纹中，研究水的扩散与断层的粘滑，发现水的扩散引起“滑移区”的扩大和“锁闭区”的转移都与有效应力有关，从而提出弱化断层非稳定性的不均匀模式假定^[6]。总之，有效应力定律在岩石力学中的应用问题的研究还远远没有终结，尤其应把着眼点放在各种节理、裂隙和断层面上。

4. 孔隙压对岩石变形和破裂机制的影响

以往的研究多侧重于孔隙压对岩石强度的影响，实验和观测结果表明，变形将使孔隙压发生变化，反之亦然，小至裂缝的张开或闭合，大至地面的隆起或下陷，这种现象累见不鲜。研究含断层泥的裂面的摩擦特性时发现，由于流体压力和湿润作用，裂面位移从粘滑机制变到稳定滑动机制。作者从花岗岩、大理岩的室内水压致裂三轴实验中也观测到与常规三轴不同的破裂机制^[8]。图4为破裂过程的声发射（AE）记录，它说明水压致裂具有明显的突发性，在主破裂之前极少或者根本没有微破裂活动，这是张性破裂的特征。从而有理由认

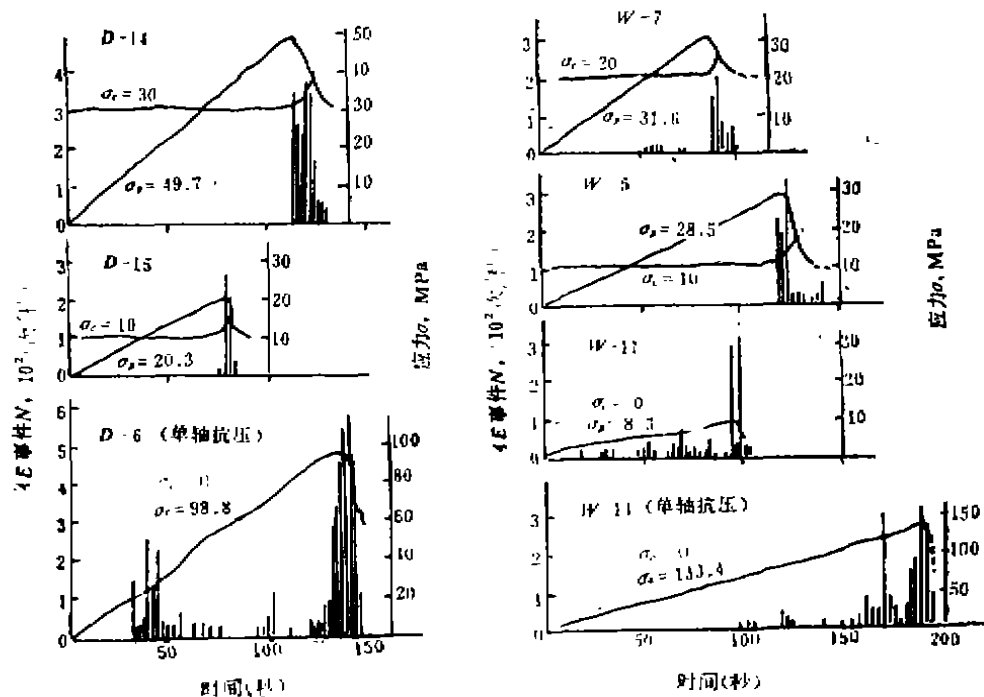


图4 致裂过程的AE活动性及其压力变化

Fig. 4 AE activity of breaking process and its pressure variation

左图为干样，右图为饱和样， σ_c 为围压、 σ_p 为致裂压力， σ_z 为轴压力

为, 在水库诱发地震序列中, 水压致裂本身可能是构成小震活动的一种机制。

5. 从断裂力学观点考察孔隙压的作用

前面谈到应用有效应力定律去考察孔隙压对岩石强度的影响, 在一定条件下适用, 但决不是唯一途径。显而易见, 由于流体的楔入, 将在裂纹尖产生很大的应力集中, 使裂纹迅速扩展而失稳。这对于研究震源机制、坝基稳定性及地下防水工程都十分重要。已经有人从断裂力学观点对此课题提出研究报告^[1]。如果能够开展这方面实验观测, 应用断裂力学的理论计算, 提出一个更全面的包括孔隙压作用在内的破裂强度理论, 将是十分有意义的。

上面谈到水对岩石产生的种种不利影响, 但从辩证观点来看, 也决非百弊而无一利, 只要掌握了它的客观规律, 还可发现其有利的一面, 甚至变弊为利。例如, 利用地下水位变化和水质分析预报地震, 注水诱发地震有可能使其小震能量提前释放而避免大震的发生, 对低渗透率岩石材料的水压致裂法开采, 地下热能的开发利用等等, 无不与地下流体的活动及孔隙压有关。这也是岩石力学为国民经济服务应该研究的范畴。

参 考 文 献

- [1] K. G. 斯塔格等, 工程实用岩石力学, 地质出版社, 1978.
- [2] 吴景浓, 岩石软化与水库地震, 中国诱发地震, 地震出版社, 1984.
- [3] 龚钢延、谢原定, 与地震学中有关的岩石渗透率的问题, 世界地震译丛, No. 4, 1987.
- [4] 吴景浓等, 岩石渗透特性的实验研究, 西北地震学报, Vol. 11, No. 1, 1989.
- [5] 施行宽、C. Y. Wong, 水的扩散与断层的粘滑, 中国地震, Vol. 2, No. 3, 1986.
- [6] 龚钢延、吴景浓, 岩石渗透实验中试件内孔隙压分布及初次渗水时间的分析, 岩石力学与工程学报, Vol. 8, No. 4, 1989.
- [7] 周群力, 从断裂力学观点对新丰江水库地震的探讨, 地震研究, Vol. 2, No. 3, 1979.
- [8] 吴景浓, 室内岩石水压致裂三种试验研究, 岩土工程学报, Vol. 8, No. 4, 1986.

PERMEABILITY OF ROCK IN CRUST AND THE INFLUENCE OF WATER AT APERTURE ON THE CHARACTER OF ROCK MECHANICS

Wu Jingnong

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

[Abstract] This paper sums up the situation and the results gained by studying the permeability of rock in crust and the influence of water at aperture on character of rock mechanics. It points out that the major problems and their developing tendency of future study are those: the formation and distribution of pore pressure, relations between porosity, permeability and pore pressure, effective stress of pore pressure, influence of pore pressure on the deformation of rock, rupture mechanism and the action of pore pressure observed from the point of fracture mechanics.

Key words: Permeability of rock; Pore pressure; Effective stress;
Rupture mechanism