

基于多曲率压头的钻孔横向贯入仪 研制及其初步应用

李小春¹, 王安礼¹, 刘召胜², 王少泉², 石露¹, 崔银祥¹, 江振波³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中冶北方工程技术有限公司, 辽宁 大连 116600; 3. 九州大学, 工学府建设系统工学科, 日本 819-0382)

摘要: 针对深部岩土工程岩石参数获取成本高的问题, 借鉴压痕试验技术, 研制钻孔横向贯入仪, 用于在钻孔中测定岩石的相关力学参数。该设备具有便携、快捷、高效、低成本的特点。该设备通过获取4个不同曲率半径的压头在压入过程中的载荷-位移曲线, 并对这些曲线进行分析从而获取岩石的相关力学参数。在大理石上进行钻孔横向贯入仪的初步应用, 并在试验中引入声发射监测塑性变形的发展情况, 揭示试验的压入曲线特性, 从试验曲线中提取岩石的模量, 通过与单轴试验结果进行对比, 用钻孔横向贯入仪试验曲线提取的模量介于单轴试验的割线模量和弹性模量之间, 并且与割线模量较为接近。认为钻孔横向贯入仪的试验结果可以代表现场岩石的力学参数, 可供工程参考。

关键词: 岩石力学; Hertz 接触问题; 压痕试验; 力学参数; 钻孔横向贯入仪

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)09-1901-08

DEVELOPMENT AND PRELIMINARY APPLICATION OF DRILLHOLE PENETROMETER INSTRUMENT WITH MULTI-CURVATURE INDENTER

LI Xiaochun¹, WANG Anli¹, LIU Zhaosheng², WANG Shaoquan², SHI Lu¹, CUI Yinxiang¹, JIANG Zhenbo³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Northern Engineering and Technology Corporation, Dalian, Liaoning 116600, China; 3. Department of Civil Engineering, Kyushu University, 819-0382, Japan)

Abstract: A drillhole penetrometer instrument using the technology of indentation was developed to solve the high cost problems existing in acquiring rock parameters in deep geotechnical engineering. This apparatus was portable, convenient, efficient and low-cost. The apparatus acquired the load-displacement curves produced by four indenters with different curvature radii in the process of loading. The elastic-plastic parameters were obtained by the analysis of these curves. The preliminary application of the drillhole penetrometer instrument was conducted on the marble and the plastic deformation was monitored with the acoustic emission technology, which demonstrated the characteristics of the identification curves. The elastic modulus was acquired through the relevant curves, and comparisons between the results of this research and the uniaxial compression test. It was shown that the modulus value extracted through the curves of drillhole penetrometer instrument was between the

收稿日期: 2014-11-10; **修回日期:** 2015-02-05

基金项目: 中国中冶“三五”重大科技专项

作者简介: 李小春(1964-), 男, 1984年毕业于重庆大学采矿系, 现任研究员、博士生导师, 主要从事二氧化碳地质封存方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1480

values of the secant modulus and the elastic modulus in uniaxial compression test and was closer to the secant modulus, which proved that the results acquired through drillhole penetrometer instrument represented the mechanical parameters of field rock.

Key words: rock mechanics ; Hertz contact problem ; indentation test ; parameter of mechanics ; drillhole penetrometer instrument

1 引言

岩石力学参数的准确获取直接关系到工程设计、施工与运行的安全性，长期以来一直是研究的难点之一。由于条件限制，众多工程岩体试验布置在地表或开挖面附近，受风化、卸荷、爆破等综合影响，试验结果与真实的力学参数往往有较大的差异。借助已有勘探钻孔，可以借助声波等技术深入到岩体的不同部位进行岩体的弹性和非破坏力学特征测量。然而岩体破坏相关的力学试验(如水压致裂法)，成本都较高、试验周期较长、试验过程繁琐。

球头加载头由于其与岩体接触面积小，能够在较小的载荷下使得被加载材料从弹性变形进入塑性变形至局部破坏，目前已广泛应用于材料的硬度测试中^[1-4]。根据压头的不同，常用的硬度测试方法可分为：球形压头的 Brinell 硬度试验和 Meyer 硬度试验、正四棱锥压头的 Vickers 硬度试验、金刚锥形压头的 Knoop 硬度试验等。对于不同形式的压头，根据弹性计算的应力分布和试验的观测结果，各学者提出了众多的半经验模型。K. L. Johnson^[2, 5]在观察研究的基础上，提出了膨胀空腔模型，用于对弹塑性压入行为的描述，并根据此模型计算出压入过程中的应力和位移分布。M. C. Shaw 和 G. J. DeSalvo^[6-7]提出了一个与膨胀空腔模型较为相似的模型，用于确定压入过程中进入塑性时的弹性约束系数，但其没有给出应力和位移的解析表达式。R. Hill 等^[8]则通过基于刚塑性模型的滑移线理论来分析二维的压入情况。

鉴于此，开发了一套基于多曲率压头的钻孔横向贯入仪，获取孔壁不同曲率半径压头的载荷和位移曲线，对这些曲线进行分析获得岩体的相关力学参数。与传统的常规试验相比，具有快速、简便、低成本等优点，易于工程现场的应用。

近年来，有学者研究压痕试验在岩石和混凝土等方面的应用，例如，王伟和徐卫亚^[9]使用平底圆柱形压头对砂岩的弹性模量进行提取，并与单轴试验结果进行对比；T. Szwedzicki^[10]对硬岩压痕试验所测得的硬度和常规单轴试验所测的单轴强度进

行对比，得到单轴强度 UCS 和硬度 IHI 之间存在如下关系： $UCS = 3.01IHI^{1.09}$ ，认为可以通过压痕试验估算岩石的强度；M. H. Leite 和 F. Ferland^[11]对多孔介质材料进行了压痕试验与单轴试验的对比，认为单轴试验得到的弹性模量大约为压痕试验计算得到的弹性模量的 2 倍，而二者所确定的压缩强度则较为接近。尽管对岩石等地质材料有所研究，但是仪器化的现场设备至今为止尚未见报道。

本文主要介绍自主研发的钻孔横向贯入仪，分 3 个部分介绍其理论基础、仪器化产品以及试验成果。对于理论和成果，本文侧重于弹性参数提取的研究，后续将进一步开展岩体非弹性力学参数的研究。

2 钻孔横向贯入仪的理论基础

压痕试验的理论基础是接触力学理论。1881 年，H. Hertz^[12]首先对 2 个弹性体的接触问题进行研究，I. N. Sneddon^[13]通过积分变换的方法研究各种压头的轴对称压力的分布，K. L. Johnson^[2]对接触力学的实际应用方面做了大量研究。

如图 1 所示， R_1, R_2 为 2 个接触球体的半径， a 为接触圆半径， $R_e = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 表示等效半径。弹性体的 Hertz 接触问题基于以下假设：(1) 表面都是连续的，并且是非协调的： $a \ll R_e$ ，(2) 满足小应变假设： $a \ll R_e$ ；(3) 2 个物体均可以看作弹性半空间： $a \ll R_{1,2}$ ， $a \ll l$ (l 表示物体横向和深度两方面的有效尺寸)；(4) 表面无摩擦： $q_x = q_y = 0$ (q_x 和 q_y 表示接触表面的切向摩擦力)。

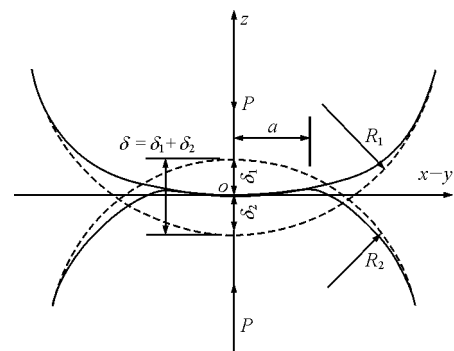


图 1 球形压头的压痕试验图示
Fig.1 Schematic representation of ball indentation test

H. Hertz^[12]通过试验及弹性力学问题与静电势问题的类比，给出了关于弹性球体接触区域的压力为

$$p(x, y) = p_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中： p_0 为接触区域中心的压力。

由此，可以推导得到压入过程中的力与位移的关系为

$$\delta = \left[\frac{9}{16} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \left(\frac{P}{E_c} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (2a)$$

其中，

$$E_c = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2b)$$

式中： E_c 为组合模量； P 为压力； E_1, E_2 和 ν_1, ν_2 分别为与半径 R_1, R_2 相应的接触球体的弹性模量和泊松比。

接触圆半径为

$$a = \left[\frac{3PR_1R_2}{4E_c(R_1 + R_2)} \right]^{1/3} \quad (3)$$

接触区域中心的压力为

$$p_0 = \left[\frac{6PE_c^2}{\pi^3} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1R_2} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (4)$$

沿 z 轴的应力分布为

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = - \left[1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = -(1 + \nu) \left(1 - \frac{z}{a} \arctan \frac{a}{z} \right) - \frac{1}{2} \frac{\sigma_z}{p_0} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r \quad (7)$$

$$\tau_{\max} = \sigma_z - \sigma_r \quad (8)$$

式中： σ_z 为沿 z 轴的正应力， σ_r 为柱坐标下径向正应力， ν 为相应计算接触体的泊松比， σ_θ 为柱坐标下环向正应力， τ_{\max} 为最大剪应力。

通过式(5)~(7)可得沿 z 轴应力的分布如图 2 所示。从图 2 中可以看出，集中应力主要分布在与接触半径 a 相当的区域内，当超出该区域时，应力迅速衰减，尤其是最大剪应力衰减得更快。同时，由式(4)不难得知，在弹性段，即使较小的压力 P 也会引起很大的应力，因此，在加载段，总是弹塑性的，即使在通常认为很小的荷载下也是如此。

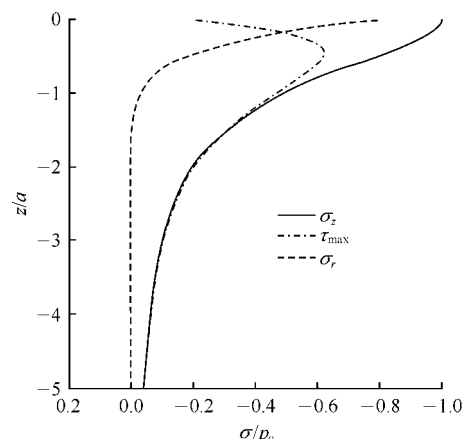


图 2 应力沿 z 轴的分布($\nu = 0.3$)

Fig.2 Stress distribution along the z -axis($\nu = 0.3$)

3 钻孔横向贯入仪的介绍

基于接触理论，研制了钻孔横向贯入仪，用于钻孔内测量岩石的力学参数。压入测试技术中常用的压头有球形的和锥形的，相关研究表明，由于锥形压头的自相似性，固定锥角压头下，材料的力学参数和荷载-位移曲线并非单值对应^[14-16]，在一次试验中至少需要 2 种不同锥角的压头才能提取出 2 个塑性参数^[17-23]，而球形压头的非自相似恰好能克服这个问题，仅用一条压入曲线即可提取 2 个塑性力学参数^[15]。考虑到岩石是复杂的地质材料，而在同一点处不能进行压头更换，且不同的点岩石参数有可能有较大变化，不能使用锥形压头，故本文中研制的钻孔横向贯入仪采用球形压头，以便于后续塑性参数提取。

3.1 钻孔横向贯入仪的基本组成

如图 3 所示，钻孔横向贯入仪主要由液压泵、

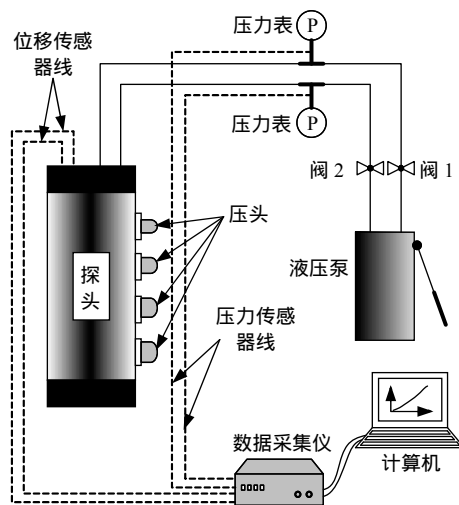


图 3 钻孔横向贯入仪示意图

Fig.3 Schematic representation of drillhole penetrometer instrument

探头、位移传感器、压力传感器、数据采集仪及计算机几部分组成,可以分为2个大部分:由液压泵、加泄压管路、阀门及探头等组成的加载系统和由传感器、数据采集仪和计算机等组成的数据采集系统。

钻孔横向贯入仪最核心的部分是探头,它包括腔体、球形压头、垫板、回压垫、活塞、加压孔、承压板、布线槽、卸压孔、传感器探头、卸压腔和加压腔12个部分(见图4),其实物见图5。

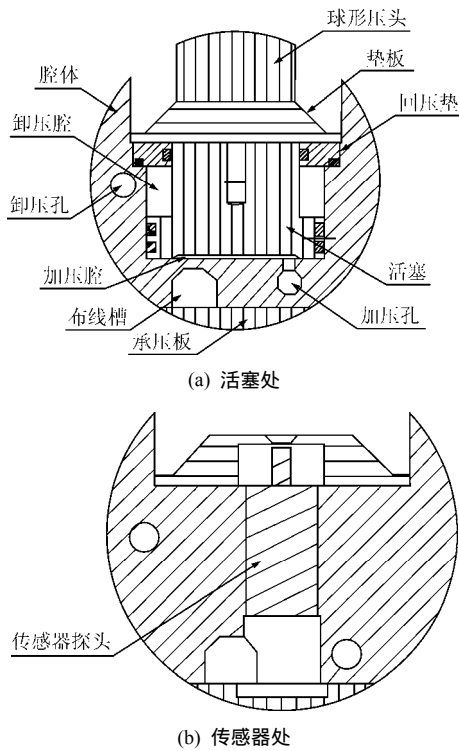


图4 横断面设计图

Fig.4 Schematic representation of crosssection

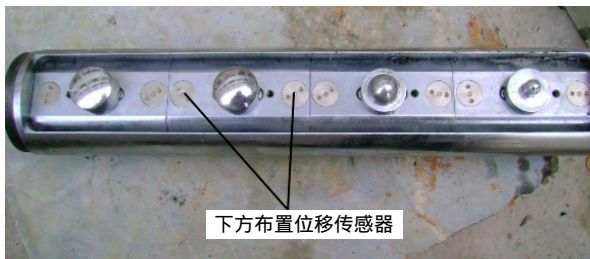


图5 探头实物图

Fig.5 Photo of the sonde

4个压头对应的加压腔、泄压腔通过各自的加压孔、泄压孔与泄压管和加压管路连成一体,而泄压孔中的压力在加载过程中一直保持为0,加载过程中各压头的力由加压管路的油压乘以压头底部活塞的面积得到,这也使得各加载压头的加载力一致。

每个压头的位移由2个LVDT位移传感器测定,位移传感器对称地布置在用于固定压头的垫板上,如图5所示。

3.2 钻孔横向贯入仪的基本原理

在探头中,由活塞通过回压垫固定在腔体中,活塞底端与腔体组成了加压腔;由腔体、回压垫和活塞组成了卸压腔,垫板用螺丝固定在活塞上部,工作板或压头通过螺丝固定在垫板上。当加载阀门打开,卸压阀门自动关闭,液压泵向加压腔注入液压油,推动活塞向外运动,使活塞上的垫板和压头向外运动,对钻孔壁施加压力。当卸压阀门打开,加载阀门自动关闭,液压泵向卸压腔注入液压油,使活塞往回运动,垫板和压头缩回。每个压头的位移值由2个对称布置的LVDT位移传感器进行测定,加压腔内和卸压腔内的压力由相应的压力传感器测定。所有传感器均连接到数据采集器上,数据采集器通过数据线与电脑连接。由此,数据采集器可以记录试验过程中位移与压力的变化,并将数据传输到电脑,电脑对所采集的数据进行记录。

3.3 钻孔横向贯入仪的试验步骤

(1) 仪器标定。在本装置中,用到了8个位移传感器和2个压力传感器,由于传感器本身存在漂移问题,故而在现场试验之前需要利用精密千分表和高精度液压表对传感器进行标定。

(2) 根据工程需求,将孔壁钻孔横向贯入仪运至现场,选择适当的工程钻孔,平整好场地,将钻孔横向贯入仪探头、油压加载系统和数据采集系统连接完毕,进行油路的检漏,完成准备工作。

(3) 将钻孔横向贯入仪探头放入钻孔的指定深度,调整好方向,将油路调整到加载状态,用油压泵对探头加压,使压头向钻孔壁施加径向压力,观察电脑上压入位移与压力之间的关系,在整个加载过程中宜缓慢并均匀地加载(2 mm 位移的加载为8~10 min),以使整个加载过程中力-位移($P-\delta$)曲线的特征较好地表现出来。

(4) 加载到一个合适的荷载值后,缓慢打开卸压的阀门,使加载腔中液压缓慢下降,由此测得卸压的力-位移曲线。每次试验中可进行多次加、卸压循环。

(5) 力-位移曲线测定完毕后,将油路状态调整到卸压状态,手动液压泵调节到反向加载状态,用油压泵对探头反向加压,使垫板和压头回缩,进行下一组测试,直至所有试验完成,将探头从钻孔

中取出。

(6) 试验测试完毕，对试验数据进行整理分析，求取所需参数。

在整个过程中，可以在钻孔的任意深度和任意方向进行施压，同时获取多条位移曲线，从而得到连续的力-位移曲线。整个过程用时较少，达到了方便、快捷、经济的目的。仪器配备有 10~40 mm 不同尺寸的球形压头，可根据不同的岩石类型选用。该仪器主要应用于完整岩石、钻孔深度较深、取样比较困难的岩层中。

由于钻孔横向贯入仪系统中力的传递过程明了，加、卸载实现过程较为简单，实践表明，钻孔横向贯入仪能方便、快捷地放入钻孔中进行试验。只要有足够长的油管 and 传感器导线，钻孔横向贯入仪就能在任何深度进行岩石力学参数的测定。本文所使用的钻孔横向贯入仪探头直径 75 mm，活塞行程 13 mm，故而该仪器可以放入直径 75~88 mm 的钻孔中进行测量，对于更大直径的钻孔，可以将承压板加厚，从而扩大其适用范围。

4 钻孔横向贯入仪的初步应用

上文介绍了钻孔横向贯入仪的理论基础和钻孔横向贯入仪试验系统，为验证钻孔横向贯入仪的可用性，本文采用湖北省咸宁市通山县大理岩进行试验研究，试验用的大理岩为青灰色，均质、细腻，见图 6。



图 6 试验用大理石

Fig.6 Marble used for test

通过对直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱样进行单轴试验和常规三轴试验，得到该种岩石的力学参数见表 1，2。

表 1 试验用大理石单轴试验结果

Table 1 Uniaxial tensile test results of marble

值类型	峰值强度/MPa	割线模量/GPa	弹性模量/GPa	泊松比
平均值	154.455	36.229	62.881	0.247
标准差	24.785	4.649	5.590	0.049

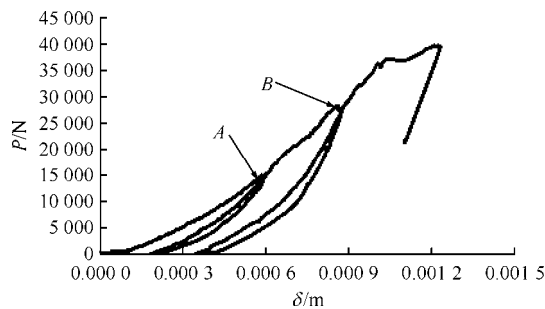
表 2 试验用大理石常规三轴试验结果

Table 2 Conventional triaxial test results of marble

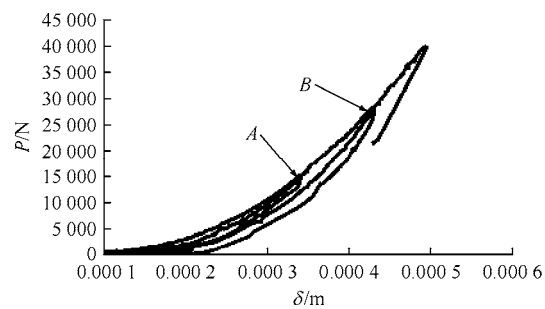
围压/MPa	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2	159.260	75.423	0.223
4	189.917	76.230	0.253
8	210.820	84.233	0.227
16	243.590	75.140	0.247
32	316.950	78.517	0.243

4.1 试验结果介绍

为了模拟钻孔横向贯入仪用于现场钻孔的试验情况，本文将大理石加工成 1 m×1 m×1 m 的方块，如图 6 所示。在这个方块上钻直径为 90 mm 的孔，按照节 3.3 中所述的试验步骤，进行孔壁压痕试验。图 7 为试验得到的典型力-位移(P-δ)曲线。



(a) 直径 14 mm 压头



(b) 直径 40 mm 压头

图 7 典型试验曲线

Fig.7 Typical test curves

对比图 7(a)，(b)中 2 种不同直径压头在同一次试验中得到的试验曲线，可知：在试验的加、卸载循环中，卸载存在残余变形，且压头直径越小，残余变形越大，这可能是由于压头越小，应力集中程度越高导致的。在图 7(a)的曲线中，在第一次卸载

时,再加载曲线在卸载点 A 处基本上与加载曲线重合;而在点 B 处,再加载曲线与加载曲线有较大分离,而图 7(b)的曲线中,在点 A 和点 B 处,再加载曲线和加载曲线重合得很好。

由以上分析可知,加、卸载过程完成之后有永久变形,对于非率相关材料,塑性变形源于加载过程的。为分析加载过程中塑性变形的发展情况,本研究采用声发射对塑性发展过程进行监测,如图 8 所示。

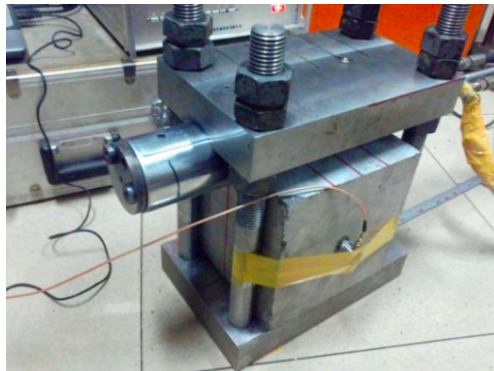


图 8 孔壁压痕试验中引入声发射监测塑性变形
Fig.8 Monitoring plastic deformation with acoustic emission apparatus in drillhole indentation test

声发射监测的典型结果如图 9 所示,对于单向加载的力曲线,刚开始接触时,随着位移的增加,力曲线上升,且随位移的增大,曲线的斜率不断增加,而当荷载较大时,曲线斜率不再增加,而是接近于直线,荷载进一步增加,曲线斜率下降,而后发生破裂,即力随位移增加不再增加,甚至下降。对于声发射累计能量,由于后期累计能量太大,为能展现整个加载过程声发射累计能量的变化,在图中用对数坐标表示。在最初接触之后的一小段位移增长过程中,并没有声发射(AE)事件,对应的是荷载曲线的斜率增加段;随着位移的增加,出现了少量的 AE 事件,并且不断增长,但总体来说数值仍然较小,对应荷载曲线的接近直线段;当位移再进

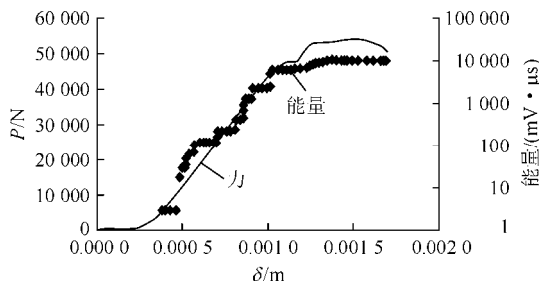


图 9 力与声发射累计能量随位移变化(12 mm 压头)
Fig.9 Variation of force and cumulated energy with deformation (indenter 12 mm)

一步增大时,声发射累计能量大幅度增加,达到较大的数值,此时对应荷载曲线的斜率下降段。

以上分析表明,AE 事件与加载曲线斜率存在较好的对应关系。加载过程中,弹性段仅有开始的一小段,而在加载过程中的绝大部分时间,都伴随着塑性变形的发生。

4.2 试验结果分析

图 10 所示曲线为抽象后的试验曲线,本文用此图来说明弹性模量的提取。由于较大的应力集中,在加载过程中总是伴随着塑性变形的发生,而一般认为,卸载曲线是弹性的,据此,本文通过卸载曲线来对弹性模量进行提取。考虑到在力较小时,系统的摩擦影响较大,而当力接近点 A 的力时,则不满足非协调假设。综合考虑,在进行弹性模量提取时,采用卸载曲线上的 BC 段进行拟合求解,对应的压力为最大压力的 $2/3 \sim 1/2$ 段。

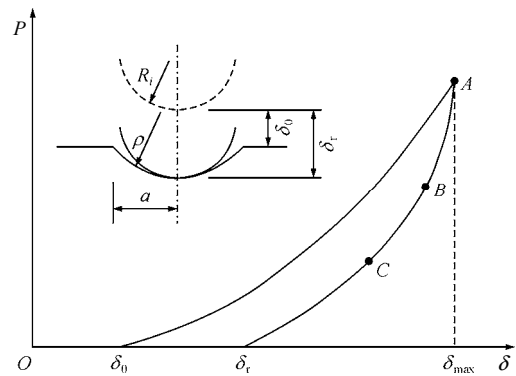


图 10 抽象化的试验曲线
Fig.10 Abstraction curve of the test result

对于卸载曲线,由于存在塑性变形,因此,在卸载分析时,应该考虑成半径为 R_i 的压头与卸载完成之后的压痕半径 ρ 的接触问题。考虑到在较大的压力的情况下压入时,接触表面大部分区域已经进入塑性状态,同时考虑到压入深度相比于压头尺寸较小,且变形主要以岩石为主, ρ 采用下式进行计算:

$$\rho = R_i \frac{\delta_{\max} - \delta_0}{\delta_r - \delta_0} \tag{9}$$

式中: δ_0 为位移初读数, δ_{\max} 为压入的最大位移, δ_r 为 P 卸载至 0 时的终了位移。

在式(2a)中令 $R_2 = -\rho$, $R_1 = R_i$, 得到:

$$\delta = \left[\frac{9}{16} \frac{\rho - R_i}{\rho R_i} \left(\frac{P}{E_c} \right)^2 \right]^{1/3} \tag{10}$$

由式(10)可知,位移 δ 与压力 P 成 $2/3$ 次幂的关系,考虑到存在终了位移 δ_r ,在实际求解中,采用下式来进行拟合:

$$\delta = TP^{2/3} + \delta_r \quad (11)$$

其中，

$$T = \left(\frac{9}{16} \frac{\rho - R_i}{\rho R_i E_c^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

求得 T 之后，按下式反演得到组合模量 E_c ：

$$E_c = \left(\frac{9}{16} \frac{\rho - R_i}{\rho R_i T^3} \right)^{1/2} \quad (13)$$

最后，通过式(2b)反演得到下式，由此计算岩石的弹性模量：

$$E_r = \frac{E_c E_i (1 - \nu_r^2)}{E_i - E_c (1 - \nu_i^2)} \quad (14)$$

式中： E_r ， ν_r ， E_i ， ν_i 分别为岩石和压头的弹性模量和泊松比。对于岩石的泊松比 ν_r 未知的情况，考虑到多数岩石的泊松比在 0.15 ~ 0.35 范围，可以通过使 $\nu_{rn}^2 - 0.15^2 = 0.35^2 - \nu_{rn}^2$ (其中， ν_{rn} 为估算的岩石泊松比) 成立而使最大误差最小，解得： $\nu_{rn} = 0.2694$ 。此时误差最大约为 5.4%。可见，即使在泊松比未知时，用 ν_{rn} 代替 ν_r 计算岩石的弹性模量，误差是可以接受的。

以上是通过试验曲线求解弹性模量的整个过程。下文对试验曲线的计算结果进行分析，在计算过程中压头钢材的弹性模量取 210 GPa、泊松比取 0.3，岩石的泊松比按单轴试验结果取为 0.247。分析对象采用钻孔横向贯入仪和单轴试验弹性模量的比值 E_r/E_c 。

为了说明不同卸载水平对求得弹性模量的影响，图 11 绘出了同一试验曲线上不同卸载水平计算得到的弹性模量，图中，箭头方向指向更高水平的卸载；图例中 12_5 表示直径 12 mm 压头的第 5 次试验，其余类推。从图 11 中可以看出，2 个卸载水平中的弹性模量值是有差别的，但随着卸载水平的提高，求得的弹性模量值有增有减，而不是单纯的增加或者减小，且其差别被认为是可以接受的。鉴

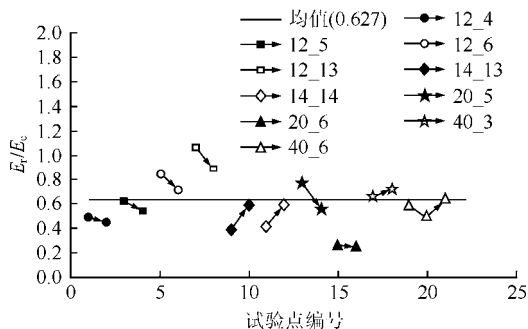


图 11 钻孔横向贯入仪不同卸载水平弹性模量结果的比较

Fig.11 Comparison of the elastic modulus at in different unload levels

于此，对于一个试验点，计算时，取各次卸载水平的弹性模量值均值作为该点的弹性模量。

图 12 和表 3 为钻孔横向贯入仪对试验用大理岩试验计算得到的弹性模量的汇总，用钻孔横向贯入仪测得的大理岩弹性模量为 36.229 GPa，是单轴试验测定的弹性模量的 0.627，这个结论与王 伟和徐卫亚^[9]用平底压头微痕试验得到的结论相近，与 M. H. Leite 和 F. Ferland^[11]对多孔介质材料的试验结果的差别也不大。比值介于弹性模量与割线模量之间，并且与割线模量比较接近，这可能与加载过程中微裂隙的张开和闭合有关。图 12 表明，用钻孔横向贯入仪测定的弹性模量与单轴试验所测值得比值绝大部分在 0.4 ~ 1.0 范围，0.5 ~ 0.7 区间约占 40%。可以看出，通过钻孔横向贯入仪测定的弹性模量数据离散性较大，其标准差为单轴试验的 2.4 倍。这与孔壁压痕法本身的试验条件有关，由于岩石本身并非均质体，所测点不同，所测“局部”参数也不同，从而导致数据的离散性较大，而单轴试验由于采用的试样较大，所测数据的代表性更强，从而数据离散性也较小，钻孔横向贯入仪的这个缺陷可以通过其快速的测试速度得到大量样本，从而统计平均来弥补。从图 12 中还可以看出，不同直径压头的的数据点基本上较为均匀地分布在平均值线的两侧，表明在该种岩石下，试验的弹性模量对直径为 10 ~ 40 mm 的压头的压入行为无尺寸效应，这也表明了试验的可行性。

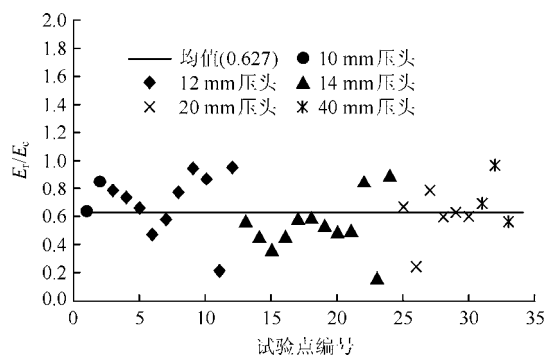


图 12 大理石弹性模量的钻孔横向贯入仪结果与单轴结果比较

Fig.12 Comparison between the elastic modulus obtained by indentation test and uniaxial compression test

表 3 钻孔横向贯入仪结果与单轴结果比较

Table 3 Comparison between the elastic modulus obtained by indentation test and uniaxial compression test GPa

试验方法	弹性模量		割线模量	
	平均值	标准差	平均值	标准差
单轴试验	62.88	5.59	36.229	4.649
钻孔横向贯入仪	39.40	13.09	-	-

受接触区域复杂的应力状态影响, 尽管钻孔横向贯入仪测定的弹性模量与单轴弹性模量试验值存在一定的差别, 但其值介于单轴弹性模量和割线模量之间, 可以用于现场试验作为岩石力学参数的评价指标。

5 结 论

借鉴压痕试验, 发展了钻孔内测定岩石力学参数的新手段——钻孔横向贯入仪, 用于在现场钻孔中测定岩石的力学参数, 对该仪器的应用做了初步的探讨, 得到以下主要结论:

(1) 钻孔横向贯入仪本身具有体积小、质量轻的特点。能方便、快捷地应用于现场钻孔进行试验, 具有成本低、效率高、能连续地测定不同深度岩石力学参数等优点。

(2) 在大理石上进行了压入试验, 并用声发射设备进行监测。声发射试验数据表明, 钻孔横向贯入仪加载曲线中, 在加载过程中弹性段很短, 加载时绝大部分过程都伴随着塑性变形的发展, 分析认为这主要是由于高度的应力集中引起的。

(3) 在对大理石的试验中, 通过钻孔横向贯入仪试验曲线卸载段计算得到的弹性模量值介于单轴试验测定的割线模量和弹性模量之间, 比割线模量略大, 为弹性模量的 0.627 倍。

(4) 该方法的不足之处是测试结果离散性较大, 这与岩石本身是复杂的地质材料有关, 可以通过本仪器快速的测试速度得到大量数据统计分析弥补。

总而言之, 钻孔横向贯入仪所测弹性模量虽然有一定的差别, 但是其值仍具有重要的参考意义, 尤其是凭借其简便、快速以及廉价的试验成本, 非常利于现场钻孔连续测量。当然, 本文研究的仍然仅仅是弹性模量的提取, 由于在压入过程中材料发生了塑性破坏, 关于塑性参数的提取的研究还需进一步对岩体破坏模式、参数获取模型进行深入研究, 以便贯入仪能在实际工程中得到广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] FISCHER-CRIPPS A C. Introduction to contact mechanics[M]. USA: Springer, 2007: 151–152.
- [2] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 172–176.
- [3] YAN W Y, SUN Q P, LIU H Y. Spherical indentation hardness of shape memory alloys[J]. Materials Science and Engineering :A, 2006, 425(1/2): 278–285.
- [4] YAN W Y, PUN C L. Spherical indentation of metallic foams[J]. Materials Science and Engineering :A, 2010, 527(13/14): 3 166–3 175.
- [5] JOHNSON K L. The correlation of indentation experiments[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1970, 18(2): 115–126.
- [6] SHAW M C, DESALVO G J. A new approach to plasticity and its application to blunt two dimensional indenters[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1970, 92(2): 469–479.
- [7] SHAW M C, DESALVO G J. On the plastic flow beneath a blunt axisymmetric indenter[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1970, 92(2): 480–492.
- [8] HILL R, LEE E H, TUPPER S J. The theory of wedge indentation of ductile materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London :Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1947, 188(1013): 273–289.
- [9] 王伟, 徐卫亚. 一个新的岩石力学特性测定方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(增): 538–544.(WANG Wei, XU Weiya. A new method of testing rock properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Supp.): 538–544.(in Chinese))
- [10] SZWEDZICKI T. Indentation hardness testing of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(6): 825–829.
- [11] LEITE M H, FERLAND F. Determination of unconfined compressive strength and Young's modulus of porous materials by indentation tests[J]. Engineering Geology, 2001, 59(3/4): 267–280.
- [12] HERTZ H. On the contact of elastic solids[J]. Journal Für die Reine und Angewandte Mathematik, 1881, 92: 156–171.
- [13] SNEDDON I N. Fourier transforms[M]. New York: McGraw-Hill, 1951: 450–510.
- [14] CHEN X, OGASAWARA N, ZHAO M, et al. On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation :The indistinguishable mystical materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(8): 1 618–1 660.
- [15] CHENG Y T, CHENG C M. Scaling, dimensional analysis and indentation measurements[J]. Materials Science and Engineering R, 2004, 44(4/5): 91–149.
- [16] CHENG Y T, CHENG C M. Can stress-strain relationships be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters[J]. Journal of Materials Research, 1999, 14(9): 3 493–3 496.
- [17] BUCAILLE J L, STAUSS S, FELDER E, et al. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters[J]. Acta Materialia, 2003, 51(6): 1 663–1 678.
- [18] CAO Y P, QIAN X Q, LU J, et al. An energy-based method to extract plastic properties of metal materials from conical indentation tests[J]. Journal of Materials Research, 2005, 20(5): 1 194–1 206.
- [19] CHOLLACOOP N, DAO M, SURESH S. Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters[J]. Acta Materialia, 2003, 51(13): 3 713–3 729.
- [20] DAO M, CHOLLACOOP N, VAN VLIET K J, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 2001, 49(19): 3 899–3 918.
- [21] OGASAWARA N, CHIBA N, CHEN X. Representative strain of indentation analysis[J]. Journal of Materials Research, 2005, 20(8): 2 225–2 234.
- [22] SWADDIWUDHIPONG S, THO K K, LIU Z S, et al. Material characterization based on dual indenters[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(1): 69–83.
- [23] TABOR D. The hardness of metals[M]. Oxford: Clarendon Press, 1951: 67–79.