

片麻岩载荷-位移性态的巴西法试验研究*

刘宝琛

(冶金部长沙矿冶研究院)

一、前言

随着电-液闭环伺服控制及程序控制材料试验机的发展和完善,新的岩石力学试验技术不断出现,岩石的本质性的性态不断被揭示出来。然而,由于岩石本身的抗拉强度较小,破坏过程较快,因而至今尚未见有岩石直接拉伸的载荷-位移全过程试验结果发表。巴西法是一种在压应力作用下的拉伸强度试验方法,它可以用来求算岩石的抗拉强度。以前,曾有个别学者作过巴西法载荷-位移全过程试验^[1,2],取得了一些可喜的成绩。然而到目前为止,尚未见到这方面的较系统的资料发表。

二、试验方法及岩石样品

试验使用英国Instron公司生产的10吨级的电-液闭环控制万能型材料试验机,配用 $x-y$ 记录仪作载荷-位移曲线的自动记录。使用试验机本身附有的载荷传感器,调整到10kN/V的灵敏度。使用Instron双悬臂梁夹式变形传感器,灵敏度标定为0.1mm/V。用数字电压表监测变形。整个试验系统示于图1。

将黑云母片麻岩岩芯加工成厚 $h = 2.2 \sim 2.9\text{cm}$, 直径 $D = 4.2\text{cm}$ 的圆盘状试件(见图2)。

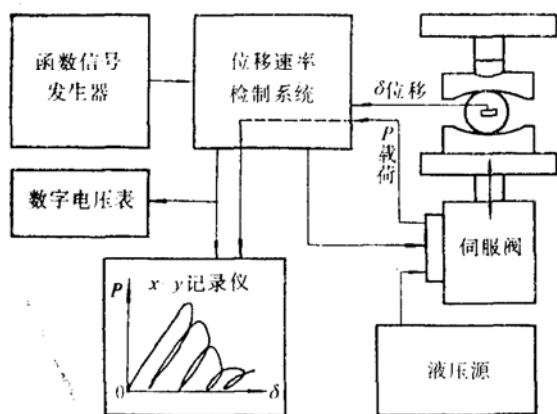


图1 巴西法试验系统图

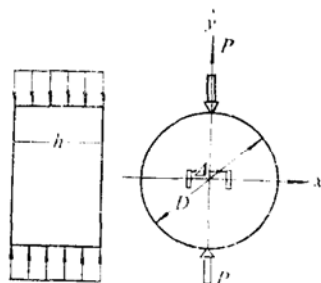


图2 圆盘岩样受力情况

* 本文系作者1983年在瑞典吕勒欧大学讲学期间,在Stephansson教授协助下完成的。

使用有自动调整装置的加载头(见图1), 以保证沿厚度方向的均匀加载。用夹式位移计观测试样中部的横向位移, 测距为 $\Delta = 1.0\text{cm}$ (见图2)。集中载荷 P 沿圆盘直径 y 轴方向施加。采用位移速率反馈闭环控制, 位移速率为

$$\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt} = \text{常数}$$

加载全过程中, 取 $\dot{\Delta} = 0.028 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ 。相当于 $\dot{\epsilon}_x = 2.8 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 。

三、岩样内部的应力-应变分析

由弹性力学知, 岩样中心点处的应力及应变为^[8]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^0 &= -\frac{2P}{\pi Dh} \\ \sigma_y^0 &= \frac{6P}{\pi Dh} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x^0 &= -\frac{2(1+3\mu)P}{E\pi Dh} \\ \epsilon_y^0 &= \frac{2(3+\mu)P}{E\pi Dh} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中负号表示拉应力。

应用式(1), 求出在 $P = P_{\max}$ 时岩石的抗拉强度 σ_p 为

$$\sigma_p = -0.64 \frac{P_{\max}}{Dh} \quad (3)$$

此时, 在与拉应力垂直方向上的压应力为 $3\sigma_p$ 。

若由观测获得岩石的应变, 则由式(2)可以求得岩石的弹性模量 E 及泊松比 μ 。一般岩石的泊松比变化不大, 可以由观测得出或类比给定, 则由式(2)中第一式可求出弹性模量为

$$E = -\frac{2(1+3\mu)P}{\pi Dh \epsilon_x^0} \quad (4)$$

在应力峰值以后, 公式(2)所确定的应力-应变关系不能使用。

四、试验结果分析

试验分成两组, 第一组的加载方向平行于片理面方向, 试验的典型结果示于图3; 第二组的加载方向垂直于片理面方向, 试验的典型结果示于图4。

根据试验结果, 按照公式及应力-应变曲线, 可以求出岩石的抗拉强度 σ_p , 岩石应力达峰值 σ_p 时的应变 ϵ_p 以及弹性模量 E ($\mu = 0.25$)。计算结果列于表1。

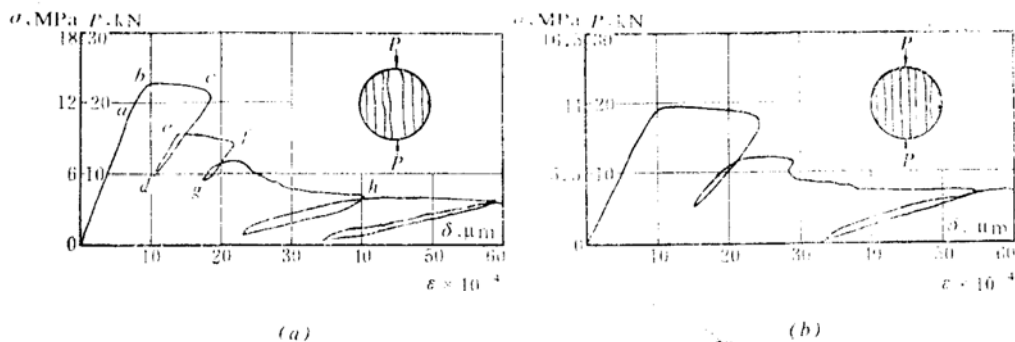


图3 岩样载荷-位移试验结果(平行于片理面方向加载)

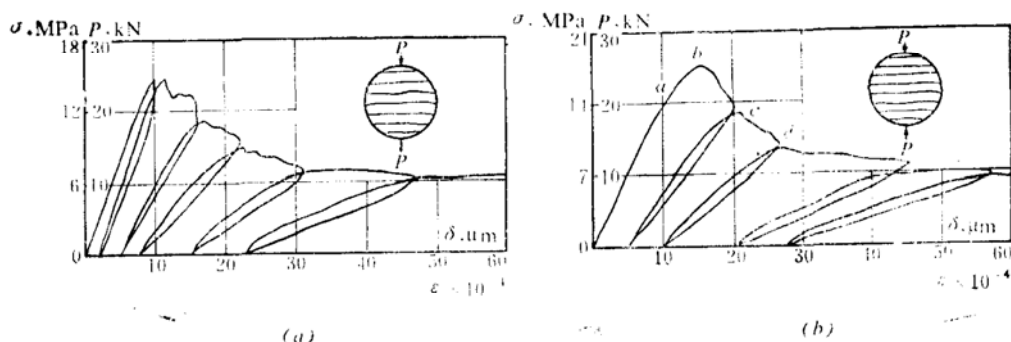


图4 岩样载荷-位移试验结果(垂直于片理面方向加载)

表 1

编 号	加 载 方 向	抗拉强度 σ_p	应 变 ε_p	弹性模量 E
		(MPa)	($\times 10^{-3}$)	(GPa)
2	平行于片理面	13.1	1.750	12.0
3		13.7	1.000	26.7
6		10.6	1.120	18.6
9		10.2	1.010	20.9
平均		11.9	1.220	19.8
10	垂直于片理面	14.7	1.000	26.2
11		17.4	1.625	24.3
平均		16.1	1.313	25.3

由表1可知,拉应力方向与片理面法线方向相同时抗拉强度较小,互相垂直时较大。这证明片理面是一种弱面,其抗拉强度较低,弹性模量也有上述规律,由此可见,片麻岩具有明显的各向异性。

分析图3,4所示的应力-应变全过程曲线,可以获得以下几点初步认识:

1.两种加荷方向的试验中,在应力到达峰值以前,都有相当大范围的线弹性段,即曲线的 oa 段(见图3(a))。线弹性阶段的应力上限约为最大应力的90~97%。

2.在应力达峰值后(图3的 b 点),随变形增加而应力下降。对于第一组试验(见图3),

有相当大的塑性变形阶段(即 bc 段);对于第二组试验(见图4),则没有明显的塑性变形阶段。

3.仔细观察试件发现,第一组试验在应力-应变曲线达 c 点时,试件中心处开始发生微小的纵向裂纹。曲线的 cd 段是突然发生的(可能是机器的反馈伺服控制的速率不够大),直到 f 点以后,裂缝向上下两个方向发展。约在变形达到 $0.4\sim 0.7\text{mm}$ 时,岩样分裂成两半。第二组试验在曲线达 b 点后,裂缝随变形增加而逐步连续地向上下两个方向发展,直到岩样破裂成两半。

4.在岩样开始发生微裂缝以后的各阶段卸载及再加载时,岩样的变形刚度逐步下降。卸载与再加载线不相重合,形成长形的闭环。

5.巴西法试验的岩石应力-应变全过程曲线与单向压缩、三向压缩及弯曲试验的岩石应力-应变全过程曲线的基本形态相似^①。

五、岩样断裂过程的力学分析

为了分析岩石的断裂机理,必须把应力(载荷)、应变(位移)与破裂裂缝的发展过程联系在一起。应力增加到一定程度会使岩石产生裂缝,而微裂缝产生以后,又使岩石的应力状态发生变化。控制位移以一定速率增长,则裂缝也以某一规律扩展,此时,载荷也将发生变化,最终形成载荷-位移全过程曲线,它代表在一定位移速率下的岩石破坏的完整过程。

任何自然界的岩石,都存在一些肉眼可见的或微观的天然裂缝。片麻岩的片理面就是一种天然的微观不连续的裂缝。岩石在外载荷作用下,其内部形成应力场,而在岩石的不连续面(即微裂缝)的端部形成应力集中。在外载荷增加到某一定值时,此应力集中超过岩石的强度而导致裂缝的发展,并最终使岩石破坏。

试验结果揭示,圆盘岩样的破裂开始于中心附近。可以设想,外载荷作用使宏观拉应力达到 σ_p 时,试件中心处的某一微裂缝的端部应力超过岩石强度而使微裂缝开始扩展,并在某一载荷作用之下使裂缝发展到长度为 a 。裂缝产生以后,裂缝部份将不能再承受拉应力(见图5)。此时,如果不采用位移速率闭环控制,岩样就立即突然破裂成两半。采用位移速率控制,当中心开裂以后,外载荷立即相应地降低,则破裂过程成为可控。

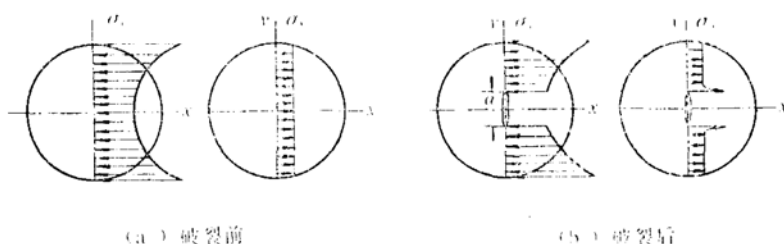


图5 岩石破裂前及破裂后的应力状态

我们假设裂缝的纵向长度 a 与开始破裂后的横向位移成正比,即:

$$a = k(\delta - \Delta \epsilon_p) \quad (5)$$

①严文炳、刘宝琛,刚性试验系统的设计与应用,岩石力学,1981年第4期。

式中 k ——比例系数; δ ——距离为 l 的位移增加量。

岩样开始破裂以后, 其承受拉应力的面积 A 将减小为

$$A = h[D - k(\delta - l\varepsilon_p)] \quad (6)$$

因此外载荷为

$$P = \frac{\pi h \sigma_p}{2} [D - k(\delta - l\varepsilon_p)] \quad (7)$$

由此可见, 岩样的承载能力随裂缝发展而下降。系数 k 可以由试验结果求算。以图 4(b) 所示试验为例: $\sigma_p = 17.4 \text{ MPa}$, $\varepsilon_p = 1.625 \times 10^{-3}$, $D = 4.16 \text{ cm}$, $h = 2.2 \text{ cm}$, $l = 1.0 \text{ cm}$, 对于 c 点, $P_c = 18.5 \text{ kN}$, $\delta = 2.05 \times 10^{-3} \text{ cm}$, 则由式(7)求出 $k_c = 2550$ 。因为对不同的点所求出的 k 值不同, 所以要选用平均值。实质上, 是以直线关系代替了实际的曲线。

六、小 结

已经公开发表的岩石拉伸应力-应变全过程的资料极少, 本次试验又仅作了一类岩石, 因此, 本文所述的工作仅仅是初步的探索, 所获得的一些结果仅能定性地加以利用。

参 考 文 献

- [1] 蔡跃军、刘宝琛、崔志莲, 岩石圆盘劈裂刚性试验研究, 岩土工程学报, 第7卷, 第3期, 1985年。
- [2] Jeager, J.C. and Cook, N.G.W., Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen, 1979.
- [3] 刘宝琛, 矿山岩体力学概论, 湖南科学技术出版社, 1982年。