

高温高压 岩石力学实验

(专题报告译文集)

(内部发行)

国家地震局地质研究所

实验室设备与量测系统

一、序 言

在讲设备之前，首先讲讲工作的性质和我们的一些思路。

我们实验室主要研究岩石和矿物的性质和变形。在实验室做这些工作是为了对自然界的地质过程理解得更深刻。实验室工作是对野外工作的补充。在岩石变形方面，我们可以区别两种性质——脆性与柔性变形。脆性主要涉及岩石的破裂，柔性则主要涉及岩石的流动。脆性是研究工程的人比较感兴趣的问题，我想对你们搞地震的人也是感兴趣的。关于柔性领域的问题，则是研究深部地质的地质学家们所感兴趣的。但这两个领域有很多重叠和互相联系。在讲从脆性到柔性过渡之前，从微观角度先讲讲微破裂、微破裂到宏观破裂的发展。这些微破裂到柔性领域还是存在的。研究的问题有两个方面：一是材料本身的性质，二是研究材料的结构，它们之间是有区别的。例如一个桥，研究它的材料性质及它的格架结构是不同的两方面，在岩石中也有这两方面的问题。我主要讲材料的性质。我感兴趣的是岩石的变形。主要想将实验室的工作与野外工作联系起来。这里主要是从时间尺度上如何把实验室工作与野外工作联系起来，这是一个重要的问题。实验室进行实验，最长也就是几小时或几天（如蠕变实验），而在野外，岩石变形时间是以百万年计的。如用应变率表示，实验室是 $10^{-2} \sim 10^{-6}/\text{sec}$ ，自然界是 $10^{-10} \sim 10^{-14}/\text{sec}$ 。所以，我们的问题是如何从前一个条件到后一个条件进行

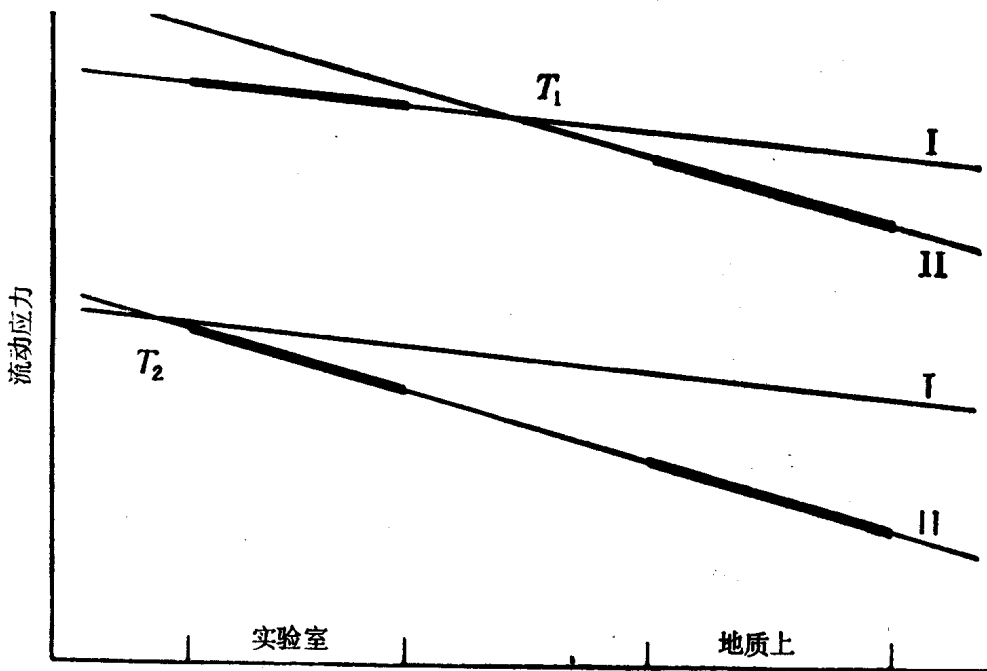


图 1-1 时间尺度 (应变率的倒数)

外推。这里有一个变形机制的问题。在不同应变率条件下和不同温度下的变形机制是不同的。我们要把实验室资料外推到自然界时，我们不得不考虑在地质条件下的变形过程是什么。图1—1说明两个过程的关系。曲线Ⅰ是第一种过程。曲线Ⅱ是第二种过程。纵坐标是流动应力（在某种条件下岩石开始发生流动的应力），横坐标是时间尺度（应变率的倒数）。左边是实验室条件下的应变率，右边是自然界的应变率（见图中的粗线部分）。我们现在考虑第一种过程岩石的流动应力（温度 T_1 下曲线Ⅰ的粗线部分）。对第二种过程，如果推到实验室条件下，岩石应在更高的应力条件下才开始流动。两种情况不同，第一类是通过双晶化来产生的，第二类是通过晶内滑动产生的。所以在实验室用不同速率进行实验，得到这样一条曲线，把它外推到地质条件下（ T_1 下的曲线Ⅰ向右延长）就得到较高的流动应力。但实际工作中，发现在地质条件下不是产生第一种变形，而是产生第二种变形，第二种比第一种应力还要低。将 T_1 下的曲线Ⅱ的粗线部分（即地质条件下的）延长到实验室条件，流动应力更高。这两种条件下出现差异，两条曲线交叉了，所以这种外推是无法实现的。这问题可借助于岩石对温度的依赖关系来研究，一般情况下，岩石对应变率及对温度的依赖关系是类似的。把温度从 T_1 提高到 T_2 ，过程就从第一种情况过渡到第二种情况。应变率对流动应力的影响在更高的温度下更敏感些。 T_1 变到 T_2 后，原来的交点向左移了，这样就可把室内实验外推到野外。在此情况下，室内的高温（ T_2 ）高应变率与野外的低温（ T_1 ）低应变率条件比较类似。这主要说明将实验室条件外推到野外，岩石的变形机制是十分重要的。这是我研究的比较重要的方面。通过这个研究流变性质，要设法把温度提高达到外推的条件，这就是为什么要做高温下的实验的基础。在讲实验之前，先谈谈各种不同机制的条件。

图1—2
变形机制图

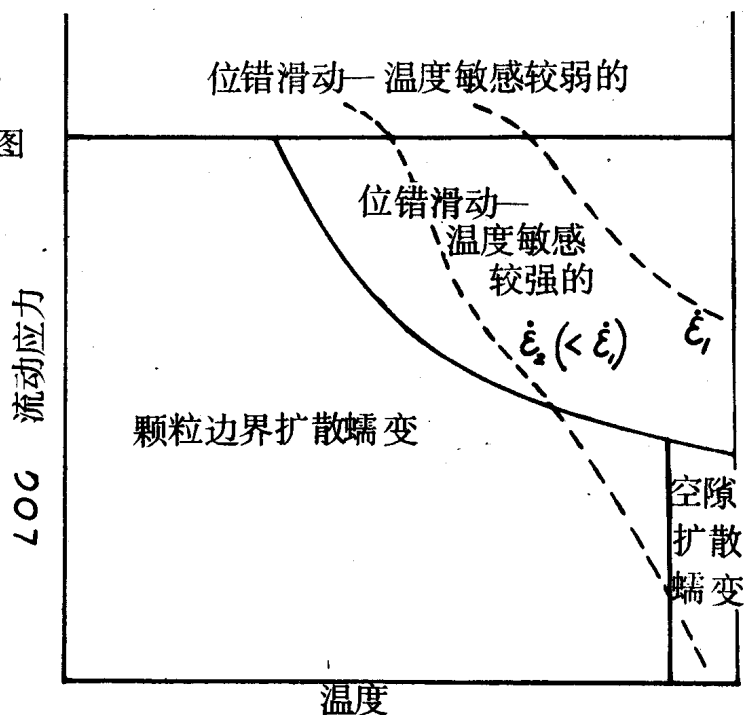


图1—2是爱斯特做的变形机制图。纵坐标是流动应力的对数，横坐标是温度。不同的温度应力场在图中表示。不同的温度、不同的应力下出现不同的变形机制。高应力下变形是晶

体中的位错模型，与温度关系较弱。另一种高温蠕变机制，温度很高，流动应力很低，这个区域受温度影响很大。在这个区域，是通过晶格里面的滑动变形的，物体形状变化是从一个区域流动到另一个区域。图中还表示了应变率与变形的关系。图中虚线表示应变速率，在等应变速率下，变形发生在低的流动应力和相对比较低的温度下。

二、静态高压设备

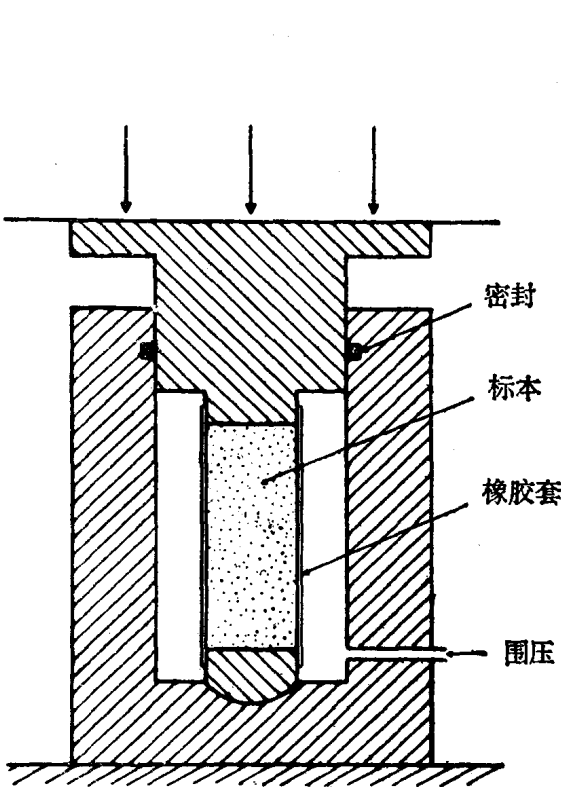


图 1-3 室温下的高压装置

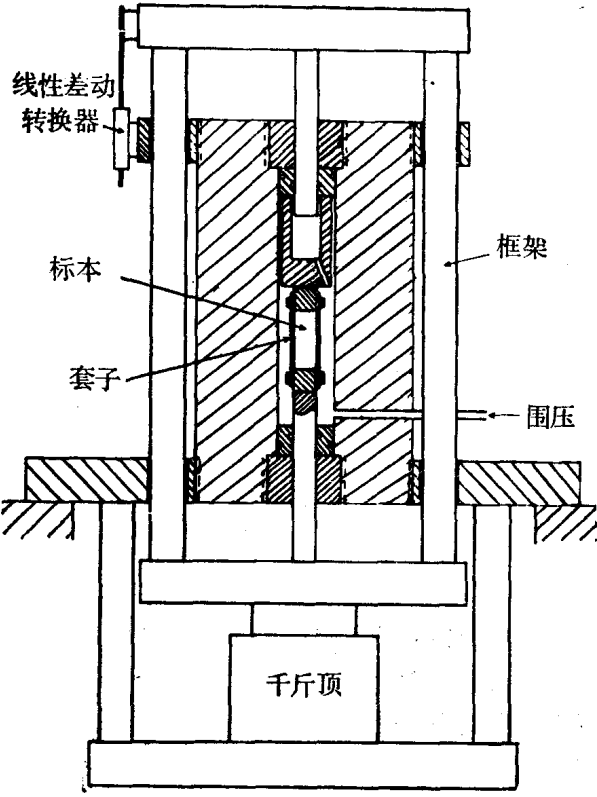


图 1-4

1. 图1—3是室温下的高压设备。围压介质由容器侧面的孔打入。活塞上的轴向压力由上部压机给出。为了把标本与外部介质隔开，标本外加一合成橡胶套子。这个设备在实验中有一个问题：随活塞的下降，容器里边容积缩小，围压将发生变化。图1—4这个装置克服了这个缺点。这是二十年前装的，已用了很多年。这个装置有两个活塞，用一个框架连接起来，这两个活塞之间的距离保持不变。在千斤顶的作用下，两个活塞一起移动，下活塞向上顶，进入容器，而上活塞从容器中出去，使容器中的围压保持不变（容积是常数）。利用活塞对标本加差应力。标本上端用一个砧子顶着，砧子与容器连在一起，不与上活塞连接。这上活塞的作用与标本变形是无关的，只起保持容器容积不变的补偿作用。还有一个优点，下活塞由千斤顶给的力只起对标本变形的作用。这种原理也用在高温实验中。在高温实验装置里，活塞的位

置与此颠倒了一下，如图1—5所示。

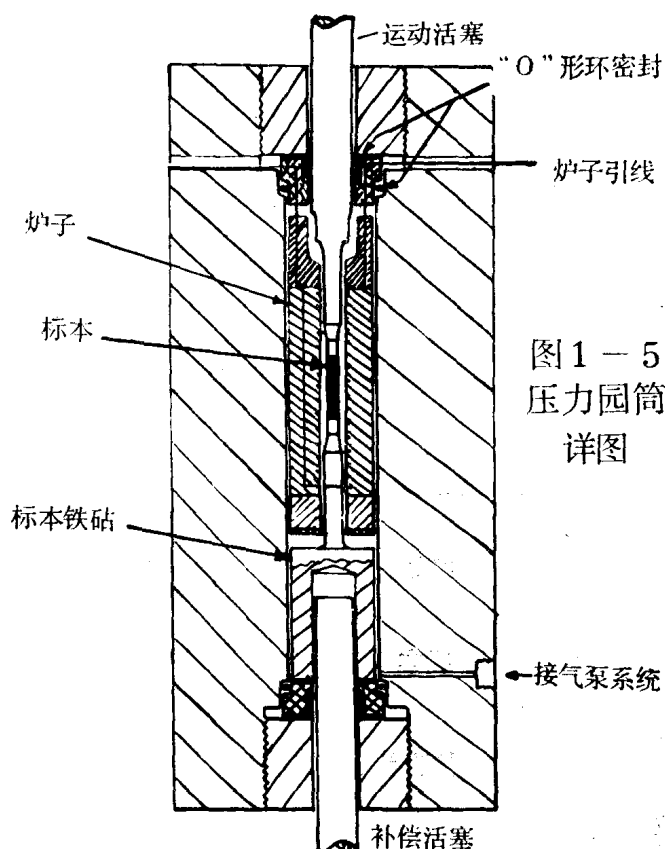


图1—5
压力园筒
详图

2. 图1—6为高温实验仪。大约两米高，1是高压容器在上部，现在只能看到容器外面的冷却水套，容器和活塞看不见，上、下活塞用框架连接。下部是两个千斤顶，这两个千斤顶可使框架上下移动。位移测量用线性差动转换器。压力介质为氩气。气体由管道进入储气筒，再通过倍增器进入容器。左边靠上部分是一个小容器，里边放置锰铜线圈测量压力。压力是通过用线圈装的阀门控制，线圈与阀门连接。压力降低时，线圈使阀门打开，泵开动，向容器输送气体。压力达到额定值后，阀门就关了。还有一个开关，是控制炉子和冷却水装置的。水循环流动时，开关就开，否则就关闭。保证炉子加温时，容器一定有冷却，防止发生危险。

下边详细谈谈泵的系统。有两套这样的设备，这是第一套（图1—7）。右边是一个储气筒，里边充满了100大气压的氩气。中间两个是气—油转换器，其上部是气体，下部接油泵。左边是一个16:1的增压器。打开节门1、2、3，将氩气打入第一级泵，关闭节门2，第一级泵（即气油转换器）将气体压到700大气压。通过节门4进入第二级气—油转换器，打到3000大气压。然后经过增压器打到10,000大气压，最后通到容器。增压器上部是一个压力表。在压力10kb时用煤油做介质。7kb时用气体介质。很多年前是做高压，现在用的压力不超过5kb。现在主要做流动应力，压力只要1kb就可以了。

第二套泵系统是两级气泵。第一级是商业上的压缩空气泵，可将气体由7b打到1kb。第二级泵是用与第一级相同的泵进行修改，用更小的活塞及新的阀门系统，可增压到5kb，通

常只用3kb。我们发现，这个系统很方便。

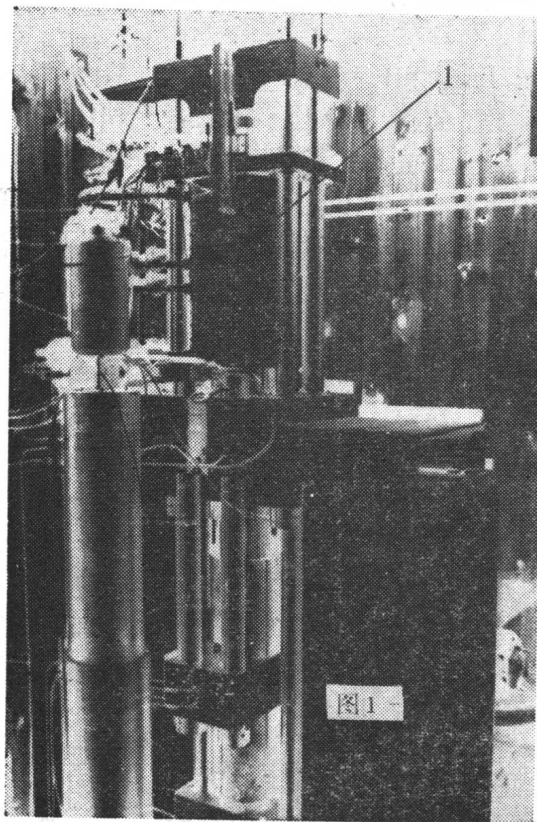
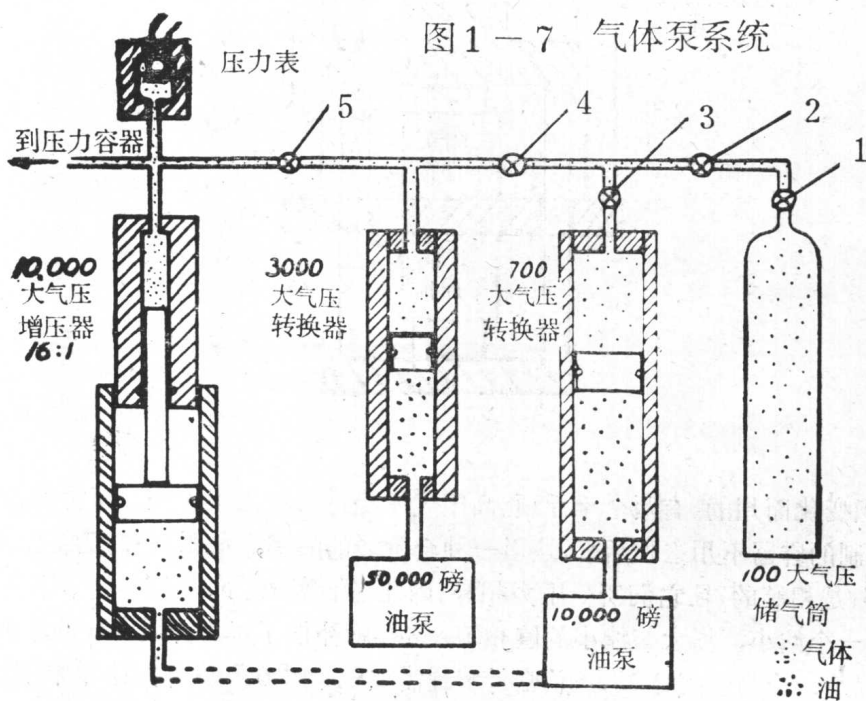


图 1—6

图 1—7 气体泵系统

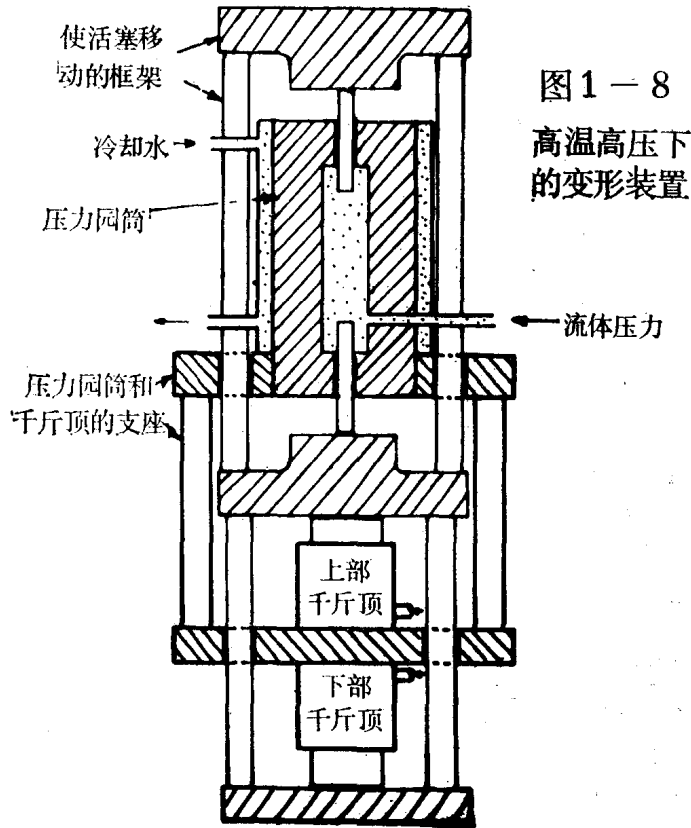


这些设备、仪器放在墙的一侧。墙面上贴有薄木板，是防护用的。当容器破裂时，碎片不会伤人。控制系统及测量设备在墙外边，电线通过墙引入。人在墙外边操作。

控制系统有：压力控制、温度控制、应变速率控制等装置。有两个记录装置：一是记录温度、压力的，另一个是记录载荷和位移的。

关于高温实验，有两种类型的高温蠕变实验装置，一种是固体围压介质，一种是气体介质的。固体介质的，如Griggs设计的，主要是用滑石、氯化钠、玻璃等软的物质做介质，它们比岩石强度低得多。这种情况可以看作是静水压。优点是结构简单、可靠，使用时间长。缺点是：①它的温度在标本中是不均匀的，温度梯度大。②高温下标本变软了，它们的强度与标本介质相比就相差不多了。测量误差将增大，不能忽略了。这些缺点可以用气体介质来克服。

气体介质设备困难在密封方面。优点是温度比较均匀，测量压力比较容易。图1—8是气体介质装置图。变形在压力腔中进行，有两个活塞，一个是为标本变形用的，另一个是为补



偿容器中容积变化而用的。有两个千斤顶。高压气体经过泵进入压力腔。压力容器周围有冷却装置。我们新制的容器不用这种活塞，是用一种台阶形的活塞，如图1—9。活塞上部面积 S 与下部环行面积 S_1 是相等的，且它们所受压力相等。因此当活塞上、下移动时，上、下两个腔体的容积一个增大，一个缩小，增大与缩小的值相等。这样就补偿了压力介质在实验中的体积变化。缺点是还需另加一个高压气体压力源。密封装置需要三个“O”形环，比原来增加了一个。

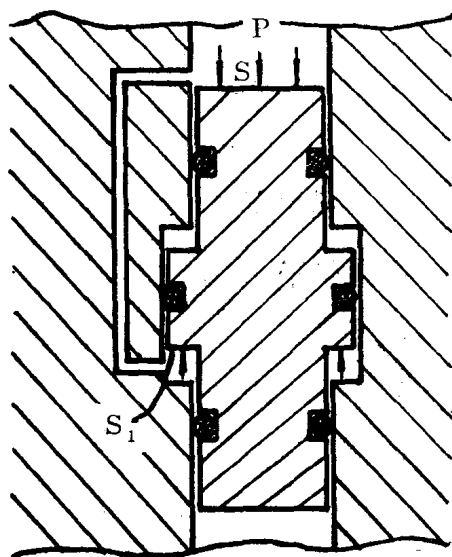


图1—9

图1—5是高温围压容器装置。上活塞是对标本加压的，下活塞通过一个砧子固定在容器上。最下部是补偿活塞，它与轴向载荷无关。现在用的砧子是薄壁的，外边贴应变片，测载荷用。这种压力计放在容器里边，防止了活塞摩擦的影响，测量比较准确。这在高温蠕变下是很重要的，因这时岩石流动应力很小，比活塞摩擦力还小，若在外边测就不准了。对 10^{mm} 的标本，应力灵敏度可测到几个巴。

另一个重要部分是炉子。炉子在容器内部有两个优点：①标本热，但容器比较冷。②炉子加热时间短。若外部加热，时间就很长了。炉子电路是通过容器密封部分的。压力传感器导线输出也是通过另一端的密封部分。测温是通过活塞中心孔放入热电偶通到标本来测。

图1—10 是炉子结构。（这不是最新的设计）。最外边是钢套。炉子分三部分：①加热线圈。②炉膛（图中A），为陶瓷材料做的。外面有螺旋形槽，槽中放置线圈。线圈分上、下两部分。炉子设计比较困难的地方是防止气体对流，热气往上走。高压下气体密度是水的十分之一。气体热容量很大，所以对流对温度影响也是很大的。在设计时，考虑对流比热传导更重要。为解决这问题，将炉子分成两部分，下面的线圈给出更高的功率，使标本周围温度较均匀。为了减少对流，炉子内径在两端小些，使其与活塞的间隙减少，这间隙越小，对流越少。③绝热部分：原来用几种同心圆的瓷管，现在用一种多孔的瓷管。这方面有几种材料可用。

密封用“0”形环，用在活塞和容器间。如图1—11所示。其中1是钢套筒，2是三角形截面的铜环，它的作用是防止“0”形环挤入。容器受内压后，内径会胀大。容器与套筒之间的间隙增大，但这里是静密封，问题不大。这时活塞和套筒之间的间隙不受影响，容器受压前后保持常数，这里的密封是动密封。这种结构比单用“0”形环更可靠。“0”形环在 $3\sim 5\text{kb}$ 时比较可靠，它吸收油后会胀大。

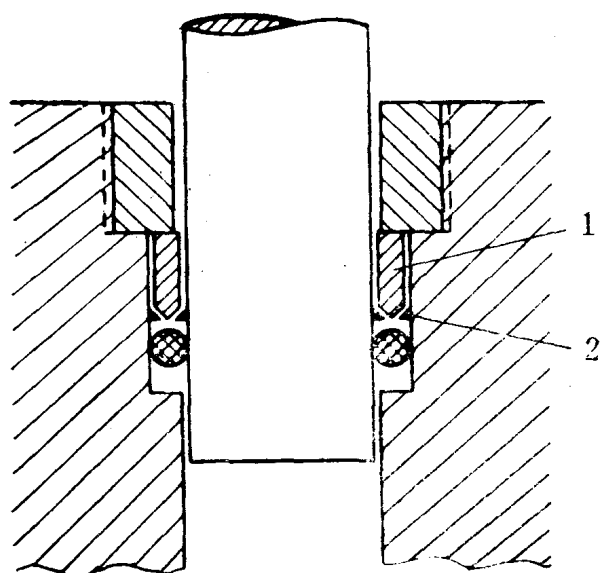
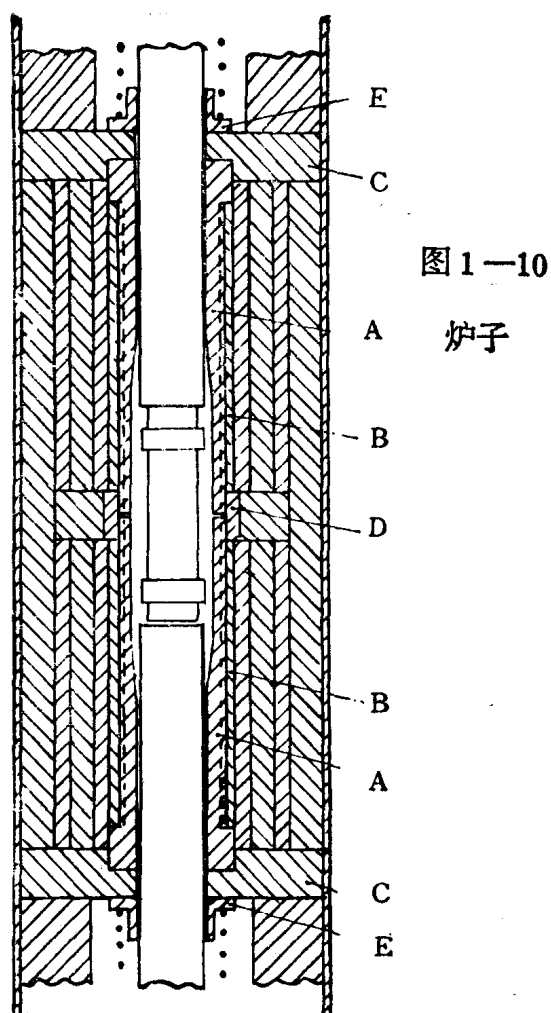
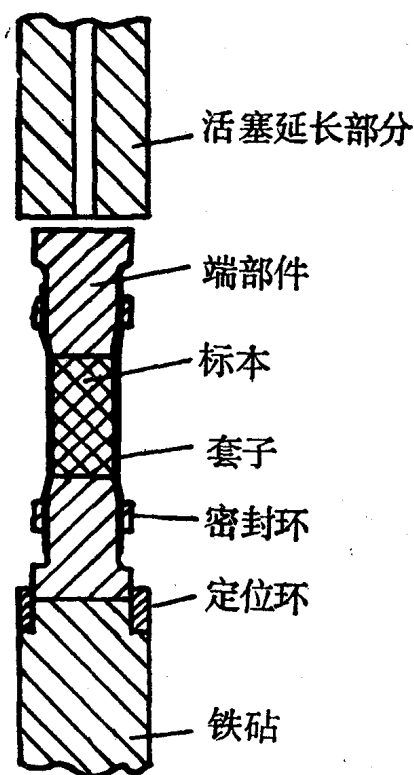


图 1-11 容器的密封装置

标本装置：图1—12所示的是最经常用的标本装置。容器上边有个主活塞，它的延长部分是个耐高温的小活塞，它们之间有个连接部分（图中未画出）。标本上、下各垫一个耐高温的垫块，垫块用耐高温的碳化钨或碳化钛（能耐800℃）来做，更高的温度用镍合金和钼合金。标本用一个很薄的铜套包起来，两端用密封的金属环卡紧到垫块上。卡紧环要有一定强度，环与活塞用同一种材料，使它们的热胀系数相同。温度再高就有好几个问题：① 标本外套可能会焊上。② 活塞上的孔高温下材料变软会缩小（此孔放热电偶用的）。所以温度高于1000℃时，用氧化铝管做套子，但它抗张强度小，密封困难。可加予紧力来



1 CM

图 1-12
标本装置

解决。这方法也很不可靠，又采取下述方法，见图 1—13 右。

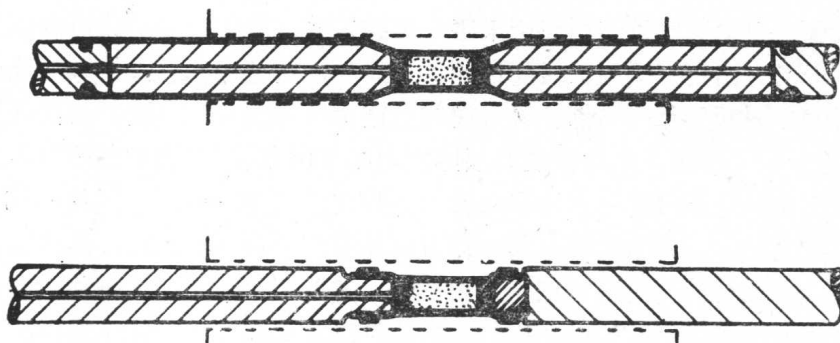


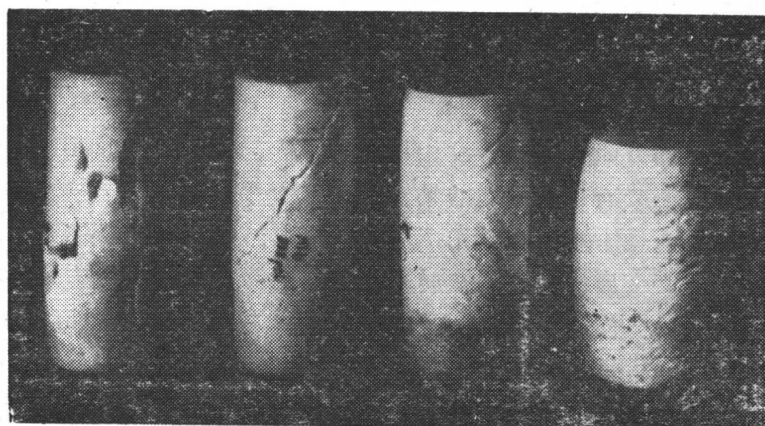
图 1—13

虚线表示炉子范围。套子做得长些，伸到炉子外边，很容易用“O”形环密封。套子不是直筒的，两端大些。炉子要很有效，中间温度高，出去温度很快降低。标定温度梯度后，来决定线圈上、下的比例、功率如何调配。在 1000°C 下温度梯度不大于 10°C 。更精确地调整后，还可以更小些。最高做到 1400°C 。一般岩石实验做到 1300°C 。

宋瑞卿整理

脆性—延性过渡

今天讲脆性岩石变形和脆性—延性过渡。报告开始前，首先让我们回顾一下有关脆性岩石



a b 图 2—1 c d

的破裂。岩石的破坏形式与围压有关。围压较低时（常压），受压力作用的大理岩标本将产生纵向破裂（图 2—1a）；围压较高时（35—350 巴），则产生单向剪切破坏或共轭剪切系（图 2—1b和c）；当围压更高时（1,000 巴）则产生均匀的延性变形（图 2—1d）。下面将主要讨论剪切破裂，并说明脆性—延性过渡。

关于微破裂扩展

过去有很多人曾试图根据格里菲斯理论来研究裂纹扩展,但结果却迁到很多困难。实验证明,格氏理论对于张力作用下裂纹扩展的预测是正确的,这是因为裂纹扩展形成的破裂面与裂纹在同一平面内,同时裂纹的局部扩展方向与总应力场方向基本一致。格氏理论说明了临界破裂条件,但对于压力作用下裂纹扩展的预测则出现了困难。椭圆裂纹在压力作用下的分析表明,在偏离椭圆长轴端点附近一点上存在着局部张应力(图2—2),因此,椭圆裂纹在压力作用下将首先在这一点上开始扩展,其破裂方向并不与长轴方向相同,而是逐渐偏离长轴趋近于纵向发展。张裂纹扩展一定长度后达到稳定。随着压力水平逐步增加,在适当方向上分布的裂纹也将相继出现类似的扩展和稳定。由此可以看出在压力作用下裂纹扩展的方向并不与裂纹长轴方向一致,这与格氏理论不符;其次,格氏理论只是解释了裂纹扩展的初始条件,它并没有涉及扩展后的发展过程。受压岩石的最终破裂实际上并不仅是由一条裂纹的

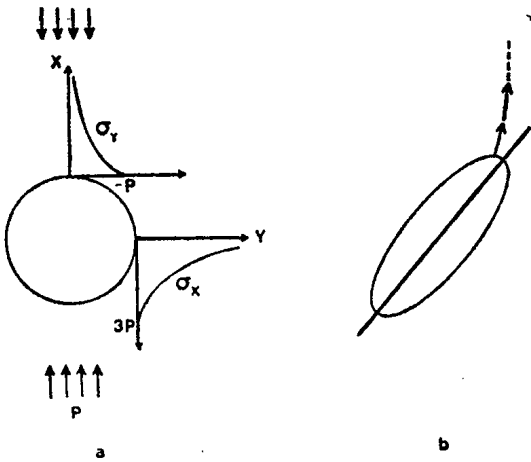


图 2—2

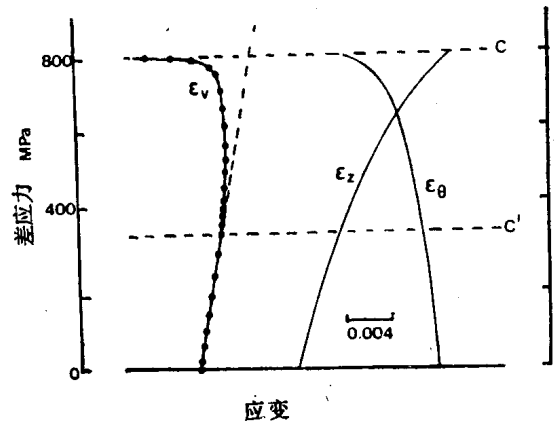


图 2—3

扩展所引起,而是由不同方向的扩展裂纹相互联通所致。关于裂纹发展过程的研究已经发表了很多文章,下面介绍一些有关的研究结果。

根据经典理论,岩石受压力作用后先产生弹性变形,然后发生破坏。下面就来考查一下花岗岩试件在主破裂前其变形、破裂的发展过程(图2—3)。纵坐标表示差应力,横坐标表示应变,围压为1千巴, ϵ_v 表示体积应变, ϵ_z 表示轴向应变, ϵ_θ 表示径向应变, ϵ_v 可以根据 ϵ_z 和 ϵ_θ 计算得到。图中 ϵ_z 并非理想直线,即岩石为非弹性体 ϵ_v 在开始阶段随应变增加逐渐减小,它表示弹性变形阶段;当应力差进一步发展到 C' 水平时(C' 表示开始扩容应力), ϵ_v 标开始偏离弹性直线并变小,表示扩容开始;也可以把呈弹性变化的直线与 ϵ_v 曲线的偏离角称为扩容。对其它类型的岩石也作过扩容研究。大量研究表明,扩容应力为峰值应力 $1/2-2/3$ 。图2—4a(见下页)为石英岩的体积应变;图2—4b为苏长岩的体积应变,其开始扩容时的应力亦为峰值应力的 $1/2-2/3$ 。以上资料说明主破裂前微破裂获得了进一步发展。

与微破裂有关的另一资料为声发射(图2—5见下页),声发射反映了裂纹扩展过程。当应力达到最终破裂应力一半时,声发射开始出现,裂纹开始扩展;到临近最终破裂时,声发射

急剧增加，即微破裂数量和裂纹扩展长度急剧增加。

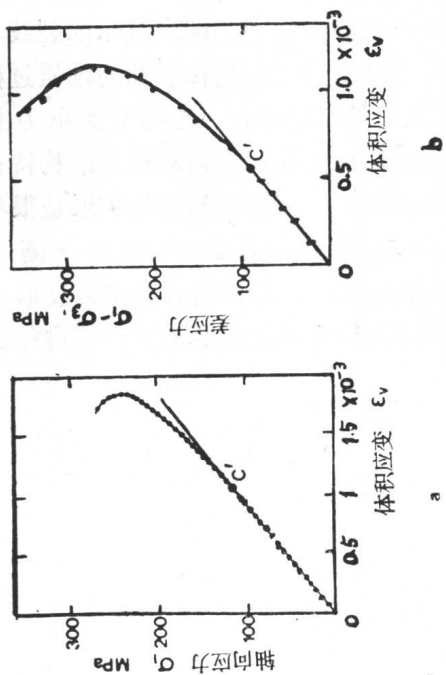


图 2—4

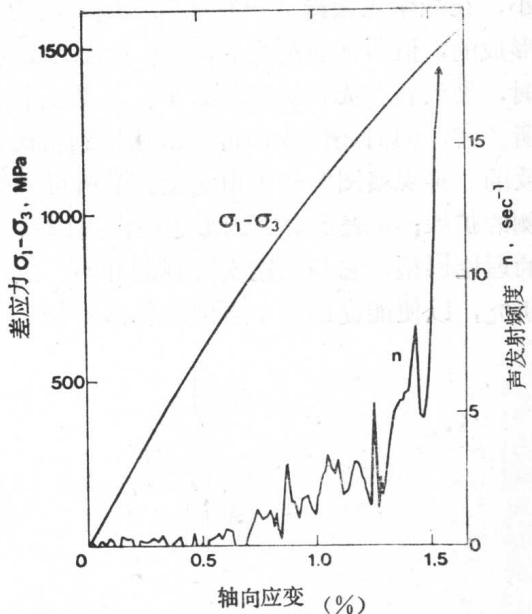


图 2—5

第三个资料是波速变化与体积变化关系。图2—6为花岗岩实验观测结果。由图可见，在弹性变形阶段波速变化不显著；当扩容开始时剪切波速度发生了显著变化， V_{S31} 和 V_{S32} 表示两个偏振方向的变化。根据 V_{S31} 和 V_{S32} 的变化差异可以进一步了解微破裂的空间分布特征。图中的差异变化说明微裂纹方向接近于轴向分布。

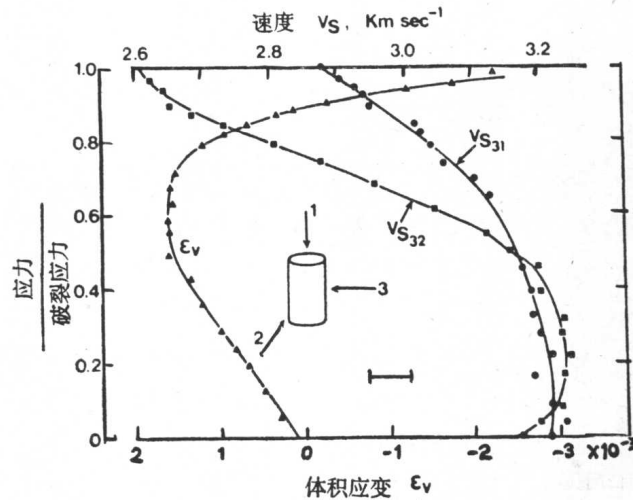


图 2—6

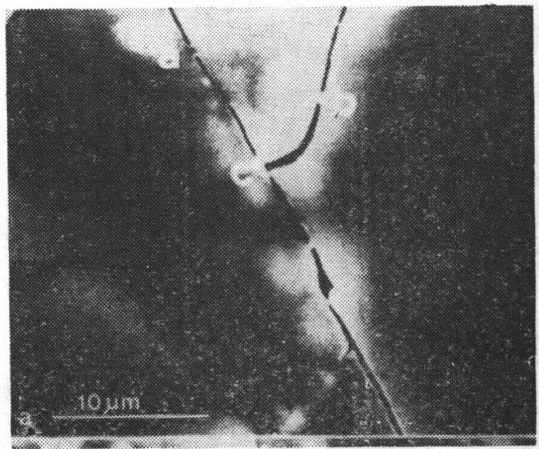


图 2—7

另外，饱和水岩石在受压条件下电阻率和渗透率的变化也反映了微破裂扩展与空间分布

特征。

岩石样品的微观结构也提出了最终破裂前出现扩容的证据。电子显微镜已用于微破裂扩展过程的研究，图2—7即为利用电镜对实验前的花岗岩进行观察的例子。图中显示的裂纹非常小，在光学显微镜下一般难以发现。这些位于矿物颗粒边界上的裂纹是在长期的地质过程中形成的，值得注意的是在a、b、c处生成的石英使裂纹得到了局部愈合，当标本受外力作用时，裂纹将首先在愈合处扩展。这些实验观察不仅提醒我们在实验前必须对样品结构特征有所了解，同时还使我们再一次认识到格氏理论所预示的裂纹扩展与实际的裂纹扩展是很不一致的。再观察图2—8中由电镜扫描所得到的裂纹分布。a表示裂纹沿着愈合裂纹的一侧或两侧的扩展，b表示由黑云母边缘向周围石英矿物中发展的裂纹，c是目前有关张裂纹形成的理论模型，它与上述实际观测并不一致，因此，有关微裂纹发展过程的工作尚须进行更多研究，以便能提出一个合理的物理模型。

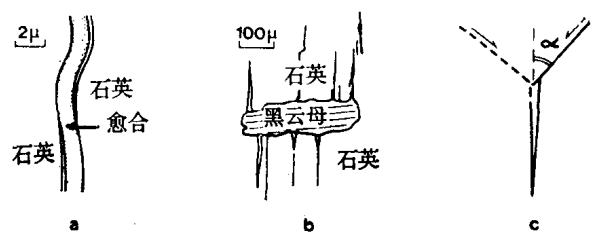


图 2—8

归纳以上结果，我们可以将上述各类观测根据岩石试件在压缩条件下的应力—应变曲线特征划分为四个阶段（图2—9）。这一划分标准也是因人而异的。在第I阶段内，声发射频率和渗透率下降，体积压缩，波速和电阻率增加，表示标本内部孔隙和裂纹压实。这一阶段

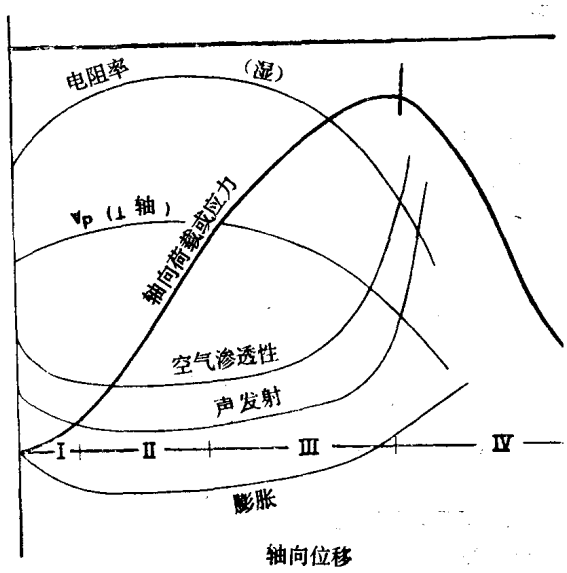


图 2—9

主要出现在大气压和低围压下，但在高围压下孔隙已被压实，这一阶段表现不够明显。第II

阶段相当于弹性变形阶段，体积，波速，电阻率，声发射频度和渗透性变化不大。在第Ⅲ阶段内微裂纹开始扩展，体积开始膨胀，声发射和渗透性显著上升，波速和电阻率下降，随着应力增长，这些效应也将很快增大，并且还将继续到峰值应力以后第Ⅳ阶段。峰值应力的真正含义是什么？实际上，宏观的最终剪切破坏不一定必须发生在峰值应力时，而是发生在峰值应力后。峰值应力本身可以认为是由于下述两种效应的平衡出现而引起；第一个效应是为了使微破裂继续活动需要消耗更多的应力，因为产生新裂纹要求有更高的应力；另一个效应是由于微裂纹不断发生，增加了微裂纹密度，使样品破裂，扩展，最终使岩石样品强度变弱，峰值应力意味着因裂纹扩展而消耗的应力与样品内部因裂纹扩展而降低的强度达到平衡，或作用于标本的净应力与标本的剩余强度相等。峰值应力也可用微裂纹的稳定化来解释，随着应力增加，微裂纹均匀发展，应力进一步增加微裂纹数量也相应增加，微裂纹的空间分布是随机的，当应力临近和达到峰值应力时，微裂纹将主要集中于最终剪切破裂面的有限范围内扩展或联通，而剪切破裂带外的微裂纹则趋于稳定。最终破裂面是一个复杂的发展过程，其发展细节也是随不同岩石类型而变化的，这也需要从微观着手进行研究。

脆性—延性过渡

下面在考虑岩石的延性变形。所谓延性变形是从宏观意义而言的，即岩石在受力变形中没有出现宏观破坏（failure）的变形，它不涉及变形机制。下面将根据实验资料介绍脆性—延性过渡的一些主要特征。

图2—10为大理岩在不同围压下采用（按 Rummel博士）伺服控制加载系统得到的实

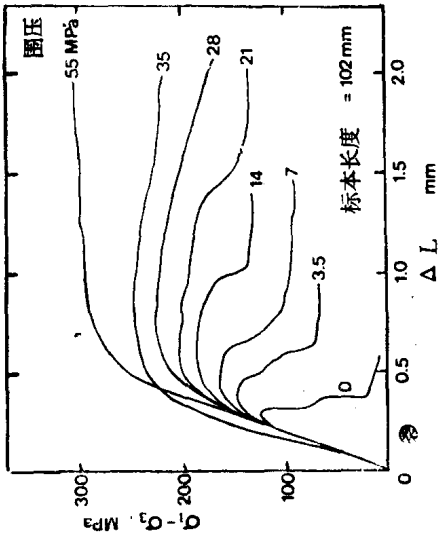


图 2—10

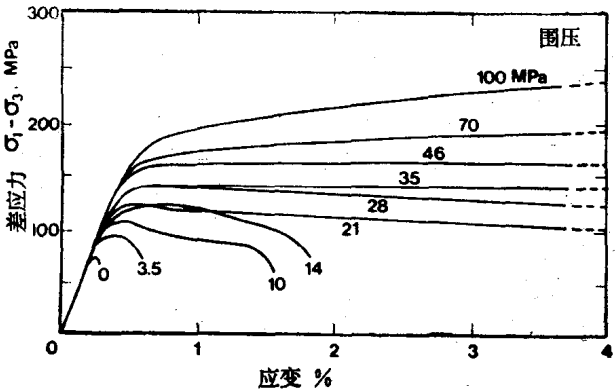


图 2—11

验结果。

纵坐标为差应力，横坐标为位移。在围压为零时，应力—应变曲线达到峰值应力后迅速下降，随着围压增加，达到峰值时的应变量也相应增加；在高围压下，当达到峰值应力前标本已经历了微破裂发展过程，在峰值应力后，曲线则变得非常平缓，当围压达35MPa时大理岩

开始出现延性变形。图 2—11 是几年前由实验得到的曲线，由于当时没有采用伺服控制压机加载，所以峰值后曲线的意义不大。当围压增大时，曲线有类似变化。在前述的图 2—1a 的破裂系在围压为零时的破裂；图 2--1b 为低围压下的剪切破裂；图 2—1c 为较高围压下的共轭剪切破裂。出现共轭剪切破裂与标本端部变形受到金属压头的束缚有关，岩端部采用球形垫座，即可发生如图 2—1b 中的单向剪切破裂。标本中间部分显示出膨胀，这说明标本内部也出现了破坏。在更高围压下，标本变成鼓形，但没有微破裂出现。标本形状的变化就是延性的具体表现。

图 2—12 为灰岩实验结果。碳酸岩很容易在室温下达到脆性—延性过渡。而硅酸岩达到

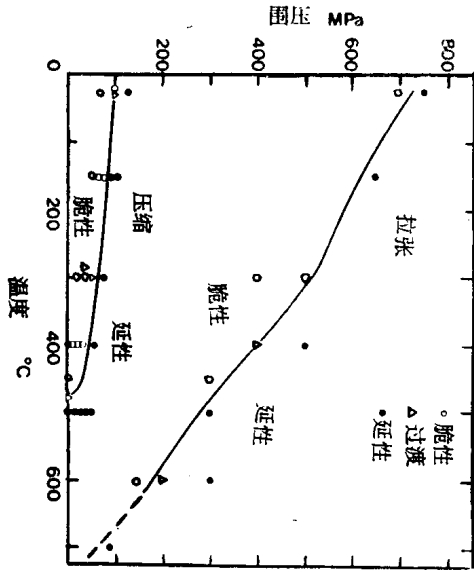


图 2—12

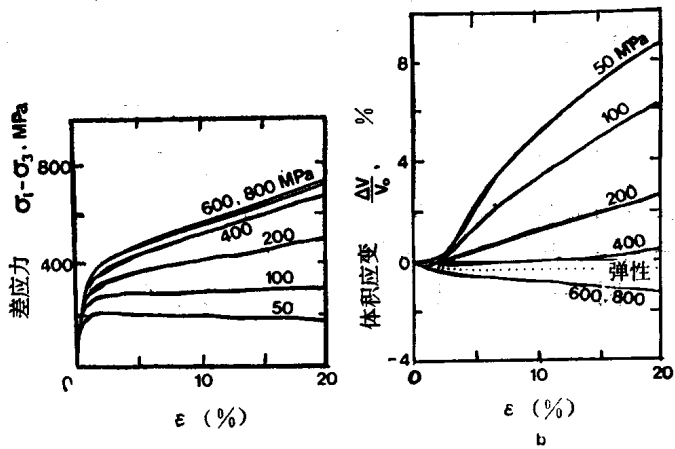


图 2—13

过渡时则需要较高围压，除非提高温度。图中下面一支曲线表示在压缩条件下的过渡线；在拉伸条件下，图中上面一条线其脆性—延性过渡线所对应的围压和温度显著提高。

下面再介绍一个大理岩脆性—延性过渡和扩容有关的实验。图中为差应力—应变和体积变化与应变的关系。大理岩在围压 0.5kb 时即出现了脆性—延性过渡，也出现了微破裂（图 a）。在围压为 0.5kb 的过渡中当应变达 20% 时，其体积应变可达 8% 以上；围压为 1kb 时，标本变成鼓形，虽然这也显示了延性，但当应变达到 20% 时，也仍然出现了扩容（图 b）。由此可以看出，微破裂不仅存在于前述的脆性变形中，同时也存在于延性变形中，所以，微破裂是变形过程中一个极为重要的问题。围压继续增加，扩容将减小。亦即微破裂减小。当围压达到 6 到 8kb 时，标本进一步受到压缩，即内部孔隙受到进一部压实。上述变化还表明压力敏感性也将随围压增加而降低，这一现象与晶体内部产生塑性变形的情况极为相似。

变形机制

下面再介绍氧化镁屈服应力与温度的关系（2—14）。由图可以看出，围压不同，其屈服应力亦不同。随着温度升高，围压对屈服应力的影响逐渐减小；还可以预料，在交会点

处扩容将会随温度升高而消失。这样，由脆性进入延性后的变形就将有两种机制：一是低温低压下的碎裂流动；另一则是高温下晶体内部的塑性变性。

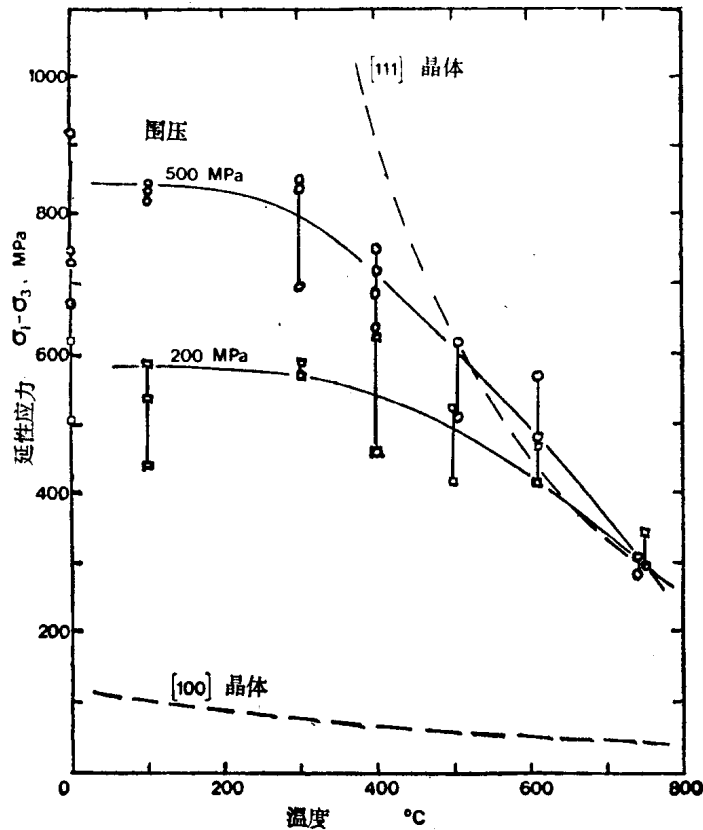


图 2—14

试设想多晶体氧化镁在高温高压下晶粒内部产生的塑性变形是通过晶粒内部的滑移实现的。一颗晶粒只有一组滑移面，而且各晶粒间的滑移面又都各不相同，于是对晶粒边界提出了不同的要求，从而产生了扩容，即出现边界上的应变的不相容，为了不产生扩容，这就要求在晶粒变形时使边界相容，即要求均匀变形，也就是各晶粒的变形与宏观变形一致，根据冯·米赛斯理论只要有五个独立滑动系统就可以使晶粒间协调变形而不产生扩容现象。关于五个独立滑动系统——即五个独立变量间相互关系的数学推导比较复杂，这里不予介绍。氧化镁晶体与氯化钠晶体相同，其滑动面为 $[100]$ ，滑动方向为 $\langle 110 \rangle$ 。在氧化镁的六个滑动面中实际上只有两个独立滑动面，这两个独立滑动面的变形就可代替其它滑动体系的滑动组合，图 2—14 中下面一条虚线表示氧化镁单晶在很低压下沿 $[100]$ 加压时屈服应力随温度的变化。由于多晶体不象氧化镁那样只有两个滑动面，而为了符合冯米赛斯变形条件就得需要更多滑动面与更高应力。在低温时，由于沿 $[100]$ 加压产生滑动的屈服应力低，而沿 $[111]$ 加压产生滑动的屈服应力高，于是就出现了以微破裂形式代替在高应力水平下沿 $[111]$ 而加压产生滑动的过程。由于这时产生了微破裂，因而也增加了应力敏感性。但在高温下，沿 $[111]$ 加压产生滑动的屈服应力则显著降低。多晶体也是由两组滑动面产生滑动，但就不再产生微破裂。这样，由于温度增加产生了由碎裂流动变为晶内

滑动的机制，从而说明了压力敏感性的下降，于是，脆性—延性过渡也就包括了微破裂碎裂流动和晶内塑性变形两种机制。我们在考虑两种情况，一是纯塑性流动（图2—15a）。一是完全的碎裂流动（图2—15b）。塑性流动系指晶粒内部的剪切滑动，其破裂应力随围压增

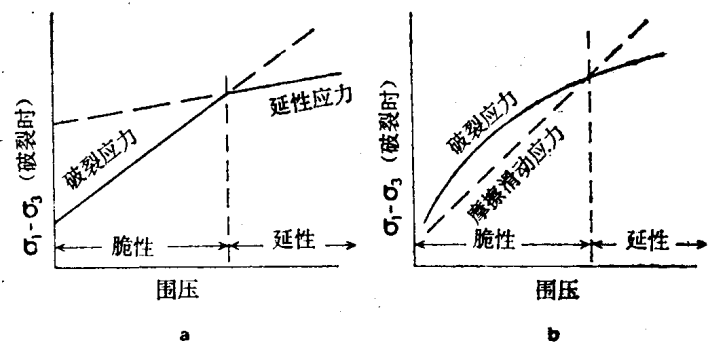


图 2—15

加而增大，而在金属中其屈服应力与围压关系不大，它的过渡不象图中那样绝然相交，即在变形中由脆性向延性过渡时，不仅有微破裂，而且有晶粒内部的塑性滑动；随着温度升高，塑性流动将变得更为明显。在碎裂流动中，破裂应力和摩擦阻力均随围压增加而增大，当摩擦阻力达到一定数值时，滑动停止，从而产生微破裂，以实现其脆性—延性过渡。在更高围压下，微破裂不是沿一个带分布，而是均匀分布。当这种微破裂发展到极点时，即可以近似地把变形体视为砂粒样的颗粒物质时，它的变形就将通过颗粒间的相互错动来实现；从宏观来讲，这种过渡变形就是碎裂流动。还有一种变形机制就是高温下的扩散，它将在蠕变部分予以讨论。

李建国 整理 马瑾 校

碳酸盐的变形机制

(M·S 佩特森讲 1980.9.18)

方介石的变形过程原则上与其他岩石是一样的。我们要讲的脆性变形到柔性变形的过渡，不涉及碎裂流动。蠕变实验中我们使用应变随时间变化的曲线。我们常常把它们分为二个阶段，一个为瞬时阶段，应变率随时间逐渐降底，一个是稳态阶段。一般还有第三个阶段，即应变率随时间而增加的阶段，但今天不准备讲。蠕变阶段的应变率常常表示为应力和时间的函数

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma, t)$$

低温时也可表示为与时间的对数成正比

$$\dot{\epsilon} \propto \log t$$

高温时应变率则与 $t^{1/3}$ 成正比

$$\dot{\epsilon} \propto t^{1/3}$$