

# 岩石变形显微构造形成机制及矿物 中常见的变形显微构造特征<sup>\*</sup>

付保国,侯青亚

(山西冶金第三地质勘查局 314 队,山西 临汾 041000)

**摘 要:**岩石受到应力的作用就会发生位移和变形,岩石变形是一种重要的构造现象,是构造地质学研究的主要内容;近十多年来,由于冶金物理学和材料科学的极大发展,将位错理论和交电压透射电子显微镜技术引进到了变形岩石显微构造研究领域中来,使得构造地质工作者将宏观和微观进行了很好地结合,对构造地质学的研究大大地深入了一步,并初步发展成为一门系统的科学——显微构造岩石学。

**关键词:**岩石;矿物;变形显微构造;形成机制;特征

**中图分类号:**P583 **文献标识码:**A

## 1 岩石变形显微构造形成机制

### 1.1 应力作用下岩石的力学行为

当岩石表面受到的作用力较小,且作用时间短时,岩石变形不明显;而当作用力较大且作用时间较长时,岩石就会发生永久变形,当作用力超过岩石的破碎强度时,就会发生以断裂作用为主的变形。岩石在应力作用下,所表现的力学行为主要有以下 3 种:弹性、非弹性(包括脆性、韧性和塑性)和蠕变。影响岩石力学性质及变形行为的因素主要有:外界物理环境的影响,主要包括气压、温度、外施应力加力条件(加载的快慢、加载力的方位和中间主应力加载方式等),反复的加载会引起表面的疲劳而导致强度的下降。岩石本身因素的影响,主要包括岩石的成分、结构、构造,岩石的孔隙度和含水量,岩石中先存的面状构造。

因此,岩石变形往往是多重因素互相制约、互相影响的,其多种因素的联合效应相当复杂。在研究宏观变形的同时,详细研究其微观变形机制就显得更为重要,而且更有意义。

### 1.2 岩石的变形机制

岩石在应力作用下的主要变形方式是脆性变形与韧性变形,但对于构造岩石学来说,由于脆性变形和韧性变形并不是截然分开的,尤其是在脆韧性过渡阶段,脆性变形的机制仍在一定程度上起重要作用。所以,从以下 3 个方面对岩石的变形机制加以阐述。

#### 1.2.1 岩石脆性变形的机制

显微脆性变形主要是显微破裂的产生和扩展及有关的破碎作用。首先在应力的作用下,岩石内由于穿晶张裂隙的开放而出现显微破裂,随着应力的增加,显微破裂的程度不断加大。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2003-01

作者简介:付保国(1956-),男,地质工程师,长期从事地质普查找矿。

由于显微破裂分布不均匀、局部的集中,便产生了宏观破裂。

Paterson(1982)把脆性范围内岩石在压缩下宏观破裂发生前应力-应变状态划分为4个阶段:第一阶段,应力-应变曲线下弯,表示样品内部孔隙和裂纹压实,宏观效应属非强性;第二阶段,主要涉及晶粒和孔隙的强性变形,此时可能有很小的微变破裂产生;第三阶段,曲线明显地偏离了完全弹性,此时微破裂开始扩张;第四阶段,从微破裂明显的局部化开始为起点,一直到宏观破裂(轴向张裂或剪切型破裂)。

### 1.2.2 岩石塑性变形的机制

由于岩石本身的性质及变形条件的不同,会有不同的机制起作用,有时是一种机制起作用,有时是几种机制联合起作用。

1.2.2.1 固态塑性变形 产生的原因主要有:由发生在岩石或晶体碎块间的相对运动即形成的碎裂蠕变。由晶粒间的相对运动所形成的超塑性蠕变。由晶内滑移所导致的狭义的塑性蠕变。由晶格中的原子、分子或空缺的位移所造成的扩散蠕变。

1.2.2.2 碎裂蠕变作用 表现为韧性断裂,常见于地壳的浅部。晶体缺陷通常包括3类:点缺陷主要包括间隙原子和原子空位。线缺陷出现在晶体晶格和外部不连续的区域,并异常导致了塑性滑移。面缺陷包括位错壁、双晶面以及一些诸如两个同相晶体间的晶界或两个位向不同的晶体之间的接触面。位错壁是借助于滑移和攀移作用,分散在晶格之中的位错按一定规律构型作线状排列的一种方式。

高温蠕变就是由于离子、原子或某种缺陷(点缺陷、杂质、空位、线缺陷、位错)的扩散和运动而引起的岩石变形。在较低温度范围内,晶粒边界扩散超过晶格扩散而占优势,在温度上升时,晶格扩散速度加快,两种扩散都起着重要作用。

1.2.2.3 塑性变形的机制和过程 主要表现为:

低温变形机制(指温度小于 $1/3$ 熔点)。主要为滑移、双晶、膝折和解理几类。

高温塑性变形机制。在高温时,扩散作用非常强烈,出现了新的变形机制,如位错攀移、体扩散和表面扩散,扩大了晶内运动的范围,开始了强度更高的均匀岩石的变形。硬化使得位错在变形过程中越过那些阻挡它们前进的障碍(如颗粒边界、杂质、其他位错)使变形继续进行,恢复则可以清除晶格中的位错、堵塞,最后形成亚颗粒。位错蠕变:其机制为位错的滑移和攀移。扩散蠕变:主要是指结晶物质内部的某一部分,如离子、原子或某种缺陷(点缺陷、杂质、空位、线缺陷、位错)的扩散和运动而引起的变形,它是高温蠕变的重要机制。根据控制蠕变的因素不同,又可分为以下几类:当空位通过两个晶粒边界之间的区域扩散时,为晶粒边界控制的扩散式Coble蠕变;当扩散沿着晶粒边界发生时,为晶格控制的蠕变式Nabarro-Herring蠕变;当空位在攀移位错之间扩散和转移时,为位错蠕变式Weertman蠕变。

重结晶作用。如果重结晶和变形同时发生就叫做同构造或动态重结晶作用,如果重结晶发生在变形之后,则称之为后构造或静态重结晶作用。重结晶所需要的能量主要来源于位错所产生的弹性应变能,晶体内部的位错消失重结晶作用也就停止。另一个来源为晶体的表面能,二次重结晶则是晶体表面能降低的结果。

重结晶作用包括成核过程和新晶的生长过程。变形的大多晶体中,应变一般是不均匀的,那么由于储于晶体内的塑性应变能的不同而引起自由焓差,从而产生一种驱动力,在此力的驱动下,应变晶粒边界的隆凸和粒内亚晶粒的旋转两种机制形成重结晶晶粒的核,并在此基础上生长成为新晶粒而取代老的应变晶粒,结果产生一种特有的变形岩石显微构造。重结晶程度的强弱(即新晶核与残留应变晶粒之比率)与应变大小有密切关系。而重结晶晶粒的粒度则主

要取决于变形时的差异应力,因此是一种很有用的地质应力计。

**压溶作用。**在变形过程中,当有流体(主要是  $H_2O$  和  $CO_2$ ) 存在时,岩石中处于高应力部位的可溶性物质(如石英、方解石)被溶解,通过间隙流体扩散穿过晶粒边界薄膜,转移到应力低的晶粒边界重新沉淀下来,这一过程可以归纳为压溶、溶移、再沉淀 3 个部分。

溶解可以发生在可溶性矿物晶粒处于高应力的两边,经过溶移而在此晶粒处于低应力的另一边沉淀下来,这种再沉淀的过程就是在原有晶粒基础上的次生加大现象。这一作用的结果改变了晶粒的形态,而形成椭圆形,并且长轴具有定向排列形式,在次生边缘清晰可见时,便成为一种压力影构造。另外,随着压溶的不断执行,可溶性物质不断分异富集,形成局部集中的条带(赵中岩,1985)。压溶是岩石变形,特别是在浅部地壳层次的岩石变形的重要机制。

### 1.3 脆性和韧性变形间的转化

典型的脆性变形与韧性变形宏观特征的区别是明显的,变形机制也是不同的,前者主要是微破裂作用,后者主要是晶内滑移和蠕变等一些过程。但是这两者之间的差别并非是截然的,有些变形岩石宏观上既表现出脆性特征,同时又表现出韧性特征。从微观上讲,两种变形行为的中心问题是变形局部化还是均匀化。

脆性变形时,微破裂在局部强烈集中,造成局部的应力很大,以至由于内聚力破坏而发育明显的不连续面。韧性变形时,则是在整个变形体内应变是以逐渐变化的方式进行的,变形趋于均匀化、稳定化。这样,在脆性与韧性之间存在着一定范围的过渡状态。因此,脆-韧性转变通常包括塑性流动机制与碎裂流动机制的某些混合状态。

## 2 矿物中常见的变形显微构造特征

### 2.1 显微破裂

显微破裂是指出现在岩石单个颗粒式晶体上的破裂,它们可能穿过颗粒的接触界面,也可能不穿过,通常有剪切破裂和张裂两种。前者裂纹一般比较平直、紧闭,充填物较少,原来完整的砾石,矿物颗粒多被裂纹切断,并有位移,形成碎斑和碎粉;后者裂纹附近的砾石的矿物颗粒则多被拉开,所以裂纹常呈锯齿状,具开放性,且往往被岩脉所充填。有时也有一些复合形式,如张剪破裂和压剪破裂,则表现出两种力学性质的特征。

### 2.2 变形矿物的光性异常

变形矿物的光性异常是指矿物在变形之后晶体格架发生了畸变或者变形作用引起了矿物晶体光率体的应变。常见的主要有以下几种: 不均匀消光(或波状消光),它是由晶体在某个滑移系上不均匀滑移而导致晶格弯曲所生成的。光性变异,伴随着矿物强烈的不均匀消光而引起的矿物晶体光率体的变形。X射线性质的变异,也就是变形矿物有时还表现出X射线衍射性质的变化,它是变形矿物中亚晶粒矿物形成的结果。

### 2.3 双晶纹

双晶纹在碳酸盐矿物(方解石、白云石)中最常见的变形现象,它是矿物内部晶格双晶滑移(矿物晶体塑性变形)的结果,它与原生(生长)双晶纹有明显的区别。见表1。

### 2.4 砂钟构造

砂钟构造是在压力的作用下,晶体中产生一组“X”型的剪切破裂面,并伴有一定的旋转,结果造成了破裂的4个部分,其中相对的两个部分与另外两个部分消光位有所不同,即不同时消光,所以表现出类似砂钟形状的构造特征。

表 1 生长双晶与机械双晶的区别

生长双晶(原生双晶)	机械双晶(次生双晶)
双晶纹一般较均匀地分布于整个晶粒中。	分布局部化,在应变大的部位(如破裂附近或晶粒边缘)双晶纹很发育,而在未应变或应变变弱的部位,双晶纹不发育或很少。
双晶作用是简单的,双晶纹较稀少。	双晶作用是复合的,双晶纹密度较高。
单一双晶纹。	一条双晶纹往往由多条更细的双晶纹组成。
在一个晶粒范围内,不同条纹的厚度差异较大。	在一个晶粒范围内,各条纹的厚度基本上是一致的。
双晶纹通常较宽而粗大,宽度急剧改变,且呈阶梯状,各双晶纹的变厚变薄相互之间无关系。	双晶纹通常是细或非常细的,并且是逐渐地、规律地在同一方向上一致地改变其厚变。
单个双晶纹相互独立地尖灭,并且与原来的弯曲或破裂无关。	双晶纹有规律地尖灭,在明显的弯曲部分呈楔状,厚度的变化横过破裂的发生,最终的双晶纹具有一种特征的“火焰状”。
一般只有一个世代的双晶纹。	可以出现多个世代的双晶纹,从它们的切穿关系常可以判断各期的早晚。

### 3 晶体缺陷和位错

#### 3.1 晶体缺陷

晶体缺陷是指晶格结点上的质子(原子、离子或某种基团)的周期性排列或多或少会在某些地方遭到破坏。晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷 3 种。点缺陷是指晶格内某一结点上原子排列的周期性的破坏或中断,进一步可分为空位型和杂质型。线缺陷是指晶体格架内结点原子排列的周期性破坏成为一条线的情况,它的主要类型是位错。面缺陷是指晶体格架结点原子排列的周期性中断形成一个面的一种情况,如晶体颗粒的边界和亚晶粒边界都是面缺陷的典型,另外还有位错壁和双晶面也属面缺陷。

#### 3.2 位错

位错是一种线缺陷。位错线不一定是直线,可以是曲线或其他不规则状线;位错围绕位错的晶格产生畸变,造成了位错附近的空间有较高的应力集中。位错可分为两类刃型位错和螺型位错。位错亚构造主要包括:自由位错。晶体中单个离散的位错,它们没有被“编织”进任何位错“组织”(如位错壁)中去,自由位错的密度即单位体积( $V$ )内所含的位错线的总长度( $L$ ),即位错密度  $10L/V$ 。位错列。位错运动过程中,刃型位错通过攀移,螺型位错通过交叉滑动,就可以使位错平行地排列起来,这样一个晶体就会被若干个位错壁分隔成为几个晶格方位不同的区域,即亚晶粒(尼古拉定义,一个晶体之内,由结晶学方位有小角度(小于  $12^\circ$ )的偏离的区域所构成的多边形构造),它们之间为低角度的亚晶界,亦即位错壁所分隔。

#### 参考文献:

- [1] 单文琅,宋鸿林等.构造变形分析的理论、方法和实践[M].武汉:中国地质大学出版社,1991.
- [2] 傅昭仁等.变质核杂岩及剥离断层的控矿构造解析[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
- [3] M·S 佩特森.实验岩石变形-脆性域[M].北京:地质出版社,1982.
- [4] A 尼古拉.构造地质学原理[M].北京:石油工业出版社,1989.