地 质 学 报
1985 年 ACTA GEOLOGICA SINICA 第 4 期

天然变形岩石中黑云母的击象

徐树桐　　季寿元
（安徽省地质研究所）（南京大学地质系）

我们发现的具有击象的黑云母产于安徽省东部早元古代变质沉积岩的糜棱岩中。黑云母击象中一组裂理平行于黑云母光轴面，裂理中细小包体主要为榍石。黑云母击象是脆性变形产物，它形成于以柔性变形为主的糜棱岩带中是由于构造过程中的应变硬化。作为冲击作用产物的黑云母击象产出于糜棱岩带内，这是由于强烈变形带中积累的能量有突然和缓慢释放的交替过程。目前对形成黑云母击象的精确温度、压力和应变速率仍是有待研究的问题。

已知在云母的(001)面上施加外力时，可产生三组裂理。当所施加的外力发生于瞬间并达到足够数量时，所产生的三组裂理中有一组平行于云母的光轴面；这三组裂理造成的图象称为云母的击象[1,2]。如果所施加的外力作用于较长的时限内，所产生的三组裂理都与云母的光轴面斜交，此种图象称为云母的压象。因此，云母的击象是高应变速率产物，而压象是蠕变的产物。

到不久以前，云母的击象和压象都是在实验室条件下由人工获得的。在我们的发现和报道[3,4,5]之前，未见过有关天然变形岩石中云母击象的报道。用人工方法获得云母击象时，都是不计量的。因而不知道应变速率或衡量达到多大数值才能产生云母的击象。

花岗岩或火山岩中的黑云母有时因出溶作用而在(001)面上出现平行于(010)和(110)面的裂理，其中常含有金红石、钛铁矿或磁铁矿的包体[2,6]。它与云母击象的裂理、包体成分和形成机制都不相同。

我们研究的黑云母击象，产于安徽省东部早元古代变质岩的糜棱岩带中。嘉山附近被两个钻孔揭露的这个糜棱岩带中，普遍含有带击象的黑云母，样品取自600米深处的岩心。对此种黑云母击象的大致情况，我们已作过报道[3,4,5]。本文是在此基础上对它的结构、包体成分和形成机制作进一步讨论。

据安徽省地质局实验室方盘工程师回忆，他曾在安徽省大别山群变质岩样品中见到过此种黑云母击象；江苏省地质局区域地质调查队的同志也曾在海州群变质岩中见到过相同现象（私人讨论，1984）。但他们当时并未予以注意，也未作过专门研究。

J. G. Ramsay 根据照片图象曾怀疑我们的样品是由出溶作用造成（私人通讯，1983）。H. J. Zwart 因为我们的样品产出于糜棱岩带中而怀疑它是黑云母的压象（私人通讯，1984）。他们的建议都对我们的工作起过有益的作用。方盘工程师曾在我们鉴别"击象"工作中给予帮助。由林承裕博士作电镜测试。郜莉同志协助绘图。对此均表感谢。

本文 1985年 2月收到，5月改回，王　毅编辑。

一、地质背景

取样地点在安徽省嘉山附近(图 1)。安徽省东部的变质岩包括两部分。一部分是属于低级角闪岩相的下元古代肥东群，其中有片麻岩、片岩和大理岩。厚度不等的糜棱岩带叠加于区域变质杂岩之上并平行于其中第1期褶皱的轴面面理，它们一起受后继变形的影响而产状多变，但总体产状向东缓倾[3,5]。另一部分是位于肥东群东侧的中元古代张八岭群和上元古代的震旦系，两者都属绿片岩相或低级绿片岩相，共同组成一个大型平卧褶皱推覆体(或构造滑动)，覆盖在肥东群之上。其中的主要糜棱岩带也平行于第 1 期褶皱轴面并分布在其倒转翼[3]。嘉山附近的钻孔穿过中元古代张八岭群和倒转翼的上元古代震旦系进入肥东群的糜棱岩带，具有击象的黑云母产于其中(图 2)。

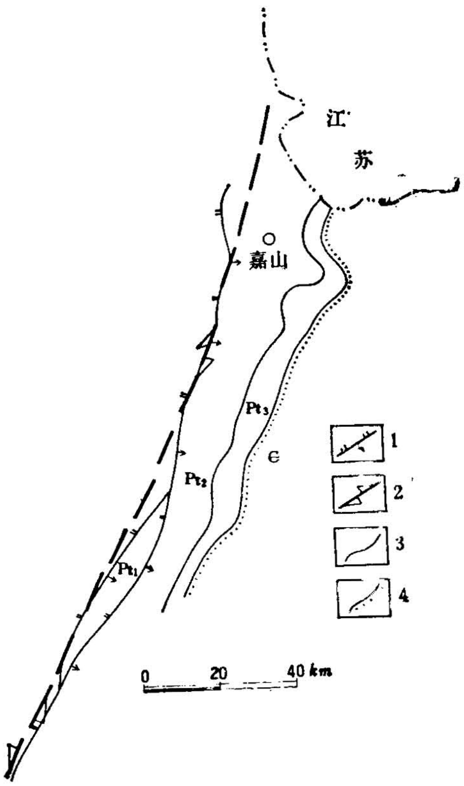


图 1 安徽省东部变质岩区地质略图

Fig. 1 Geologic sketch of metamorphic rocks in Eastern Anhui, China

Pt_1. 早元古代肥东群； Pt_2. 中元古代张八岭群； Pt_3. 晚元古代震旦系； Є. 寒武系； 1.冲断层或构造滑动；2.平移断层；3.地质界线；4.不整合线

二、含黑云母击象的糜棱岩带

在显微镜下观察，糜棱岩带的主要矿物成分为斜长石、石英和黑云母。糜棱岩带表现出强烈的退化变质作用——钠黝帘石化。斜长石退变成钠长石、绿帘石、黝帘石(或斜黝帘石)和少量褐帘石、榍石、黄铁矿和磷灰石，方解石形成于矿物颗粒之间的空隙内。云母部分变为绿泥石。糜棱岩带中的柔性变形特征表现为长石、石英、云母的波状消光，云母的膝褶，石英颗粒边缘的动态重结晶和晶内变形带。脆性变形表现为长石、黑

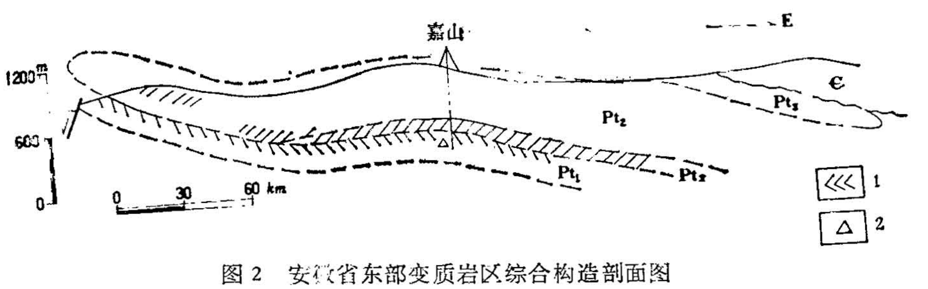


图 2 安徽省东部变质岩区综合构造剖面图

Fig. 2 Generalized structural section in the area of metamorphic rocks in Eastern Anhui, China

1.早元古代和晚元古代的糜棱岩带；2.具有击象黑云母的产出位置；其余符号同图 1

云母颗粒的破裂，高倍镜下的微角砾状石英[4]。各种矿物的裂缝中都可有帘石类矿物的充填。在显微镜下和手标本上都可见到有二组不同定向的糜棱岩带(照片 1、图 3)。含有击象的黑云母主要与早期糜棱岩带（Sm_1）伴生。当后期糜棱岩带（Sm_2）切割 Sm_1 时，云母或重新定向，或被破碎，但击象裂理之间的夹角并无明显变化（照片 1)。早期和晚期糜棱岩带分别平行于第 1 和第 2 期褶皱的轴面面理（图 3)。

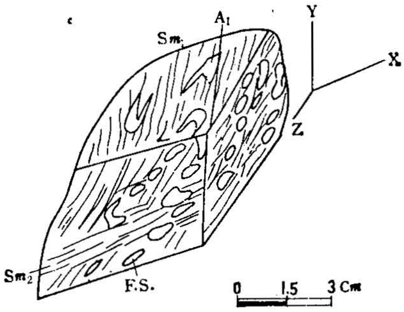


图 3　两种定向糜棱岩带素描
（据标本 J-28)
Fig. 3 Sketch of two sets of mylonite belt with different orientations
(according to J-28)
Sm_1. 早期糜棱岩带；Sm_2. 晚期糜棱岩带；A_1. 第 1 期褶皱轴；F. S.. 长英质岩性层形成的碎斑；X.Y.Z、糜棱岩带的应变轴

三、黑云母的击象

以图 3 中糜棱岩带的应变轴为参考坐标，在“YZ”和“XZ”切面上都可观察到黑云母的击象。击象在黑云母(001)面上表现为三组透入性裂理，其中一组平行于光轴面，相邻两组裂理的夹角应为 60°，但由于切面并不完全平行于云母的(001)面，故在薄片中所测夹角也略有不同（照片 2)。

为了确证击象裂理中包体的物质成分，曾在薄片中选择若干测点，进行能谱分析，结果见表 1：

表 1　黑云母及其击象裂理中包体的化学成分

Table 1　Chemical composition of biotite and fine-grained inclusions in its percussion partings

标本	测点	化学成分							矿物	测试单位
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO*	MgO	CaO	K_2O		
J-28	1	38.99	1.16	21.43	19.66	12.00	—	6.76	黑云母	南京大学现代分析中心扫描电镜室。林承裕
	2	35.37	—	23.33	25.48	15.31	—	0.50	绿泥石化黑云母	
	3	41.43	1.77	20.67	16.04	10.55	—	9.53	黑云母	
	4	41.43	2.18	19.98	16.82	10.23	0.06	9.30	黑云母	
	5	37.50	32.36	3.37	1.90	—	24.87	—	榍石(?)	
	6	39.68	14.06	13.58	11.16	6.00	9.38	6.14	黑云母+榍石	
	7	39.73	9.85	15.80	13.31	7.81	6.51	6.98		
	8	41.61	6.98	17.09	13.13	8.66	4.31	8.22		

* 全铁

测点 1、2、3、4 选择在裂理之外的黑云母区，其中 1、3、4 三个测点的成分均为黑云母的成分；测点 2 含 K_2O 量仅 0.50，推测为绿泥石化的部分，应为绿泥石化黑云母。测点 5、6、7、8 均为选择在裂理中的包体部位。其中，测点 5 不含 K_2O 及 MgO，相当于榍石的组分。测点 6、7、8 则比较复杂，既不同于黑云母，又不同于榍石，很可能是二者的混合成分。其理由如下：

1. 三个测点的分析数据均含有 K_2O 和 CaO。根据黑云母及榍石的理想成分可知，

K_2O 仅含在黑云母中，而 CaO 则仅含在榍石中。设想榍石是由理想的组分 CaO、TiO_2、SiO_2 组成，按分析数据中的 CaO 含量，分别计算出相应的 TiO_2 及 SiO_2 含量，再由总量中扣除相应的榍石组分所含的分额后，将剩余的总量，换算成百分之一百，换算结果见表2。经过这样换算以后的组成，大体上相当于黑云母的成分。如果与测点 1、3、4 相对比时，也大体一致，其中尤以 Al_2O_3 最为吻合，而 Al_2O_3 是众所周知的难以迁移的惰性组分。

表 2　从表1中扣除理想的榍石组分后，各测点的成分(%)

Table 2　The residue (%) after taking off the ideal components of sphene from those shown in Table 1

测　点	化学成分					
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	K_2O
6	44.09	0.95	20.24	16.63	8.94	9.15
7	33.85	0.86	23.50	19.79	11.62	10.38
8	43.56	0.98	20.12	15.46	10.20	9.68

2. 在扫描电镜下，击象裂理中的包体呈粒状，沿裂理分布，其中有二组连续性较好(照片 3)，其余一组连续性较差。当用电子束对包体进行面扫描时，可以发现 Ca 与 Ti 的含量同步增长，因而可以证明包体中有榍石的存在。在扫描电镜下被测试的颗粒，均在裂理中，但裂理面也不平直，它与黑云母的(001)解理面并不一定完全正交，加以颗粒本身细小，因此在电子束照射过程中，很可能不仅轰击到榍石颗粒上，也会波及黑云母，由此产生的二次电子，不仅来自榍石，也有部分来自黑云母，故而表现出二者的混合组成。

根据上述分析，可以认为击象裂理中充填的矿物，当以榍石的可能性最大，决不可能是所谓的金红石，因为在金红石中很难设想有大量的 Ca 存在，更不可能出现 Ca 与 Ti 同步增长的现象。这就排除包体是由于黑云母出溶所形成的设想[4]。它的形成应是黑云母先期受到冲击变形，形成击象裂理，再经后期充填而成。Ti 主要来自黑云母，而 Ca 则主要来自斜长石的去钙作用。

含有黑云母击象的糜棱岩带中可以见到变形的砾石或岩屑。砾石或岩屑都有鲜明的轮廓和铁染环，其中一部分象是脱玻化的隧石，另一些含有粘土矿物和绿泥石（照片 4)。这表明糜棱岩的原岩是沉积岩，因而也不可能有出溶作用的存在。

黑云母的击象可以在室温条件下由人工冲击实验获得，提供实验的晶体是完全属于弹性范围的固体状态。因此属于脆性变形的范畴。在偏光显微镜下，部分击象裂理有锯齿状边缘，伴生石英呈微角砾状[4]等现象也都表明黑云母击象形成于脆性变形的条件下。但它却生成于以柔性变形特征为主的糜棱岩带中，又由于黑云母本身也同时表现有波状消光，膝褶等柔性变形特征，因此用物性不同来解释脆性和柔性变形共存的这种现象显然是不合适的。可供选择的解释如下：

(1) 形成时期不同。糜棱岩带形成在先，黑云母击象是在糜棱岩带从深处上升到近地表的条件下形成的，或者黑云母击象先在近地表条件下形成然后下降到深处再形成糜棱岩带。但据薄片研究，黑云母击象与早期糜棱岩带密切伴生并受到后期糜棱岩带的改

造（重新定向），在手标本和薄片内都未见到有关的透入性脆性破裂面。所以这种解释与我们研究的情况不符。

（2）应变硬化。实验已经证明，物体在受力后的应变过程中，应变-应力曲线可分为两部分。一部分是弹性范围，另一部分是塑性范围。两者之间的转折点为屈服点，对应的应力为屈服应力。在包括屈服点的弹性范围内的应变常表现为脆性破裂。当曲线进入塑性范围以后，移去应力并立即再施加同一应力，会导致曲服点的升高，表现为应变硬化或工作硬化[7]。如果在物体已进入塑性范围后不断地卸载和立即地再加压，则物体的屈服点因应变硬化而不断地升高，弹性范围不断地加大，因而会有多次脆性破裂的出现（图 4）。这有点象尼古拉斯等在实验工作中所见到的应力与应变的脉动现象[8]。

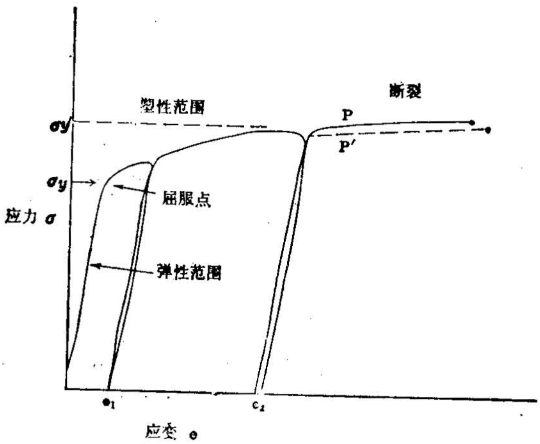


图 4　弹-塑性物质应变-应力关系综合图

（据 T. Hopwood, 1974）

Fig. 4　Generalized strain-stress relationship in an elastic-plastic material (after T. Hopwood)

e_1, e_2. 永久应变；σ_y. σ_y'. 屈服应力；P. 卸载后立即相同应力的曲线；P′. 卸载一段时间后再加同样应力的曲线

我们已经知道，任何一次构造运动都是一个脉动过程。每次脉动都相当应变-应力关系中的一次卸载和一次加压。当受压物质（断层带或强裂变形带内）进入塑性范围以后，还会因应变硬化而出现脆性破裂；当后继的塑性变形不能消灭此种脆性破裂时（或消灭不完全时），就会在同一种物质中同时有两种变形特征。如果脆性变形的后继塑性变形是在较高温度下进行的，则恢复作用会使先成的脆性破裂完全愈合而使其消失。因此，两种变形现象的共存，只能在后继的塑性变形属于“冷加工”时，也就是在柔性变形的条件下才有可能。对于长英物质来说，大体相当于绿片岩相变质作用的温度、压力条件。既然黑云母击象是构造成因而且与第 1 期糜棱岩带同时生成，则它的形成条件也应与糜棱岩化的条件相似。从伴随黑云母击象的糜棱岩化过程中的钠黝帘石化和石英的动态重结晶作用来看，它的温、压条件也应大体与绿片岩相变质作用相当。在构造活动（脉动）过程中，由于变为开放系统而可能有水的不断（也许是周期性或反复地）影响（“淬火”），因而可能有不同温度、压力平衡条件的交替。柔性变形过程中出现脆性变形现象，表明温度、压力平衡条件的改变，但这种改变不应超越绿片岩相的温度、压力范围；而且这种改变是由构造脉动触发的。这样的解释比较适合于我们研究的情况。但是，我们尚未做出任何实验来支持我们的论点。

根据实验，黑云母击象是高速应变率（冲击）的产物，而糜棱岩带一般被认为是缓慢应变（蠕变）的产物。这种不同应变速率产物共生的现象，是因为任何一次构造运动的脉动过程中，积累于强烈变形带内的能量也有一个缓慢释放和突然释放的交替过程，也就是有一个蠕变和快速应变的交替过程。所以，在以蠕变为主要机制的糜棱岩带中，也可能产生快速应变的黑云母击象，就好象糜棱岩带中可以有假熔岩的产出一样[9]。

四、结 论

1. 形成于糜棱岩带中的黑云母击象，是构造应力作用下快速应变的产物而不是由出溶作用造成的。

2. 黑云母的击象是应变硬化过程中的脆性变形，但又受到后继柔性变形的影响。

3. 快速应变产生的黑云母击象产出于以蠕变为主要机制的糜棱岩带中，相当于积累于强烈变形带内能量的突然释放和缓慢释放过程。

4. 黑云母击象形成的温度和压力条件可能大致相当于绿片岩相变质作用的温度、压力，但其精确数值以及形成黑云母的应变速率需要多大，仍然是需要进一步研究的问题。

参 考 文 献

[1] 王嘉荫，1978，应力矿物概论。地质出版社。
[2] Winchell, E. N., 1956, Elements of optical mineralogy, 4th. edition. 2nd. printing, Wiley. New York.
[3] 徐树桐，1983，安徽东部元古代变质岩中糜棱岩及其地质意义。构造地质论丛，第 3 期，地质出版社。
[4] 何永年、徐树桐，1984，天然变形岩石中黑云母的击象：高速变形事件的重要证据。科学通报，第 16 期。
[5] 徐树桐等，1984，皖东元古代末期之构造滑动。国际交流地质学术论文集（为 27 届国际地质大会而作），地质出版社。
[6] 王德滋，1974，光性矿物学。人民出版社。
[7] Ramsay, J. G., 1967, Fdding and fracturing of Rocks. McGraw-Hill Inc. New York.
[8] Nicolas, A. and Poirier, J. P., 1976, Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. John Wiley and Sons; New York.
[9] Sibson, R. H., 1977, Fault rocks and fault mechanics. L. Geol. Soc. Lond, Vol. 133.

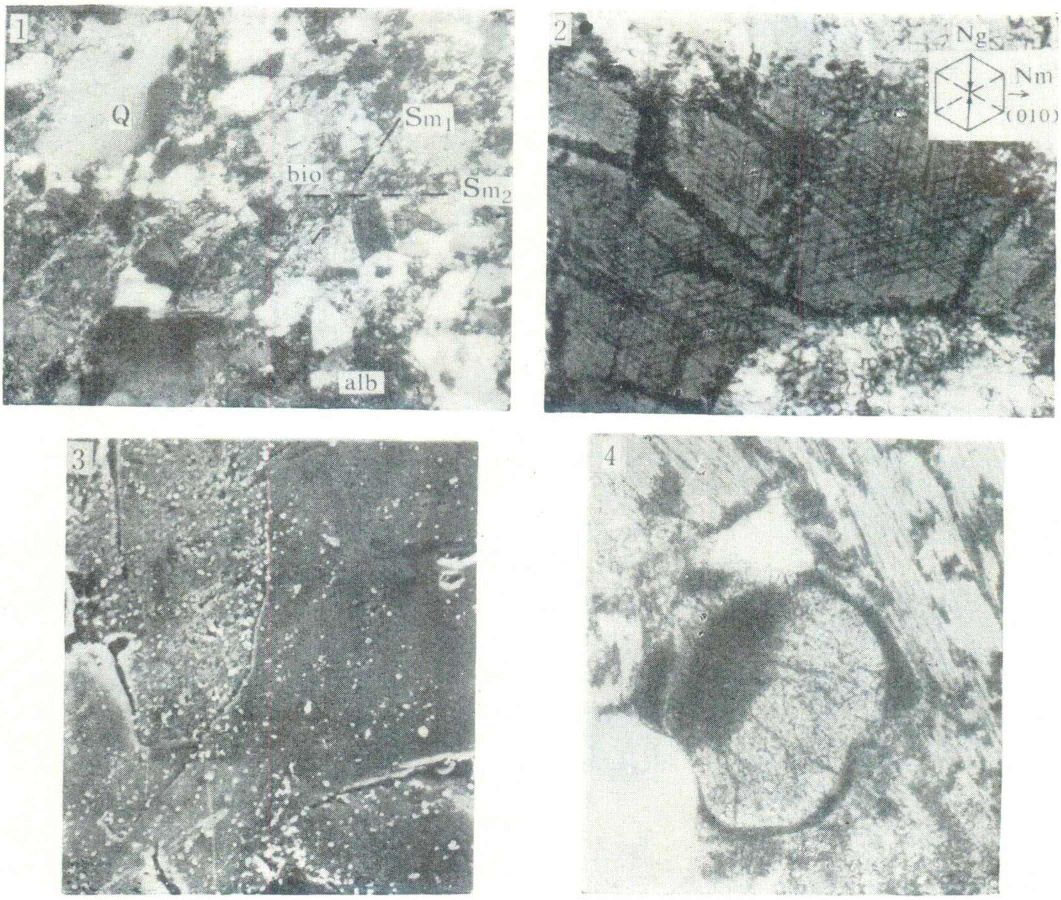
THE PERCUSSION FIGURE OF BIOTITE IN NATURALLY DEFORMED ROCKS

Xu Shutong
(Geological Institute of Anhui Province)

Ji Shouyuan
(Department of Geology, Nanjing University)

Abstract

Three sets of partings may be produced on the plane (001) of biotite by a sufficient stress. If the applied stress acts in a transient time, then one of the three sets will be parallel to the optic-axial plane of biotite, forming a percussion figure of biotite; while the stress acts for a longer interval, all the three sets will be oblique to the optic-axial plane and then a pressure figure of biotite will be produced. Exsolution may produce partings parallel to (010) and (110) and containing inclusions of Ti/Fe oxides. Biotite with a percussion figure as studied here occurs in an early Proterozoic mylonite belt in eastern Anhui. Mylonite is associated with intense saussunitization, and contain deformed chert and mudstone "pebbles" One set of partings on (001) is parallel to the optic-axial plane The minute inclusions along the partings are mainly sphene and, sometimes, minerals of the epidote group. The percussion figure of biotite as the product of brittle deformation occurs within the mylonite belt characterized by ductile deformation because of strain hardening during tectonic pulsation. The occurrence of the percussion figure as the product of impact in a mylonite belt with creep deformation as the main mechanism is probably due to the fact that the energy accumulated in an intensely deformed belt releases alternatively suddenly and slowly. However, the accurate temperature, pressure and strain rate for producing the percussion figure on biotite still remains to be a problem.



1. 两组糜棱岩带，Sm_1 和 Sm_2 分别为早期和晚期糜棱岩带，alb：钠长石，Q:石英、Bio：黑云母（双偏光，×63）

2. 黑云母击象及其光性，一些裂理呈锯齿状，其中含有包体（双偏光，×630）

3. 扫描电子显微镜下的黑云母击象，裂理中有粒状包体

4. 含黑云母击象的糜棱岩带中的变形砾石（照片中部）（双偏光，×250）