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

一个可能的糜稜岩形成过程

董 火 根
(南京大学地质系)

应用石英类似物——八氯丙烷 (Octachloro-propane), 进行高温 (0.7 T)、中速 ($1.7\times10^{-4}sec^{-1}$) 和纯剪形变实验,获得了一个可能的糜稜岩形成过程,它包括: (1) 前糜稜岩阶段; (2)原糜稜岩阶段;(3)糜稜岩阶段;(4)超糜稜岩阶段。全文论述了物质形变过程中,颗粒规模的显微结构和显微构造的特征、颗粒变化及形变机制,讨论了模拟的糜稜岩形成过程的地质意义及其动态分析恢复和动态重结晶的演化细节。

一、糜稜岩问题的研究

R. H. Sibson 于 1977 年研究英国外赫布里底的逆冲断层和断层岩石后,曾提出过断层带的双层结构模式[1],直到 1981 年 4 月又在美国召开了国际糜稜岩会议——糜稜岩的意义和岩石学成因[2],在这短短的几年中,有关对断层岩的研究,特别是对糜稜岩的研究,得到了迅速地发展。

糜稜岩的概念最早于 1885 年由英国学者 C. Lapworth 研究苏格兰的莫因断层时提出的[1],他把莫因断层带中细粒化的并发育很好的条纹构造的断层岩石称之为糜稜岩[2]。

近年来,人们对糜稜岩的韧性变形、成因和结构分类的认识不断深化。另外,对糜稜岩的几何学、构造位置、糜稜岩的显微构造和形变机制问题,糜稜岩化的物理条件、形变的局部化集中问题都引起地质学家们的注意和争论[2]。其中值得提出的,如 T. H. Bell, M. A. Etheridge (1973); J. M. Christie(1960); C. Lapworth (1885); J. G. Ramsay, R. H. Graham (1970); E. H. Rutter(1972); A. Spay(1969); S. H. White(1980); R. H. Sibson(1977); S. Schmid, R. Kerrich, J. P. Poirier; J. Tullis, A. Snoke(1981) 等,对这一方面研究,所作出的贡献。当然,在野外观察,实验和理论方面还存在不少的问题,今后尚需要进一步解决[2]。

一个糜稜岩是如何形成的? 形成的过程是怎样的呢? 或者说一个糜稜岩的面理构造在高应变(简单剪切)条件下如何逐渐发展变化的呢? 完全由动力重结晶后的糜稜岩的显微构造特征又是什么呢[2]。

现有的糜稜岩的概念性双层结构模式,一方面是基于野外糜稜岩的研究(例如外赫布里底断层岩在空间上从西到东由脆性变形到韧性变形的变化); 另一方面,也基于断层岩结构、构造、温度、围压、应变速率、差异应力及形变时间;此外还基于形变机制的不同和变化。因此,双层结构模式是概念性的,模式化的。

本文 1985 年 1 月收到,4 月改回,王 毅编辑。

现有的岩石形变实验也还只能提供形变的初始及终止信息，而反映形变过程的信息较难获得。

本文应用石英的类似物——八氯丙烷（Octachloropropane）进行形变实验并进行了连续的观察，获得了一个可能的糜稜岩形成过程，尤其是石英质糜稜岩形成过程的信息，以此为糜稜岩的成因，结构分类提供实验方面的依据。

二、八氯丙烷的高温、中速、纯剪实验

据自然界中现存的岩石形变构造（或从常规的岩石形变模拟实验）来重建显微构造的演化细节以及与之相关的显微构造运动还是很困难的，但利用石英的化学类似物进行形变观察的实验却提供了重建显微构造的演化与构造运动之间联系的可能性[3]。

1. 实 验 步 骤

八氯丙烷是正光性的化学结晶物质。它的绝对熔点为 140°F，当它的 70%处于绝对熔点温度时（0.7 Tm）容易发生重结晶作用，其形变和重结晶情况较类似于石英，目前，八氯丙烷的结晶构造还没有完全确定，但 Mügge 型实验提出它是六方晶系或三方晶系，具有确定的底面和可能的柱面、菱面或锥面的滑动面[3]。为此可用石英的类似物八氯丙烷来模拟一个可能的糜稜岩形成和演化的细节。

把八氯丙烷制备成 40μm 厚的薄膜，应用自动形变仪（高温为（0.7Tm），应变速率为（$1.7\times10^{-4}\text{sec}^{-1}$）来进行纯剪切的形变实验，观察其形变过程中显微结构、构造的发生、发展，研究与其相联系的形变机制。

2. 实 验 观 察

1）前糜稜岩阶段

1.（图版-a）在未形变状态下，八氯丙烷是在高温下（0.9Tm）制备的，在偏光显微镜下结晶颗粒大部分呈等轴六边形，边界清晰，规则，基本上为等轴形结构，结晶颗粒处在低能稳定的状态之下，称之为"泡沫构造"（foam structure）。颗粒呈灰、灰黑、灰白、黑色，颜色不一表明光轴取向不一，所以是无定向的组构，少许颗粒有亚颗粒边界出现。

2.（图版-b）形变进行 30 分钟之后，形变物质水平侧向缩短应变量为 0.5%，属无限小应变。少数颗粒的边界发生缓慢的迁移，结构和构造基本上没有什么变化，可能是积累应变能的过程，从稳态开始向不稳态转化。

2）原糜稜岩阶段

3. 变形进行 45 分钟之后，物质水平侧向缩短应变量为 2%，属有限应变。垂直于主压应力 σ_1 方向的边界区域，沿着少数颗粒边界出现少量显微裂隙，说明了边界区域曾有一短暂的脆性形变，显微裂隙是沿着潜在的吕德氏线发育。

一些结晶颗粒出现波状消光的现象，它是与拉长颗粒的局部转动有关的[4]，形变机制上可能与位错滑动（dislocation glide）有关[2]。一些颗粒出现变形条带（deformation band），它可能与位错密度增高有关，也是代表工作硬化的过程。

形变物质内部的结晶颗粒边界形成镶嵌结构，它是由颗粒边界迁移进一步发展而成

的。在颗粒边部开始出现细小的亚颗粒，形似多边形化，它是动态恢复的一种证据，虽然还很微弱，但已经开始出现。在两个或两个以上的颗粒边界之间开始出现动态的无应变的重结晶新生小颗粒。这是糜稜岩开始的最初阶段。

4.（图版-c）形变进行 50 分钟之后，物质水平侧向缩短应变量为 2.7%。

边界区域靠近左侧的显微裂隙已由颗粒边缘的多边形化的亚颗粒以及边界迁移愈合。

内部区域仍然是镶嵌的边界结构，颗粒边部多边形化明显，也就是产生了动态恢复的亚颗粒，一些亚颗粒的长轴方向垂直于颗粒边界，而颗粒之间边界迁移形成的无应变重结晶新生颗粒增多，而且可以看到动态重结晶增多的区域主要是沿着一组方向的颗粒边界分布。是否说明可能潜在的吕德氏线为边界迁移和动态重结晶提供了空间条件呢？

波状消光和变形条带的显微构造现象依然存在。

5.（图版-d）形变进行 52 分钟之后，物质的水平侧向缩短应变量为 3%。

颗粒边界的显微裂隙部分已由动态重结晶至边界迁移愈合。而内部则由于颗粒边界的进一步迁移，以至颗粒边界镶嵌结构更明显。颗粒边部多边形化形成的亚颗粒更多，可以看到一些亚颗粒以不明显的矩形形态出现，形成了所谓的"核和幔"的构造，它是动态恢复的标志。其中一些亚颗粒可能由于转动而发展成为无应变的动态重结晶颗粒，这种就是 Hobbs 的所谓的转动重结晶作用（rotation recrystallization）[5]。颗粒边界迁移形成了更多的无应变的动态重结晶颗粒，这种动态重结晶作用为迁移重结晶作用（migration recrystallization）[6]。

波状消光以及形变条带现象仍然存在。

3）糜稜岩阶段：

6.形变 54 分钟之后，物质侧向水平缩短应变量为 3.5%。

颗粒的镶嵌边界之间的细小无应变的重结晶颗粒增多，也就是糜稜岩化加强，这种重结晶颗粒一部分由边界迁移作用形成，一部分也由于颗粒边界的多边形化的亚颗粒转动，使其低角度的亚颗粒边界变成高角度的颗粒边界，边界之间的方位差大于 12—15°。可以看到一些重结晶颗粒成为矩形，微定向，垂直于主压应力（σ_1）方向。也可以看到一些原来无应变的重结晶颗粒在动态过程中变成为更细小的颗粒。

波状消光和变形条带现象仍存在，而且开始出现在细小的无应变的重结晶颗粒之上，说明是同构造期的产物。

7.（图版-e）形变进行 56 分钟之后，薄膜水平侧向缩短应变量为 4.5%。

原来颗粒边界镶嵌的结构由于动态恢复亚颗粒和动态重结晶的进一步增多，即糜稜岩化的加强，而更加细粒化了，开始以老颗粒的残碎斑结构而取代镶嵌结构。较大的老颗粒为残碎斑，残碎斑边部为亚颗粒，颗粒边界之外为重结晶小颗粒，犹如火焰状[7]，重结晶颗粒开始微定向，出现不太显著的面理构造。

波状消光和变形条带仍存在。

8.（图版-f）形变 58 分钟之后，薄膜水平侧向缩短应变量为 6%。

无应变的重结晶新生颗粒增多，进一步替代颗粒边部的亚颗粒。老的颗粒一方面继续的出现动态恢复的亚颗粒而使自己成为残碎斑出现。

波状消光和变形条带继续存在，并出现在无应变的新生重结晶颗粒上。

9.形变 60 分钟之后，物质水平侧向缩短应变量为 7%。

无应变的重结晶颗粒连续增多，残碎斑的多边形化也增多，重结晶颗粒微定向，面理化构造明显。

波状消光和变形条带仍然存在，并出现在重结晶颗粒之上。

4）超糜稜岩化阶段：

10.（图版-g）形变进行 90 分钟之后，物质水平侧向缩短应变量为 15%。

从 9 中提及的显微构造图象到图版-g 中图象进行的形变时间为 30 分钟，在开始时，显微构造变化不大，可以认为随着形变时间的进行，应变量变化不大，是一种应变硬化的现象，一部分能量消耗于产生动态恢复的亚颗粒上。而到晚期，几乎全部突变成由重结晶颗粒构成的糜稜岩或超糜稜岩构造了，面理显著，原来全消光的部分颗粒也由于动态恢复的多边形化和动态重结晶化，C-轴转动而显现出来，只剩下极少数的老颗粒的残碎斑了。因此在晚期阶段可能是一种应变软化的现象。

波状消光现象存在。

11.（图版-h）形变进行 120 分钟之后，物质水平侧向缩短应变量为 24.7%。

从上述(图版-g）之后又开始了一个应变硬化的过程，而在晚期又可能是一种应变软化的现象。构成了大部或全部重结晶的超糜稜构造，而细粒化以及面理化。令人注目的重结晶颗粒的大小不是减小，而在一定程度上比上一张显微图象上所显示的颗粒大小要大一些，颗粒大部分呈矩形或等粒定向，大致垂直于纯剪的主压应力（σ_1）方向。

至此，八氯丙烷薄膜纯剪实验告一段落，全部形变时间为 120 分钟。

三、可能的糜稜岩的形成过程

上述形变实验展示了一个可能的糜稜岩连续形变的过程，根据颗粒显微结构和构造的特征，根据颗粒形变机制的特征，这一过程可以归纳为以下四个阶段。

1. 第一阶段——前糜稜岩阶段

结晶颗粒边界缓慢的迁移，改变低能状态下的稳态构造而开始向不稳态转化。实际上是结晶颗粒内部产生位错，储存应变能量，特别在颗粒边界上，储存较多的应变能[2]。

2. 第二阶段——原糜稜岩阶段

边界区域出现少量显微裂隙。表明物质在该区的短暂的脆性形变，而后由边界迁移和重结晶愈合。

它的内部区域颗粒形成镶嵌结构。颗粒边部多边形化产生动态回复的亚颗粒，形成了所谓的核幔构造。颗粒边界由于迁移，在颗粒边界之间产生少量无应变的动态重结晶的新生小颗粒。

波状消光和变形条带的出现表明了它的变形机制为位错滑动。动态恢复的亚颗粒和动态重结晶作用的开始则表明它的形变机制开始转变为位错的蠕变[2]。它是糜稜岩化的开始，应变能除了一部分由脆性的变形释放外，大部分消耗于回复的亚颗粒的出现和动态

重结晶作用。

3. 第三阶段——糜稜岩阶段

结晶颗粒镶嵌边界之间的无应变动态重结晶增多，这种重结晶一方面由颗粒边部的亚颗粒的转动发展而来，另一方面由边界迁移而形成。颗粒边部的多边形化随形变时间增多而向内侧发展，因此，原来的颗粒开始成为残斑状结构，重结晶的新生颗粒也经受了形变影响。

这阶段波状消光和变形条带仍然出现，主要的形变机制是位错的蠕变，但仍有位错的滑动保留[2]，形变时间不长而应变的显微构造瞬息变化。

4. 第四阶段——超糜稜岩阶段

结晶颗粒的细粒化以及面理化成为第四阶段超糜稜岩化的最大特点。几乎全部成为无应变的重结晶颗粒并呈现面理化的构造。这些重结晶的颗粒还经受了变形而出现波状消光。这个阶段其间经历了应变的硬化和应变软化的多次过程。令人注目的是重结晶的颗粒大小变得比前面稍大一些，颗粒呈现矩形形态或等粒形态。

这一阶段的形变机制是位错的蠕变，这由动态恢复的亚颗粒和动态重结晶的出现佐证。

八氯丙烷是石英的化学类似物，在差异应力为常数，围压为常数的实验条件下，高温，中速的纯剪实验所模拟的糜稜岩形成过程有可能与自然界的糜稜岩以及根据野外研究所确定的糜稜岩化程度或所假设的结构模式相比拟的。

它可以与澳大利亚 Aritunga nappe Complex 和新南威尔士 Wyangala Dam. 的石英质糜稜岩的演化一一对比。例如：(1) 原糜稜岩阶段的镶嵌的颗粒边界结构以及开始的重结晶作用[8,9]；(2) 糜稜岩阶段的石英质糜稜岩的颗粒进一步拉长以及沿颗粒之间的边界的重结晶颗粒增多[8,9]；沿着颗粒边界的重结晶作用出现所谓的火焰状构造以及石英老颗粒成为残斑结构[8,9]；(3) 超糜稜岩阶段的完全重结晶和面理化构造的出现。

它也可以与澳大利亚东南部花岗岩中的糜稜岩随有限应变递增的典型的显微构造的变化相对比[9]，亦可看到上述的三个阶段。

它亦与英国的莫因糜稜岩和外赫布里底的石英-长石质的糜稜岩有相类似的现象[10]。

其它如与澳大利亚的 Quenstana 的石英质糜稜岩[11]，苏格兰的石英质糜稜片岩[12,13]亦可相类比。

四、地 质 意 义

在高温、中速、应变率为常数 ($1.7\times10^{-4}sec^{-1}$)，差异应力为常数，围压为常数的以及纯剪的特定的条件下，形变物质随形变时间的增加而增加有限应变量，从一个方面模拟了一个可能的糜稜岩，特别可能是石英质糜稜岩的形成过程。它不仅仅是模拟了自然界糜稜岩的一些现象，而更重要的是从实验的角度帮助我们更深入的理解自然界糜稜岩的成因、形成和发展的过程以及它的结构分类。

1. 由它的形变机制，从实验的角度论证了糜稜岩的韧性形变成因，虽然在初始阶段边

界区域出现瞬息的脆性形变，但总体是韧性形变。由波状消光、变形条带为特征的位错滑动机制贯穿总体形变过程，而较后的以动态恢复的亚颗粒以及动态重结晶作用为特征的位错蠕变的机制，都证明模拟的糜稜岩的成因是韧性成因的，在特定的本实验的条件下，有限应变量随形变时间的增加而加强，因此形变机制亦随有限应变的增加而变化。

2. 由它的显微结构和构造的变化以及它的形变机制的变化，从实验上可以将糜稜岩的形成和发展过程划分为四个阶段，即前糜稜岩阶段、原糜稜岩阶段、糜稜岩阶段和超糜稜岩阶段。它将帮助我们更好的认识自然界糜稜岩的形成和发展的过程以及它的结构分类。

本人认为糜稜岩发展的第二阶段开始糜稜岩化的岩石属于原糜稜岩，基质和残斑的量的比例不一定要象 R. H. Sibson 所规定的那样基质占 10—50%，“原”的意思是开始出现，所以基质在 10—20—30% 即可认为，而超过 30—40% 就可认为是糜稜岩了，所以第三阶段的糜稜岩基质含量的变化范围可以大一些，如 30—40%—80—90%，第四阶段几乎全部重结晶化和面理化的糜稜岩为超糜稜岩。

3. 由实验展示了动态恢复的演化细节：

① 颗粒边界缓慢迁移，属于无限小应变范围，可能是积累应变能使在形变晶体内产生位错，特别在颗粒边界和边部有较高的应变能[2]；

② 位错进一步迁移形成位错壁，亦即产生动态恢复的亚颗粒；

③ 亚颗粒转动，由低角度的边界变成高角度的边界，亦即亚颗粒变为动态的无应变的重结晶颗粒。

4. 由实验展示了动态重结晶的演化细节：

① 一种无应变的动态重结晶可以由上述动态恢复的亚颗粒转动发展而来；

② 同时，另一种无应变的动态重结晶可以由颗粒的边界迁移作用而形成。

动态重结晶作用在糜稜岩细粒化和面理化中起着极为重要的作用。

参　考　文　献

[1] Sibson, R. H., 1977, Fault and fault mechanisms. J. Geol. Soc., V. 133.
[2] Tullis, J., Snoke, A. W. and Todd, V. R., 1982, Significance and petrogenesis of mylonitic rocks. Geology, Vol. 10, No. 5.
[3] 董火根，W. D. 明斯，1983，一个可能的矿物类似物八氯丙烷的快速、高温、单剪实验及其“退火”实验。南京大学学报，第二期。
[4] Knipe, R. J. and White, S. H., 1979, Deformation in low grade shear zones in the old red sandstone, S. W. Wales. Journal of Structural Geology, Vol. 1, No. 1. pp. 53—66.
[5] Hobbs, B. E., 1968, Recrystallization of single crystals of quartz. Tectonophysics, 6. pp. 359—401.
[6] Guillope, M. and Poirier, J. P., 1979, Dynamic Recrystallization during creep of single—crystalline halite: an experimental study. Jour. of Geophys. Res., Vol. 84. No. B10, Sept. 10.
[7] Higgins, M. W., 1971, Cataclastic rocks. Prof. Pap. U. S. Geol. Surv. pp. 687.
[8] Hobbs, B. E., Means, W. D. and Williams, P. F., 1976, An outline of structural geology. John Wiley and Sons. Inc.
[9] Etheridge, M. A. and Wilkie, J. C., 1981, An assessment of dynamically recrystallized grainsize as a palaeopiezometer in quartz-bearing mylonite zones. Tectonophysics, 78(1981) 475—508.
[10] 钟大赉，1983，石英长石质断层岩的某些变形特征岩石学研究。第二期，地质出版社。
[11] Wilson, C. J. L., 1982, Foliation in quartz mylonite. Atlas of deformational and metamorphic rock

fabrics., pp. 340.
[12] Borradaile, G. J., 1982, Schistosity of meta-arkoses and diminution of grain size. Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics., pp. 360.
[13] Borradaile, G. J., 1982, Mylonitic schistosity and quartz blades or ribbons. Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics., pp. 362.

A POSSIBLE FORMATIONAL PROCESS OF MYLONITE

Dong Huogen
(Department of Geology, Nanjing University)

Abstract

A high-temperature (0.7 T), medium strain rate (1.7 $10^{-4}s^{-1}$) and pure shearing deformation experiment on octachloropropane, a quartz analoque, shows a possible process of formation of mylonite, particularly quartz mylonite. The process includes (1) the pre-mylonite stage, characterized by the slow migration of grain boundaries (pl. a, b), (2) the protomylonite stage, characterized by the appearance of dynamically recovered subgrains and dynamically recrystallized grains (pl. c, d), (3) the mylonite stage, characterized by increasing rotation recrystallization and boundary migration recrystallization and initiation of foliation (pl. e, f), and (4) the ultramylonite stage, characterized by fine granulation and foliation (pl. g, h). This paper deals with the features and changes of microtextures and microstructures and the deformation in the process of deformation. Besides, the paper discusses the geological significance of the simulated formational process of mylonite and the details of the evolution characterized by dynamic recovery and dynamic recrystallization.

图 版 说 明

照片 -a. 前糜棱岩阶段：未形变的八氯丙烷，颗粒呈等轴结构和“泡沫”构造。

照片 -b. 前糜棱岩阶段：少数颗粒边界缓慢迁移。

照片 -c. 原糜棱岩阶段：颗粒呈镶嵌的边界结构；颗粒边部多边形化，产生动态恢复的亚颗粒：颗粒之间的动态无应变重结晶颗粒出现。
波状消光和变形带存在。

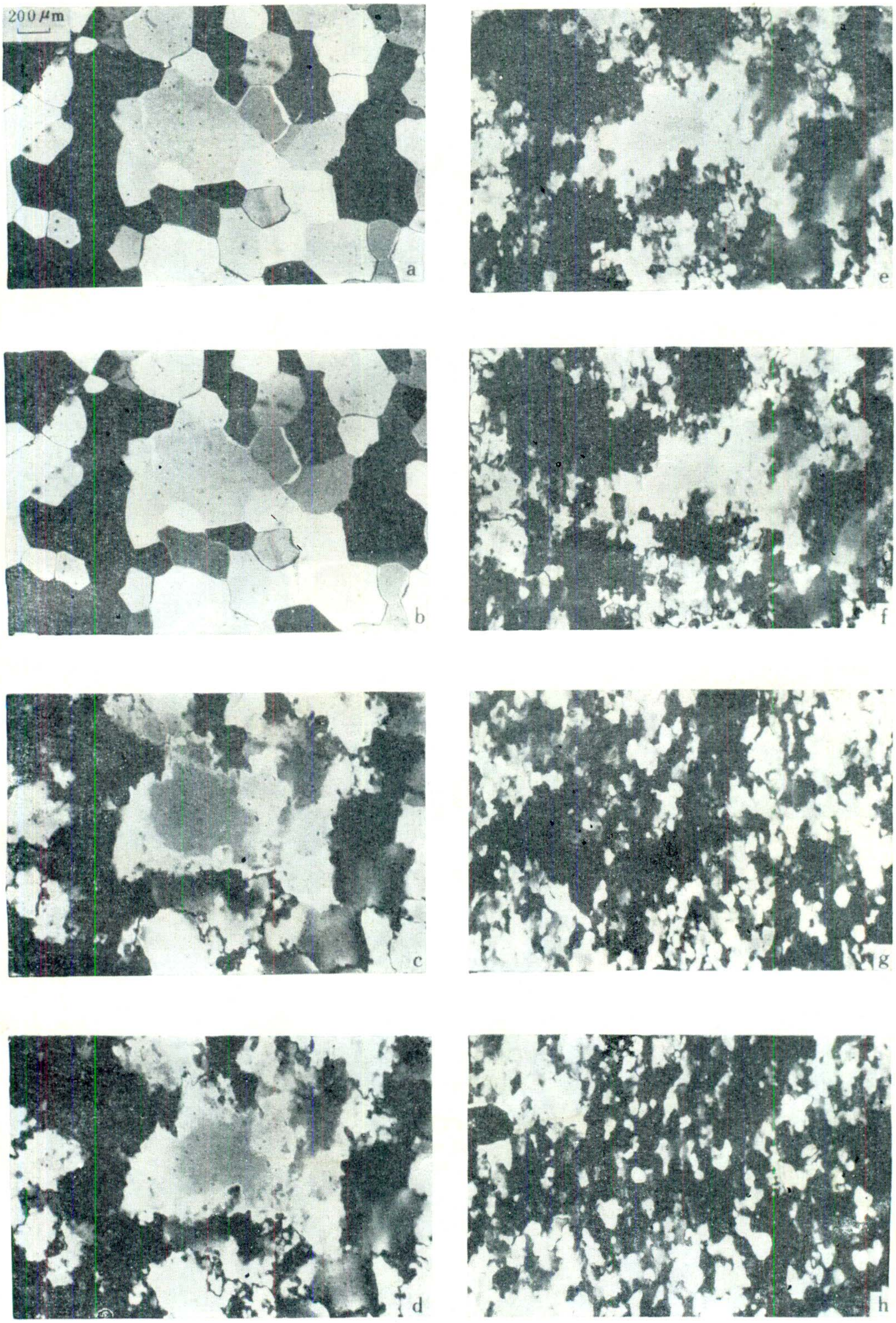
照片 -d. 原糜棱岩阶段：边界镶嵌结构明显：边部亚颗粒增多，形成“核和幔”的构造；一些亚颗粒转动成为重结晶：边界迁移形成更多的无应变动态重结晶。
波状消光和变形带存在。

照片 -e. 糜棱岩阶段：动态重结晶颗粒进一步增多：开始以老颗粒的残碎斑结构替代边界的镶嵌结构：出现面理化构造。
波状消光和变形带存在。

照片 -f. 糜棱岩阶段：无应变的动态重结晶颗粒大量增多。
波状消光和变形带存在，并且也出现在新生的重结晶颗粒上。

照片 -g. 超糜棱岩阶段：几乎全部的动态重结晶颗粒构成了糜棱岩、超糜棱岩构造，细粒化、面理化。

照片 -h. 超糜棱岩阶段：细粒化、面理化；一些重结晶颗粒大小相对变大。


200 μm
a
b
c
d
e
f
g
h