

韧性剪切带与金矿化的关系

——以金厂峪金矿床为例

林传勇 等著

地震出版社

56.57121
121.6.5
3.95

韧性剪切带与金矿化的关系

——以金厂峪金矿床为例

林传勇 等著

地震出版社

1995

内 容 提 要

本书介绍了韧性剪切带的基本特征和研究方法,从宏观构造、显微和超显微构造、岩石化学和地球化学角度,论述了冀东金厂峪金矿床韧性剪切带的基本特征、形成环境和演化历史,并着重探讨韧性剪切带与金矿化的关系;论证了韧性剪切带不仅是该金矿床的主要控矿构造,而且是重要的成矿机制;进而提出了韧性剪切带型金矿的找矿标志和找矿方向。本书对从事金矿及其他矿床研究的地质工作者及有关大专院校师生有重要参考价值。

韧性剪切带与金矿化的关系

——以金厂峪金矿床为例

林传勇 等著

责任编辑: 商宏宽

责任校对: 徐雁生

*

地质出版社出版发行

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 5.625印张 4插页 144千字

1995年7月第一版 1995年7月第一次印刷

印数 001—300

ISBN 7-5028-1223-7/P·760

(1643) 定价: 9.00元

前 言

近十几年来,国内、外在断层研究方面取得了突破性的进展,特别是在韧性剪切带概念的提出以及对它的认识方面。随着对韧性剪切带研究的不断深入以及大量新资料的获得,国外学者发现韧性剪切带与金矿化作用存在密切关系,它不仅是控矿的重要因素,而且也是一种重要的成矿机制,并由此提出了“剪切带型金矿”的概念。这一新的认识在1986年加拿大多伦多的金矿国际讨论会上引起强烈反响。对于一些由传统观念确定的属于含金石英脉型及层控浸染型金矿,也认为与剪切带有密切关系。总之,含金剪切带型金矿的研究在国外正受到越来越多的重视。

近几年来,这一新的认识在我国也引起很大反响。根据我国金矿的实际地质条件及特征,有的学者提出我国的“破碎带蚀变岩型金矿”实际上与国外的“剪切带型金矿”没有本质的区别,因此建议采用“剪切带型金矿”这一概念,以便更科学地概括这一类型金矿的形成机制及特征(邱德同,1990)。同时,不少矿床工作者在实际研究工作中也纷纷提出我国许多金矿床与韧性剪切带有密切关系。例如,有人提出,广东省高要县河台云西金矿区金矿化带实际上是糜棱岩带,金矿主要赋存于糜棱岩的动态重结晶石英中,其次是在黄铁矿中(周崇志、段嘉瑞,1988)。另外,也发现吉林桦甸夹皮沟金矿化带与片理化带、糜棱岩带有密切关系,可以作为找矿的标志(江克一等,1990)。有人认为,山东玲珑金矿区也存在有韧性剪切带,它与脆性断裂带的叠加部位是成矿的最有利部位(王吉君、余和勇,1990)。类似例子还可举出许多,这表明,韧性剪切带在我国金矿研究中已逐渐得到重视,并已取得初步的认识。

为了进一步探明韧性剪切带与金矿化的关系,我们承担了国家黄金管理局地质科研项目“冀东地区韧性剪切带与金矿化关系的研究”。研究期限为1989年12月至1992年12月,共三年时间。合同书所预定的研究任务和目标是:通过对冀东地区含金韧性剪切带的地质背景、构造环境及形成机制的研究,探明韧性剪切带对金矿化的控制条件以及金矿在韧性剪切带内的成矿规律。我们将工作重点放在金厂峪矿区。

金厂峪金矿床位于河北省迁西县,矿区公路发达,交通便利。金厂峪矿名列河北省金矿床之首,其开采历史可追溯至唐代,目前已是现代化大型金矿,跃居全国十大金矿之列。

由于金厂峪金矿床所在的冀东早太古代深变质古老结晶基底蕴含丰富的铁、金等矿产资源,所以吸引了众多地质工作者,在近一万平方公里的范围内,先后有高等院校、科研机构 and 地质队等十几个单位进行过野外地质找矿和研究工作,积累了大量的地质资料,提出许多有益的见解。但是,由于本区变质作用、构造地质比较复杂,对某些重大地质问题尚无公认的看法,亟待深入研究解决。

在本项目执行过程中,我们曾先后两次前往金厂峪矿区及其外围进行详细的野外工作,在地表观测了13条剖面,在井下观测了5个中段7条坑道,并系统地采集了各种类型岩石、矿石标本共452件。在野外工作的基础上,进行了系统的室内分析测试工作。

本书由国家地震局地质研究所林传勇、何永年、陈孝德、史兰斌、张小鸥完成,长春黄金研究所朱奉三教授为技术顾问。在金厂峪矿区工作期间,得到矿领导的大力支持和协助;矿地质处祁学义处长亲自指导野外工作,地质处郝荣、张继林工程师共同参加野外工作;地质科龚瑞助科长提供了各方面的方便条件;工作期间还经常得到国家黄金管理局地矿办公室周传新总工程师、寸圭主任及叶胜勇、韩冰工程师的及时指导和大力支持;张兰凤为本书清绘图件;在此谨表诚挚的谢意。

目 录

第一章 韧性剪切带的基本特征和研究方法	(1)
第一节 韧性剪切带的基本概念	(1)
第二节 地壳断裂带的概念模式	(1)
第三节 韧性剪切带的变形岩石及其变形机制	(3)
第四节 韧性剪切带的宏观构造特征	(4)
第五节 韧性剪切带的微观构造特征	(5)
第六节 韧性剪切带变形岩石的组构特征	(8)
第七节 韧性剪切带的研究方法	(9)
第二章 区域地质	(11)
第一节 区域构造及地壳演化	(11)
第二节 区域地层	(13)
第三节 岩浆作用与混合岩化	(15)
第三章 金厂峪金矿矿床地质特征	(16)
第一节 矿区构造	(16)
第二节 矿区内的岩石与岩脉	(18)
第三节 矿体与脉带	(24)
第四节 矿石的结构构造和矿物组成	(25)
第五节 黄铁矿和石英的主要特征	(27)
第六节 金的矿物特征	(32)
第七节 成矿阶段的划分	(35)
第四章 金厂峪矿区韧性剪切带的基本特征	(37)
第一节 研究现状	(37)
第二节 矿区韧性剪切带的几何特征	(37)
第三节 矿区韧性剪切带的宏观特征	(38)
第四节 矿区韧性剪切带的变形岩石及特征	(40)
第五节 矿区韧性剪切带岩石的典型显微构造特征	(41)
第六节 矿区变形矿物的位错亚构造	(42)
第七节 矿区韧性剪切带岩石的组构特征	(45)
第八节 矿区韧性剪切带剪切指向的确定	(49)
第五章 金厂峪矿区韧性剪切带的形成环境	(52)
第一节 显微构造应力计的实验基础	(52)
第二节 矿区韧性剪切带的差异应力	(52)

第三节	矿区韧性剪切带形成温度	(56)
第四节	矿区韧性剪切带的应变速率	(58)
第五节	关于矿区韧性剪切带形成环境的讨论	(60)
第六章	金厂峪矿区韧性剪切带与金矿化的关系	(62)
第一节	矿区韧性剪切带的演化发育过程	(62)
第二节	矿区韧性剪切带发育过程中化学成分的变化	(63)
第三节	金矿的成矿作用	(68)
第四节	金厂峪金矿成矿时代的讨论	(74)
第五节	矿区韧性剪切带与金矿化的关系	(75)
第七章	结束语	(77)
第一节	韧性剪切是金厂峪金矿的主要成矿机制	(77)
第二节	韧性剪切带是金厂峪金矿的主要控矿构造	(78)
第三节	金厂峪金矿的成因类型	(78)
第四节	找矿标志和方向	(78)
第五节	远景预测	(79)
参考文献	(81)
照片说明	(84)
照片		

第一章 韧性剪切带的基本特征和研究方法

虽然早在一个世纪以前就有人注意到韧性剪切带这一地质现象，但是韧性剪切带概念的完整、系统地提出则是十几年来事 (Sibson, 1977; Ramsay, 1980)。目前，韧性剪切带的研究在我国已经得到很大的重视并已取得一定的进展。但是，对于韧性剪切带的基本特征和研究方法的认识还不完全一致，因此还有必要进行探讨。本章将根据目前国内外的最新进展着重介绍韧性剪切带的基本特征和研究方法，特别是显微构造研究方法。

第一节 韧性剪切带的基本概念

在天然变形地质体中，强烈的变形常常局限于两边近平行的相对狭窄的带内，这种狭窄的带便被定义为剪切带 (Ramsay, 1980)。根据变形的性质，剪切带可以划分为以下三种类型：

(1) 脆性剪切带：即通常所说的断层，其特征是带的两侧之间存在有一个不连续面 (图 1-1a)。这种脆性剪切带一般是在造山应力作用下，岩石发生脆性破裂和位移的产物。

(2) 脆-韧性剪切带：它是天然地质体中一种过渡性的剪切带。在这种剪切带中两壁在一定范围内可以显示出塑性变形。断层两侧相对运动引起的局部牵引效应可以归入此类型 (图 1-1b)。另外还有一种剪切带，它没有明显的边界，但是带内部由剪切运动产生的张性裂隙呈雁行状排列，并以 30° 或较大的角度与剪切带相交 (图 1-1c)，有时可呈 S 型；张性裂隙之间的岩石通常显示某种程度的塑性变形，这种剪切带也可归入该类型。

(3) 韧性剪切带：根据 Ramsay (1980) 的定义，韧性剪切带是“带内的变形以及带两侧的相对位移完全由韧性流动来完成的剪切带”。

在这种剪切带中看不到断面，而且如果围岩中有标志层穿过剪切带，标志层可以发生偏转或改变厚度但不中断 (图 1-1d)。这种剪切带正是本书重点研究的对象。

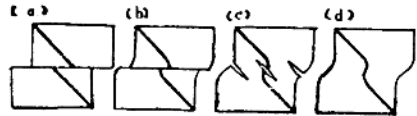


图 1-1 剪切带的基本类型 (据 Ramsay, 1980)

(a) 脆性剪切带；(b)、(c) 脆-韧性剪切带；
(d) 韧性剪切带

韧性剪切带之所以近年来受到重视，是因为它不仅在地壳及上地幔的演化历史中起着重要的作用，而且它也是岩石块体在中到高级变质条件下改变其形状的主要变形模式。同时，它也常常是地壳浅部脆性剪切带或断层在深部的对应部分。近年来，还发现韧性剪切带常常与矿化作用有密切的关系。

第二节 地壳断裂带的概念模式

上述剪切带的三种基本类型，实际上反映了不同的变形环境，它们是在地壳不同深度层次变形作用的产物。1977年，Sibson 根据对断层岩的研究结果，并结合岩石力学和实验变形资料，首次提出大陆断裂带的概念模式。该模式合理地概括了不同类型的剪切带及其中的变

形作用。目前，该模式已得到完善和补充，并已得到广泛的应用。

根据 Sibson 的模式，随着深度的变化，地壳断裂带可以分成上下两层，上层属于弹性摩擦体系 (Elastic frictional regime)，下层属于准塑性体系 (Quasi-plastic regime)。上下两层的界线大致在地壳的 12km 深处 (图 1-2)。在上层摩擦体系中，断裂带的变形作用主要表现为脆性破裂，亦即上一节所述的脆性剪切带。断层作用产生的变形岩石 (断层岩) 随深度的变化依次为断层泥、断层角砾岩和碎裂岩等，在干条件下可能还有假玄武玻璃。岩石的变形机制主要为摩擦破裂和碎裂作用。下层准塑性体系中，断层活动主要表现为塑性流变，亦即上一节所述的韧性剪切带。断层作用的产物主要为糜棱岩系列的断层岩。这里岩石的主要变形机制为扩散蠕变和位错蠕变。实际上，这两层并不是截然分开的，其间存在有过渡带，称之为脆-韧性转换带。在转换带内，断层活动有可能相当于上一节所述的脆-韧性剪切带，其中的岩石变形机制既有碎裂作用，又有连续的塑性变形机制，是一种复杂的情况。相应地，转换带中的断层岩既有碎裂岩，也可有糜棱岩。

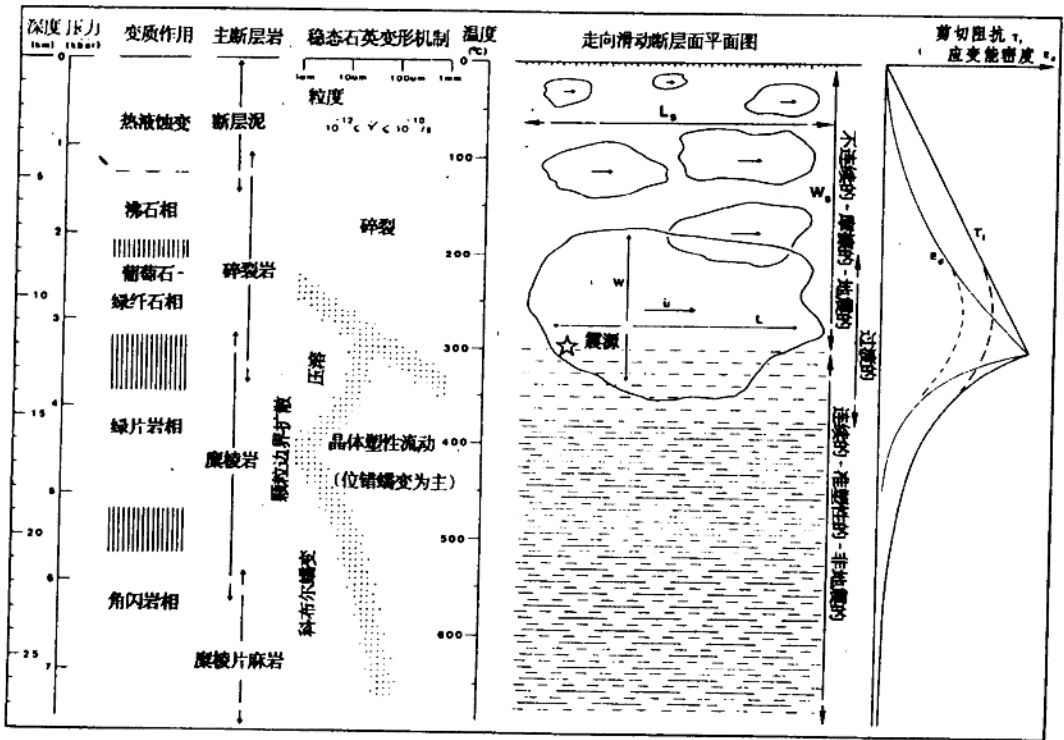


图 1-2 大陆断裂带的概念模式 (据 Sibson, 1986)

(1 bar = 10⁵ Pa)

近年来，对于脆-韧性转换带的研究给予了很大的重视，因为它是大陆破坏性地震常常发生的地方，同时它在大陆断裂带的演化发育历史中起着重要的作用。美国地球物理学会出版一本论文集专门论述岩石的脆-韧性转换变形。Scholz (1988) 和 Shimamoto (1989) 提出的

对大陆断裂带模式的修改意见,也集中表现在对脆-韧性转换带的不同认识。例如,Shimamoto (1989)提出,S-C 糜棱岩应形成于半韧性体系中 (Semiductile regime),而不是在完全韧性体系中 (fully ductile regime)。因此,提出在脆-韧性转换带内还可进一步划分出半脆性 (semibrittle) 和半韧性 (semiductile) 区。

第三节 韧性剪切带的变形岩石及其变形机制

由上一节的讨论中可见,韧性剪切带内的变形岩石是糜棱岩。因此,从岩石变形的角度来说,糜棱岩带就是韧性剪切带。但是,由于发生韧性剪切的环境条件的不同(温度、压力、差异应力、应变速率及流体的存在等),以及受到剪切变形的介质不同(组成岩石的矿物和矿物组合的不同),韧性剪切带内的变形岩石常常不是单一的,甚至有时候韧性剪切带内的变形岩石不一定具有糜棱岩通常所有的特征(何永年等,1988)。还应强调的是,作为韧性剪切带变形产物的糜棱岩,其概念及含义有别于传统的糜棱岩概念。过去所说的糜棱岩是断层带中高度破碎、研磨的细粒岩石,因此实际上是脆性破裂的产物,而不是韧性剪切的产物。自从韧性剪切带的概念提出以来,对糜棱岩有了新的认识并赋予新的含义。为了统一对糜棱岩的认识,以及消除在“糜棱岩”这一术语的应用中的混乱现象,1981年在美国曾经召开过“糜棱岩的含义及其成因”国际学术讨论会。会议对糜棱岩给予如下的定义:①出现在相对狭窄的带内,即韧性剪切带内;②与围岩(原岩)相比,粒度有明显的减小;③与围岩(原岩)相比,有强化的叶理和拉伸线理。同时,还强调指出,糜棱岩粒度的细化机制不是碎裂作用,而是动态重结晶作用。上述定义将糜棱岩和碎裂岩明确地区分开来(Tullis等,1983)。

糜棱岩通常由残碎斑晶和重结晶基质两个部分组成。根据两者含量的不同(实际上也反映变形程度的不同),糜棱岩还可进一步划分为初糜棱岩、糜棱岩和超糜棱岩三种。根据 Weiss 等人(1985)的定义,初糜棱岩中残碎斑晶占50%以上,它发育有微弱的叶理;糜棱岩中残碎斑晶占10%—50%,它具有发育很好的叶理;超糜棱岩中残碎斑晶少于10%,粒度普遍小于0.5mm。此外,国外文献中还保留有糜棱片岩(mylonite schist)、糜棱片麻岩(mylonite gneiss)、干糜岩(phylomylonite)等术语。其中,糜棱片岩指的是基质以片状矿物为主的糜棱岩。

糜棱岩是韧性剪切带中岩石发生塑性流变的产物。在韧性剪切过程中,岩石是通过什么途径来完成这种塑性流变呢?大量的野外和实验研究,特别是对糜棱岩的显微构造研究,表明韧性剪切带中岩石的流变机制主要为扩散蠕变、位错蠕变以及颗粒边界滑移所控制的超塑性流动。显微破裂也常常见于韧性剪切过程中,但它不起主导作用。

扩散蠕变(diffusion creep)是通过物质的扩散转移导致矿物颗粒形态发生变化(变形)的过程。它可以在晶粒内部进行,也可以沿颗粒边界发生。一般发生在温度较低的条件(<0.5 T_m)。压溶作用(产生压力影构造)就属于这种变形机制。

在低温条件下,位错的运动主要通过位错在滑移面上的滑移来实现,称之为位错滑移(dislocation glide)。这种低温塑性变形导致位错缠结(dislocation tangles)的形成,从而阻止位错的进一步运动,引起加工硬化。

在高温条件下(通常为 $T > 0.5T_m$),位错可以通过攀移和交叉滑移而离开滑移面运动,从而降低加工硬化,提高物质的韧性。这种高温塑性变形机制称之为位错蠕变(dislocation cre-

ep)。位错蠕变产生的典型位错构造可以有以下几种：①稳定的自由位错密度；②发育很好的亚晶粒构造，它是由位错的重新排列所形成的低角度边界（亚晶界）围限而成的有少许方位偏差的小区域；③由高角度晶界围限而成的新晶粒，它是由动态重结晶作用（包括颗粒边界迁移和亚晶粒旋转机制）形成的（Knipe, 1989）。

由脆性变形机制向位错蠕变机制的转换，不同的矿物有不同的转换温度。如石英的转换温度为 300℃，而长石则要高一些，钾长石一般为 400℃，钠长石则为 500℃左右（Sibson, 1986）。

超塑性流动（superplastic flow）一般发生在温度较高的条件下，而且主要发生在岩石粒度特别细小的情况下，由于粒度特别细小，颗粒边界的面积就非常大，因此应力和应变几乎全部集中在颗粒边界上。变形是通过颗粒边界滑移来完成的。由超塑性流动而变形的岩石的特征是，由非常细小的近等轴状颗粒组成，而且晶粒内部不显示任何的应变，也不具有优选方位。

除了上述的变形机制之外，韧性剪切带岩石还常见有扭折（kinking）和机械双晶作用（mechanical twinning）的发生。但是，一般认为这些塑性变形机制不可能产生大的应变（Kerrich & Allison, 1978），因此不占主导地位。

应当指出的是，岩石对变形作用的反应取决于环境和岩性因素。环境因素主要包括温度、压力、剪应力以及流体压力等，而岩性因素则包括岩石的矿物成分、结构构造和渗透率等。这些因素的综合决定了物质的作用过程（变形机制的活动），以及发育的显微构造（Knipe, 1989），因此，有时是相当复杂的。

第四节 韧性剪切带的宏观构造特征

根据其相对位移及产状，韧性剪切带也可以划分为平移、滑脱、逆冲、推覆以及正韧性剪切带（图 1-3），其规模可从微观到上百公里。这些类型可以和地壳浅部的脆性断层相对应。

但是，不论它属于那一种类型，以及规模如何，韧性剪切带都有以下的宏观构造特征：

（1）韧性剪切带可以看成是平面应变中的简单剪切，它既可以有体积的变化，也可以没有体积的变化。关于剪切带的几何性质 Ramsay（1980）已有详细的分析，这里不再赘述。

（2）韧性剪切带中普遍发育有叶理。在第二节中已经提到，韧性剪切带的变形岩石是糜棱岩，其特征是发育有强化的叶理。这种叶理常常肉眼也可观测到，它构成韧性剪切带的独特的宏观构造之一。叶理由片状矿物以及拉伸的矿物条带的定向排列构成。韧性剪切带中常可见到两组叶理，一是和剪切带边界平行的剪切叶理（C），另一组是糜棱叶理 S，两者以小角度斜交。这种组构称为 S-C 组构（Lister & Snoke, 1984），它可以指示剪切指向（图 1-4）。

（3）韧性剪切带中普遍发育有拉伸线理。同样，这也取决于糜棱岩的性质。拉伸线理也常常是肉眼可见的，它主要由拉伸的单矿物和矿物集合体组成，有时拉伸的包裹体和捕虏体以及杆状构造和窗根构造等也可构成拉伸线理。拉伸线理指示剪切方向，因此具有十分重要的意义。

（4）韧性剪切带中常常发育有剪切褶皱。剪切褶皱主要有两种型式：

①“a”型褶皱：它常发育在韧性剪切带的边界附近，表现为平卧或近平卧的剪切褶皱。褶皱轴与拉伸线理平行，与剪切方向一致，常表现为窗根构造（图 1-5）。

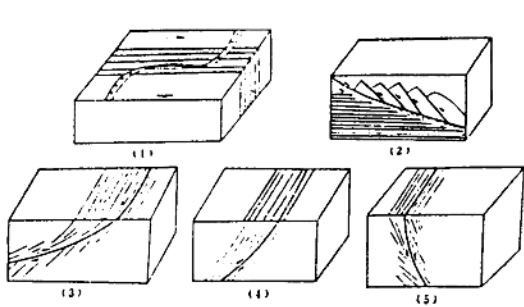


图 1-3 韧性剪切带的基本类型

- (1) 韧性平移剪切带；(2) 韧性推覆剪切带；
 (3) 韧性滑脱剪切带；(4) 韧性逆冲剪切带；
 (5) 韧性正剪切带

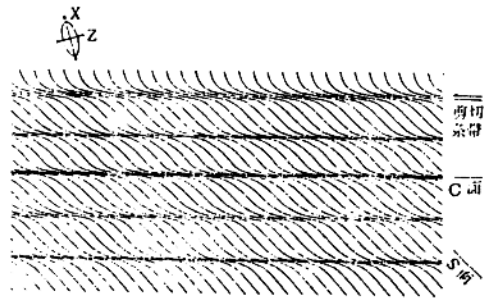


图 1-4 S-C 组构

S 为糜棱叶理；C 为剪切叶理

② 鞘褶皱：它是一种特殊的 a 型褶皱，其轴平行于拉伸线理（剪切方向），而其头部转折线斜交或垂直褶皱轴，它的横切面呈封闭的眼球状构造（图 1-6）。鞘褶皱是韧性剪切带的独特的宏观构造之一。

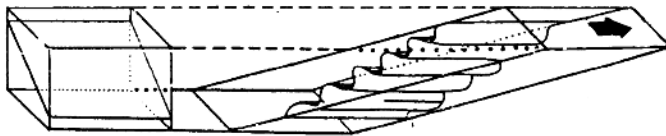


图 1-5 褶皱轴平行剪切方向的 a 型褶皱（据 Malavielle, 1983）

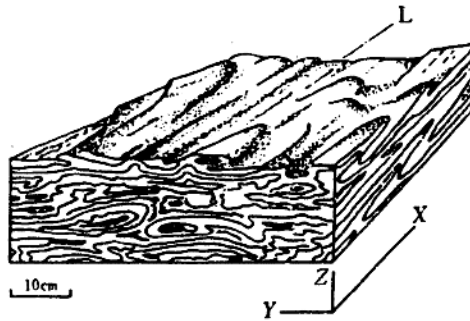


图 1-6 鞘褶皱的形态。L 为位伸线理（据 Malavielle, 1983）

第五节 韧性剪切带的微观构造特征

如上所述，韧性剪切带两侧的位移以及带内的变形完全是由韧性流动来实现的，因此，韧性剪切带具有反映韧性流动的独特显微构造特征。这些变形显微构造主要有以下几种类型：

- (1) 核幔构造：这是长英质糜棱岩中最为常见的显微构造之一。它是由细小的重结晶颗

粒（构成晶幔部分）围绕具有一定应变的石英残斑（晶核部分）而构成，是动态重结晶的重要标志。随着动态重结晶作用的增强，晶幔部分逐渐增加，而晶核部分逐渐减小，最后完全被重结晶新晶粒所取代。这一术语首先由 White (1976) 提出，看来现在已被广泛接受。石英残斑的应变常表现为波状消光、变形纹、亚晶粒构造的发育。

(2) 亚晶粒构造：所谓亚晶粒是指一个晶体内，由结晶学方位有小角度偏离 ($\theta < 12^\circ$) 的区域所构成的多边形亚构造，它们之间被低角度边界（亦即位错壁）所分隔。在光学显微镜下，亚晶粒构造表现为晶粒的不均匀消光（补丁状消光）或带状消光。由于位错壁是由位错攀移造成的，因此是位错蠕变的重要标志之一。

(3) 石英缎带或集体体条带：这是长英质糜棱岩最常见的显微构造之一。石英缎带是由石英一单晶体高度拉伸构成，其长宽比常常可达 10:1，甚至 100:1。石英缎带常发育有波状消光和变形纹等，它们常常定向排列构成拉伸线理。石英集体体条带是由许多石英颗粒组成，其宽度可以是一个颗粒，也可以是多个颗粒。两端常尖灭，形成长透镜体状。Simpson (1983) 曾详细讨论过韧性剪切带中石英集体体条带的形成过程。（图 1-7）。

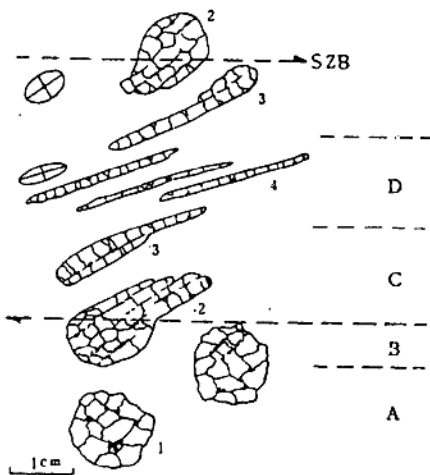


图 1-7 韧性剪切带中石英集体体条带的形成过程（据 Simpson, 1983）
图中 SZB 为剪切带边界

(4) 不对称的显微构造特征：韧性剪切带的变形岩石中常常发育有相对于叶理面不对称的显微构造，它们指示剪切指向。这些显微构造包括不对称的眼球体（常常由长石构成）、压力影，以及错位的破裂刚性矿物、S-C 构造、与叶理面斜交的亚晶粒、重结晶颗粒等。Simpson 和 Schmid (1983) 以及 Paschier 和 Simpson (1986) 曾详述如何利用这些显微构造标志来判断剪切指向，这里不再赘述。

除了上述显微构造以外，韧性剪切带的变形岩石中还常发育有变形纹、变形条带、机械双晶、扭折带等。这些变形显微构造都是塑性变形的产物，但不一定是韧性剪切的产物，不能作为韧性剪切带的判据。应当指出，韧性剪切带的变形岩石中还常常可以发现显微破裂的发育。一方面由于岩石的组成矿物物理性质的不同，对韧性变形的反应也不同，例如在长英质糜棱岩中，长石比石英

难于发生韧性变形，因此常常发育有显微破裂。另一方面，韧性失稳常常导致微破裂的产生。但是，它们在韧性剪切带中不占主导地位。

韧性剪切带的变形岩石的组成矿物中发育有各种各样的位错亚构造，它们是在韧性剪切过程中位错滑移和攀移的结果。常见的位错亚构造有以下几种：

(1) 自由位错：指的是晶体中单个离散的位错，它们没有被编织进任何的位错“组织”（如位错壁）中去。自由位错在低温条件下常常是平直的，而在高温条件下则常常是弯曲的。自由位错密度（单位面积中自由位错的总长度）与差异应力的直接有关，因此是一种地质应力计。

(2) 位错缠结 (dislocation tangle)：位错在滑移的过程中互相缠结在一起，它是位错的

塞积，有时可构成所谓的“胞室构造”。位错缠结导致应变硬化，晶体的强度提高。位错缠结是位错滑移的典型位错亚构造，是低温塑性变形的标志。

(3) 位错列和位错壁构造：位错运动过程中，刃型位错通过攀移，螺型位错通过交叉滑移，就可以使位错平行地排列起来，这样的排列叫做位错列 (dislocation array)。这里，是从单纯的排列形态来称呼的，如果进一步考虑到位错的性质，则称之为位错壁。刃型位错通过攀移形式以一定的间隔排列起来，便形成了位错倾斜壁 (dislocation tilt wall)，其形成过程如图 1-8 所示。刃型位错在排列过程中由于几何学的需要，形成了两侧晶格的方位偏转 (图 1-8c)。如果是一系列螺型位错通过交叉滑移排列起来便形成纯扭转壁 (pure twist wall)，或者称之为位错网格 (dislocation network)。图 1-9 所示为位错扭转壁的原子排列情况。由于这种位错壁看起来象是上层原子与下层原子之间相对扭转了一个小角度，所以称之为扭转壁。位错壁是一种低角度边界，或可称之为亚晶界。

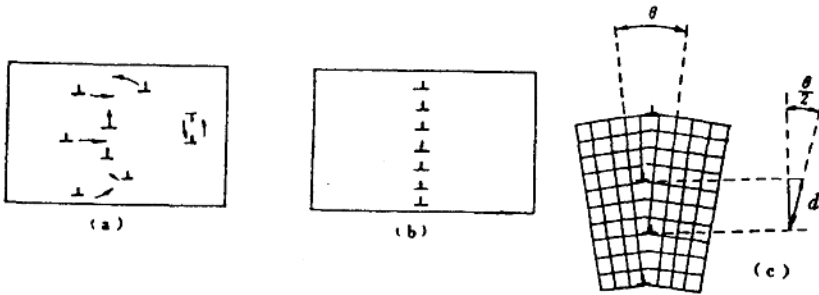


图 1-8 位错倾斜壁形成过程 (a, b) 以及对称型位错倾斜壁两侧的方位偏差
图中 d 为两个位错之间的距离； θ 为偏转角

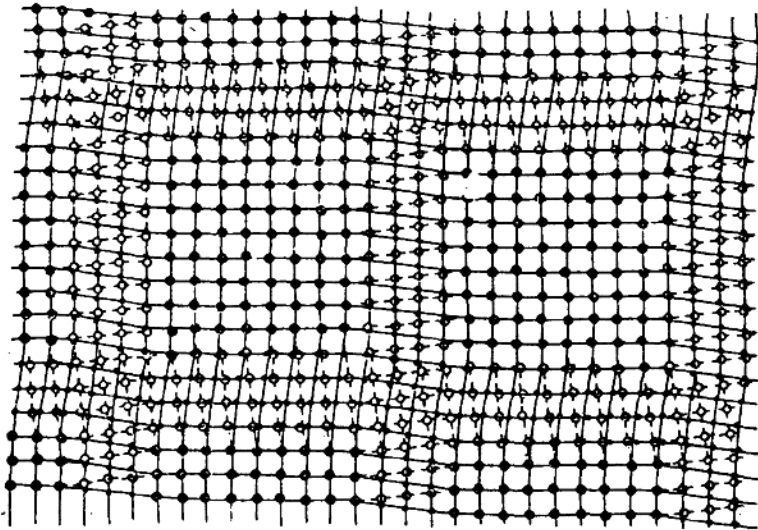


图 1-9 纯位错扭转壁，上下两层少许旋转的立方格架重叠形成螺型位错构成的方格网

(4) 亚晶粒构造：位错壁两侧的晶格方位发生小角度偏转，这样一个晶体就会被若干个位错壁分割成为晶格方位不同的区域，这就是亚晶粒 (subgrain)。亚晶粒的大小也是一种常用的地质应力计。

(5) 位错弓弯和位错环：当某一位错线的两端被钉扎时，在持续的外施应力作用下，位错线会发生弯曲，形成圆弧状构造，称为位错弓弯 (dislocation bowing-out)。位错弓弯的进一步发育便形成位错环 (dislocation loop)。位错环还可以通过位错偶极子 (dislocation dipole) 的破裂来产生。所谓位错偶极子是指由中等大小的位错割阶形成的，由柏格斯矢量相同但符号相反的位错组成的位错对。由位错偶极子破裂形成的位错环一般比较小。

上述位错构造中，平直的位错线、位错缠结以及由位错缠结构成的胞室构造都是低温塑性变形的产物，而位错壁、亚晶粒构造、位错环等则是高温塑性变形的产物 (Knipe, 1989)。

以上显微构造特征在所研究的矿区中均有所发育，读者可以参照后面有关章节的显微照片。

第六节 韧性剪切带变形岩石的组构特征

在韧性剪切带的研究中，组构分析是不可缺少的，特别是当剪切指向不易确定的情况下，组构分析是有效的手段。在长英质糜棱岩中，常常研究石英的组构特征。White (1980) 曾总结韧性剪切带中石英的 C 轴组构特征。他把糜棱岩中石英的组构分成三种类型 (图 1-10)：

(1) 交叉环带 I 型：它是由两个与叶理面斜交的交叉环带组成，其中发育有与叶理面成小角度的一对极密部 (图 1-10a)。这种组构反映，在变形过程中石英的活动滑移系是菱面滑移系；

(2) 交叉环带 II 型：它也是由两个与叶理面斜交的交叉环带组成，其中发育有平行于叶理面而垂直于拉伸线理的极密部 (图 1-10b)。这一组构型式表明，在变形过程中，石英的活动滑移系是柱面滑移系；

(3) 点极密型：它以与叶理面和拉伸线理成高角度的点极密为特征。这一组构型式表明，在变形过程中石英的活动滑移系为底面滑移系。极密部的不对称是韧性剪切的结果。

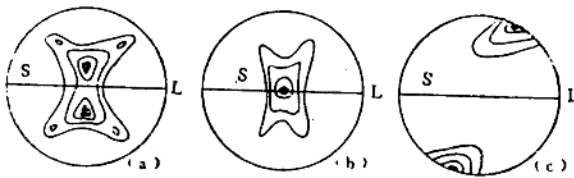


图 1-10 糜棱岩中石英的 C 轴组构

(据 White, 1980)

(a) 交叉环带 I 型；(b) 交叉环带 II 型；(c) 点极密型

S 为叶理面，L 为拉伸线理

由于变形过程中石英的活动滑移系取决于变形的条件 (温度和压力等)，因此根据组构型式可以推断变形的条件，这也是组构分析的重要意义之一。应该指出的是，韧性剪切带中的组构有时是复杂的，韧性剪切带的不同部位组构特征可能不同，同时后期的褶皱作用也可能改变糜棱岩的组构型式。Lister 和 Williams (1976) 曾提出韧性剪切带

中石英 C 轴组构的演化趋势有两种：一种是极密和环带随叶理面的旋转而旋转，另一种则不随叶理面而变化。总之，在韧性剪切带研究中，组构分析可以提供许多有用的资料。

第七节 韧性剪切带的研究方法

韧性剪切带的研究应包括野外工作和室内分析两个部分。我们认为韧性剪切带的研究工作应包括以下内容。

1. 野外工作

(1) 韧性剪切带的确定：如同上面已经提到的那样，韧性剪切带具有其特定的宏观构造特征，根据这些特征在野外有可能判定韧性剪切带的存在。首先，假如某一边界两侧岩石变形程度明显不同，而且其中的标志层有明显的偏转而没有间断，则可能存在有韧性剪切带。由于韧性剪切带的变形岩石常常是糜棱岩，因此糜棱岩的野外鉴定具有十分重要的意义。根据变形岩石是否具有强化的叶理和拉伸线理，以及相对于围岩粒度是否细化等，可以在野外初步判定是否为糜棱岩。当然，有时还需要在室内进一步确定。此外，a型褶皱和鞘褶皱，不对称构造等的发育，也是韧性剪切带的判断依据。在此基础上，还要进一步详细确定韧性剪切带的几何学特征，即其形态、规模（延伸长度及宽度）以及向深部的变化等。应当指出，由于韧性剪切带是个薄弱带，因此后期的脆性断裂常常沿韧性剪切带边界发育，造成糜棱岩和碎裂岩系列变形岩石共存的复杂局面，这时更应详细进行研究。

(2) 叶理和拉伸线理的观测：叶理和拉伸线理在韧性剪切带中具有十分重要的意义。在野外对叶理和拉伸线理进行详细的观测和测定，可以帮助我们确定韧性剪切带的性质及几何学特征等。在野外，要特别注意叶理面及拉伸线理产状的变化，以及它们是否有不同的期次；还要注意区分糜棱叶理以及剪切叶理，以确定是否为S-C糜棱岩。总之，在野外进行大量的统计测定是十分必要的。

(3) 不对称构造的观测：这种观测应当在XZ面上进行。注意观测是否有不对称的眼球体、不对称的压力影，以及错位的破裂刚性体等，所有这些都是剪切指向的重要标志。

(4) 定向标本的采集：采集定向标本的目的是为了在室内进一步开展组构分析、根据显微构造判断剪切指向、有限应变分析等。在野外应采集包含有叶理面和拉伸线理的定向标本，测定这些组构要素的产状。在室内切制互相垂直的定向薄片。一般可选取XZ和XY切面。

2. 室内工作

(1) 显微构造研究：除了常规的显微镜下观测（包括岩石学和矿物学观测）以外，显微构造观测在韧性剪切带研究中具有十分重要的意义。首先，糜棱岩的确定单靠野外观测往往难于完成，而需要根据显微构造特征来判定。White (1988)曾指出，糜棱岩和区域变质片岩在野外有时难以区分，而将糜棱岩误认为片岩将导致构造格架的错误划分以及对大地构造的错解释，从而对找矿工作毫无帮助。其次，显微构造研究的目的在于确定变形作用的环境和变形机制。例如，石英变形纹的不同类型反映不同的变形环境，亚晶粒构造反映位错蠕变机制等。此外，详细的显微构造研究，还可以揭示塑性变形的各个阶段和韧性剪切带的演化发育历史。

(2) 位错亚构造研究：位错的运动是矿物塑性流变的本质，因此，位错亚构造的研究，不仅能够揭示岩石变形的微观变形机制，而且也可提供有关变形环境的可靠依据。例如，平直的位错线和位错缠结是位错滑移的结果，反映低温塑性变形；而位错壁、亚晶粒构造和位错环等则是位错蠕变的结果，属高温塑性变形。位错亚构造的研究，一般需要借助于高压透射

电子显微镜，其缺点则是成本较高。此外，还可借助化学浸蚀法，其优点是观测的视域大，成本低，其缺点则是放大倍数小，而且不能确定柏格斯矢量。

(3) 组构分析：包括组构的运动学和动力学分析。这种分析应在定向薄片中进行，一般是XZ和XY切面。组构的运动学分析，可以提供有关韧性剪切带中组构演化的信息，同时根据组构的不对称可以判断剪切指向。根据由组构型式所确定的活动滑移系还可以判断变形环境。组构的动力学分析则可提供有关韧性剪切带形成过程的主应力方位。有关组构分析的具体作法，已有许多专著予以详述（如何永年等，1988），这里不再赘述。

(4) 剪切指向的确定：前面已经提到，韧性剪切带的变形岩石中常发育有可以指示剪切指向的显微构造特征。这种观测应在垂直于叶理面而平行于拉伸线理切制的薄片中进行。关于利用这些显微构造特征确定剪切指向的具体细节，读者可参考本书的有关章节。

(5) 韧性剪切带形成环境的确定：了解韧性剪切带的形成环境（包括温度、压力、差异应力、应变速率等）对于揭示韧性剪切带与金矿化的关系具有十分重要的意义。温度、压力的确定，除了可以利用目前已提出的地质温压计以外，前面提到的显微构造特征等也可提供依据。差异应力则可利用显微构造应力计来推导，目前已经提出的应力计有自由位错密度、亚晶粒粒度、动态重结晶颗粒粒度等应力计。一旦温度和差异应力确定之后，便可利用岩石的高温稳态流变律来确定应变速率。关于韧性剪切带形成环境的具体确定方法本书第五章将详细介绍。

(6) 韧性剪切带化学成分的变化：由于韧性剪切带是应变软化带或弱化带，因此它有利于流体的贯入，从而导致原先不含水或含水很少的矿物转变成为含水或富水的矿物组合，这一转变的结果常常是退变质作用。例如，黑云母→绿泥石，斜长石→绢云母，角闪石→绿泥石、绿帘石，单斜辉石→透闪石、阳起石，斜方辉石→黑云母等。正是由于伴随有变质作用，使得韧性剪切带不仅是重要的控矿构造，而且也是重要的成矿机制。因此，韧性剪切带中化学成分的变化是重要的研究内容，应当给予足够的重视。

(7) 有限应变分析：有限应变分析是确定变形机制，了解变形岩石中应变分布规律的一种有效手段，因此也是韧性剪切带研究的重要内容之一。有限应变分析可以通过应变标志（如石英颗粒、鲕粒、岩脉等）进行应变椭球体分析。