

谨将此书献给第三十届国际地质大会



003

韧性剪切带与成矿

何绍勋 段嘉瑞 刘继顺 张曾荣 著



地质出版社

D411-368

Dedicated to the 30th International Geological Congress

韧性剪切带与成矿

DUCTILE SHEAR ZONE STRUCTURE AND METALLOGENY

He Shaoxun, Duan Jiarui, Liu Jishun and Zhang Zengrong

GEOLOGICAL PUBLISHING HOUSE
BEIJING

ISBN 7-116-02085-3



9 787116 020856 >

ISBN 7-116-02085-3

P • 1568 定价: 17.50 元

地

P611-208

社

韧性剪切带与成矿

何绍勋 段嘉瑞 刘继顺 张曾荣 著

地质出版社

·北京·

内 容 提 要

本书共分四部分。第一部分概要介绍了有关岩石变形的基本知识,特别是韧性变形的机制和过程以及韧性剪切带与区域性构造的关系;第二部分详细介绍了韧性剪切带的构造特征和研究方法;第三部分以金矿为例介绍了韧性剪切带与成矿作用的关系,探讨了各种成矿作用的论点,并提出了作者的初步认识;第四部分介绍了我国与韧性剪切带有关的三个金矿床实例。

本书可供广大地质科技人员以及高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

韧性剪切带与成矿/何绍勋等著.-北京:地质出版社,1996.6

ISBN 7-116-02085-3

I. 韧… II. 何… III. 剪切带,韧性-关系-成矿作用 IV. P611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 00983 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:张荣昌 王学明

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:11.5 字数:280000

1996 年 6 月北京第一版·1996 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—800 册 定价:17.50 元

ISBN 7-116-02085-3

P·1568



谨将此书献给

第三十届国际地质大会

前 言

断裂构造是地壳和岩石圈最基本的构造型式。巨大的断裂,控制着地壳岩石圈的发展和演化。活动性断裂不仅会引起地震,而且会影响环境。断裂构造是工程及水文地质最重要的因素。断裂常常是岩浆及成矿物质活动通道及赋存场所,因而成为最重要的控矿因素。因此,断裂构造历来是人们研究的重点。

断裂是最复杂的构造类型,但是,长期以来,人们都把断裂简单地理解为岩石的破裂和位移。实际上,不同的断裂构造,由于在构造层次及变形域方面存在差异,因而其形成时的环境条件——温度、压力、流体、差异应力及应变速率等方面大不相同,它们的特征也有很大的差异。近代地质学的一个重要观点,就是不同层次和不同变形域中形成的构造类型和特征是不相同的。据此,断裂构造可以划分为脆性断层、韧性断层和脆-韧性过渡断层三大系列。

脆性断层系列和脆-韧性断层系列就是传统上的断层,它的理论和研究方法已广为人知,并获得广泛的应用。

但是,对韧性断层系列的研究历史还不长。自从英国构造地质学家 Ramsay 于 1970 年提出“韧性剪切带”的概念以来,至今不过 20 余年。它的研究热潮,在西欧,是 70 年代末开始的,其发展极为迅速,至今已具有较完善的理论和较成熟的研究方法,并且向剪切带构造地球化学及与成矿作用的关系等方面有了更深层次的发展。

在我国,从 80 年代初开始展开韧性剪切带的研究,并取得了一些有价值的成果,在找矿勘探及其它地质生产实践中也开始应用。为了使韧性剪切带这一重要的构造类型在生产实践中获得进一步的推广和应用,让更多的地质工作者都了解和掌握韧性剪切带构造的基本理论、研究方法、研究现状及其与成矿的关系等内容,作者接受中国有色金属工业总公司地质勘查总局矿产地质情报网下达的任务,特编写了本专著。

本书共分四部分:第一部分概要地介绍了岩石变形的基本知识,特别是韧性变形的形成机制和过程,以及韧性剪切带与区域构造的关系。第二部分介绍韧性剪切带的基本理论与研究方法,并尽可能包括国内、外最近的研究成果。第三部分介绍韧性剪切带与成矿的关系,这是一个具有理论和实践意义的部分,但无论在国内或国外,对其研究都还处于初期阶段,尚无系统的理论和完善的论述。作者根据自己的研究,并参考了国内外研究的成果,提出一些见解,以供读者参考。第四部分是与韧性剪切带构造有关的几个矿床实例。目前,韧性剪切带与成矿关系的研究主要集中在金矿,所以介绍的实例也都是金矿。由于韧性剪切带与成矿的研究尚处于初期阶段,认识还不统一,各实例的观点明显存在差异,为了客观反映研究现状,各实例基本上照各个作者的原文刊载。

本书各部分编写执笔分工是:第一和第四部分由张曾荣和何绍勋负责;第二部分由段嘉瑞执笔;第三部分由刘继顺负责。全书由何绍勋、段嘉瑞和任荣恩负责组织及审定。此外,王幼明、孔华、崔凤英等参与了本书的资料整理等各项有关的工作。

本书是在中国有色金属工业总公司地质勘查总局直接领导下,由矿产地质信息网边绍

志高工组织编者完成的。中国地质矿产信息院的尚庆辉研究员为本书提供了大量参考书,有色总公司地勘总局的郑之英教授审阅了书稿全文,并提出了许多宝贵意见,有色总公司矿产地质信息网的王学明工程师对本书的文稿进行了全面而细致的编辑加工,并纠正了不少疏漏之处,在此一并致以衷心的感谢。

限于作者水平,本书难免有错漏之处,敬请读者指正。

作 者

1995年5月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 韧性剪切带的研究简史	(2)
第二节 韧性剪切带的基本知识	(2)
第三节 韧性变形的机制与过程	(5)
第四节 构造层次的划分	(12)
第五节 韧性剪切带的研究现状	(14)
第二章 韧性剪切带的构造特征	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 韧性剪切带的几何学特征	(23)
第三节 韧性剪切带的变形特征	(27)
第四节 韧性剪切带的宏观构造	(30)
第五节 韧性剪切带的微观构造	(39)
第六节 断层岩	(49)
第七节 韧性剪切带的构造化学作用	(62)
第八节 韧性剪切带的构造分析	(68)
第九节 韧性剪切带的分类	(82)
第十节 韧性剪切带的研究方法	(95)
第三章 韧性剪切带与成矿的关系	(99)
第一节 概述	(99)
第二节 韧性剪切带与金矿床的时空关系	(102)
第三节 韧性剪切带与矿化的成因关系	(109)
第四节 与韧性剪切带有关的金矿床的成矿模式	(120)
第五节 韧性剪切带的成矿性评价准则	(137)
第四章 矿床实例	(139)
第一节 广东河台金矿	(139)
第二节 广东新洲逆冲推覆韧性剪切带与金矿化的关系	(144)
第三节 辽宁省丹东市韧性剪切带及其与金矿化的关系	(150)
主要参考文献	(159)
英文摘要	(164)

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
1.	Brief History of Study on Ductile Shear Zones (DSZ)	(2)
2.	Basic Fundamentals of Rock Deformation	(2)
3.	Mechanism and Processes of Ductile Deformation	(5)
4.	Classification of DSZ	(12)
5.	Studies on DSI at Present	(14)
Chapter 2	Structural Characteristics of DSZ	(21)
1.	Introduction	(21)
2.	Geometry of DSZ	(23)
3.	Deformation Features of DSZ	(27)
4.	Classification Structures of DSZ	(30)
5.	Microscopic Structures of DSZ	(39)
6.	Fault Rocks	(49)
7.	Tectonchemical Processes in DSZ	(62)
8.	Structural Analysis of DSZ	(68)
9.	Classification of DSZ	(82)
10.	Methology of DSZ	(95)
Chapter 3	Relationship of DSZ to Metallogeny	(99)
1.	Introduction	(99)
2.	Timing and Spatial Relations Between DSZ and Au-deposit	(102)
3.	Genesis Relations Between DSZ and Mineralization	(109)
4.	Metallogenic Models of Au-deposit Related to DSZ	(120)
5.	Appraisal Principles of Metallogenibility of DSZ	(137)
Chapter 4	Examples of Ore-deposits	(139)
1.	Hetai Au-deposit of Guangdong	(139)
2.	Relationship of Thrust-nappe DSZ to Au-mineralization of Xinzhou, Guangdong	(144)
3.	Dandong DSZ of Liaoning and Its Relationship to Au-Mineralization	(150)
References		(159)
Abstract in English		(164)

第一章 绪 论

剪切带是由简单剪切变形所形成的线状构造。它的尺度可以很小,有的只能在电子显微镜下才能察觉,如晶格位错;也可以非常巨大,如具全球规模的板块俯冲带和转换断层等。由于对剪切带构造特征的研究逐步深入,对剪切带的形成机制也有了比较全面的认识。根据剪切带的形成机制和形成条件,可将它分为脆性剪切带和韧性剪切带两大类,这两者之间往往缺少明显的界限,因此还存在过渡类型——脆-韧性剪切带(图 1—1)。脆性剪切带可以有一个或几个不连续面(断层或断裂面)。它是在地壳浅层的低温条件下经受脆性变形形成的构造带,常伴以碎裂岩系列的断层岩。脆-韧性剪切带具有多种多样的构造型式,其不连续面可有可无,常出现在地壳浅层和深层的过渡区。韧性剪切带一般缺少不连续面,剪切带的两盘具明显的位移,但却呈基本连续的状态,它是地壳深层次的强烈构造带。

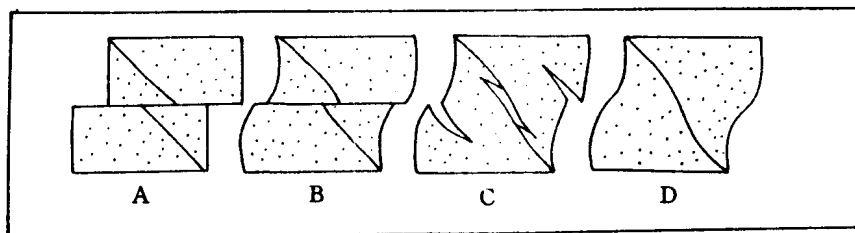


图 1—1 剪切带的类型

Fig. 1—1 Types of shearzones

(据 Ramsay, 1980)

A—脆性; B、C—脆-韧性; D—韧性

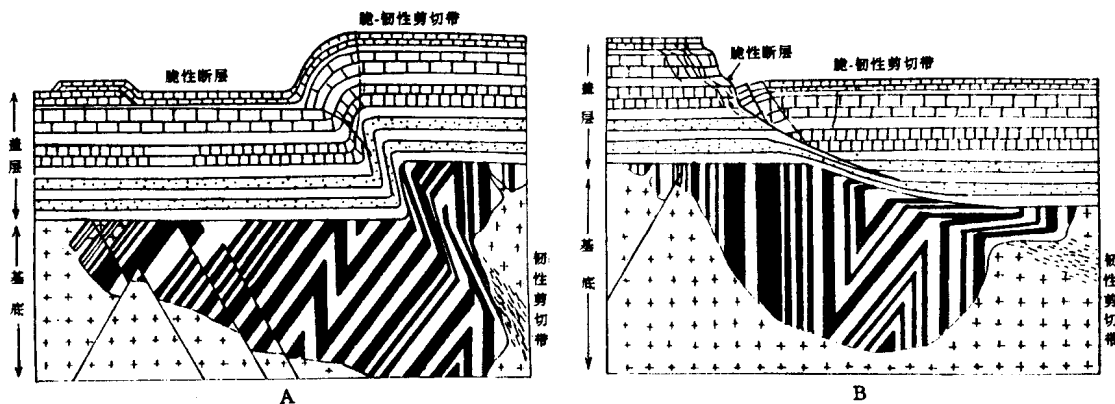


图 1—2 地壳内部挤压(A)和伸展条下(B)不同层次剪切带的关系示意图

Fig. 1—2 Schematic diagrams illustrating relationship between the shearzones

at different levels and the conditions of compression (A) and extension (B) within earthcrust

(据 Ramsay, 1980)

以上三种剪切带类型代表了地壳不同层次、不同条件下产生的构造带。它们在空间上和时间上有着密切联系,并可以相互过渡或转换。一般地说,在地壳深部发育韧性剪切带,向上逐渐过渡到浅层的脆-韧性剪切带和脆性剪切带(图 1—2)。

韧性剪切带主要是由简单剪切变形所产生的,其应变强度由带的边缘向中心逐渐增大。在中心的应变最强部位可能出现物质成分的变化和强烈的化学作用(即构造化学作用)。在韧性剪切带的中心部位往往形成糜棱岩带。系列的糜棱岩是韧性剪切带的主要岩石,因此也是韧性剪切带的重要标志。

第一节 韧性剪切带的研究简史

早在 1907 年 Clough 描述了在英国苏格兰高地看到的带状片麻岩和一套次变质基性火成岩墙组成的老变质岩系被宽仅数厘米到数百米的剪切带所切过并发生弯曲的情况。这是有关剪切带的最早报导。随后不少学者注意到剪切带内发育的断裂构造,Riedel(1929)率先进行粘土剪切模拟实验,以后从事这方面实验的还有 Gilbert(1928)、H. Cloos(1932)、Black(1937)、Wilson(1951)、E. Cloos(1955)、Oertel(1961)、Imai 和 Koide(1963)、Roering(1968)。李四光(1936)研究剪切带构造,提出多字型构造体系。Ramsay 和 Graham(1970)系统地讨论了剪切带的特点,认为在自然界的变形岩石中,剪切带是常见的构造现象。1980 年 Ramsay 明确地将剪切带分为脆性、脆-韧性和韧性剪切带三大类型,并详细描述了韧性剪切带的特征。由于糜棱岩带是韧性剪切带中常见的主要岩石,糜棱岩带的研究也包括在韧性剪切带的研究范围内,因此韧性剪切带的研究史也应包括糜棱岩带的研究史。

对糜棱岩带的形成机制问题存在两派截然不同的观点。一种观点认为糜棱岩面理是压扁作用产生的,因此认为糜棱岩带的主要形成机制是压扁作用,即纯剪切说。另一种观点则认为糜棱岩带是简单剪切的产物,即简单剪切说。但是,不少学者则主张混合说,即一般先发生剪切作用,随后又遭受压扁作用,或者两种作用交替重复。根据现有资料的分析,多数糜棱岩带是以简单剪切作用为主,后期叠加纯剪切作用(压扁和拉伸作用)。

由于巨大的韧性剪切带多具有多次多期活动的特点,它不但具有一条或几条糜棱岩带,而且还叠加有脆性-韧性剪切带和脆性剪切带。因此,可以同时出现碎裂岩系列的断层岩,从而使它成为一条在构造上、岩性上极为复杂的剪切带。

第二节 韧性剪切带的基本知识

岩石受力后可能发生整体的刚性移动或整体的刚性旋转,也可能发生大小或形状的变化,这些现象统称岩石的形变。单纯的形状改变又称“畸变”,或简称“变形”。畸变也是人们最关心和最常见的岩石形变现象。因此习惯上把岩石的畸变简称变形。

1. 应变的基本概念

为了说明变形的程度,在构造地质学中常用应变来表示变形的相对大小,也就是相对于变形前的百分数,因此应变是无量纲的。物体变形时的总应变,一般包括线应变和剪应变两部分,前者表示物体变形后的相对伸长或缩短,通常用 ϵ 表示。后者表示变形前物体中的两正交直线,经变形后偏离直角的角度的大小,常以 ψ 表示。 ψ 角的正切值称剪应变,以 γ 表示。

2. 简单剪切

岩石的畸变包括四种基本方式,即拉伸或缩短、剪切、弯曲和扭转。拉伸与缩短在构造地质学中称纯剪切,也称纯应变。这种变形在应变过程中,最大和最小的主应变方向始终保持不变,因此又称共轴应变。剪切在构造地质学中称简单剪切,而在应变过程中最大和最小主应变方向发生连续的转动,因此又称非共轴应变。

简单剪切是剪切带畸变的主要方式,它是旋转变形的一种类型,是物质顺着一系列分隔的剪切面发生剪切而形成的,因此可用一垛卡片来形象地说明简单剪切的特点。在卡片垛的侧面画上一个单位圆(半径为 1cm)和一个腕足类化石,并假设卡片垛的长边方向为直角坐标的 x 轴,卡片垛的厚度方向与 y 轴一致。未变形的化石胶合线与中线垂直,如图 1—3A 所示。卡片垛经过均匀的简单剪切变形后,也就是沿 x 轴发生滑移后,单位圆变为椭圆,腕足类化石的胶合线与中线不再相互垂直,其夹角为 $90^\circ - \psi$ 。这 ψ 角称角剪应变,其相应的剪应变为 γ , $\gamma = \tan \psi$ (图 1—3B)。这时在卡片垛侧面上的任一点(坐标为 x, y),经剪切变形后该点的坐标 (x', y') 有下列关系:

$$x' = x + \gamma y, \quad y' = y。$$

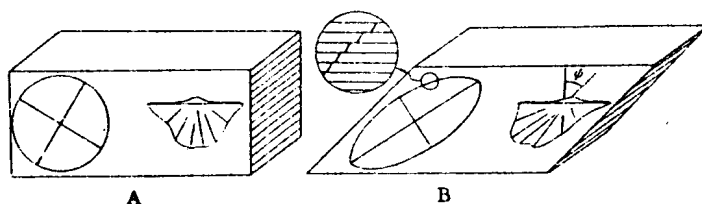


图 1—3 简单剪切的卡片模拟

Fig. 1—3 Card deck model of simple shear

(据朱志澄和宋鸿林,1990)

A—剪切变形前; B—剪切变形后

3. 岩石的脆性和韧性

为了阐明岩石的脆性和韧性,先讨论一下岩石变形实验。现以石灰岩的压缩实验为例(围压为 1055kg/cm^2),说明它在各变形阶段的特征。在弹性变形阶段,它的应力-应变曲线表现为一条直线(图 1—4 的 OA),表示石灰岩试件具弹性。当应力继续升高,超过一定的应力值时,应力-应变曲线偏离其弹性的直线形态,开始弯曲成一条向上凸的曲线(图 1—4 的 AB),表明岩石从弹性行为转变为塑性行为。该转折点(A)称弹性极限,其应力值称屈服强度。在屈服强度以下,石灰岩处于弹性变形阶段。在该阶段载荷撤除后岩石可恢复原来的长度(即应变为零)。当应力超过屈服强度,石灰岩开始发生塑性变形。在试件开始塑性变形后,卸去轴向载荷,弹性变形的缩短部分会迅速得到恢复,而塑性变形产生的缩短部分则不能恢复,从而产生永久变形石内,如图 4BF 曲线所表示的。如果对试件再重新施加载荷,石灰岩再一次表现为弹性体(由应力-应变曲线的 OA 直线表示),但这次的屈服强度要高些(图 1—4 的 C 点),表明岩石发生应变硬化作用。在屈服强度以上的曲线是向上凸的,曲线最高点代表石灰岩在实验过程中的极限强度。最后岩石发生断裂作用,其应力强度称破坏强度(破裂强度)。

从上述岩石的变形实验可知,岩石在外力作用下,一般都经历三个变形阶段,即弹性变形、塑性变形和断裂变形。由于岩石力学性质的不同或同样的岩石在不同的条件下,三个变形阶段的长短和特点也各不相同。岩石变形超过弹性阶段后没有发生塑性变形或只有很小的塑性变形,应变量小于 3% 到 5% 者,其性质属脆性行为(图 1—5)。在断裂发生前岩石具有明显的塑性变形,且总应变量达到 5% 至 10% 左右时,属脆-韧性行为。应变量超过 10% 而仍未破坏者,属韧性行为。

4. 粘性及其与塑性的关系

在应力不变的情况下,如果变形物体的应变随时间的增长而加大,但又不出现破坏的现象,称为粘性。塑性物体的应变虽然也随时间的增长而加大,但应变增加到一定程度将发生破

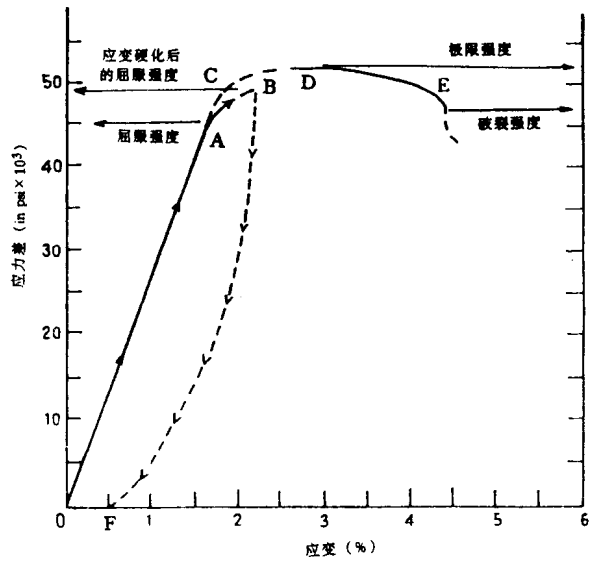


图 1—4 石灰岩在围压 1055kg/cm² 条件下的应力-应变图
Fig. 1—4 Stress-strain curve for limestone under confining pressure 1055kg/cm²
(据 Davis, 1984, 略加修改)

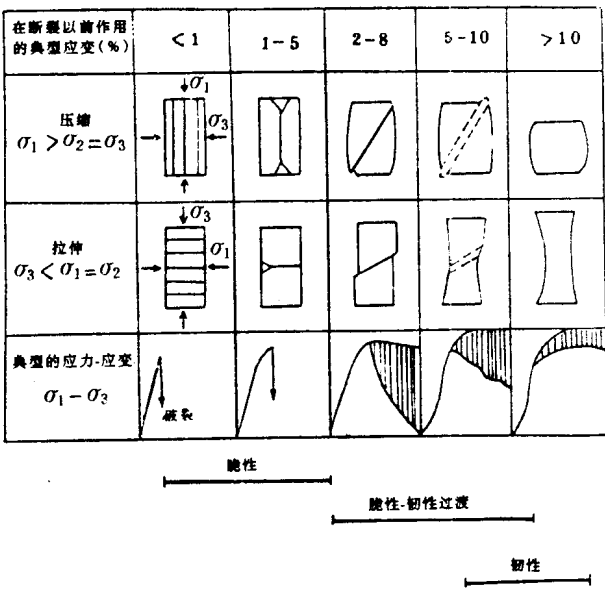


图 1—5 从脆性到韧性行为的变形特征及其应力-应变曲线形式
Fig. 1—5 Deformation features from brittle behavior to ductile behavior and the shape of stress-strain curves
(据 Griggs 和 Handin, 1960)

坏。

在一个体系中同时存在着固体和液体,如果固体和液体数量上的比例不同,前者相对于后者不超过 35% 时,数量不多的固体是悬浮在液体中,这时该体系呈粘性状态。当固体数量连续增加并相对于液体之百分比超过 35% 时,如岩浆中的结晶作用,使体系的整体从粘性状态转变为塑性状态。相反,当固体含有不多的液体时,如深变质岩发生逐渐的熔融时,在熔融过程的初始阶段,固体中的液囊是彼此孤立相互隔离。当液体相对于晶体的百分比继续增加,液体囊就能相互沟通,也是从无渗透性多孔逐步变为渗透性多孔的过程。随着熔融作用的继续进行,液体逐渐增多,但仍被包围在固态的晶质中。最后,当液体相对于晶体的百分比超过 35% 时,整个体

系呈液体状态,晶体或晶团则悬浮在液体中。这时该体系在整体上也从塑性状态(固体格架保持连续)转变为粘性状态(固体悬浮在液体中)。

第三节 韧性变形的机制与过程

研究天然变形岩石或实验变形岩石中的各种显微构造及其形成机制,可以帮助了解岩石的变形机制。岩石的韧性变形可分为两种情况,一种是在固态情况下,另一种是有流体参与的情况。前者包括由晶内滑移造成的晶内变形,由晶粒间相对滑移造成的超塑性变形,由岩石或晶体碎块间的相对运动造成的碎裂流动,以及由晶格中原子、分子或空位的位移造成的扩散蠕变等等。有流体参与的韧性变形主要有压溶作用。现分述如下。

1. 晶内变形

在讨论晶内变形前,先介绍有关晶体缺陷方面的内容。在晶体的生长或畸变过程中,常会破坏晶格有规律的周期性堆积,形成晶体缺陷。也就是说,晶体缺陷或晶格缺陷是晶格周期性遭到破坏的位置或一组位置。晶体缺陷有三种类别,即点缺陷、线缺陷和面缺陷。晶体缺陷可用来解释晶体的塑性变形和流变现象,其中又以点缺陷和线缺陷最为重要。

(1)点缺陷 点缺陷又称零维缺陷,它包括丢失原子(又称空位)和填隙原子。图 1—6B 中的 v 就是空位。填隙原子可以是相同的原子插入到规则的晶格位置之间,如图 1—6B 中的 I ,也可以是一个与主晶原子不同的异类原子存在晶格之间造成的点缺陷,如图 1—6D 中的“小黑点”。此外,异类原子代替了规则晶格位置上原来的原子也可以形成缺陷,如图 1—6C。点缺陷对固态扩散所引起的物质迁移过程起着重要作用。有些点缺陷在温度增高时就可以自发地产生,例如当温度增加时,某一个给定的原子并不停留在一个晶格的位置上,而是通过与空位交换位置而在晶格中不断移动,形成固态扩散机制。

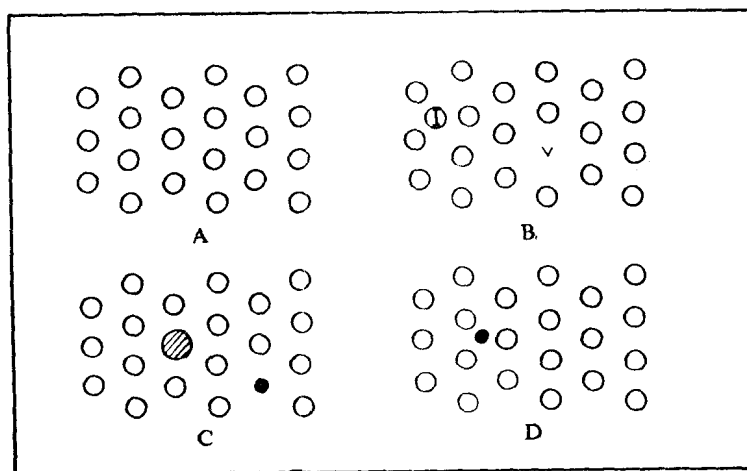


图 1—6 点缺陷示意图

Fig 1—6 Sketch of point defects

(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

A—完整的晶格; B—由相同原子形成的间隙型点缺陷 I 和空位 v ; C—由杂质原子替换形成的缺陷;

D—由杂质原子填隙原子形成的缺陷

(2)线缺陷 线缺陷又称一维缺陷或位错。当晶格周期性的破坏出现在晶体中一条线的每一个点上时,便形成线缺陷。位错是由晶体结构错排所引起的晶内滑移。错排有两种不同的情况,一种是在晶体的两层网之间增多了一层“附加半原子面”(图1—7B)。缺陷出现在半原子面的边缘,使缺失一半原子面的地方造成一排线状晶胞畸变线。这种错排情况称**刃型位错**。另一种称**螺型位错**。它在晶体中没有附加半原子面,只是一排晶格从原来的位置沿着某一面网错移并接到下一排晶格上,从而恢复了原来的晶胞,在错移的部位形成一条由变形晶胞组成的畸变线,就像一张纸被撕裂的情况(图1—8A)。晶胞的畸变线也称**位错线**。刃型位错的位错线垂直于剪切方向,螺型位错的位错线平行于剪切方向,但是剪切变形是由垂直于剪切方向的位移所实现。位错是在压力高到足以阻止脆性破裂和温度低到无显著固体扩散的条件下发生的。这时单个矿物晶体沿着米勒指数低的晶面发生滑移,滑移方向是该面内低指数的结晶学方向。某一具体的结晶面和该面内某结晶方向的联合,统称**滑移系统**。例如石英常见的一个滑移系统是沿底面 $[0001]$ 上的 a 轴方向发生滑移。

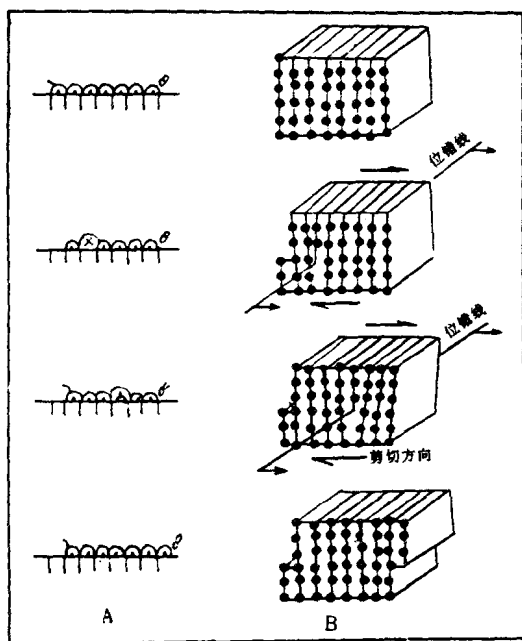


图1—7 由刃型位错的传播产生的晶体滑移
Fig. 1—7 Slip in crystal produced by propagation of edge dislocation

(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

A—毛虫的前进动作;B—由刃型位错的移动所引起的晶体滑移;附加半原子面相当于毛虫的鼓包

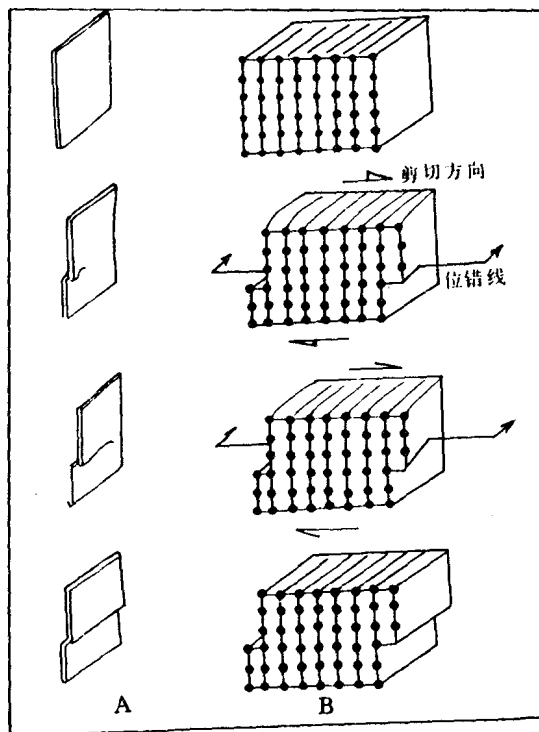


图1—8 由螺型位错的传播产生的晶体滑移
Fig. 1—8 Slip in crystal produced by propagation of screw dislocation

(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

A—一张纸的撕裂情况,在撕裂缝的前端,有一螺型位错; B—由螺型位错的运动引起的晶体滑移

位错滑移是低温条件下的变形机制,它产生宏观上的剪切。要使矿物集合体发生均匀连续变形,每个晶体必须有五个自由度,也就是要有五个独立的滑动系统(又称 Von Mises 准

则)。由于有些矿物的对称性较低,不具备五个滑动系统,在低温条件下矿物集合体的塑性变形单靠位错滑移还不能保持均匀连续变形,还需要有其它变形机制的参与,如机械双晶、扭折和解理裂隙等。

位错不但可以沿着滑移面进行滑移,而且还能进行攀移。在刃型位错情况下,攀移是通过“附加半原子面”边缘的原子扩散迁移(原子与空位的交换)来实现的。如果附加半原子面上的原子遇到晶格中的空位,附加半原子面就会被吸收而缩短,于是位错线就“上升”(图 1—9A);如果附加半原子面遇到的不是空位,而是原子,这时半原子面的运动就与上述情况恰好相反,使位错线“下降”(图 1—9B)。

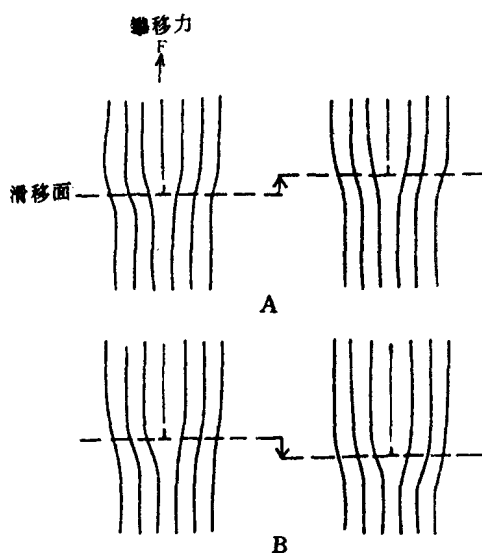


图 1—9 刃型位错的攀移

Fig. 1—9 Climb of an edge dislocation

(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

- (a)——在附加半原子面边界消失一排原子,构成位错线上升;
(b)——沿附加半原子面边界由扩散作用增添一排原子,构成位错线下降;丁字符号表示半原子面

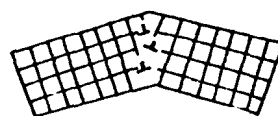


图 1—10 两个亚颗粒被位错壁所分开

Fig. 1—10 Two subgrains separated by dislocation wall
(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

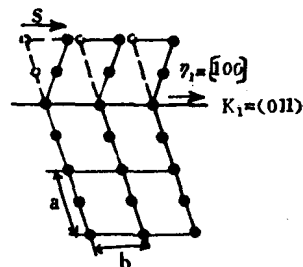


图 1—11 双晶滑移示意图

Fig. 1—11 Sketch of deformation twinning

(据 Nicolas 和 Poirier, 1976)

- 在双晶面 K_1 上,沿着双晶化方向 η_1 发生双晶作用,
虚线代表双晶化发生前的原晶体结构;
S 代表双晶剪切

(3)面缺陷 面缺陷主要是位错壁、双晶面以及两个相同晶体间的晶界或两个位向不同的晶体之间的接触面。散布在晶格中的位错可以借助滑移和攀移作用按一定规律的构型作线状排列,这种低能量的构型称位错壁。位错壁将一个晶体分为几部分。每部分称为一个亚颗粒,或称亚晶(图 1—10)。

(4)双晶滑移 位错还有一种特殊的滑移,称双晶滑移,也称机械双晶或变形双晶。双晶滑移的特点是它的滑移停止在滑动方向上的滑距不到一个完整的原子间距,并组成一个与原晶体结构相同但方向成对称状的晶体(图 1—11 上半部)。机械双晶与自然生长的双晶具有不同的成因和不同的特征(表 1—1)。根据天然岩石的观察和变形实验的结果,初步认为机械双晶和生长双晶的主要区别有下列几点:

表 1—1 生长双晶与变形双晶的区别

Table 1—1 Correlation between growth twinning and deformation twinning

	特 征	生长双晶	变形双晶
双晶主要特征	楔形的聚片双晶	无	典型
	弯曲的聚片双晶	少见	常见
	两端呈平头状的双晶体被非双晶所包围(图 1—12b)	常见	罕见
	平头状双晶体的一端被非双晶所包围(图 1—12c)	常见	罕见(除与裂隙斜交滑移面或其他双晶相交的情况)
	双晶贯通整个晶体(图 1—12a)	常见	罕见
	双晶体位于晶体的边缘(图 1—12d)	常见	罕见
	双晶面两侧的双晶体与原晶体成对称状	罕见	常见
双晶类别	方解石单晶具有两组或两组以上的双晶	无	典型
	透辉石单晶具两组共轭双晶	无	典型
	长石卡斯巴双晶	典型	无
	长石阿克双晶	典型	无
	长石斜坡双晶	典型	无
双晶类别	长石底面双晶	典型	无
	长石聚片双晶	无	典型
岩石中的双晶	变质岩中的双晶	无应变者多为生长双晶	(不易识别)
	岩浆岩中未遭受构造变形的双晶	主要	少见

(5) 扭折 扭折发生在仅具有一组滑移面的晶体中(如云母等),在晶内变形过程中可以发生扭折。当平行滑移面方向上受到压缩时,首先造成滑移面的弹性弯曲;同时滑移面之间发生滑动,在继续挤压下可达到局部折断形成扭折。具有层间滑动的区段称扭折带(图 1—13)。滑移面的弯曲和折断主要集中在扭折带内。

(6) 解理裂隙 在多晶集合体中,具有一个滑移面又是解理面的晶粒,受力后由于原子平面间的结合强度不能继续承受弹性变形,而塑性变形又不能完全解除应力,这时沿着结合较弱的结晶面(滑移面)出现解理裂隙。

2. 粒间变形

多晶体的塑性变形大多是由于单个晶粒的晶内滑移(如上节所述),或晶粒沿着它的边界的相对运动(即晶粒边界滑动)所造成的。晶内滑动在低温条件下(一般认为低于 $1/3$ 熔点温度)是唯一的变形形式,但在高温下(高于 $1/3$ 熔点温度)可伴随有晶粒边界滑移所造成的粒间变形。

颗粒边界滑移也称超塑性变形(流动)。这种变形时岩石的整体变形由晶粒边界处的滑移和晶粒的旋转造成。在多晶体内每一晶粒都被邻近的晶粒所包围而不能独立自由转动;晶