

西藏上地幔橄榄岩和铬铁矿石 结构构造图册

倪心垣 巴登珠 杨茂同 著

中国地质大学出版社

**THE TEXTURES AND STRUCTURES OF THE
PYROLITES AND CHROMITIES
IN TIBET (XIZANG)**

NI XIN YUAN BA DENG ZHU YANG MAO TONG

THE PRESS OF THE CHINA UNIVERSITY OF
GEOSCIENCES

· (鄂) 新登字第12号 ·

内 容 提 要

本图册是应用板块构造理论和方法, 阐明西藏上地幔橄榄岩和铬铁矿石结构构造形成的地质条件。从塑性流变学的角度解释矿物相之间的相互作用及不同结构构造类型之间的成因联系。将铬铁矿的成因置于上地幔岩石的整个演化过程中, 并提出铬铁矿成因的新设想。全书重视实践、资料丰富、类型划分合理、图片典型、观点有创新、具有较高学术价值和实用意义。

图册可供大地构造、岩石、矿床等研究人员、地质院校师生和野外地质工作者参考。

西藏上地幔橄榄岩及铬铁矿石

结构构造图册

倪心垣 巴登珠 杨茂同 著

出版发行 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 闻立峰 责任校对 陈爱玲

印 刷 陕西省地矿局测绘印刷厂 (西安·和平门外·710054)

开本 787×1092 1/16 印张 7.375 附图 36 字数 164 千字

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷 印数 1-1000 册

ISBN 7-5625-0654-X/P·232 定价: (精装) 29 元

序

印度河—雅鲁藏布江缝合带和班公错—怒江缝合带横贯青藏高原南部与中部。作为缝合带的主要成分雅鲁藏布江蛇绿岩带举世闻名。

青藏高原广泛发育的蛇绿岩可与世界典型蛇绿岩相媲美，其中的上地幔橄榄岩分布之广、规模之大、保存完好、岩石新鲜均为全国之冠，产出于岩体之中的阿尔卑斯型“豆荚状”铬铁矿质量佳、储量大，亦为全国之首。因此《西藏上地幔橄榄岩和铬铁矿结构构造图册》的出版，其科学价值已超出了西藏范围，在国内外都具有普遍的科学意义。

《图册》汇集了极为丰富的各类上地幔橄榄岩结构构造显微照片和铬铁矿矿石、矿相和手标本照片，并辅以简要的文字探讨与说明，从不同角度和层次揭示了上地幔橄榄岩和铬铁矿的结构构造特征，许多结构构造现象是以往文献中没有和很少报导的。

《图册》展示了在上地幔条件下塑性变形结构和地壳条件下脆性变形结构的特点和区别，揭示了上地幔橄榄岩与铬铁矿的成因，成矿地质环境的相关因素。

《西藏上地幔橄榄岩和铬铁矿结构构造图册》是作者倪心垣高级工程师等西藏地学工作者近三十年来参与西藏上地幔橄榄岩和铬铁矿的研究成果与总结，是一部具有现实意义的科学著作。尽管作者对上地幔橄榄岩的演化过程与铬铁矿成因的论述尚有欠完美之处，对图片的解释也有不尽合适之处，但也有许多独到的观察和解释，因此《图册》的出版必将有助于促进和深化对上地幔动力学和铬铁矿成因的研究，为我国的上地幔岩石学和铬铁矿成因的研究作出了新贡献。

曹佑功

一九九二年十一月

前 言

西藏是我国最重要的铬铁矿基地，也是我国上地幔橄榄岩出露和保存最好、岩石最新鲜的典型地区。我国地质工作者在西藏的两条蛇绿岩带中已发现阿尔卑斯型橄榄岩体近 200 多个，总面积出露达 2300km²。在部分岩体中所探明的铬铁矿储量约占我国已探明铬矿石储量的近一半，而且主要是冶金级富矿类型。为了提供铬铁矿成因依据，根据作者在西藏从事岩矿鉴定工作 25 年中，在上地幔橄榄岩和铬铁矿方面积累的大量薄片、光片和标本等资料的基础上，经过分析和归纳整理成这本图册。

本图册的编制任务是作为科研项目，由西藏地质矿产局下达给西藏地质二队。项目研究组人员由倪心垣、杨茂同、田雅丽组成。图册的文字部分由倪心垣编写；图册中的显微照片由杨茂同收集摄制，图册的偏光投影照片和标本照片由巴登珠摄制。田雅丽由于工作调动，只参加部分资料收集。

在图册编制过程中，得到了曹佑功、濮兆华、夏斌、向余庆、周详、朱明玉等高级工程师的指导和帮助。此外，西藏地质二队总工办和岩矿鉴定室的全体同事们为图册做了大量的工作，在此一并感谢！

作 者

1991 年 10 月 24 日

目 录

概 论	(1)
第一章 上地幔橄榄岩结构构造	(6)
第一节 塑性流变结构	(6)
第二节 动态重结晶结构	(8)
第三节 塑性活化结构	(9)
第四节 残碎结构	(10)
第五节 出溶结构	(10)
第六节 交代变晶结构	(11)
第七节 静态重结晶结构	(12)
第八节 碎裂结构	(13)
第九节 蚀变结构	(14)
第二章 铬铁矿石结构	(15)
第一节 残碎结构	(15)
第二节 文象状后成合晶结构	(16)
第三节 蠕虫状出溶结构	(16)
第四节 交代变晶结构	(17)
第五节 重结晶结构	(18)
第六节 塑性变形结构	(18)
第七节 糜棱岩化结构	(19)
第八节 碎裂结构	(19)
第九节 蚀变结构	(19)
第三章 铬铁矿石构造	(20)
第一节 致密块状构造	(20)

第二节	浸染状构造	.....	(21)
第三节	条带状构造	.....	(22)
第四节	斑杂状构造	.....	(22)
第五节	团块状构造	.....	(23)
第六节	网环状构造	.....	(23)
第七节	脉状构造	.....	(23)
结 论			(24)
主要参考文献			(27)
图版及说明			(29)

概 论

岩石圈分割成几个板块在软流层上的相对运动,是形成地球表面几个大洋和大陆的原因,大洋壳下以方辉橄榄岩为代表的洋幔橄榄岩类,是从上地幔软流层上升演化来的,属于亏损上地幔橄榄岩类,在大洋消亡过程中刮落下的一部分洋幔和洋壳残片,称之为蛇绿岩。

西藏境内分布的两条蛇绿岩带,是代表中生代特提斯海大洋消亡带。在蛇绿岩带中分布有上百个大小不等的,以方辉橄榄岩为主的上地幔变质构造体,其中常含有少量的二辉橄榄岩、纯橄榄岩和铬铁矿床,称其为阿尔卑斯型岩体。

上地幔橄榄岩和铬铁矿石之间的成因联系,历来为地学界所重视,并提出了各种不同的成因模式。本图册采纳交代分异的模式,认为上地幔原始二辉橄榄岩,在一部分流体相参与下经过交代分异形成方辉橄榄岩、纯橄榄岩和榴辉岩透镜体。从金伯利岩中幔源包体的研究,得出上地幔中除橄榄岩类之外还有少量的榴辉岩。在高压相系的榴辉岩中,含铬组分主要分布于镁铬榴石中。另外从深部上地幔石榴石橄榄岩上升到浅部演化为尖晶石橄榄岩后,镁铬榴石经过相变演化为文象状后成合晶结构的铬铁矿副矿物。进一步证实铬在石榴石中比在橄榄石中和辉石中含量高。现在的阿尔卑斯型橄榄岩体中见不到高压相系的偏碱性榴辉岩,而常见少量的豆夹状铬铁矿体。所以本图册作者推断,在上地幔软流层上升演化为洋幔橄榄岩的过程中,其中的高压相系偏碱性富铬榴辉岩,由于其熔融温度比橄榄岩类将近低 200°C ,应该是榴辉岩熔融形成玄武质岩浆比橄榄岩类选择性局熔分离集聚成玄武质岩浆更有利。因此榴辉岩熔融分离(上侵或喷出)组成洋壳,而富铬组分的难熔残余物经过重结晶作用,形成致密块状的豆夹状铬铁矿体。另外根据成因矿物学专家薛君治提供的资料,藏南罗布莎岩体中的二辉橄榄岩和方辉橄榄岩其形成和形变的最大深度可达 200km 左右,而该岩体中的铬铁矿石的形成和形变深度只在 $36\text{--}80\text{km}$ 。关于纯橄榄岩的形成和形变深度,根据大量岩石薄片的观察:上地幔岩石的交代分异(镁橄榄石化)作用迹象,从深部到浅部的洋幔橄榄岩都有发现,因此在纯橄榄岩中往往显示深部早期形成的橄榄石具高温塑性流变,而晚期(浅部)交代斜方辉石残留体形成的橄榄石,不具高温塑性流变。所以最终形成的纯橄榄岩深度可能较浅。

一、上地幔橄榄岩结构构造

20世纪初期,地质学家普遍认为橄榄岩类是岩浆形成的,多数采用岩浆岩的结构命名和分类,如自形粒状结构、半自形粒状结构等。到20世纪中期岩浆结晶分异学说,被大多数地质学家接受后,开始采用岩浆堆晶结构的命名和分类,如正堆积结构、中堆积结构、补堆积结构等。自从本世纪60年代板块构造学的建立,促使蛇绿岩研究的深入,多数地质学家接受了蛇绿岩中部层位的层状橄榄岩类为岩浆堆晶岩类,下部层位的方辉橄榄岩类为具变质构造岩组构的上地幔岩。所以堆晶结构只限于层状堆积岩中应用,而上地幔岩的结构采用

组构三分法的原生粒状结构、碎斑结构、等粒结构的命名和分类。由于这个变质变形结构的分类是在火山岩幔源包体的组构分析基础上建立的，所以应用到方辉橄榄岩型的洋幔橄榄岩中，有一定的局限性，它不能充分表达洋幔橄榄岩类的形成和演化的全过程，而且在命名的概念上易使人误解。如原生粒状结构中粗粒橄榄岩是由早期形变的橄榄石重结晶形成的，称其原生是不合适的，又如碎斑结构一词与脆性碎裂结构中的碎斑结构易混为同一类型，所以有人定其为残斑结构或残碎斑结构；等粒结构的等粒是属于一般岩石的粒度特性，所以有人称其为变晶结构。因此本图册中的上地幔橄榄岩结构构造命名和分类未采用上述三分法。根据洋幔亏损橄榄岩来源于洋脊扩张带之下的上地幔软流层，其结构构造是属于高温固态流动的产物，在演化为蛇绿岩中的变质构造体后的结构构造，是属于后期的变质作用。现将本图册岩石的结构构造划分原则和依据，作一简略介绍：

图册中结构构造的概念，是采用都城秋穗和久城育夫合著的岩石学中的规定：微观的显微镜下现象为结构，宏观手标本上或野外露头上的现象为构造。结构构造命名和分类的术语主要采用张树业等编著的变质岩结构构造图册中的命名分类术语。结构构造现象的形成机制从岩石成因学观点作了适当的解释和推断。下面就图册中各类岩石结构构造现象的成因联系，叙述如下：

上地幔橄榄岩从岩石圈扩张带下的软流层上升是属于高温的固态流动，而产生的结构是高温的塑性流变结构。高温的塑性流变主要表现在造岩矿物晶内的晶格位错和滑移及扭折。在偏光显微镜下，主要表现在晶粒内部的波状消光、变形带、变形纹、变形双晶和扭折带等的形态上，所以细分为上述现象的各种类型结构若干种。高温塑性流变过程中的晶格位错和滑移，常常伴随着晶格攀移而产生晶内的多边化亚颗粒结构。通过位向差机制的边界迁移，从亚颗粒结构和初步重结晶结构演化为巨粒聚结结构，是属于高温塑性流变的同构造动态重结晶结构。

上地幔橄榄岩中，由于各种矿物在塑性流变过程中变形程度不等，而塑性流变的晶格位错是受一定温压状态下的滑移系控制，所以往往具一种滑移系的硬矿物，由于应力集中，迫使边界趋于破裂。沿破裂边界被一种强塑性的软矿物挤入，促使破裂进一步生长和迁移，成为各种条带体和线理构造，这是热加工型高温塑性流变过程，对于由不同种矿物组成的岩石内，也是最为常见的结构现象。本图册将其呈散裂方式分布的硬矿物，粒度细小的称为残碎结构，粒度粗大的称为残斑结构，将分布于残碎结构中的软矿物称为塑性活化结构。在上地幔橄榄岩中呈塑性活化结构的橄榄石，由于极易重结晶，所以残碎结构的硬矿物常表现为重结晶橄榄石中的包体。

上地幔软流层中的岩石，从岩石圈扩张带（洋脊）下上升过程中，除少部分镁铁质岩石熔融分离（上侵或喷出）组成洋幔橄榄岩的盖层外，主要是沿扩张带两侧演化为新生的洋幔橄榄岩。经过高温塑性流变后的洋幔橄榄岩随着温压条件的改变，在洋幔中形成各种不具高温塑性流变的结构现象。如来自于高压相系的斜方辉石，由于富含较多的Ca、Al、Cr等杂质组分，进入低压相系后，经过出溶作用形成条纹状和蠕虫状的具有出溶结构的透辉石和铬尖晶石，沿斜方辉石的滑移面和扭折带及其边缘的晶格缺陷处分布；又如来自高压相系的镁铬榴石，进入低压相系洋幔中后，经过相变后形成由辉石和铬尖晶石组成的文象状后成合晶结构铬铁矿。洋幔橄榄岩经过塑性流变后，矿物粒间成为上地幔橄榄岩中少量流体相活动的通道和进行交代作用的有利部位，主要表现在与镁橄榄石化有关的一系列交代变晶结构的形

成。另外经过高温塑性流变后的洋幔橄榄岩在相对稳定的温压条件下，从高能位的各种不稳定结构，经过重结晶作用转化为低能位的稳定结构，是属于应变感生的静态重结晶结构。

上地幔橄榄岩上升后，经过冷却变为脆性，在应力作用下的脆性碎裂结构和上升的高温上地幔橄榄岩与水圈接触，形成具有水热交代变晶结构的蚀变现象，在此不再赘述。

二、铬铁矿石结构构造

铬铁矿石在上地幔岩石的演化过程中，蕴含着大量的成因信息，所以本图册将其从上地幔橄榄岩的结构构造中分别列出来，单独进行分析和描述。由于铬铁矿的成因观点，众说纷纭，因此铬铁矿结构构造的命名和分类还没有一个统一的标准。下面就铬铁矿在橄榄岩中的成因作一简单的介绍和评述。

20世纪前地质学家普遍认为，铬铁矿的形成与超镁铁岩的蛇纹石化有关；后来鲍姆格特尔（1904）在显微镜下发现，铬透辉石在蛇纹石化分解后，形成次生铬铁矿；到20世纪60年代莫斯科列娃等人发现，铬铁矿是交代橄榄石和辉石形成的，属于交代变晶结构；而到70年代尼古拉斯等人认为阿尔卑斯型橄榄岩中的铬铁矿是重结晶作用形成的。与铬铁矿是变质作用形成相对立的另一观点，认为铬铁矿是岩浆作用形成的。如福格特（1894）在未蛇纹石化超镁铁岩中发现铬铁矿后，提出铬铁矿是岩浆结晶作用早期形成的，后来斯皮尔（1923）发现超镁铁岩中铬铁矿呈他形晶而有脉状矿体后，提出铬铁矿是岩浆晚期生成的。到20世纪中期A·H查瓦列茨基和丹纳特等人认为铬铁矿可以形成于岩浆阶段，也可以形成于气成阶段和热液阶段，理由是铬铁矿属尖晶石类，可以形成于不同的温度条件下。关于阿尔卑斯型岩体中豆夹状铬铁矿床的成因，在60年代我国铬矿专家王恒升根据豆状和瘤状铬铁矿矿石呈浑圆形，提出岩浆熔离分异形成的；到70年代我局周翌元提出岩浆深部分异多期侵入。同时，在国外迪凯（1975）的上地幔二辉橄榄岩选择性局熔集集成岩浆房中堆积形成的观点开始盛行。由于在豆夹状铬铁矿床中，铬铁矿之间的脉石矿物橄榄石和辉石属于高镁质的矿物，不可能从镁铁质岩浆中结晶形成，铬铁矿床富集的微粒级钺铀矿类不可能从岩浆中分异形成；另外在同一铬铁矿床中，铬铁矿石的粒度不等、形态各异，显示不同期次和不同作用方式下形成的特征。如网环构造的矿石中，网眼中有残碎结构铬铁矿包体，而组成网环状的细粒级铬铁矿是属于晚期沿破破裂隙热液交代形成的。再据近年来国内外报道，在阿尔卑斯型橄榄岩体中发现有微粒级金刚石，在豆夹状铬铁矿石的铬尖晶石中，发现有蓝晶石包体。结合前述，上地幔软流层演化为洋幔方辉橄榄岩后，少量分散相的镁铬榴石演化为文象状后成合晶结构的铬铁矿副矿物。所以作者认为，高压相系富铬的榴辉岩，在洋脊扩张带下熔融分离成玄武质岩浆后，富铬残余物是形成豆夹状铬铁矿床的主要物质来源。下面就本图册中铬铁矿石结构构造现象的成因联系，作一简单的推断性描述。

1. 在上地幔橄榄岩中的副矿物铬铁矿结构。根据晶形、粒度、分布及其与橄榄石和辉石之间成因联系，结合岩石中形变与相变的关系，将其划分为残碎结构或残碎斑结构，文象状后成合晶结构，交代变晶结构和重结晶结构。

上地幔橄榄岩在高温塑性流变过程中，使早期形成的铬铁矿散裂，成为残碎结构或残碎斑结构。主要分布于纯橄榄岩中呈线理构造和条带状构造。根据高温流变机制，如果主要表现在以粒间滑移和旋转为主的流变，是属于超塑性流变结构。因此有可能部分铬铁矿线理构造和条带状构造是在超塑性流变过程形成的。分析残碎结构形成机制，塑性活化橄榄石挤入

是使铬铁矿散裂的主要原因；而塑性活化橄榄石经过动态重结晶后，残碎结构的铬铁矿常成为橄榄石内的包体。

上地幔橄榄岩中分散的镁铬榴石，从深部上升后随着压力的降低，经过相变形成具文象状后成合晶结构的铬铁矿。由于没有分离作用，所以文象状后成合晶铬铁矿之间有辉石、镁铬榴石浑圆形的假象保留。有人认为这是深部石榴石橄榄岩相上升后，演化为尖晶石橄榄岩的标志矿物。如果富铬的镁铬榴石在榴辉岩中，经过相变后的熔融分离，文象状后成合晶中的骸晶状铬铁矿成为残余物，经过重结晶作用后，成为紧密镶嵌的致密块状铬铁矿。

上地幔橄榄岩中存在有少量的流体相，在岩石中，主要表现为镁橄榄石化的交代作用。在橄榄石交代斜方辉石过程中，发生物质分异，一部分 Si、Ca、Al、Cr 组分随着流体迁移，最后在上地幔岩石的裂隙或孔隙中成为交代溶液，形成的交代矿物有透辉石和铬铁矿等。在未被橄榄石化交代的斜方辉石中，经过出溶作用，形成页理状的透辉石和蠕虫状的铬铁矿。按柯尔比（1973）提出的出溶机制，是属于斜方辉石应变感生过程，在固体扩散位移时杂质分凝形成的，新矿物铬铁矿在原矿物斜方辉石基体上形成的。因此在上地幔橄榄岩中，副矿物铬铁矿的交代变晶结构，可分为有流体相参与下的交代变晶结构和在斜方辉石中或其边缘的出溶结构。

上地幔橄榄岩经过塑性流变后，在洋幔中，由于应变能的趋动下发生重结晶作用，橄榄石最易重结晶，其次是辉石和尖晶石类，铬铁矿的重结晶最弱，但在橄榄石和辉石重结晶过程中，少量分散相的微粒级骸晶状铬铁矿，经过重结晶形成较粗粒的自形晶铬铁矿，分布在橄榄石中或边缘，在重结晶橄榄石之间 120° 三联点处最常见。

2. 在豆夹状铬铁矿矿床中，铬铁矿石结构以粗粒级为主，颗粒之间的相接界面以弧形弯曲为主，形成紧密镶嵌的粒状变晶结构，组成致密块状的铬铁矿石。这类结构的形成机制是属重结晶作用，所以同一矿床中矿石矿物成分均一。

由于铬铁矿属等轴晶系的硬矿物，高温的塑性变形在致密块状矿石中，常形成网格状的变形纹带和破裂。沿破裂和网格状的孔隙常见有强塑性活化橄榄石的挤入（高温高压下的强塑性橄榄石类似于粘稠的流体），随着大量塑性活化橄榄石的挤入和散裂，形成由残碎结构或残碎斑结构组成的浸染状矿石。在应力局部集中的部位，高温塑性变形的致密块状铬铁矿石中，形成糜棱岩化结构。糜棱岩化结构是由大量密集的网格状变形纹带构成，其中常见有较粗大的透镜状碎斑晶，在网格状变形纹带之间的孔隙中和裂隙中，常见有强塑性活化橄榄石的挤入体。

豆夹状铬铁矿床随着上地幔橄榄岩上升后，在低温下的脆性碎裂结构，常常继承早期塑性破裂的基础上，进一步以裂散方式迁移，但在晚期的裂隙中挤（贯）入的是低温热液脉体，有绿泥石脉，蛇纹石脉，方解石脉，石英脉等。铬铁矿在晚期岩石蚀变过程中，也常出现蚀变，形成富铁铬铁矿和磁铁矿，并有少量的铝（Al）迁移，形成绿泥石壳。在铬铁矿晶体的裂纹中，常出现有钛铁矿和镍黄铁矿、针镍矿、铁镍矿、钺铀矿等的出溶条纹。

铬铁矿相对于橄榄石、辉石、蛇纹石等硅酸盐矿物是属于硬矿物，在应力作用下，在其颗粒边缘往往形成压力影结构。根据压力影结构对称程度和物质组成，可以指示应力作用的温压状态。如高温塑性流变过程中，铬铁矿两侧橄榄石的塑性变形带不对称；而低温状态下的压力影结构，在铬铁矿颗粒边缘孔隙中，充填有蛇纹石脉或绿泥石脉。

3. 铬铁矿构造类型之间的成因联系一直是地质学家们研究的重要课题。由于铬铁矿矿

石的构造类型极其繁多，而且往往呈显出过渡性的特征。为了满足野外地质工作者的需要，从大量矿石标本中选择一部分有代表性的标本，结合对阿尔卑斯型橄榄岩和铬铁矿的认识，单列一个章节对各种铬铁矿构造类型进行描述和分析。下面就根据前面铬铁矿结构的成因推断，简单地叙述各种铬铁矿构造类型之间的演化过程。

对上地幔橄榄岩中的豆夹状铬铁矿床，据尼古拉斯等人的构造研究成果，认为洋脊扩张带下形成时是属于不整合矿床；洋幔中演化成为假整合矿床；在强烈变形的阿尔卑斯岩体中演化为整合型矿床。在整个演化过程中矿石的构造类型产生相应的变化。另外奥古士梯蒂斯等人对于纯橄榄岩中条带状铬铁矿和团块状铬铁矿的形成机制，是应用动力学和运动学的分析观点；结合塑性流变学，认为粗粒级的致密块状铬铁矿（相当于原生粒状结构），在流变过程中形成的各种构造类型（相当于碎斑结构或残斑结构）。流变后的变晶结构由于铬铁矿残碎斑晶不易重结晶，而主要表现脉石矿物橄榄石的重结晶作用。由于本图册不是采用麦瑟尔的组构三分法，所以将铬铁矿石构造类型之间的成因联系作如下推断。

豆夹状铬铁矿床中致密块状铬铁矿石形成后，在高温的塑性流变过程中，在粗粒级紧密镶嵌粒状变晶结构的铬铁矿内，形成网格状的塑性变形纹带和破裂孔隙。由于沿破裂孔隙强塑性活化橄榄石的挤入促使破裂的生长和迁移，形成以散裂方式分布的各种不规则铬铁矿浸染体，这些浸染体没有迁出致密块状矿石就成为反斑杂状的铬铁矿石。如果随着大量塑性活化橄榄石的挤入而迁移，并遭进一步散裂将成为各种稠密度的浸染状铬铁矿石；在各种稠密度的浸染状铬铁矿石中常见有较粗大的残碎斑晶，称其为斑杂状铬铁矿石。由于大量塑性活化橄榄石的挤入和迁移，在塑性流变过程中显示流动方向的各种条带状铬铁矿石，由于碎裂程度不等和碎裂方式不一，而组成的条带状铬铁矿石类型繁多，这里不再详细解释。

致密块状铬铁矿石是由紧密镶嵌的粗粒级铬铁矿组成，高温的形变过程中，由于铬尖晶石{111}解理纹尚未显示，所以形成的网格状变形纹带显示弧形弯曲，沿弧形弯曲的变形纹带破裂的残碎斑晶，小的似豆状，大的似瘤状，组成的矿石为豆状或瘤状的团块状铬铁矿石。在低温的形变过程中，由于铬尖晶石{111}解理纹已发育，破裂作用沿铬尖晶石{111}解理纹为主，形成边直角尖的残碎结构铬铁矿。所以由细粒级组成的浸染状铬铁矿石常显示类似于自形粒状结构的假象，其中含有较粗大的残碎斑晶呈方块状称为斑点状构造。从高温到底温的形变过程中，铬铁矿的破裂程度和散裂方式的演化，形成各种过渡类型的混合式矿石类型，其中常常反映出早期的塑性形变破裂和晚期的脆性碎裂的继承性。

阿尔卑斯型橄榄岩体中，铬铁矿的成因类型划分为原生型和活化再分配型。早期的原生型是由致密块状的豆夹状铬铁矿演化来的，前已详述。晚期的活化再分配型是由于上地幔橄榄岩中含铬流体相活动形成的。根据橄榄石交代置换斜方辉石过程中，多余的 Si、Ca、Al、Cr 组分随着流体相迁移，称其为铬的活化过程，在晚期的裂隙或孔隙中再交代早期的硅酸盐过程，称其为再分配，因此在上地幔橄榄岩的晚期破碎带中见有网脉状铬铁矿石构成的网环状铬铁矿和反团块状构造的铬铁矿石。如图 134 中网环状铬铁矿石中，在破碎角砾的岩石中含有残碎结构的铬铁矿，沿破碎裂隙形成的交代网脉状铬铁矿，显示交代分异的特征。脉体中心稠密，边缘逐渐变稀疏。因此上地幔橄榄岩中的脉状铬铁矿石，有构造作用碾碎的铬铁矿条带体和晚期交代作用形成的脉体。

本图册的公开出版，纯系抛砖引玉，如能得到同行的赐阅，将不胜感谢。

第一章 上地幔橄榄岩结构构造

上地幔橄榄岩是以橄榄石为主，含少量辉石和铬尖晶石的超镁铁岩，呈暗绿色或深灰绿色的致密块状岩石。由于辉石和铬尖晶石在岩石中常常分布不均匀，而呈显斑杂状构造和条带状构造，有时少量的铬尖晶石形成反映塑性流动的线理构造。本图册的上地幔橄榄岩，是属于阿尔卑斯型橄榄岩类，它的结构构造是属于高温固态流动的产物。

第一节 塑性流变结构

上地幔橄榄岩在软流层中是一种高温的晶质塑性体。在应力作用下的形变是属于塑性流变。在同一种矿物组成的岩石内，主要表现为造岩矿物的晶格位错和滑移及扭折。在偏光显微镜下表现为波状消光、变形带、变形纹、变形双晶和扭折带等的形态特征。

一、波状消光变晶结构

上地幔橄榄岩中波状消光的造岩矿物常显示压扁弯曲的现象，是由于晶体内部晶格位错、滑移和扭折形成的。晶格位错和滑移是受一定温压条件下的滑移系控制的。所以上地幔橄榄岩中波状消光的方位，在不同的矿物中是不同的。据崔军文对藏南超镁铁岩中塑性流变的研究，得出原生组橄榄石（高温流变橄榄石）的滑移面 $T = (001)$ ，滑移方向 $t = [100]$ ，属于高温流变。而变晶组橄榄石滑移面 $T = (010)$ 、 (100) ，滑移方向 $t = [001]$ 、 $[010]$ ，属于低温流变。

橄榄石的波状消光常演变为变形带和变形双晶。斜方辉石的波状消光常表现在扭折带部位，呈褶皱轴的简单旋转关系。

图 1：纯橄榄岩，巨粒聚结结构橄榄石中，残留有高温流变的波状消光，变形带和扭折带等的塑性流变结构残余。在动态重结晶橄榄石边缘和粒间界面上分布有重结晶铬铁矿。

图 2、图 3：纯橄榄岩，在巨粒聚结结构橄榄石形成之后的低温流变、波状消光、变形带、变形双晶等的形变，是晚期压扭性剪切构造产生的，呈纹理状构造。

图 4、5、6：方辉橄榄岩，从橄榄石、辉石、铬尖晶石的粒度、形态及分布特征，反映出岩石经历塑性流变，动态重结晶、出溶、交代等的变质变形组构特征，如按麦瑟尔的分类图 5 的块状构造类似于原生粒状结构，图 4、6 的斑杂状构造类似于碎斑结构。

二、变形带结构

变形带是限定在颗粒界内的一种面性结构，是由于矿物晶体内部应力局部集中，沿晶体内部滑移系方向产生的晶格位错群。从波状消光发展成受位错壁控制的定向消光的变形带，是指晶体内部形变强烈的部位。在橄榄石晶体内部的变形带形态有透镜状、平直条带状、扇状等等，

它取决于所受应力的性质和大小，以及橄榄石变形时的塑性状态。

图 7: 纯橄榄岩，橄榄石中有透镜状的变形带，变形带边界呈弧形弯曲。

图 8: 含辉纯橄榄岩，橄榄石中有平直条带状的变形带。岩石中有晚期不具塑性变形的镁橄榄石交代早期具塑性流变的橄榄石和斜方辉石残留体。

图 9: 纯橄榄岩，橄榄石内有透镜状变形带和扇状变形带。在透镜状变形带内有斜列式的变形纹。

图 10: 含辉纯橄榄岩，早期高温塑性流变橄榄石中有平直条带状变形带和扇状变形带。晚期交代变晶橄榄石中，有斜方辉石交代残留体和蠕虫状铬铁矿残留体。

三、变形纹结构

在变形带消光时，常见到垂直于或斜交于变形带的相对亮一些的条纹，即为变形纹。它是垂直于应力方向上产生的晶内滑移面，在矿物晶体内显示狭窄的、密集间距的局部面状区。变形纹的宽度与应力的性质和大小呈反比，即应力大宽度小，应力小宽度大。

图 9 中的斜列式变形纹前已专述。

图 11 是图 3 中变形带的局部放大照片，变形带内的变形纹呈针状，略有些弧形弯曲和斜交。在变形带边缘有动态重结晶橄榄石组成纹理构造。

图 12: 纯橄榄岩，在低温流变的残碎橄榄石中，变形带内一组斜交的“×”型变形纹，这是交叉滑移形成的。其锐角等分线与压应力方向一致，岩石显示碎裂结构。

四、变形双晶结构

在橄榄石中常出现变形双晶，它是橄榄石晶体内每个滑动层，位错的离子间距成定比；界面两侧的晶格构造成对称关系，而形成的一种机械变形双晶。在早期的透辉石中，常沿(100)滑移面滑动(在高温流变时)，变成有机机械变形双晶的异剥石。变形双晶的宽度、形态和间距变化取决于矿物应变率的大小和所处的温压条件。

图 8 变形带内构成的变形双晶是属于高温流变的结构，而图 3 变形带内构成的变形双晶属于低温流变的结构。两种变形双晶在形态、间距变化和分布特征上是不相同的。

图 13: 方辉橄榄岩，橄榄石中常见有高温流变的机械变形双晶。斜方辉石呈残碎结构，沿斜方辉石破裂挤入有塑性活化橄榄石；在斜方辉石边缘有少量的交代橄榄石分布。

图 26: 含辉橄榄岩，橄榄石中具有变形双晶的异剥石包体。辉石在橄榄石中属于残碎体。

图 51: 二辉橄榄岩，早期的透辉石交代变晶受变形后表现为沿(100)滑移面滑移形成的机械变形双晶，成为透辉石质的异剥石。

五、扭折带结构

扭折带是晶体形变过程中弯曲扭折形成的，是属于晶格位错、滑移的塑性流变形式之一。斜方辉石中扭折带最明显，和弯曲的变形纹垂直的变形带，与扭折褶皱轴呈简单的旋转关系，主压应力方向平行于褶皱轴向。

图 14: 方辉橄榄岩，斜方辉石弯曲扭折，形成“V”型共轭，其中的变形纹和解理纹呈弧形弯曲。

图 15: 方辉橄榄岩, 斜方辉石的形变和破裂。强烈的形变扭折使斜方辉石呈三角形的楔形扭折带结构, 波状消光带垂直于变形纹和解理纹, 变形纹和解理纹在扭折部位剧烈弯曲。变形纹中分布有出溶透辉石页理。沿斜方辉石破裂有塑性活化橄榄石挤入, 形成残碎结构的斜方辉石分布于橄榄石中。

图 16: 方辉橄榄岩, 斜方辉石形变过程中压扁拉伸的弯曲扭折, 形成平行扭折带结构。在形变过程中的破裂隙内, 有边缘的塑性橄榄石活化挤入体呈尖角状形变挤入。

图 17: 方辉橄榄岩, 斜方辉石形变过程中在其边缘的局部也可产生平行扭折, 与斜方辉石中的整体扭折平行。在斜方辉石的边缘有塑变橄榄石和交代变晶橄榄石伴生。

图 18: 方辉橄榄岩, 斜方辉石中的波状消光、弧形弯曲、破裂、塑性活化橄榄石挤入呈残碎结构。按麦瑟尔分类法属碎斑结构。

第二节 动态重结晶结构

上地幔橄榄岩在塑性流变过程中, 晶体内部的晶格位错和滑移常常伴随晶格攀移的蠕变, 形成由位错壁分割成的不同方位的晶格体。方位角一般不超过 10° 的多边化亚颗粒结构, 通过亚颗粒之间的边界迁移, 经过初步重结晶演化为巨粒的聚结结构, 是属于同构造的动态重结晶作用, 下面根据其形成和演化过程中三个阶段中的三种结构现象描述如下:

一、亚颗粒结构

在正交偏光下矿物消光时, 略微转动物台, 出现低角度的不均匀消光区域, 或在晶体的波状消光带中, 出现稍有差异的消光区域, 即为亚颗粒结构。也可在透射电镜下直接测量亚颗粒的粒度。

图 19: 纯橄榄岩, 在左下角的形变橄榄石消光时出现低角度的不均匀消光区域, 就是形变橄榄石内的亚颗粒结构。在岩石内, 一般由亚颗粒经初步重结晶形成的结构, 为初步重结晶结构。

图 20: 纯橄榄岩, 左边的形变橄榄石不均匀, 显示具亚颗粒结构; 右边的不具形变的不规则橄榄石, 属初步重结晶作用形成的。

二、初步重结晶结构

在第一阶段形成的多边化亚颗粒结构基础上, 随着应变能继续释放, 由低角度边界构成的亚颗粒, 通过边界迁移发育成高角度边界, 微粒级或细粒级不规则新颗粒, 称为初步重结晶结构。

图 19、20 右上角的细粒至微粒级橄榄石, 其边界局部平直, 局部渐变不清。当出现平直的边界时, 初步重结晶颗粒之间的三联点界面角 120° 。当界面不清时, 常出现局部锯齿状的不稳定边界, 这是动态重结晶的初步重结晶结构。

三、聚结结构

在初步重结晶结构的基础上, 继续在应变能的驱动下, 通过进一步重结晶作用的边界迁移, 形成巨粒的聚结结构。如在重结晶过程中继续伴随着流变, 即形成呈纹理状构造的动态

重结晶条带体。

图 21: 方辉橄榄岩, 橄榄石呈巨粒的聚结结构, 颗粒形态不规则, 边界呈锯齿状。在聚结结构的橄榄石中常保留有早期的塑性流变残余和初步重结晶结构的橄榄石。

图 22: 纯橄榄岩, 动态重结晶橄榄石在塑性流变橄榄石中形成各种条带体, 成为纹理构造。条带体是指示流变的方向。

上述三种动态重结晶结构的形成过程归纳为亚颗粒旋转和边界迁移的形成机制, 是属于塑性流变过程中的同构造应变感生重结晶, 其基本特征归纳如下:

1. 动态重结晶结构的颗粒大小取决于流变应力的的大小, 与温度无关系; 静态重结晶结构颗粒的大小取决于重结晶时的温度。
2. 动态重结晶颗粒的形态, 由于在流变过程中无成核作用的边界迁移, 而形成大小不等、形态不规则, 在纹理构造中常显示长条状晶体。而静态重结晶颗粒的形态, 由于在成核作用下的晶体生长, 形成颗粒相等、形态较规则的等轴状晶体。
3. 动态重结晶颗粒首先出现在高应变区域, 如扭折带、变形带或拉长颗粒边界处。如图 22 中, 在形变橄榄石的变形带中分布有不具形变的动态重结晶橄榄石, 构成纹理状构造。又如图 11 中, 在形变橄榄石边界处分布有微粒级动态重结晶橄榄石。
4. 动态重结晶颗粒内常有残留的波状消光、变形带等。如图 1 中的动态重结晶橄榄石中有波状消光、变形带、扭折带等残留。又如图 23 中, 斜方辉石张性裂隙中充填的塑性活化橄榄石, 经动态重结晶后残留有早期的变形带。
5. 动态重结晶颗粒的边界, 显示从原始边界经过阻止边界发展到平衡边界, 所以常表现出不平衡边界的局部平衡边界。如图 19 中, 初步重结晶结构橄榄石同一颗粒局部平直边界, 局部呈渐变不清的锯齿状边界。
6. 动态重结晶作用的边界迁移, 可以形成巨大的聚结结构; 在聚结结构的颗粒内常见有各种包裹体。如图 21 中的聚结结构的橄榄石中, 包含有残碎的斜方辉石和细粒级的初步重结晶橄榄石等。
7. 动态重结晶颗粒之间有明显的优选方位, 因为动态重结晶形成的新变晶是在早期塑变晶体的基体上, 通过亚晶粒之间的位向差机制演化过来, 所以新变晶之间有一定的优选方位。如形变橄榄石中的动态重结晶橄榄石优选方位显示同一晶体的演化形成。
8. 动态重结晶与静态重结晶只是相对而言。往往是动态重结晶后紧接着的静态重结晶, 使上地幔橄榄岩结构分析难度增大, 而且常表现出旋回性的复杂演化。

第三节 塑性活化结构

塑性活化结构, 是塑性流变结构的一种特殊类型, 是指一种强塑性矿物在应力作用下, 沿弱塑性矿物粒间滑移和旋转的一种流变结构。不同种类矿物组成的岩石, 在塑性流变过程中, 由于各种矿物的变形程度不等, 相对较弱塑性的硬矿物破裂, 沿破裂隙和孔隙中强塑性矿物的挤入, 形成呈定向展布的塑性活化结构。在上地幔橄榄岩的高温塑性流动过程中, 因橄榄石的塑性流动类似于一种粘稠的流体, 在斜方辉石和铬铁矿的裂隙和孔隙中挤入形成呈散裂方式分布的残碎结构。

图 23: 方辉橄榄岩, 斜方辉石的张裂隙中挤入的塑性活化橄榄石, 属于塑性活化结构。塑