

437190

高等学校教学参考书

矿床预测和评价原理

下 册

〔苏〕B.T.波卡洛夫 主编



地质出版社



高等学校教学参考书

矿床预测和评价原理

下 册

〔苏〕 B.T. 波卡洛夫 主编

秦国兴 译

地质出版社

内 容 简 介

本书探讨矿床的预测、普查和评价问题,指出了解决这些问题的途径。对矿床在地壳发展历史中的地位、矿床的构造和岩浆控制因素、地质构造、矿石物质成分、矿化分带性、地球化学和地球物理特征等方面的资料进行了分析,在此基础上制定了建造分析的原则,确定了矿床预测和评价准则。上册讨论稀有金属、铜、锡、钨、钼、铌和云母矿床,下册讨论铁、铬铁矿、铝土矿矿床以及与碳酸盐有关的矿床。书中利用了苏联和其它国家在勘探和研究上述矿床过程中所获得的最新资料。

本书可作为地质院校有关专业师生的教学参考书,也可供从事矿床研究、预测、普查和评价的广大地质人员参考。

Принципы Прогноза и Оценки Месторождений

Полезных ископаемых. «Недра», 1977.

Авторы

Ф.Р.Апельцин

А.Я.Архипенкова

В.М.Григорьев

В.С.Кудрин

А.Е.Лисицын

С.Ф.Лугов

В.Г.Орлов

И.И.Пастушенко

В.Т.Покалов

Л.С.Пузанов

Г.Г.Родионов

Т.А.Смирнова

Б.А.Теняков

Б.А.Тюриц

А.А.Фролов

Н.Г.Ммидт

Н.А.Хрущов

矿床预测和评价原理

下 册

(苏) В. Т. 波卡洛夫 主编

秦国兴 译

责任编辑:熊曾嘏

地质部教育司教材室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行、各地新华书店经售

开本:787×1092¹/₁₆·印张:9⁵/₁₆·字数:228,000

1982年3月北京第一版·1982年3月北京第一次印刷

印数1-4490册·定价1.20元

统一书号:15038·教132

目 录

主要由壳下岩浆、变质作用和外生作用生成的矿石建造·····	1
铬铁矿矿床建造·····	1
固结地区斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩侵入体的铬铁矿建造·····	4
地槽区纯橄岩-斜辉辉橄岩岩体的铬铁矿建造·····	11
铬铁矿床的预测和评价·····	25
碳酸岩中综合性矿床建造·····	31
铁矿床建造·····	57
沉积变质和火山-沉积变质含铁硅质岩建造·····	58
褶皱区基性和超基性侵入岩中的钛磁铁矿建造·····	67
地台区的镁磁铁矿建造·····	69
古生代褶皱系优地槽型铁镁质杂岩中的矽卡岩-磁铁矿建造·····	79
应用地球物理方法预测和评价铁矿床的物理-地质基础·····	91
铝土矿建造·····	107
采用的术语·····	107
铝土矿建造和铝土矿矿床的分类·····	109
铝土矿建造和铝土矿矿床的预测·····	135
结 束 语·····	143
参考文献·····	145

主要由壳下岩浆、变质作用 和外生作用生成的矿石建造

铬铁矿矿床建造

铬尖晶石是唯一具有工业意义的铬矿物，它在采矿业的实际工作中被称为铬铁矿。铬铁矿矿床与在地壳以下深处形成的超基性岩和基性-超基性岩体有关，它们只分布在超基性岩和基性-超基性岩岩体范围内，并且成为这类岩体的一个岩相变种。因此，铬铁矿矿化的形成条件和分布规律与上述岩石的形成作用有着极其密切的关系。

铬尖晶石是超基性岩和某些基性岩的固定的副矿物，但是铬尖晶石的工业富集只出现于一定建造类型的岩石中：地槽区的纯橄岩-斜辉辉橄岩建造-固结区的斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩（分异的玄武岩类）建造。铬尖晶石的非工业富集出现于褶皱区的单斜辉石岩-纯橄岩建造的超基性岩（含铂-钛）和地台的超基性-碱性岩建造的岩石（含铂-稀有金属）中。因此，超基性-基性岩的建造分析是预测含铬远景的基础。本文将只探讨具有工业价值铬铁矿矿化的建造。

与各种超基性岩建造有关的铬铁矿矿床在地壳内的分布规律、形成条件、与围岩的关系、矿体的形态和参数以及决定矿床工业价值的矿石成分等方面具有一些明显的特点。据此，可划分出与上述岩石建造相一致的两种工业铬铁矿矿石建造：地台区的斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩侵入体建造和地槽区的纯橄岩-斜辉辉橄岩岩体的建造。

铬铁矿矿石的成分主要决定于铬尖晶石的成分。天然的铬尖晶石是 $(Mg, Fe)^{2+}(Al, Cr, Fe)^{3+}_2O_4$ 的五组份系统，其中二价和三价元素普遍出现类质同像现象（图1），这就造成了矿石成分的重大变化（斯蒂文斯，1944年；索科洛夫，1948年；帕甫洛夫，1949年；等等）。

铬铁矿矿石的用途取决于铬尖晶石的成分及其在矿石中的含量。工业矿石主要是具有适宜的铬、铝含量和 Cr_2O_3/FeO 比值的致密状和密集浸染状矿石。富含铬的矿石（ $Cr_2O_3 > 45\%$ ， $Cr_2O_3/FeO > 2.5$ ， $SiO_2 < 10\%$ ）是冶金、化学和耐火材料工业的原料，富含铝（ $Al_2O_3 > 15\%$ ）的矿石只用来生产耐火材料，高的镁含量能提高各种矿石的质量，而高的铁含量，特别是氧化铁的含量会使各种矿石的质量降低。对于铬尖晶石含量较低的矿石或者在胶结物中富集了有害杂质（ CaO, P ）的矿石，需要进行选矿。主要的工业型矿石是冶金级和耐火材料级矿石，它们在发达国家的总消费量中分别占60—65%和15—20%左右。高铁铬铁矿目前在工业上还未被利用。

铬铁矿矿石的成分与围岩的建造属性有关（斯蒂文斯，1944年；索科洛夫，1948年；帕甫洛夫，1949年；格里戈里耶娃、丘普雷尼娜，1973年；塞耶，1960年，1969年；欧

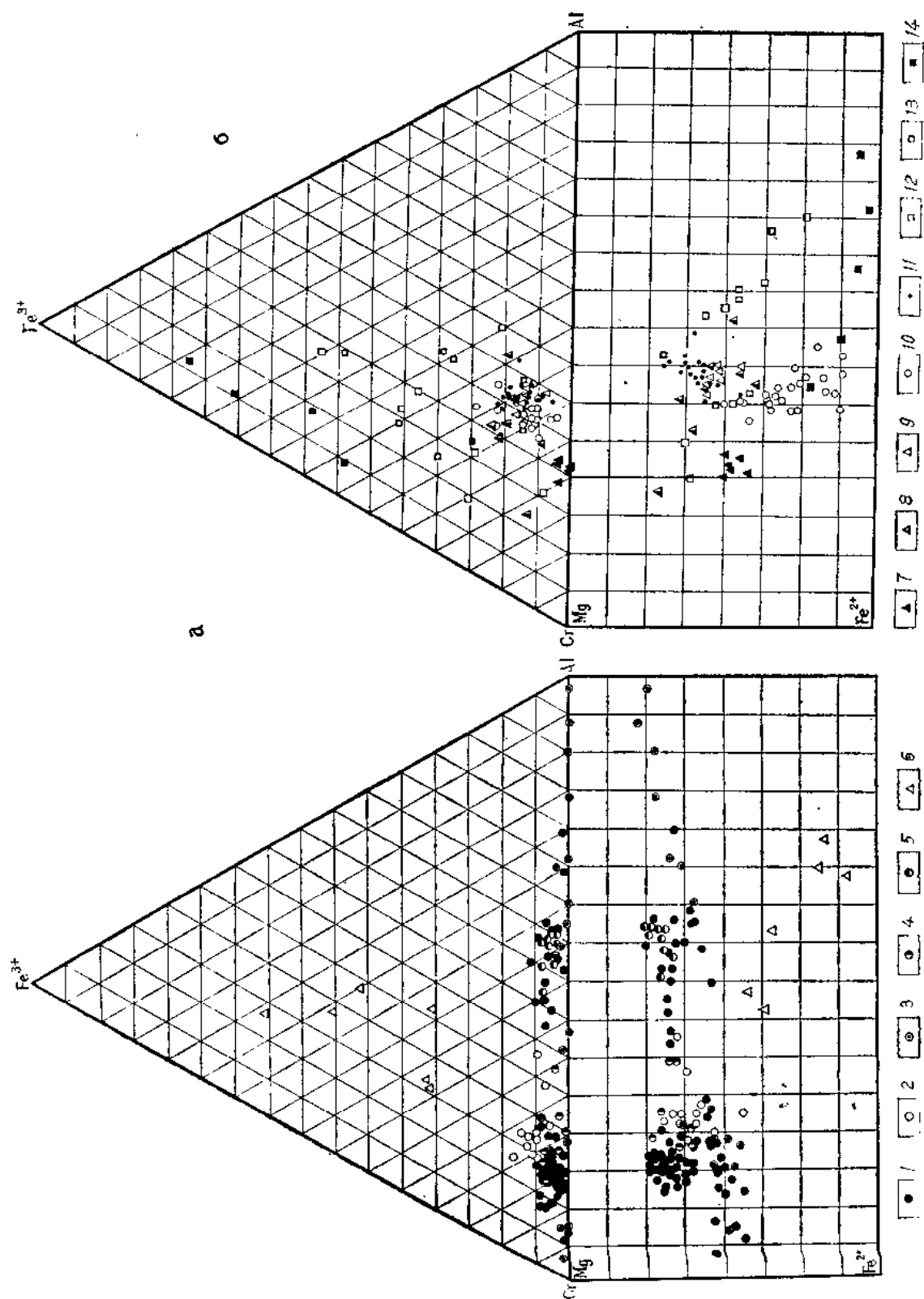


图 1 各种类型的超基性岩中成矿铬尖晶石的成分图解

- a—纯橄岩-斜辉辉橄岩建造；б—斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩建造和单斜辉石岩-纯橄岩建造
- 纯橄岩-斜辉辉橄岩建造的矿床和矿点：1—南乌拉尔肯皮尔赛岩体；2—中乌拉尔的矿床；3—楚科奇的矿点；4—加利福尼亚的矿点；5—菲律宾的墨辛洛克；6—楚科奇克腊斯诺戈尔斯克岩体晚期纯橄岩-辉石岩-橄辉岩组合中的矿点
- 斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩建造的矿床：7—津巴布韦的“大岩墙”；8—南非共和国的布什维尔德；9—美国的斯齐卢奥捷尔；10—芬兰的克米；11—中乌拉尔的萨腊诺夫
- 单斜辉石岩-纯橄岩建造的矿点：12—中乌拉尔的下塔吉尔和克特累姆岩体；13—阿拉斯加东南部；14—美国怀俄明州
- 资料来源：1、2—H.B.巴甫洛夫，4、13、14—R.斯蒂文斯，3、6—T.A.斯米尔诺娃，5—W.斯托尔，7—R.比吕 (Bi Chan)，8、9—C.万德瓦特 (Wan der Valt)，10—O.瓦阿斯斯基，A.海克南，11—C.C.齐明，12—H.B.布提林和A.A.叶非莫夫

文，1967年，等）。纯橄岩-斜辉辉橄岩建造的岩体含有铬和铝含量不定，而氧化铁含量总是很低的高镁铬铁矿（根据H.B.帕甫洛夫的命名为铬铁矿—铝铬铁矿—硬铬尖晶石，1949年）矿床。斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-苏长岩建造的岩体含有镁铁质铬铁矿矿床，其中氧化铬的含量变化不定，但通常为中等，而氧化铝和氧化铁的含量则较高（亚高铁铬铁矿—高铁铝铬铁矿）。由于上述两种建造的矿石成分不同，因而它们的工业价值也不同。纯橄岩-斜辉辉橄岩建造是冶金级富铬矿石的主要来源和耐火材料级高铝镁质矿石的唯一来源。玄武岩类建造主要含耐火材料级高铁矿石，这种建造的矿床中只有含铬最富的矿石才符合冶金工业的要求。

纯橄岩-斜辉辉橄岩建造中产有规模最大的肯皮尔赛（苏联）富铬铁矿矿床，较小的古列曼矿床（土耳其）、巴拉望矿床（菲律宾）、谢柳克韦矿床（津巴布韦）、喀利多尼亚矿床（古巴）等，以及高铝镁质矿床——墨辛洛克（菲律宾）和古巴、印度、日本等地规模较小的矿床。在玄武岩类建造中产有特大型的“大岩墙”（津巴布韦）富铬矿床和一系列含铬中等而含铁较高的矿床——布什维尔德（南非共和国）、斯齐卢奥捷尔（美国）、克米（芬兰）、非斯克涅谢特（格陵兰）、锡塔姆彭季（印度）和其它一些较小的矿床。大多数研究者将含铬中等的萨腊诺夫矿床（苏联）归入这一类型。看来，巴伊亚州（巴西）的富铬矿床也属于这一类型。

分异的玄武岩类侵入体的铬铁矿建造拥有全世界已探明的铬铁矿矿石储量的四分之三，资本主义国家和发展中国家铬铁矿矿石储量的95%左右，苏联铬铁矿矿石储量的5%。

全世界铬铁矿矿石资源分布极不均匀。资本主义国家和发展中国家95%的储量集中在两个最大的矿床中——布什维尔德和“大岩墙”，它们分别含有10.5和5.5亿吨铬铁矿矿石。其它国家中，铬铁矿矿石储量最大的是芬兰（3000万吨）、土耳其（1000万吨）、印度和菲律宾（各为700万吨），苏联也拥有巨大的铬铁矿矿石储量。

在苏联，铬铁矿矿石资源的地理分布也很不均匀，它只有两个工业矿床，它们集中在同一地区。这两个矿床是肯皮尔赛矿床（南乌拉尔的阿克秋宾斯克州）和萨腊诺夫矿床（中乌拉尔的彼尔姆州）。肯皮尔赛矿床集中了全苏铬铁矿矿石储量的95%，矿石中 Cr_2O_3 的平均含量为50%，萨腊诺夫矿床集中了全苏铬铁矿矿石储量的5%，矿石中 Cr_2O_3 的平均含量为38%。在乌拉尔的其它一些地区，以及在哈萨克斯坦、西伯利亚南部、堪察加、楚科奇和乌克兰，也发现了许多铬铁矿矿点和小矿床。尽管苏联原料基地的铬铁矿保证程度很高，但是在各种工业类型矿石的储量与对它们的需求量之间存在着不相适应的情况。

苏联耐火材料级矿石的储量不足，根本没有优级高铝质耐火材料（墨辛洛克型）。由于这一缘故，在世界市场上冶金级矿石奇缺的情况下，却把20%左右的冶金级矿石用作为耐火材料。铬铁矿原料基地的合理利用要求在耐火材料工业上停止消费冶金级铬铁矿矿石，而代之以高铝质铬铁矿矿石或镁质耐火材料。

工业发达国家的铬铁矿消费量正在与日俱增，这就促使要为贫浸染状矿石找出合理的选矿方法，或者不经选矿而直接冶炼的方法。

固结地区斜辉辉橄岩—斜方辉石岩—苏长

岩侵入体的铬铁矿建造

地壳中的分布规律

分异的玄武岩类侵入体的铬铁矿建造产于地壳的稳定地区。这种建造的岩体分布于大陆地壳的深大断裂带中，玄武岩类熔融体从地壳以下沿着深大断裂带上升，并在中等深度条件下发生结晶。地台环境有利于熔融体深度的分异，熔融体的结晶产物形成了非常稳定的层状杂岩体，其中含有与围岩同生的铬铁岩层。

根据与主要大地构造单元的关系，可将分异的含铬铁矿玄武岩类侵入体的分布区划分为四种类型：（1）地台区；（2）地台周围的褶皱区（基底构造遭受轻微改造）；（3）地槽内的中间地块区；（4）褶皱系地区。

分异的玄武岩类侵入体赋存于上述大地构造单元的结晶基底（基底杂岩）中，或者赋存于由沉积岩（主要是陆源岩）和火山—沉积岩组成的盖层中。它们形成于已固结构造延续很长的活化时期（从褶皱带早期固结阶段开始，直到地台基底的形成和地台的活化）。

地台区含有绝大多数含铬铁矿玄武岩类侵入体和这种类型的所有已知的工业矿床。非洲地台和北美地台可以作为地台区的典型实例。在太古代后的非洲地台南部的深大断裂中分布着布什维尔德和“大岩墙”两个岩体，它们的侵入时间估计为早—中元古代。在中元古代后的北美地台上，在加拿大地盾的边缘断裂中产有中元古代的斯齐卢奥捷尔、马斯科克斯、菲斯克涅谢特等侵入体。在南美地台巴西地盾的断裂中产有巴伊亚州的前寒武纪侵入体。这类岩体还发现于俄罗斯地台的结晶基底中（波罗的地盾和沃罗涅日地盾）以及出现于西伯利亚地台的阿尔丹地盾上。在苏联，没有发现这种类型的工业矿床。

地台周围的褶皱区分布于已固结的褶皱带中（在遭受轻微改造的地台基底上）。毗邻俄罗斯地台的乌拉尔褶皱区的西部（乌拉尔冒地槽带）是这类地区唯一已知的实例。这里，在乌拉尔褶皱带构造中，在乌拉尔造山期以前固结的岩系内，分布着萨腊诺夫—维谢拉含铬铁矿超基性岩带（Д.С.施捷因别尔格，Ю.Л.斯米尔诺夫）。该岩带的形成与俄罗斯地台（保存着遭受轻微改造的基底构造）东部边缘古老里非期地槽的次地台发展阶段有关。Ю.Л.斯米尔诺夫将这类岩体列为特殊的长石质岩浆建造。但是，关于萨腊诺夫带的超基性岩是否属于玄武岩类建造的问题，目前尚有争论；有人认为，它属于特殊的冒地槽型辉长橄辉岩建造（Н.В.帕甫洛夫）或辉石岩—橄辉岩建造（К.К.佐洛耶夫，Л.Л.布雷金）。

地槽内的中间地块区只包含一个兹拉托戈尔侵入岩和一些研究得很差的铬铁矿矿点（产于科克契塔夫前寒武纪中间地块的加里东早期断裂带中）。

褶皱系地区包含 B.B. 斯洛德克维奇不久前在东萨哈林（库页岛）发现的舍利金加组层状含铬铁矿岩体。这些岩体分布于典型的优地槽岩系中，它们是在褶皱系发育的固结阶段形成的。褶皱系岩体的这一特点及其较新（中中新世）的时代，使它们区别于固结期后活化带的古老岩体。

由此可见，含铬铁矿玄武岩类侵入体分布的一般规律是它们与地壳稳定区的深大断裂带有关，已知的大多数铬铁矿矿床和所有具有重要经济意义的铬铁矿矿床都是在最初的太古代—元古代原始地台发生活化时形成的，据此可相应地划分出前寒武纪成矿时代。

地质特征简述

分异的玄武岩类侵入体呈线状或不规则状的简单岩盆或复杂岩盆（联合的岩浆房）出现，它们的规模可以很大。例如，由五个碟状岩体组成布什维尔德岩盆，其面积达到 2 万平方公里，厚度 7.5 公里。槽形的“大岩墙”侵入体由四个简单的盆组成，长达 500 公里，宽 5—10 公里，厚度为 3 为 4 公里。发育较少的是菲斯克涅谢特岩体（延长 125 公里）类型的线性岩墙状岩体。层状杂岩体向岩盆中心平缓倾斜，但边缘部分倾斜较陡。

层状杂岩体由多种超基性岩和基性岩以及少数中性岩组成（纯橄岩、斜辉辉橄岩、辉石岩、长石超基性岩、斜长岩、苏长岩、辉长岩，有时有铁闪长岩和文象斑岩）。岩体具有垂直分带性，它表现为向着岩体顶部岩石的基性程度降低（超基性岩—基性岩—中性岩）。分带性通常被不同规模的分层性和韵律性所复杂化。在岩体边部，存在原始玄武岩类的淬火带，而在外接触带中，则出现热变质带。遭受过构造变动的岩体与原地岩体的区别是它们不存在边缘淬火带。

分异的玄武岩类岩体根据岩石成分可以划分为一系列不同的带（赫斯，1960年；沃斯特，1960年；等）。在岩体的完整剖面中，除了边缘淬火带外，还可划分出以下各带（从底部到顶部）：（1）底部纯橄岩—橄辉岩—辉石岩带；（2）由辉石岩—苏长岩组成的临界带；（3）由苏长岩—辉长岩—斜长岩组成的主带；（4）上部辉长岩—闪长岩带（图 2）。临界带与上部带的岩石组合差别最明显。各带通常再可分为数个层位（厚从数十米到一、二百米），而每一个层位又是由许多不同厚度的岩层所组成。韵律性表现为各个层位、岩层和岩层本身的组成部

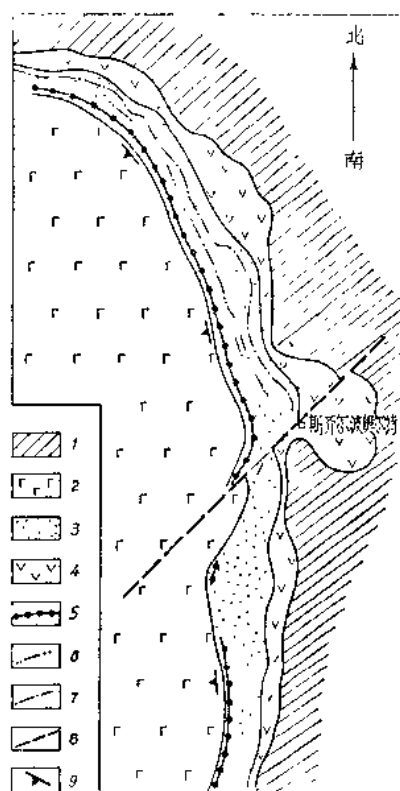


图 2 布什维尔德杂岩体东部地质构造略图

（根据 Ю. 卡麦朗、Дж. 杰新博罗的资料，1973 年）

1—布什维尔德岩体周围的元古代地层（普利托里安群及其共生的岩石）；2—7—布什维尔德杂岩体；2—主带，3—临界带，4—过渡带和下部带，5—梅林斯基矿层，6—斜长岩系的铬铁矿层 7—斯齐尔波奥尔特铬铁矿层；8—断层；9—布什维尔德杂岩体的岩石产状

分在侵入体的垂直剖面上交替出现。

常见的是规则的岩层和矿层，但除此之外还发育厚度变化不定和出现分枝等的岩层及矿层。岩层的接触关系从急变到渐变均有。通常出现堆积嵌晶状结构（由细粒堆积相和粗粒的间堆积体构成），韵律性条带状构造。不存在线性构造。包含在辉石或斜长石中的铬尖晶石呈现良好的自形。

往侵入体顶部，岩石的成分随着二氧化硅和铁含量的增高而发生有规律的变化；随着斜长石的出现，碱金属的含量亦增高。硅酸盐和尖晶石副矿物也具有这种趋势。例如，沿着布什维尔德侵入体的剖面，从纯橄岩到铁闪长岩，橄榄石的含铁量（指橄榄石中铁在铁镁总量中所占的百分比——译者注）从10%增高至100%，斜长石的基性度从85%降至35%；从纯橄岩到辉长岩，斜方辉石的含铁量从10%增高至60%（威廉斯，1969年）。金属副矿物是互相排斥的铬尖晶石（在超基性岩和某些辉长岩中）和磁铁矿（在较酸性的岩石中）。这种情况反映了尖晶石（这类杂岩体的常见副矿物）成分的主要演化趋势——尖晶石的含铁量随着岩石中二氧化硅含量的增高而增高。

发育铬铁矿矿化的玄武岩类侵入体的超基性和基性分异物，主要含斜方辉石，故它们属于斜辉辉橄岩—斜方辉石岩—苏长岩系列（与含钛和硫化物矿化的侵入体中主要发育单斜辉石的情况不同）。

铬 铁 矿 矿 化

铬铁矿矿体赋存于玄武岩类最基性的分异物——超基性岩及其含长石的变种（斜长岩，有时是苏长岩）中，并且分布于岩体的下带（底部带或临界带）。含矿带的总厚度达数百米。含矿带中可划分出若干含矿层位，它们由铬铁岩层与无矿岩层的互层组成。含矿带的结构与侵入体剖面其它部分的结构类似。

铬铁岩层通常位于不同岩石的接触部位上，这些岩石通常形成以下类型的韵律：纯橄岩—铬铁岩—古铜辉岩、古铜辉岩—铬铁岩—斜长岩—苏长岩（分别出现于布什维尔德岩体临界带的辉石岩系和斜长岩系中）、斜辉辉橄岩—铬铁岩—斜方辉石岩—矾石岩（马斯科克斯矿床）和纯橄岩—铬铁岩—顽火纯橄岩（萨腊诺夫矿床）。在结构较简单的矿带内，铬铁岩层产于斜辉辉橄岩（“大岩墙”、斯齐卢奥捷尔）、辉石岩（布什维尔德、锡塔姆普季）和斜长岩（布什维尔德、菲斯克涅谢特）中。

层状矿床的特征是铬铁矿层的厚度较小，延伸很长，而且往往为数众多。在布什维尔德，已查明27个铬铁矿层；在萨腊诺夫岩体中，发现29个；在“大岩墙”的哈尔特利杂岩体中，发现12个；在斯齐卢奥捷尔，发现13个。斯齐卢奥捷尔岩体中，矿层的最大厚度为3.6米，锡塔姆普季岩体——3米，布什维尔德——2米，菲斯克涅谢特——1米，“大岩墙”——0.35米，通常以数厘米到12厘米计；萨腊诺夫矿床是唯一的例外，其中铬铁岩层的厚度达到12米。铬铁矿层的长度时常达到数十公里，这超过它们厚度的 10^5 倍。正因为如此，厚度不大的矿层能拥有特别大的储量。例如，布什维尔德的斯齐尔波奥尔特矿层的厚度为1.37—1.46米，长达77公里，根据最保守的估计，它含有5亿吨铬铁矿矿石，是世界上最大的铬铁矿矿床。

矿层通常具有较急变的下部接触界线和渐变的上部接触界线，而且最富含铬铁矿的底

部矿层由致密的单矿物矿石组成，而其它部分则主要由密集浸染状矿石组成。同时，矿石的结构-构造特点往往也有变化。致密矿石主要由细粒八面体铬尖晶石组成，而浸染状矿石则由中粒斑状或鲕状矿石组成。同时，铬尖晶石的数量逐渐地或有节奏地减少。有时，在矿层范围内，浸染程度很稳定。具有对称结构的矿层，即中部由致密矿石、上部和下部接触带由浸染矿石组成的矿层极为少见（布什维尔的斯齐尔波奥尔特矿层，“大岩墙”哈尔特利杂岩体的1号矿层）。在未遭受变质的矿石中，铬尖晶石被橄榄石、斜方辉石和斜长石所胶结；也可能存在硫化物、自然铂和其它一些矿物。

表1中列出了全世界大多数正在开采的层状矿床中成矿铬尖晶石的典型成分。铬尖晶石的成分由含铬中等的高铁铬尖晶石（高铁铬铁矿和高铁铝铬铁矿）变化至富含铬的镁铬尖晶石（铬铁矿—亚高铁铬铁矿）。它们与阿尔卑斯型矿床的铬尖晶石的区别是：总含铁量高（ $f=50-80\%$ ），铁的氧化程度较高（平均30%）， Cr_2O_3/FeO 比值较小（0.8—2.8%），而杂质组份 TiO_2 （0.4—1.6%）和 MnO （0.2—0.9%）的含量较高。

萨腊诺夫矿床与地台型矿床的区别在于矿石的总含铁量较低（平均为48%），这是由

固结区玄武岩类侵入体中铬铁矿建造的成矿铬尖晶石的成分

表 1

组 份	围 岩						
	长 石 斜 辉 辉 橄 岩			辉石岩系	顽火纯橄岩	斜 长 岩	
	1	2	3	4	5	6	7
SiO_2	1.30	0.34	0.23	0.12	0.88	0.76	0.82
TiO_2	0.62	1.60	0.91	0.44	0.55	0.44	0.52
Al_2O_3	12.94	13.0	14.4	15.74	16.29	24.02	15.4
Cr_2O_3	57.00	49.2	36.6	47.12	45.68	34.48	44.6
Fe_2O_3	1.67	3.1	16.0	—	5.98	6.48	6.1
FeO	17.63	25.3	24.0	25.15*	17.69	25.23	24.7
MnO	0.19	0.31	0.19	—	0.21	0.28	0.40
MgO	9.48	6.5	7.2	11.13	12.09	6.20	6.5
CaO	0.21	0.3	0.01	0.53	0.00	0.00	—
V_2O_5	0.23	1.1	0.17	0.62	0.18	0.27	0.18
NiO	0.12	—	—	—	0.15	—	0.10
总 计	101.39	100.75	99.71	100.85	99.71	98.16	99.32
$Cr_2O_3/\Sigma FeO$	2.63	1.81	0.95	1.66	1.98	1.11	1.30
f	50.8	68.4	64.9	55.6	52.7	69.3	67.9

1—津巴布韦“大岩墙”，2号矿层（R.比昌，1969年）；2、3—美国斯齐卢奥捷尔，G和B带（塞耶，1969年）；4—南非共和国布什维尔，斯齐尔波奥尔特层（威廉斯，1969年）；5—萨腊-格陵兰（M.吉斯勒，1970年）；7—芬兰克米（O.瓦阿斯乔基，1963年）。

* 总含铁量换算成氧化亚铁

于氧化亚铁含量很少所致；从这一点来说，它类似阿尔卑斯型矿床的矿石。但是，由于没有发现其它的萨腊诺夫类型的矿床，因而不能将这一结论推广到所有冒地槽带的矿床。然而，在萨腊诺夫矿床与在地台型矿床一样，铁的氧化程度也很高（平均为32%），在其它组份的含量方面，萨腊诺夫矿床与地台型矿床也没有区别。

有些矿床的矿石中含有铂。铂族元素呈硫化物，其次呈砷化物、碲化物、锑化物和自

然金属出现,并且与铁、镍和铜的硫化物共生。铂族金属具有明显的钨-铂专属性。对于富含铂族元素的铬铁矿层,如果其中铂族元素的总含量达到每吨数克,可附带或专门开采铂族元素,并可顺便提取铜、镍和金。铂族元素富集层可以是厚度很小的铬铁矿薄层:在正在开采的梅林斯基矿层(布什维尔德)中,含铂铬铁矿薄层的厚度仅为数毫米。

T.泰耶尔、E.杰克逊、B.沃尔斯特、T.伊尔文、O.K.伊凡诺夫等人,通过研究查明了成矿铬尖晶石及与其共生的硅酸盐成分的一系列变化规律。成矿铬尖晶石的成分取决于:(1)围岩类型;(2)矿层的地层位置;(3)铬尖晶石浸染体的密度。

随着岩石基性度的降低和二氧化硅含量的增高,特别是随着钙含量的增高(按照纯橄岩-斜辉辉橄岩-斜方辉石岩-斜长岩的次序),成矿铬尖晶石富含铁(主要是氧化亚铁)和铝,而铬和镁则变贫(见表1)。因此,在纯橄岩和斜辉辉橄岩中,可能有富铬矿石出现(“大岩墙”矿床),而在辉石岩、尤其是斜长岩中,只能出现含铬中等和较贫的、铁和氧化铝的含量较高的矿石(非斯克涅谢特矿床)。在侵入体层状剖面中,即使在矿层产于同名岩石中的情况下,也出现这种趋势。沿着布什维尔德岩体的剖面,铬铁矿层(在超基性岩-斜长岩中)被磁铁矿层(在辉长岩中)所取代,这是成矿尖晶石成分与围岩成分存在依从关系的明显例证。

在铬铁矿层范围内,铬尖晶石的成分取决于它的含量:铬铁矿数量越多,它就越富含铬和镁。因此,铬尖晶石数量的变化会在矿体的垂直剖面中造成地球化学分带性(通常是韵律式的,偶尔是对称性的)。与铬尖晶石共生的硅酸盐也具有这种规律:随着铬尖晶石含量(及其镁含量)的增高,橄辉石和斜方辉石的含镁量以及斜长石的基性度亦增高。根据E.杰克逊的资料,在矿层范围内,在矿染密度相同的情况下,不管胶结物的成分如何,仍然保持着往上部含铁量增高和含铬量降低的趋势。

在矿层的侧翼,铬尖晶石中的总含铁量保持不变,但是 Fe^{2+} 的含量往边部增高。这种情况由铬或铝含量的下降得到补偿。根据A.A.勃罗尼科夫的资料,在萨腊诺夫矿床矿石成分很稳定的情况下,在陡倾斜矿层的横断面上,氧化铬的含量往深处,即往矿层侧翼增高(图3)。在所有三个正在开采的矿层中,三价铬很稳定——在100米范围内为0.8%。

由此可见,随着铬铁矿矿体围岩基性度的增高,矿体分布于侵入体剖面的较下部位以及成矿铬尖晶石浸染体密度的增高,矿石的质量也提高:铬含量和Cr/Fe比值增高。在同一个岩体范围内,矿石的成分,特别是主要组份的含量,通常不起重大变化,但是Cr/Fe值变化较明显。

晚期岩浆作用和岩浆期后作用通常不会使矿石质量发生根本变化。但是,高温Mg-

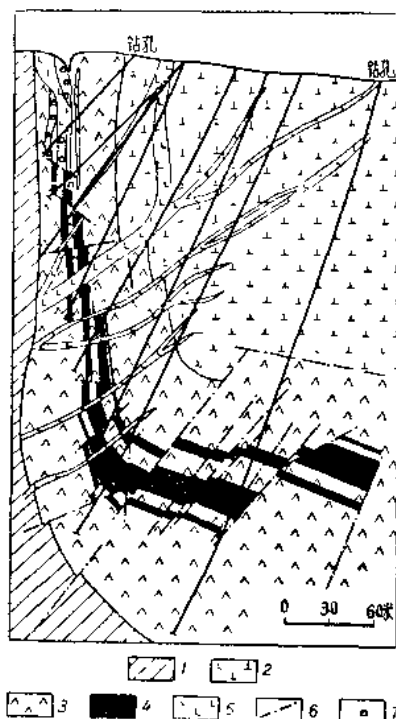


图3 萨腊诺夫主铬铁矿矿床的地质剖面

(根据萨腊诺夫地质勘探队的资料)

1—结晶片岩; 2—辉长岩和辉长-苏长岩; 3—橄辉岩; 4—密集浸染状和块状铬铁矿石; 5—辉长-绿辉岩, 玢岩等; 6—构造断裂; 7—山地工程

Fe—Ca 交代作用会使矿石含铁量明显增高。例如, 布什维尔德镁铁橄石纯橄岩中的一部分铬铁矿层含 FeO 49.7%, Cr_2O_3 30.39%, MgO 1.98%, $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}=0.54$, 而未蚀变矿石含 FeO 29.79%, Cr_2O_3 38.22%, MgO 8.8%, $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}=1.26$ 。萨腊诺夫岩体橄石—顽火辉石交代岩中的铬铁矿矿石也具有较高的含铁量。

铬铁矿矿化的进一步改造与构造—岩浆活化作用有关。以下两个例子在这方面表现比较突出。

萨腊诺夫矿床的矿体被断裂切割成一些块段, 它们的断距达数十米。岩石和矿石遭受区域性绿片岩相变质作用。切穿它们的大量辉绿岩、辉长—辉绿岩和斜长石岩岩脉伴生有接触交代岩和脉状交代岩。大量碳酸盐交代岩的存在促使富含氧化钙—平均 1.2%, 个别块段中达 5%, 这可能就是在其它因素都很有利的情况下矿石未能达到标准的原因所在。

菲斯克涅谢特矿床(格陵兰的前寒武纪早期片麻岩基底)曾遭受过两期褶皱、变质作用, 其结果是使铬铁矿层产生断裂和发生石香肠化, 并导致形成次生的角闪石—铬磁铁矿共生组合(M. 吉斯列尔)。

形 成 条 件

大多数研究者认为, 分异的含铬铁矿玄武岩类建造是地台条件下玄武岩类岩浆在岩浆房内结晶的产物。岩石和矿石主要是在发生分离结晶作用和重力分异作用(岩浆分选作用)时形成的(塞耶, 1960年; 赫斯, 1960年等)。

根据淬火带的成分可以判断, 原始熔融体类似于在 20—60 公里的深度和 1100—1300°C 的温度条件下生成的拉斑玄武岩(Л. X. 格林, Э. Л. 林格伍德, 1968年)。侵入体是在中深条件下形成的, 因为它们的厚度达到 15 公里。层状杂岩体沿侧向在很大距离内保持着其本身的特点, 这说明岩浆房内的原始熔融体是很均匀的; 而在垂直剖面上岩石和矿物成分的变化性质表明, 它们是在熔融体成分发生变化和温度下降的条件下结晶的。共生组合的变化与鲍文提出的玄武岩熔融体的结晶分异公式(随着硅的积聚和相对含铁量的增高)以及作过实验研究的 $\text{MgO—FeO—Fe}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 简化系统(A. 穆恩, E. 奥斯博恩)是很符合的。

业已查明, 存在着这样一种稳定的矿物结晶顺序: 橄石、铬尖晶石(堆积体), 然后是辉石(或者还有斜长石), 辉石包含了堆积相。结晶作用受边缘熔蚀反应控制, 用边缘熔蚀反应还可说明铬尖晶石被斜方辉石取代的现象。

除了温度下降和成分变化以外, 玄武岩类熔融体发生结晶的一个重要因素是氧的分压力的变化(A. 穆恩, E. 奥斯博恩, P. 比昌)。或许正是这一因素控制了铬铁岩层的形成: 尖晶石结晶时的 $p\text{O}_2$ 比硅酸盐结晶时的 $p\text{O}_2$ 要高; 随着 $p\text{O}_2$ 的降低, 尖晶石的结晶区缩小以至消失(E. 奥斯博恩, Л. 罗伊杰尔)。这种情况可以说明用其它原因不能解释的铬尖晶石穿过岩石界线的现象, 因为 $p\text{O}_2$ 的变化会影响硅酸盐的结晶温度。一般认为, 在所研究的这种封闭系统中, $p\text{O}_2$ 变化的机理可能是对流迁移或围岩的同化(在许多侵入体中发现有围岩碎块)。随着分异作用的进行, 铬尖晶石的含铁量增高, 以至被磁铁矿取代, 这种情况也说明, 尽管氧在尖晶石形成过程中被消耗, 但 $p\text{O}_2$ 没有减弱。这种认识与 E. 奥斯博恩和 Л. 罗伊杰尔对钙—碱系列的玄武岩类熔融体所作的实验是符合的。由此可

见,侵入体的形成是静态的重力分异作用与动态的对流分异作用互相结合的结果。有些研究者认为,熔融体在深部有可能发生初步分异作用。

在平静环境中形成的层状杂岩体,可以被看作为是岩浆沉积作用的产物,它们拥有普通沉积物所具备的一切特点(包括间断和不整合在内)。为了说明层理、韵律和反常层序等现象,时常引用结晶熔融体中的对流和紊流作为补充因素。已沉淀的晶体从岩浆房壁部的迁移,边缘部分岩层厚度变大以及斜层理的出现可用对流加以解释;而紊流则能说明晶体按照质量、大小和形状发生的分选性。引用岩浆流还可说明岩层分离现象。

层状杂岩体的形成作用一直延续到堆积相和堆积体之间的矿物沉积之后。岩浆“沉积物”的固结是与“成岩作用”同时发生的,后者引起了岩石和矿石的重结晶(斜方辉石分解,易变辉石变为斜方辉石,由原生硅酸盐发育角闪石等)。同时,产生铬铁岩的多面体结构、球状结构和斑状结构,并且经常出现较粗粒的定向构造。

关于层状侵入体中铬铁矿矿石的形成条件尚未通过实验加以查明。根据平衡的共生矿物橄榄石和铬尖晶石(三价阳离子的含量是固定的)中镁和铁的分配情况,对铬铁矿矿石的形成温度所作的计算表明,它们的形成温度与已知的、玄武岩熔融体的温度不相上下。并且已经查明,铬铁岩的形成温度与矿层层位有关,而在矿层内部,则与产出深度有关。

层位较高的矿层是在较低的温度下形成的。矿层下部的密集浸染状矿石,其形成温度最高,往上部温度明显下降并趋向稳定。例如,斯齐卢奥捷尔岩体底部斜辉辉橄岩带中两个相邻的铬铁岩层(厚度各为3.5米左右,上下相距约70米),它们形成的平均温度(根据计算得出)分别为 $1280 \pm 104^{\circ}\text{C}$ (下部铬铁岩层)和 $1000 \pm 83^{\circ}\text{C}$ (上部铬铁岩层)(杰克逊,1969年)。

根据已查明的铬尖晶石的成分与氧的分压力之间的关系,可以对氧的分压力作出估计:高的 Fe^{3+} 、Mg和Cr含量反映了较高的 $p\text{O}_2$ (T.伊尔文,Ю.П.特列契亚科夫)。可以推测,沿着含矿侵入体和单个矿层的剖面往上, $p\text{O}_2$ 会下降(引起铬铁矿中铬和镁含量的降低),而往矿层边部 $p\text{O}_2$ 将增高(引起铬尖晶石中 Fe^{3+} 含量的增高)。

但是,上述理论不能说明分异的玄武岩类侵入体及其铬铁矿矿床的某些特点。为了解释这些特点,引用了堆积期后的变质作用和交代作用的概念。除了上面提到的铬铁矿矿石和岩石的重结晶现象之外,必须指出,还存在高温Ca—Fe—Mg交代作用。例如,布什维尔德的纯橄岩似伟晶岩、古铜辉岩似伟晶岩、异剥岩似伟晶岩和金云母似伟晶岩以及萨腊诺夫岩体的纯橄岩伟晶岩、顽火辉石和透辉石纯橄岩伟晶岩、拉长石-透辉石伟晶岩便是由这种交代作用形成的。

超基性岩的低温交代作用主要表现为利蛇纹石型蛇纹石化(利蛇纹石-磁铁矿共生组合)。玄武岩类岩体和铬铁矿矿化受到的机械改造和变质-交代改造作用发生于构造-岩浆活化阶段。机械变形使矿体的形状、大小和产出条件发生变化,使它们变得更复杂。稳定的缓倾斜矿层被改造成不稳定的、可能是很陡的块段(出现位移),同时还可能被改造成石香肠化透视镜体。矿石出现片状构造并产生破碎带。由于发生区域变质作用和局部变质作用的结果,矿石的原始共生组合被绿片岩相蛇纹石-绿泥石-铬磁铁矿组合所代替,偶尔出现角闪岩相变质作用。

表生作用通常表现为形成结核矿和砂矿,因为铬铁矿在风化壳中是稳定的。在构造断裂带中,可能发生淋滤作用。

一般说来,侵入期后发育阶段对于这种矿石建造的保存不起根本性影响。它通常表现

为矿体形态的变化和矿石出现绿片岩相变质现象。

由此可见，铬铁矿矿石是在成分相当于橄榄拉斑玄武岩的熔融体发生分异作用时产生的。原始岩浆属于橄榄拉斑玄武岩并非是偶然的，因为橄榄拉斑玄武岩中铬的含量高于其它玄武岩类中的含量——在橄榄拉斑玄武岩中为0.0185—0.0210%，而在石英拉斑玄武岩、碱性玄武岩和霞石玄武岩中为0.0125—0.0170%。含铬铁矿侵入体的超基性岩和基性岩一般具有高镁低钙成分，它们主要含斜方辉石并且形成斜辉辉橄岩—斜方辉石岩—苏长岩系列。富含钙的侵入体（其中的超基性岩含单斜辉石）不含铬铁矿矿化，它们一般也不含铬尖晶石副矿物，而是含钛磁铁矿。这说明玄武岩类岩浆具有原始成矿专属性，这种成矿专属性可能与它们产生的深度有关（看来，铬铁矿分支是较深的产物）。铬和镁具有亲氧性，因此它们不富集于含有硫和钙的介质中（马腊库舍夫，1974年）。这种情况可以解释这类侵入体中时常见到的铬铁矿矿床和硫化物矿床的相斥性。玄武岩类建造铬铁矿矿化的时间趋势（取决于上地幔的分异程度），可能也是由于这一原因造成的。

矿化发生的可能性及其规模，除了决定于原始岩浆的成分之外，还取决于分异程度以及岩浆房的大小和容量。铬铁矿矿体只出现于含有超基性岩的强烈分异的岩体中。根据经验资料，只有厚度大于3—4公里的侵入体才含矿，而铬铁矿层的总厚度与侵入体的厚度成比例（O.K.伊凡诺夫，1974年）。

层状玄武岩类侵入体建造是一种综合性建造。除了铬铁矿矿化之外，在其辉长岩、斜长岩、铁闪长岩和交代型异剥岩中还可能存在含钒钛磁铁矿矿化；在辉石岩中可能存在综合性的铂—铜—镍硫化物矿化，可能出现含铂超基性交代岩，蛭石交代岩，卡蛇纹石亚型的纵向纤维状温石棉以及橄榄岩风化壳中的菱镁矿矿石。

地槽区纯橄岩—斜辉辉橄岩岩体的铬铁矿建造

地壳中的分布规律

纯橄岩—斜辉辉橄岩岩体的铬铁矿建造赋存于大陆和大洋地壳的活动带中。地壳中这种铬铁矿建造的出现与渗透带有关，因为地幔物质是沿着渗透带进入地壳的。纯橄岩—斜辉辉橄岩建造的岩体沿着活动带形成延伸很长的岩带（往往是全球性的）；（1）现代大陆和大陆—大洋过渡带的优地槽（古代和现代的）；（2）大洋中的优地槽——大洋中脊的裂谷带（Г.Б.乌金采夫称之为裂谷生成带——Рифтогснали）。

优地槽的纯橄岩—斜辉辉橄岩建造通常与地槽早期发展阶段的沉积—火山岩建造伴生，即与细碧—辉绿岩建造（非分异的拉斑玄武岩型地幔火山岩）和以硅质为主的沉积物伴生，从而形成蛇绿岩套（施捷因曼的蛇绿岩三段式）。超基性岩产于硅质火山岩中，有时它们被硅质火山岩所覆盖。大洋中脊的超基性岩与其围岩的相互关系还不清楚，但可以肯定，它们也与原始基性火山岩伴生。

纯橄岩—斜辉辉橄岩建造在活动带发展历史中所占据的位置是争论很激烈的一个问题，这是由于许多岩石学问题和大地构造问题尚未解决而造成的。在以下一些研究者的著作中，介绍了对超基性岩的岩石学和大地构造问题所提出的不同观点，列举了各种观点

的论据并提出批评意见,他们是: X.赫斯、H.鲍文、T.泰耶尔、Ю.М.施捷因曼、A.林格伍德、Л.格林、П.维利、Г.В.皮努斯、Н.Д.索博列夫、А.В.彼伊维、Н.В.帕甫洛夫、B.E.哈因、C.H.伊凡诺夫和其他一些研究者。

虽然所有研究者都认为超基性岩物质来源于地幔,但是他们对超基性岩的形成条件及其侵入地壳的方式持有不同看法。大多数岩石学家否认在上地幔(达到软流圈的深度)温度下有可能存在超基性岩浆,他们推测,超基性岩是从排除了低温玄武岩熔融体之后的地幔残余物中形成的,而且认为,地幔物质在壳下或地壳条件下可能完全熔融并发生分异作用。

超基性物质进入地壳的方式还不清楚。据认为,可能有以下几种方式:(1)液态超基性岩浆侵入地壳(М.捷伊洛尔)或发生海底喷发(Е.别伊利、Е.基因季格);(2)固液混合物的侵入(H.鲍文);(3)热的(T.泰耶尔)或冷的(B.罗维尔)固态块体的侵入。近年来,关于超基性岩呈热的塑性体侵入(因构造作用)的假说得到了广泛承认,连对超基性岩持有原始岩浆成因看法的人也接受了这种假说。

传统的大地构造学派认为地槽区的纯橄岩-斜辉辉橄岩建造形成于地槽迴返前的早期阶段(哈因,1973年),即与很深的槽沟和硅质-火山岩系(超基性岩侵入于其中)形成时产生的断裂有关。

大洋地区(大洋中脊裂谷带和转换断层)超基性岩的发现有助于查明褶皱区中超基性岩的性质。赫斯-季特茨的假说认为,大洋中脊的超基性岩是岩石圈板块断开时(形成裂谷时)产生的洋壳碎块。这一假说与其它资料一起,成为建立新全球构造说——新活动论的基础。

新全球构造说认为,纯橄岩-斜辉辉橄岩建造是古老洋壳的下部暗色基底,它组成优地槽的底部,其上被沉积-火山岩系所复盖。根据古老优地槽带剖面与大洋中脊剖面的相似性,可以推断,古老地槽系的发育条件与现代海洋裂谷带的发育条件是相似的。褶皱带中的纯橄岩-斜辉辉橄岩建造的岩带类似于经历了大洋中脊-岛弧-褶皱区发展阶段的大洋裂谷带的超基性岩。大多数新活动论的支持者否认超基性岩是原地产出的,某些研究者认为,超基性岩在地壳中出现的时间与其形成时间是不一致的。

这两种假说中无论哪一种都不能满意地解释所观察到的各种事实,但是可以肯定的一点是:超基性岩是在地槽发育的早期阶段——地壳拉张阶段出现于地壳中的,而且与洋壳上产生的内部优地槽带有关。当地槽进一步演化时,超基性岩便被卷入造山作用——参与褶皱的形成,故得名阿尔卑斯型超基性岩。由于地槽区的演化,超基性岩便分布于地槽后期的造山区和地台区中。

发育原始超基性岩的地槽可在不同的大地构造条件下形成。B.E.哈因将其划分为:(1)大洋内部地槽;(2)在大陆-大洋过渡带中产生的大洋边缘地槽;(3)当大陆岩石圈遭受拉张作用时,在次生洋壳上产生的大陆内部地槽。

地槽区的纯橄岩-斜辉辉橄岩建造出现于从太古代到新生代的漫长时期内。最早的纯橄岩-斜辉辉橄岩建造产生于晚太古代—早元古代原始地槽发育时期。它们形成了南非地盾、印度地盾、加拿大地盾、乌克兰地盾、沃罗涅日地盾、波罗的地盾的超基性岩带,以及远东地区南部和西伯利亚地台南部(贝加尔—叶尼塞地区)结晶地块的超基性岩带。超基性岩的下一个形成阶段与晚元古代—早古生代地槽的发育有关(贝加尔褶皱带、里菲褶皱

带),它们形成了古老地台的褶皱边缘。乌拉尔—蒙古和大西洋褶皱区的许多超基性岩带以及地中海带和太平洋带的最古老的超基性岩带,与加里东地槽和海西地槽有关。太平洋带和地中海带中还有许多超基性岩体(主要是白垩纪和早第三纪的超基性岩体)与阿尔卑斯地槽的发育有关。最年轻的早第三纪超基性岩体发育于现代地槽——太平洋的年轻岛弧和处于强烈发育时期的地背斜(菲律宾盆地东部和马来西亚)中。

超基性岩出现的时代趋势与它们形成的大地构造条件(受地壳全球性演化的制约)有关。早期超基性岩与大洋内部的原始地槽有关,后者到晚元古代—古生代时期主要被大洋边缘地槽和内陆地槽所代替。因此,大洋裂谷带相当于大洋内部的原始地槽。

铬铁矿矿床可出现于各种不同时代的超基性岩中。T.泰耶尔认为,具有重要经济价值的矿床与古生代和更年轻的超基性岩有关。H.B.帕甫洛夫指出,加里东期和海西期的超基性岩与更老的和年轻的超基性岩相比,含铬铁矿较富。实际上,在前寒武纪超基性岩中,只发现少量小型矿床和矿点,它们出现于津巴布韦、印度、斯里兰卡和苏联(乌克兰,贝加尔—叶尼塞褶皱区)。加里东期和海西期超基性岩含有大量的(其中包括规模很大的)铬铁矿矿床和矿点,它们见于乌拉尔、哈萨克斯坦、阿尔泰—萨彦地区、阿巴拉契亚山脉和澳大利亚。许多铬铁矿矿床和矿点还出现于地中海带(希腊、塞浦路斯、阿尔巴尼亚、南斯拉夫、保加利亚、土耳其、伊朗、巴基斯坦、叙利亚和印度)和太平洋带(阿纳迪尔—科里亚克地区、日本、菲律宾、新几内亚)的阿尔卑斯褶皱带(包括太平洋的年轻岛弧在内)中。根据现有资料还不能认为中生代超基性岩比古生代超基性岩含铬铁矿较贫。看来,铬铁矿矿床还存在于大洋中脊的超基性岩中,因为从洋底曾采到铬铁矿矿石碎屑。

下面我们将只探讨地槽超基性岩,因为对大洋超基性岩无法进行观察,而且看来在最近的将来它们还不能开采。

因此,现代的含铬铁矿纯橄岩-斜辉辉橄岩建造分布区相当于不同的大地构造单元,它们反映了活动带发育的不同阶段,超基性岩正是在这些阶段侵入地壳的。这些大地构造单元就是:大洋中脊;年轻的(大洋边缘的)岛弧——现代地槽;成年的(大陆边缘的)岛弧——未结束的阿尔卑斯褶皱区;地槽后期褶皱区;地槽后期地台——地台和地盾基底的前古生代古老褶皱区。

我们感兴趣的阿尔卑斯型超基性岩分布于现代地槽以及不同时代的地槽后期褶皱区中。

地质特征简述

在地槽区范围内,纯橄岩-斜辉辉橄岩建造的岩带沿着不同级别的构造-建造带的边界分布。Г.В.皮努斯等人将这些岩带划分为:(1)沿地槽区与地台(或褶皱区)边界分布的一级边缘带;(2)沿地槽系与中间地块边界分布的二级边缘带;(3)地槽内部一级内地向斜与地背斜(拗陷和隆起)的交接带;(4)分布于内地向斜拗陷和隆起范围内的低级构造-建造带中的内部岩带。

此外,在嵌式地槽区中,还发育“贯穿性”(皮努斯,科列斯尼克,1966年)的超基性岩带,它们由地槽区伸入中间地块中(西伯利亚南部的贝加尔褶皱带和加里东褶皱带)。与同沉积-火山岩系构成的典型组合不同,分布于中间地块内的贯穿性岩带的超基