

矿田和矿床构造

Ф·И·沃尔弗松

[苏]

П·Д·雅科夫列夫

编著

中国地质大学出版社

· 译 者 的 话

Ф.Н. 沃尔弗松、П.Д. 雅科夫列夫是苏联著名的矿田构造学家，在我国地质界也有广泛的影响。本书是作者数十年从事矿田构造研究和二十余年进行矿田构造教学工作成果的总结，是苏联主导（相当于我国的重点）高等工科院校地勘系和矿业工程系的必修课教材，在苏联同类教材中具有一定的先进性和权威性。故向我国读者推荐这本书。

近年来，国民经济的发展对矿产资源的需求愈来愈强烈，要求广大地质工作者一方面对待查的新基地迅速做出准确的评价，另一方面对经过多年开采、面临资源不足的老矿山开展外围及深部预测，扩大其远景。为了解决这些问题，必须进行成矿理论和控矿因素的综合研究，其中，矿田和矿床构造的研究则是首要的任务。构造变形为成矿流体的运移和矿石堆积提供有利的物理环境，而导致构造变形的构造应力则是驱动成矿流体运移的动力之一；构造不仅对矿床的形成往往起着主要的控制作用，而且制约着矿床的演化和改造（包括成分上和形态上）。因此，在控矿的诸因素中，对构造因素尤其应予重视，首先应予查明。只有详细地查明了矿田和矿床构造的特征，才有可能查明矿化富集的条件，恢复地质事件发生的时序和确定矿石堆积的时间以及矿体产出的准确位置。

矿床和构造的关系虽然早在远古时代就为人们所注意，但是，只是在本世纪初人们才开始重视对它的研究，而在高等学校开设“矿田和矿床构造”课程则只是最近50年的事情。本书作者积20余年的教学经验，为适应苏联经济建设和高等教育的需要，编写出这本大学高年級的教材。在书中，作者为保持学科理论的系统性，首先追述了矿田和矿床构造概念的沿革史，概括了作为矿田构造学基础的构造地质学的经典理论，然后介绍了与成矿关系密切的主要构造要素，分析了内生矿田和矿床形成的构造地质环境，从大量的实例中归纳出内生矿田和矿床的主要类型，并总结出：不同的构造类型具有不同的控矿特征，不同地质体中发育的独特构造型式具有独特的控矿作用，不同的构造层和亚构造层具有不同的矿化富集规律。可以说，这是迄今为止较为详细的矿田和矿床构造的分类系统，它对于认识构造控矿规律具有一定的指导意义。为了加强构造分析，作者特辟一章讲述矿田构造研究的方法，除了传统的矿床详细地质测量、岩石物理力学性质研究等以外，还介绍了显微构造分析和苏联近年来出现的一些新方法，如综合岩石物理研究、构造-岩石物理分析、构造物理方法、含矿构造历史分析和详细的构造-预测图等。最后，为了训练学生的思维能力和动手能力，还编有若干实验课习题，这在国内为数不多的同类书籍中是没有的。当然，象其中的利用几何作图法来求深部矿体的产状等在一些情况下只是近似的，而矿田构造研究方法的介绍也略显简单。此外，由于客观原因，作者未能引进中国地质工作者近年来在矿田和矿床构造研究上所取得的突出成果。这些不能不说是一种不足。

在苏联，本书一般按40学时讲授。书末的实验课习题则穿插在相应的章节中讲解和由学生在课下独立完成。

现奉献给读者的中译本是按原书第二版（1985年）译出。这一版较第一版（1975年）在内容上有较大的变化，补充了最新的研究成果，引进了用于构造分析的最新方法。尽管由于译者的水平所限，书中翻译上的不足之处在所难免，但是译者相信，本书的译出将有助于我

国地质工作者对苏联矿田和矿床构造研究的深入了解，有益于我国“矿田构造”课程的教学。

承蒙夏卫华教授、赵福堂老师悉心校对了译文，袁春同志参加了第八章的部分翻译并整理了全部图件和清抄译稿，在此一并致谢。

译者

1988年10月于武汉

前 言

本书这一版在体系上基本与第一版相近，但不少章节补充了对重要矿田和矿床构造进行详细研究时获得的最新实际资料，同时引进了一些普遍性的理论内容和用于构造分析的最新方法。

作者希望本书的出版将满足地质勘探专业大学生对这类教科书的迫切需要，同时本书也广泛适用于从事矿床普查勘探和研究的地质生产人员及科学工作者。

读者曾对第一版提出了一些宝贵意见。作者收到了不少地质生产人员、院校教师和研究科研工作者的来信，他们提出了许多有益的建议。作者十分感激地接受了绝大多数意见，并已在这一版中加以考虑。

序

矿田和矿床构造学不仅是一门研究矿田和矿床构造成因的学说，而且在节省新的易开采矿床的资金和增加已知矿床开采深度方面具有越来越大的实际意义。但是，在金属和非金属矿床地质学教科书中，矿床构造仅占极小的篇幅（通常为一章）。矿床构造方面的专门教科书（А·В·科罗廖夫，В·М·克列特列尔，Ф·Н·沃尔弗松等；А·В·科罗廖夫和П·А·舍赫特曼，А·С·维利基）早已是图书中的珍稀，当然，它们还未反映出近年所取得的新成果。

这本教科书是根据作者最近20年在莫斯科奥尔忠尼启则地质勘探学院和卢蒙巴人民友好大学工程系以及更早的25年期间在莫斯科加里宁有色金属及黄金学院的授课和实验资料编写的。

书中引用的实际资料主要是作者及其同事们多年来对中亚、哈萨克斯坦、高加索、乌拉尔、东外贝加尔、雅库梯和苏联其他含矿省的矿田和矿床进行研究的过程中所获得的。本书旨在使读者了解构造分析的理论基础、构造地质环境和不同级别、不同成因类型的典型矿田、矿床和矿体的构造。此外，本书还尝试性地评介了矿田和矿床构造的基本研究方法，并且首先探讨了那些旨在揭示矿化分布规律的构造研究方法。这对于在成矿地区有效地进行地质勘探，对已采矿床的边部和深部进行远景评价以及在新的远景地区进行深部普查勘探都是必要的。苏共二十六大文献中指出了进行这项工作的特殊重要性。苏联1981—1985年和1990年前经济和社会发展的基本方针规定：“要加强富而易选的黑色金属和有色金属、铝土矿、磷块岩、煤、可燃页岩以及原子能、建材、矿物肥料等原料的普查与勘探，也要加强地下水的普查与勘探。”^①

苏联的地质勘探部门正在成功地完成这些任务。扩大构造地质研究无疑能提高地质勘探工作的效率。

本书不仅阐述了矿田和矿床构造的理论基础，而且提供有实验课材料，其中包括有关矿田和矿床构造的各种习题。这将有利于巩固理论知识和发展高水平构造地质研究所必须的历史方法。

①苏共二十六大资料，莫斯科，政治文献出版社，1981。

目 录

第一篇 矿田和矿床的构造要素

第一章 矿田和矿床构造概念的沿革	(1)
第二章 矿田和矿床的构造要素	(5)
第一节 岩石的性质	(5)
第二节 各种地质条件下褶皱的形态、类型和结构	(10)
第三节 断裂	(14)
第四节 断裂与褶皱的组合规律	(28)
第五节 含矿侵入体及其构造特征	(29)
第六节 含矿火山建造及其类型和结构	(36)
第七节 火山管道、爆发岩筒及其类型和在矿化富集中的作用	(42)

第二篇 矿田、矿床和矿体的地质构造

第三章 内生矿田和矿床的构造地质环境	(45)
第一节 矿田的一般概念	(45)
第二节 内生矿化局部分带及区域分带的可能原因	(46)
第三节 影响矿田分布的构造要素	(49)
第四节 岩浆矿床的矿田	(52)
第五节 伟晶岩矿田	(54)
第六节 碳酸岩矿田	(54)
第七节 矽卡岩和热液矿床组成的矿田	(55)
第四章 内生矿田和矿床的主要构造类型	(61)
第一节 矿田和矿床构造分类概述	(61)
第二节 矿田和矿床的主要构造类型	(65)
第五章 内生矿床的矿体构造	(105)
第一节 岩浆矿床	(105)
第二节 伟晶岩型矿床	(108)
第三节 云英岩型矿床	(109)
第四节 矽卡岩型矿床	(111)
第五节 中温和低温热液矿床	(112)
第六节 矿柱的类型	(119)
第六章 各种构造层和亚构造层中的内生矿化富集特征	(122)
第一节 构造层和亚构造层及其对矿化富集的影响	(122)

第二节	成矿过程中热液矿化的形成深度	(124)
第三节	各种构造层和亚构造层中的内生矿床定位条件的特征比较	(126)

第三篇 构造研究方法及实验课习题

第七章	构造研究方法	(137)
第一节	矿田和矿床的详细地质测量、地下地质填图和形态成因分析	(137)
第二节	不同变形阶段中的断裂位移研究	(141)
第三节	岩石裂隙的研究	(142)
第四节	岩石的物理力学性质研究	(143)
第五节	构造-岩石物理分析	(145)
第六节	显微构造分析及其在矿田和矿床构造研究中的应用	(148)
第七节	含矿构造演化历史分析和构造物理学问题	(151)
第八节	详细构造-预测图及构造因素在局部预测中的作用	(152)
第八章	实验课习题	(156)
参考文献		(181)

第一篇 矿田和矿床的构造要素

第一章 矿田和矿床构造概念的沿革

在苏联,“矿田和矿床构造”作为一门独立的课程,首先是由A·B·科罗廖夫于三十年代初在塔什干工学院地质勘探系开始讲授的。1936年他的讲稿用玻璃版印刷出版,成为矿田和矿床构造教材的最早版本。三十年代末,A·B·派克在地质人员进修班上讲授了这门课程的一些章节。莫斯科地质勘探学院的E·E·扎哈罗夫在矿床学课程中,B·M·克列特列在固体矿床普查与勘探方法课程中,都讲授了以上章节。从四十年代起,在莫斯科加里宁有色金属及黄金学院,作者将矿田和矿床构造作为矿床学的一部分来讲授,一直讲了二十五年多。从五十年代开始,Л·И·卢金在莫斯科大学开设了矿床构造课,此后至今一直由Г·Ф·雅科夫列夫讲授。现在,苏联所有的大学都开设了这门课程。

尽管这门课程开设的时间不太长,但这方面的研究已有相当长的历史了。在我国,首先注意到矿床构造问题的是M·B·罗蒙诺索夫。十九世纪在Л·И·索科洛夫的著作中已有这方面的论述,后来,H·K·维索茨基也有过论述。二十世纪初,在E·C·费多洛夫,Л·K·科纽舍夫,B·A·奥勃鲁契夫,B·K·科图尔茨基及其他一些地质学家的著作中,也阐明了矿床构造方面的某些问题。

在苏联,只是在十月革命之后才开始深入研究矿床及矿体的形态和构造以及矿化分布的条件。B·A·奥勃鲁契夫,A·E·费尔斯曼和C·C·斯米尔诺夫都曾强调指出进行这些研究的必要性。奥勃鲁契夫特别重视查明热液矿床中富矿部位分布的条件。他还强调,矿床普查与勘探的成绩如何在很大程度上取决于对工作区的构造研究的精度。费尔斯曼(1939)指出,只有结合构造研究,地球化学作用的研究才有可能。他写道,各种类型和规模的构造线及与其有关的断裂决定着地球化学迁移作用的类型和规模,所以,在组织矿产普查时,首先研究各普查地区的构造特征具有重大意义。此外,他还着重指出,在未编出地质图和未分析矿床形成的构造条件时,要想查明矿床的成因是不可能的。斯米尔诺夫认为,实用地质学首先是构造地质学。他在研究苏联东部地区矿床地质及成矿学时就利用了构造地质资料。

A·H·扎瓦里茨基曾对许多含矿侵入体进行过广泛的地质学和岩石学研究。他也很重视矿床构造的研究。在这一方面,他于1926—1929年所发表的有关乌拉尔铂矿床和含铜黄铁矿矿床的著作以及马格尼特山的矽卡岩型磁铁矿矿床的著作具有特别重要的意义。晚些时候他发表的有关含铜黄铁矿矿床的论著也是这样。

正如已经指出的,科罗廖夫于1936年对矿田和矿床构造进行了第一次理论综合,提出了

内生矿床构造的详细分类,首次指出了巨型断裂在含矿省区域分带发育中的重要作用。派克对乌拉尔钦磁铁矿所进行的研究以及他于1939年出版的《裂隙构造和构造分析》一书大大地推动了苏联矿床构造的详细研究。

А·Г·别捷赫琴分析了“矿田”和“含矿地段”的概念。据他的定义,矿田是成矿省的组成部分。对内生矿床来说,矿田指的是与某一出露在地表或产于近地表的火成岩体有成因联系的矿床的总和。

1940年,В·М·克列特尔进行了矿床构造成因分类的第一次尝试。他将岩浆矿床划分成六组,共十九种构造类型:1)褶皱构造,2)断层,3)裂隙构造,4)复合构造,5)侵入体分异的岩浆阶段构造,6)侵入体晚期岩浆构造。克列特尔还研究了与矿田构造研究有关的一些问题。他把矿田构造分成四种类型,并且将地壳某地段内由于构造变形在岩石中产生的各种裂隙归为矿田构造要素,这些断裂基本上决定了空间上相邻、成因上同源的内生矿床的分布。

1955年,Ф·И·沃尔弗松提出了不同成因类型的内生矿床构造的分类。他把热液矿床构造分为两类——褶皱构造和裂隙构造。每一类中的矿床和矿体的构造类型的特征,或取决于它们赖以发育的褶皱构造的结构,或者取决于含矿断裂的结构及相邻岩块沿这些断裂的运动方向。

В·И·斯米尔诺夫院士提出的内生矿床构造分类包括六组和二十种类型。他描述了成矿前、成矿期和成矿后构造的特征,并且根据含矿溶液运移途径对前两种做了进一步划分,分出五种类型的矿柱。1936年,科罗廖夫提出了内生矿床的分类,后来,他又和П·А·舍赫特曼(1965)一起对其进行了发展和补充。他们查明,矿化富集的构造条件除了褶皱和断裂以外,围岩(首先是层状岩石)也具有重要的意义。

科图尔茨基对岩浆铜镍矿床的构造研究十分重视。他认为,只有详细研究了含矿岩体的裂隙构造,才有可能查明这类矿床的成因。六十年代,Н·А·叶利谢耶夫详细研究过与层状岩体有关的铜镍矿床的构造。后来И·Г·戈尔布诺夫也进行过这类研究。卫国战争结束后,伟晶岩矿床和气成矿床构造的研究曾受到重视,但这期间的主要工作还是集中在热液成因的矿田和矿床构造分析上。

近二十年来,苏联矿田和矿床构造的研究有了空前的发展,大量地质工作者在从事矿床勘探和开采过程中进行了这方面的研究。苏联科学院地质研究所,苏联地质部 and 高等院校的科学工作者越来越多地参与这方面的研究。Н·С·沙茨基、А·В·裴伟、В·В·别洛乌索夫、В·Е·哈茵、П·Н·克鲁波特金、Г·Д·阿日吉列等学者在大型成矿省和成矿区所进行的区域性构造专题研究大大促进了这一工作。苏联科学院矿床地质、岩石、矿物及地球化学研究所,大地物理所和其他科研所都有专门的实验室来进行理论和方法的研究,从而推动了矿田和矿床构造研究的进展。М·В·格佐夫斯基的实验工作从根本上拓宽了应力场及其类型和方向的概念,这对查明构造演化史起了积极的作用。下列学者对大量的有色金属、稀有金属及贵金属矿田、矿床构造进行了专门的研究,并获得了大量有意义的资料。他们是А·В·科罗廖夫、В·М·克列特尔、Е·Е·扎哈罗夫、А·В·派克、В·И·斯米尔诺夫、Н·П·拉维罗夫、В·Н·科特利亚尔、Ф·И·沃尔弗松、П·А·舍赫特曼、В·А·科罗廖夫、В·А·涅夫斯基、Л·И·卢金、Н·И·鲍罗达耶夫斯基、В·Ф·车尔尼雪夫、П·Ф·伊万金、Е·П·索组什金、Г·П·波斯佩洛夫、А·В·德鲁日宁、П·Д·雅科夫列夫、И·З·科林、Г·Г·克拉夫钦科、Б·П·雷巴洛夫、Л·В·霍罗希洛夫、В·И·卡赞斯基、Г·Ф·雅科夫列夫、Е·М·涅克拉索夫、С·

С.拉平、Ю.С.希欣、П.М.拉乌穆林、В.В.阿尔汉格尔斯卡娅、О.В.扎尔科娃、А.Е.托尔库诺夫、Л.П.伊林科娃、А.А.加尔马什、К.Ф.库兹涅佐夫、В.Д.巴拉诺夫、К.А.卡拉维、Ю.Г.萨福诺夫、Е.П.马利诺夫斯基、В.М.克鲁片尼科夫、Б.П.弗拉索夫、В.Е.维什尼亚科夫、Ю.В.德罗诺夫、Р.Д.真丘拉耶娃、Х.А.阿克巴罗夫、Ш.Д.法赫图尔拉耶夫、М.Н.贾帕里则、Л.С.麦利克谢强、М.Т.特克麦拉则、А.Х.沙菲科夫、В.М.拉平、А.А.弗罗洛夫等。

现在，人们已大大加深了对表现在岩石裂隙、褶皱、断裂及矿体形态随深度而变化中的构造分带性的认识。在控矿断裂和容矿断裂的内部结构方面进行了大量的研究。

在构造地质研究中，人们越来越重视查明矿田在不同大地构造环境中的分布规律，收集了能够表明内生矿床的矿田同各种构造要素间的关系的资料。近年来，在揭示不同地质环境和不同构造层的矿田、矿床中矿化富集的构造条件方面所进行的研究工作具有重要的意义。在苏联，已大规模地开展了矿田和矿床的详细地质填图、构造要素及构造演化史的研究、矿化富集的构造条件的揭示和构造研究方法的改进等方面的工作。现已基本上查明了一些与爆发岩筒、不同类型的火山机构和火山深成岩体等有关的热液矿床的矿田构造新类型。

在研究金属矿床时，广泛采用了普通地球物理方法来研究构造总体发育的方向，而在追索断裂及其他线性构造时，则采用专门的地球物理和地球化学方法。近来，由于对含矿溶液的构造古流体动力学（Структурная палеогидродинамика）的研究，获得了一些新的资料。

苏联的构造研究学派的特点是，用历史的方法来揭示在构造和岩浆作用演化的总过程中，矿化的时间和地点，并通过成矿的地质、物理化学条件的综合研究来揭示矿化富集的条件。

近年来外国地质学家在研究矿田和矿床构造中取得了很多成果。首先应该提出的是捷克斯洛伐克的地质学家对云英岩型钨锡矿床矿化富集的构造条件和脉型铅锌矿床构造的研究。

保加利亚的地质学家在研究脉型和交代型铅锌矿床构造和矿柱形成条件时，获得了大量宝贵的资料。匈牙利出版了论述构造透镜体在菱铁矿矿床形成中的作用的文献。

罗马尼亚地质学家在揭示矿化过程中沿主干断裂的构造错动方向以及主干断裂与旁侧羽裂的空间关系方面进行了有意义的研究。

德意志民主共和国的地质学家深入研究了铅锌、锡和萤石矿床构造。

美国地质学家在研究有色金属、稀有金属矿田和矿床构造方面取得了重大成果，其中之一是他们发现，含矿沉积岩沉积时形成的褶皱构造在层状铅锌矿床矿化富集中具有重要意义，而微细裂隙对细脉浸染状铜钼矿化富集起着主要的作用，这些微细裂隙是由于气体爆炸作用或成矿期构造变形而产生的，含矿侵入体冷凝作用为它们的发育奠定了基础。

在比尤特（Бьютт）铜矿床（蒙塔纳州）、著名的克莱玛克斯（Клаймакс）钼矿床、克尔德阿伦（Кер-д'Ален）矿带中的矿床、科罗拉多高原的一些铀矿床和上湖区的自然铜矿床的构造研究中所获得的资料，有着特殊的意义。加拿大地质学家详细研究了肖德贝里（Садбери）的岩浆铜镍矿床及一些金、铀和铅锌矿床的构造，所获得的成果是对矿床构造学发展的一个重大贡献。澳大利亚出版了有关具有不同物理力学性质的岩石中裂隙形成条件的宝贵资料。许多研究成果都指出了成矿断裂产状要素的变化对矿化富集的影响。大型容矿断裂之间岩块的错动方向的揭示同样也受到重视。澳大利亚和加拿大的地质学家在分析褶

皱在矿化富集中的作用，以及在确定围岩的岩石特征对内生矿床矿石分布的影响方面都取得了很多成果。

在指出资本主义国家地质学家在矿床构造的认识上所取得的成就的同时，还应指出所存在的一个明显的不足之处，这就是：他们进行研究时并不总是力求恢复成矿前和成矿后所发生的地质事件，而且在许多情况下不是采用历史的方法来研究矿床构造的。

总的来说，构造研究具有越来越重要的意义，在苏联尤其是如此。这些研究有利于合理地布置普查、勘探和采掘工作。必须指出，矿床构造研究一般是和矿床勘探、采掘工作平行进行的，因而所总结出的规律立即会受到实践的检验，而所获得的资料则是一些具有客观真理意义的可靠情报。

第二章 矿田和矿床的构造要素

研究矿田和矿床构造首先要研究它们的某些构造要素——褶皱、断裂、侵入体、火山颈、爆发岩筒等，这些构造要素在构造地质学指南中均有描述。然而，应该注意到，许多矿田和矿床都位于那些区域断裂和褶皱的走向突然改变的地段。这就导致含矿地段比其周围地段受到的构造破坏更为强烈，形成大量的具各种形态的褶皱和具各种内部结构及发育状况的断裂。

岩浆期后矿床是在热液同围岩相互作用下形成的，所以了解和研究岩石的性质对于研究岩石变形、变质和成矿是十分重要的[13]。

第一节 岩石的性质

一、围岩的岩石成分和化学性质

由于溶液同围岩间的化学作用，会发生矿物的部分溶解，阳离子的扩散交换以及难溶的反应产物的沉淀。岩石对成矿有利的程度取决于岩石的溶解度，岩石中所含形成新矿物所需要的元素以及金属矿物交代造岩矿物的相对能力等。一定类型的矿石产在一定成分的岩石中。例如，经统计查明卡拉马扎尔（Карамазар）矿区，最有利于铅锌矿石沉淀的是碳酸盐与铝硅酸盐组合的岩石，两者比例大致相等时有利于方铅矿沉淀，碳酸盐占优势时有利于闪锌矿沉淀。有利于上述矿石沉淀的岩浆岩具有较高的碱度，即 K_2O 和 Na_2O 总含量在7%左右，而且钾比钠对矿化强度有更明显的影响[13]。

在卡拉马扎尔矿区的捷克利（Текелли）矿田沿切过不同岩石的一条含矿断裂的走向，可以观察到下列矿化交替现象：在钙质花岗质砾岩中发生的主要为方铅矿化，灰岩中主要为闪锌矿化，花岗闪长凝灰岩和英安凝灰岩中主要为毒砂矿化，而玢岩中则为黄铁矿化。成矿前的热液交代岩对矿化分布有较大的影响，交代岩的化学成分与原岩的成分有本质的不同。

无论是原来围岩中的碳酸盐，还是交代岩中的碳酸盐，在交代过程中都起着特别重要的作用。碳酸盐使溶液中的Fe、W、Zn、Pb、Ag等组分发生沉淀，相反，却能使其中的Au、Cu不断迁移。

北高加索的克季捷别尔达（Кти-Теберда）矿床砷和钨（主要为白钨矿）矿化集中发生在云母石英片岩中角闪岩层被矿脉切过的部位，这是一个著名的实例。辉石矽卡岩对硫化物矿石的富集是有利的，如北乌拉尔的图林（Турьин）矽卡岩型铜矿床，中亚的图兰格拉（Турангла）铅锌矿床等。

有机质在矿化富集中的作用已经查明。它能造成促使硫化物形成的强烈还原环境。不论是围岩还是下伏岩石，其成分对成矿介质来讲都是重要的。上升的溶液同这些岩石相互作用，从而改变溶液的成分和浓度，溶液可以富集金属组分和成岩组分，因而影响成矿作用的性质。

因此，在研究非均质岩层中的矿床时，必须对成矿围岩剖面进行详细的岩相学和岩石化学划分，划分出有利于矿石富集的岩层。

二、岩石物理性质

同岩石化学成分一样，岩石物理性质在很大程度上取决于组成岩石的矿物的性质(表1)。

表1 一些造岩矿物在变形和成矿方面的性质

矿 物	莫氏硬度	脆性或塑性	受变形性质	溶解性	成矿方面的性质	能干性
石 英	7	强脆性	易碎裂	不溶于酸(除氢氟酸外)，溶于碱	有利	能干，能逐渐愈合
长 石	6—6.5	脆 性	易碎裂	溶于酸和碱	很有利	非能干
辉 石	5—7	弱塑性	沿解理产生裂隙	几乎不溶于酸	有利	非能干
角闪石	5—6	弱塑性	弱弹性	不溶于酸	很有利	非能干
方解石 (白云石)	3—3.5	弱脆性 弱塑性	连续变形	易溶于酸和碱	很有利	很能干，愈合能力极强
绿泥石和云母	1.5—3	强塑性	挠性，但不具弹性	溶于酸	有利	非能干
蛇纹石	2.5—3	强塑性	韧性，鳞片状破裂	溶于酸	惰性	非能干
高岭石	2.5—3	强塑性	挠性，但不具弹性	溶于酸	惰性	非能干

岩石结构及组成岩石的矿物颗粒大小对岩石物理性质起着重要的作用。在致密细粒的和玻璃质岩石中，变形作用只能导致裂隙的产生，不会引起粒间变形。粗粒的岩石易受到粒间变形和粒内变形。辉绿岩的抗压强度较高，页岩的韧性和塑性较高，这首先是由这些岩石的结构所决定的。

岩石构造对其脆性和塑性有较大的影响。条带状构造可提高岩石的塑性，降低其脆性。但是岩石的物理非均质性程度和塑性程度并不总是成正比关系的。岩石的渗透性(即热液通过岩石的能力)主要取决于岩石的有效孔隙度和裂隙率。压力、深度、温度、溶液成分及其聚集状态，溶液与岩石相互作用的特征等也影响渗透率。

孔隙度是岩石中孔隙的总体积相对于整个岩石体积的百分比。岩浆岩和变质岩的孔隙度是很小的，为0.0n%—0.n%。但是大多数岩石的孔隙度变化范围较大。

岩 石	孔隙度%
花岗岩和片麻岩	0.02—0.56
页岩	0.49—7.55
砂岩	3.5—28.3
灰岩和白云岩	0.53—45.4
卡拉尔(Карап)大理岩	0.22—0.40
火山碎屑岩	n×10
砂岩和砾岩	n×10
多孔的碳酸盐岩	n×10

П.А.舍赫特曼、B.А.科罗廖夫、H.А.尼基弗洛夫等建议按孔隙发育程度将岩石分成以下几类[13]。

1) 孔隙度极低(<1%)的岩石 属于此类的有未蚀变的火成岩，致密的泥质岩，碳酸

盐岩, 结晶片岩。

2) 低孔隙度(1%—3%)的岩石 这是一些由于内力作用或风化作用而造成的中等蚀变的各种岩浆岩和变质岩, 较致密的砂岩、灰岩、变质凝灰岩。

3) 较高孔隙度(3%—10%)的岩石 此类岩石包括弱变质砂岩和砾岩, 强蚀变或风化的岩浆岩、凝灰岩和层凝灰岩。

4) 高孔隙度($\geq 10\%$)的岩石 归于此类的有较松散的砂岩、砾岩和凝灰岩、多孔灰岩和白云岩, 尤其是强烈淋滤和风化的侵入岩。

岩石的总孔隙度影响岩石的力学性质。岩石的孔隙度和裂隙率是在实验室对采自矿床的岩石样品进行测定而获得的。

三、岩石的变形性质

在外力作用下, 物体的形态和体积发生改变称为变形。地壳变形可分为弹性变形和永久变形。弹性是固体的形态和体积在外力作用下发生变化, 并在这种作用撤消以后完全恢复到原始状态的一种性质。

在力的作用撤消后固体能完全恢复原状的变形称为弹性变形。所有的变形都存在着弹性极限。如果超过弹性极限就会产生永久变形。永久变形是作用力撤消后变形完全不消失或部分不消失的变形。物体内部产生的与外力保持平衡的内力称为弹性力。物体单位截面上所受的力称为应力。

地壳中广泛分布的永久变形, 可分为塑性变形和脆性变形两种。在外力作用下物体的连续性未被破坏的永久变形称为塑性变形, 物体无明显塑性变形而破坏称为脆性变形。

在分析地质现象时, 重要的是不仅要考虑塑性变形, 而且要考虑岩石的粘性以及松弛和蠕变。塑性变形的速度取决于物体的粘性, 因为粘性反映内摩擦作用, 即物体内部各质点在相互间位错过程中一部分质点抵抗另一部分质点的能力。所谓松弛现象, 就是当作用在物体上的应力减小时塑性变形的大小保持不变。这一现象与物质质点在塑性变形时发生位移, 寻找新的稳定位置有关。这时, 导致质点位移的应力在质点到达新的稳定位置时将消失。松弛使弹性变形逐渐变为永久变形, 即塑性变形。

蠕变是材料在未超过弹性极限的恒定应力下长期发生的塑性变形。这种现象的实质是物体在恒定载荷作用下质点重新排列并且弹性变形的部分不断地转变为塑性变形。但是, 由于载荷不变, 所以在达到原先大小时, 又恢复了弹性变形。

按照虎克定律, 轴的伸长率与载荷成正比, 而轴的伸长率与轴的横截面积成反比。在未达到一定限度值的载荷作用下, 试件的伸长率与拉伸力 P 及试件长度 l 成正比, 与试件的横截面积 F 成反比。上述实验的结果可用下式表示之:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

式中, Δl —长度的增量, 即在力 P 的作用下轴的绝对伸长量; E —比例系数, 称为弹性模量或杨氏模量(材料不同, E 的大小也不同), 其单位是MPa(兆帕)。

关系式 $\Delta L/l$ 称为相对伸长量, 用符号 e 表示。

设应力 $\sigma = \frac{P}{F}$ (MPa), 那么单轴拉伸条件下的虎克定律就可用下式来表示。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \text{ 或 } \sigma = E\varepsilon.$$

拉伸或压缩的轴，除经受纵向应变外，还遭受横向应变。相对横向应变值与相对纵向应变值之比称为泊松系数，用符号 μ 表示，即 $\mu = \varepsilon_1 / \varepsilon$ ， E 和 μ 这两个系数完全可以说明均质物体的弹性性质。

剪切情况下，剪应力 $\tau = G\gamma$ （ γ —相对剪切大小， G —剪切模量）。

岩石具有抵抗变形的不同能力。岩石抵抗变形的能力称为强度。岩石在挤压时强度最大，在拉伸时强度最小。表2列出一部分岩石在常温和压力为98 066Pa时的强度以及杨氏模量、泊松系数。

表2 岩石的物理力学性质
(据B·M·克列特和B·B·别洛乌索夫等的资料编制)

岩 石	强 度, MPa			杨氏模量 E , 10^4 MPa	泊松系数 μ
	抗 压	抗 拉	抗 剪		
砂 岩	50—150	1—3	5—15	0.6—10.0	0.08—0.11
灰 岩	40—140	2—6	10—20	7.6—8.5	0.16—0.32
頁 岩	70	25	15—20	0.5—2.2	
霏细岩	200—280				
安山岩				4.0—5.4	0.16—0.18
玄武岩	200—500			10.1—1.06	0.22—0.25
花岗岩	100—320	3—5	15—30	1.6—6.9	0.04—0.27
正长岩	150—200				
闪长岩	100—250			5.5—8.7	
辉长岩	100—190			5.8—10.8	0.11—0.27
辉绿岩	130—210	5		7.2—11.6	0.10—0.28
大理岩	80—160	3—9	10—30		
片麻岩	140—240			0.9—5.0	0.03—0.15
石英岩	140—500				

粘性 η 是岩石的一个重要特性，因为根据它可以确定塑性变形的速度 $\dot{\varepsilon} = \tau / \eta$ 。

正如已指出的，粘性反映的是物体的内摩擦作用，即物体一部分质点反抗另一部分质点错动的能力。粘度单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。粘度越大，物体抵抗塑性变形能力就越大。成分不同的物体，具有不同的粘度：水为 $0.001 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，湿粘土为 $100 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，而岩石可达 $10^{23} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。塑性材料和岩石能保持相当大的塑性变形而不破坏，而脆性材料一经弹性变形立即就会破坏，或者在经过不大的塑性变形之后而破坏。塑性体的弹性极限和强度极限之间较大的差异，而对脆性体来说，二者是相吻合的或几乎是相吻合的。

岩石中不同类型的变形（拉伸、挤压、剪切）可产生两种裂隙——剪裂隙和张裂隙。剪裂隙的形成与最大剪应力有关，张裂隙的形成与最大张应力有关。因此，每一种岩石都具有两种强度——抗剪强度和抗张强度。在应力增加，岩石强度较低的情况下，岩石将先产生破坏。表3列出室温、压力为98 066Pa的条件下，一些干燥岩石样品的瞬时强度。

岩石变形性质取决于围压、温度、饱和介质的存在及变形速度。《高温高压下岩石的变形性质》一书对这一问题进行了研究。围压增加，岩石的强度也增加，岩石的颗粒越小，强度就越大（表4和表5）。

围压增加时，岩石的韧性和强度尤其是抗张强度就增高。应变时间（或速度）起很大的作用。瞬时应变（爆炸）时，甚至塑性体也象脆性体一样发生变形。长期应变可使相对脆性

表3 室温和一个大气压 (98 066Pa) 下干燥岩样的瞬时强度 (MPa)

(据M·B·格佐夫斯基)

岩 石	抗张强度	抗 剪 强 度		
		最 小	最 大	统计平均
花 岗 岩	3	60	180	75
辉 绿 岩	5	65	230	90
片 麻 岩	—	40	160	80
石 英 岩	8	13	160	100
结 晶 片 岩	—	30	150	70
大 理 岩	5	12	130	50
灰 岩	5	10	180	45
砂 岩	2—6	20	75	—
页 岩	3—4	18	26	—
石 盐	1—5	9	—	—
煤	—	2	8	—

表4 弹性模量与围压的关系

(据M·И·沃拉罗维奇)

岩 石	不同围压 (MPa) 下的杨氏模量 (10^4 MPa)				
	0.1	40	50	100	500
辉 绿 岩	7.32	10.3	—	11.5	—
玄 武 岩	4.38	6.0	—	6.66	—
花 岗 岩	2.90	4.25	—	4.40	—
片 麻 岩	3.59	—	—	8.36	9.30

表5 一些岩石在不同围压下的抗剪强度

(据J·亨丁)

岩 石	不同围压 (MPa) 作用下的抗剪强度 (MPa)				
	10	20	30	40	50
玄 武 岩	290	750	1 300	1 400	1 700
黑 曜 岩	380	800	1 200	1 400	1 500
辉 绿 岩	270	630	—	1 200	1 400
灰 岩	100	340	570	680	720
石 盐	90	180	220	240	290

的岩石表现为塑性的。温度增加可导致岩石粘度降低, 并从而导致其塑性变形能力提高, 岩石的抗剪强度也就降低。温度降低, 岩石的粘度和抗剪强度就增加。当岩石中存在液体和水蒸汽时, 岩石的强度就会降低。

岩石的变形特征取决于变形条件、上述各项因素(岩石产出深度、应变时间或应变速度、温度、溶液的存在)的总和以及它们的相互组合。温度和围压共同作用时, 从地下某一深度开始, 岩石的破坏主要表现为韧性剪切, 而在接近地表处, 则表现为张裂。

长期的地质作用促进了塑性变形的发育, 并更有利于剪切断裂(相对于脆性变形时产生的张裂隙)的形成。

在研究金属矿床时，必须考虑到许多金属矿床中岩石的热液蚀变（矽卡岩化、云英岩化、青盘岩化、黄铁细晶岩化、硅化等），由于这种蚀变，岩石的物理力学性质（孔隙度和强度指数）发生了相当大的变化，而后者又对随后发生的成矿作用产生了影响。

岩石最重要的构造性质是塑性和脆性。这些性质是相互联系的，并且由于作用的时间、变形条件、溶液对岩石的作用、岩石间的相互作用等的不同，这些性质同时在岩石中不同程度地表现出来。

在其他条件相同时，岩石的脆性-塑性同造岩矿物的性质和含量有关。主要造岩矿物按脆性递减、塑性递增的排列顺序为：石英—长石—辉石、角闪岩、橄榄石—黑云母；白云母、绢云母、碳酸盐矿物—绿泥石、滑石、高岭石。根据岩石的矿物成分，可以定量评价岩石的脆性-塑性。从酸性火成岩到基性火成岩，塑性呈增大的趋势。沉积岩的塑性变化较大，碳酸盐岩具有较大的塑性，而白云岩的脆性总是大于灰岩。

岩石的变形性质不仅取决于组成岩石的矿物的性质，而且取决于矿物的组合特征，即岩石的构造。为了解决许多构造问题，需要研究岩石的力学性质的各向异性。块状岩石中的矿物定向肉眼难以鉴别，而在层状侵入体和喷出岩中矿物晶体的线状和面状定向极为明显，变质岩中片状构造特别显著。带状（层状、片状）构造的岩石有较大的塑性，在变形时主要表现为弯曲。

具有中等脆性-塑性、变形时裂隙能愈合的岩石称为能干岩石（компетентные породы）。方解石和白云石能很快地完全愈合，而石英不大容易愈合，且愈合较差，其他矿物则更不容易愈合。最能干岩石是碳酸盐岩，次为铝硅酸盐岩石，而完全不具有能干性的岩石是塑性极大的岩石（泥岩、页岩、绿泥石片岩、滑石片岩、绢云母片岩）和脆性极大的岩石（石英岩、凝灰质熔岩等）。

在物理力学性质不同的岩石组成的层状岩层中，矿化集中发生在含矿溶液易于渗透的岩石中。渗透性差的岩石则为屏蔽层，并限制矿石向上分布。这是不少多金属矿床、汞锑矿床及其他类型矿床的一个突出特征。在研究矿床地质构造时必须查明有利于成矿的岩层。岩石的物理力学性质的研究是在实验室利用从矿区采来的岩石样品进行的。

第二节 各种地质条件下褶皱的形态、类型和结构

大量的金、铜、铅、锌、锑、汞及其他金属矿床皆与褶皱构造有关。矿体可以产在褶皱的枢纽部位，也可产在翼部。对一些矿床来讲，褶皱构造只是一个共同的环境，而控制矿体产出的构造则是稍晚的叠加构造（如鲁德内阿尔泰的多金属矿床），对另一些矿床来讲，控矿构造直接与褶皱时形成的构造有关（如中亚的一些汞锑矿床）。在勘探和研究这些矿床时，最为重要的是要详细分析褶皱的结构。

首先必须指出，在内生矿田中致密岩层的褶皱形态和成因类型完全与含矿区地质发展史相一致。在元古代和太古代岩层中通常发育的是轴面和两翼均陡倾甚至直立而紧闭的线状褶皱。很多褶皱为倒转褶皱，且在大多数变形岩层中明显发育有轴面片理。流动褶皱也常常可见。在这些褶皱形成时，夹于塑性变形岩层之间的相对脆硬的岩层多发生透镜体化，形成香肠构造。

古生代和中生代地槽中的层状岩层通常形成线状或具陡倾翼的等斜褶皱。轴面片理一般不切过全部岩层，而只是发育在那些较易形成塑性变形的岩层中。组成地槽上部的或属于地台的层状岩层，一般形成两翼缓倾的穹状褶皱，在这些情况下也常发育有箱状褶皱和各种挠曲。