

矿田构造基础

曾庆丰

(中国科学院地质研究所)

引言



地质·矿床

构造条件是成矿的外部因素,它和成矿内因一样,是成矿的必备条件之一。因此,研究和确定成矿区域内不同期次的各种构造类型及其在空间上的分布规律,恢复地质构造—成矿过程发展史,乃是矿田构造研究的基本任务之一。在此基础上才能更好地研究构造对成矿的控制作用,掌握矿产的分布规律及指导找矿勘探、矿产预测和开采工作。

本文简要论述矿田构造的基础问题,即矿田的分类、矿田构造的分期、矿田构造的形成(包括鉴别和分析)、脉体的充填、矿田构造应变史和矿田构造发展基本规律等等。至于构造与成矿的关系(第二个基本任务),将另文阐述。

矿田构造的分期

在研究矿田构造时,我们一再强调了“三性”概念,即形成的时间性、形变的空间性和成因的力学性。

地质构造、成矿作用的历史是一个长期发展的过程。按成矿与基底构造的关系,我们把矿田分为同生类和叠生类。前者是指与褶皱带(活动区)同一时期形成的矿田,区域构造的形成发展与成矿过程基本上是连贯和衔接的。叠生类矿田形成于老的基底构造层之后,即成矿构造与成矿作用叠加其上。

就矿田构造的发展过程与成矿的时间关系而

言,可把矿田构造分为基础构造、成矿构造和成矿后构造三大期。每次构造可细分为发生阶段和发展阶段,前者为褶皱、断裂的形成,后者则表现为构造被火成岩体、岩脉的侵入和各种矿脉的充填。最后还有破坏阶段。

从历史分析和力学分析的观点出发,首先要在时间上把矿田构造划分出不同的期和阶段,并对每次形成的构造形迹进行研究和分析,以掌握它们在空间上的组合和分布的规律性,然后进行力学分析,确定其应变图。在这基础上,对矿田构造发展过程由老到新将应变图串连排列起来,以恢复地质构造—成矿作用的发展应变史。

构造和成矿常常表现为多期次、多阶段的特征。在同一矿田区域内,不同的构造期有时出现不同期的成矿作用,我们称之为叠加性,即多期构造叠加和多期成矿叠加。而同一时期同一成矿期内更多地表现为构造与成矿的多阶段性,称之为脉动性,即同期构造脉动和同期成矿脉动。不论是构造与成矿的叠加性或脉动性,它们分别是紧密相连,相互配合的。我们将叠加性分为同型、异型和复型三种类型。把脉动性分为新生、再生、继承和复合四种类型。新生脉动性是指不同阶段在不同方向(异向)应力作用下形成的成矿构造,它们的性质和产状各不相同,结果各阶段矿脉互相穿插和错动。再生脉动性则是同向应力的作用,因而相邻两次形成的构造在性质、产状和组合上表现出一致性。继承脉动性是指同一成矿构造再次张开充填。在成矿的全过程中,常常有不同脉动性的复合类型^[2]。

矿田构造的形成和分析

矿田构造的形成主要是水平或近水平的挤压应力作用的结果。在平面上 (*ab* 面) 表现为垂直压应力方向的褶皱, 并出现两组共轭剪性断裂及横向张性断裂 (纯张或迁就两组剪裂面而形成的锯齿状张裂)。一般共轭角小于 90° , 所以共轭剪裂面所夹的锐角指向压应力方向, 钝角指向张应力方向。由于岩石性质、边界条件的差异及老构造面的影响, 共轭角有时近于或略大于 90° 。因此, 在利用共轭剪裂来确定压应力方向时, 要有野外、室内准确的两侧相对错动方向的证据。随着形变进一步发展, 在横剖面上 (*ac* 面) 出现两组走向断裂, 在背斜轴部形成鞍状虚脱构造、纵向断裂和层间错动。走向断裂是在剖面上两组 X 型剪裂发展起来的, 只是其走向与压应力直交, 故称之为压性, 以示在称呼上有别于平面剪裂。在形变强烈时, 发生旋转甚至直立、倒转构造、帚状构造, 以及次一级构造, 如羽状、劈理、拖拉褶皱等等构造。至于在纵剖面上 (*bc* 面), 可见褶皱岩层层面、剪裂、张裂的倾斜交线及压性断裂的水平波状交线, 表现为平行式、雁行式和阶梯式等。

野外观察及室内模拟证明, 在单向压应力作用下, 形变破裂不只表现在平面上, 也出现在剖面上。它明显地反映出立体形变特征。这是矿田构造的基本特征之一。我们强调这种空间概念并在实际工作中加以运用, 目的在于完整地认识一次构造活动所形成的成矿构造的空间组合和分布规律。这对了解导矿和储矿构造、矿化集散及深部矿体预测都有重要现实意义。

鉴别同一期次所形成的构造的类型和性质, 我们从三个方面进行: (1) 宏观观察: 野外地质测量是一项基础性的工作, 以查明褶皱构造的形态特征、空间分布及其组合形式、各岩层间的关系、产状及延深、褶皱内各种小型构造的特征及规律、大小褶皱的关系、确定褶皱构造形成时代、力学性质及褶皱与矿产的关系。断裂构造与成矿有着极为密切的关系, 必须进行深入研究, 确定它们的力学性质、组合配套关系、空间分布规律、形成机制及发展演化过程。(2) 显微构造:

岩石和矿物受应力作用发生外形上、内部结构上的变形或矿物成分的重新组合和新矿物的产生, 从而出现应力矿物和构造岩, 前者表现在矿物晶体变形、晶格错位、新相矿物等。构造岩则有 S—构造岩型、B—构造岩型和 R—构造岩型。应力矿物和构造岩在不同的应力条件下有不同的表现。显微构造研究日益受到重视, 不少学者通过各种途径探讨矿物岩石的变形和应力机制问题。(3) 岩组分析: 对构造岩岩组的微观定向研究, 可以判别或提供应变规模、应力状态、运动方式、动力学分析等构造信息。有效的定向机制一经确定, 就可以利用所观测到的优选方位型式来推导有关岩石所受到的应变性质, 以及变形的温度和应变速率等。因此, 对变形岩石和矿物晶位的优选方位的规律及其形成机制的研究, 一直是岩组学研究的中心课题。

我们从五十年代末期就将岩组分析引进矿田构造研究领域, 对基础构造 (褶皱、断裂、侵入岩体、岩脉)、成矿构造 (褶皱、各种不同性质的成矿断裂)、成矿期内构造和成矿后构造分别进行了系统的研究, 对矿田构造各阶段的发展演化也作了探讨。无疑, 这对矿田构造的研究是大大深入了一步^[1]。

在前述工作基础上, 就可以对同一期次形成的构造系统进行力学分析, 确定其应力场。(1) 宏观分析: 在力学分析中, 关键是确定压应力方向。为此, 要全力找出压性构造线的方向, 即垂直压应力的面与地平面交线的方向。压性构造线可以下列构造形迹为代表: 褶皱轴的走向、区域陡倾和直立的岩层、片理、片麻结构的走向、冲断裂的走向以及各种小型构造。垂直构造线的方向, 代表了压应力方向。它是形变破裂的主导因素。因此, 抓住了构造线, 等于抓住了矛盾的主要方面, 就便于确定应力场的情况了。(2) 图解法: 利用平面上两组共轭剪裂面的产状及错动方向, 用赤平极射投影图解法求得三维应力轴的方位及倾斜度, 这种方法更为准确。在矿田内作系统的定点测量和分析, 绘成平面应力轨迹图, 它清楚的显示出三维应力轴的方向及其变化情况^[2]。(3) 有限单元分析: 对构造应力场分析可以进行数学模

拟,有限单元法以能量原理为基础,通过固体力学中的物理、几何关系及平衡方程,计算各单元的应变及其相应的应力,最终获得整体应力分布状态^[2]。(4)显微构造—数学力学算法:近年来一些学者在透射电镜下通过观察超微薄片的晶体位错密度、重结晶颗粒大小和亚颗粒大小,用数学力学公式来计算古应力的大小。这样,有可能使构造应力分析逐步由定性发展为半定量、定量的阶段,实现完整的构造应力场研究。(5)应变图表示法:根据我们的研究,在范围不大的矿区内,同一期次的应力场一般变化不大。因此,可将同期次的断裂构造进行系统的测量和统计,求出各组平均产状,然后用图解法求三维应力轴方位,以两个相互垂直的面应变图来表示空间立体形变特征,并以主、次相区分。若形变只表现在一个平面上,那就用一个面应变图来表示。最后,按时间顺序将各期次的应变图依次排列起来,恢复矿田构造应变史。这种方法,简明扼要,一目了然,可以帮助了解矿田构造发展过程及其应力场的变化规律。

下面以一矿田成矿构造的分析为例,作一说明。该矿田的成矿断裂有两次生成阶段,相应应有两次矿化阶段的充填。第一生成阶段的断裂(矿脉)主要为北西向、次北东向,少数南北及东西向,共五组(表1)。平面上的组合为:北西(右型)北东向(左型)为两组共轭剪性断裂,南北向者属张性,上述平面上三组发育较好。在剖面上的组合是两组走向相同(东西向)、倾向相背的压性成矿断裂,它们与面上的三组交织成“米”字形。如此,平面上和剖面上的组合构成统一的成矿断裂系统,它们是同一阶段形成的,完整地反映出空间体形变特征。利用平面上两组共轭剪裂的平均产状以图解法求得三维应力轴,其结果示于图1。鉴于断裂系统反映了空间体变形特征,而且平面上的组合较剖面为佳,故前者划为主形变范畴,剖面为次,用两个相互垂直的应变图来表示(图1):主应变图(平面上)压应变轴C南北向、水平;张应变轴A东西向、近水平;中间应变轴B垂直于C,A,近直立(作为面应变分析,与中间应力关系不大。余同)。次应变图(剖

不同矿化阶段矿脉(断裂)产状统计表 表1

阶段	组别	走向	倾向	倾角	密度(%)	强度	断裂性质
一	1	南东130°	南西	80°	10	最强	剪平
	2	北东35°	北西	75~80°	10	强	剪
	3	南北	西	85°	5	弱	张面
	4	东西	南	60~70°	7	中	压剖
	5	东西	北	70°	3	弱	压面
二	1	北东30°	南东	75~80°	12	最强	剪平
	2	南东130°	南西	80°	4	弱	剪
	3	东西	北	80°	4	弱	张面
	4	南北	东	55~60°	6	中	压剖面

面上)以前者C轴为中心向下旋转90°而成,即压应变轴C不变;B'轴东西向、近水平;A'轴近直立,即主应变图之中轴转化为次应变图的张应变轴。上述分析表明,第一次生成阶段的成矿断裂系统是在南北向挤压作用下形成的。第二阶段的矿脉切穿并错开前述矿脉,可见由于成矿期内构造的再次活动(新生脉动性)产生了新的断裂系统,共四组,系统测量结果示于表1中,北东向一组最发育,为右型剪裂,北西向者属左型,二者为共轭的两组剪裂面,东西向为张裂,这三组是平面上的组合,且发育较强,属主应变。剖面上一组南北向断裂为压性,归入次应变。同样,用图解法求出三维应力轴并以两个相互垂直的应变图来表示其空间体形变特征(表1、图1)。分析结果表明,第二次生成阶段的断裂系统是在东西向挤压作用下形成的。

生成阶段	图 解	应 变 图	压 力 轴 方 位			
			平面	剖面	倾 向	倾 角
一			C	C	174°	4°
			A	B'	84°	15°
			B	A'	276°	75°
二			C	C	260°	2°
			A	B''	352°	20°
			B	A'	168°	74°

图1 成矿断裂两次生成阶段应变轴方位图

脉体的充填

这里讨论的是沿断裂(带)出露的岩浆岩岩体、岩脉以及各种矿脉形成的力学机制问题。显然断裂生成在前,脉体形成于后。矿田构造的生成阶段主要是在水平压应力作用下发生的,而其发展的第二阶段、即张开充填阶段则是在垂直上隆的拉伸条件下形成的。大量实例表明,内生矿床在成矿时期,区域是处于上升隆起状态,即该类矿床多产于地质上的隆起带或是隆起与坳陷的过渡带,而不是产生在坳陷过程中,这是普遍的客观现象。由此可见,隆起断裂带是内生成矿的基础条件之一(这里指的是成矿时期,但并不等于在成矿后直至现代仍处于上升状态)。上述事实,反映了成矿条件的一个基本问题,地壳的这部分(成矿区)在上升隆起时必然会产生拉伸作用,为岩浆和矿液打开了通道并创造了有利的空间条件。事实上,大多数内生矿床主要形成于地壳浅部,这里矿化强度较强,而往下矿化渐趋尖灭。同期岩脉和同一阶段的矿脉同时充填于几个不同方向的断裂中,只有在构造拉伸作用下才有可能,因此在断裂生成阶段中,除张裂可以发生一定程度的张开外,压性断裂不大可能张开而充填为数众多的平行大脉。例如某些充填于压性和压剪性断裂的大矿脉,平行排列、成群成组,并有小矿脉与之平行,在范围不大的矿区内,这种矿脉多达数十至上百条,总厚度几十米以至过百米。很难设想,在断裂生成阶段压应力作用下会出现这种情况。因此可以认为,在成矿时只有垂直上述断裂走向方向发生构造拉伸作用,才能造成如此有利的成矿条件。在矿床中经常可见条带构造,不同矿化阶段的矿脉紧密为邻、平行排列、产状一致、彼此无明显错动,这种特征是成矿断裂遭受拉伸作用的明显证据。可见在成矿过程中,构造活动可以沿接触薄弱处多次张开和充填,也可使早期矿脉破碎并为后矿化阶段的成矿物质所胶结而形成角砾构造。详细的岩组分析表明,脉中矿物生长的定向性,在很大程度上取决于充填阶段的拉伸应力方向。基于所述事实和分析,说明构造发展的第二阶段即脉体的充填是在断裂构造

生成之后,主要是在构造的拉伸条件下形成的。其发生原因看来与地壳垂直运动引起成矿区域不均匀的上升隆起作用有关,由此促使断裂张开和被充填。这时,断裂生成阶段的水平应力已为垂直应力所代替,挤压变为拉伸。既然两个阶段的应力状态不同,条件各异,因此对张开充填阶段应单独确定其应变图,这时C轴近于直立,最大拉伸方向A垂直于最发育的矿脉走向,中轴B则与该组方向一致。因为脉体经常存在于几个方向的断裂中,这说明除沿A轴发生最大伸展外,沿B轴也有若干伸展,为了表示这种特征,可使用两个应变图,二者有主有次,后者以主应变图C轴为中心水平地旋转90°而成。如果脉体只发育在一个方向的情况下,那就用一个应变图来表示之。当然,充填阶段应变图的确定,需要从多方面进行综合分析,同时应结合成矿区域某一时期所处的构造环境,并且考虑到前后阶段应力状态的相互关系和影响。上述原则同样适用于基础构造和成矿后构造的分析。

矿田构造应变史及某些规律性

对构造活动及成矿过程进行详细的调查研究,划分不同的构造期和阶段,搞清每次运动所形成的构造形迹、应力状态及与成矿的关系等等,这样就可把各次运动每阶段的应变图象由老到新依次排列起来,恢复矿田、矿床地质构造—成矿过程发展的全部历史,这对认识矿产形成条件及规律是不可缺少的。

下面我们举岭南—钨矿田为例作一简述。

(一)基础构造:重大事件表现在:(1)加里东期构造活动强烈,受近东西向挤压作用使古生代岩层形成近南北向褶皱带,并上升隆起成山,有加里东期花岗岩体侵入(3.7~3.85亿年)。嗣后,在晚古生代,构造环境较为平静,只表现为缓慢的升降。(2)中生代早期构造活动又复强烈,断裂构造发育,在矿田内以北西向最明显,次为东北及其他方向。初步分析,它们是南北向挤压作用的结果。断裂带为岩浆侵入和成岩创造了十分有利的条件,广泛发育着花岗岩、石英闪长岩、石英玢岩(1.5~1.9亿年)。燕山期的断裂构造及

岩体控制着矿田的展布。

(二) 成矿期及成矿期内构造：成矿及成矿期内构造是直接的控矿构造。矿脉不但穿过了基底变质岩，而且也切穿了侵入岩体，表明成矿构造发生在岩体形成之后，是另一时期的产物。详细研究表明，该期成矿构造发生了三次，相应应有三次矿脉的充填。第一次生成的成矿断裂系统表现在（平面上）北西（右型）、北东向（左型）两组共轭剪裂及南北向张裂，在横剖面上出现两组压性成矿断裂。断裂系统完整地反映了空间体形变特征，且平面组合发育较剖面为佳，分别属主形变和次形变。力学分析表明，该阶段是在南北向挤压应力作用下发生的。之后，张开充填，主要是东西向的拉伸，而南北向次之。矿液上升沉

淀形成第一阶段金属氧化物石英脉，有黑钨矿、锡石和金属硫化物及非金属矿物，呈逆向分带现象。第二次成矿构造生成阶段出现北东（右型）、北西向（左型）两组剪裂及东西向张裂，划入主形变范畴。南北向断裂属压性，为次形变。它们是在东西向压应力作用下发生的，且反映了空间体形变特征。第二次张开充填阶段最大拉伸方向表现为南北向，次为东西向。形成第二矿化阶段的金属硫化物石英脉，切穿和错动了黑钨石英脉。最后一次生成的成矿断裂只表现为平面上北东（左型）、北西向（右型）两组剪裂和一组南北向的张裂，其应力状态与第一次相似（南北向挤压），但只表现为面形变。第三次张开充填阶段主要是东西向拉伸作用，形成碳酸盐脉，切穿错动上述所有矿脉。

期	阶段	应变图	说明
成矿后构造及成矿期			主要为（平面）北东向（右型）及北西向（左型）剪裂，次为（剖面）南北向压性断裂
	张开充填Ⅲ		第三矿化阶段（方解石—萤石脉）主要北东向、少量北西向
	成矿断裂Ⅲ		成矿断裂第三生成阶段，只表现在平面上北东向（左型）和北西向（右型）剪裂，少数南北向张裂
	张开充填Ⅱ		第二矿化阶段（金属硫化物石英脉）主要北东向，其次北西、东西和南北向
	成矿断裂Ⅱ		成矿断裂第二生成阶段，主要（平面）北东及北西向剪裂，次要（剖面）南北向压性断裂
构造	张开充填Ⅰ		第一矿化阶段（金属氧化物、硫化物石英脉），主要北西向，其次北东、东西及南北向

期	阶段	应变图	说明
成矿期及构造	成矿断裂Ⅰ		成矿断裂第一生成阶段，主要（平面）北西和北东向剪裂，南北向张裂，次要（剖面）东西向压性断裂
	岩浆侵入		燕山期岩浆活动强烈，形成花岗岩、石英玢岩、石英闪长岩等，主要受中生代断裂带控制
	断裂生成		中生代构造运动强烈，形成北西、北东向剪裂，南北向张裂及东西向压性断裂构造
	岩浆侵入		上升隆起，有加里东期花岗岩类侵入，受褶皱及断裂构造控制
构造	褶皱		加里东期形成近南北向褶皱及与之伴生的各向断裂构造

图2 矿田—构造—成矿发展各阶段应变图
实线—主应变图；虚线—次应变图；正上方指北

(三) 成矿后构造: 表现为一系列的北东向右型剪性断裂, 还有一些小规模的北西向左型剪裂及南北向压性断裂。它们是东西向压应力作用的结果, 平面属主形变, 剖面为次。根据先压后张规律, 看来还可能存在属正断层的张裂, 只是我们工作做得还不深入。将各阶段的应变图象由老到新依次排列起来(图2), 可以清楚表现出矿田构造—成矿作用的发展演化过程, 看出其应力场的情况及规律。综上所述, 矿田经历了一个漫长的发展过程, 加里东构造期使下古生代地层变质和褶皱, 构成下构造层(东西向挤压)。中生代燕山构造期使基底发生活化, 断裂和岩浆活动强烈, 属上构造层(南北向挤压)。其后成矿构造和成矿过程都发生了三次, 是典型的新生脉动性。成矿年龄约为1.6 亿年, 与燕山期花岗岩时代相符、空间吻合, 表明二者有时间上、空间上和成因上的紧密联系, 而与加里东期无关, 它们相隔二亿多年, 可见成矿构造是叠加在古老的基底构造之上, 所以矿田属叠生类。

根据我们的工作和分析国内外一系列有关材料, 可以对矿田构造发展特点作一些初步总结。

(1) 地质构造—成矿作用的历史是一个长期发展演变的过程, 它们经历了多次构造运动, 每次运动有它自身的特点, 又互有联系和影响, 既有连续性, 又有阶段性, 既有共性, 也有特性。研究表明, 应力场不止一次地改变着, 这是经常存在的客观规律。一个具体的应变图只能适用于同一构造运动所形成的构造系统, 由此可以由老到新地逐次确定其应变图和恢复其应变史。(2) 地壳运动的主导因素是水平运动, 由地球自转而产生南北向和东西向挤压。实践证明, 矿田构造系统多是在水平的挤压应力作用下发生的, 压应力方向常是南北向或东西向, 而更普遍的是南北向。在矿田多次构造活动中, 它们的压应力常变换方位, 多数情况下, 约在 90° 左右。(3) 除水平运动外, 还存在垂直运动, 它们是地壳运动的两种不同表现形式, 既相互依存, 但又不是等量的, 在不同的时间、不同的空间有不同的表现。地壳运动以水平运动为主, 它是构造形成的主导因素, 而垂直运动则居于次要地位, 引起局部地区的升

降运动。正是由于这种垂直运动在成矿区域引起不均匀的上隆作用, 使不同期次的构造系统遭受引张作用而张开, 为岩浆和矿液的上升和侵入充填创造了良好条件。(4) 由上可见, 水平的挤压作用和垂直的上隆作用对矿田构造、特别是脉状矿床的形成是两个重要的构造因素, 前者促使构造系统的发生, 后者则使其张开和充填。由此, 使我们得出一个认识, 矿田构造系统的发生发展过程主要地是由水平压应力来发动, 由上隆作用的张应力来完成。(5) 矿田构造长期发展过程中常表现为水平应力和垂直的上隆作用交替出现, 即挤压与拉伸作用的交替, 且常常间歇地多次发生。在成矿的全过程中, 成矿构造的发生和充填往往出现多次。若发生与充填多次交替出现, 乃是形成新生或再生脉动性的原因, 如先有构造的形成, 后为多次拉伸和充填, 则出现继承脉动性特征。常常是数者兼而有之, 即复合脉动类型。

(6) 大量事实说明, 构造形变破裂不单表现在平面上, 而是在三度空间内进行的, 而且三维应力轴、特别是张应力与中间应力常互相转化, 所以我们使用两个互为垂直的应变图来表示这种空间立体形变特征。同时, 三维应力轴的方位不完全是水平或铅直的。认识这一点, 对了解和掌握构造系统的组合、方向、倾向和倾角的特点是重要的, 它对实际工作有指导意义。(7) 成矿受构造条件的控制和影响, 在那些地壳运动剧烈的地区, 而且又经多次构造运动反复作用, 特别是上升隆起地区, 一般来说, 对内生成矿作用是有利的, 它们往往控制矿田、矿床和矿体的展布方向、延伸、范围和规模的大小。我们的任务是要搞清楚矿田构造发展的来龙去脉, 在这个基础上抓住与成矿有关的构造活动在时间上和空间上的特征和规律。

本文蒙学部委员、地学部主任涂光炽教授以及翟裕生教授审阅, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 曾庆丰: 论热液成矿条件, 科学出版社, 1985年
- [2] 曾庆丰、雷世和: 地质与勘探, 1983, 第3期
- [3] 曾庆丰: 地质与勘探, 1984, 第8期