

关于韧性变形与成矿作用的一些实验结果

岳 石 马 瑞

(长春地质学院博士后流动站)(长春地质学院地质系)

王子潮

(国家地震局地质研究所)

提 要 本文通过以含丰富的成矿物质的广东河台金矿石和辽宁玉龙铅锌矿石为样品,在 250~450℃和 200~400MPa 的围压条件下进行变形实验,揭示出了某些成矿物质与韧性变形之间的内在联系。实验做出了三种韧性变形构造:它们是韧性剪切带、韧性挤压带、韧性扭曲带。伴随这些韧性变形,某些成矿物质如黄铁矿和闪锌矿等都发生了明显的迁移,向着韧性变形构造带集中。电子探针测出了在韧性扭曲构造带上金发生了高度集中。

关键词 韧性变形 成矿作用 高温高压变形实验

一、概 述

随着地质科学的发展,对地质现象的认识也在不断地进化和更新。矿产的分布与构造之间的密切联系人们早有认识。因为断裂可为成矿物质提供运移的通道和沉淀的空间,这是很容易理解和接受的。而近年来,随着韧性剪切带概念的提出,地壳中的韧性变形受到了广泛的重视和研究。随着这种研究的深入,又涉及到成矿学的领域。于是新的问题和新的认识又随之产生。人们又发现成矿与韧性剪切带具有密切的联系^[1],但这种控制机理却需要探讨,因为韧性变形不象断裂那样为成矿物质提供通道和空间。然而事实毕竟是事实,在野外地质调查中,已有大量的证据说明某些矿产确与韧性构造有密切的联系。如全国瞩目的广东河台金矿就是一个典型的例子^{[2][3]}。详细的勘探结果表明:金的品位与糜棱岩化有着密切而又稳定的联系,离开糜棱岩带,金的品位就骤然下降。这种现象引起了众多找矿工作者和地质研究者的兴趣。有必要对韧性变形控制成矿的机理进行探讨。而最好的办法则是借助于实验研究。关于韧性构造变形与成矿关系的实验研究还很少,目前还没有专供这种研究的理想设备。但高温高压岩石变形实验设备可以提供高温高压条件和变形条件,因此可以用来进行这种研究。本文就是利用高温高压岩石变形实验设备,以含丰富成矿物质的矿石作为样品进行实验,探讨韧性构造变形与成矿物质组分迁移之间的联系。

用来做实验研究的样品有两种,一种是采广东河台金矿区的金矿石,一种是采自辽南玉龙

铅锌矿区的闪锌矿石。实验采用了国家地震局地质研究所的高温高压岩石变形实验装置和长春地质学院岩石变形实验室的装置,取得了一些初步的结果。这些结果或许有助于认识韧性变形与成矿过程的关系,有助于地质找矿工作的发展。

二、实验设备与方法简介

这里主要介绍一下高温高压容器构造和装样方式。高温高压容器内部是园筒状的。将样品切成园柱状置于容器的最中间。温度是通过套在样品外面的石墨管提供的。围压是通过石墨管外面盐套传导过来如图 1 所示。样品上下是刚玉柱起传递轴压的作用。上下又分别装有密封垫或密封环。温度是通过与样品接触的热电偶测得。样品尺寸为直径 10mm,长度 20mm(国家地震局地质所设备)和直径 25mm,长度 50mm(长春地质学院设备)。两种设备的容器构造是一样的,装样方样基本相同,但后者热电偶是与样品底部接触,而前者是与中部接触。

实验是在温度为 250~450℃,压力为 200~400MPa 的条件下进行的,相当于地下 10 公里左右的深度,也与成矿过程发生的条件相近。在样品变形过程中,差应力为 100~300MPa,应变速率为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ km/S,加载时间从十几小时到几十小时。每个样品都发生了明显的韧性变形。样品总变形量最高达 30%。

将经过实验变形的样品切成薄片和光片,在显微镜下观察其组构的变化,与未变形样品进行比较,考察成矿物质迁移情况,并用电子探针检测某些元素的集中或成分的变化。

三、实验结果

实验所采用的两种矿石样品,一种主要是由黄铁矿和石英组成,含有金元素,一种是由方解石、石英及硫化物(主要为黄铁矿和闪锌矿)。两种矿石在实验前,除有一些微裂隙以外,并无定向性组构,硫化物都是颗粒状。在实验后,硫化物不但有明显的定向,也有明显的迁移和集中。迁移和集中是沿着样品中韧性变形带发生的,是由塑性流动所造成的。实验中所出现的韧性变形构造主要有三种:韧性剪切带、韧性挤压带和韧性扭曲带。

关于韧性剪切带是人们很熟悉的概念。所谓韧性挤压带是指那些垂直于变形过程中的挤压方向的韧性变形带。这种构造带无论在野外还是在实验样品中都广泛发育。它与韧性剪切带的区别是其内部的构造都是对称的,如对称重结晶和对称微裂隙等,并以矿物压扁作用占优势而不发育旋转构造。

韧性扭曲带是指在韧性变形过程中,变形带发生了明显的弯曲,形成各种形态,如 v 字型, S 型等等。这类构造以扭曲位移为主,与韧性挤压带和韧性剪切带在形态上有明显区别,在物质位移及所伴随的地质作用尤其是矿化作用具有其特殊性。

韧性剪切带是样品中广泛出现的韧性变形构造。沿着韧性剪切带,成矿物质组份的集中是很明显的。图版 1 是黄铁矿和石英组成的矿石样品经变形实验后的显微照片,是在透射光下拍

照的。图中黑色的为黄铁矿,白色的为石英。薄片是平行轴向切割的,挤压方向是竖直的。照片中可见到从左上角到右下角的一条黑色的条带,由黄铁矿组成。可见到黄铁矿的流动现象和该剪切带的剪切指向。照片中无脆性破裂。剪切带完全是由物质的韧性流动造成。黄铁矿的集中,显然是在实验变形过程中,由剪切带附近向带中迁移的结果。该样品的实验温度为 300°C ,围压 300MPa ,时间 40 小时。图版 2 是锌矿石样品的光片显微照片。主要由闪锌矿、方解石及石英组成。图中的白色条带状矿物是闪锌矿,沿着韧性剪切带密集分布。在该韧性剪切带中发育一条脆性裂隙,它是在韧性剪切带发育过程中产生的。闪锌矿未在裂隙中充填,而是由于韧性流动散布在整个带内,裂隙面是在韧性变形的后期产生的。当脆性裂隙比较发育时则有闪锌矿充填,这些闪锌矿进入裂隙中是以固态的流动、还是以液态或气态的贯入还不能确定。该样品实验温度 400°C ,围压 300MPa ,加载 15 小时。图版 3 是锌矿石样品中的黄铁矿。该

样品的实验温度为 450°C ,围压 350MPa 。样品中闪锌矿已少见,黄铁矿却沿着各种韧性变形带分布,有时呈带状,有时也呈现出斜列式的。图中白色的即为黄铁矿颗粒,它们不象上述几种闪锌矿那样平行于韧性剪切带分布,而是斜列于韧性剪切带中,但总体分布却与韧性剪切带一致。

韧性挤压带在变形样品中也是很常见的,并通常伴随有成矿物质的集中,但韧性剪切带在样品中一般仅出现于局部,并不象韧性挤压带那样斜穿整个样品。韧性挤压带常常形成于较缓慢变形的样品中间部位或由于韧性剪切过程中所产生的局部挤压,如共轭韧性剪切带的交汇部位或附近形成挤压带。与韧性剪切带相比,韧性挤压带一般较宽,边界不十分清楚。图版 4 是石英黄铁矿矿石样品中发育的韧性挤压带。黄铁矿(图中黑色矿物,白色为石英)向韧性挤压带中富集。该带与样品轴向垂直,即垂直于挤压方向,无破裂面,边界也不清楚。主要由黄铁矿的集中所体现。该样品的实验温度 300°C ,围压 300MPa ,时间 15 小时。

除了韧性剪切带和韧性挤压带之外,韧性扭曲构造也是一个非常重要的韧性变形构造类型。它通常是伴随着韧性剪切作用和韧性挤压作用而发生,但韧性扭曲带是需要一定的边界条件下才能形成,或者是由于变形的叠加,或者是由于物质运动受到某种阻碍而产生扭曲变形。正是由于这种扭曲作用与韧性剪切作用和韧性挤压作用都不同,使其具有某种特殊的意义,尤其是在控制成矿作用方面,扭曲作用常常是产生物质迁移集中的动力条件。图版 5 是在金矿样品中产生的一个扭曲构造,在图中是由黑色的黄铁矿条带构成,样品受压方向是竖直的。该构造是在竖直压力作用下,黄铁矿沿着右上到左下的韧性剪切带运移,受到了较坚硬的

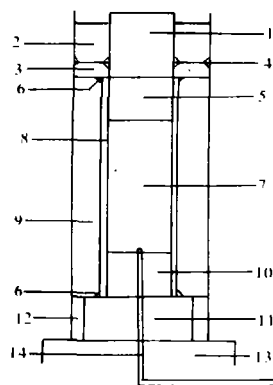


图 1 实验装样方式图

Fig. 1 Assembly of experiment

图例说明:

- 1、轴压活塞 2、围压活塞 3、铜导环
- 4、密封环 5、刚玉 6、接触环
- 7、样品 8、石墨管 9、盐套
- 10、刚玉 11、垫块 12、叶腊石套
- 13、底座 14、热电偶

矿物颗粒的阻碍,产生了弯曲流动,形成了由图所示的韧性扭曲构造。扭曲变形极为明显,尤其是顶弧处弯曲的带状石英明显反映出该构造形式的形成过程。黄铁矿明显的韧性流动和高度的集中反映出了扭曲作用是产生物质迁移富集的有力因素。更值得提出的是就在该韧性扭曲构造顶弧的内侧,电子探针分析金的富集达到 0.041%。几种元素的测试结果如下:Fe 46.219%;S 52.13%;Au 0.041%;Pb 0.028%;Ag 0.016%。而在其它样品中的各种构造上均未测出金的存在。由于分析精度的原因,只有当金达到非常高的富集时才能由电子探针测出,所以在此并不能说明金在其它形式的韧性构造中没有一定程度的富集,只不过说明韧性扭曲作用比其它变形作用更容易引起金的富集。广东河台金矿就是受这样一个韧性扭曲构造控制。

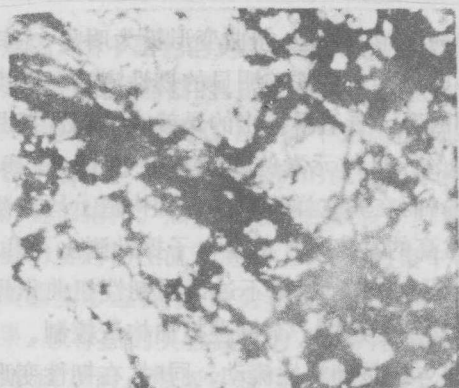
综上所述,硫化物沿几种韧性变形构造的主要迁移方式是韧塑性流动。同时,在韧性变形过程中也可产生某些脆性破裂,伴随有汽液等作用发生。但韧性流动是更为明显的。从图版 1—5 都可以看到硫化物的各种流动迹象。图版 6 是一个黄铁矿集合体有一半发生了韧性流动,而另一半则只有很微弱的韧性流动变形,除了部分劈理以外,基本上保持了原来的形态和结构。而靠近变形带(左上右下方向)则具有明显的韧性流动,内部结构也发生了很大变化。可以预见,如果持续的变形下去,该黄铁矿便会全部集中在变形带中。

关于硫化物的韧性流动机制,似乎与石英等矿物在韧性剪切带中的变形机制不完全相同。石英在韧性剪切带中的韧性变形,通常是通过边界迁移及动态重结晶等机制进行。硫化物是比石英更容易发生韧性流动的。在较低的温度下,它们变形机制相近,而在较高的温度下,硫化物极易发生分解。某些化学作用在其变形过程中发生着影响。如在 450℃ 的条件下,黄铁矿首先发生的是内部某些化学成份和结构的变化。这种变化主要是由温度因素所致。使较大的黄铁矿颗粒变为很多细小的颗粒,之后在韧性变形过程中流动并定向迁移,这也可能是硫化物比石英等其它矿物更容易发生韧性流动的一个原因。

上述硫化物随着韧性变形而迁移富集的现象,尽管在程度上还有较大的差异,在机制上还有探讨的余地,但在事实上,其易于发生韧性流动则是毋庸置疑的。所有上述韧性变形构造和成矿物质硫化物的各种变化完全是实验变形过程中发生的,这是经过对样品实验前后及样品变形形态与受力方式的认真分析对比而确认的。实验前的样品,硫化物都是呈粒状随机分布的。

四、几点讨论

本文通过高温高压变形实验,总结出了三种韧性变形构造类型。其中韧性剪切带是自然界中普遍存在的,也是已经受到广泛重视的。韧性挤压带和韧性扭曲带构造在自然界中是否普遍存在,是否具有重要意义,目前还没有引起广泛的重视和研究。作者认为这两种韧性变形构造是很值得研究的,对成矿的意义更不容忽视。粤西河台金矿是与韧性变形十分密切的金矿。由于研究者和地质工作者都没有韧性扭曲构造的概念,使对该区的构造分析陷入困惑,一个非常明显的韧性扭曲构造不能确认。实际的地质调查已充分证明了该韧性扭曲构造的存在。本文的实验进一步证实了自然界韧性扭曲构造的普遍意义。韧性扭曲作用更容易造成某些成矿物



照片1 黄铁矿沿韧性剪切带集中。暗色矿物为黄铁矿, 浅色矿物为石英。

×50



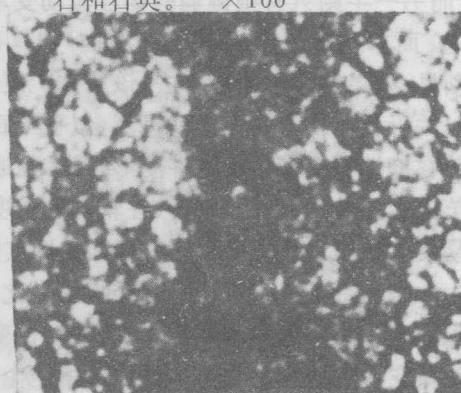
照片2 闪锌矿的韧性流动与集中。浅色矿物为闪锌矿, 密集成带; 暗色矿物为方解石和石英。

×100



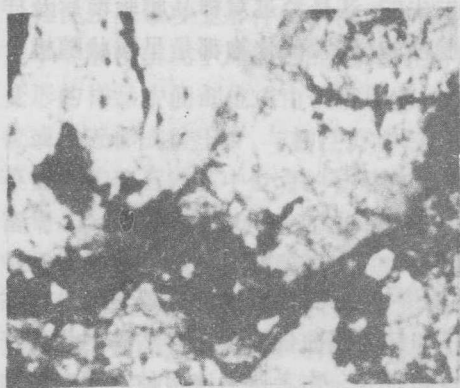
照片3 在韧性剪切带中斜列式分布的黄铁矿。白色矿物为黄铁矿

×200



照片4 在韧性挤压带中富集的黄铁矿。竖直的暗色条带为黄铁矿, 浅色矿物为石英。

×100



照片5 黄铁矿向韧性扭曲构造带集中, 黑色弯曲状的构造带由黄铁矿组成, 韧性流动现象明显。

×20



照片6 白色矿物为变形带中和变形带外的黄铁矿; 暗色为透明矿物。黄铁矿一部分发生了韧性流动。

×200

质的滞积和集中,这是不容忽视的。

以实验来探讨构造控矿的机制是一种有说服力的方法。但实验是不能完全模拟出自然条件的,比如自然界的应变速率是很低的,这是实验所无法模拟的。但实验可以模拟出自然界构造和构造变形过程,通过改变其它一些条件,将自然界中在漫长地质时期中发生的地质作用在短时间内再现出来,如通过提高温度就可能达到这样的目的。但又必须在一定的限度内,如对硫化物,温度超过 450℃,物质的存在形态和运移的方式都将发生变化,这就影响了对较低温度下物质变形与迁移机制的研究,这是实验所面临的最严重的问题。此外,自然界中的任何运动过程和条件都是很复杂的,实验只能模拟出一般典型的条件。随着实验工作的开展和深入,将会逐渐向实际地质条件接近,这是实验工作者的任务。

在实验结果上所体现的韧性变形与成矿物质组份迁移的现象是在样品范围内,或者说是微观尺度上。是否可以将其应用于宏观的地质现象上,应该说是可以的,因为宏观地质现象都必然在微观上有所体现,尤其是在机制方面,还必须从微观角度来探讨。本实验的结果说明韧性流动可以直接使某些成矿组份发生迁移和富集。但人们一定会问,韧性变形是否能够将离变形带很远的物质运移到变形带中来?关于这一点,实验也是局限性的,实验结果也只是说明在变形带附近的某些成矿物质能够通过塑性流动向变形带中迁移。在地质上,伴随着韧性变形,脆性或半脆性的构造以及热液的活动更为普遍些,成矿过程可能是更为复杂的过程。在实验中,虽然也体现出了部分脆性构造作用及成矿物质的液态迁移,但主要的是模拟成矿物质的韧性流动问题。至于成矿物质在液态下的迁移富集规律,不是本文的内容。作者将在另外的文章中给予叙述,因为模拟热液成矿过程,无论是在实验条件上和实验设计上都将是完全不同的,其结果也是很复杂的。

欢迎订阅 1991 年度《地质找矿论丛》(季刊)

《地质找矿论丛》是由冶金工业部天津地质研究院主办的学术性刊物(季刊)。主要刊登冶金矿产和黄金资源等科研成果,包括金属矿床成矿区带及成矿预测;矿床类型、成矿系列及找矿方向;矿床物质成份及综合利用;新技术、新方法在地质找矿中的应用;最新找矿信息及学术活动等。

《地质找矿论丛》国内外公开发行人。国内统一刊号:CN12-1131, (ISSN1001-1412)。自办发行,现已开始办理 1991 年度征订手续,每册定价 2 元,全年 8 元。需订者可直接与本刊编辑部发行组联系。收款单位:冶金工业部天津地质研究院对外技术开发部。地址:天津市友谊路 42 号,邮政编码 300061;开户银行:天津市建设银行三支行,帐号:27128449。欢迎广大读者订阅。

参考文献

- [1] 吴美德、芮仲青, 含金剪切带型金矿床(编译)。地质矿产部情报研究所, 1989
- [2] 赵士杰, 河台金矿区区域地质背景及含金糜棱岩带地质特征。广东区域地质, (1)1987
- [3] 岳石, 粤西河台金矿床构造控矿规律研究。地质找矿论丛, 4(4)1989
- [4] Cox, S. F., Etheridge, M. A. and Hobbs, B. E., 1981, The experimental ductile deformation of poly-crystalline and single crystall pyrite. Pure. Appl. Geophy. 115, P. 119

EXPERIMENTAL ACHIEVEMENTS ON DUCTILE DEFORMATION STRUCTURES AND METALLIZATION

Yue Shi

Ma Rui

(Postdoctoral center at Changchun College of Geology)

(Geological Dept. Changchun College of Geology)

Wang Zichao

(Geological Institute, The State Seismic Bureau)

Abstract

To look into the genetic relationship between ductile deformation and metallization, specimens with rich metallogenic materials have been used in deformation experiment under high temperature and high pressure. The temperature of the experiment ranged from 250°C to 450°C and the confining pressure from 200 MPa to 400MPa. Three types of ductile structures have developed during the experiments, which are ductile shear zone, ductile compression zone and ductile contortion zone. Following these ductile deformation, metallogenic materials, especially sulfide migrated and concentrated. It has been shown that pyrite and sphalerite can easily flow plastically at 250°C. But with increasing temperature, sulfide will decompose and diffuse. For example, it is difficult to find sphalerite grains on the polishing section of specimens after experiment at 450°C. Most pyrite have also changed much. The results of the experiments indicate that ductile contortion structure is an important structural pattern which can contribute much to enrichment of metallogenic materials.