

文章编号: 0258-7106 (2001) 04-0323-08

块状硫化物矿石中硫化物的压溶和增生及成矿意义

——以加拿大西部矿床为例*

顾连兴¹ Ken R. McClay² 周继荣³ 吴昌志¹

(1 南京大学地球科学系及内生金属矿床成矿机制国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 2 Department of Geology, Royal Holloway, University of London, Egham, Surrey TW20 0EX, U. K.; 3 地质出版社, 北京 100083)

摘要 加拿大西部块状硫化物矿石普遍地发生过硫化物的压溶和增生。增生作用根据增生体的成分可以分为同质增生和异质增生, 根据动力环境可以分为静态增生和动态增生。三晶嵌接结构可以是静态增生的产物。压溶和增生是块状硫化物矿床成岩和变质过程中的重要作用。脉石矿物的压溶可使原生矿石就地加富, 硫化物的压溶可使成矿物质发生再活化。增生可促进矿质沉淀。富含硫化物的地层之所以能成为地球化学障而有利于后期热液叠加和层控矿床的形成, 硫化物晶芽的增生是一种重要机制。

关键词 黄铁矿 压溶 增生 再活化 块状硫化物 层控矿床

中图分类号: P571; P578.2 **文献标识码**: A

自从 McClay 等(1977)发现了沉积岩中硫化物的压溶以来, 研究人员对层控金属矿床中硫化物的压溶作了大量研究, 认为压溶可能在成岩作用的早期就已经开始, 并是低级变质过程中硫化物塑性变形的一种重要机制 (McClay et al., 1983; Cox, 1987; Marshall et al., 1987; McClay, 1991; Gu et al., 1992)。至于增生, 早已有大量文献描述 (Stanton, 1972; Spry, 1979; Barker, 1990; Ramsay, 1983), 但是, 前人对压溶和增生的成矿意义尚未充分认识。本文将在研究加拿大西部块状硫化物矿床的基础上, 阐明压溶使原生矿石就地加富并使成矿物质发生再活化的机制, 并探讨硫化物增生在层控矿床形成过程中的作用。

1 矿床地质特征

Faro 和 Tom 锌铅矿床位于育空地区, 而 Driftpile 和 Cirque 矿床位于不列颠哥伦比亚省西北部(图 1)。这些矿床产在古北美克拉通西缘古生代 Selwyn 盆地和 Kechika 海槽中 (Carne et al., 1982), 含矿岩系分别是寒武系千枚岩 (Faro 矿床) 和泥盆系海相

碎屑岩、黑色页岩和碳酸盐岩 (Tom 矿床, Driftpile 矿床及 Cirque 矿床)。主要的硫化物矿体均呈层状或透镜状, 其矿石以块状和层纹状为主。Tom 矿床西矿带南端层状矿体下方还发现了作为海底热液通道的脉状和角砾状矿化 (McClay, 1991)。这些矿床的矿石矿物主要有黄铁矿、方铅矿和闪锌矿, 局部地段存在磁黄铁矿和磁铁矿; 脉石矿物有碳酸盐、重晶石、石英和粘土矿物。前人研究表明, 这些矿床是克拉通边缘盆地中形成的块状硫化物矿床 (Carne et al., 1982; McClay, 1991; Jonasson et al., 1987), 矿床及其围岩的变形和变质发生在晚侏罗世至中白垩世, 变质程度达低级绿片岩相。

为了研究矿石中硫化物的结构特征, 笔者将全部矿石光片用 $w(\text{HNO}_3) = 20\%$ 的 HNO_3 浸蚀后, 在矿相显微镜下进行观察。

黄铁矿的原生结构主要有微晶结构、莓球和球粒结构 (Gu et al., 1992)。黄铁矿微晶多为半自形至自形, 粒径 $1 \sim 8 \mu\text{m}$ 。莓球直径变化于 $5 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间, 其中可含有 $20 \sim 30$ 个呈细胞状排列的黄铁矿微粒。球粒中有相当一部分呈菊花状, 直径多为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$, 其构成往往是一些棒条状黄铁矿围绕一

* 本文为国家自然科学基金(49773194)和英国国务院访问学者基金联合资助项目成果

第一作者简介 顾连兴, 男, 1944 年生, 南京大学地球科学系教授, 博士生导师, 从事矿物学、岩石学、矿床学专业教学和研究工作。
收稿日期 2001-05-14; 改回日期 2001-08-10。李岩编辑。

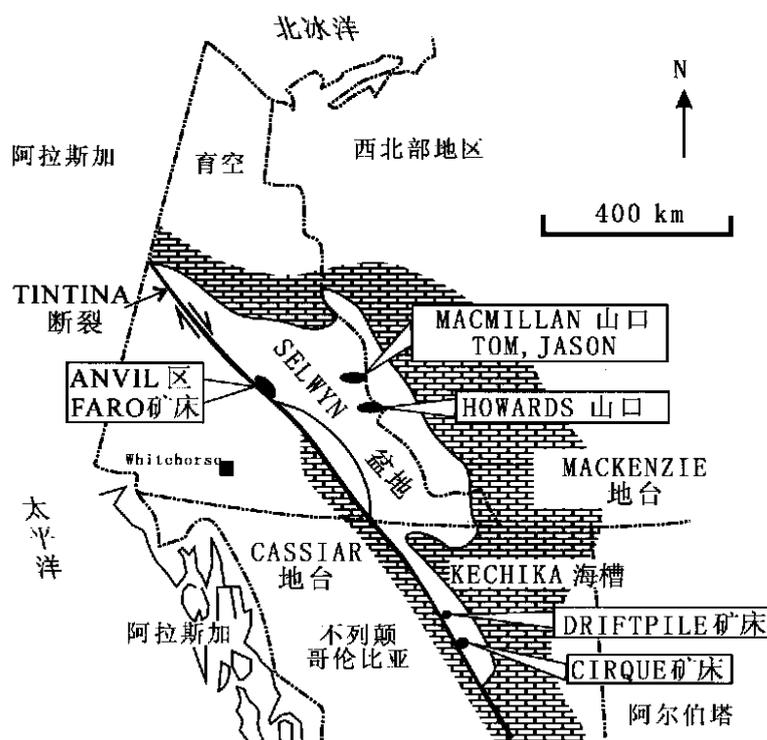


图1 加拿大西部古生代盆地主要块状硫化物型铅锌矿床分布图(据 Carne et al., 1982)

Fig. 1 Locations of major massive sulphide lead-zinc deposits in Palaeozoic basins of western Canada (data from Carne et al., 1982)

个或几个黄铁矿莓球或黄铁矿自形单晶(图 2a)呈放射状排列,放射状排列的外层通常比其核心更易受到硝酸的浸蚀。

2 硫化物的压溶结构

压溶又称 Coble 蠕变,是指岩石发生变形时,其中处于高应力部位的易溶物质被溶解,并通过间隙流体的扩散而转移到低应力部位重新沉淀下来的过程(McClay, 1977)。加拿大西部块状硫化物矿石中的如下常见结构,表明矿床中的硫化物曾经发生过显著的压溶:

(1) 莓球或球粒之间相互嵌入,其接触面呈弯曲状、波状或锯齿状,形成缝合线(图 2b),表明压力在这里造成了硫化物的强烈溶解。先形成的莓球或球粒可被后期黄铁矿或其他矿物颗粒嵌入或贯穿,表明来自后期矿物的压力使莓球发生了溶解。

(2) 有些黄铁矿单晶可在一个方向上受到溶蚀而在另一个方向上增生,致使颗粒呈透镜状。在图 2c 中,一个黄铁矿颗粒左右两侧的增生部分与原有颗粒边界十分清晰。这种结构明显展示了物质从高

应力部位向低应力部位的转移。

(3) 虽然较粗粒的矿石对于压溶并不灵敏(Rutter, 1983; Cox, 1987; Lehner, 1990; Spiers, 1990),但仍可见到明显的压溶现象。在图 2d 中,上方的一个黄铁矿颗粒压入了下方的颗粒,使下方颗粒产生垂向张裂,并在两者的弧形接触面上形成由细粒黄铁矿残留体构成的压溶线(pressure solution seam)。

(4) 压溶线的存在表明在应力作用下易溶矿物的优先溶解和难溶矿物的相对聚集(Ramsay et al., 1983)。尤其在由黄铁矿和(或)闪锌矿与碳酸盐和(或)硅质构成的矿石中,后两者在应力集中处的优先溶解,往往使黄铁矿和(或)闪锌矿聚集成压溶线。压溶线既可较平直,也可呈波状弯曲或交织成网状,其厚度从数微米到数毫米不等,既可与层理平行,也可与层理垂直或斜交。有时,大量相互平行的压溶线使矿石呈现条纹状的外貌(图 2e)。

(5) 当黄铁矿莓球微层与硅质和(或)碳酸盐微层相间而构成层纹状矿石时,若这种矿石发生揉皱,则可见到压溶使易溶的脉石条带在微褶皱翼部强应力处变薄,莓球聚集成压溶线,并使层理被劈理置换

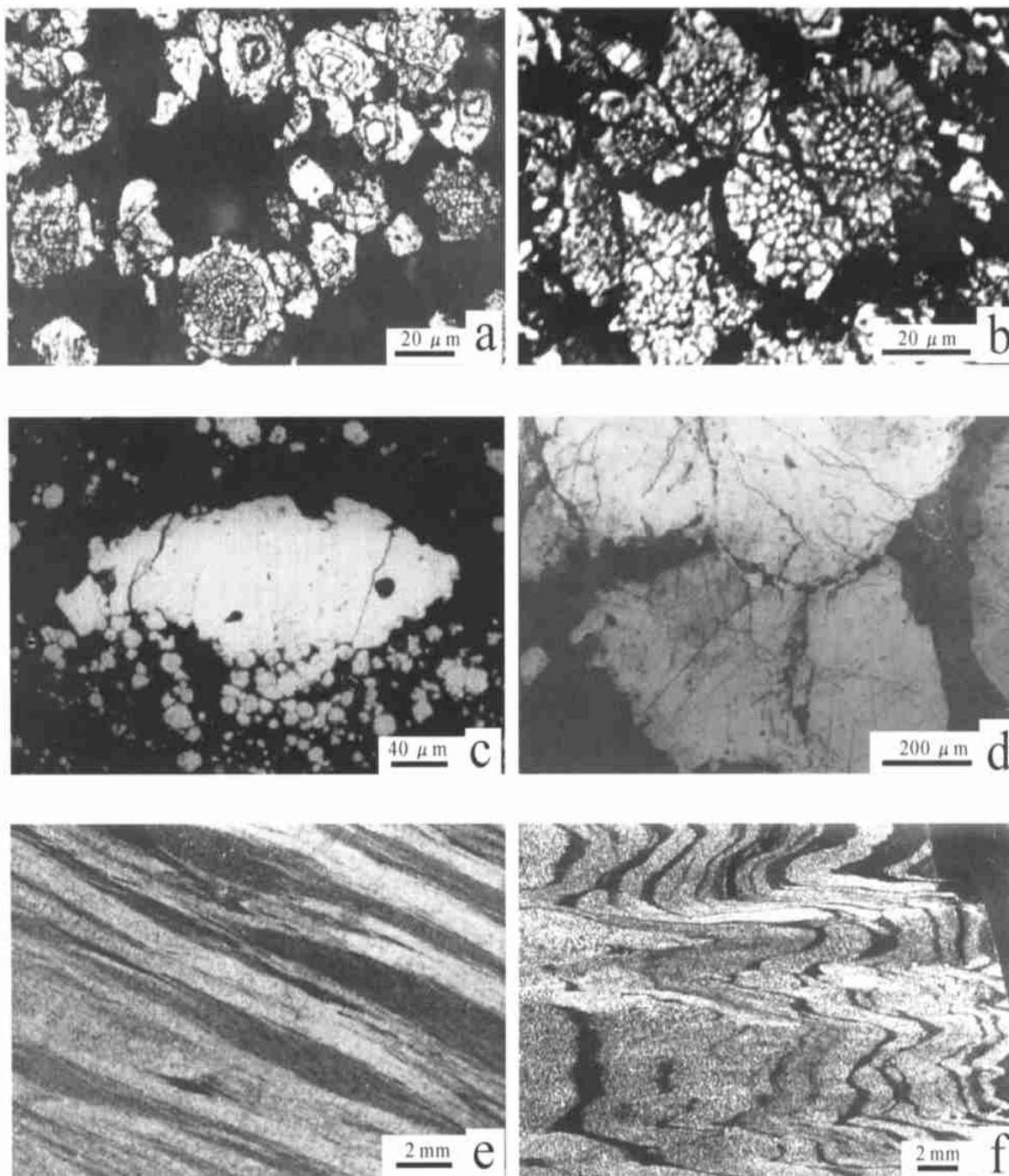
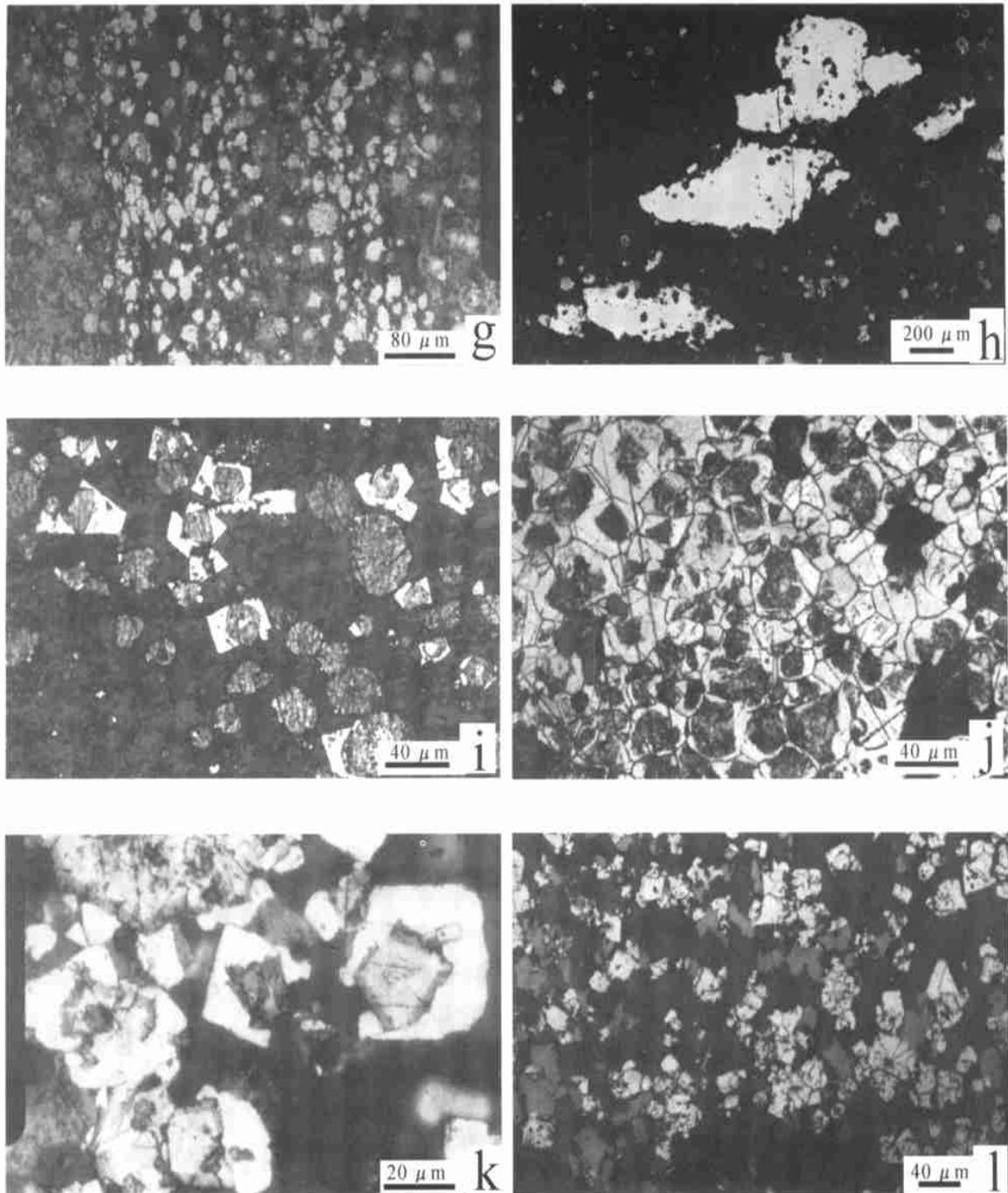


图 2 加拿大西部块状硫化物矿石的压溶和增生结构

Fig. 2 Pressure solution and overgrowth textures of massive sulphide ores in western Canada (all samples etched with nitric acid)

a. 黄铁矿立方体微晶和莓球的两阶段增生。微晶外围黄铁矿增生体的晶面与基体晶面平行；莓球外围的黄铁矿棒条状增生体呈放射状生长。Driftpile 矿区。**b.** 黄铁矿莓球的增生和球粒的压溶。球粒由棒条状黄铁矿增生于莓球外侧而成，视域中部两个球粒的增生部分已因压溶而消失，并形成锯齿状的缝合线。Driftpile 矿区。**c.** 黄铁矿颗粒因南-北方向的压溶和东-西两侧的增生而呈透视镜状。Driftpile 矿区。**d.** 两个黄铁矿颗粒的碰撞和压溶。弧形接触面上有细粒黄铁矿的压溶线，下方的颗粒因受压而发生南-北方向的张裂。Faro 矿床。**e.** 莓球状黄铁矿矿石中平行排列的压溶线。因脉石矿物的优先压溶而使黄铁矿莓球在强应力处相对聚集成亮带。矿石中的层理已被劈理所置换。Cirque 矿区，抛光面。**f.** 揉皱状黄铁矿矿石的压溶。黄铁矿条带由大量莓球构成，压溶使脉石矿物条带在强应力的微褶皱翼部变薄，莓球聚集成明亮的压溶线，并使层理被劈理置换。Faro 矿区，抛光面



续图 2

Fig. 2 (Cont.)

g. 球粒状矿石剪切带中的压溶。视域两侧为未受剪切的球粒状矿石。球粒的核心为较难浸蚀的黄铁矿自形单晶或莓球,外部为极易浸蚀的放射状排列的黄铁矿。视域中部为南北方向的剪切带,其中球粒的外部已被溶解而仅残留其核部高反射率的黄铁矿莓球或立方体微晶,部分黄铁矿莓球已被拉长或解聚。Faro 矿床。h. 黄铁矿颗粒的剪切压溶和增生。视域中三个较大的黄铁矿颗粒在南-北方向上发生压溶而在东西方向上增生,故成透镜状。增生部分与原颗粒界线清晰。三个颗粒的排列方式表明矿石曾受左旋剪切应力作用。Faro 矿床。i. 黄铁矿球粒的动态增生。增生体沿球粒的东、西两侧定向排列。增生部分比球粒本身更难受到浸蚀。Cirque 矿床。j. 黄铁矿的静态增生。核部黄铁矿因易受浸蚀呈黑色。增生部分的颗粒边界两面夹角多呈 120° ,形成三晶嵌接结构。Tom 矿床。k. 黄铁矿微晶的两个世代增生。增生体晶面与基体晶面呈 45° 夹角。Driftpile 矿床。l. 黄铁矿微晶(白色)和球粒上的闪锌矿增生体(深灰色),呈南北方向排列。Driftpile 矿床

(图 2f)。

(6) 矿石如果受到剪切作用,则常可见到剪切带中硫化物的强烈溶解现象。图 2g 为球粒状矿石,其核心由较难浸蚀的黄铁矿莓球和立方体构成。图 2g 中部为南北方向的剪切带,此带中球粒的放射状易浸蚀部分已被溶解殆尽,仅留下核部高反射率的黄铁矿莓球和立方体微晶,多数莓球因受剪切变形的影响而成透镜状或长条状。图 2h 中有三个黄铁矿颗粒,均包括一个中部的原生单晶和两侧的增生部分,其核心单晶的浑圆状和透镜状形态表明这些单晶曾受到过接近南北向的压应力所造成的压溶,其雁行排列方式和东、西两侧的增生表明该压应力可能为北东向左旋剪切力的派生产物。

Heald (1955) 的研究表明,由压力引起的不同矿物溶解度加大的程度,按如下顺序递增:锆石和黄铁矿(最小),榍石、电气石和胶磷矿,云母、绢云母和粘土矿物,长石,石英,方解石,赤铁矿(最大)。上文所列的证据表明,在硫化物矿石中,不但脉石矿物可以发生强烈压溶,就是 Heald 顺序中最难溶的矿石矿物黄铁矿,其压溶效应也不容忽视。

3 硫化物的增生结构

增生可以发生在不同的地质作用下。就成分而言,增生物质既可以围绕同成分的矿物沉淀,也可以在另一种矿物的表面淀积 (Gary et al., 1973)。

就应力环境而言,增生可以有两种方式。一种在岩石中具有方位,增生产物的延长方向大致对应于最小主应力方向或剪切带的 S 面理方位。图 2h 中三个黄铁矿颗粒两侧增生部分的延长方向大致相当于北东向剪切的 S 面理。在图 2i 中,后期黄铁矿主要增生于基体黄铁矿球粒或单晶的左右两侧,表明增生过程发生于南北向的压应力条件下;与明亮的增生部分相比,基体黄铁矿因易受硝酸浸蚀而反射率降低。图 2h 和 2i 中的增生作用均发生于定向应力条件之下,可以称为动态增生。这种增生可能是矿床变质和变形过程中的产物。

与图 2h 及 2i 不同的是,图 2a、2b、2j 和 2k 的增生黄铁矿无一定优选方位。在图 2a 中,两个不同世代的黄铁矿或者呈柱条状围绕一个黄铁矿莓球呈放射状增生,或者使原有的自形黄铁矿微晶次生加大。黄铁矿莓球的增生可有两种方式,除了图 2a 和 2b 中围绕整个莓球增生的方式外,有时还可见到流体

渗入莓球内部,使黄铁矿增生于各微晶之上,其结果使莓球发生膨胀。在图 2k 中黄铁矿立方体也经历了两个世代的增生。第二世代增生黄铁矿的晶面在图 2a 和 2j 中与基体黄铁矿晶面平行,而在图 2k 中则与基体晶面呈 45° 夹角。这可能取决于增生过程中溶液物理化学条件的差异,这种差异控制了黄铁矿不同晶面的生长速度。这种黄铁矿无优选方位的增生,表明增生作用发生在无定向应力的条件下,可以称为静态增生。这种增生应是成岩阶段的产物。

在由单矿物组成的岩石或矿石中,矿物颗粒边界平直镶嵌的结构常被视为退火结构,而两面夹角呈 120° 时的三晶嵌接结构 (顾连兴等, 1990) 则通常被认为是退火达到了平衡的产物,因而被称为退火平衡结构 (Stanton, 1972; Craig et al., 1993)。然而,图 2j 中增生于易浸蚀的黄铁矿基体之上的黄铁矿亮晶也具有平直的边界,并且相当一部分两面夹角也呈 120°。由此可见,三晶嵌接结构并非退火平衡所独有,无定向应力条件下的静态增生也可形成这种结构。

以上照片中的增生产物与基体成分相同,即是所谓同质增生 (syntaxial overgrowth) (Ramsay, 1983)。从各同质增生照片可以看出,基体部分通常比增生部分易受浸蚀,因而反射率较低,这种特征酷似白云石中常见的雾心亮边结构 (余志伟, 2000), 其形成可能是因为成岩晚期流体比早期流体溶质浓度低,沉淀速度慢,产物所含晶内杂质和缺陷较少的缘故。另一种情形是增生产物与基体成分不同,即是所谓异质增生 (antitaxial overgrowth, Ramsay, 1983)。在图 2l 中除了可以见到黄铁矿增生于黄铁矿之上外,还可以见到闪锌矿选择性地增生于黄铁矿之上。增生产物同光片中的脉石矿物一样,大致呈南北方向排列,表明该光片中的增生是在应力作用下的动态增生。在 Driftpile 和 Cirque 矿区常见到闪锌矿和方铅矿围绕黄铁矿莓球,或者棒条状黄铁矿围绕一个闪锌矿核心呈放射状增生而构成的球粒。尽管这些矿区铜含量甚低,但仍可见到黄铜矿增生于黄铁矿之上的现象。矿床中普遍存在裂缝发育的黄铁矿,这些裂缝如被后期矿物充填,则最常见的充填物是黄铜矿,其次是闪锌矿和方铅矿,脉石矿物通常较少。黄铜矿和其他硫化物的优先充填显然缘于它们与黄铁矿的较强亲合性。在异质增生过程中,增生体与基体在晶体化学和结构上的匹配误差,可由周期性的位错来补偿 (Spry, 1979)。

4 压溶和增生的成矿意义

以上讨论表明,压溶和增生并不仅仅是砂岩、灰岩等沉积岩中的特有现象,也是沉积硫化物矿石固结和变形的重要方式。矿物颗粒在一个方向上的压溶与另一个方向上的增生,可使硫化物颗粒、莓球、球粒等被压扁、拉长并发生定向排列,表现出片理和宏观的韧性变形。

硫化物的压溶和增生决非仅限于加拿大的上述矿区。作者曾在加拿大苏利文(Gu et al., 1992)和广东云浮大降坪见到了黄铁矿的强烈压溶和增生,并在澳大利亚 Mount Isa 的光片中见到闪锌矿增生于黄铁矿立方体之上,形成一个镶边;韩发等(1997)报道了广西大厂锡矿区黄铁矿的压溶以及毒砂在黄铁矿上的增生;Eldridge 等(1993)和郭介人等(1994)分别描述了澳大利亚 McArthur River 地区 H. Y. C 矿床和我国秦岭下沟矿床中闪锌矿和方铅矿在黄铁矿之上的增生;在下扬子铜陵地区铜官山、马山和冬瓜山等矿区,在块状磁黄铁矿矿石中普遍可见粗粒黄铁矿变斑晶,变斑晶周围有一圈黄铜矿镶边(顾连兴等,1989)。黄铜矿和闪锌矿等硫化物充填黄铁矿裂隙的结构,在很多地区层控硫化物矿石中都能见到(Hagni, 1986; Vokes et al., 1993)。笔者的观察表明,挪威 Sulitjelma 块状硫化物矿床中粗大的黄铁矿变斑晶,往往是一个或多个黄铁矿晶核增生的产物;韩发等(1997)将大厂矿区矿石光片浸蚀后也见到了这种现象。在许多经过强烈变质的硫化物矿石中通常较少出现压溶结构,这可能是因为这些主要形成于成岩和低级变质阶段的结构(Gu et al., 1992)在递进变质时受到了均匀化作用破坏的缘故。

Mookherjee (1976)将物质从一处转移到另一处的各种化学的、物理的或介于两者之间的过程均称为活化转移(mobilization),而将物质从先存矿体中转移出来,然后在他处形成新矿体的过程称为再活化(re mobilization)。压溶是机械能向化学能转变的一种方式。压溶和再生长经常出现在同一个矿物颗粒之上,因而 Yardley (1989)认为,由压溶所引起的物质转移仅局限于同一颗粒附近。然而,不言而喻,压溶线中难溶物质的聚集是因为易溶物质受压溶后流失所致,可见压溶产物的迁移可有一定距离。在未变质—浅变质的石灰岩或砂岩中,形成碳酸盐

或石英等侧分泌脉的过程,其物质来源在很大程度上可能与围岩中同种矿物的压溶有关(Ramsay, 1983)。从图2中可以看到,有些压溶显著的黄铁矿球粒本身未发生伴随的增生,同时,有些强烈次生加大的黄铁矿本身也没有显示压溶。这表明压溶和再生长未必处处共存,在局部地段也可以分别单独存在,也就是说,孔隙溶液借助压溶作用获得的成矿物质,可以通过溶液的流动,在远离原颗粒的其他部位沉淀。如果这种溶液被裂隙系统所沟通,那么由压溶而导致的成矿再活化,便可以在相当大的范围内进行,并可能在条件有利之处形成新的矿体。笔者(顾连兴,1984)曾讨论过华南型块状硫化物矿床中金属元素的成矿后再活化,如今看来,压溶也是其重要的驱动因素之一。

在存在流体的情况下,构造应力可使某些造岩矿物比硫化物和金更强烈地溶解流失,因此许多研究者强调压溶对韧性剪切带中金初步富集的贡献(Kerrich, 1989; 王鹤年等, 1992; 刘喜山等, 1992)。在块状硫化物矿石中,脉石矿物石英和碳酸盐的溶解度对应力作用尤为敏感,其压溶可使矿石中的硫化物和相关金属含量相对增高,因而使原生矿石就地加富。刘连登等(1994)和顾连兴等(2001)曾报道了辽宁红透山矿区呈带状分布的矿石糜棱岩,其铜、金平均品位分别高达15%和1.54 g/t,均为邻近块状矿石品位的4倍左右。笔者的新近研究表明,在退变质韧性剪切过程中脉石矿物石英等的强烈压溶流失,是矿石糜棱岩中铜、金就地加富的一种重要机制。最近,笔者还研究了江苏省东海县毛北、新沂县郝湖、赣榆县朱家官庄等地产于榴辉岩中的浸染状金红石矿石,认为这些矿石中金红石的高度富集,在相当大的程度上与榴辉岩在退变质剪切过程中脉石矿物的压溶有关。

层控硫化物矿床的研究者往往强调地层中同生沉积矿层或矿胚层地球化学障的作用(周怀阳等, 1987; Gu et al., 1993)。上述广泛存在的增生现象表明,早先存在的硫化物可以作为后期叠加流体的晶芽,富含晶芽的沉积地层即成为晶芽层。当后期叠加流体在沉积岩系中循环时,成矿物质将优先围绕先存晶芽增生并沉淀,从而使原有矿层叠加变富,或将矿胚层改造成为具有工业价值的层控矿床。

参考文献

顾连兴. 1984. 华南型块状硫化物矿床及其伴生矿床中金属的地层

- 学分带[J]. 南京大学学报(地质学增刊): 57~71.
- 顾连兴, 严正富. 1989. 华南型块状硫化物矿床及其伴生铁矿床中矿物共生顺序研究[J]. 矿物岩石, 9(4): 68~72.
- 顾连兴, 郑素娟. 1990. 华南型块状硫化物矿床中的胶黄铁矿及其退火作用[J]. 岩石矿物学杂志, 9(4): 251~256.
- 顾连兴, 肖新建, 倪培, 等. 2001. 辽宁红透山块状硫化物矿床中沉积磁黄铁矿的结构及其成因[J]. 地质论评, 47(2): 188~192.
- 韩发, 赵汝松, 沈建忠, 等. 1997. 大厂锡多金属矿床地质及成因[M]. 北京: 地质出版社. 1~213.
- 刘连登, 朱永正, 戴仕炳. 1994. 金矿与韧性剪切带及叠加构造[A]. 见: 张贻侠, 刘连登主编. 中国前寒武纪矿床和构造[C]. 北京: 地震出版社. 39~78.
- 刘喜山, 李树勋, 刘俊来. 1992. 变形变质作用及成矿[M]. 北京: 中国科学技术出版社. 1~188.
- 王鹤年, 张守韵, 俞爱均, 等. 1992. 华夏地块韧性剪切带型金矿地质[M]. 北京: 科学出版社. 1~180.
- 郭介人, 任秉琛, 黄玉春. 1994. 西北海相火山岩地区块状硫化物矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1~271.
- 余志伟. 2000. 氧、碳同位素在白云岩成因研究中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(2): 103~105.
- Barker A J. 1990. Introduction to metamorphic textures and microstructures [M]. Glasgow and London: Blackie and Sons Ltd. 162p.
- Carne R C and Cathro R J. 1982. Sedimentary Exhalative (SEDEX) zinc-lead-silver deposits, northern Canadian Cordillera [J]. Can. Inst. Min. Metall., 75(1): 66~78.
- Cox S F. 1987. Flow mechanisms in sulphide minerals [J]. Ore Geol. Rev., 2(1-3): 133~171.
- Craig J R and Vokes F M. 1993. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview [J]. Mineral. Mag., 57(1): 3~18.
- Eldridge C S, Williams N and Walshe J L. 1993. Sulphur isotope variability in sediment-hosted massive sulphide deposits as determined using the iron microprobe SHRIMP: II. A study of the H. Y. C. deposit at McArthur river, Northern Territory, Australia [J]. Econ. Geol., 88(1): 1~26.
- Gary M, McAfee Jr R and Wolf L. 1973. Glossary of Geology [M]. Washington D. C.: American Geological Institute. 506.
- Gu L X and McClay K R. 1992. Pyrite deformation in stratiform lead-zinc deposits of the Canadian Cordillera [J]. Mineral. Deposita, 27(2): 169~181.
- Hagni R D. 1986. Mineral paragenetic sequence of lead-zinc-copper-cobalt-nickel ores of the Southeast Missouri lead district, USA [A]. In: Craig J R, Hagni R D, Kiesel W ed. Mineral Paragenesis [C]. Athens: The Ophrastus Publications S. A. 73~193.
- Heald M T. 1955. Stylolites in sandstones [J]. J. Geol., 63(2): 101~114.
- Jonasson I R and Goodfellow W D. 1987. Sedimentary and diagenetic textures and deformation structures within the sulphide zone of the Howards Pass (XY) Zn-Pb deposit, Yukon and Northwest Territories [A]. In: Morin J A ed. Mineral Deposits of Northern Cordillera [C]. Can. Inst. Min. Metall. Spec., vol. 37, 51~99.
- Kerrich R. 1989. Geodynamic setting and hydraulic regimes: shear zone hosted mesothermal gold deposits [A]. In: Bursnall J T ed. Mineralization and Shear Zones [C]. Geol. Ass. Can., short course notes. 89~128.
- Lehner F K. 1990. Thermodynamics of rock deformation by pressure solution [A]. In: Barber D J, Meredith P G ed. Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks [C]. London: Unwin Hyman. 296~333.
- Marshall B and Gilligan L B. 1987. An introduction to remobilization: information from ore-body geometry and experimental considerations [J]. Ore Geol. Rev. 2(1~3): 87~131.
- McClay K R. 1977. Pressure solution and Coble creep in rocks [J]. J. Geol. Soc. Lond., 134(1): 71~75.
- McClay K R and Ellis P G. 1983. Deformation and recrystallization of pyrite [J]. Mineral. Mag., 47(4): 527~538.
- McClay K R. 1991. Deformation of stratiform lead-zinc (barite) deposits in the Northern Canadian Cordillera [J]. Ore Geol. Rev., 2(1~3): 435~462.
- Mookherjee. 1976. Ores and metamorphism: temporal and genetic relationships [A]. In: Wolf K H ed. Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits, 4 [C]. Amsterdam: Elsevier. 203~260.
- Ramsay J G and Huber M Z. 1983. The techniques of modern structural geology, V.1, Strain Analysis [M]. London: Academic Press. 1~307.
- Rutter E H. 1983. Pressure solution in nature, theory and experiment [J]. J. Geol. Soc. London, 140(5): 725~740.
- Spiers C J and Schutjens P M T M. 1990. Definition of crystal aggregates by fluid-phase diffusional creep [A]. In: Barber D J, Meredith P G ed. Deformation processes in minerals, ceramics and rocks [C]. London: Unwin Hyman. 334~353.
- Spry A. 1979. Metamorphic textures [M]. Oxford: Pergamon Press Oxford. 1~350.
- Stanton R L. 1972. Ore petrology [M]. New York: McGraw-Hill. 1~713.
- Vokes F M and Craig J R. 1993. Post-recrystallisation mobilisation phenomena in metamorphosed strata-bound sulphide ores [J]. Mineral. Mag., 57(1): 19~28.
- Yardley B W D. 1989. An introduction to metamorphic petrology [M]. London: Longman. 1~248.

