

辽宁红透山块状硫化物矿床矿石糜棱岩铜-金富集机制

顾连兴¹, 汤晓茜¹, 吴昌志¹, 陆建军¹, 肖新建¹,
郑远川¹, 倪培¹, 田泽满²

(1. 南京大学 地球科学系 内生金属矿床研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

2. 红透山铜矿有限公司, 辽宁 抚顺 113321)

摘 要: 辽宁红透山太古宙块状硫化物型铜-锌矿床成矿后的变质作用达到高角闪岩相, 并经历了 3 个阶段的变形。矿床的主要矿石矿物为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿。主矿体内分布有 30 多条矿石糜棱岩带, 它们大多数平行或近于平行块状硫化物矿层, 少数产在矿体附近围岩中。带中的各种硫化物矿物均遭受了强烈的剪切变形, 其中黄铁矿以碎裂为主, 而磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿显示强烈的塑性。矿石糜棱岩比块状硫化物矿石明显富集铜、金、银等元素, 其铜、金和银平均含量分别达 11.00%, 1.74 g/t 和 235 g/t, 相对于块状矿石的富集系数分别为 5.3、5.0 和 4.6。这些金属的高度富集主要是因为矿石糜棱岩受到了后期流体的叠加。铅同位素组成表明矿石糜棱岩中的金属一部分来自块状矿石, 另一部分来自块状硫化物矿体之外。韧性剪切和流体叠加均发生于矿床退变质过程中。

关键词: 块状硫化物矿床; 矿石糜棱岩; 韧性剪切带; 再活化; 铅同位素; 红透山; 辽宁

中图分类号: P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2004)02-0339-13

自 1970 年 Ramsay 和 Granham^[1] 提出韧性剪切带以来, 这种构造就被认为是一种重要的成矿构造。于此领域, 尤其是在金的成矿方面, 涌现了大量的文献^[2~8]。至于海底喷流块状硫化物矿石, 已有的研究结果认识到这类矿石的相当一部分在成矿后变质变形过程中遭受了韧性剪切^[9,10], Duckworth 和 Rickard^[11] 描述了瑞典北部 Renström 矿床中的韧性剪切带和矿石糜棱岩, 认为这些剪切带是在退变质过程中形成的。张秋生等 (1984)^[12] 和刘连登等 (1994)^[13] 报道了红透山矿床中矿石糜棱岩相对于块状矿石而言更加富集铜-金的现象, 并把其铜-金富集机制解释为塑性铜-金矿物与脆性黄铁矿等矿物之间的差异机械再活化。然而迄今为止, 关于块状硫化物矿体内韧性剪切带高度富集成矿金属的报道仍十分少见。同时, 红透山矿区矿石糜棱岩的铜-金富集机制亦未阐明。本文通过对红透山块状硫化

物矿体中矿石糜棱岩的描述, 探讨其高富集铜、金及银的机制。

1 区域和矿床地质

辽宁省红透山铜-锌块状硫化物矿床产在华北地台东北部的浑北花岗岩-绿岩地体内^[12~14]。地体中花岗质岩石和绿岩的比例约为 3:2。古太古代的层状绿岩一般称为清源群, 岩性主要为斜长角闪岩、片麻岩和变粒岩, 并被进一步划分为下部的金凤岭组和上部的红透山组^[15]。清源群的原岩为从基性到酸性不同成分的火山岩, 化学成分具有拉斑玄武岩到钙碱性系列的特征, 因而被认为是岛弧环境下的产物^[12,16]。这些岩石的成岩年龄大于 3.0 Ga, 并在 2.8~2.9 Ga 期间经受了高角闪岩相区域变质^[12]。

浑北绿岩带中分布有 100 多个海底喷流块状硫化物矿床和矿点, 其中红透山、红旗山、西北山、东南山、树基沟、稗子沟和张胡子沟为铜-锌矿床, 大荒沟为黄铁矿矿床。所有矿床和矿点均产于一个厚约百

收稿日期: 2004-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40172034)

作者简介: 顾连兴 (1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿物学岩石学矿床学专业教学和研究工作。

米的岩性段内,该岩性段位于红透山组上部,被当地地质工作者称为“薄层互层带”,乃由薄层黑云母变粒岩、片麻岩和斜长角闪岩互层而成,并被磁铁矿层覆盖。在成分上,这一互层带以含石榴石、直闪石和硅线石为特征,其原岩推测为玄武岩-安山岩-流纹岩组合以及含有沙泥质的凝灰质岩石^[17]。

红透山矿床是浑北地体中7个与火山成因有关的太古宙块状硫化物铜-锌矿中最大者,产在红透山组顶部的“薄层互层带”中。岩石经历过温压条件分别为600~650 和0.8~1.6 GPa的高角闪岩相区域变质^[18]。岩石片理与岩性界线基本一致,均向南东倾斜,倾角70°~80°,构成一个倾竖褶皱(图1)。杨振声和余宝祥^[19]将矿区的变形划分为3个阶段D₁~D₃,发生时间约为2.8~2.5 Ma。D₁形成轴面片理和小型紧闭褶皱,向北倾,倾角20°~30°;D₂形成了中、大型陡倾和倾竖褶皱,并伴有韧性断层。现存的NEE向线理即为这一变形阶段的产物(图1)。D₃变形弱于前两次,主要形成了一些宽缓直立歪斜褶皱。大量后构造辉绿岩墙呈近南北向切割褶皱和矿体,其厚几十cm到几十m,长几十m到千余m不等,时代尚未确定。块状硫化物矿层产状与围岩片理一致,向南东倾斜,构成一倾竖褶皱^[19]。目前,采矿垂深已达1 257 m。在至此深度的不同中段上,矿体均呈向东开口的“Y”形(图1),即东部的两个矿层向西逐渐汇成一体,而后继续西延。倾竖褶皱的直立枢纽即位于此“Y”形的三臂交会处。矿体在该处最厚,形成巨大的直立“矿柱”。在不同中段上,“矿

柱”的长、宽分别为70~100 m和20~40 m不等。从地表(+430 m)到-467 m深度,矿柱几乎垂直向下延伸,但随着向斜枢纽倾角的变化,“矿柱”的倾角也从垂深1 017 m的45°变化到了1 257 m的10°。

矿石类型主要为致密块状(硫化物的体积分数>50%),局部为条带状,未发现可视为海底热液喷流通道的网脉和角砾化带。然而,有些地段矿体外侧的变质岩中可存在浸染状矿石,浸染状矿化带的厚度通常为几十m,长度可超过100 m,其铜、锌平均含量均低于工业品位,但局部可形成可采矿囊。

红透山块状矿石中硫化物含量为60%~80%。矿石矿物成分主要为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿,比例约为5 5 1 1,其次为方铅矿、方黄铜矿、银金矿、辉铜矿和磁铁矿,未发现毒砂。脉石矿物主要为石英,其次为斜长石、石榴石、角闪石、阳起石、黑云母和白云母等。

红透山矿床的探明储量为金属铜36万t,锌47万t、金5 t。伴生的银、镉、铟、钴和硒均可综合利用。矿石平均品位(质量分数)为铜1.70%~1.80%,锌2.30%~2.50%,硫20%~22%,金 0.5×10^{-6} ,银 36×10^{-6} ,镉 56×10^{-6} 及硒 25×10^{-6} ^[17,20]。未发现矿化沿地层层位的分带现象,但从深部往浅部,铜/锌比值呈增长趋势。矿石铜品位在浅部较高,达2.51%~3.50%,而锌品位在深部较高,达2.51%~3.50%。矿床中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围为-1.2‰~+5.6‰(CDT)^[17]。

矿床中普遍可见宽几mm至几cm的含硫化物脉体。多数脉中的硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿和

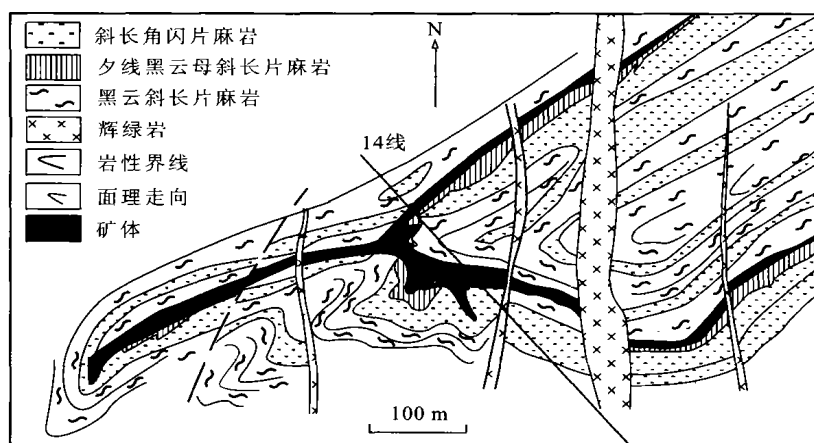


图1 红透山矿床-167 m中段地质平面图

Fig. 1 Geology at Level -167m of the Hongtoushan deposit

闪锌矿,而脉石主要为石英及少量碳酸盐。脉的这种矿物组成与块状硫化物矿石的整体矿物组成基本一致。然而,在采矿面上也偶然见到过含大量方铅矿的矿脉。这些矿脉无定向地切穿了块状硫化物矿石,在有些地段还切穿了后构造的辉绿岩墙。含硫化物矿脉彼此穿插的现象也很常见。

2 块状硫化物矿物学

红透山块状硫化物矿床的一个显著特征是在不同类型矿石中均含发育良好的黄铁矿变斑晶,其体积分数占 20%~60%,基质由不同含量的磁黄铁矿、黄铜矿及闪锌矿组成。基于基质中磁黄铁矿和闪锌矿的比例差异,可以将矿石分为磁黄铁矿型和闪锌矿型。磁黄铁矿型矿石的基质主要为磁黄铁矿以及少量的黄铜矿、闪锌矿和脉石;闪锌矿型矿石主要由闪锌矿和黄铁矿构成,大多分布于矿床较深部位。在两种类型的矿石中,方铅矿均几乎缺失或含量甚微。矿石中的脉石矿物主要为球粒状或浑圆状石英,并含有少量斜长石、黑云母、石榴石、硅线石、角闪石、绿帘石、斜黧帘石和碳酸盐。块状硫化物矿石的主要矿物特征如下:

2.1 黄铁矿

磁黄铁矿型矿石中的黄铁矿变斑晶呈典型的立方晶形(图 2A),其粒径多为 5~30 mm 不等,有时达到 50 mm。黄铁矿变斑晶与磁黄铁矿的边界多数平直,而与球粒石英及含水脉石的边界则往往呈港湾状,表明这是黄铁矿变斑晶生长受阻或受后期蚀变所致。变斑晶可包括有磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、黑云母及球粒石英。黄铁矿变斑晶的变形主要表现为适度的碎裂变形,其裂缝中常充填再活化的黄铜矿,其次为磁黄铁矿和闪锌矿。这些结构说明至少有一部分黄铁矿立方晶体是在退变质过程中形成的,所需的硫可能部分来自降温所致的磁黄铁矿脱硫反应^[21,22]。然而,有些矿石中黄铁矿变斑晶体积分数可超过 10%,仅靠磁黄铁矿脱硫尚不能提供形成全部变斑晶所需的硫。这是因为,实验表明,在 743 °C 时与黄铁矿平衡的六方磁黄铁矿最高含硫量为 55.1 atm %^[23],而自然界中六方磁黄铁矿的含硫量最低限是 52 atm %^[24],故磁黄铁矿的脱硫作用只能提供不足 3.5 atm %的硫,这表明矿石中原先可能含有一定的沉积黄铁矿,它们在进变质过程中发生了重结晶,而在以后的退变质过程中又发生过增

生。此外,在有些闪锌矿矿石中,等粒状的五角十二面体黄铁矿体积分数超过 50%,也可能是由原先沉积的黄铁矿进变质重结晶而成的。

矿床中还存在由退变质热液交代而成的另一世代黄铁矿。进变质的黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿,甚至退变质的黄铁矿斑晶均可被磁铁矿交代,并伴有黄铁矿的生成(图 2B)。后世代的黄铁矿以细粒(<0.5 mm)立方体为特征,其硫为被交代的硫化物在氧化过程中释放的产物。

2.2 磁黄铁矿

磁黄铁矿在块状硫化物矿石中占矿物体积总量的 20%~80%,并主要产在基质中,粒径 2~5 mm,偶达 10 mm。绝大多数磁黄铁矿因重结晶或初始退火作用而拥有平直的颗粒边界,而局部呈现的三晶嵌接结构或泡沫结构(foam textures)指示退火已达平衡^[25,26]。大部分磁黄铁矿的变形特征因重结晶而已消失,但局部仍可见叠加的变形双晶、条带、膝折和亚颗粒。定向排列的长条状磁黄铁矿颗粒可能是在原有膝折基础上重结晶的产物^[25]。显微镜下可见退火的磁黄铁矿被长柱状硅线石切割,有时被切割成光性连续的岛弧。黄铁矿变斑晶中常可见到磁黄铁矿包裹体,两者之间的边界既可以是平直的,也可以是弯曲的。相反,在磁黄铁矿颗粒中却未见过黄铁矿包裹体或是交代残余。此外,黄铁矿变斑晶与磁黄铁矿的界面几乎总是平直的,表明黄铁矿的晶体生长力强于磁黄铁矿^[21]。在磁黄铁矿上涂抹磁性胶体后发现,块状矿石的磁黄铁矿几乎全是单纯的六方变体,表明强烈的变质退火已使单斜出溶叶片发生了均匀化^[27]。这些结构说明矿石中的磁黄铁矿主要是同生沉积后变质重结晶的产物。

红透山块状硫化物矿石中也可见到另一个世代的磁黄铁矿,它们港湾状交代黄铁矿变斑晶或其它硫化物,或直接充填矿石裂隙。与挪威的块状硫化物矿床一样,该世代的磁黄铁矿为六方变体与大量单斜出溶叶片的交生体^[27]。隋延辉^[28]也在红透山矿床切穿块状矿石的矿脉中发现磁黄铁矿含大量单斜变体。当磁铁矿交代先存的各种硫化物(如磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿)时,可形成磁黄铁矿与磁铁矿的后成合晶(图 2B)。合晶中的细小板状磁黄铁矿呈无定向排列,其光性方位与交代残留的磁黄铁矿并不连续,说明这种细粒的磁黄铁矿不是原有磁黄铁矿的交代残余,而是交代过程中的新生矿物相。

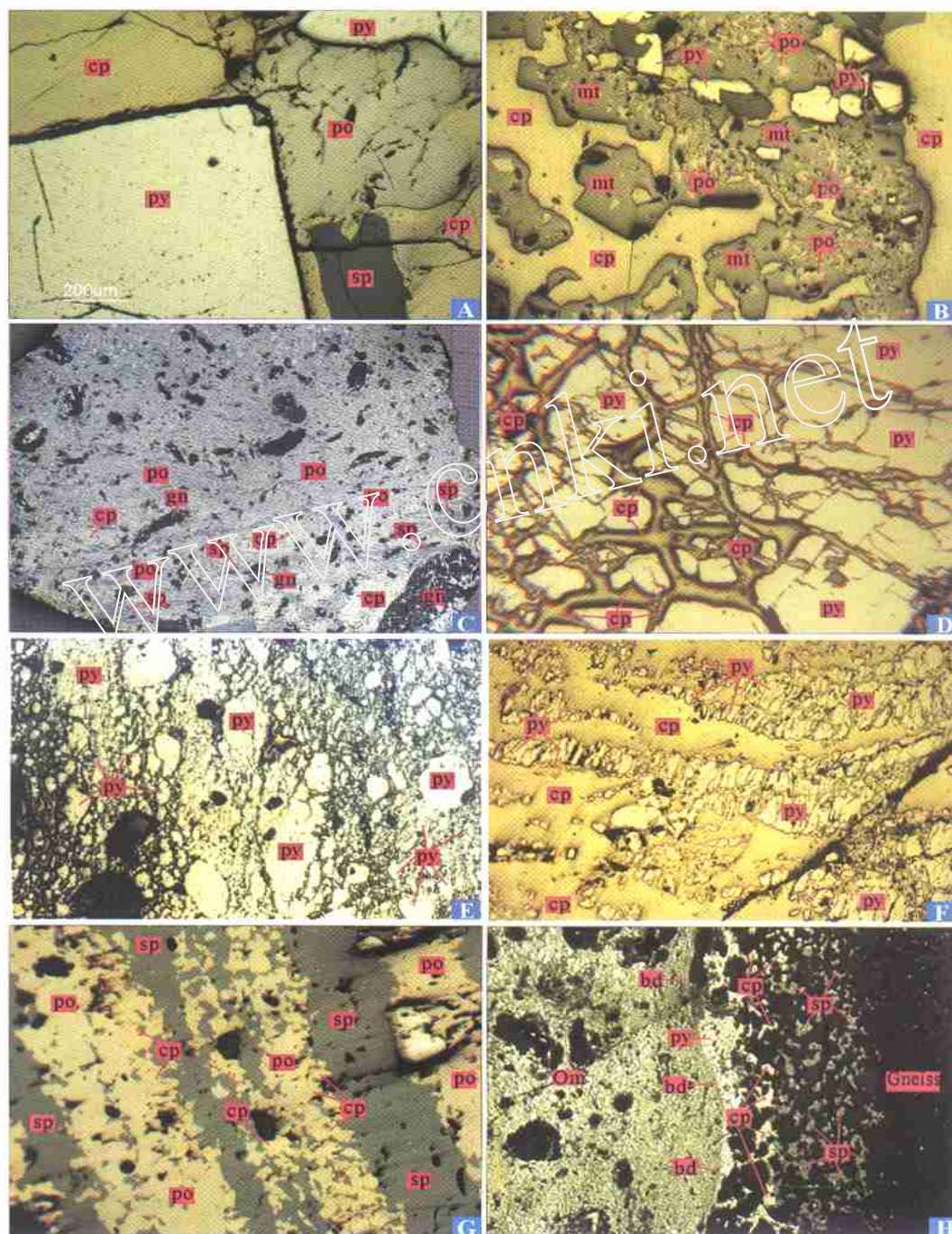


图2 红透山矿区块状矿石和矿石糜棱岩结构、构造照片

Fig. 2 Photomicrographs for structures and microtextures of massive sulphide ores and ore mylonites from the Hongtoushan deposit

A—块状硫化物矿石中的自形黄铁矿变斑晶(py),以及基质中的黄铜矿(cp)、磁黄铁矿(po)和闪锌矿(sp)。平面反射光,视域宽1 mm。
B—块状矿石中黄铜矿(cp)被磁铁矿(mt)与磁黄铁矿(po)的后成合晶交代,并生成黄铁矿(py)。平面反射光,视域宽0.9 mm。
C—矿石糜棱岩手标本磨光面,主要由细粒化的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿和脉石(gn)组成。下部条带代表剪切面理。cp为黄铜矿;po为磁黄铁矿;sp为闪锌矿;gn为脉石。上方白色细点为黄铁矿;右下方的脉石裂隙被硫化物充填。照片宽75 mm。
D—矿石糜棱岩黄铁矿(py)碎斑中的黄铜矿(cp)脉,部分脉的两壁不能拼合,应为流体交代成因。平面反射光,视域宽1 mm。
E—矿石糜棱岩中定向排列的黄铁矿(py)碎斑,其形态呈透镜状,表明曾经发生过压溶和增生。碎斑的裂隙又被后期黄铁矿愈合,表明流体再活化。视域宽4 mm。
F—矿石糜棱岩黄铜矿(cp)基质中的黄铁矿碎斑(py)沿剪切方向呈书斜状排列。平面反射光,视域宽2.5 mm。
G—矿石糜棱岩中闪锌矿(sp)条带与磁黄铁矿(po)-黄铜矿(cp)条带相间排列。磁黄铁矿在正交偏光下具有退火平衡结构。照片C中光面的局部,平面反射光,视域宽1 mm。
H—片麻岩(Gneiss)在与矿石糜棱岩(Om)的接触界线附近被热液硫化物交代。自接触带往片麻岩方向,硫化物矿化呈现以黄铁矿(py)-黄铜矿(cp)-闪锌矿(sp)为顺序的分带,表明锌比铜扩散得更远。在黄铁矿带的左侧,片麻岩与矿石糜棱岩的界线(bd)清晰可辨。手标本磨光面,视域宽60 mm

2.3 黄铜矿

黄铜矿是红透山最主要的含铜矿物,在磁黄铁矿型块状硫化物矿石中的体积分数约占 5%~10%,一般呈小的团斑赋存于黄铁矿变斑晶的基质中,也可在黄铁矿斑晶中呈包裹体出现,说明它主要是海底喷流的原始产物。板条状黄铜矿的普遍出现指示了高于 557 °C 的峰期变质^[29,30],这一温度与赵印香^[18]推测的矿区变质温度一致。在显微镜下常见黄铁矿变斑晶碎裂后,其裂隙被塑性硫化物充填,尤以黄铜矿最为常见。有些黄铁矿变斑晶的碎块可很好地拼合,并且裂隙中的黄铜矿与碎斑外侧的黄铜矿相连,这种充填黄铜矿可以是固态再活化或塑性流动的产物,而裂隙的张开可能在一定程度上是由于黄铜矿的机械侵入。然而,在另外有些情况下,被黄铜矿充填的黄铁矿裂隙边界不可拼合,并且在黄铁矿碎斑旁侧也找不到与裂隙中黄铜矿相连的黄铜矿,这时用化学再活化来解释似乎比固态侵入机制更加合理^[9,21]。有时,黄铜矿可从外部交代黄铁矿,使之形成港湾状边界。光片中还常见再活化黄铜矿沿粗粒黑云母解理沉淀。这种黑云母与包含在黄铁矿变斑晶中的进变质黑云母相似,常呈弯曲状或具膝折构造。Cook 等^[31]报道过纳米比亚 Matchless 矿床块状硫化物矿石中黄铜矿充填黑云母解理的结构。

矿石中还发现黄铜矿小团斑被长 0.1~0.3 mm 的针状阳起石和片状黑云母交代。这种代表黄铜矿溶解的结构表明,在高绿片岩相退变质过程中铜发生过再活化,并表明上述化学再活化的铜至少有一部分来自于块状硫化物矿体内部。黄铜矿也可被后期的磁铁矿交代,此时形成的另一世代蠕虫状黄铜矿可与磁铁矿构成后成合晶。在与黄铁矿共存之处,黄铜矿总是优先被磁铁矿交代,表明黄铜矿比黄铁矿更易受到氧化性流体的影响。

虽然红透山块状硫化物矿床中的铜品位略低于锌,但黄铜矿却总比闪锌矿更易充填黄铁矿裂隙,也更易在黄铁矿颗粒上生长,这似乎与 Vokes 和 Craig^[26]对 Gressli 矿床矿石结构的解释相一致。这两位作者认为,在变质过程中黄铜矿比起闪锌矿来活动性更大。但是在本文作者看来,另一种可能性也值得考虑,即黄铜矿在黄铁矿颗粒上的优先增生是因为黄铁矿-黄铜矿界面自由能可能要低于黄铁矿-闪锌矿界面自由能,尽管目前尚无可靠的界面自由能的数据来佐证这一认识。

2.4 闪锌矿

闪锌矿在磁黄铁矿型块状硫化物矿石中的体积分数约占 5%~15%,而在闪锌矿型块状矿石中则可超过 20%。黄铁矿变斑晶中的大量闪锌矿包裹体表明闪锌矿也是进变质之前就已存在的同生沉积矿物相。闪锌矿在两种类型块状硫化物矿石中呈黑色集合体产于基质中。用 1:1 HNO₃ 侵蚀后可见闪锌矿粒径多为 0.1~0.5 mm,多数晶粒边界平直并发育规则的生长双晶,表明闪锌矿经历了进变质重结晶。

与其他块状硫化物矿床中的闪锌矿^[21,32~34]不同,红透山矿床中的闪锌矿缺乏微米级大小的黄铜矿“乳滴”,即所谓的黄铜矿“病毒”^[32],这可能是由于红透山的闪锌矿受到了“变质均匀化”^[35~37]的缘故。尽管如此,在后期黄铜矿交代或穿插闪锌矿之处仍可见到较典型的黄铜矿“疾病”,这与 Vokes 和 Craig^[26]对 Gressli 矿区矿石的描述一致。

2.5 银金矿和方铅矿

块状硫化物矿石中的金和银主要呈银金矿产出。刘连登等(1994)^[13]所做的 5 粒银金矿的电子探针分析获得的金质量分数变化范围为 52.34%~70.28%,平均质量分数 61.47%。大多数银金矿在硫化物(如黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿)和脉石矿物中呈包裹体出现,粒径在 0.001~0.02 mm 之间。

方铅矿仅在少数样品中见到,通常呈他形,粒径 <0.5 mm。在切穿块状矿石的一条石英-硫化物脉中肉眼也见到了方铅矿。除了黄铁矿和黄铜矿,方铅矿是这条脉的重要组成矿物,但脉中没有闪锌矿。与红透山块状硫化物矿石中较高的锌/铅比值相反,这条脉贫锌富铅,表明脉中的金属很可能主要来源于矿床以外。此外,方铅矿平直的劈理和弯曲的颗粒边界表明它既没有经历显著的变形也没有发生退火,这条脉很可能是后构造的产物。

3 矿石糜棱岩

3.1 分布及结构

在红透山矿区内,有多达 30 多条矿石糜棱岩带,主要产在块状硫化物主矿体内部(图 3),个别产在紧邻矿体的围岩中。主矿体内部的矿石糜棱岩带长 2~30 m,宽 0.1~1.5 m,厚 2~30 m,多数平行或近于平行块状硫化物矿层(图 3),矿石糜棱岩带与长英质变质岩的边界清晰,但与毗邻的块状硫化物

矿石呈渐变关系。

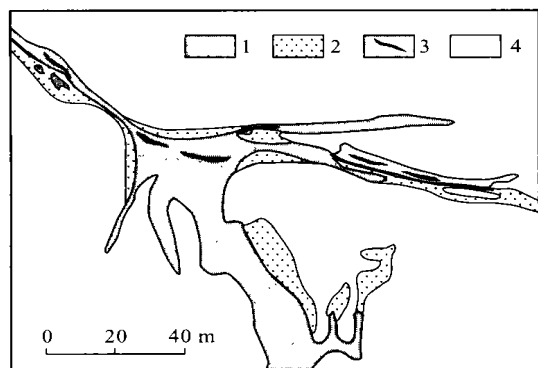


图3 红透山矿床 - 227m 中段矿石糜棱岩带分布图

Fig. 3 Distribution of ore mylonites at Level - 227m of the Hongtoushan deposit

1—块状硫化物矿石; 2—浸染状矿石; 3—矿石糜棱岩;
4—新太古代斜长角闪岩、片麻岩和变粒岩

糜棱岩带中的各种矿物均遭受了强烈的剪切变形(图 2C), 原有的球粒石英和长石被剪切拉长。就显微镜下所见, 被剪切成交状或拔丝状的石英其实是由动态重结晶或静态退火的细小颗粒组成的。斜长石则几乎已被细粒钠长石和绿泥石彻底地交代。

各种硫化物的差异流变十分明显。脆性较强的黄铁矿以碎裂变形和碎斑结构为特征(图 2D)。碎斑的裂隙常被黄铜矿充填, 而闪锌矿和其它矿物则甚少。在有些碎斑中如将所充填的黄铜矿移去, 裂隙两侧无法拼合(图 2D), 表明所充填的铜主要以热液方式带入, 因此发生了两侧黄铁矿的溶蚀。有些黄铁矿碎斑的透镜状形态可能意味着这些碎斑曾经发生过压溶(图 2E)^[38], 黄铁矿的裂隙可被再活化而来的黄铁矿愈合(图 2E)。

黄铁矿斑晶受到剪切时可形成一组剪张性裂隙, 这些裂隙将黄铁矿切割成一些菱形或近矩形的书斜状碎块(图 2F), 进一步剪切时塑性矿物黄铜矿和磁黄铁矿可沿这些裂隙挤入, 使黄铁矿碎块沿剪切方向分散排列(图 2F)。在单向位移的情况下, 各碎块间的关系尚可恢复, 但如果伴随强烈的位移并发生旋转, 则碎块可被磨圆并互不相连地散布于塑性基质中, 此时碎块间的关系就很难恢复, 有时甚至会被误认为是原来的细粒黄铁矿晶体。有些较大的黄铁矿碎斑具同心环状裂纹, 边界外侧还可存在一圈微细粒的被碾脱的碎屑, 这种结构表明黄铁矿颗粒在变形过程中曾发生过旋转^[9, 39]。黄铁矿斑晶的碎裂和细粒化促进了颗粒边界滑移的发生, 因而也

大大促进了矿石的韧性剪切^[40, 41]。未见到变形黄铁矿的显著退火现象。

糜棱岩化矿石中基质矿物粒径多小于 0.1 mm, 这与块状矿石中超过 1mm 的矿物颗粒形成了鲜明对照。磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿作为主要的基质组成矿物在剪切变形过程中表现出较强的塑性。强烈的拉伸使得这些矿物排列成相间的条纹(图 2G)。有时, 相对脆性的闪锌矿被塑性黄铜矿包围, 并被剪切成交平的透镜状。剪切变形后的退火形成了细小而无应变的磁黄铁矿颗粒以及平直的闪锌矿聚片双晶。退火后的磁黄铁矿几乎全是单纯的六方变体, 缺乏单斜叶片交生。

由于磁黄铁矿和黄铁矿的退火在温度分别高于 450 和 550 时才显著^[9], 而糜棱岩带中只存在磁黄铁矿的退火结构而缺乏黄铁矿的退火结构, 因此推断矿石糜棱岩的退火发生在 450 ~ 550 之间。在这一温度下, 磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿已表现出足够的塑性, 而黄铁矿仍以脆性变形为主^[38, 42, 43]。

一块采自 - 707 m 采掘面的标本同时包含有矿石糜棱岩及其围岩, 两者接触界线清晰。接触部位的片麻岩具有清晰的硫化物矿化分带(图 2H), 从矿石糜棱岩-片麻岩边界往外, 可以依次分出黄铁矿带、黄铜矿带和闪锌矿带, 这种分带显然是矿石糜棱岩的流体在向片麻岩渗透过程中不同硫化物先后沉淀的产物。

3.2 成矿元素含量

金、银、铜、铅、锌含量在有色总公司江苏地质勘探局 814 队实验室用 WFX-1E2 型原子吸收分光光度计测定, 采用空气-乙炔火焰气灯扣除背景。金的测定采用活性炭吸附原子吸收法; 银、铅和锌采用王水介质火焰法。

表 1 的测定结果表明, 红透山块状硫化物矿石 6 个样品铜、金、银的平均质量分数分别为 2.08 %, 0.35 g/t 和 51.33 g/t, 而矿石糜棱岩 5 个样品的平均质量分数则高达 11.00 %, 1.74 g/t 和 235.2 g/t。与未受剪切的块状矿石相比, 矿石糜棱岩中的铜、金和银分别富集了 5.3, 5.0 和 4.6 倍, 而铅和锌并未发生显著富集, $w(\text{Ag})/w(\text{Au})$ 值亦无显著变化。对矿石糜棱岩 HT-91 样品进行显微镜观察后发现, 几乎所有的闪锌矿都发生了剪切变形, 这表明此样品中异常高的锌质量分数(9.61 %)主要是因为继承了剪切之前块状矿石所具有的高锌含量。

矿石糜棱岩中铜、金和银的富集也与红透山矿

表 1 红透山块状硫化物矿石和矿石糜棱岩成矿元素含量分析结果

Table 1 Analyses for metals of massive sulphide ores and ore mylonites from Hongtoushan

岩性	样品号	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Zn})/\%$	$w_B/(\text{g t}^{-1})$		$w(\text{Ag})/w(\text{Au})$
					Au	Ag	
块状硫化物	HTF-50	1.82	173	0.79	0.23	54	234.8
	HTF-66	1.49	190	2.20	0.07	38	542.9
	HTF-68	2.17	226	1.48	0.64	50	78.1
	HTF-77	2.10	154	2.54	0.20	50	250.0
	HTF-85	0.86	143	2.21	0.58	22	37.9
	HTF-216	4.06	328	2.84	0.36	94	261.1
	平均	2.08	202.33	2.01	0.35	51.33	146.7
矿石糜棱岩	HTF-5	16.43	48	1.01	1.23	337	274.0
	HTF-9	7.65	156	1.30	0.69	164	237.7
	HTF-16	15.84	37	3.46	0.97	278	286.6
	HTF-90	12.58	435	2.86	2.65	303	114.3
	HTF-91	2.52	249	9.61	3.15	94	29.8
	平均	11.00	185	3.65	1.74	235.2	135.2
富集系数		5.3	0.9	1.8	5.0	4.6	

注: 富集系数 = 矿石糜棱岩中的金属含量/块状硫化物矿石中的金属含量。

区的采矿纪录基本一致。该记录表明,糜棱岩带的平均金属品位(质量分数)为铜 15.20%,金 1.54 g/t,银 231.40 g/t,远远高于块状硫化物矿石中的铜 3.69%,金 0.46 g/t 和银 59.96 g/t。

3.3 铅同位素组成

红透山矿床铅同位素测定在内生金属矿床成矿作用国家重点实验室(南京大学)完成,实验仪器是 Finnigan 公司的 TRITON TI 型热电离质谱仪。测定结果如表 2 所示。

表 2 块状硫化物矿石和矿石糜棱岩的铅同位素分析结果

Table 2 Lead isotope compositions of massive sulphide ores and ore mylonites

矿石类型	样品号	$N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	误差	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	误差	$N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	误差
块状矿石	HTF-50	13.648 5	±5	14.613 7	±6	33.728 8	±15
	HTF-66	13.634 3	±26	14.625 1	±38	33.738 6	±115
	HTF-68	13.620 9	±4	14.594 6	±4	33.641 8	±10
	HTF-77	13.582 9	±2	14.521 1	±2	33.421 9	±6
	HTF-85	13.593 5	±2	14.519 9	±3	33.427 2	±8
	HTF-216	13.609 6	±3	14.571 8	±4	33.571 9	±9
	平均	13.600 0	±3	14.560 0	±4	33.500 0	±10
矿石糜棱岩	HTF-5	14.294 0	±3	14.707 9	±3	34.228 5	±10
	HTF-9	13.584 0	±2	14.524 9	±3	33.432 4	±9
	HTF-16	14.050 5	±2	14.617 4	±3	34.140 0	±9
	HTF-90	13.780 1	±5	14.590 2	±7	33.704 1	±22
	HTF-91	13.580 3	±3	14.510 6	±3	33.389 4	±8
	HTF-228	13.753 1	±2	14.550 7	±3	33.648 4	±7
	平均	13.700 0	±3	14.580 0	±4	33.600 0	±10

红透山矿区块状硫化物矿石铅同位素组成变化范围甚小, $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 13.58 \sim 13.65$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 14.52 \sim 14.63$, $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 33.42 \sim 33.74$, 并且其数值在 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) - N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 和 $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) - N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 图解(图 4A、B)上的投影呈明显的线性排列,且离散度较小。这些特征似乎表明块状矿石中的铅来自两个同位素组成差别不大的源区,这两个源区的铅发生了不同程度的混合。相比较而言,矿石糜棱岩铅同位素组成变化范围较大,为 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 13.58 \sim 14.29$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 14.51 \sim 14.71$, $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 33.39 \sim 34.23$, 在图解中总体上位于块状矿石趋势线的右侧和右上方,但其最低放射性铅与块状矿石几乎重合(图 3)。这些特征表明,矿石糜棱岩中的铅可能是另一个源区与块状矿石趋势线中不同组成铅发生混合的产物。基于矿床的形成和演化历史似可推测,两类矿石的最低放射性铅可能代表了太古宙喷流沉积物的同位素组成,块状矿石趋势线的上端可能代表了变质过程中外来铅的同位素组成,而矿石糜棱岩的各投影点则代表了上述两类铅与富矿体形成过程中从块状硫化物矿层以外带入的铅的三元混合。由于原有块状硫化物矿石的铅元素含量和放射性铅比值均甚低,因此即便外来铅微量加入,也能显著地改变矿石糜棱岩的铅同位素组成。这种

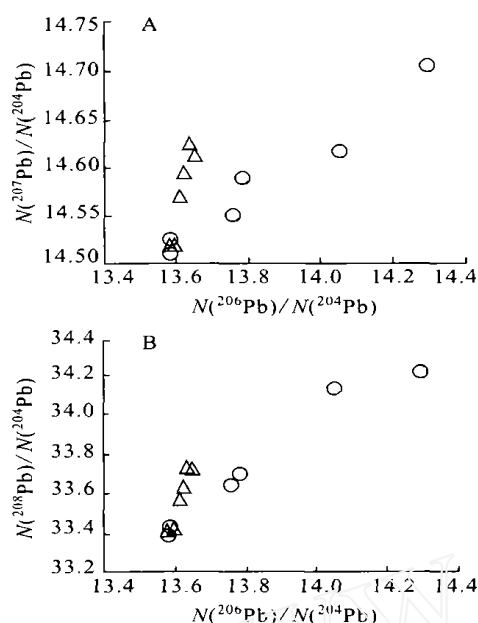


图4 块状矿石和矿石糜棱岩铅同位素组成投影图

Fig. 4 The variations in lead isotope compositions of the massive ores and ore mylonites from the Hongtoushan deposit
—块状矿石; ○—矿石糜棱岩

外来铅放射性较高,其源区很可能是赋矿的变质岩系,而其进入矿石糜棱岩的机制应当是流体搬运而不是固态差异再活化。

4 矿石糜棱岩铜-金富集机制

前人认为^[12,13],红透山富矿体的形成是固态再活化的产物,而这种再活化是由原始块状矿石中不同硫化物矿物塑性流动性的差异所引起的。事实上,并非所有的富矿体均由“塑性”硫化物组成,在有些矿石糜棱岩中,强干性的黄铁矿甚至可占矿石矿物体积总量的50%以上,这样的事实表明差异塑性流动并不是一种令人信服的成矿机制。相反,矿石糜棱岩的如下特征指示了成矿物质的流体再活化:

(1) 富矿带与周围的块状硫化物矿石之间并无明显的成分突变,而如果是固体物质的贯入,则应该存在突变界线^[9]; (2) 脆性黄铁矿碎斑变成透镜状可能表明在富矿体形成过程中曾伴有压溶和增生作用^[38,43,44]; (3) 富矿体中发生过强烈的热液蚀变,如石榴石化、角闪石化、阳起石化、绿帘石化、斜黝帘石化、黑云母化、绢云母化、钠长石化、碳酸盐化和硅酸盐化等。这些交代产物以及交代成因角闪石的蓝色多色性表明热液蚀变发生于由角闪岩相向绿片岩相转变的退变质环境^[45]; (4) 黄铜矿沿裂隙或颗粒边

缘交代黄铁矿变斑晶、毒砂或造岩矿物碎块的结构比比皆是,表明流体沉淀是铜的重要富集方式; (5) 在矿石糜棱岩中,黄铁矿碎斑的裂隙不仅可被黄铜矿愈合,还可被后期的黄铁矿愈合,表明黄铁矿也有一部分是从流体中沉淀下来的; (6) 与强烈变形的黄铁矿形成鲜明对照的是,在显微镜下,矩形的银金矿和菱形毒砂自形晶断面常完好保存而无显著变形痕迹,表明这两种矿物均形成于糜棱岩化之后; (7) 充填糜棱岩化后形成的毒砂裂隙的银金矿应当是流体沉淀的产物; (8) 矿石糜棱岩铅同位素组成与块状矿石有显著差异; (9) 紧邻矿石糜棱岩的片麻岩受到黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿明显交代并出现硫化物矿化分带。基于上述证据,作者认为红透山矿区富矿体是矿石糜棱岩带受再活化流体叠加的产物。

块状硫化物矿石在韧性剪切后的糜棱岩化是形成富矿体的先决条件,而成矿金属在糜棱岩带中的高度富集可归因于以下几种机制: (1) 作为块状矿石中最主要的脉石矿物,石英比一般的硫化物矿物更易发生压溶^[38,46~48],剪切作用使得该矿物优先溶解,从而造成矿石糜棱岩中金属的相对富集^[49,50]; (2) 矿石剪切后孔隙率增高,促进了流体的渗透^[51~53]。大量强干性黄铁矿碎斑之间的孔隙互相连通,更有利于流体的运移和聚集^[54],并为成矿金属的沉积提供了场所; (3) 由破碎和重结晶造成的细粒化增加了硫化物矿物表面自由能,从而加快了化学反应和增生速率。笔者^[49]曾经指出,黄铁矿是黄铜矿增生的“青睐场所”。华明等^[55]将黄铁矿置于氯化铜溶液中,使之在450 °C的条件下反应,其结果在黄铁矿颗粒表面上增生了铜的硫化物微粒。前人早就注意到了硫化物在金的沉积中所起的重要作用^[56~58]。Hyland和Bancroft^[59]的实验表明硫化物能将溶液中金的络合物还原成单质金。张世柏等^[60]的实验也证实了强烈破碎的黄铁矿是金的强吸附剂。

由于富矿体主要分布于块状硫化物矿体内部及其毗邻地带,同时,富矿体的金属组分与块状矿石相似,均以富含铜、金、银、锌而贫铅为特征,故可推测叠加于矿石糜棱岩的成矿金属可能主要来源于周围的块状硫化物矿石。但是铅同位素表明,可能还有一部分金属来自赋矿的变质岩系。

5 结论与讨论

红透山块状硫化物矿石在沉积以后经历了强烈

的变形、变质、重结晶和成矿金属再活化。沉积的硫化物包括黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和银金矿。与其他太古宙的块状硫化物矿床类似,方铅矿在该矿床中仅局部出现。矿石中现今所见的石英和长石很可能代表了沉积的硅和火山物质。然而,与其他地区经过强烈变质的块状硫化物矿床一样^[21, 27, 39, 61, 62],红透山矿区的进变质作用造成了沉积硫化物的强烈重结晶和退火,沉积结构绝大部分已被消除,闪锌矿中的黄铜矿“病毒”已发生粗化,六方磁黄铁矿中的单斜磁黄铁矿叶片已被均匀化。退变质作用可能始于磁黄铁矿中硫的出溶以及黄铁矿变斑晶的形成。矿石进一步的变形促进了退变质退火的发生。与峰期变质时发生的整个矿床尺度的退火相比,退变质退火仅在局部发生,并且只形成细小的平衡颗粒^[63]。红透山矿床的矿石糜棱岩仅孤立地呈带状分布,其中变形矿物的退火远不如块状矿石中来得强烈。伴生的脉石以绿片岩相矿物组合为特征,因此可以推测矿石糜棱岩及由此派生的富矿体是退变质过程的产物。

广泛的再活化可发生在矿床的整个变质过程中,而进变质和退变质过程的再活化特征却显著有别。进变质过程中可发生强烈的机械再活化及流体的长距离运移,矿床中峰期变质以前的化学再活化产物几乎没有保留,说明大量溶解的组分被流体转移到了矿床外围。即使在变质早期有一定量的金属卸载于矿体内部,但随着温度和压力的升高,它们将发生进一步再活化,并且以孔隙渗透或沿通道运移等方式,向矿体之外温、压较低的低变质相区域转移^[54, 64]。红透山矿区外围若干太古宙热液金矿化^[13, 16, 65],其中的一部分金可能来源于块状硫化物矿体中成矿物质的远程再活化。这一点与前人研究结果一致,即变质热液化学再活化的距离可达数 km^[66]。在变质峰期之后的低温阶段,固态再活化已不再重要,然而由于岩石、矿石本身的体积收缩和裂隙开放,化学再活化仍十分活跃。同时,退变质再活化产物在后期地质过程中能相对地保持稳定,故可很好地被保存下来。红透山矿区退变质矿石糜棱岩的叠加成矿组分不仅来自先存的块状硫化物矿体,还有一部分可能来自矿床周围的变质围岩。该矿床中有许多切穿块状矿石的未变质的含硫化物石英脉,这些脉大多宽几 cm,是再活化流体沿通道运移(channelized fluid flow)^[54]的产物。此外,遍见于矿床各处的各种显微镜尺度的交代结构表明渗透式流体

运移(pervasive fluid flow)^[54]也是退变质再活化的一种重要机制。矿石中丰富多样的结构同时记录了再活化的起点和终点:表征铜和锌退变质再活化起点的典型结构是黄铜矿和闪锌矿被黑云母和阳起石交代,黄铜矿被磁铁矿、磁黄铁矿和黄铁矿组合交代;最能代表铜、锌退变质再活化终点的结构是黄铜矿和闪锌矿沿黄铁矿变斑晶裂隙充填以及黄铜矿在黄铁矿上的增生。闪锌矿中的黄铜矿“疾病”则既代表了锌的再活化起点也代表了铜的再活化终点;红透山矿床中的矿石糜棱岩同样代表了铜、金和银的再活化终点。上文曾提到,磁铁矿常与黄铁矿和磁黄铁矿形成后成合晶,这种结构指示了接近三相平衡的条件^[67]。这种后成合晶普遍交代先存硫化物也表明,退变质后期再活化流体具有氧逸度和酸度增大的演化趋势。

红透山铜-金富矿体是退变质韧性剪切所形成的矿石糜棱岩受后期流体叠加的产物。该矿区的块状硫化物矿石中含有大量强干性较弱的硫化物,如磁黄铁矿和黄铜矿,这些矿物在不到 300 °C 时的塑性就足以启动韧性剪切^[9, 42]。但是,矿石糜棱岩分布的局部性却表明了韧性剪切成核的局部性,其规模的大小不一则说明了这些剪切带处于不同的生长阶段^[68, 69]。剪切带的成核既可以发生在流体局部聚集之处^[68],也可以发生在先存的破裂部位^[70~72],而流体则是促进剪切带生长的重要因素,即使在后一种情况下也是如此。这是因为流体的存在可促使岩石含水弱化(hydraulic weakening)^[69, 73, 74]、颗粒边界滑动^[9, 25, 44]、压溶^[38, 75, 76]和含水蚀变矿物的生成^[53, 77, 78]。剪切造成的细粒化反过来又会造成流体的进一步汇聚及其与变形矿物的反应^[79, 80]。因此,红透山矿石糜棱岩的形成可能是一个退变质变形、流体注入和化学反应等一系列作用不断反馈的复杂过程,这种反馈一直持续到再活化流体所析出的铜、金和银等金属将矿石糜棱岩孔隙完全堵塞为止。叠加的金属不仅来自邻近的块状硫化物矿石,还有一部分来自矿床外围的变质围岩,这说明规模如此小的韧性剪切带也是一个足够开放的体系。

References[参考文献]:

- [1] RAMSAY J. G., GRAHAM R. H. Strain variation in shear belts[J]. *Can J. Earth Sci.*, 1970, 7: 789-813.
- [2] KERRICH R., ALLISON I. Vein geometry and hydrostatics during

- Yellowknife mineralization[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1978, 15: 1653-1660.
- [3] POULSEN K H, ROBERT F. Shear zones and gold: Practical examples from the Southern Canadian Shield[A]. BURNALL J T. *Mineralization in Shear Zones*[C]. Montréal: Geological Association of Canada Short Course Notes, 1989, 6: 239-266.
- [4] KERRICH R. Geodynamic setting and hydraulic regimes: Shear zone hosted mesothermal gold deposits[A]. BURNALL J T. *Mineralization and Shear Zones*[C]. Montréal: Geol Ass Can, Short Course Notes, 1989. 89-128.
- [5] EISENLOHR B N, GROVES D I, PARTINGTON G A. Crustal-scale shear zones and their significance to Archaean gold mineralization in Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1989, 24: 1-8.
- [6] CHEN Yanjing, FU Shigu. *Gold Mineralization in West Henan*[M]. Beijing: Chinese Seismological Press, 1992. 1-234 (in Chinese).
[陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 1-234.]
- [7] ZHANG Lianchang, SHEN Yuanchao, JI Jinsheng. Characteristics and genesis of Kanggur gold deposit in the eastern Tianshan mountains, NW China: Evidence from geology, isotope distribution and chronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23: 71-90.
- [8] PIRAJNO F, THOMASSEN B, DAWES P R. Copper-gold occurrences in the Palaeoproterozoic Inglefield mobile belt, northwest Greenland: A new mineralization style[J]? *Ore Geology Reviews*, 2003, 22: 225-249.
- [9] MARSHALL B, GILLIGAN L B. Durchbewegung structures, piercement cusps, and piercement veins in massive sulphide deposits: Formation and interpretation[J]. *Econ Geol*, 1989, 84: 2311-2319.
- [10] LYDON U W, PAAKKI J J, ANDERSON H E, et al. An overview of the geology and geochemistry of the Sullivan deposit[A]. LYDON J W, H Y T H, SLACK J F, et al. *The Geological Environment of the Sullivan Deposit*, British Columbia[M]. Geological association of Canada, mineral deposits division, (Special Publication 1) 2000: 505-522.
- [11] DUCKWORTH R C, RICKARD D. Sulphide mylonites from the Renström VMS deposit, Northern Sweden[J]. *Mineral Mag*, 1993, 57: 83-92.
- [12] ZHANG Qiusheng, LI Shouyi, LIU Liandeng. *Geology and Metallogeny of the Early Precambrian in China*[M]. Changchun: Jilin People's Publishing House, 1984. 1-536 (in Chinese).
[张秋生, 李守义, 刘连登. 中国早前寒武纪地质及成矿作用[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1984. 1-536.]
- [13] LIU Liandeng, ZHU Yongzheng, DAI Shibing. Relationships between gold deposits and ductile shear zones and overprint structures[A]. ZHANG Yixia, LIU Liandeng. *Precambrian Ore Deposits and Tectonics in China*[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1994. 39-77.
[刘连登, 朱永正, 戴仕炳. 金矿与韧性剪切带及叠加构造[A]. 张贻侠, 刘连登. 中国前寒武纪矿床和构造[M]. 北京: 地震出版社, 1994. 39-77.]
- [14] SUN Haitian. A general review of volcanogenic massive sulphide deposit in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 1992, 7: 43-71.
- [15] SHEN Baofeng, PENG Xiaoliang, LUO Hui. Archaean greenstone belts and related ore deposits in the North China platform [A]. ZHANG Yixia, LIU Liandeng. *Precambrian Ore Deposits and Tectonics in China*[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1994. 1-38 (in Chinese).
[沈保丰, 彭晓亮, 骆辉. 华北地台太古宙绿岩带及矿床[A]. 中国前寒武纪矿床和构造[M]. 北京: 地震出版社, 1994. 1-38.]
- [16] LI Junjian, SHEN Baofeng, LI Shuangbao, et al. *The Geology and Gold Mineralization of the Greenstone Belts in Qingyuan-Jiapigou Region, China*[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1995. 1-132 (in Chinese).
[李俊建, 沈保丰, 李双保, 等. 清原-夹皮沟绿岩带地质及金的成矿作用[M]. 天津科学技术出版社, 1995. 1-132.]
- [17] DENG Gongquan. Base metal deposit of the Liaodong-Jinan terrane [A]. RUI Zongyao, SHI Lindao, FANG Ruheng. *Geology of Nonferrous Metallic Deposits in Northern Margin of the North China Landmass and Adjacent Areas*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 25-52 (in Chinese).
[邓功全. 辽北-吉南太古宙地体有色金属矿床[A]. 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 25-52.]
- [18] ZHAO Yinxian, CUI Wenyuan. Mineralogy and *p-T* conditions of crystallization of Archaean metamorphic complex from Qingyuan district, Liaoning Province [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1987 (Special Issue of Metamorphic Geology): 191-204 (in Chinese).
[赵印香, 崔文元. 辽宁清源地区太古宙变质杂岩的矿物学和结晶温压条件[J]. 长春地质学院学报, 1987 (变质地质学专辑): 191-204.]
- [19] YANG Zhensheng, YU Baoxiang. Poly-deformation of the Archaean greenstone belt in the Hongtoushan area, Northern Liaoning Province [J]. *Bulletin of Changchun College of Geology*, 1984(1): 20-35 (in Chinese).
[杨振声, 俞宝祥. 辽宁北部红透山地区太古宙绿岩带的多期变形[J]. 长春地质学院学报, 1984(1): 20-35.]
- [20] LU Wenjiang. Geology and Genesis of the Hongtoushan Copper-zinc deposit[J]. *Liaoning Nonferrous Metal Geology*, 1994(1): 1-11 (in Chinese).
[卢文江. 红透山铜锌矿床地质特征及矿床成因模式探讨[J]. 辽宁有色金属地质, 1994(1): 1-11.]
- [21] CRAIG J R, VOKES F, M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: An overview[J]. *Mineral Mag*, 1993, 57(1): 3-18.
- [22] GU Lianxing, TANG Xiaoqian, NI Pei, et al. Pyrrhotite textures and their genetic implications in the Hongtoushan Massive sulphide deposit, Liaoning Province, China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2001, 20(3): 210-217.
- [23] ARNOLD R G. Equilibrium relations between pyrrhotite and pyrite from 325 to 743 [J]. *Econ Geol*, 1962, 57: 72-90.
- [24] CARPENTER R H, DESBOROUGH B A. Range in solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite [J]. *Am*

- Min, 1964, 49: 1350-1365.
- [25] STANTON R L. *Ore Petrology* [M]. New York: McGraw-Hill, 1972. 713.
- [26] VOKES F M, CRAIG J R. Post-recrystallization mobilization phenomena in metamorphosed stratabound sulphide ores[J]. *Mineralogical Magazine*, 1993, 57(1): 19-28.
- [27] GU Lianxing, VOKES F M. Intergrowth of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in some sulphide ores from Norway[J]. *Mineral Mag*, 1996, 60:304-316.
- [28] SUI Yanhui. Study on plastic deformation of sulphides in Hunbei Archean massive sulphide deposits[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1990, 20(3): 277-286 (in Chinese). [隋延辉. 浑北太古宙块状硫化物矿床金属硫化物的塑性变形研究[J]. 长春地质学院学报, 1990, 20(3): 277-286.]
- [29] CABRIL J. New data on phase relation in the Cu-Fe-S system[J]. *Econ Geol*, 1973, 68: 443-454.
- [30] CABRIL J, SZYMANSKI J T, STEWART J M. On the transformation of cubanite[J]. *Can Mineral*, 1973, 12: 33-38.
- [31] COOK N J, KLEMD R, OKRUSCH M. Sulphide mineralogy, metamorphism and deformation in the matchless massive sulphide deposit, Namibia[J]. *Mineral Deposita*, 1994, 29: 1-15.
- [32] BARTON P B Jr. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan[J]. *Mining Geology*, 1978, 28: 293-300.
- [33] ELDRIDGE C S, BARTON P B, OHMOTO H. Mineral textures and their bearing on formation of the Kuroko orebodies[J]. *Econ Geol*, 1983 (Monograph), 5: 241-281.
- [34] GU Lianxing, ZHOU Bing, ZHANG Wenlan. Chalcopyrite intergrowths in sphalerite in the Meixian lead-zinc deposit, Fujian Province and their metallogenic significance[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1998, 17(4): 311-319.
- [35] CRAIG J R. Metamorphic features in Appalachian massive sulphides [J]. *Mineral Mag*, 1983, 47: 515-525.
- [36] ELDRIDGE C S, BOURCIER W L, OHMOTO H, et al. Hydrothermal inoculation and incubation of the chalcopyrite disease in sphalerite [J]. *Econ Geol*, 1988, 82: 978-989.
- [37] CRAIG J R. Textures of the ore minerals [A]. JAMBOR J L, VAUGHAN D J. *Advanced Microscopic Studies of Ore Minerals* [M]. Mineral Association of Canada, 1990, 17: 213-262.
- [38] GU Lianxing, McCLAY K R. Pyrite deformation in stratiform lead-zinc deposits of the Canadian Cordillera [J]. *Mineralium Deposita*, 1992, 27(3): 169-181.
- [39] VOKES F M. A review of the metamorphism of sulphide deposits [J]. *Earth Sci Rev*, 1969, 5: 99-143.
- [40] LIU Ruixun. *Geological Structures Under the Microscope* [M]. Beijing: Publishing House of Peking University, 1988. 1-235 (in Chinese). [刘瑞. 显微构造地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1988. 1-235.]
- [41] KERRICH R. Geodynamic setting and hydraulic regimes: shear zone hosted mesothermal gold deposits [A]. BURNSALL J T. *Mineralization and Shear Zones* [M]. *Geol Ass Can, Short Course Notes*, 1989. 89-128.
- [42] CLARK B R, KELLY W. Sulfide deformation studies: I. Experimental deformation of pyrrhotite and sphalerite to 2 000 bars and 500 [J]. *Economic Geology*, 1973, 68: 332-352.
- [43] McCLAY K R, ELLIS P G. Deformation and recrystallization of pyrite [J]. *Mineralogical Magazine*, 1983, 47: 527-538.
- [44] COX S F. Flow mechanisms in sulphide minerals [J]. *Ore Geology Review*. 1987, 2(1-3): 133-171.
- [45] MIYASHIRO A. *Metamorphic Petrology* [M]. London: University College London Press, 1994. 1-404.
- [46] McCLAY K R. Deformation of stratiform lead-zinc deposits [A]. SANGSTER D F. *Sediment-Hosted stratiform Lead-Zinc Deposits* [C]. [s.l.]: Mineral Association of Canada, 1983, 8: 283-309.
- [47] SUN Yan, ZHANG Qinglong, YANG Shufeng. On the evolution of pressure solution [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1984 (1): 35-41 (in Chinese). [孙岩, 张庆龙, 杨树峰. 初论压溶的发育 [J]. 矿物学报, 1984(1): 35-41.]
- [48] WU Xueyi. *An Introduction to Tectono-geochemistry* [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1998. 1-416 (in Chinese). [吴学益. 构造地球化学导论 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1998. 1-416.]
- [49] GU Lianxing, McCLAY K R, ZHOU Jirong, et al. Pressure solution and overgrowth of sulphides in massive sulphide ores and their metallogenic significance [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(4): 323-330 (in Chinese). [顾连兴, McCLAY K R, 周继荣, 等. 块状硫化物矿石中硫化物的压溶和增生及成矿意义 [J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 323-330.]
- [50] WANG Henian, ZHANG Shouyun, YU Shoujun, et al. *Geology of the Gold Deposits in Ductile Shear Zones of the Cathaysian Block* [M]. Beijing: Science Press, 1992. 1-180 (in Chinese). [王鹤年, 张守韵, 俞受均, 等. 华夏地块韧性剪切带型金矿地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 1-180.]
- [51] BOULTER C A. The golden Mile, Kalgoolie: A giant gold deposit localized in ductile shear zone by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid [J]. *Econ Geol*, 1987, 82: 1661-1678.
- [52] CHEN Yanjing. Fluidization model for continental collision in special reference to study ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling Mountains, China [J]. *Progress in Natural Science*, 1998, 8(4): 385-393.
- [53] BURNSALL J T. Introduction: Review of mechanical principles, deformation mechanisms and shear zone rocks [A]. BURNSALL J T. *Mineralization and Shear Zones* [M]. *Montr  l: Geol Ass Can, Short Course Notes*, 1989. 1-28.
- [54] OLIVER N H S. Review and classification of structural controls on fluid flow during regional metamorphism [J]. *Metamorphic Geol*, 1996, 14: 477-492.
- [55] HUA Ming, XU Zhaoen, RAO Bing, et al. Geochemical simulation experiments of reaction between pyrite and CuCl₂ brine and surface mineralogy [J]. *J Nanjing University (Natural Sciences)*, 2004, 39 (in press) (in Chinese). [华明, 徐兆文, 饶冰, 等. 黄铁矿-

- CuCl_2 盐溶液反应地球化学模拟实验及表面矿物学研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2004, 39(待刊).]
- [56] RAMDOHR P. *The Ore Minerals and Their Intergrowth*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1969. 1-1174.
- [57] SEWARD T M. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems[A]. FOSTER R P. *GOLD 82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*[M]. Rotterdam: A A Balkema Press, 1984. 165-181.
- [58] BAO Zhenxiang. Gold-bearing features of pyrite, arsenopyrite and stibnite in gold deposits of the Jiangnan paleo-island arc[J]. *Gold Science and Technology*, 1993, 1(3): 40-47(in Chinese). [鲍振襄. 江南古岛弧带金矿床中黄铁矿-毒砂-辉锑矿含金性研究[J]. 黄金科学技术, 1993, 1(3): 40-47.]
- [59] HYLAND J M, BANCROFT G M. An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: Reducing agents [J]. *Geochim Cosmohim Acta*, 1989, 53: 367-372.
- [60] ZHANG Shibai, WU Daqing, XIE Xiande. An experimental study of adsorption of gold complexes by pyrite from different deposits[J]. *Geochimica*, 1996, 25(1): 84-92(in Chinese). [张世柏, 吴大清, 谢先德. 不同类型黄铁矿对金的吸附实验[J]. 地球化学, 1996, 25(1): 84-92.]
- [61] MARSHALL B, GILLIGAN L B. Remobilization, syntectonic processes and massive sulphide deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 1993, 8: 39-64.
- [62] COOK N J. Mineralogy of the sulphide deposits at Sulitjelma, northern Norway[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11: 303-338.
- [63] GU Lianxing, YIN Lin, VOKES F M. Intergrowths of monoclinic and hexagonal pyrrhotites and their genesis from massive sulphide deposits of Norway[J]. *Geological Journal of Universities*, 1995, 1(1): 80-92(in Chinese). [顾连兴, 尹琳, VOKES F M. 挪威块状硫化物矿床中单斜与六方磁黄铁矿的共生及其成因[J]. 高校地质学报, 1995, 1(1): 80-92.]
- [64] WOOD B J, WALTHER J V. Fluid flow during metamorphism and its implications for fluid-rock ratios[A]. WALTHER J V, WOOD B J. *Fluid-Rock Interactions During Metamorphism* [M]. New York: Springer, 1986. 89-108.
- [65] DAI Shibing. The genesis of gold deposit in South Longwangmiao synductile shear zone belt in Archean greenstone, North Liaoning, China [J]. *Bulletin of Changchun College of Geology*, 1993(3): 279-286(in Chinese). [戴仕炳. 辽北太古宙绿岩带南龙王庙同韧性剪切金矿床的成因[J]. 长春地质学院学报, 1993(3): 279-286.]
- [66] PLIMER I R. Remobilization in high-grade metamorphic environments [J]. *Ore Geology Reviews*, 1987, 2: 231-245.
- [67] GU Lianxing, ZHANG Wenlan, YIN Lin. Symplectite of pyrite and magnetite in the sulphide ore from Mashan, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1997, 6(4): 359-362.
- [68] CHRISTIANSEN P P, POLLARD D D. Nucleation, growth and structural development of mylonitic shear zones in granitic rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(9): 1159-1172.
- [69] INGLIS J, LAMOUREUX C, SOULA J C, et al. Nucleation of ductile shear zones in a granodiorite under greenschist facies conditions, N'ouvielle: Massif, Pyrenees, France[J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21: 555-576.
- [70] SEGALL P, SIMPSON C. Nucleation of ductile shear zones on dilatant fractures[J]. *Geology*, 1986, 14: 56-59.
- [71] GIBSON R G. Nucleation and growth of retrograde shear zones: an example from the Needle Mountains, Colorado, USA[J]. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12: 339-350.
- [72] TOURIGNY G, TREMBLAY A. Origin and incremental evolution of brittle/ductile shear zones in granitic rocks: Natural examples from the southern Abitibi Belt, Canada[J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 15-27.
- [73] GRIGGS D T, BLACIC J D. Quartz: Anomalous weakening of synthetic crystals[J]. *Science*, 1965, 147: 292-295.
- [74] KIRBY S H. Chemical effects of water on rock deformation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 3991-3995.
- [75] KERRICH R, ALLISON I. Pressure solution in shear zones, Yellowstone[J]. *J Geol Soc Lond*, 1977, 134: 74.
- [76] McCLAY K R. Pressure solution and Coble creep in rocks and minerals: A review[J]. *J Geol Soc Lond*, 1977, 134: 57-70.
- [77] XU Xuechun. Advances in the study of metamorphic fluids[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 1996, 3(3-4): 200-206(in Chinese). [徐学纯. 变质流体研究新进展[J]. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 200-206.]
- [78] ENGVIK A K, AUSTRHEIM H, ERAMBERT M. Interaction between fluid flow, fracturing and mineral growth during eclogitization, an example from the Sunnfjord area, Western Gneiss Region, Norway [J]. *Lithos*, 2001, 57: 111-141.
- [79] OLIVER N H S. Linking of regional and local hydrothermal systems in the mid-crust by shearing and faulting[J]. *Tectonophysics*, 2001, 335: 147-161.
- [80] MUSUMECI G. Sillimanite-bearing shear zones in syntectonic leucogranite: Fluid assisted brittle ductile deformation under amphibolite facies conditions[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(9): 1491-1505.

MECHANISMS OF Cu-Au ENRICHMENT IN ORE MYLONITES OF THE HONGTOUSHAN MASSIVE SULPHIDE DEPOSIT, LIAONING, NE CHINA

GU Lian-xing¹, TANG Xiao-qian¹, WU Chang-zhi¹, LU Jian-jun¹,
XIAO Xin-jian¹, ZHENG Yuan-chuan¹, NI Pei¹, TIAN Ze-man²

(1. State Key Laboratory of Endogenic Metal Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Hongtoushan Copper Ltd., Fushun 113321, China)

Abstract: The post metallogenic metamorphism of Hongtoushan Archean Cu-Zn massive sulphide deposit, Liaoning Province of NE China, belongs to upper amphibolite facies with three phases of deformations. Ore minerals in the deposit are dominated by pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite and sphalerite. There are more than 30 mylonite-type oreshoots found inside the main massive sulphide orebodies. Most of them run parallel or subparallel to the strike of the massive sulphide ore layers with only a few being developed in metamorphic rocks in the immediate vicinity of the sulphide orebodies. Almost all the sulphide minerals in the oreshoots have been affected by intense ductile shearing. Pyrite is characterized by cataclastic flow, while pyrrhotite, chalcopyrite and sphalerite exhibit strong plasticity. Cu, Au and Ag in ore mylonite are averaged in 11.00 wt %, 1.74 g/t and 235.2 g/t respectively. Compared to the massive sulphide ores, ore mylonites show remarkable enrichment of these elements with enrichment coefficients of 5.3, 5.0 and 4.6 respectively. The high enrichment of these ore-forming metals is basically due to the overprinting of late-stage fluids on ore mylonites. The composition of lead isotopes suggests that the metals in the ore mylonites were derived partly from the original massive ores, and partly from outside the massive ores. Both ductile shearing and fluid overprinting took place during retrograde metamorphism.

Key words: massive sulphide deposit; ore mylonite; ductile shear zone; remobilization; lead isotopes; Hongtoushan; Liaoning Province

利用氡含量研究皖北矿区深层地下水循环特征

桂和荣¹, 陈陆望², 宋晓梅¹

(1. 安徽理工大学 资环系, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院 岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

皖北矿区位于淮北平原的北部, 面积 30 000 km²。境内 800 ~ - 1 000 m) 延伸, 矿井重、特大型突水事故频繁发生。有皖北煤电集团和淮北矿业集团两个国家级特大型企业, 是 矿区内主要水源有四种: 新生界底部第四系含水层、二叠系华东地区重要的煤炭基地。矿区随着开采逐渐向深部 (- 煤系砂岩含水层、石炭系太原群灰岩含水层和奥陶系灰岩含

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金资助项目 (36); 安徽省自然科学基金资助项目 (00047109); 安徽省高校学科拔尖人才基金资助项目