



编号 1258-7106(2010)05-0853-16

四川省九龙县黑牛洞韧性剪切带型浸染状铜 矿石的特征及其矿床学意义^{*}

李建忠¹, 汪名杰¹, 王发清², 姚 鹏¹, 梁 鲸², 唐高林², 祝向平¹, 马国桃¹,
邹光富¹, 沈战武¹, 陈敏华¹, 李贵洪²

(1 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2 四川里伍铜业股份有限公司, 四川 九龙 626200)

摘 要 四川省黑牛洞铜矿赋存于中元古代变质火山-沉积岩中,含矿变质火山-沉积岩可能形成于扬子地台西缘大陆被动边缘裂谷带,经历了至少 2 次韧性变形,变质达到角闪岩相(泥质原岩:十字石+铁铝榴石(蓝晶石),变基性火山岩:斜长石+普通角闪石+铁铝榴石)。一方面,经构造动力作用(韧性剪切变形),原矿石经过改造形成韧性剪切带型浸染状矿石或矿化岩(简称剪切型矿石);另一方面,活化、迁移形成的含矿热液在合适的构造部位淀积成块状、准块状、角砾状和浸染状等矿石,形成以块状、准块状和角砾状硫化物为主的铜矿床。剪切型矿石的特征为:① 矿石矿物和脉石矿物与围岩片理的产状基本一致,发育大量剪切条带、石英不对称透镜体和石香肠、不协调褶皱;② 矿物晶体或集合体一般呈他形、透镜状,在平行片理的面(//AB 面,⊥C)上,矿石矿物集合体呈浸染状、斑点状和薄片状,在垂直片理走向的面(//AC 面,⊥B)上,则呈细条状、透镜状,甚至无根钩状,发育 SAC 构造,与围岩变形特征相同;③ 石英动态重结晶颗粒、对称透镜体、布丁、条带和 SAC 构造发育,矿石矿物集合体条带、对称透镜体、无根褶皱,以及与活化、迁移有关的溶蚀结构十分发育。研究表明,黑牛洞矿区发育的剪切型矿石和非剪切型矿石是同一构造过程的不同变形阶段,在不同的成矿作用和不同的地球物理化学条件下的产物。

关键词 地质学;大陆被动边缘裂谷;韧性正剪切带;剪切带型浸染状矿石;构造改造矿床;黑牛洞铜矿床

中图分类号:P618.41

文献标志码:A

Characteristics of ductile shear-type disseminated ores in Heiniudong copper deposit, Jiulong County, Sichuan Province

LI JianZhong¹, WANG MingJie¹, WANG FaQing², YAO Peng¹, LIANG Jing², TANG GaoLin²,
ZHU XiangPing¹, MA GuoTao¹, ZOU GuangFu¹, SHEN ZhanWu¹, CHEN MinHua¹ and LI GuiHong²

(1 Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, MLR, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2 Sichuan Liwu Copper Mining Co. Ltd., Jiulong 626200, Sichuan, China)

Abstract

Based on field mapping and drilling as well as indoor studies, the authors reveal that the Heiniudong copper deposit located in the extensional ductile shear zone is hosted by volcanic-sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Liwu Group which experienced metamorphism of the staurolite-kyanite grade and was formed at the rifting valley in the passive continental margin of Yangtze platform, suffering from at least two times of ductile deformation.

^{*} 本文得到国土资源部矿产资源补偿费矿产勘查项目“四川省九龙县里伍铜矿外围普查(编号:1212010630404)及青藏高原东缘地震活动带基础地质调查综合研究项目(编号:1212010918010)资助

第一作者简介 李建忠, 1964 年生, 博士, 研究员, 构造地质专业, 主要从事矿田构造、矿产勘查和活动构造研究工作。Tel.: 028-83230700; Email: zdljianzhong@cgs.gov.cn

收稿日期 2009-06-08; 改回日期 2010-06-10。张绮玲编辑。

mation. On the one hand original ores were changed into ductile shear-type disseminated ores by ductile deformation and on the other hand copper-rich fluids were formed by ductile deformation and precipitated in brittle fractures or shattered rocks, mainly forming massive and brecciated sulfide ores. Shear-type disseminated ores have the following characteristics: ① Ore minerals and gangues are consistent with the deformation of host rocks. The mineral crystals are anhedral. Within the ductile shear zone, there are a lot of quartz lenses, shear-type bands, sausages and harmonious folds. ② The aggregates of ore minerals are in the forms of disseminations and spots on the side parallel to the schist ($\parallel AB, \perp C$), and in the form of fine bands, lens, sausages and crooks on the other side ($\parallel AC, \perp B$). There are $S\wedge C$ fabrics and 'δ' quartz porphyroblasts on the side ($\parallel AC, \perp B$). The $S\wedge C$ fabrics with ductile deformation features in the ductile shear-type disseminated ores show that ductile shear zone is extensional. ③ Ductile shear-type disseminated ores must have resulted from two phases of ductile shear deformation, whose ore and vein mineral deformation is consistent with features of hosted rocks, whereas non-shear type disseminated ores (disseminated ores) might have resulted from heat fluid, whose ore and vein mineral deformation is inconsistent with features of hosted rocks.

Key words: geology, rift valley in passive continental margin, extensional ductile shear zone, ductile shear-type disseminated ore, metamorphogenic deposit, Heiniudong copper deposit

四川省九龙县黑牛洞铜矿区位于扬子地台西缘-龙门山-锦屏山后山接合带、康滇地轴北西侧(图1)。含矿岩系分布在以前震旦系火山-沉积岩为核的椭圆形穹隆构造内。

近几年的野外和室内研究表明,黑牛洞铜矿与韧性剪切带有关(李建忠等,2006)。与韧性剪切带有关的金矿床国内外报道颇多(Boulter et al., 1987; Bonnemaison et al., 1990; 吴雪桦, 1991; Hutchinson, 1993; 刘玉琳, 1996; 陈柏林等, 2002; Thorne et al., 2008)与之有关的其他构造改造矿床则报道较少(傅昭仁等, 1991; 1992; Byrne et al., 1993; 张志斌等, 1997; 汪劲草等, 2000; 2003; 顾连兴等, 2004; 2007; Wilde, 2006; Michalski et al., 2007),系统总结被韧性剪切改造后的矿石特征则更少(顾连兴等, 2004; Gu et al., 2008)。黑牛洞铜矿床的成因至今仍有争论(姚家栋, 1990; 颜丹平等, 1994; 1997; 杜亚军等, 1996; 傅昭仁等, 1997)。普查结果显示,江浪穹隆有较好的资源勘查潜力(李建忠等, 2006; 汪名杰等, 2007; 冯孝良等, 2007; 姚鹏等, 2008; 祝向平等, 2008; 马国桃等, 2009)。黑牛洞铜(锌)资源量已达到中型矿床规模,还伴生Ag和Au,而且矿体深部和西北部边界尚未完全控制,有进一步找矿的潜力(汪名杰等, 2007)。笔者发现黑牛洞铜锌矿的浸染状矿石有剪切带型和非剪切带型2种。本文初步总结了这2种矿石的特征,以便为里伍铜矿田及其他地区的找矿勘探提供参考。

1 区域地质背景

研究区位于扬子地台西缘、南北向康滇地轴的北西侧(图1)。江浪构造穹隆经历了长期的地质构造演化,成穹于燕山期。有关研究认为,康滇地轴在中元古代存在裂谷作用(任主传等, 1984; 潘杏南等, 1988; 华仁民, 1989; 冉崇英等, 1994; 陈毓川等, 2006)。笔者因此推测,整个康滇地轴,包括江浪穹隆以及东川地区,可能同处于一个锯齿状的裂谷系中。穹隆轴向北北西,长短轴之比为2:1(姚家栋, 1990)。

1.1 地层

江浪穹隆构造核部出露的最老地层为中元古界里伍岩群(1 437 Ma, U-Pb法, 石英片岩中的锆石, 傅昭仁等, 1997; 继承年龄1 838.6 Ma和1 930 Ma, K-Ar法, 许志琴等, 1992),是扬子地台基底上部的一套火山、沉积变质岩系。原岩恢复为石英砂岩、泥质石英粉砂岩和泥质岩,夹基性火山岩。其上,依次出露古生界—中生界浅变质岩系。

黑牛洞矿区的含矿岩系是一套二云片岩、二云石英片岩和石英片岩,以及经过塑性变形改造的云母质和石英质糜棱岩、千糜岩、变粒岩和片糜岩,夹斜长角闪片岩、角闪片岩;围岩是云母石英质糜棱岩、云母质千糜岩和糜棱片岩、石英变晶糜棱岩、变粒岩和构造蚀变岩,原岩是石英砂岩、泥质石英粉砂岩和泥质岩,夹基性火山岩。

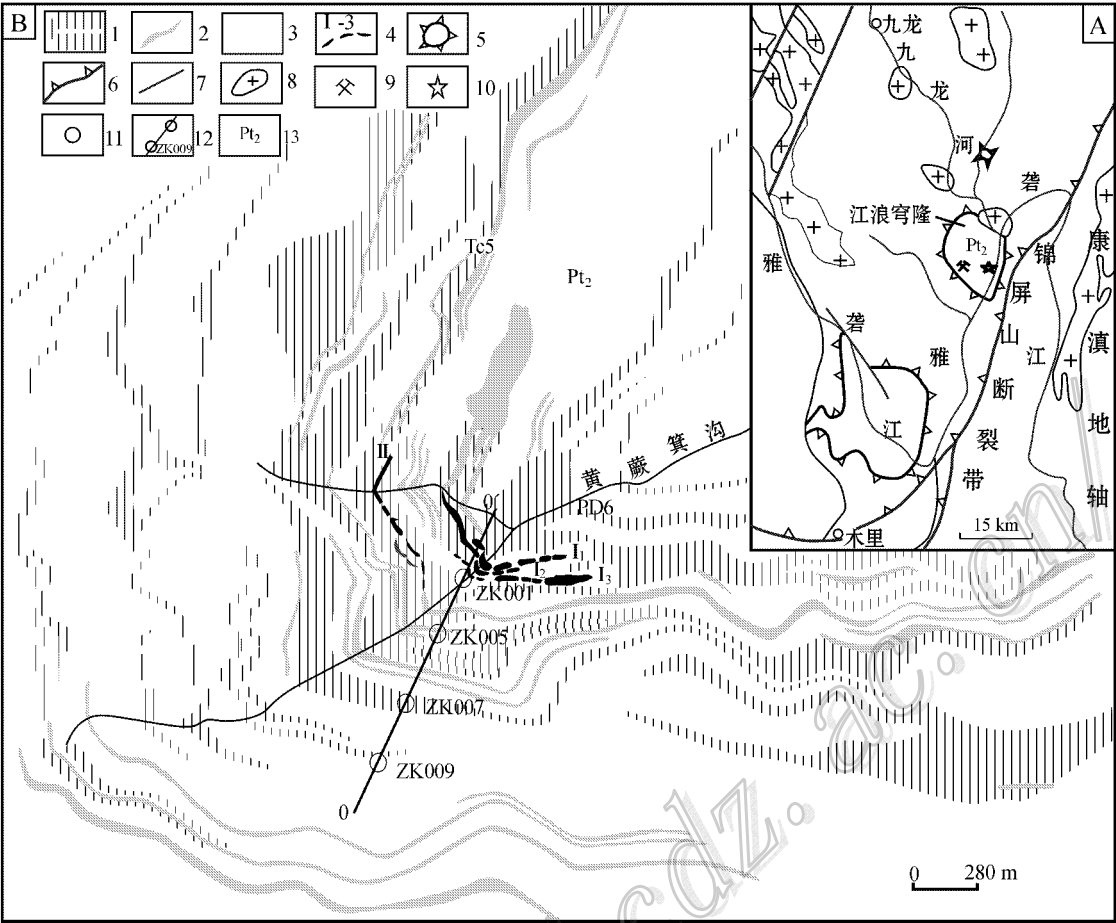


图 1 黑牛洞铜矿区大地构造位置(A)及矿区地质略图(B)(据李建忠等 2006)

1—蚀变带；2—角闪(片)岩或斜长角闪(片)岩；3—二云石英片岩、石英片岩和二云片岩；4—矿体及编号；5—穹隆；6—推覆带；7—断裂；8—花岗岩体；9—黑牛洞铜矿区位置；10—里伍铜矿；11—县城所在地；12—勘探线、钻孔位置及编号；13—中元古界；Tc5—探槽位置及其编号；PD6—平硐位置及编号

Fig. 1 Schematic map showing tectonic setting (A) and geology (B) of the Heiniudong Cu ore district (after Li et al., 2006)
1—Altered zone ; 2—Amphibolite , schist ; 3—Two-mica quartz schist , quartz schist and two-mica schist ; 4—Ore body and its serial number ; 5—Dome ; 6—Nappe zone ; 7—Fault ; 8—Granite body ; 9—Location of the Heiniudong Cu deposit ; 10—Liwu copper deposit ; 11—Location of Jiulong County ; 12—Location of the prospecting line and its serial number ; 13—Mesoproterozoic ; Tc5—Trench and its serial number ; PD6—Adit and its serial number

1.2 岩浆岩

在里伍铜矿田的东北侧,九龙河与雅砻江汇合处的文家坪一带,分布有燕山期侵入岩(图 1A),岩性是似斑状黑云母花岗岩、二云母花岗岩。岩体呈岩珠状,直接侵入于江浪穹隆的北东翼,出露面积 34 km²,西南接触面向北东倾斜,倾角约 70°,K-Ar 年龄为(131±5)Ma,属燕山晚期。这比松潘-甘孜地体内的花岗岩浆活动年龄[(219±8)~(185±3)Ma,胡健民等 2005]稍晚。有关专家认为侵入岩与成矿没有成因联系(姚家栋,1990;傅昭仁等,1997;李建忠等 2006;汪名杰等 2007)。

火山岩广泛分布于中元古代里伍岩群中段,呈条带状、透镜状产出。有关研究认为,它们为里伍式铜矿提供了丰富的矿质来源(姚家栋,1990;杜亚军等,1996;傅昭仁等,1997)。从里伍铜矿采集到的夹于二云石英片岩的斜长角闪(片)岩全岩年龄是(1 674±112) Ma 和(1 677.0±62.5) Ma (Sr-Nd 法,傅昭仁等,1997)。有的学者经过对比后认为这个年龄偏大,它可能形成于中元古代(侯立玮等,1996)。

1.3 构造

江浪穹隆(图 1A)可能是由里伍岩群的第三期

面理(S_3)构成的背形构造,轴面走向 $N15^\circ W$,长22 km,宽11 km,呈短轴状。在穹隆核部,面理倾向平缓,为 $11\sim 20^\circ$;在翼部,面理产状变陡,东翼 $25\sim 45^\circ$,西翼 $22\sim 50^\circ$,东、西两翼基本对称。翼部的次级褶皱不发育,仅仅局部有挠曲;上覆地层(古生界、三叠系)构造变形面与之协调一致,总体显示为横弯褶皱特征,说明第三期面理(S_3)可能形成于成穹之时,是韧性变形时产生的 SAC 构造的 C 面。除纵、横、张节理和“X”剪节理很发育以外,以穹隆核部为中心的放射状张节理也很发育,致使地表水系呈放射状。局部地方可见矿脉充填于裂隙中。

江浪穹隆的成因有变质核杂岩(宋鸿林,1995;杜亚军等,1996;傅昭仁等,1997;颜丹平等,1997)和构造叠加穹隆(侯立玮等,2002)之争。根据穹隆片理产状、穹隆矿化蚀变特征(蚀变矿化在水平面上呈一个封闭的环带状)、锦屏推覆体剪切带同位素年龄129 Ma和120 Ma(黑云母 $K-Ar$ 法,成都地质矿产研究所,2000)、文家坪花岗岩岩体附近围岩变形的特征和年龄(131 ± 5) Ma(黑云母 $K-Ar$ 法)以及放射状水系,笔者认为,它的成因与藏南康马变质核杂岩(Chen et al.,1990;Davis et al.,2002)不同,可能是造山带后期形成的岩浆上侵、成穹伸展的产物,它是热穹隆。

2 黑牛洞铜矿床基本特征

2.1 地层

黑牛洞矿区的含矿岩系是一套二云片岩、二云石英片岩和石英片岩,以及经过塑性变形改造的云母质和石英质的糜棱岩、千糜岩和片糜岩,夹斜长角闪(片)岩、角闪(片)岩,局部发育变粒岩。经过原岩恢复,其地层为巨厚的石英砂岩、泥质石英粉砂岩和泥质岩,夹基性火山岩。根据这些岩性推测其沉积环境为滨海—浅海;变基性火山岩(角闪(片)岩和斜长角闪(片)岩)的原岩可能形成于裂谷作用。经过区域变质,泥质石英粉砂岩和泥质岩的典型变质矿物组合是:十字石+铁铝榴石(蓝晶石),变基性火山岩的典型变质矿物组合是:斜长石+普通角闪石+铁铝榴石,变质达到角闪岩相。由于在该地区没有见到更古老的地层,其上又缺失震旦系、寒武系和奥陶系等,推测碎屑岩夹基性火山岩的沉积建造可能形成于大陆被动边缘裂谷,而非火山岛弧环境。

2.2 地质构造

矿区总体上貌似单斜构造,实际上从微观到宏观,成矿(期)前韧性、脆-韧性构造变形十分发育,局部发育脆性断裂,成矿期后节理发育。

(1)褶皱 在韧性变形伸展拆离带中,常见紧闭同斜褶皱、斜歪褶皱、钩状褶皱和流褶皱以及不协调褶皱(图2A)。流褶皱由连续的背、向斜组成,常常形成褶皱理(图2B)。这种褶皱和稍大一点的褶皱常常是控制矿体形态和矿化局部富集的构造因素(李建忠等,2006)。

(2)断裂 成矿期的脆性断裂比较发育,它们是韧性剪切作用非共轴递进变形的产物,是叠加在早期韧性变形带上的张性或张扭性脆性断裂。这种破碎带常常发育于次级背形的轴部。脆性断裂常常使岩石破碎成角砾状。而围岩角砾常被金属硫化物胶结,形成角砾状及块状、准块状(图4a;图2C上岩芯、2D)和网脉-团块状矿石。这种现象说明角砾状、块状矿石是含矿热液沿构造破碎带充填形成的。对于非硅质的角砾,溶蚀不太明显,呈棱角状、次棱角状(图4a),而硅质角砾大多被溶蚀呈浑圆状,无论是在野外的宏观块状矿体露头还是岩芯(图2E),及在显微镜下都可以见到这种无色透明的石英(图2F),并可以见到其中发育有金属矿物。该期断裂一般在走向和倾向上都延伸不远,使矿体呈透镜状、豆荚状和分枝。

成矿期后断裂不发育。偶见基本平行片理或切片理的断裂,它们明显没有切断矿体,对矿体连续性没有影响。

(3)面理 在野外容易辨认出3期面理,局部可识别出4期甚至5期面理。3期容易识别的面理特征如下:

第一期变形(D_1):第1期片理(S_1)置换层理(S_0), S_1 为透入性片理。原始的沉积岩层面(S_0)被早期面理(S_1)置换,在后期的变形中,大多数面理(S_1)又被后期的面理(S_2 和 S_3)置换,其变形通过岩性层(条带)形成的揉皱、无根褶曲等勉强可以辨认。颜丹平等(2002)研究认为该期变形是伸展体制下的产物。

第二期变形(D_2):第2期面理(S_2)广泛发育,主要表现在由细小白云母、黑云母与石英形成的片理、呈深浅相间的分异条带,深色条带主要是由黑云母组成的劈理域,浅色条带是以石英为主的微劈理域。在 D_1 基础上对早期形成的“海底火山块状硫化物矿

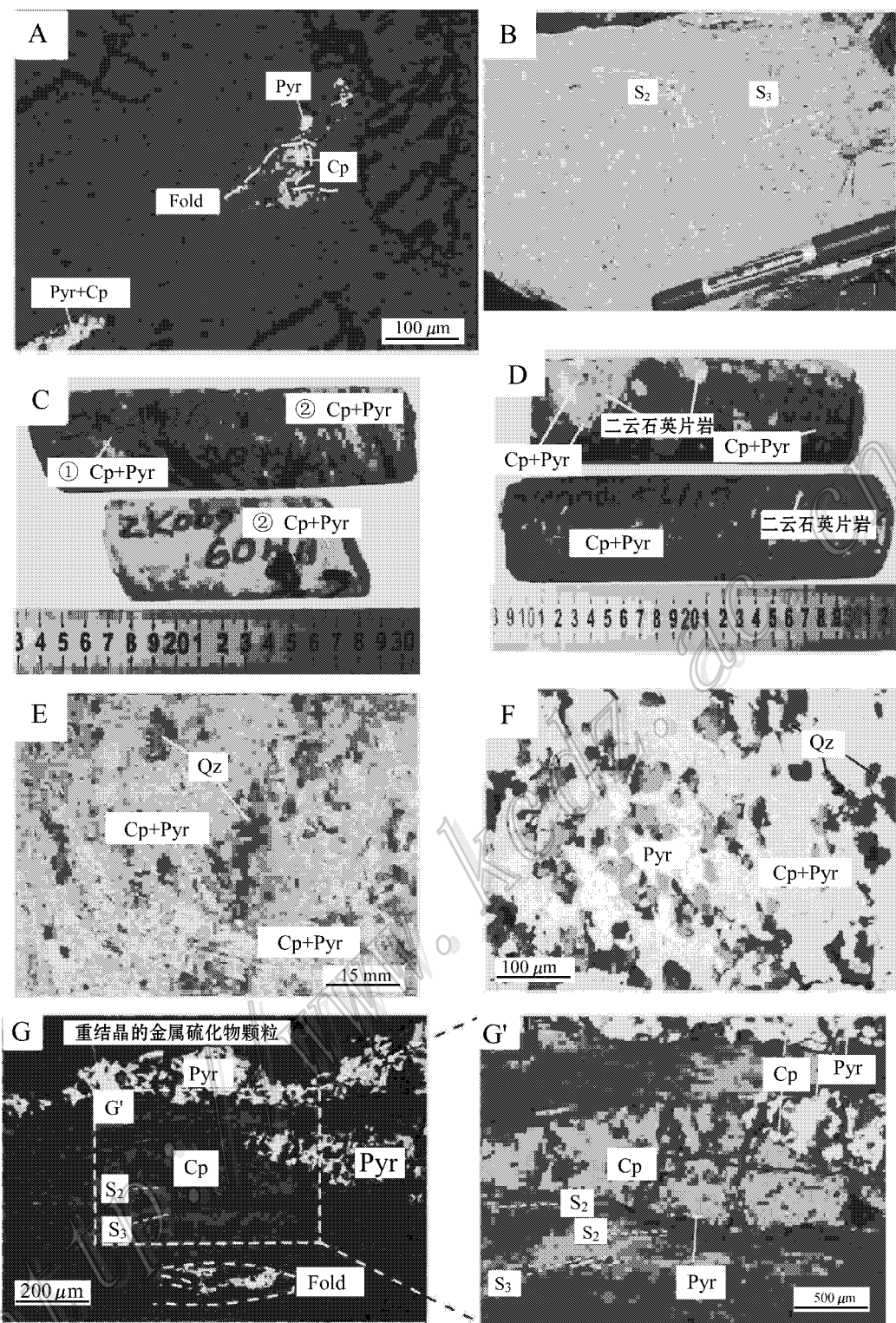


图 2 黑牛洞矿区矿石照片(一)

A. 剪切型矿石：金属硫化物条带形成的不协调“N”型褶皱，透镜体沿片理定向分布（反射光，AC面，⊥B，样品编号为 ZK309-51-G46-2）；
B. 浅灰色二云石英片岩中发育 S₂ 和 S₃ 面理（地点：黑牛洞）；C. 沿片理灌入的金属硫化物矿脉和剪切作用形成的金属硫化物条带共生（ZK406 为准块状矿石）及剪切作用形成的金属硫化物条带（钻孔 ZK009）；D. 准块状、角砾状矿石（上岩心）和块状、角砾状矿石（下岩心）（钻孔 ZK009）；E. 块状矿石：金属硫化物集合体、无色透明的脉石矿物石英均无定向分布（自然光，钻孔 ZK005）；F. 块状矿石：金属硫化物集合体、无色透明的脉石矿物石英均无定向分布；脉石矿物石英中含有金属硫化物（反射光，钻孔 ZK005）；G. 剪切型矿石：金属硫化物褶皱 2 期条带和透镜体沿片理定向分布，金属硫化物有重结晶（反射光，AC面，⊥B，样品编号 ZK007-35-G12-3）；G'. 剪切型矿石：金属硫化物 2 期条带、透镜体沿片理定向分布（反射光，AC面，⊥B，样品编号 ZK007-35-G12-4）

床进一步改造,形成剪切型矿石(图2G和2G'中平行 S_2 的条带状磁黄铁矿、黄铜矿)。在野外,局部可见残余的早期 $S_1 \wedge C$ 组构,其运动学方向反映了由南西向北东的逆冲作用(图4b)。这一期变形形成的金属矿物条带仅在局部地方或镜下可以见到。 S_2 与 S_1 之间的置换关系容易见到:在 S_1 片理褶曲转折端,第二期变形形成的 S_2 褶劈理与 S_1 近于垂直;在翼部 S_2 与 S_1 呈小角度相交,表现为分划性褶劈理;在片理域中, S_1 被改造后与 S_2 近于平行。第二期变质矿物组合以石英+白云母+黑云母为主。

第三期(主期)变形(D_3):是伴随穹隆形成的区域性片理(S_3),产状 $200 \sim 230^\circ \angle 22 \sim 31^\circ$,可能是热成穹作用的产物。无论从野外露头,还是从微观尺度,都可见到 S_3 ,主要为互相平行的石英条带、黑云母条带、二云母条带。 S_3 与 S_2 面理关系十分清楚(图2B),形成 $S \wedge C$ 组构(S_3 相当于C面)(图4c、图3H、3I),以及在 S_3 面理之间由 S_2 形成的紧闭平卧褶皱、N(图2I)和M形褶皱、无根褶皱(图5A;图2A、2G)。在 S_2 片理褶皱转折端, S_3 作为轴面面理与 S_2 垂直,在翼部二者近于平行(图2G)。常见平行 S_2 面理的石英条带被石香肠化,甚至形成 δ 碎斑或透镜体(图4c)。 δ 碎斑和 $S \wedge C$ 组构,其运动学方向反映了由北东向南西的伸展作用(图4c;图3H)。无论在厚达上百米甚至数百米的矿化蚀变带,还是在显微镜下都可以见到广泛发育的眼球状、透镜状和细条带状的平行于 S_3 的金属矿物集合体(图2G和2G';图3H、3K),以及无根钩状的矿石矿物(图2A、2G)。

在黑牛洞矿区见到的韧性变形形成的磁黄铁矿、黄铜矿条带可能与第二期和第三期变形一致。它们形成了剪切带型浸染状矿石。这2期塑性变形可能反映了海底火山块状硫化物经历了至少2期塑性迁移或再活化和淀积成矿(Marshall et al., 1987)。

(4)节理 黑牛洞矿区主要发育北东向和北东东向节理,其次为北西向节理。有的节理充填石英脉,有的发育含矿石英脉(产状 $212^\circ \angle 53^\circ$),有的发育磁黄铁矿、黄铜矿细脉(产状 $56^\circ \angle 75^\circ$),还有的两侧发育褪色带(图5B、5C);有的是压扭性的(图5C),有的是张性的。它们大多数没有矿化蚀变。

2.3 矿床地质

2.3.1 矿体特征

黑牛洞铜锌矿床的矿体呈似层状、透镜状和瓦盖状(李建忠等, 2006),局部呈分叉状(平硐PD6)产

出,与围岩产状基本一致,局部比较陡,倾角可达 55° 。矿体规模大小不一,走向长数十米至150 m不等,厚度数米至10余米不等。矿石铜品位较高,属富铜矿。

矿区2条铜(锌)工业矿体 I_3 和II号矿体以0-4勘探线为轴向南西倾伏,矿体延伸长度大于走向,产状、厚度、品位比较稳定。II号矿体位于 I_3 矿体之上,二者相距30~55 m。 I_3 和II号矿体的主要矿石类型是块状(矿石矿物含量在80%以上)、准块状(矿石矿物含量在50%~80%)和角砾状矿石。块状、准块状和角砾状矿体(图2a)产状与围岩面理基本协调一致,局部可见明显切割,界线清晰,矿体两侧常常形成褪色带(图5A)。在ZK009钻孔中,块状、准块状和角砾状矿石(图2D)厚达10 m,矿石中的棱角状、次棱角状矿化围岩角砾(云母石英质千糜岩)有程度不同的溶蚀。其顶部可见0.8 m的含黄铜矿石英脉和厚达20余米的褪色带,底部可见脉状、网脉状矿石,与剪切型矿石、浸染状矿石共生;在ZK406钻孔中,在块状、角砾状矿石的顶部,可见沿片理灌入的金属硫化物矿脉和韧性剪切作用形成的金属硫化物条带共生(图2C上岩芯)。这些特征说明块状、准块状和角砾状矿石以及脉状、网脉状矿石是含矿热液沿着平行片理的构造破碎带或片理之间的裂隙充填、淀积形成的。

2.3.2 矿体品位及厚度变化

矿区Cu、Zn品位(质量分数,下同)统计分析表明, I_3 号矿体矿石Cu平均品位2.33%,Zn平均品位0.81%。II号矿体矿石Cu平均品位0.59%,Zn平均品位2.52%。全矿Cu平均品位1.79%,Zn平均品位1.28%。铜最高品位(ZK401孔的32H18号样)16.90%,锌最高品位(ZK403孔的56H2号样)11.79%。矿体厚度变化不大,总体有向南西变厚的趋势。单个矿体靠近背形枢纽处厚度较两翼厚,如已经揭露的 I_3 号矿体,核部厚达10余米(地点:PD5),两翼厚度仅仅0.30~0.40 m(地点:PD2)。主要由块状、准块状和角砾状矿石组成的矿体,金属矿物没有明显的变形组构(局部揉皱可能系含矿热液充填时的扰动形成);但是在围岩角砾中,部分脉石矿物和部分矿石矿物变形组构发育,大量的无变形组构的块状、准块状和角砾状矿石的淀积和形成暗示,再活化中的迁移不是块状硫化物塑性流动或物理搬运形成的,而是含矿热液或近距离搬运形成的。同时,原有矿石产生动热变质成矿作用,形成大

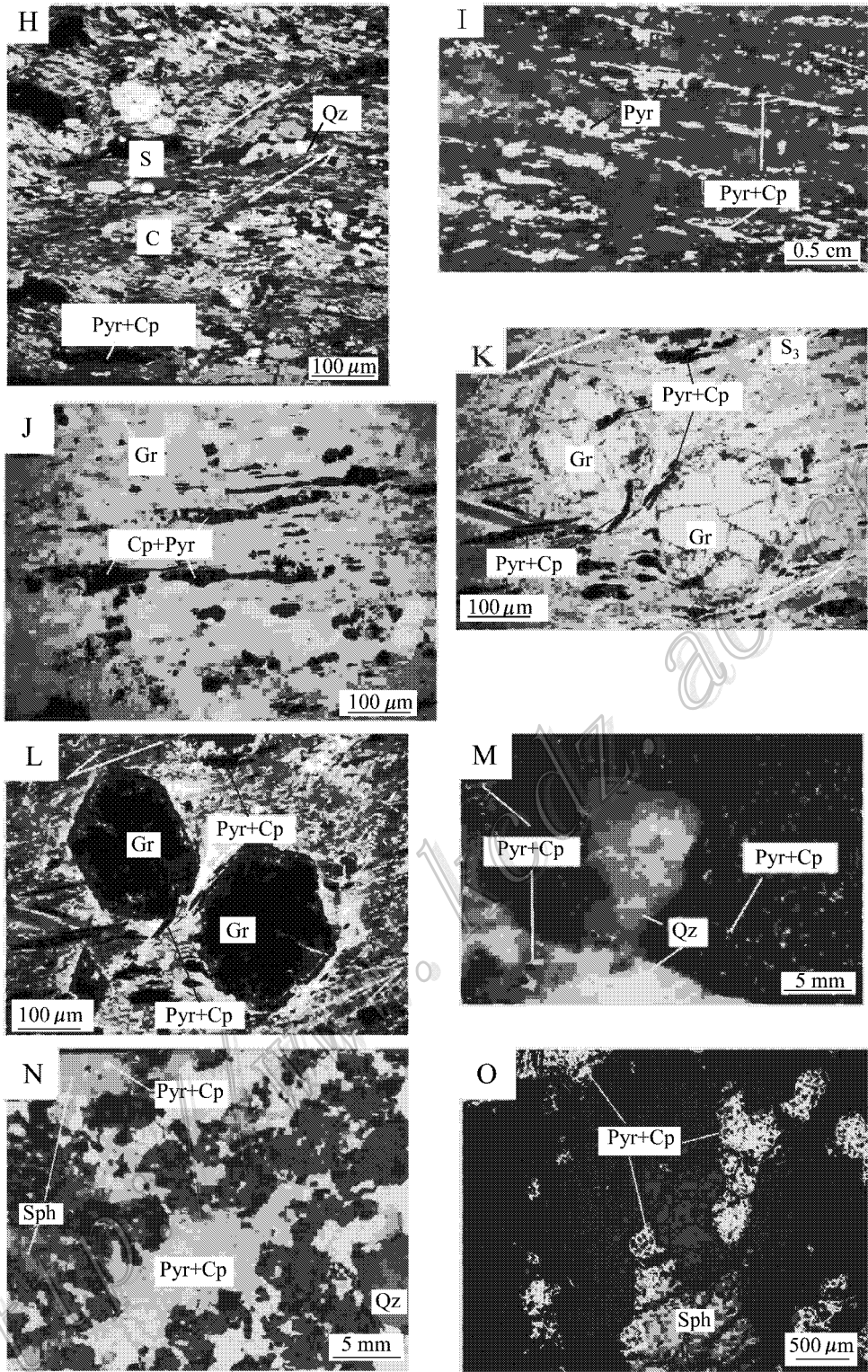


图 3 黑牛洞矿区矿石照片(二)

H. 剪切型矿化岩：S\C 组构，显示伸展，是一个韧性正剪切带，金属硫化物透镜体沿片理定向分布（正交偏光，AC 面， $\perp$ B 样品编号 ZK007-35-B2）；I. 剪切型矿石：金属硫化物透镜体、条带沿片理定向分布（光片 AC 面， $\perp$ B 样品编号 ZK007-35-G14）；J. 剪切型矿石：金属硫化物透镜体沿片理定向分布，石榴子石未旋转（单偏光，AC 面， $\perp$ B 样品编号 ZK403-56-B9）；K. 剪切型矿石：金属硫化物条带、透镜体沿片理定向分布，含金属硫化物条带的石榴子石逆时针旋转，显示一个伸展型的剪切带（单偏光，样品编号 ZK403-56-B9）；L. 剪切型矿石：金属硫化物条带、透镜体沿片理定向分布，石榴子石逆时针旋转（正交偏光，样品编号 ZK403-56-B9）；M. 浸染状矿化岩：稀疏浸染状构造（光片，AC 面， $\perp$ B 样品编号 ZK309-32-G2）；N. 浸染状、斑点状构造，闪锌矿中可见黄铜矿和磁黄铁矿集合体（光片，AC 面， $\perp$ B 样品编号为 ZK007-35-G20）；O. 浸染状构造（光片，样品编号 ZK007-35-G20）

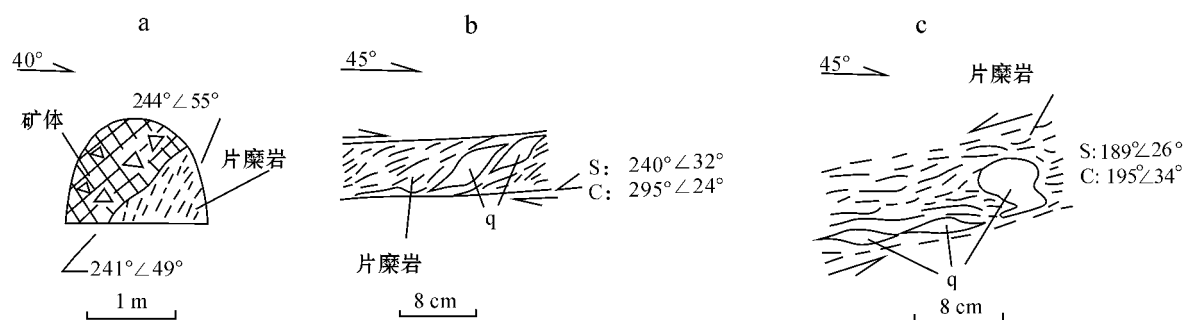


图 4 黑牛洞铜锌矿区含矿蚀变带构造变形素描(据李建忠等, 2006)

a. 块状、角砾状矿石中发育的围岩角砾(地点: PD6 平硐沿脉坑道掌子面); b. I_3 块状、角砾状矿体围岩中发育的 S-C 构造, 反映早期片麻岩经历了由南西向北东的韧性逆剪切(地点: TC5 探槽); c. I_3 块状、角砾状矿体围岩中发育的 S-C 构造, 反映晚期片麻岩经历了北东向南西的韧性正剪切(地点: TC5 探槽); q—石英

Fig. 4 Sketches showing structural deformation of ore-bearing altered zones in the Heiniudong Cu-Zn deposit (after Li et al., 2006)

量的含矿热液, 这些有用组分主要因再活化被迁移, 原块状硫化物或剪切型矿石品位贫化, 再次形成低品位剪切带型浸染状矿石或矿化岩。

2.3.3 矿体围岩

块状、准块状和角砾状矿石的围岩是片麻岩、千糜岩和变晶石英糜棱岩以及(斜长)角闪(片)岩, 局部可见变粒岩。它们分别是二云片岩、二云石英片岩和石英片岩以及斜长角闪(片)岩经过韧性剪切形成的, 局部也可见到构造蚀变岩作为围岩。根据变质矿物组合(泥质原岩: 十字石 + 铁铝榴石 + 蓝晶石, 变基性火山岩: 斜长石 + 普通角闪石 + 铁铝榴石)和局部可见变粒岩、钾长石, 推测其形成温度、压力分别是 $500 \sim 700^\circ\text{C}$ 、 $(2 \sim 2.5) \times 10^8 \text{ Pa}$, 形成时的地壳深度为 $7 \sim 9 \text{ km}$ (Guilbert et al., 2007)。这个温压条件和深度符合剪切带型浸染状矿石形成的温压条件和深度。块状、角砾状和准块状矿石中的脉石矿物基本上与围岩所含的矿物相对应。矿体上、下盘岩性均发育有数米至数十米不等的褪色带。这些褪色带与剪切型矿化一起构成了厚达百余米甚至数百余米的含矿围岩。块状、角砾状和准块状矿石组成的矿体与围岩呈截然的明显分界。除剪切带型浸染状矿化(图 3H、3I、3J、3K)普遍发育外, 围岩中还有非剪切带型浸染状矿化(图 3M), 及浸染状(图 3O)、斑点状构造的矿石(图 3N); 另外, 在块状、准块状和角砾状矿体周围, 既有非剪切带型浸染状矿化, 又发育剪切带型浸染状矿化的矿石或矿化岩。经过韧性变形改造后, 在剪切带型浸染状矿化蚀变带里包裹了其再活化形成的、金属矿物基本没有变形的(块

状、准块状和角砾状矿石中的围岩角砾所含矿石矿物除外)块状矿石组成的矿体。这在一定程度上反映了剪切带型浸染状矿石是经过韧性剪切作用形成的。

2.3.4 矿石特征

金属矿物 对不同矿石类型的宏观和显微观察表明, 原生金属矿物以磁黄铁矿($5\% \sim 90\%$)、黄铜矿($0.5\% \sim 50\%$)、闪锌矿($0.55\% \sim 20\%$)为主, 其次有少量黄铁矿($1\% \sim 3\%$)、方铅矿($<1\%$)。次生金属矿物不发育, 仅在地表局部可见褐铁矿、孔雀石、铜蓝以及铁、铜、锌、铅的硫酸盐类矿物。

脉石矿物 以石英($20\% \sim 90\%$)、白云母和黑云母($10\% \sim 70\%$)、绢云母和绿泥石为主($10\% \sim 70\%$)。其次为石榴子石和角闪石($1\% \sim 10\%$)、电气石和斜长石($1\% \sim 5\%$)、方解石(1%)等。当容矿岩石由二云片岩或片麻岩组成时, 矿体中二云母含量较高; 由石英片岩或石英变晶糜棱岩组成时, 矿体中石英含量较高; 由斜长角闪岩或角闪岩组成时, 矿体中角闪石、绿泥石和绿帘石或斜长石含量较高。

有用组分 主要为铜和锌。全矿铜(锌)矿石的铜平均含量为 1.68% , 其中 I_3 号矿体矿石平均含铜 2.04% , II 号矿体平均含铜 0.90% ; I_3 号矿体的 ZK401 孔铜含量最高, 单样最高品位为 16.90% 。矿区铜(锌)矿石中平均锌含量为 1.53% , 其中 I_3 号矿体矿石平均含锌 1.13% , II 号矿体平均含锌 2.38% , 后者明显高于前者, 最高含量为 11.79% , 见于 II 号矿体(ZK403 孔)。

有益伴生组分 主要有金、银、硫、钴、铅、镍等。矿石中 $\alpha(\text{Au})$ 为 $0.006 \sim 0.3 \text{ g/t}$, 变化较大, 全矿平

均含量为0.1 g/t。 $w(\text{Ag})$ 在矿石中为2~25 g/t,变化也较大。全矿 $w(\text{Ag})$ 平均为12.39 g/t。 $w(\text{Co})$ 0.0016%~0.037%,平均0.014%。矿体中Pb、Ni含量普遍未达到伴生有用组分评价指标。

矿石结构构造 矿石的结构主要有自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、糜棱结构(图2G、3L)、片状变晶结构、溶蚀残余结构、交代残余结构和固溶体分离结构。矿石构造主要有致密块状构造(图2D下岩芯、2E、2F)、准块状构造(图2C和2D上岩芯)、角砾状构造(图2D)、团块状构造、脉状-网脉状构造、浸染状(图3M、3O)和斑点状构造(图3N)及剪切带型浸染状构造(图2G、2G',图3H~3L)。

矿石自然类型 主要为块状、准块状和角砾状硫化物矿石,约占90%;其次是剪切带型浸染状矿石,以及少量的脉状、网状、浸染状矿石、团块状矿石和石英脉型矿石,共占10%。当脉石矿物和围岩角砾含量<20%时,为块状构造(图2D);当脉石矿物和围岩角砾含量在20%~50%之间时,为准块状构造(图2C和2D);块状、角砾状矿石的金属矿物为磁黄铁矿、黄铜矿、次为闪锌矿,另有稀少的方铅矿等。这些金属矿物呈他形-半自形粒状紧密连生,胶结围岩角砾,形成致密块状、准块状和角砾状构造。致密块状矿石的脉石矿物是石英、白(绢)云母、黑云母、绿泥石,还有少量长石、角闪石、电气石、石榴子石等。脉石矿物呈弥散状分布在金属矿物中,其矿物边界常为圆弧状、港湾状(图2E和2F),显示出脉石矿物被溶(熔)蚀、交代的特点。矿石中大、小不等的棱角状、次棱角状围岩角砾的成分是片麻岩、千糜岩、变晶石英糜棱岩和斜长角闪(片)岩以及无色透明浑圆状的石英,粒径数毫米至数厘米不等。岩芯复查发现,钻孔ZK009中厚达10 m的矿芯中基本都含有云母石英质千糜岩角砾(图2D),其他钻孔也类似。根据块状矿石中磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿组合,以及与热液成矿作用蚀变密切相关的绿色带(即绿泥石和绿帘石),推测其形成温度为450~550℃、压力 $(1.5\sim2.0)\times10^8\text{ Pa}$,形成时的地壳深度5~7 km(Marshall et al., 1987; Guilbert et al., 2007)。

在2004年对该矿床勘查时,发现在不同的截面,矿化的特点不同,在顺片理的面上,有的矿化呈浸染状或斑点状,而在垂直片理的面上,呈细脉状、透镜状,甚至像小褶曲(图3I)。虽然当时没有提出这种矿化或矿石构造类型,但是它给笔者留下了深刻的印象。因为截取钻孔ZK301中百余米厚的具有

“浸染状构造”的矿化岩芯,没有一个样品达到铜的边界品位。剪切带型浸染状矿化基本上在整个矿区的矿化蚀变带都有,绝大部分达不到Cu的边界品位,仅有小部分达到了Cu的边界品位,但基本上都是低品位矿石(0.2%~0.4%)。浸染状、斑点状矿石(图3N、3O)主要分布在块状、准块状和角砾状矿体和含石英脉旁。在块状、准块状和角砾状矿体、含石英脉,以及条带状、网脉状和稠密浸染状矿石旁,可见到同时具有这两种浸染状构造特征的矿石。

这些矿石在时间、空间上存在着一定的规律性。致密块状、准块状和角砾状矿石大多分布于矿体的中心部位,网脉状-团块状矿石分布于块状矿体的边部,或沿裂隙、片理灌入于围岩中,或分布于含石英脉中或其边部,而脉状、浸染状和斑点状矿化往往分布于靠近矿体的围岩中,再向外是剪切带型浸染状矿石或矿化岩。也常常见到浸染状和剪切带型浸染状矿石的过渡类型,分布于块状、角砾状矿石和剪切型矿石或矿化岩之间。这种过渡类型的矿石既有剪切带型浸染状矿石金属矿物的变形特征,又有浸染状矿石金属矿物没有变形特征,没有变形的金属矿物常常交代、切割早期韧性变形形成的、沿片理分布的金属矿物。这些矿石类型反映了原矿石经过韧性剪切变形改造,形成剪切型矿石,大部分有用组分活化、迁移,又基本在原地有利的构造部位淀积,发生浸染状矿化,富集成矿。总之,剪切型和非剪切型矿石的分布反映前者形成早,后者形成晚。

3 韧性剪切带

根据韧性剪切带的特征(Ramsay, 1980; Lister, 1984),黑牛洞矿区存在强烈的韧性变形(李建忠等, 2006);同时,存在大量的经韧性剪切作用改造形成的矿石或矿化岩。这种矿石或矿化岩,以前认为它们都是“浸染状矿石”(姚家栋, 1990; 傅昭仁等, 1997; 汪名杰, 李建忠等, 2007),但这种浸染状矿石既不同于传统意义的含矿热液形成的浸染状矿石(化) (图3M、3O),也不同于辽宁红透山命名的矿石糜棱岩(顾连兴等, 2004; Gu et al., 2007)。它有浸染状矿石的外貌,也有韧性剪切变形形成的岩石的一般特征(条带和微褶曲,图2G)。为了便于区别,本文暂且称之为韧性剪切带型浸染状矿石(以下简称剪切型矿石,图2G,图3H~3K)。

黑牛洞韧性剪切带在江浪热穹隆的西南翼(图

1),可能是成穹过程中形成的环带状韧性、脆-韧性剪切带的组成部分。韧性剪切带在总体上呈带状,走向NW50~30°,倾向18~55°。

3.1 岩石学特征

由于塑性变形,韧性剪切使矿质活化、迁移,溶蚀构造十分发育(图2E、2F)。晚期叠加的脆性断裂以及含矿热液作用,使变形早期形成的韧性剪切带蚀变强烈,岩石强烈黑云母化、绢云母化、硅化及矿化,形成大量的含矿构造蚀变岩和褪色带(图5B、5C、5D)。韧性剪切形成的糜棱岩在野外仅能从剪切形成的对称和不对称石英透镜体、石英无根褶皱(图5A)杆状石英,以及石榴子石的压力影中辨认出。它们是云母质和石英质的糜棱岩、超糜棱岩和千糜岩以及片糜岩。在显微镜下,它们是云母质的变余糜棱岩、糜棱岩、片糜岩、千糜岩,和石英质糜棱岩以及云母石英质糜棱岩(图3H、3I、3J、3K)。超糜棱岩,韧性剪切形成的石英条带、透镜体和‘ δ ’残斑已经重结晶,未见明显的波状消光(图3H)。

3.2 宏观组构及运动学特征

研究区韧性变形发育不对称的石英钩状褶皱、无根褶皱(图5A)、流褶皱、杆状石英、不对称石英透镜体、SAC组构(图4b、4c、图3H)、对称石英眼球体(图5E)。不对称石英透镜体、SAC组构和变形旋转的肉红色石榴子石,指示韧性剪切带的剪切运动方向。在野外,露头尺度的构造能区别2期韧性变形,局部发育的早期SAC组构($S=240^\circ\angle 32^\circ$, $C=295^\circ\angle 24^\circ$),显示由南西往北东逆冲(图4b),可能是早期韧性剪切带的残余。晚期不对称石英透镜体和SAC组构($S=190^\circ\angle 27^\circ$, $C=193^\circ\angle 33^\circ$)大量发育,显示上盘由北东往南西伸展(图4c、图3H),是一个韧性正剪切带。

3.4 显微组构及运动学特征

研究区的岩石或矿石(矿化岩)的显微组构具有明显的糜棱结构特征。在显微镜下,可见岩石或矿石(矿化岩)薄片云母鱼、压力影、多米诺构造(图2G)和动态重结晶颗粒,以及SAC组构(图3H);光片中可见剪切形成的大量定向排列的金属矿物条带、对称透镜体、不对称透镜体、不协调褶皱(图2A)和与溶蚀有关的结构(图2E、2F);也可见到石榴子石和部分被石榴子石包裹的金属矿物条带一块发生逆时针旋转(图3K、3L),局部还可见两期剪切形成的金属矿物条带、对称透镜体(图2G、2G')。

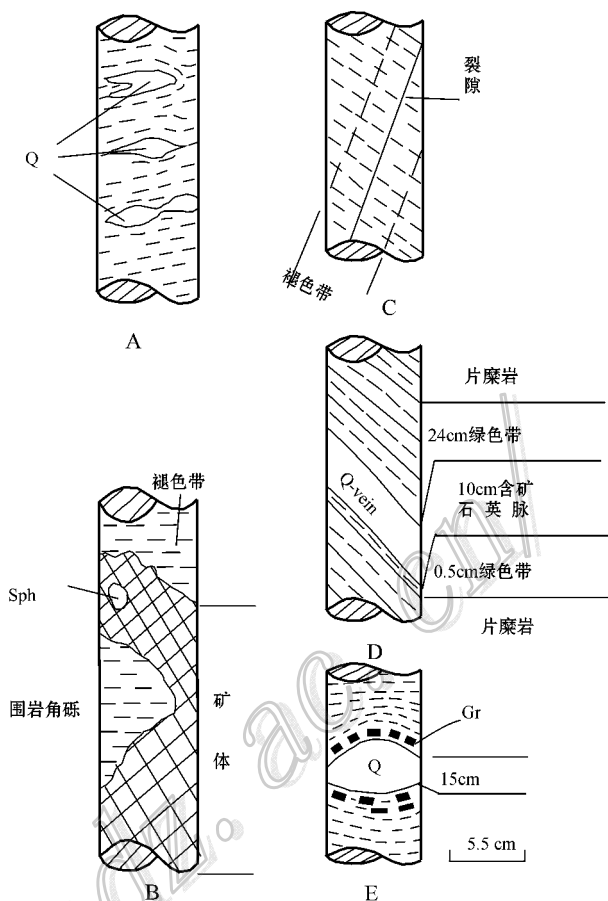


图5 黑牛洞Cu-Zn矿区岩芯矿化蚀变和变形素描

A. 剪切形成的眼球状石英和顺片理分布的石榴子石(地点:ZK309孔238回次);B. I₃块状矿体切割片糜岩,顶板绢云母化和硅化发育形成褪色带(地点:ZK401孔126回次);C. 顺压扭性裂隙绢云母化和硅化构成褪色带(地点:ZK309孔93回次);D. 石英脉附近片糜岩中发育的绿泥化和绿帘石化,构成绿色带(地点:ZK309孔131回次);E. 剪切形成的眼球状石英、无根钩状褶皱(地点:ZK401孔146回次)。Sph—闪锌矿;Q—石英;Gr—棕色石榴子石;素描图中岩性均为片糜岩

Fig. 5 Sketch of core alteration and deformation in the Heinidong ore district

4 剪切带型浸染状矿石的特征

黑牛洞剪切型铜矿体围岩主要为二云片岩、二云石英片岩、石英片岩和斜长角闪(片)岩。这些岩石经过韧性变形和蚀变,大多已成为糜棱岩、片糜岩和千糜岩。韧性剪切形成的各种糜棱岩与剪切型矿石、浸染状矿石关系密切。原来的含有块状、脉状和条带状矿石的片岩在韧性剪切作用下,产生塑性变形,形成含有金属矿物条带、透镜体和不协调褶皱的

具有糜棱结构的剪切型矿石。随着地壳的抬升,构造剥蚀,岩石埋藏深度变浅,变形逐渐由塑性变为脆性。由于递进变形,在原来塑性变形的基础上叠加张性或张扭性断裂,早先塑性变形形成的含矿热液就近充填、淀积,形成块状、准块状和角砾状(图 3D)以及脉状、网脉状和浸染状矿石(图 3O)。浸染状矿石是剪切型矿石形成过程中,韧性变形使矿质活化、迁移形成的(图 3N、3O)。显然,剪切型浸染状矿石和非剪切型浸染状矿石是同一构造过程(即热成矿过程)不同阶段(即早期的韧性变形变质阶段和晚期脆性断裂、破碎阶段)不同的成矿作用(即早期的变形变质成矿作用和晚期的热液成矿作用)的产物。早期的变形变质成矿作用使原矿石变形变质,形成剪切型矿石,大量的有用组分带出,晚期的热液成矿作用发生浸染状、斑点状、稠密浸染状矿化,形成浸染状、斑点状矿石,甚至块状、准块状和角砾状矿石,大量的有用组分带入。因此,同一构造过程不同的成矿作用,形成剪切型矿石、浸染状矿石和块状矿石。

4.1 矿石结构构造

剪切型矿石结构构造比较复杂,矿石的不同截面,矿物的结构构造不同。在野外的宏观露头 and 岩芯,矿石矿物在平行片理的面(//AB面,⊥C)上,黄铜矿、磁黄铁矿和闪锌矿呈他形浸染状或其他形星散状、薄膜状和斑点状分布,形成浸染状、斑点状构造;在垂直片理的面上(//AC面,⊥B),呈薄片状、透镜状和条带状分布,形成透镜状、长条状和褶曲构造(图 2A、2G),与围岩变形特征相同(图 4)。剪切型矿石的这个特征与浸染状、斑点状矿石形成了鲜明的对比(图 3N)。

在反光显微镜下,可见在平行片理的面(//AB面,⊥C)上,矿物呈星散状、薄片状、斑点状;在垂直片理走向的面(//AC面,⊥B)上,矿物集合体呈透镜状、长条状、无根钩状,形成透镜状、长条状构造和不协调褶皱(图 6、图 2A)。经过韧性剪切变形,有用的组分活化、迁移,金属矿物溶蚀现象十分发育。未变形的早期晶出的磁黄铁矿、闪锌矿被晚期形成的黄铜矿溶蚀交代,形成各种交代残余结构;闪锌矿中常出现黄铜矿、磁黄铁矿乳滴,或在黄铜矿、磁黄铁矿中出现闪锌矿乳滴。还可见到被石榴子石局部包裹的剪切形成的金属矿物条带,随着石榴子石一起旋转变形(图 3K、3L)。在电子显微镜下,即便在显微镜下很纯的金属矿物都包裹其他金属矿物或脉石矿

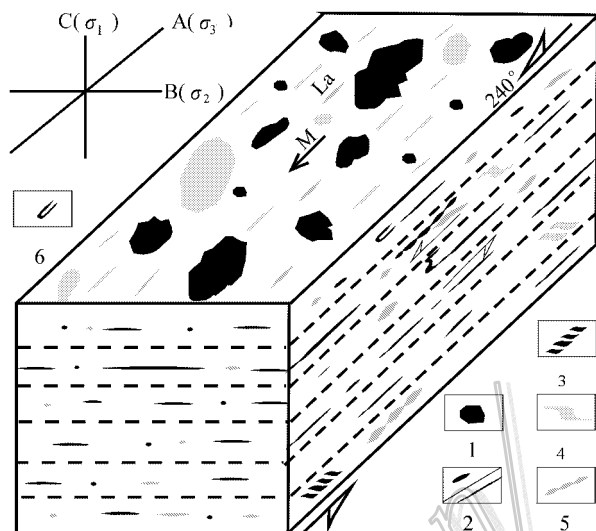


图 6 剪切型矿石的三度空间变形形态及剪切运动方向示意图

1—矿石矿物在 AB 面上呈浸染状、斑点状和薄片状;2—矿石矿物在 AC 面上呈透镜状、长条状和不协调褶皱甚至无根钩状;3—矿石矿物在 AC 面上的‘多米诺’构造,显示是一个韧性正剪切带;4—石英在 AC 面上形成的不对称‘σ’碎斑,显示是一个韧性正剪切带;5—石英在 AC 面上形成的‘香肠’;6—矿石矿物在 AC 面上形成的无根钩状褶皱;M—运动方向;La—拉伸线理

Fig. 6 Sketch map of the deformation shape in hree-dimensional space and the movement direction of ductile shear-type

物颗粒,例如,电气石中可见磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿颗粒。

4.2 变形特征

剪切型矿石与浸染状矿石类似,但在野外很容易区分它们。剪切型矿石的主要特点是矿石的不同截面,矿物集合体的变形特征不同,从而它们的构造特征不同,而且矿石矿物和脉石矿物的变形与围岩变形是协调的(详见表 1,图 6)。

在剪切型矿石薄片和光片中均可见对称的金属矿物透镜体、拉长的金属矿物条带(图 2G)及不对称的金属矿物透镜体(图 3G)和金属矿物无根褶皱(图 3H)。正交偏光镜下,除上述现象外,还可见由云母、多米诺、压力影、石英动态重结晶颗粒组成的条带、SAC 组构(图 3H)。局部可以见到 2 期定向排列的透镜状、长条状金属矿物集合体,反映了 2 期韧性变形(图 2G、2G')。这与野外局部见到的宏观露头所反映的 2 期韧性变形(图 4b、4c;图 2B)一致。同时,剪切形成的金属矿物条带可能也有重结晶和细粒化的现象,一方面动态重结晶使金属颗粒变得粗

表 1 剪切带型浸染状矿石与非剪切带型浸染状矿石的区别
Table 1 Differences between ductile shear zone type and disseminated ores

	剪切带型浸染状矿石	非剪切带型浸染状矿石
变形阶段	韧性变形	脆性变形
矿石成因	动热变质成矿作用	变质热液成矿作用
形成条件	温度 500~700℃、压力 $(2\sim2.5)\times10^8\text{ Pa}$ 、地壳深度 7~9 km	温度 450~550℃、压力 $(1.5\sim2.0)\times10^8\text{ Pa}$ 、地壳深度 5~7 km
外貌特征	外貌像浸染状矿石,矿石矿物在矿石中呈星散状分布,但是仔细观看,矿石矿物和脉石矿物一样呈定向分布	矿石矿物在矿石中呈星散状分布,没有定向,脉石矿物可呈定向分布,也可没有定向分布
有用组分	带出	带入
矿石矿物特征	矿石矿物形成在韧性剪切作用之前,矿石的不同截面,矿物晶体的变形特征不同。矿石矿物在平行片理的面(AB面,⊥C)上,呈星点状、薄片状、斑点状,在垂直片理走向的面(AC面,⊥B)上,呈透镜、长条状,甚至无根钩状,定向排列,与围岩变形特征相同,晶体呈他形,有重结晶的可呈半自形	矿石矿物形成基本与热液作用同时,矿石矿物未变形,与围岩变形特征不同。无论是在平行片理的面(AB面,⊥C)上,还是在垂直片理走向的面(AC面,⊥B)上,矿物晶体的形态特征相同,没有明显定向排列,无明显变形;晶体呈自形程度不同的集合体
脉石矿物特征	脉石矿物形成在韧性剪切作用之前,矿石的不同截面,矿物晶体的变形特征不同,在平行片理的面(AB面,⊥C)上,呈星点状、薄片状、斑点状;在垂直片理走向的面(AC面,⊥B)上,呈透镜状、长条状,甚至无根钩状,发育石英不对称的碎斑,与围岩变形特征相同,矿物晶体呈他形集合体	脉石矿物形成可以与热液作用基本同时,也可以比矿石矿物形成和热液作用早,与热液作用基本同时形成的脉石矿物未变形,与围岩变形特征不同。比矿石矿物形成早的脉石矿物,在平行片理的面(AB面,⊥C)上和垂直片理走向的面(AC面,⊥B)上,变形明显,与围岩变形特征相同,矿物晶体呈自形程度不同的集合体
矿石品位	剪切带型浸染状矿化绝大多数达不到 C_u 的边界品位,基本上是低品位矿石	稀疏浸染状至稠密浸染状矿化都有,可以是富矿石
矿石组构	发育SAC组构	不发育SAC组构
矿石结构构造	具糜棱结构,金属矿物与溶蚀有关的结构发育,如港湾状结构,定向构造发育。不同截面矿石构造特征不同	金属矿物与溶蚀有关的结构不太发育,浸染状构造
产出部位	在整个矿化蚀变带均有产出	主要在块状、准块状和角砾状矿石,以及石英脉型、条带状和网脉状矿石附近产出
围岩有无褪色现象	未受后期浸染状矿化或含矿热液叠加,则无褪色现象	有含矿热液作用,有明显褪色现象

大(图 2G),另一方面递进变形研磨使金属矿物颗粒变细。

总之,剪切型矿石的金属矿物变形与糜棱岩的相同,具有典型的韧性变形特征。这与浸染状、斑点状构造的矿石或矿化岩的金属矿物没有变形明显有区别。

4.3 围岩蚀变及矿化特征

通过平硐、钻孔等探矿工程对剪切型矿体顶、底板岩性的揭露,表明矿体围岩主要为云母质糜棱片岩、云母石英质千糜岩、石英变晶糜棱岩和斜长角闪(片)岩,主要矿物有石英、云母、绿泥石,其次为斜长石、石榴子石、角闪石、电气石和十字石等;围岩普遍具有不同程度的蚀变和矿化,蚀变类型主要有黑云母化、电气石化、钠长石化、硅化、绢云母化、绿泥石化和绿帘石化(图 5D)以及石榴子石化(图 5E、图 3K)等。矿区热液蚀变广泛发育,地表圈出大小蚀变带有 13 条,矿化蚀变带包围了矿体。根据野外及室内镜下观察,蚀变作用经历了早期的黑云母化、斜长石化、十字石化、石榴子石化、角闪石化、钾长石化,中期电气石化、硅化、石榴子石化,晚期的绢云母化、

硅化和绿泥石绿帘石化。在块状矿体附近,强烈的硅化、绢云母化,使岩石发生明显褪色现象,有的片理构造趋于消失,为接近块状、准块状和角砾状矿体的重要标志。伴随着晚期蚀变,围岩在变质热液作用下,常有稀疏浸染状(图 3M)到稠密浸染状以及斑点状(图 3N)矿化。而原有矿石经过早期塑性变形形成剪切带型浸染状矿化,同时形成大量的含矿热液。这种矿化岩石绝大多数达不到矿石的边界品位(0.2%),即使达到,品位一般较低(0.2%~0.4%),当有浸染状矿化叠加时可以达到 0.7%左右。剪切型矿石由于是韧性剪切作用形成,与围岩没有明显的边界,品位也是逐渐过渡的,没有明显的褪色现象。随着温压的降低,非共轴递进变形的发展,成穹晚期在韧性变形的基础上,叠加脆性断裂,早期韧性变形形成的含矿热液沿着这些断裂带活动,一方面热液中的矿质淀积,胶结构造角砾,形成块状、准块状和角砾状矿体(图 2D),另一方面与围岩发生交代作用,形成稀疏浸染状(图 3M)、浸染状(图 3O)和斑点状矿化(图 3N)以及晚期各类蚀变。岩石中的铁镁组分淋失,伴随着硅化、绢云母化,形

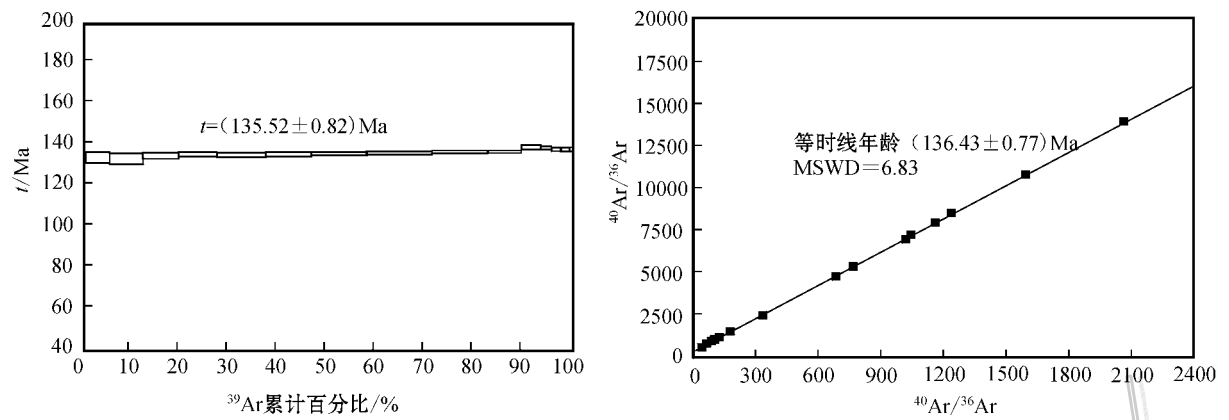


图 7 黑牛洞铜矿床中黑云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 法坪年龄和等时线年龄
Fig. 7 ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of biotite from the Heiniudong Cu-Zn deposit

成的宽窄不同的褪色带(图 5B、5C)。这也许是块状矿体、准块状、角砾状、条带状和网脉状矿体的围岩均有褪色现象,而剪切型矿体无明显褪色现象的原因。

4.5 剪切带型浸染状矿石的形成时代

从矿化和蚀变来看,采自与矿化关系密切的褐棕色黑云母(PD6 平硐 I₃ 矿体底板与围岩接触面),用³⁹Ar-⁴⁰Ar 法(中国科学院广州地球化学研究所,2006 年 5 月)测得的年龄为 $(134.26 \pm 0.5) \text{ Ma}$,成矿时代为早白垩世。

对 II 号矿体成矿期蚀变黑云母(野外编号黑 05-22)进行⁴⁰Ar-³⁹Ar 激光阶段加热法定年测试。测试工作在中国科学院广州地球化学研究所 MAP-215-50 质谱仪上进行,结果见图 7,⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄值为 $(135.52 \pm 0.82) \text{ Ma}$ 。这一年龄与相邻的里伍铜矿成矿期黑云母单矿物 K-Ar 稀释法年龄 $(132.6 \pm 5.0) \text{ Ma}$ (宋鸿林等,1995)基本一致;也与侵入江浪穹隆东部文家坪似斑状黑云母花岗岩的 K-Ar 同位素年龄 $(131 \pm 5) \text{ Ma}$ 及锦屏推覆体剪切带云母 K-Ar 同位素年龄 $(129 \text{ Ma}$ 和 120 Ma ,成都地质矿产研究所,2000)接近,也与锦屏山西韧性剪切带燕山期以来逆冲左行、平移剪切的时间一致(许志琴等,1992)。相邻的里伍铜矿成矿期脉石包体年龄 191.9 Ma (Rb-Sr 法,傅昭仁等,1997),显示成矿晚于早侏罗世。这表明主成矿作用可能发生在燕山期(早白垩世),与区域构造-岩浆热事件的时间基本一致(胡健民等,2005)。

5 讨论和结语

黑牛洞矿区的矿石既有被韧性剪切、构造改造的矿石,即剪切型矿石,也有变形变质形成的含矿热液沿构造面理、裂隙淀积成的浸染状矿石,还有兼具两者特征的矿石。所以,从形成以块状、准块状和角砾状矿石占主体的角度讲,黑牛洞铜矿床称为变成矿床比较恰当。

从目前的资料来看,剪切型矿石能很好地解释黑牛洞矿区野外和实验室取得的资料,而且还能解释矿石各种成分的来源、活化和迁移。它的特点如下:① 外貌特征:外貌像浸染状矿石,矿石矿物在矿石中呈星散状分布,但是仔细观看,矿石矿物和脉石矿物一样呈定向分布;② 矿石的不同截面,矿物晶体的变形特征不同:矿石矿物在平行片理的面(//AB 面,⊥C)上,呈星散状、薄片状、斑点状;在垂直片理走向的面(//AC 面,⊥B)上,呈透镜状、长条状,甚至无根钩状,定向排列明显,与围岩变形特征相同。脉石矿物在平行片理的面(AB 面,⊥C)上,呈星点状、薄片状、斑点状;在垂直片理走向的面(AC 面,⊥B)上,呈透镜状、长条状,甚至无根钩状,发育石英不对称 δ 碎斑,定向排列明显,与围岩变形特征相同;③ 矿石结构构造:金属矿物与溶蚀有关的结构发育,如港湾状结构,定向构造发育;④ 矿石具糜棱结构,发育 SAC 组构;⑤ 围岩无明显褪色现象,矿石矿物和脉石矿物均形成在韧性剪切作用之前;

⑥ 矿体与围岩没有明显界线 Cu 的品位渐变。

大量的剪切型矿石或矿化岩是该区极有可能存在海底火山块状硫化物矿床的直接证据。

这些海底火山块状硫化物经过地壳较深层次的塑性变形、构造改造,已有有用组分再活化、迁出,品位降低。块状、准块状和角砾状矿石附近围岩广泛发育褪色带、剪切型矿石或矿化岩,也常常见到浸染状矿石;有的矿石既具有浸染状矿化的特征,又具有剪切型矿化的特征。

这些特征说明剪切型矿石的形成过程可能是:中元古代江浪一带发生裂谷作用,形成海底火山块状硫化物矿床。后来,又经过海西期的构造活动(沈苏等,1988),形成剪切型矿石或矿化岩以及块状硫化物矿石。最后一次成矿作用是在燕山晚期,随着江浪地区的热成穹作用,发生韧性变形和非共轴递进变形。一方面,热成穹作用早期,原矿石与围岩一起,产生韧性变形和动热变质,形成大量的剪切带型浸染状矿化和含矿热液;另一方面,随着地壳抬升,构造剥蚀,上覆地层变薄,变形由韧性、脆-韧性、脆性,变为晚期脆性变形,形成脆性断裂或构造破碎带。温度压力下降,这些被活化、迁出的有用组分,基本在原处形成的容矿空间(晚期叠加脆性断裂或构造破碎带)淀积、充填,形成以块状、准块状和角砾状矿石为主体的矿床,并在其围岩或先前形成的剪切型矿石或矿化岩中强烈地发生浸染状矿化,形成浸染状矿石。岩石中的铁镁组分淋失,形成褪色带。

总之,剪切型矿石是原有矿石经过韧性剪切改造形成的,貌似浸染状矿石,但是又具有糜棱结构和定向构造的一种受变质的矿石。这种矿石或矿化岩是韧性剪切、构造改造矿床的直接标志。它和非剪切型浸染状矿石一样,是同一构造过程、不同变形阶段、不同成矿作用和不同地球物理、地球化学条件下的产物。

志 谢 项目在野外和室内工作期间,自始至终得到成都地质矿产研究所和四川里伍铜业股份有限公司领导的热情关怀,九龙县龙财矿业股份有限公司彭勇工程师也给予大力支持。成都地质矿产研究所的沈敢富研究员、张立生研究员、潘桂棠研究员,广东省地质矿产局伍广宇教授级高级工程师,湖南省地质矿产局蒋中和教授级高级工程师,四川省地质勘探开发局骆耀南教授级高级工程师和余如龙教授级高级工程师给笔者提出了许多有益的建

议。在成文过程中,成都地质矿产研究所高原室林仕良研究员和显微镜管理中心的戴婕工程师给予了大量帮助。审稿人付出了大量劳动,提出了很好的建议。在此一并致谢!

另外,作者之一汪名杰教授在2008年底的一次野外工作中不幸遇难,在他一周周年忌日之际,付梓此文,以示纪念!

References

- Boulter C A, Fotios M G and Phillips G N. 1987. The golden mile, Kalgoorlie 'a giant gold deposit localized in ductile shear zones by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid' [J]. *Econ. Geol.*, 82: 1661-1678.
- Chen B L, Yang N, Wu G G, Ye D J, Liu X C and Shu B. 2002. Analysis of ore-controlling structure in Ductile shear zone type gold deposits in southern Beishan area, Gansu Province [J]. *Mineral Deposits*, 21: 149-158 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z, Liu Y and Hodges K V. 1990. The Kangmar dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet) [J]. *Science*, 250: 1552-1556.
- Davis G A and Zheng Y D. 2002. Metamorphic core complexes: Definition types and tectonic setting [J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (4-5): 185-192 (in Chinese with English abstract).
- Du Y J and Tian J Y. 1996. Structural control and evolutionary model for Liwu copper deposit [J]. *Journal of Sichuan Geology*, 16(3): 213-218 (in Chinese with English abstract).
- Feng X L, Wang M J, Wen C M, et al. 2007. The preliminary study of the exploration potential of the Liwu copper deposit and its surrounding areas, western Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(1): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- Fu Z R, Yan D P and Song H L. 1997. The structure of the Jianglang metamorphic core complex in the western margin of Yangtze platform and its control on metallization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 71 (2): 113-122 (in Chinese with English abstract).
- Gates A E. 1991. Shear zone control on mineral deposits in the State-line serpentinite, Pennsylvania Piedmont [J]. *Ore Geology Reviews*, 6: 171-184.
- Gu L X, Yang X Q, Wu C Z, Lu J J, Xiao X J, Zheng Y C, Ni P and Tian Z M. 2004. Mechanisms of Cu-Au enrichment in ore mylonites of the Hongtoushan massive sulphide deposit, Liaoning, NE China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 339-351 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Zheng Y C, Tang X Q, et al. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, NE China [J]. *Ore Geology Reviews*, 30: 1-29.
- Guilbert J M and Park C F Jr. 2007. The geology of ore deposits [M]. U. S. A.: Reissued by Waveland Press Inc.

- Hou L W. 1996. Type and origin of the core complexes and the domal deformational-metamorphic bodies in the western margin of Yangtze Craton[J]. *Journal of Sichuan Geology* , 16(1): 7-11(in Chinese with English abstract).
- Hu J M , Meng Q R , Shi Y R and Qu H J. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implication[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 21(3): 867-880(in Chinese with English abstract).
- Hua R M. 1989. On the middle proterozoic rifting in China and its control over stratabound copper deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia* , 13(2): 150-160.
- Hutchinson R W and Albers J P. 1992. Metallogenic evolution of the Cordilleran region of the west United States , the Cordilleran Orogen : Conterminous U S Colorado[M]. U. S. A. : The Geological Society of America. 629-653.
- Hutchinson R W. 1993. A multi-stage , multi-process genetic hypothesis for greenstonehosted gold lodes[J]. *Ore Geology Reviews* , 8 : 349-382.
- Kerrick R. 1986. Fluid infiltration into fault zones : Chemical , isotopic , and mechanical effects[A]. In : Wang C , ed. Internal structure of fault zones[J]. *Pure Appl. Geophys.* , 124(1/2): 225-268.
- Li J Z , Wang M J , Yao P , Zou G F , Tang G L , Li G H , Shen Z W and Zhu X P. 2006. Geology and new perspectives of the Heiniudong copper deposit and its surrounding areas in Jiulong , Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* , 26(4): 69-77(in Chinese with English abstract).
- Lister G S and Snoke A W. 1984. S-C mylonites[J]. *J. Struct. Geol.* , 6 : 617-638.
- Liu Y L. 1996. Foreign research progress in ductile shear-zone gold deposits[J]. *Gold Geology* , 3(3): 76-80(in Chinese with English abstract).
- Ma G T , Wang M J , Yao P , Li J Z , Zhu X P , Chen M H and Liang J. 2009. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of biotite from the Heiniudong copper deposit in Jiulong County , Sichuan Province , and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica* , 83(5): 671-679(in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Li X F , Li H M , Qu X M , Zhang C Q , Xue C J , Wang Z L , Yu J J , Zhang Z H , Feng C Y and Wang R T. 2005. Types and characteristics of endogenetic metallic deposits in orogenic belts in China and their metallogenic processes[J]. *Acta Geologica Sinica* , 79(3): 343-372(in Chinese with English abstract).
- Marshall B and Gilligan L B. 1987. An introduction to remobilization information from ore-body geometry and experimental considerations [J]. *Ore Geology Reviews* , 2 : 87-131.
- Michalski J R , Reynolds S J , Niles P B , et al. 2007. Alteration mineralogy in detachment zones : Insights from Swansea , Arizona[J]. *Geosphere* , 3(4): 184-198.
- Pan X N , Zhao J X , Zhang X Y , et al. 1988. Tectonics and rifting in Kangdian region[M]. Chongqing : Chongqing Press(in Chinese).
- Ramsay J S. 1980. Shear zone geometry[J]. *Journal of Structural Geology* , 2 : 83-89.
- Ran C Y , Zhang Z Y and Zhang W H. 1994. Kangdian rift cycle , copper ore layers structure , and its evolution[J]. *Science in China(Series B)* , 24(3): 325-330(in Chinese).
- Ren Z C and Li Z G. 1984. On the structure control of copper ores in the Kunyang Group[J]. *Acta Geologica Sinica* , 4 : 337-347(in Chinese with English abstract).
- Shen S , Jin M X and Lu Y F. 1988. Mineralization law and prospect for main ore deposits in the Xichang Central Yunnan area[M]. Chongqing Chongqing Press. 7-22(in Chinese).
- Song H L. 1995. An overview of metamorphic core complexes : Characteristics and origin[J]. *Earth Science Frontiers* , 2(1-2): 103-111(in Chinese with English abstract).
- Thorne K G , Lentz D R and Hoy D. 2008. Characteristics of mineralization at the main zone of the Clarence Stream gold deposit , southwestern New Brunswick , Canada : Evidence for an intrusion-related gold system in the northern Appalachian Orogen[J]. *Exploration and Mining Geology* , 17(1-2): 13-49.
- Wang J C , Xia B , Lei M B and Tan B F. 2003. Structural control of the extensional brittle-ductile shear zone on Woxi W-Sb-Au deposit in western Hunan Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* , 33(2): 135-140(in Chinese with English abstract).
- Williams M L and Bauer P W. 1995. The copper Hill Cu-Ag-Sb deposit , Picuris Range , New Mexico : Retrograde mineralization in a brittle-ductile trap[J]. *Econ. Geol.* , 90 : 1994-2005.
- Xu Z Q , Hou L W and Wang Z X. 1992. Process of making mountains , Songpan-Ganzi Orogen , China[M]. Beijing : Geol. Pub. House(in Chinese).
- Yan D P , Song H L and Fu S R. 1997. Tectonic evolution of Nyainqentanghla chain since Mesozoic in Tibet[J]. *Geoscience* , 11(3): 290-297(in Chinese with English abstract).
- Yang Y X , Chou D M , et al. 1988. Precambrian stratabound copper deposits in Xichang-central Yunnan region [M]. Chongqing : Chongqing Press(in Chinese).
- Yao J D. 1990. The cause of forming Liwu copper deposits[J]. *Journal of Sichuan Geology* , 10(4): 251-257(in Chinese with English abstract).
- Yao P , Wang M J , Li J Z , Ma G T and Zhu X P. 2008. Isotopic tracing of the Liwu-type Cu-rich deposits and its ore-forming geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 29(6): 691-696(in Chinese with English abstract).
- Zhang G L , Boulter C A and Liang J C. 2001. Brittle origins for disseminated gold mineralization in mylonite : Gaocun gold deposit , Hetai goldfield , Guangdong Province , South China[J]. *Econ. Geol.* , 96 : 49-59.
- Zhang Z B and Gao D B. 1997. The knowledge of the genesis of the Shizi mountain Cu deposit , Yimer[J]. *Yunnan Geology* , 16 : 352-358(in Chinese with English abstract).
- Zhu X P , Wang M J , Yao P , Xu J S , Li J Z , Chan M H and Tang G L. 2008. Typomorphic characteristics of pyrrhotite as an ore-forming indicator of Heiniudong copper deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica* ,

24(3):562-568(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Davis G A, 郑亚东. 2002. 变质核杂岩的定义、类型及构造背景[J]. 地质通报, 21(4-5):185-192.
- 陈柏林, 杨农, 吴淦国, 叶得金, 刘晓春, 舒斌. 2002. 甘肃北山南带韧性剪切带型金矿床构造控矿解析[J]. 矿床地质, 21: 149-158.
- 杜亚军, 田竞亚. 1996. 李伍铜矿床控矿构造地质特征及演化模式探讨[J]. 四川地质学报, 3: 213-218.
- 冯孝良, 汪名杰, 文成敏. 2007. 浅析里伍铜矿外围找矿前景[J]. 沉积与特提斯地质, 27(1): 9-13.
- 傅昭仁, 宋鸿林, 颜丹平. 1997. 扬子地台西缘江浪变质核杂岩结构及对成矿的控制[J]. 地质学报, 71(2): 113-122.
- 顾连兴, 汤晓茜, 吴昌志, 陆建军, 肖新建, 郑远川, 倪培, 田泽满. 2004. 辽宁红透山块状硫化物矿床矿石糜棱岩铜金富集机制[J]. 地学前缘, 11(2): 339-351.
- 侯立玮. 1996. 扬子克拉通西缘弯状变形变质体的类型与成因[J]. 四川地质学报, 16(1): 6-11.
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 867-880.
- 华仁民. 1989. 中国中元古代裂谷与层控洞矿床[J]. 大地构造与成矿学, 13(2): 150-160.
- 李建忠, 汪名杰, 姚鹏, 邹光富, 唐高林, 李贵鸿, 沈战武, 祝向平. 2006. 四川九龙黑牛洞铜矿床地质特征及其外围找矿方向初探[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 69-77.
- 刘玉琳. 1996. 国外韧性剪切带型金矿研究现状[J]. 黄金地质, 2(3): 76-80.
- 马国桃, 汪名杰, 姚鹏, 李建忠, 祝向平, 陈敏华, 梁鲸. 2009. 四川省九龙县黑牛洞富铜矿床黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年及其地质意义[J]. 地质学报, 83(5): 671-679.
- 潘杏南, 赵济湘, 张选阳, 等. 1988. 康滇构造与裂谷作用[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 冉崇英, 张智筠, 刘卫华. 1994. 康滇裂谷旋回与铜矿层楼及其地球化学演化[J]. 中国科学(D 辑), 24(3): 365-330.
- 任主传, 李宗光. 1984. 论昆阳群铜矿的控矿性[J]. 地质学报, 4: 337-347.
- 沈苏, 金明霞, 陆元法. 1988. 西昌-滇中地区主要矿产成矿规律及找矿方向[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 宋鸿林. 1995. 变质核杂岩研究进展、基本特征及成因探讨[J]. 地学前缘, 2(1-2): 103-111.
- 汪劲草, 夏斌, 雷鸣波, 谭碧富. 2003. 伸展型脆-韧性剪切带对沃溪钨锡金矿床的构造控制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 33(2): 135-140.
- 汪名杰, 李建忠, 姚鹏, 等. 2007. 四川黑牛洞铜矿床普查地质报告[R].
- 吴雪桦. 1991. 同韧性剪切带复成热液金矿床—排山楼金矿[J]. 黄金地质科技, 28(2): 48-49, 62.
- 许志琴, 侯立伟, 王宗秀. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社. 117-136.
- 颜丹平, 宋鸿林, 傅昭仁. 1997. 扬子地台西缘江浪变质核杂岩的出露地壳剖面构造地层柱[J]. 现代地质, 11(3): 290-297.
- 杨应选, 仇定茂, 等. 1988. 西昌-滇中前寒武系层控铜矿[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 姚鹏, 汪名杰, 李建忠, 马国桃, 祝向平. 2008. 里伍式铜矿床同位素示踪及其成矿地质意义[J]. 地球学报, 29(6): 691-696.
- 姚家栋. 1990. 试论李伍铜矿床成因[J]. 四川地质学报, 10(4): 251-258.
- 张志斌, 曹德斌. 1997. 对易门狮子山铜矿床成因的认识[J]. 云南地质, 16(4): 352-35.
- 祝向平, 汪名杰, 姚鹏, 徐金沙, 李建忠, 陈敏华, 唐高林. 2008. 四川黑牛洞铜矿床磁黄铁矿的标型特征及成矿指示意义[J]. 岩石学报, 24(3): 562-568.