

doi: 10.12097/gbc.2022.04.032

黑龙江多宝山铜矿区韧性剪切变形时代及其对铜矿化改造的约束

刘宝山¹, 张春鹏¹, 寇林林^{1*}, 李成禄², 韩仁萍¹, 王宇利¹, 杨宏智¹

LIU Baoshan¹, ZHANG Chunpeng¹, KOU Linlin^{1*}, LI Chenglu², HAN Renping¹, WANG Yuli¹, YANG Hongzhi¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036

1. *Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;*

2. *Research Institute of Regional Geological Survey of Heilongjiang, Harbin 150036, Heilongjiang, China*

摘要: 黑龙江多宝山斑岩铜矿主要赋存于奥陶纪花岗闪长岩中, 少量发育于奥陶纪花岗闪长斑岩及奥陶系多宝山组安山岩中, 铜矿化以浸染状、细脉-浸染状为主。成矿过程经历了斑岩期、剪切变形期。矿区发育韧性剪切变形带, 多宝山组、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、安山质凝灰角砾岩及矿体均发生了剪切变形作用, 沿剪切面发育绢云母新生矿物。绢云母的坪年龄和正反等时线年龄分别为 280.1 ± 1.2 Ma 和 281.4 ± 1.3 Ma、 281.3 ± 1.3 Ma, 在误差范围内基本一致, 限定矿区韧性剪切变形的时间为早二叠世(约 280 Ma)。多宝山斑岩铜矿床主要成矿作用形成于斑岩期, 成矿时代为早奥陶世(约 475 Ma), 早二叠世的韧性剪切变形作用对原生斑岩铜矿化进行了改造, 使矿石的铜进一步富集, 品位相对增高。

关键词: 韧性剪切带; Ar-Ar 年龄; 斑岩型铜矿床; 多宝山; 黑龙江; 矿产勘查工程

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)06-0885-11

Liu B S, Zhang C P, Kou L L, Li C L, Han R P, Wang Y L, Yang H Z. The age of ductile shear deformation and its constraint on Cu mineralization transformation in Duobaoshan Cu deposit, Heilongjiang Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 885-895

Abstract: The Duobaoshan porphyry Cu deposit is mainly found in Ordovician granodiorite, with minor occurrences in Ordovician granodiorite porphyry and andesite of the Duobaoshan Formation. The copper mineralization is primarily disseminated and levee-disseminated. The metallogenic process encompasses a porphyry stage and a shear deformation stage. A ductile shear deformation zone exists in the mining area, involving the Duobaoshan Formation, granodiorite, granodiorite porphyry, andesitic tuff breccia, and ore bodies. New sericite minerals develop along the shear plane. The plateau age, isochron ages and inverse isochron ages of sericite are 280.1 ± 1.2 Ma, 281.4 ± 1.3 Ma, and 281.3 ± 1.3 Ma, respectively, which are consistent within error ranges. The ductile shear deformation occurred during the Early Permian (about 280 Ma). The primary mineralization of the Duobaoshan porphyry copper deposit formed in the Early Ordovician (about 475 Ma). The Early Permian ductile shear deformation reshaped the original copper mineralization, further enriching the copper content and increasing the grade.

Key words: ductile shear zone; Ar-Ar age; porphyry Cu deposit; Duobaoshan deposit; Heilongjiang Province; mineral exploration engineering

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-08-22

资助项目: 国家重点研发计划课题《典型矿集区三维地质结构与矿体定位》(编号: 2017YFC0601305)和中国地质调查局项目《东北地区铜金稀有金属战略性矿产资源调查》(编号: DD20230028)

作者简介: 刘宝山(1970-), 男, 教授级高级工程师, 从事地质矿产调查。E-mail: liubaoshan1111@163.com

* 通信作者: 寇林林(1983-), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 从事矿产地质调查及综合研究工作。E-mail: koulinlin@126.com

黑龙江多宝山斑岩铜矿床位于兴蒙造山带兴安地块东缘,嫩江—黑河大断裂西侧,形成于早古生代大陆边缘弧(刘军等, 2015, 2017)。2011 年已探明获得多宝山和铜山铜矿床累计资源储量铜 335×10^4 t、金 73 t、钼 15×10^4 t(赵元艺等, 2011), 目前紫金矿业集团股份有限公司边探边采, 2021 年对铜山深部靶区实施钻孔查证, 单个钻孔进尺 1748.57 m, 在 1148.41 ~ 1512.05 m 新发现连续的铜矿体, 穿矿厚度达 363.64 m, Cu 平均品位 0.74%, 资源储量扩大已成定局(许逢明等, 2022)。矿床发现至今, 众多地质科研工作者对著名的多宝山斑岩铜矿床开展了大量研究工作, 但多侧重于矿床成因、成岩成矿时代、同位素地球化学等方面的研究(赵一鸣等, 1997; 葛文春等, 2007; 魏浩等, 2011; Liu et al., 2012, 2017; 向安平等, 2012; 刘军等, 2017, Zhao et al., 2019)。三矿沟—多宝山—争光 NW 向韧性剪切带经过多宝山Ⅲ号铜矿带(杜琦, 1988; 赵广江, 2007; 李德荣等, 2011), 该矿带位于剪切带核心部位, 带内铜矿化发育, 矿体品位相对较高, 是矿区 4 条矿带资源储量最大的矿带, 铜资源量 174×10^4 t, 约占矿床总资源量的 73.4%(赵超, 2019), 但对于韧性剪切带的形成时代及其对铜矿化的改造作用还缺乏深入研究。鉴于此, 本文选择多宝山矿区韧性剪切变形带内的绢云母开展了 ^{40}Ar — ^{39}Ar 年龄研究, 精确限定韧性剪切变形带的形成时间, 初步探讨该期韧性剪切变形事件对铜矿化的二次富集改造作用, 对进一步剖析铜矿床的成矿期次具有重要的指示意义。

1 矿床地质特征

多宝山铜矿床位于黑龙江省嫩江县境内, 距多宝山镇 NE 方向约 20 km。区域上位于大兴安岭成矿带东乌珠穆沁旗—嫩江铜—钼—铅—锌—钨—锡—铬成矿带北东端, 嫩江—黑河缝合带北西侧(图 1)。矿区出露地层主要为中奥陶统铜山组和多宝山组, 铜山组以陆源碎屑沉积岩为主, 夹少量火山碎屑岩, 岩石组合为凝灰质砂岩、粉砂岩、砂砾岩、安山质凝灰岩及结晶灰岩; 多宝山组是一套滨海—浅海相的中性火山岩, 岩石组合为变英安岩、安山岩、安山质火山碎屑岩和碎屑火山沉积岩组合, 以安山质火山岩为主, 其中安山岩是矿区的主体岩石(杜琦等, 1988; 韩振新等, 2004; 刘军等, 2010)。矿区中酸性侵入岩体及岩脉发育, 岩石类型主要有早、中奥陶世花岗闪长岩、花岗闪长斑岩, 晚三叠世更长花岗岩、角闪辉长

岩, 中侏罗世安山玢岩、早白垩世闪长岩脉等(赵超, 2019; 刘宝山等, 2020)。锆石 U—Pb 年龄(表 1)表明, 多宝山铜矿区有 5 次岩浆侵入活动, 第一次形成含铜矿化花岗闪长岩(485~478 Ma), 第二次形成含铜矿化花岗闪长斑岩(477~459 Ma), 第三次形成英云闪长岩、更长花岗岩、角闪辉长岩等(231~222 Ma), 第四次形成安山玢岩脉(约 170 Ma), 第五次形成花岗闪长岩、闪长岩脉(128~118 Ma)(蔡文艳, 2020; 刘宝山等, 2020)。

矿区发育韧性剪切构造 NW 向变形带, 强弱变形带相间出现, 中奥陶统多宝山组、铜山组及奥陶纪花岗闪长岩、花岗闪长斑岩等均发生不同程度的韧性变形。多宝山组安山岩中沿糜棱面理发育香肠状石英脉(图版 I—a), 早奥陶世花岗闪长岩糜棱岩化并发育眼球状石英(图版 I—b), 花岗闪长斑岩发育 S—C 组构, 石英颗粒呈 σ 型旋转碎斑(图版 I—c), 安山质凝灰角砾岩中角砾压扁拉长定向排列(图版 I—d), 安山质凝灰角砾岩中旋转透镜角砾(图版 I—e), 花岗闪长岩糜棱面理及波状褶曲(图版 I—f)。可见变形改造的黄铜矿脉, 黄铁矿脉、石英脉穿切浸染黄铜矿石(图版 I—g, h)。

多宝山矿床发育 I、II、III、IV 号矿带, 其中 I 号矿带位于早奥陶世花岗闪长斑岩体北东侧, NW—SE 向延伸, 长度大于其他 3 个矿带, II、III、IV 号矿带位于花岗闪长斑岩体南西侧, 由 NW 向 SE 依次为 III、II、IV 号矿带。该矿床共发育 215 条铜钼矿体, 矿体多发育在早奥陶世花岗闪长岩体内, 少量赋存于中奥陶统多宝山组安山岩及早奥陶世花岗闪长斑岩体内, 总体呈 NW—SE 走向, 倾向 SW, 倾角 $65^\circ \sim 80^\circ$, 矿体受 NW 向韧性剪切带构造控制, 多呈脉状、透镜状, 似层状雁行排列, 其中, III 号矿带位于矿区中部, 为矿区资源储量最大的矿带, 长 300~1400 m, 延深大于 1000 m, 厚度 2~390 m 不等, 呈扁豆状, 沿 $\text{NW}310^\circ \sim 340^\circ$ 展布, 倾向 $\text{SW}220^\circ \sim 250^\circ$, 倾角 $67^\circ \sim 80^\circ$ (蔡文艳, 2020)。

矿石主要结构类型有交代残余结构、自形—他形粒状结晶结构、固溶体分离结构等, 矿石构造主要为浸染状、细脉状, 其次可见块状、角砾状和条带状(蔡文艳, 2020)。金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、斑铜矿, 还可见少量方铅矿、磁铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、辉铜矿、赤铜矿、黝铜矿等; 脉石矿物主要为石英和碳酸盐, 其次还有黑云母、绢云母、钾

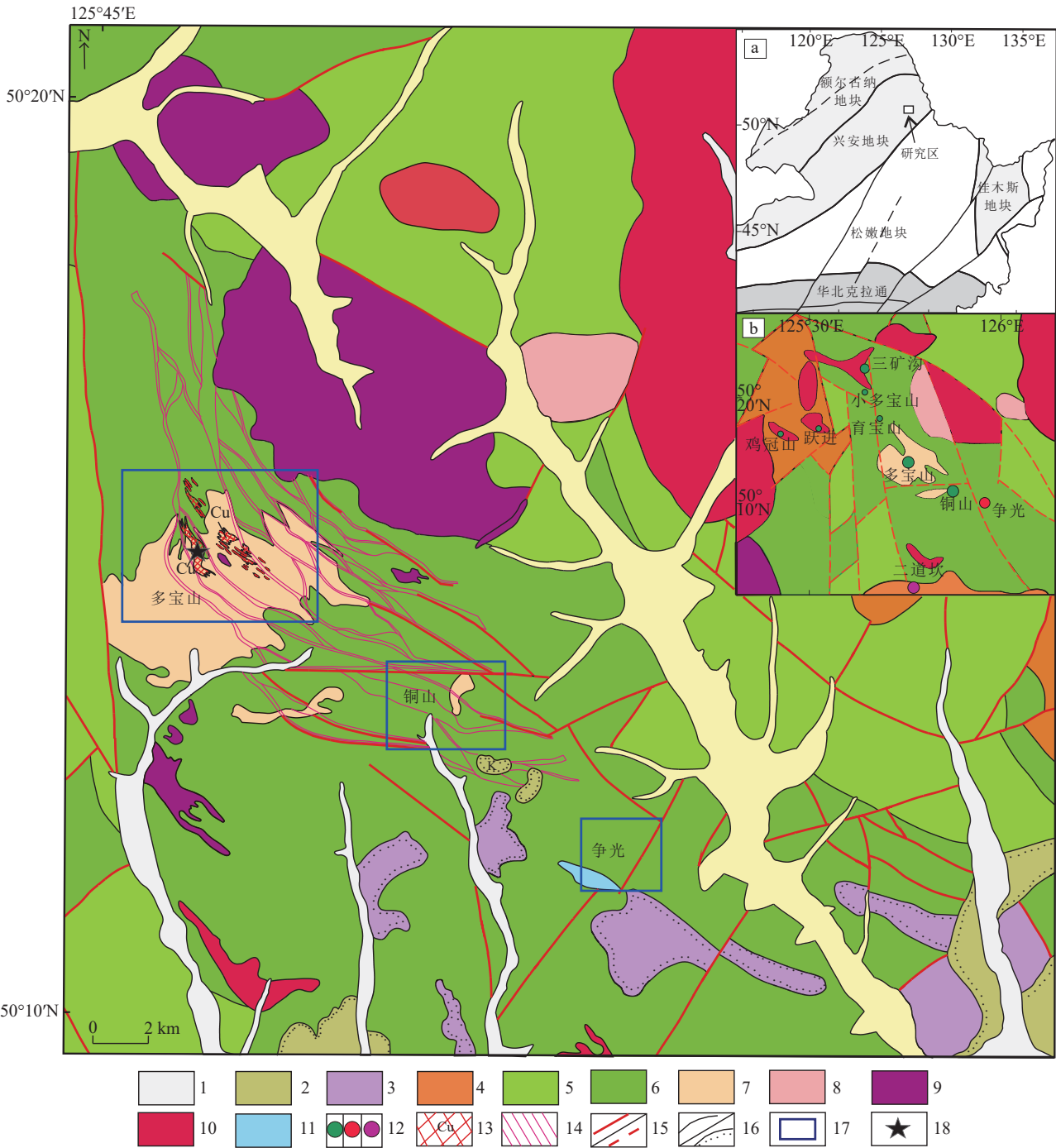


图 1 区域大地构造位置图(a,据张兴洲等,2006 修改)、多宝山矿集区地质简图(b,据郝宇杰,2015 修改)及多宝山矿田地质简图(c,据姚志强等,1995 修改)

Fig. 1 Regional geotectonic map (a), geological sketch map of the Duobaoshan ore concentration area (b) and geological sketch map of the Duobaoshan ore field (c)

1—第四系;2—白垩系;3—三叠系;4—泥盆系;5—志留系;6—奥陶系;7—奥陶纪花岗岩;8—二叠纪花岗岩;
9—三叠纪花岗岩;10—侏罗纪花岗岩;11—闪长岩;12—铜/金/银矿床;13—铜矿体;14—韧性剪切带;
15—断层;16—地质界线;17—矿区范围;18—采样位置

长石、斜长石、绿泥石、绿帘石等(郝宇杰,2015;蔡文艳,2020)。围绕花岗闪长斑岩由里到外依次划分

出石英核→钾长石化带→绢云母化带→青磐岩化带,石英核主要由强硅化蚀变的花岗闪长斑岩构成,

表 1 多宝山铜矿床各期岩体年龄
Table 1 Age list of rock mass in Duobaoshan copper deposit

岩石类型	测试矿物	测试方法	年龄/Ma	参考文献
花岗闪长岩	锆石	SHRIMP U-Pb	485±8	葛文春等, 2007
黑云母花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	484±5	向安平等, 2012
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	482±4	Zeng et al., 2014
花岗闪长岩	锆石	SHRIMP U-Pb	480±5	崔根等, 2008
花岗闪长岩	锆石	SHRIMP U-Pb	480±5	赵焕利等, 2012
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	479±2	Wu et al., 2015
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	479±2	蔡文艳, 2020
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	478±4	向安平等, 2012
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	478.1±3.2	刘宝山等, 2020
花岗闪长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	477±4	Zeng et al., 2014
花岗闪长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	475±5	向安平等, 2012
花岗闪长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	475±2	刘军等, 2017
花岗闪长斑岩	锆石	SIMS U-Pb	475.7 ± 2.8 477.2 ± 2.9	赵超, 2019
花岗闪长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	459.5±2.3	刘宝山等, 2020
花岗闪长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	462.1±4.3	刘宝山等, 2020
英云闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	231±3	Zeng et al., 2014
英云闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	231±2	Hao et al., 2015
晶状闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	223.6 ± 1.4	赵超, 2019
正长斑岩	锆石	LA-ICP U-Pb	222.5 ± 2.2	赵超, 2019
英云闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	223.4 ± 2.6	赵超, 2019
更长花岗岩	锆石	LA-ICP U-Pb	226.3±2.3	刘宝山等, 2020
角闪辉长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	224.3±1.7	刘宝山等, 2020
安山玢岩	锆石	LA-ICP U-Pb	170.1±5.6	刘宝山等, 2020
花岗闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	128±1	蔡文艳, 2020
闪长岩	锆石	LA-ICP U-Pb	118.1±6.6	刘宝山等, 2020

石英呈不规则细脉状、细网脉状交代、铜钼矿化较弱。钾长石化带主要由环绕石英核的细网脉状硅化、团块状分布的钾长石、条带状分布的黑云母及硅化的花岗闪长岩组成, 铜钼矿化极弱。绢云母化带蚀变矿物主要有绢云母、石英及少量绿泥石、绿帘石。青磐岩化带主要包括绿泥石、绿帘石、碳酸盐等蚀变矿物(郝宇杰, 2015; 蔡文艳, 2020)。

本文把多宝山铜矿床成矿过程划分为奥陶纪斑岩铜矿成矿期和后期韧性剪切变形改造活化期。其中, 奥陶纪斑岩期为主要成矿期, 主要形成于早奥陶世(矿石辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 475.1±5.1 Ma(向安平等, 2012)、477.0±2.8 Ma(蔡文艳, 2020))。该期成矿作用不仅形成了多宝山铜矿床, 而

且形成了铜山铜矿床及争光金矿床(郝宇杰, 2015; 蔡文艳, 2020)。韧性剪切构造变形期主要是剪切变形作用对先期形成的铜矿石起活化改造作用, 表现为金属矿物黄铁矿、黄铜矿沿 NW 向糜棱面理的定向排列, 黄铁矿裂开并出现旋转碎斑。

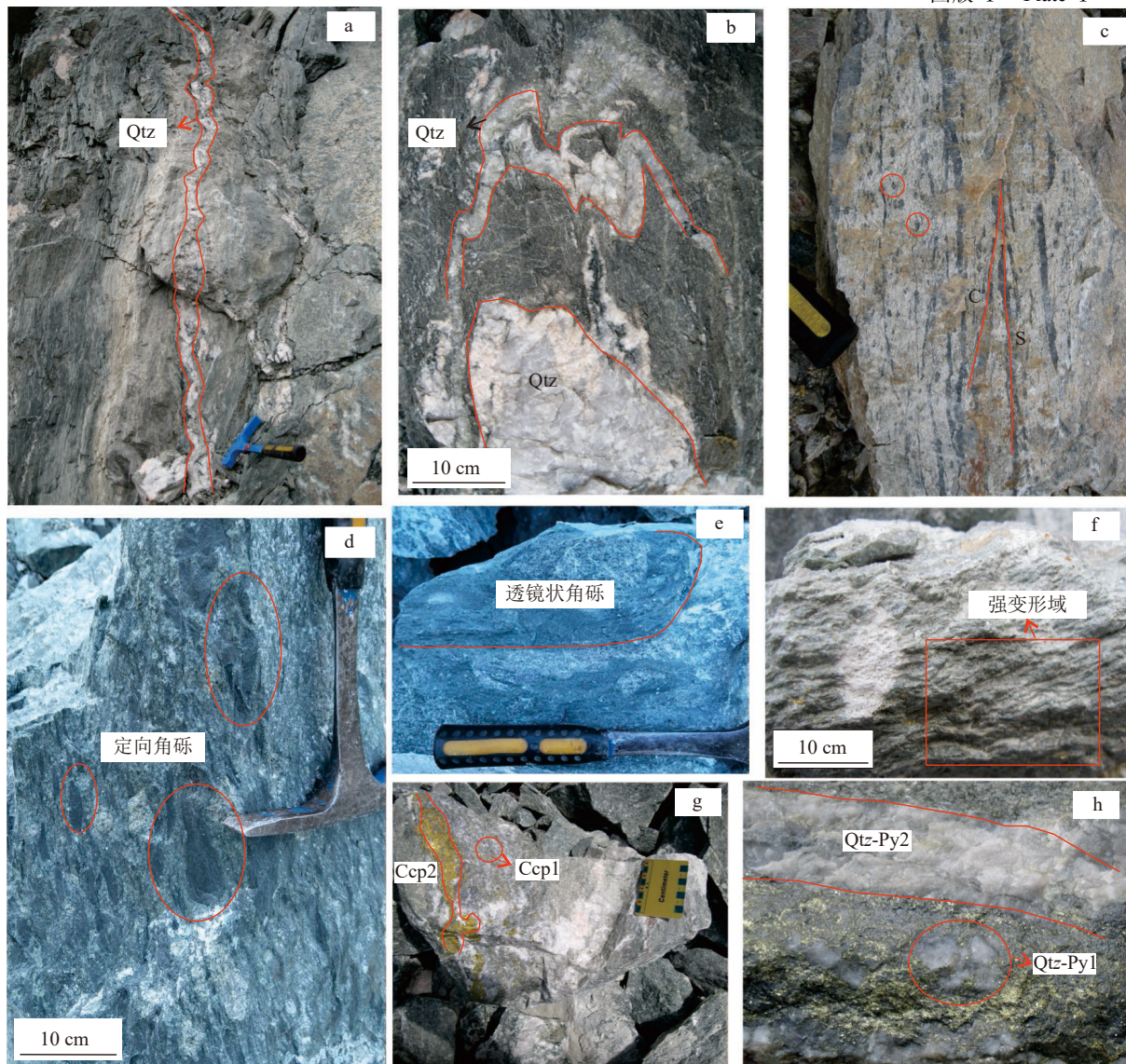
2 样品与测试方法

2.1 样品特征

本次用于 Ar-Ar 定年的样品(DBS30)采自多宝山铜矿Ⅲ号矿带韧性变形较强烈的黄铁绢英岩化花岗质糜棱岩(图 2), 样品位于 NW 向韧性剪切带上。

岩石强烈糜棱岩化, 具有明显的定向性, 呈糜棱组构。岩石主要由绢云母和石英组成。绢云母多呈

图版 I Plate I



a. 沿安山岩糜棱面理发育的香肠状石英脉; b. 糜棱岩化花岗闪长岩发育眼球状石英; c. 花岗闪长斑岩发育 S-C 组构, 石英颗粒呈 σ 型旋转碎斑; d. 安山质凝灰角砾岩中角砾定向排列; e. 安山质凝灰角砾岩中旋转透镜状角砾; f. 花岗闪长岩糜棱面理及波状褶曲; g. 浸染状早期黄铜矿 (Ccp1) 和变形改造的晚期黄铜矿 (Ccp2); h. 浸染状早期石英-黄铁矿 (Qtz-Py1) 和变形改造的晚期石英-黄铁矿脉 (Qtz-Py2)。

Qtz—石英; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿

细鳞片状, 具明显的定向性, 片径小于 0.1 mm, 低突起, 单偏光下无色, 干涉色可至二级, 其含量约为 75%; 石英多呈他形粒状, 常具磨圆, 为岩石受挤压磨损所致, 粒径为 0.1~0.6 mm, 无解理, 裂隙发育, 局部呈波状消光, 含量约为 25%。岩石矿化蚀变发育, 黄铁矿呈脉状沿糜棱面理发育, 石英脉平行黄铁矿脉, 也顺糜棱面理产出。

2.2 测试方法

单矿物绢云母的分选由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。采集的矿石样品经过粉碎、分

离、粗选和精选处理过程, 获得纯度大于 99% 的绢云母单矿物样品, 再进行超声波清洗处理。

Ar-Ar 同位素年龄测定在澳大利亚墨尔本大学氩-氩实验室进行。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素使用 Thermofisher ARGUSVI 多接收质谱仪进行激光分段升温分析: 样品在 450℃ 下放气 2 h, 之后在 500~1350℃ 之间逐渐加热。达到所需温度需要约 3 min, 每个加热步骤的持续时间为 20 min。萃取气体在被送入 VG3600 质谱仪之前, 先由多台 SAES 锆-铝 (Zr-Al) 吸气剂净化清洗。通过对标准空气体积的

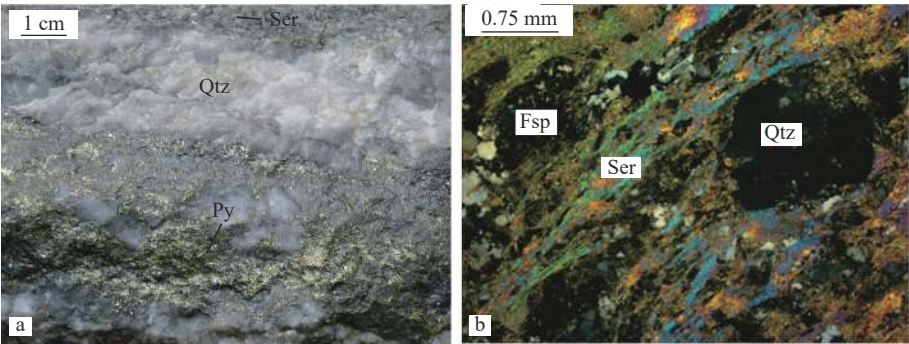


图 2 黄铁绢英岩宏观特征

Fig. 2 Photograph and microscope photograph of beresite in Duobaoshan copper deposit

a—黄铁绢英岩化花岗闪长岩;b—花岗闪长岩绢云母条带状发育,长石及石英拉长定向排列。

Qtz—石英;Py—黄铁矿;Ser—绢云母;Fsp—长石

分析检查质量歧视效应和仪器校准,中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的K₂SO₄和CaF₂获得。发布的数据已经修正系统背景、质量歧视效应、梯度影响和大气污染。除非另有说明,与年龄测定相关的误差不包括J值的不确定性、标样年龄误差影响和衰减常数(McDougall et al.,1999)。

3 测试结果

绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年分析结果见表 2。绢云母 1000~1500℃ 的 7 个温度阶段组成了一个良好的年龄坪,坪年龄(*t_p*)为 280.1 ± 1.2 Ma,MSWD=2.7,对应 47.3%的³⁹Ar 释放量(图 3)。相应的³⁹Ar/³⁶Ar-⁴⁰Ar/³⁶Ar 等时线年龄(*t_i*)为 281.4±1.3 Ma,MSWD=1.7。反等时线年龄为 281.3±1.3 Ma,

MSWD=1.7。坪年龄、等时线年龄和反等时线年龄十分接近,在误差范围内一致。

4 讨论

4.1 韧性变形时代

绢云母经常被用于测定同位素 Ar-Ar 年龄,以确定矿床成矿时代及韧性剪切构造变形时间。绢云母 Ar-Ar 同位素体系对后期岩浆及构造活动的地质作用十分敏感,特别容易受到后期地质作用的影响改造,出现氩丢失,进而呈现明显的扩散丢失年龄图谱(Hanson et al., 1975),而未受后期地质热事件扰动的绢云母形成平坦型年龄图谱,为可信年龄,其坪年龄可用于地质解释(邱华宁等, 1997; 陈文等, 2011)。本次测定的绢云母在加温至 1000~1500℃ 呈平坦型年龄谱(280.1± 1.2 Ma, MSWD=2.7),可以代表其

表 2 多宝山铜矿床绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析结果

Table 2 ⁴⁰Ar-³⁹Ar analytical data forsericitee from Duobaoshan copper deposit

温阶 /℃	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar ⁺ /%	F(⁴⁰ Ar ⁺ / ³⁹ Ar)	³⁹ Ar/10 ⁻¹⁴ mol	³⁹ Ar/%	年龄/Ma	±1σ/Ma
800	21.5894	0.0008	0.0154	98.85	21.3407	15.76	1.44	235.7	1.1
850	22.5433	0.0001	0.0036	99.80	22.4978	178.57	16.31	247.7	1.2
900	23.2568	0.0002	0.0017	99.75	23.1986	172.55	15.76	254.9	1.2
950	23.9041	0.0002	0.0015	99.79	23.8530	240.11	21.93	261.6	1.2
1000	25.7973	0.0002	0.0017	99.79	25.7442	169.93	15.52	280.8	1.3
1050	26.1524	0.0002	0.0027	99.72	26.0803	110.43	10.08	284.2	1.3
1100	25.7788	0.0003	0.0024	99.66	25.6919	99.72	9.11	280.3	1.3
1150	25.7389	0.0003	0.0042	99.63	25.6426	70.99	6.48	279.8	1.3
1200	25.7468	0.0005	0.0222	99.45	25.6046	17.81	1.63	279.4	1.3
1300	25.7864	0.0008	0.0991	99.11	25.5595	13.57	1.24	278.9	1.3
1500	26.1768	0.0029	0.4590	96.89	25.3707	5.70	0.52	277.0	1.4

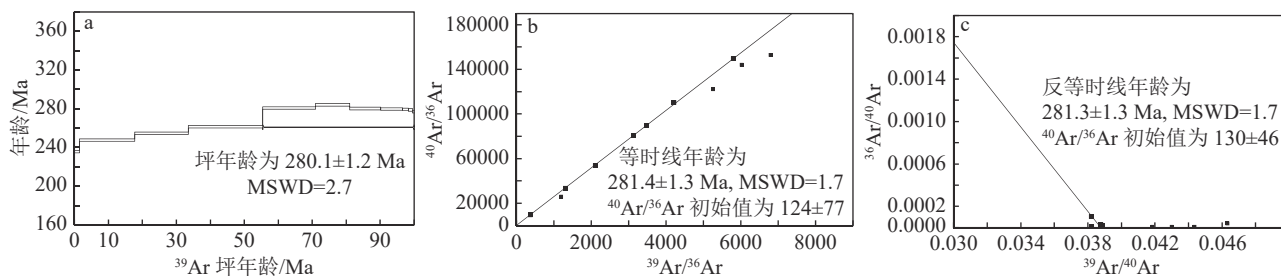


图 3 多宝山铜矿床热液蚀变绢云母 ^{40}Ar – ^{39}Ar 坪年龄(a)、正等时线(b)和反等时线(c)年龄图

Fig. 3 ^{40}Ar – ^{39}Ar plateau age (a), isochron age (b) and inverse isochron age (c) of hydrothermal altered sericite in Duobaoshan copper deposit

形成的冷却结晶年龄。而 800~950℃ 出现异常的年龄谱(261.6~235.7 Ma), 其中, 261.6~254.9 Ma 年龄可能与兴安地块晚古生代造山后一次伸展事件有关(Wu et al., 2002, 2011), 247.7~235.7 Ma 年龄可能与三叠纪岩体(表 1)侵入有关。

从多宝山矿区Ⅲ号矿坑北东壁地质体出露可以清晰看出(图 4, 刘宝山等, 2020), 形成于晚奥陶世的安山质凝灰角砾岩(453 Ma)、安山岩(447 Ma, Wu et al., 2015)发生韧性变形, 而更长花岗岩(226 Ma)未发生变形, 表明 NW 向韧性剪切带形成于 447~226 Ma 之间。为进一步精确限定韧性变形时代, 本文收集了有关矿区绢云母等矿物 Ar–Ar 测试年龄。

刘驰等(1995)为了确定多宝山铜矿的成矿时代, 对多宝山矿床的绢云母、钾长石、黑云母、伊利石进行了 Ar–Ar 测年, 10 件样品获得 2 组年龄数据, 一组为 253~220 Ma, 另一组为 184~162 Ma。从多位学者的研究成果看(郝宇杰, 2015; 刘军等, 2017; 赵超, 2019; 蔡文艳, 2020), 多宝山铜矿的成矿时代为早奥陶世(约 475 Ma)已成共识。因此, 这 2 组年龄应与后期区域岩浆活动引起的水热事件有关。

综合刘驰(1995)测得的单矿物 Ar–Ar 年龄及本次获得的绢云母 Ar–Ar 年龄谱, 按成矿时间大致划分为 4 期, 早二叠世(284~277 Ma)、晚二叠世(261~253 Ma)、中晚三叠世(247~235 Ma)、早侏罗世(184~173 Ma), 其中, 早侏罗世(184~173 Ma)与矿区安山玢岩脉(170 Ma)年龄相近(刘宝山等, 2020), 与该期岩浆活动事件有关。

综合前述, 基于矿区未发现与本次获得绢云母 Ar–Ar 坪年龄(280.1±1.2 Ma, MSWD=2.7)相近或同期的岩体, 不存在热扰动事件, 推断该年龄可以代表韧性剪切变形时代。

4.2 韧性变形对铜的活化改造作用

斑岩铜矿改造与叠加指在主成矿期形成铜矿床之后, 又经历了后期的构造、岩浆和热液作用对前期形成原斑岩铜矿的改造和叠加过程(相鹏等, 2012)。

本文用于 ^{40}Ar – ^{39}Ar 年龄测定的绢云母沿含矿花岗闪长岩糜棱面理分布, 表明它们是后期韧性剪切构造变形过程中的新生矿物, 其形成时间可以代表多宝山矿区韧性剪切构造变形带形成的时代。绢云母的坪年龄 280.1±1.2 Ma, 表明多宝山矿区韧性剪切构造变形作用形成时间发生在早二叠世。由此可见, 韧性剪切构造变形作用时间明显晚于多宝山铜矿床的形成时代(约 475 Ma)。宏观上, 矿石中较粗大的黄铜矿脉、黄铁矿脉、石英脉沿糜棱面理产出, 与韧性剪切带 NW 向构造产状协调一致, 镜下观察亦显示黄铁矿受该韧性剪切作用产生微裂隙, 具有剪切变形特征, 表明矿体明显受韧性剪切带构造控制, 韧性剪切变形作用可能对原矿体起到了改造和富集作用。

多宝山矿区Ⅲ号采坑赋矿围岩多宝山组及奥陶纪含铜的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩均发生强烈韧性剪切构造变形, 在韧性剪切构造变形带内不仅金属矿物黄铜矿脉及黄铁矿脉沿着糜棱面理分布, 而且石英脉也多平行黄铁矿脉、黄铜矿脉沿糜棱面理产出, 矿石强烈变形处黄铁矿及黄铜矿含量均较高, 主要呈现出 4 种脉体类型: 波状弯曲的黄铜矿脉(图 5-a)、透镜状黄铁矿–黄铜矿脉(图 5-b)、黄铁矿脉和石英脉平行相间产出(图 5-c)、较纯的灰白色石英脉(图 5-d), 这些脉体宽多为 0.5~1 cm, 个别达 20 cm。奥陶纪花岗闪长岩与花岗闪长斑岩是多宝山铜矿的含矿斑岩体, 铜矿化多以浸染状、细脉浸染状为主, 因此, 具有铜品位较低、规模较大等特点。多宝山斑岩铜矿沿 NW 向剪切带产出的黄铜矿

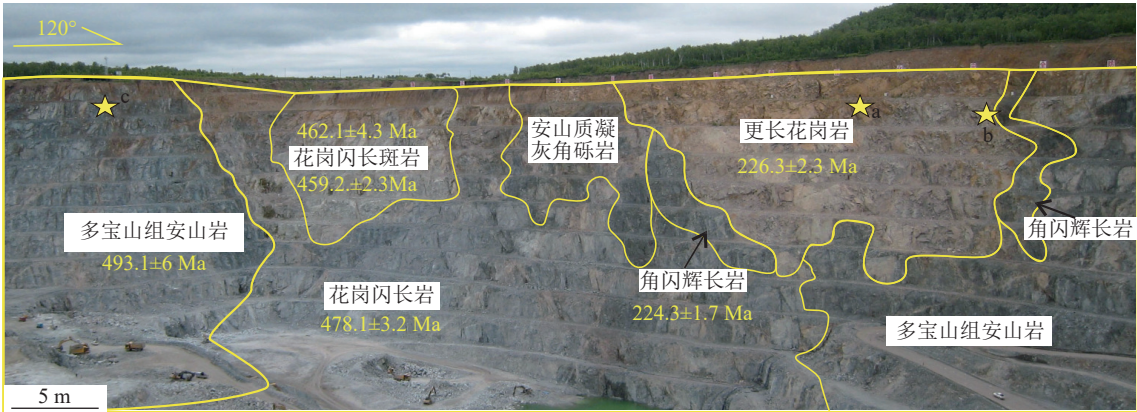


图 4 多宝山Ⅲ号矿坑北东壁地质体分布特征(据刘宝山等,2020)

Fig. 4 Geological body distribution characteristics of the No. III northeast wall of Duobaoshan copper deposit

脉均相对较宽,其矿化形式与非变形的浸染状、细脉浸染状的矿脉系截然不同,其形成与 NW 向强烈韧性剪切构造活动紧密相关。但并非所有剪切带都发育宽脉状矿体,只有当剪切带叠加在早期铜矿化带上时,才明显富集形成透镜状、宽脉状矿体(韩成满等,2007)。

刘宝山等(2020)镜下观察发现,显微尺度的构造变形特征指示韧性剪切构造变形方向为左行,这与宏观野外露头观察的现象一致。由图 6-a~c 可

见,在韧性剪切构造流动的作用下,石英、黄铁矿碎斑发生韧性剪切变形,有的呈透镜状、长条状,碎斑周围的绢云母矿物定向排列,黄铁矿在递进应力剪切构造作用下,发生了旋转及破裂,部分碎片具有向韧性剪切方向倾斜的趋势,一侧的石英矿物构成梳状压力影。韧性剪切带内变形的石英-黄铁矿-黄铜矿脉中黄铁矿发育裂隙,可见后期的黄铜矿脉沿着裂隙充填于黄铁矿中(图 6-d),反映出后期热液流体活化运移的填充作用,进一步显示了活化迁移的化

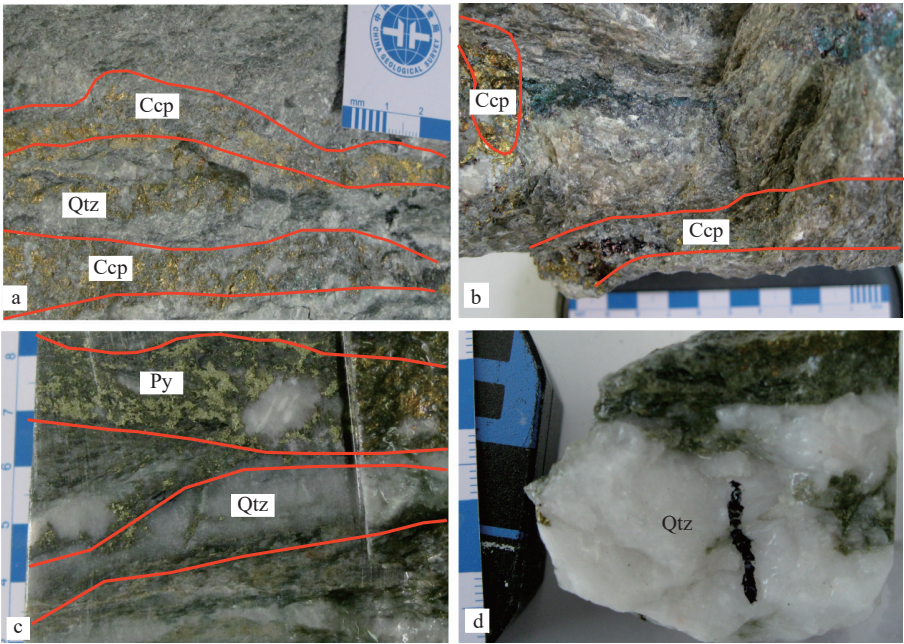


图 5 受剪切作用改造黄铜矿矿石特征

Fig. 5 Characteristics of chalcopyrite ore transformed by shear action

a—波状弯曲的黄铜矿脉及石英脉;b—沿糜棱面理产出的黄铜矿脉及左旋透镜状黄铜矿;c—近平行产出的黄铁矿脉及石英脉;d—较纯的石英脉。Ccp—黄铜矿; Qtz—石英; Py—黄铁矿

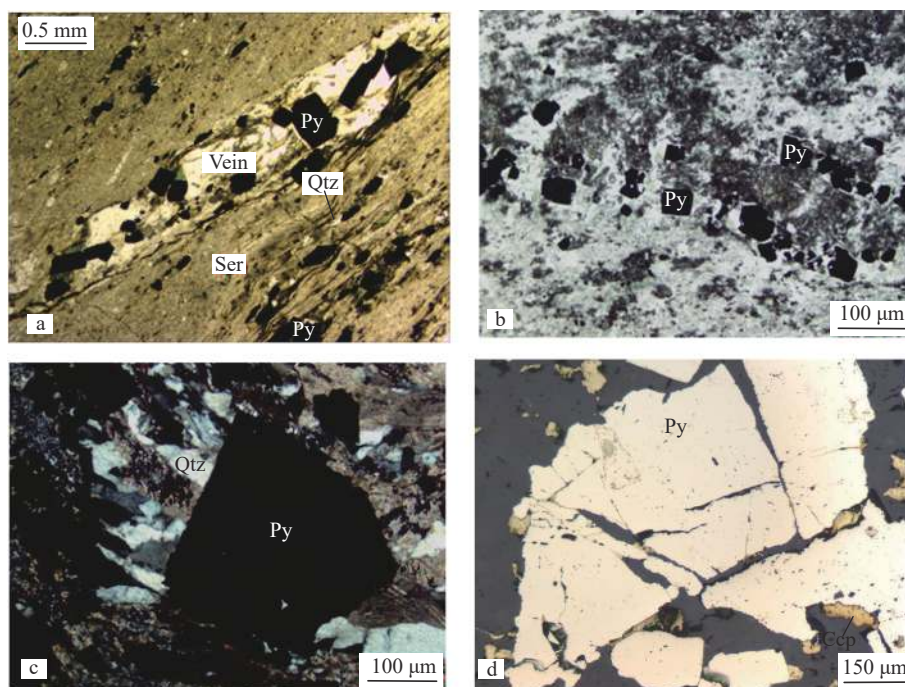


图 6 韧性剪切构造特征及矿石矿物分布特征

Fig. 6 Characteristics of ductile shear structure and distribution characteristics of ore minerals

a—糜棱岩中黄铁矿、绢云母、石英沿糜棱面理定向分布,可见黄铁矿石英压力影;b—黄铁矿沿糜棱面理定向分布;c—黄铁矿发育石英压力影;d—黄铜矿沿黄铁矿裂隙充填交代。Vein—石英脉;Ser—绢云母;Qtz—石英;Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿

学特征。矿石中部分黄铜矿—黄铁矿脉经韧性剪切作用后,被改造成大小不一的透镜体、豆荚状、肠状,反映变形过程中部分黄铜矿向低压处呈塑性状态,表明多宝山铜矿床在早奥陶世形成之后,铜铅金等硫化物在韧性剪切作用下经历了再活化。在显微构造尺度,矿区的韧性构造变形特征十分明显,不仅石英、长石、云母等常见的造岩矿物发生了韧性剪切构造变形,而且金属硫化物黄铁矿也发生了定向碎裂,表明矿区后期构造强烈且活动明显,强烈的韧性剪切变形需要较高的温度和压力条件(陈柏林, 2000; 徐桓等, 2014),有利于成矿流体的搬运、迁移与再次富集,使得成矿作用在前期原有斑岩型铜矿化的基础上,进一步得到富集和叠加。

4.3 韧性变形对铜的活化富集作用

与中酸性侵入岩体有关的斑岩铜铅矿床,矿化一般以星点浸染状、细脉浸染状为典型代表,具有品位低、规模大等特点(杜琦, 1988; 韩成满等, 2007)。而多宝山斑岩铜矿Ⅲ号矿带受韧性剪切改造矿石的黄铜矿脉较粗大,与未受剪切变形改造的浸染状、细脉浸染状矿石明显不同。

朱永峰(2004)和杨晓勇(2005)研究发现,韧性

剪切构造带中大都有流体渗透,流体和岩石的相互化学作用不仅使原岩的成分发生了改变,而且使流体本身的成分和物理化学性质发生了改变,并可能由此导致 Cu 元素进一步沉淀而促成铜富集成矿。强烈的韧性剪切构造作用难于形成具有工业价值的矿床,因为在剪切作用过程中受高温高压等因素的影响,铜金等物质在岩石中是流失的,不是增加的,对成矿不利,而且韧性剪切构造作用也难以直接为矿床的形成提供充足的成矿物质与流体,只有当韧性剪切作用叠加在原有矿体上,矿床中的 Zn—Cu—Au—Ag 等成矿元素进一步活化,在塑性变形和韧性剪切作用中的富集,可能产生韧性剪切作用的改造成矿(刘连登等, 1991)。

赵超(2019)对多宝山铜矿床斑岩型矿脉中黄铜矿及剪切带中黄铜矿硫同位素研究发现,典型斑岩型矿脉中黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -3.0‰ — $+1.4\text{‰}$ 之间,平均值为 -1.3‰ ,强片理化带中黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -12.9‰ — -2.2‰ 之间,平均值为 -5.0‰ ,强片理化带具有更低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,其硫同位素组成相比斑岩型矿脉中的黄铜矿硫同位素明显偏低,表明在强烈的韧性剪切构造变形过程中产生的构造流体携带有轻硫

(^{32}S)和 Cu、Au 等金属元素,在低压应力区及韧性剪切构造带内促使 Cu、Au 元素沉淀富集成矿,并有可能在局部较大的赋矿构造空间内形成宽大的铜金脉体,这些轻硫(^{32}S)和 Cu、Au 元素较大可能来自于前期斑岩成矿阶段的细脉浸染状矿化或多宝山组围岩。因此,强烈的韧性剪切构造作用可能造成原生斑岩阶段的铜金成矿物质再次重新活化富集,并被构造流体搬运迁移至低压应力区及韧性剪切构造带内沉淀,形成以低 $\delta^{34}\text{S}$ 值黄铜矿为主的宽大矿体。另外,杜琦(1988)的研究也认证了韧性变形对多宝山铜矿床铜的活化富集作用,在非片理化带上,Cu 含量一般只有 $300\times 10^{-6}\sim 1100\times 10^{-6}$,而在片理化带上,一般含 Cu $1000\times 10^{-6}\sim 8000\times 10^{-6}$,显示铜明显富集。如果片理化带不是叠加在含铜带上,即使发生过韧性剪切片理化作用的叠加改造,也仅使 Cu 得到一定的富集,仍然不足以形成工业矿体。Ⅲ号主矿带位于 NW 向弧形构造带内片理化带的核心部位,矿带的中部 Cu 品位相对较高,铜矿化品位多大于 0.3%。按工业指标进行矿体圈定后,可以构成稳定而连续的厚大矿体。

5 结 论

(1)黑龙江多宝山铜矿区绢云母的坪年龄和正反等时线年龄分别为 $280.1\pm 1.2\text{ Ma}$ 和 $281.4\pm 1.3\text{ Ma}$ 、 $281.3\pm 1.3\text{ Ma}$,在误差范围内基本一致,韧性剪切变形时间约为 280 Ma,为早二叠世。

(2)韧性剪切作用对原生斑岩铜矿化进行了活化改造,使矿石中的铜进一步富集,品位相对增高。

致谢:写作过程中得到中国地质调查局天津地质调查中心朱群总工及沈阳地质调查中心邵军研究员的指导,两位审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚的谢意。

参考文献

- Hanson G N, Smimons K P, Bence A E. 1975. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectrum ages for biotite, hornblende and muscovite in a contact metamorphic zone[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(9): 1269–1278.
- Hao Y J, Ren Y S, Duan M X, et al. 2015. Tectonic setting of Triassic magmatic and metallogenic event in the Duobaoshan mineralization area of Heilongjiang Province, NE China[J]. *Geological Journal*, 52: 67–91.
- Liu J, Li Y, Zhou Z H, et al. 2017. The Ordovician igneous rocks with high Sr/Y at the Tongshan porphyry copper deposit, satellite of the Duobaoshan deposit, and their metallogenic role[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 600–614.
- Liu J, Wu G, Li Y, et al. 2012. Re–Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 300–312.
- McDougall I, Harrison T M. 1999. Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method (2nd ed)[M]. Oxford University Press: 269.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H, et al. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187: 143–173.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1–30.
- Wu G, Chen Y, Sun F Y, et al. 2015. Geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes of the early Paleozoic igneous rocks in the Duobaoshan area, NE China, and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 229–250.
- Zhao C, Chao Z, Qin K Z, et al. 2019. Early Palaeozoic high–Mg basalt–andesite suite in the Duobaoshan Porphyry Cu deposit, NE China Constraints on petrogenesis, mineralization, and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, (71): 91–116.
- Zeng Q D, Liu J M, Chu S X, et al. 2014. Re–Os and U–Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu–Mo–(Au) deposit, northeast China, and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 895–909.
- 蔡文艳. 2020. 黑龙江省多宝山矿集区铜-钼-金多金属成矿作用研究[M]. 长春: 吉林大学博士学位论文.
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 等. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. *地质学报*, 85(11): 1917–1947.
- 陈柏林. 2000. 糜棱岩型金矿元素丰度与构造变形的关系[J]. *矿床地质*, 19(1): 17–24.
- 崔根, 王金益, 张景仙, 等. 2008. 黑龙江多宝山花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *世界地质*, 27(4): 387–394.
- 杜琦, 赵玉明, 卢秉刚, 等. 1988. 多宝山斑岩铜矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu, Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. *科学通报*, 52(20): 2407–2417.
- 韩振新, 徐衍强, 郑庆道. 2004. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及演化[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社.
- 韩成满, 王长水, 李宗民, 等. 2007. 多宝山铜矿资源潜力[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝宇杰. 2015. 黑龙江多宝山矿集区成矿作用与成矿规律研究[R]. 长春: 吉林大学: 1–199.
- 李德荣, 吕福林, 刘素颖, 等. 2011. 黑龙江省嫩江县三矿沟矿区地质特征及找矿方向[J]. *中国地质*, 38(2): 415–426.
- 刘驰, 穆治国, 刘如曦, 等. 1995. 多宝山斑岩铜矿区水热蚀变矿物的激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年[J]. *地质科学*, 30(4): 329–337.
- 刘军, 周振华, 何哲峰, 等. 2015. 黑龙江省铜山铜矿英云闪长岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 34(2): 289–308.

- 刘军, 周振华, 欧阳荷根. 2017. 黑龙江省多宝山 Cu-Mo 矿床成矿斑岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 矿床地质, 36(5): 1057-1073.
- 刘军, 武广, 钟伟, 等. 2010. 黑龙江省多宝山斑岩型铜(钼)矿床成矿流体特征及演化[J]. 岩石学报, 26(5): 1450-1466.
- 刘宝山, 张春鹏, 宋万兵, 等. 2020. 黑龙江多宝山斑岩铜矿床叠加改造地质特征及成因[J]. 大地构造与成矿学, 44(6): 1076-1096.
- 刘连登, 姚凤良, 卿敏, 等. 1991. 中国的金矿与韧性剪切带[J]. 黄金科技动态, (3): 1-12.
- 邱华宁, 彭良. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 魏浩, 徐九华, 曾庆栋, 等. 2011. 黑龙江多宝山斑岩铜(钼)矿床蚀变-矿化阶段及其流体演化[J]. 岩石学报, 27(5): 1361-1374.
- 向安平, 杨郢城, 李贵涛, 等. 2012. 黑龙江多宝山斑岩 Cu-Mo 矿床成岩成矿时代研究[J]. 矿床地质, 31(6): 1237-1248.
- 相鹏, 张连昌, 徐兴旺, 等. 2012. 新疆青河县玉勒肯-哈腊苏叠加改造型斑岩铜金(钼)矿床地质特征及成因[J]. 岩石学报, 28(8): 2369-2380.
- 徐桓, 陈天红, 龚全德, 等. 2014. 内蒙古苏尼特左旗地区韧性剪切带与金矿的关系[J]. 矿物岩石, 34(2): 68-76.
- 许逢明, 赵院冬, 李成立, 崔健, 等. 2022. 黑龙江多宝山矿集区三维地质建模与深部找矿预测[J]. 地质与勘探, 58(3): 629-652.
- 姚志强, 张德全, 赵玉明. 1995. 黑龙江多宝山及其邻区寻找大型斑岩铜矿的研究[R]. 黑龙江省地矿局第三地质调查所.
- 杨晓勇. 2005. 论韧性剪切带研究及其地质意义[J]. 地球科学进展, 20(7): 765-771.
- 赵超. 2019. 中亚造山带东段多宝山含金斑岩铜矿床多期岩浆-构造-成矿作用[M]. 北京: 中国科学院大学博士学位论文.
- 赵广江. 2007. 多宝山矿集区构造演化及其对铜金成矿的控制作用[R]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.
- 赵焕利, 刘旭光, 刘海洋, 等. 2012. 黑龙江多宝山铜矿床中花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其构造意义[J]. 地质与资源, 21(5): 421-424.
- 赵一鸣, 毕承思, 邹晓秋, 等. 1997. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄[J]. 岩石学报, 18(1): 61-67.
- 赵元艺, 王江朋, 赵广江, 等. 2011. 黑龙江多宝山矿集区成矿规律与找矿方向[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1676-1688.
- 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 等. 2006. 中国兴蒙吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. 中国地质, 33(4): 816-823.
- 朱永峰. 2004. 古老克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿: 金矿成矿条件与成矿环境分析[J]. 矿床地质, 23(4): 509-519.