



煎茶岭镍矿——是岩浆还是热液成因*

姜修道 魏钢锋 聂江涛

(长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要 煎茶岭镍矿是秦岭造山带中至今发现的唯一镍矿床,其成矿特征在铜镍硫化物矿床中具有特殊性。通过对矿床地质、地球化学特征和成矿地质条件的综合研究,发现该矿床严格受韧性剪切带和花岗斑岩的控制,近矿围岩蚀变强烈,矿石以交代结构为特征,细脉状构造发育。矿物生成顺序研究表明,矿石中金属硫化物明显晚于超基性岩,而与其发生蚀变的时间相近,同时由于矿体附近的钠长斑岩发生了强烈的围岩蚀变,因此成矿作用也晚于钠长斑岩。矿石微量元素和稀土元素表现出明显的双重性,在继承超基性岩特征的同时,又与矿区中酸性岩存在密切的联系。在硫同位素组成上,矿石明显地富集重硫,其 $\delta^{34}\text{S}$ 无论是变化范围还是平均值均远离镁铁-超镁铁质岩石,而与矿区中酸性岩中黄铁矿的硫同位素具有很好的一致性。说明该矿床应是由热液作用形成的,成因类型属岩浆热液改造型矿床。

关键词 地质学;镍矿床;成因类型;煎茶岭

中图分类号: P618.63

文献标志码: A

Jianchaling nickel deposit: Magmatic or hydrothermal origin?

JIANG XiuDao, WEI GangFeng and NIE JiangTao

(College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

The Jianchaling nickel ore deposit is the only nickel deposit discovered in the Qinling orogenic belt, and its geological characteristics are quite unique among the Cu-Ni sulfide deposits. A comprehensive study of geological and geochemical characteristics and metallogenic geological conditions shows that the ore deposit is strictly controlled by the ductile shear zone and the granophyre, with intense wall rock alteration seen in the wall rock near the ore bodies. Ores are characterized by veinlet structure and metasomatic texture. Mineral sequence suggests that metallic sulfides in the ores were obviously formed later than the ultrabasic rock, close to the occurrence of alteration. The alteration of albitophyre near the ore body implies that the metallic sulfides were formed also later than albitophyre. The minor elements and REE in the ores show apparent dual nature, being closely related to the medium-acid rocks besides inheritance from the ultrabasic rock. In terms of sulfur isotope, the ores are evidently rich in $\delta^{34}\text{S}$, whose content range and average value are quite different from those of mafic and ultramafic rocks but identical with things of medium-acid rocks in the ore district. It is thus believed that this nickel deposit was formed by the hydrothermal process and belong genetically to magmatic hydrothermal reformation type.

Key words: geology, nickel deposit, genetics type, Jianchaling

* 本文得到地调项目“煎茶岭金镍矿田构造演化及成矿作用研究”(1212010611807)的资助

第一作者简介 姜修道,男,1960年生,副教授,主要从事矿床地质教学与科研工作。Email: xiudaoj@chd.edu.cn

收稿日期 2010-01-28;改回日期 2010-09-06。李岩编辑。

煎茶岭硫化镍矿床位于松潘-甘孜造山带摩天岭褶皱系东部,勉县-略阳-阳平关(宁强)元古代隆起区北缘,是秦岭造山带中至今发现的唯一镍矿床。虽然品位不高,但因其独特的地质背景和与众不同的成矿特征,历来颇受关注。关于矿床成因,目前比较一致的看法是岩浆矿床(王瑞廷等,2002a;2003)或岩浆熔离-热液改造矿床(任小华,1990;王相等,1996;王瑞廷等,2002b),但岩浆成矿的证据主要来自地球化学研究(汤中立等,2006)。笔者通过综合

研究,发现该矿床控矿因素复杂,成矿作用特殊,矿床成因类型值得商榷。

1 矿区地质概况

1.1 地层

矿区出露地层较为简单,主要包括太古宙结晶基底鱼洞子群、元古宙过渡基底接官亭组以及震旦系盖层断头崖组和九道拐组(图1)。其中鱼洞子群

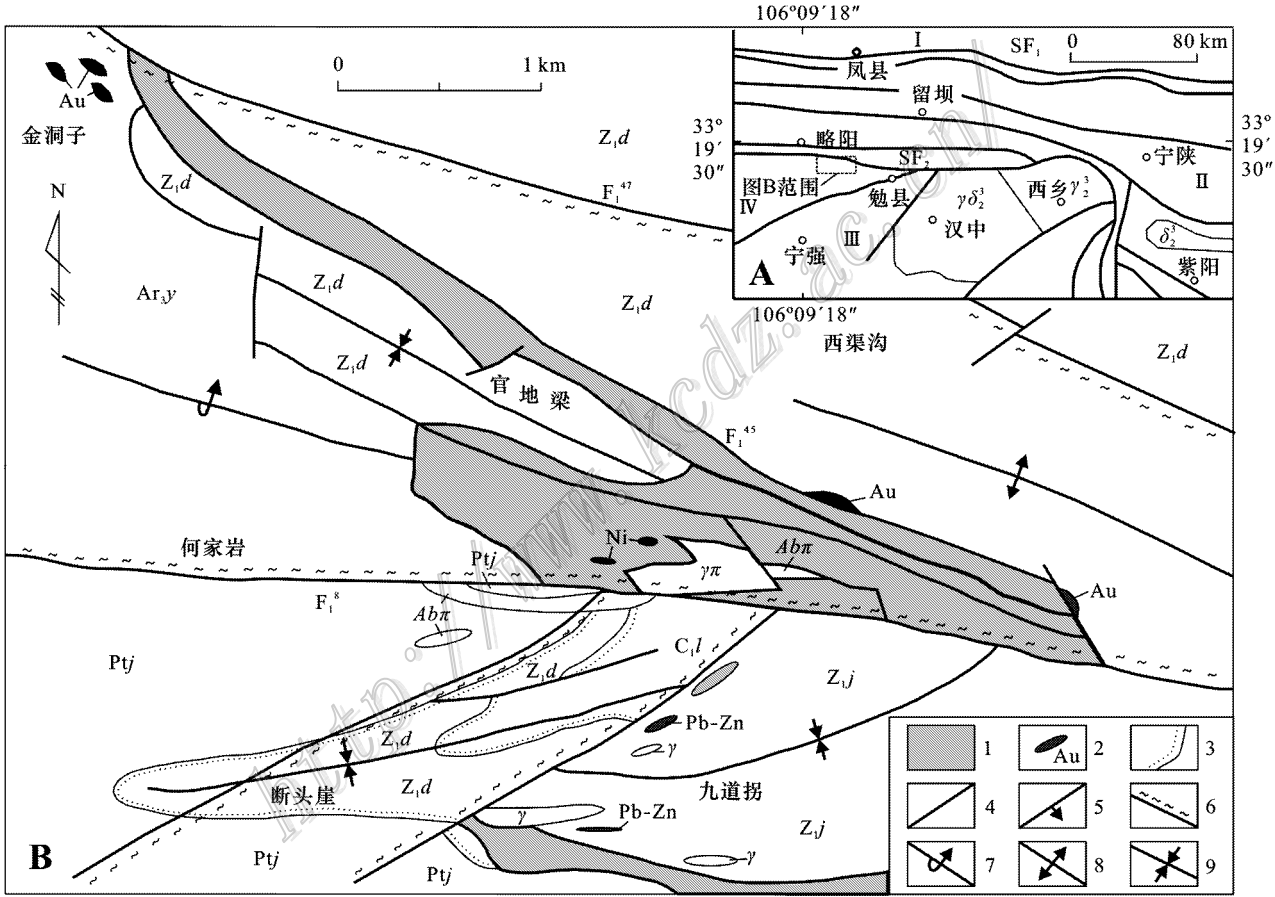


图 1 煎茶岭矿床区域位置(A)及地质(B)简图(据任小华 2000 修编)

1—超基性岩;2—矿体及矿种;3—不整合地质界线;4—断层;5—逆断层;6—韧性剪切带;7—倾伏倒转背斜;8—背斜;9—向斜。 C_{1l} —略阳组灰岩; Z_{1j} —九道拐组白云岩、灰岩、板岩; Z_{1d} —断头崖组白云岩; Pt_j —接官亭组细碧角闪岩; Ar_{3y} —鱼洞子群混合岩、变粒岩、片麻岩; γ —花岗岩; $\gamma\pi$ —花岗斑岩; $Ab\pi$ —钠长斑岩。I—华北地台;II—秦岭造山带;III—扬子地块;IV—摩天岭微地块; SF_1 —商丹缝合带; SF_2 —勉略缝合带

Fig. 1 Regional location(A) and geological sketch map(B) of the Jianchaling nickel deposit(modified after Ren,2000)
1—Ultrabasic rock;2—Ore body;3—Unconformity;4—Fault;5—Reversed fault;6—Ductile shear belt;7—Plunging overturned anticline;8—Anticline;9—Syncline. C_{1l} —Limestone in Lower Carboniferous Lueyang Formation; Z_{1j} —Dolomite, limestone and slate in Jiudaoguai Formation; Z_{1d} —Dolomite in Duantouya Formation; Pt_j —Spilite keratopyre in Jieguanting Formation; Ar_{3y} —Migmatite, granulite and gneiss in Yudongzi Formation; γ —Granite; $\gamma\pi$ —Granitophyre; $Ab\pi$ —albitophyre. I—North China block;II—Qinling orogenic belt;III—Yangtze block;IV—Mottianling microblock; SF_1 —Shangdan suture zone; SF_2 —Mianlue suture zone

主要由花岗质片麻岩、浅粒岩、变粒岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片岩、绿泥角闪片岩、绿泥绿帘片岩夹磁铁石英岩组成,集中分布在矿区西段,超基性岩体西侧。接官亭组为一套基性-酸性的浅变质火山-沉积岩系,岩石以绿泥钠长石英片岩、绢云绿泥片岩、变质细碧岩和变质石英砂岩为主。断头崖组和九道拐组主要由白云岩、硅质白云岩、白云质灰岩和炭质板岩组成,分布于超基性岩体南、北两侧。

1.2 构造

笔者在矿区厘定了2条韧性剪切带,分别为NW向和NE向(图1)。其中NW向韧性剪切带北起西渠沟北梁(F_1^{47} 断层),南至接官亭-何家岩断裂(F_1^8),宽度2~3 km,长度大于10 km。总体呈NW向延伸,倾向10~40°,局部倾向190~220°,倾角变化于40~85°之间。无论沿走向还是倾向均呈舒缓波状,主要发育在太古宙鱼洞子群和震旦系断头崖组2套地层中。

NE向韧性剪切带在接官亭-何家岩断裂以南出露较为连续,向东北方向断续延伸至庙儿垭一带,全长大于7 km,宽度约为0.4 km。总体走向50°,倾向南东(局部倾向NW),倾角变化于30~80°之间,主要发育在断头崖组和接官亭组顶部。

剪切带内出露的动力变质岩包括所在地层和岩体中各种岩性的糜棱岩化岩石、初糜棱岩、糜棱岩、构造片岩以及少量超糜棱岩,如长英质糜棱岩、云母石英构造片岩、白云质(初)糜棱岩、蛇纹质糜棱岩、菱镁质(初)糜棱岩、滑镁质(初)糜棱岩等。

剪切带内普遍发育S-C面理、构造透镜体、旋转碎斑系和“A”型褶皱,在显微镜下,可见波状消光、亚颗粒构造、应力双晶、动态重结晶等。研究表明(聂江涛等,2010),NW向和NE向韧性剪切带呈共轭产出。根据不同期次S-C面理、旋转碎斑系和“A”型褶皱所指示的剪切方向,2条剪切带在其长期的演化过程中至少经历了3期活动,其中NW向剪切带的剪切变形从早到晚依次为脆韧性右行压扭-脆韧性右行张扭-脆韧性左行压扭,NE向剪切带依次为脆韧性左行压扭-脆韧性左行张扭-脆韧性右行压扭。

鉴于第一期压扭性变形仅发育在鱼洞子群和接官亭组,说明2条韧性剪切带形成于中元古代末期;断头崖组中大量S-C面理、旋转碎斑系、右行雁行状排列的方解石脉和石英脉以及A型褶皱等均显示第二期张扭性变形发生在震旦纪以后,花岗斑岩侵位

之前,而花岗斑岩仅显示脆韧性变形,且变形强度从岩体边缘向中心部位逐渐减弱,表明第三期脆韧性变形发生在印支期(花岗斑岩年龄见下节)。

矿区脆性断裂十分发育,它们是煎茶岭韧性剪切带演化晚期脆性变形的产物,两条主干断裂 F_1^8 和 F_1^{45} 分别位于超基性岩体南、北两侧(图1)。

1.3 侵入岩

煎茶岭超基性岩体呈NW向位于矿区中央,出露面积约5 km²。平面上呈大透镜状,剖面上呈向NE侧伏的陡倾岩墙状。由于后期强烈的构造、岩浆和热液活动,岩体发生了彻底的蚀变,主要产物包括纤胶蛇纹岩、叶蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩和透闪岩等。蚀变岩多呈带状和透镜状,延伸方向与NW向韧性剪切带一致。剪切带的多期次活动导致岩体与围岩接触关系复杂化(断层接触),加之岩体的彻底蚀变,不仅给准确界定超基性岩侵入的地质时代带来很大困难,同时也使诸多同位素测年方法受到限制。前人曾根据蚀变产物特征及同位素年龄数据,将分布在岩体中部主要由滑镁岩、菱镁岩、叶蛇纹岩等构成的部分称为主岩体(全岩K-Ar法年龄590 Ma。胡建明,2002),而将分布在两侧主要由纤胶蛇纹岩构成的部分称为分支岩体(全岩K-Ar法年龄405 Ma。胡建明,2002),从而将该岩体定义为复式岩体。另外,庞春勇等(1993)获得纤胶蛇纹岩的Sm-Nd全岩等时线年龄为(927.4±49.0)Ma。关于岩体与围岩的接触关系,岩体西侧附近的鱼洞子群变质岩中发育多个超基性岩岩枝表明两者为侵入接触。而在岩体北缘东段的石棉矿-张家山金矿一带,在地表和矿洞中均可见到震旦系碳质板岩捕虏体,且普遍具透镜体化和片理化。其中石棉矿捕虏体规模最大(在1:1万矿田地质图上可见),碳质板岩呈火烧状,与超基性岩接触带附近穿插、褪色现象明显。另外在超基性岩北缘西段的三岔子一带,接触带附近的板岩中发育菊花状粗粒透闪石。这些现象说明超基性岩与震旦系亦为侵入接触关系,结合剪切带的演化规律,笔者认为超基性岩应是在震旦纪之后、印支期之前沿着2条张扭性韧性剪切带的交汇部位侵入的。

花岗斑岩侵位于超基性岩体中段南缘(图1),呈岩株状,出露面积0.34 km²。由于受NW向和NE向剪切带控制,南界面平直,走向近EW,南倾,倾角70~87°,北界面为走向NW向且向北突出的弧形,浅部北倾,倾角65~70°,深部南倾,倾角70~

72°。东西端延深浅,中部较深,空间上呈“漏斗”状。关于该岩体的形成时代,王宗起等(私人通讯)采用 U-Pb 法对花岗斑岩中锆石的年龄测定结果为(216 ± 4)Ma。

钠长斑岩分布较为广泛,但主要集中在超基性岩体中部,花岗斑岩北侧。大致呈左行斜列的脉岩群,构成了一个宽约 0.1~0.3 km 的脉岩带,脉体产状与 NWW 向韧性剪切带一致。其 K-Ar 法年龄为 239 Ma^①。

2 矿床地质特征

煎茶岭镍矿产于超基性岩体中,已探明矿体均成群、成带聚集在花岗斑岩周围(图 2)。矿体多呈透镜状产出,产状与 NWW 向韧性剪切带一致。矿体规模变化较大,一般控制长度 200~900 m,控制延深 2~700 m,厚度 2~12 m。沿走向和倾向分支复合、膨胀收缩现象明显,矿体与围岩界限清楚。

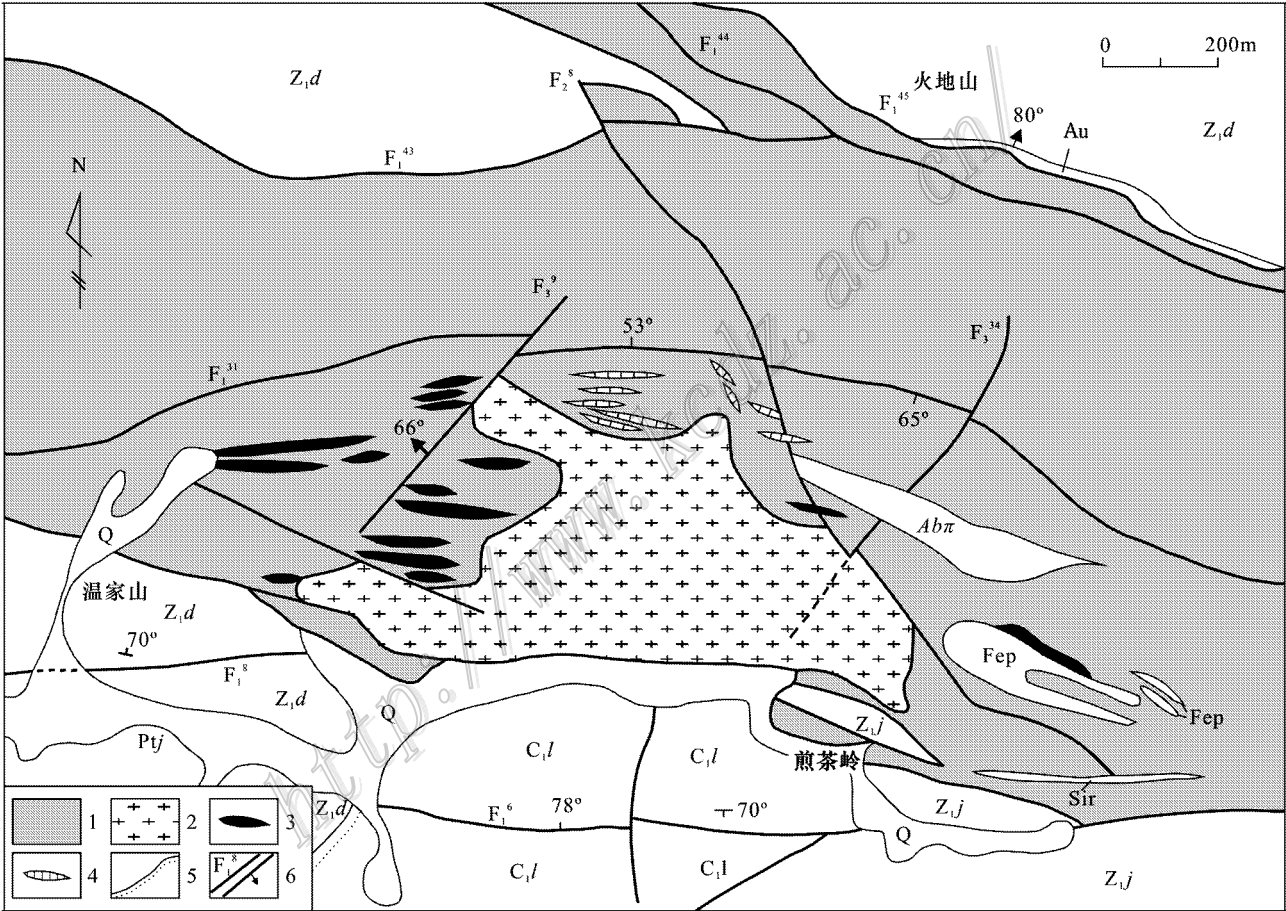


图 2 煎茶岭镍矿床地质图(据何家岩金矿 1:10 000 地质图修编)

1—超基性岩;2—花岗斑岩;3—镍矿体;4—镍矿化体;5—不整合地质界线;6—断层、逆断层及编号。Q—第四系;C₁l—略阳组灰岩;Z₁j—九道拐组白云岩、灰岩、板岩;Z₁d—断头崖组白云岩;Ptj—接官亭组细碧角斑岩;Abn—钠长斑岩;Au—金矿;Fep—贫铁矿

Fig. 2 Geological map of the Jianchaling nickel deposit(modified after 1:10 000 geologic map of the Hejiayan gold deposit)

1—Ultrabasic rock;2—Granite porphyry;3—Nickel ore body;4—Nickel mineralized body;5—Unconformity;6—Fault, reversed fault and their serial number. Q—Quaternary;Z₁j—Jiudaoguai Formation;Z₁d—Duantouya Formation;Ptj—Jieguanting Formation;C₁l—Limestone in Lower Carboniferous Lueyang Formation;Abn—Albitophyre;Au—Gold ore body;Fep—Iron ore body

① 西北有色地质勘查局 711 总队. 2001. 陕西省略阳县煎茶岭镍矿床地质详查报告.

根据赋矿岩石类型,可将矿石划分为滑镁岩型、蛇纹岩型、菱镁岩型和透闪岩型。矿石中主要非金属矿物依次为滑石、菱镁矿、蛇纹石、菱镁矿和透闪石,常伴有少量石英、白云石、菱铁矿、铬云母、绿泥石等。金属矿物以磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿为主,含少量黄铜矿和铬铁矿。常见矿石结构有中细粒半自形-他形结构、乳浊状结构、结状结构、浸蚀结构、交代残余结构、假象结构等。矿石构造以中等-稀疏浸染状、斑杂状为主,局部可见稠密浸染状和块状构造。另外,矿石中还发育细脉状构造。

3 矿床成因类型探讨

3.1 矿体产出状态的成因意义

如图 2 所示,镍矿(化)体虽然产于超基性岩中,但均紧密环绕花岗斑岩分布在其外接触带,特别是在岩体凹陷处,矿体密集、规模大,这种特点符合中酸性岩体控制气水热液矿床矿体分布的一般规律(袁见齐等,1985)。然而矿体的产状却并非平行于岩体边界,而是与韧性剪切带严格一致。研究发现,控矿构造是韧性剪切带从脆韧性向韧脆性转化时在剪切带内产生的压扭性韧性断层(图 3)。该类韧性断层总体走向 NWW,倾向 SSW,局部北倾,倾角 34°~85°,无论沿走向还是倾向均呈舒缓波状,长度一般 200~500 m。

图 3 中矿体北侧为蛇纹质构造片岩,应力矿物主要是叶蛇纹石和纤胶蛇纹石。叶蛇纹石主要生成碎斑,发育车轮状消光、扇状消光、放射状消光、波状消光及亚颗粒构造。胶蛇纹石以碎基的形式出现,

新生的纤蛇纹石呈 X 型沿 2 个方向定向排列。矿体南侧为糜棱岩化蚀变钠长斑岩,具片理化。斜长石斑晶中可见亚颗粒,石英既有碎斑,又有碎基,碎斑发育亚颗粒构造及花边结构。

另外,图 3 所示的矿体及其南侧直接围岩-钠长斑岩均发生了强烈的蚀变。矿体中的蚀变主要是纤蛇纹石化、白云石化和绿泥石化,而钠长斑岩中主要发生阳起石化、方解石化、滑石化和黝帘石化,偶见镍黄铁矿微粒(探针检测发现)。其中钠长斑岩的蚀变强度随着离开矿体而逐渐减弱。

以上特征说明矿体与花岗斑岩和韧性剪切带存在密切的成因联系,而矿体的围岩蚀变则是热液成矿的典型特征。在时间关系上,成矿作用晚于超基性岩体中的钠长斑岩。

3.2 矿石结构构造的成因意义

本次研究对 932 中段蛇纹岩型镍矿石的结构构造进行了较为系统的野外观察和室内鉴定。该类矿石中的金属矿物主要包括磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和铬铁矿,其中黄铁矿有 2 个世代;非金属矿物有蛇纹石、白云石和绿泥石。

3.2.1 矿石结构

矿石结构成因类型多样,包括结晶结构、固溶体分离结构、交代结构和应力结构。其中结晶结构有铬铁矿和第一世代黄铁矿的自形-半自形粒状结构;固溶体分离结构是指固溶体分离产物镍黄铁矿与主晶磁黄铁矿构成的各种结构类型,主要是乳浊状结构和结状结构;应力结构包括同构造期黄铁矿的拔丝结构(照片 1)和磁黄铁矿的应力双晶。

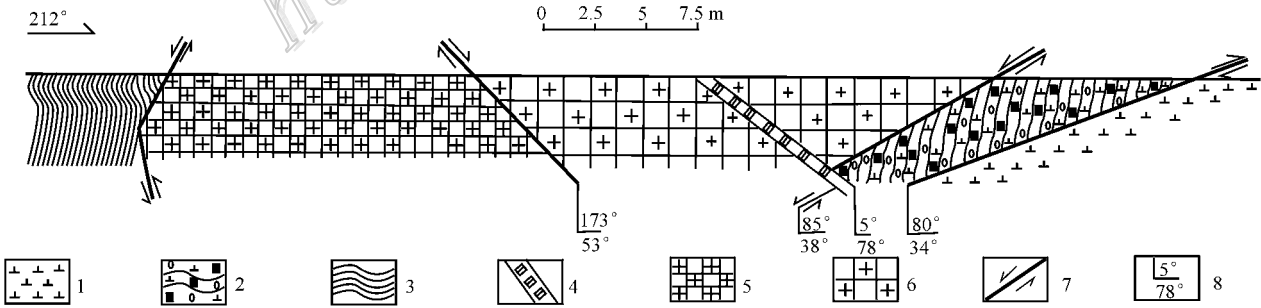


图 3 煎茶岭镍矿 4 号矿体 932 中段实测剖面图

1—钠长斑岩;2—片理化蚀变钠长斑岩;3—构造片岩;4—石棉脉;5—稠密浸染状镍矿石;6—稀疏浸染状镍矿石;7—断层;8—产状

Fig. 3 Measured section of No. 4 Jianchaling nickel ore body at 932 level

1—Albitophyre;2—Schistositized altered albitophyre;3—Tectonic schist;4—Asbestos vein;5—Dense dissemination nickel ore;

6—Sparse dissemination nickel ore;7—Faults;8—Attitude

交代结构是矿石中广泛发育的特征结构,矿物交代关系和主要结构类型如下:

(1)磁铁矿交代铬铁矿 矿石中的铬铁矿均已破碎,磁铁矿沿裂隙和边缘进行交代,致使铬铁矿呈棱角状、不规则状残留在磁铁矿中,形成交代残余结构(照片2),交代强烈时铬铁矿呈阴影状、云雾状(照片3)。电子探针测试查明,从残余铬铁矿中心到边缘 Cr_2O_3 含量逐渐降低,而 TFeO 含量逐渐升高(铬铁矿中部 Cr_2O_3 含量[$w(\text{B})$,下同]为60.03%~68.35%, TFeO 含量为20.25%~25.12%;边部分别为23.26%~55.54%和39.52%~56.26%);同样,当磁铁矿靠近铬铁矿时,其 Cr_2O_3 含量也逐渐升高(远离铬铁矿时,磁铁矿的 Cr_2O_3 含量为0.13%~0.60%,接近铬铁矿时多介于2.29%~4.37%之间,最高可达16.62%)。

(2)金属硫化物交代磁铁矿 矿石中金属硫化物交代磁铁矿的现象十分普遍。轻度交代时形成浸蚀结构(照片4),强烈交代时则形成交代残余结构(照片5)。

(3)假象结构 矿石中可见磁黄铁矿呈柱状、长柱状自形晶产出(照片6),粒度 $0.95\text{ mm}\times 0.46\text{ mm}\sim 2.73\text{ mm}\times 0.61\text{ mm}$ 。目前尚不清楚被交代者是何种矿物或矿物集合体,但这种结构无疑是气水热液交代作用形成的假象结构。

(4)磁黄铁矿、黄铜矿交代第一世代黄铁矿 矿石中第一世代黄铁矿颗粒粗大,多呈立方体,以半自形为主,浸染状分布。他形的磁黄铁矿(含镍黄铁矿)和黄铜矿沿其边缘交代,形成浸蚀结构(照片7)和交代残余结构(照片8)。

(5)第二世代黄铁矿交代磁黄铁矿 第二世代黄铁矿呈条纹状沿磁黄铁矿双晶结合面进行交代,形成交错结构(照片9)。

3.2.2 矿石构造

矿石构造以浸染状、斑点状、斑杂状为主,另外还可见不同尺度的细脉状构造。

矿石中的细脉状构造包括充填在纤胶蛇纹岩裂隙中的金属硫化物细脉(照片10),金属硫化物沿裂隙交代磁铁矿形成的细脉(照片11,显示脉体已延伸至纤胶蛇纹岩中)以及穿插在纤胶蛇纹岩和金属硫化物中的白云石细脉(照片12)。

可以看出,矿石结构构造具有典型的热液成因

的特点,而并不发育岩浆成因的海绵陨铁结构。通过对以上矿石结构构造特征的梳理,可以确定矿石中矿物的生成顺序从早到晚依次为铬铁矿→磁铁矿、纤蛇纹石→第一世代黄铁矿→磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿→第二世代黄铁矿→白云石。其中铬铁矿无疑是超基性岩浆结晶的产物,破碎(应与剪切带的多期次活动有关)后受到磁铁矿的强烈交代,而金属硫化物细脉穿插了磁铁矿,同时又被白云石细脉所切割。这说明铬铁矿是岩浆矿化期形成的,而磁铁矿及其后的金属硫化物和白云石则是气水热液矿化期不同矿化阶段的产物。

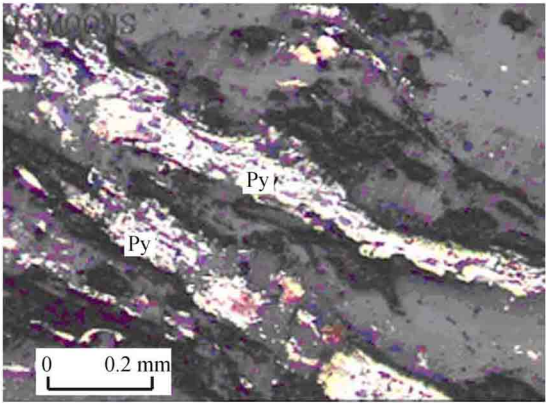
3.3 矿床地球化学特征及其成因意义

3.3.1 微量元素

矿区蛇纹岩型矿石、蛇纹岩以及花岗斑岩和钠长斑岩的微量元素含量如表1所示。通过比较可以发现,矿石的微量元素组成特征具有明显的双重性。矿石和蛇纹岩中均富含Ni、Co、Cr,反映了矿石对超基性岩的继承性。但是与蛇纹岩相比,矿石中Cu、Zn、Nb、Pb、Th均发生了显著的富集。对矿区不同蚀变岩微量元素组成特征的研究表明^①,从蛇纹岩到菱镁岩、滑镁岩,随着蚀变程度增强,Cu的含量逐渐升高(与Ni、Co变化规律恰好相反),而Zn、Nb、Pb、Th则不显变化(图4),说明超基性岩在蚀变过程中并未明显地释放出这些元素。从表1可以看出,花岗斑岩中这些元素含量普遍较高,鉴于其与镍矿之间的密切关系,认为矿石中的Cu、Zn、Nb、Pb、Th应主要来自花岗斑岩。

矿体蚀变围岩的微量元素特征能够直观地反映成矿过程中物质的带入带出情况。图3所示镍矿体南侧的钠长斑岩发生了围岩蚀变,靠近矿体处蚀变强烈,而远离矿体处蚀变微弱,两者之间为渐变过渡关系。强、弱蚀变钠长斑岩的微量元素含量见表1。与弱蚀变钠长斑岩相比,强蚀变岩中Cr、Co、Ni、Cu、Zn的含量大幅度提高,而Ga、Rb、Zr、Nb、Ba、Ta、Pb、Th等则显著降低,说明蚀变作用使蚀变岩的微量元素发生了强烈的再分配。结合矿石与蛇纹岩的对比结果,可以进一步认为,成矿热液中的Cr、Co、Ni来自超基性岩,Cu、Zn来自花岗斑岩。同时由于蚀变超基性岩中部区域钠长斑岩的广泛分布,矿石中的部分Nb、Pb、Th可能来自钠长斑岩。

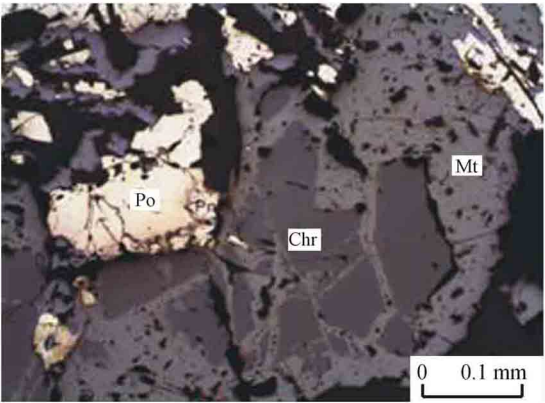
① 姜修道,魏钢锋,聂江涛. 2009. 煎茶岭金镍矿田构造演化及成矿作用研究.



照片1 同构造期黄铁矿的拔丝结构(反射光)

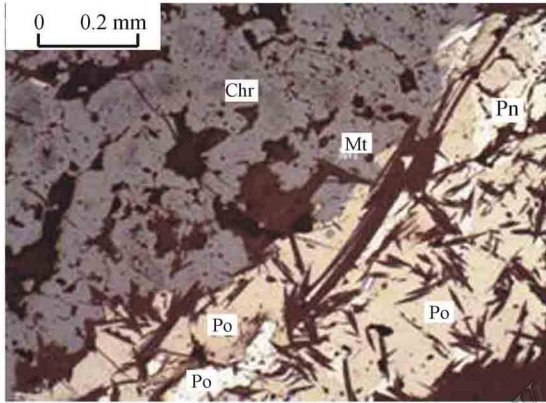
Py—黄铁矿

Photo 1 Hot candied texture of the synkinematic pyrites
Py—Pyrite



照片2 磁铁矿交代铬铁矿形成的交代残余结构(反射光)

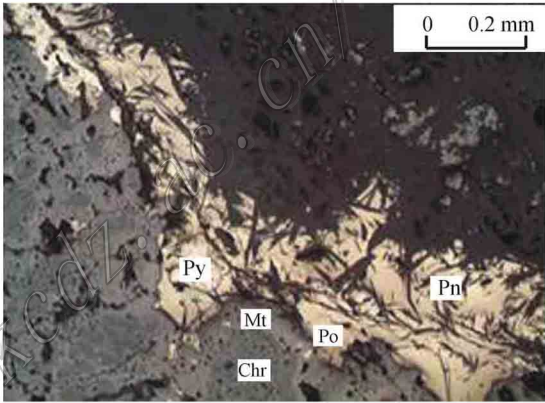
Chr—铬铁矿; Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿
Photo 2 Metasomatic relict texture of chromite replaced by magnetite
Chr—Chromite; Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Pn—Pentlandite



照片3 磁铁矿强烈交代铬铁矿, 后者呈阴影状、云雾状(反射光)

Chr—铬铁矿; Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿
Photo 3 Shadow, fog and striped texture of chromite replaced strongly by magnetite

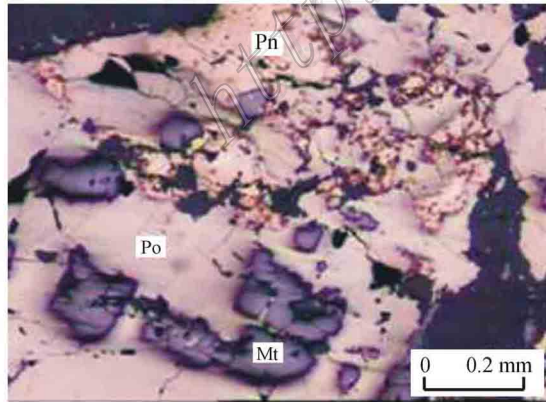
Chr—Chromite; Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; ; Pn—Pentlandite



照片4 磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿交代磁铁矿形成的浸蚀结构(反射光)

Chr—铬铁矿; Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿; Py—黄铁矿

Photo 4 Erosion texture of magnetite replaced by pyrrhotite, pentlandite and pyrite
Chr—Chromite; Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Pn—Pentlandite; Py—Pyrite

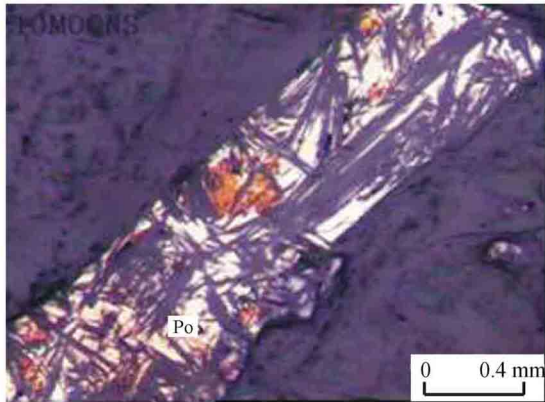


照片5 磁黄铁矿、镍黄铁矿交代磁铁矿形成的交代残余结构(反射光)

Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿

Photo 5 Metasomatic relict texture of magnetite replaced by pyrrhotite and pentlandite

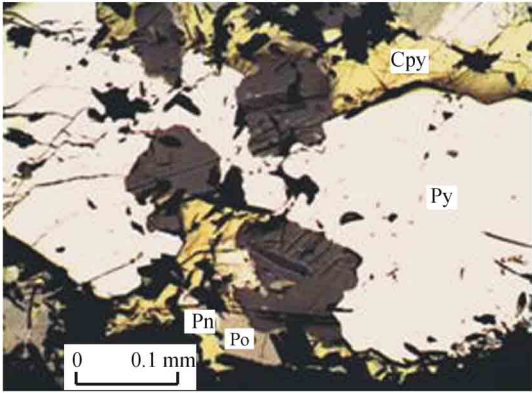
Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; P—n Pentlandite



照片6 磁黄铁矿呈假象结构(反射光)

Po—磁黄铁矿

Photo 6 Pseudomorph texture of pyrrhotite
Po—Pyrrhotite

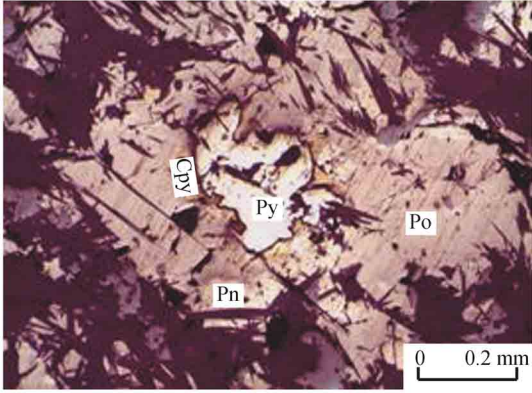


照片7 黄铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿交代第一世代黄铁矿形成的浸蚀结构(反射光)

Cpy—黄铜矿; Pn—镍黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿

Photo 7 Erosion texture of the first generation pyrite replaced by chalcopyrite, pyrrhotite and pentlandite

Cpy—Chalcopyrite; Pn—Pentlandite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite

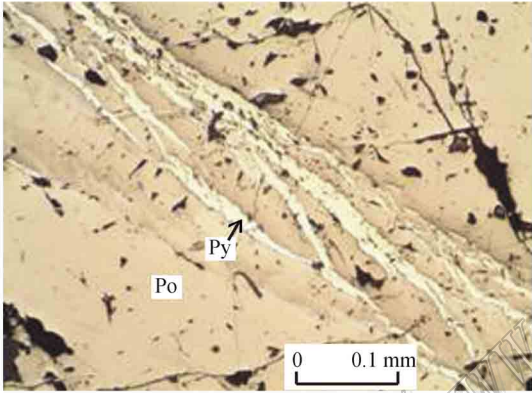


照片8 磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿交代第一世代黄铁矿形成的交代残余结构(反射光)

Cpy—黄铜矿; Pn—镍黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿

Photo 8 Metasomatic relict texture of the first generation pyrite replaced by pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite

Cpy—Chalcopyrite; Pn—Pentlandite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite

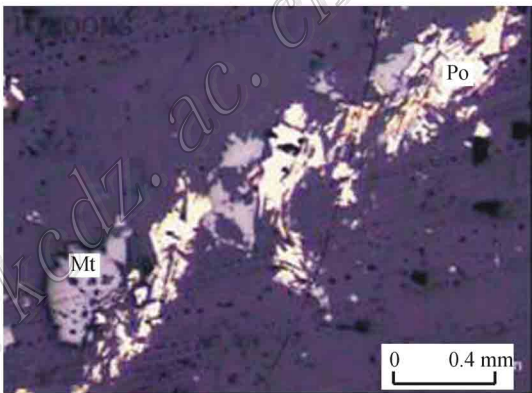


照片9 第二世代黄铁矿交代磁黄铁矿形成的交错结构(反射光)

Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿

Photo 9 Staggered texture of pyrrhotite replaced by the second generation Pyrite

Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite

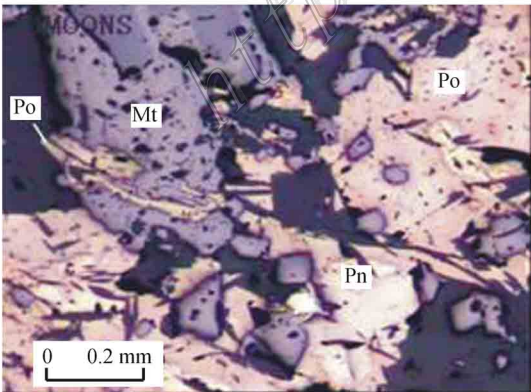


照片10 磁黄铁矿呈细脉状构造(反射光)

Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿

Photo 10 Veinlet structure of pyrrhotite

Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite

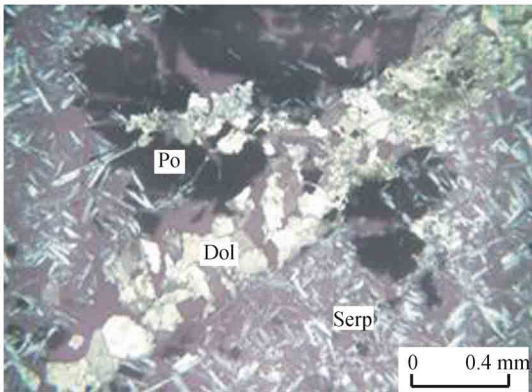


照片11 金属硫化物呈细脉状穿插磁铁矿(反射光)

Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿

Photo 11 Veinlet structure of pyrrhotite and pentlandite penetrating magnetite

Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Pn—Pentlandite



照片12 白云石呈细脉状构造(正交偏)

Dol—白云石; Po—磁黄铁矿; Serp—蛇纹石

Photo 12 Veinlet structure of dolomite in serpentinite

Dol—Dolomite; Po—Pyrrhotite; Serp—Serpentine

表 1 煎茶岭镍矿区岩石微量元素含量($w_B/10^{-6}$)
Table 1 Minor elements content of rocks and ores from the Jianchaling nickel ore district($w_B/10^{-6}$)

样品名称及编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cd	Cs	Ba	Ta	Pb	Th	U
蛇纹岩型矿石																					
P932H-2	0.426	0.123	3.676	44.05	1553	371.3	8809	269.1	72.77	3.345	0.798	25.15	2.383	1.653	0.14	0.022	4.646	0.047	89.02	1.602	0.69
P932H-3	1.14	0.01	4.047	12.64	952.1	176.4	3403	135.8	60.17	1.61	0.74	45.6	1.352	0.83	0.101	0.055	5.631	0.026	75.57	0.552	0.35
P932H-4	0.498	0.072	0.567	24.61	769.5	434.8	5103	395.9	65.19	1.787	0.695	36.35	1.593	0.827	0.1	0.012	5.278	0.026	35.75	0.863	0.564
P932H-5	0.181	0.016	0.015	19.27	744.8	496.5	8355	388.9	51.39	1.387	0.702	63.17	1.418	0.653	0.131	0.006	3.725	0.02	9.931	2.415	0.809
P932H-6	3.086	0.246	0.815	65.09	870.1	438.3	5792	342.1	164	4.862	1.443	10.5	4.883	1.327	0.126	0.208	7.208	0.046	11.46	3.06	0.857
P932H-7	1.791	0.188	0.79	37.79	1124	419.5	5813	384.4	115.2	4.191	0.899	16.47	2.047	0.871	0.053	0.086	7.219	0.02	15.13	0.845	0.84
平均值	1.187	0.109	1.652	33.91	1002	389.5	6213	319.4	88.12	2.864	0.88	32.87	2.279	1.026	0.109	0.065	5.618	0.031	39.48	1.556	0.685
蛇纹岩																					
D002-1	1.125	0.052	6.846	19.04	2103	103.2	1607	7.543	47.46	0.987	0.902	1.261	0.574	0.194	0.15	0.05	3.858	0.024	12.49	0.07	0.127
PZH-4	2.581	0.164	8.284	18.77	2583	115.1	1362	11.5	40.2	1.022	0.298	3.302	0.621	0.091	0.153	0.036	4.611	0.008	4.183	0.019	0.041
PZH-6	2.929	0.221	7.234	22.78	1968	82.2	1488	18.58	46.47	1.058	0.35	1.717	0.338	0.051	0.084	0.107	7.148	0.003	4.699	0.015	0.148
PZH-8	1.945	0.237	7.989	31.32	2096	100.3	1582	14.7	40.72	1.159	0.276	1.621	3.235	0.079	0.082	0.075	6.001	0.009	4.671	0.168	0.812
PZH-9	0.402	0.147	8.51	15.8	3231	97.28	1324	4.812	43.98	0.995	0.054	1.047	0.387	0.041	0.013	0.006	4.826	0.003	4.585	0.003	0.852
PZH-10	1.083	0.195	8.703	21.16	2694	102.8	1740	5.335	41.75	1.194	0.365	1.25	1.343	0.122	0.042	0.008	6.925	0.009	6.022	0.042	2.868
PXH-3	0.754	0.001	7.09	6.668	1536	27.68	1558	3.435	10.61	0.436	0.035	4.508	0.115	0.007	0.01	0.029	2.009	0.003	2.233	0.017	0.001
PH-IV-4	0.3	0.002	10.79	18.76	2058	92.24	1596	0.766	31.93	1.269	0.577	82.28	0.334	0.047	0.026	0.117	14.35	0.007	1.616	0.08	0.024
平均值	1.39	0.127	8.181	19.29	2284	90.1	1532	8.334	37.89	1.015	0.357	12.12	0.868	0.079	0.07	0.054	6.216	0.008	5.062	0.052	0.609
花岗斑岩																					
D9H-1	3.927	1.126	0.002	13.24	39.74	9.569	12.44	44.74	42.88	30.14	6.637	25.77	130.9	13.92	0.597	0.311	276.6	1.051	38.99	3.054	1.478
弱蚀变钠长斑岩																					
P932H-13	1.105	0.44	2.096	47.91	51.57	47.3	172.8	44.46	24.89	101.4	9.971	107.2	145.6	12	0.452	0.101	1407	0.917	18.68	8.047	2.614
P932H-14	14.24	1.564	4.027	58.54	362.2	68.61	408.1	11.3	58.98	211.4	106.4	43.34	125.6	10.69	0.369	1.206	3802	0.759	7.338	7.999	1.266
平均值	7.673	1.002	3.062	53.23	206.9	57.96	290.5	27.88	41.94	156.4	58.19	75.27	135.6	11.35	0.411	0.654	2605	0.838	13.01	8.023	1.94
强蚀变钠长斑岩																					
P932H-10	0.362	0.072	3.13	40.98	1338	105.2	806.4	70.4	91.35	3.407	0.775	14.44	2.811	0.545	0.045	0.098	3.872	0.03	4.249	2.653	1.113
P932H-11	2.526	0.154	3.201	40.76	2553	227	2923	193.3	269.1	2.9	1.156	34.36	2.285	0.644	0.07	0.221	3.866	0.027	5.931	0.656	0.57
P932H-12	18.35	0.467	3.907	53.85	1173	290.4	3042	377.8	54.49	29.11	16.04	99.15	45.28	4.421	0.246	0.591	378.2	0.27	10.8	3.013	0.954
平均值	7.079	0.231	3.413	45.2	1688	207.7	2257	213.8	138.3	11.81	5.99	49.32	16.79	1.87	0.12	0.303	128.6	0.109	6.993	2.107	0.879

注:样品由长安大学国土资源部动力地质及成矿重点实验室采用 ICP-MS 测试。

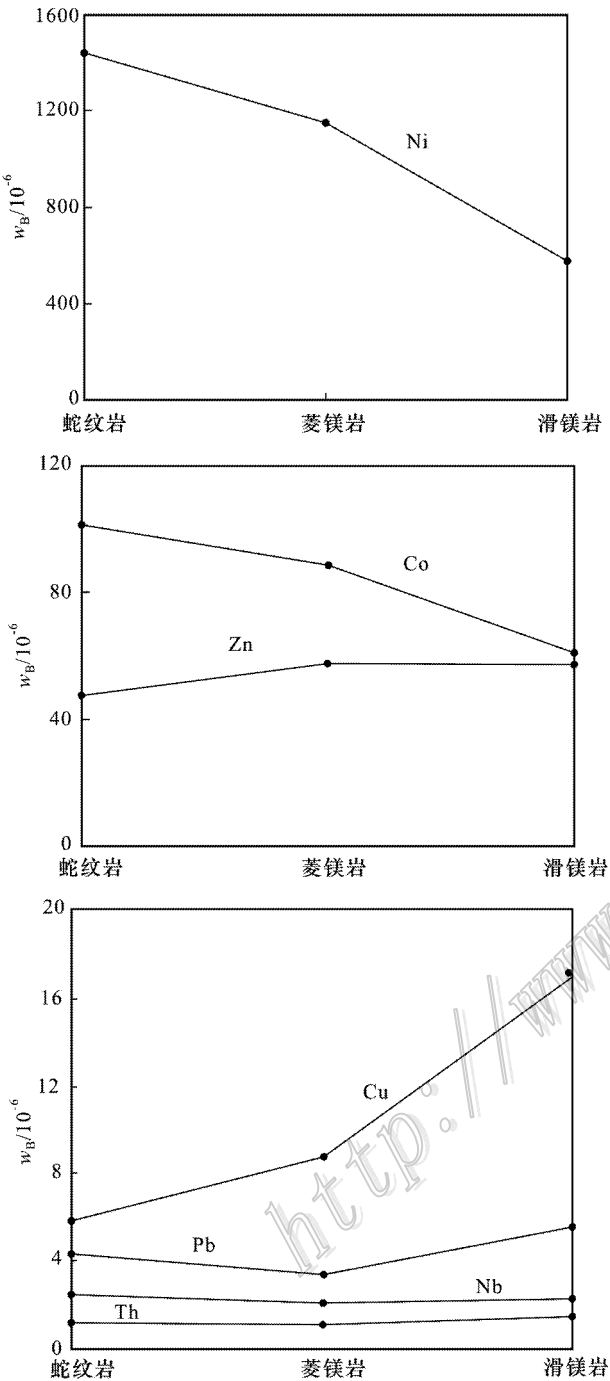


图 4 煎茶岭镍矿区不同蚀变岩微量元素平均含量曲线
注 统计样品数蛇纹岩 8 件,菱镁岩 4 件,滑镁岩 5 件,为了便于观察,Nb、Th 曲线分别在原数值上加 2 和 1
Fig. 4 Minor element average content curve of different altered rocks from the Jianchaling nickel ore district

3.3.2 稀土元素

矿区岩、矿石稀土元素含量见表 2,利用 26 个球粒陨石平均值(赵振华,1982)进行了标准化,其标准化配分曲线如图 5a、b、c 所示。可以看出,蛇纹岩的

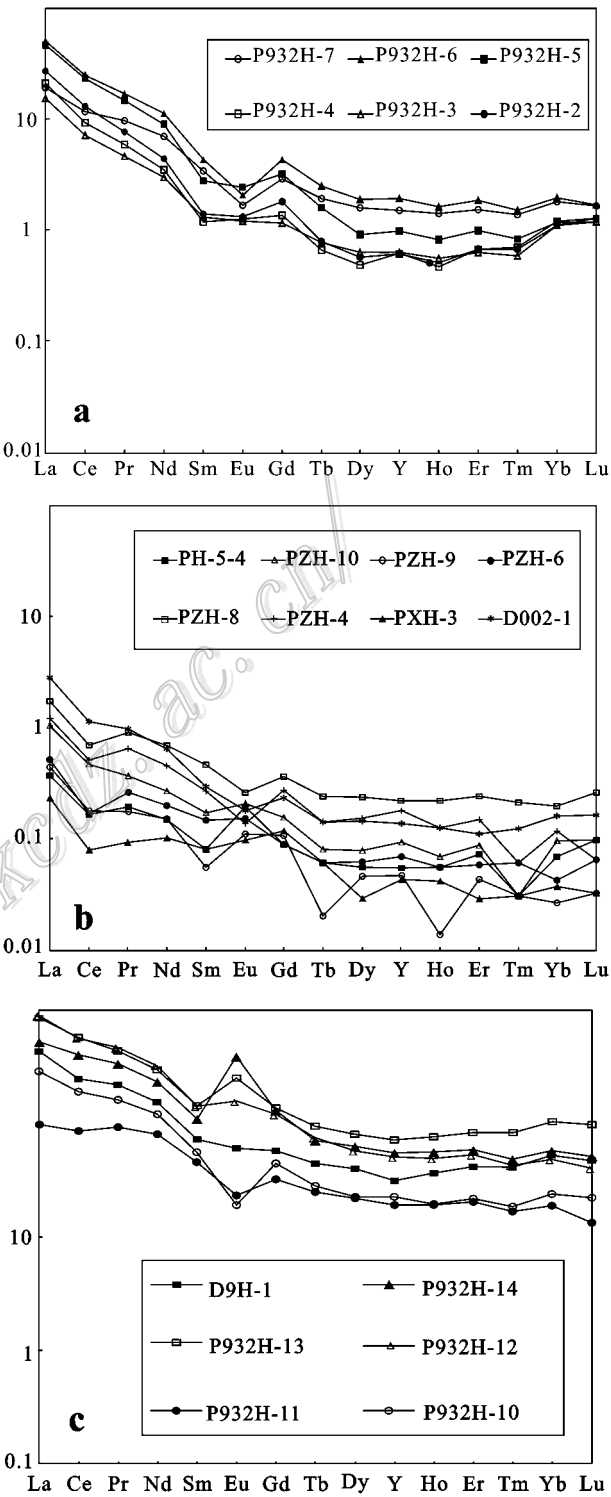


图 5 煎茶岭镍矿床岩矿石稀土元素球粒陨石标准化配分模式
a. 蛇纹岩型矿石;b. 蛇纹岩;c. 花岗岩斑岩和钠长斑岩
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of ores and rocks from the Jianchaling nickel deposit
a. Serpentine-type ores ;b. Serpentinite ;c. Granite porphyry and albite

表 2 煎茶岭镍矿区岩石稀土元素含量($w_B/10^{-6}$)
Table 2 REE content of rocks and ores from the Jianchaling nickel ore district($w_B/10^{-6}$)

样品名称及编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/ HREE*	δ Eu*	(La/Sm) †	(Gd/Yb) ‡	(La/Yb) ‡
蛇纹岩型矿石																					
P932H-2	8.559	12.03	0.907	2.628	0.28	0.095	0.552	0.039	0.174	1.175	0.037	0.141	0.022	0.207	0.036	26.882	20.281	0.824	19.105	1.634	24.55
P932H-3	4.854	6.724	0.553	1.783	0.259	0.087	0.356	0.038	0.192	1.206	0.04	0.13	0.019	0.207	0.039	16.487	13.967	0.977	11.713	1.054	13.923
P932H-4	6.657	8.715	0.713	2.093	0.237	0.091	0.422	0.033	0.15	1.207	0.034	0.142	0.023	0.228	0.039	20.784	17.279	0.981	17.555	1.134	17.336
P932H-5	14.74	21.68	1.742	5.379	0.548	0.175	0.989	0.078	0.279	1.888	0.059	0.207	0.027	0.22	0.037	48.048	23.346	0.811	16.811	2.755	39.781
P932H-6	16.01	23.07	2.018	6.68	0.853	0.149	1.322	0.124	0.578	3.724	0.117	0.387	0.049	0.366	0.052	55.499	16.287	0.479	11.731	2.214	25.973
P932H-7	6.064	10.87	1.154	4.165	0.676	0.121	0.884	0.095	0.485	2.94	0.101	0.317	0.045	0.338	0.05	28.305	9.957	0.534	5.607	1.603	10.652
蛇纹岩																					
D002-1	0.894	1.066	0.116	0.385	0.059	0.013	0.072	0.007	0.044	0.267	0.009	0.023	0.004	0.03	0.005	2.994	13.057	0.68	9.47	1.471	17.694
PZH-4	3.386	0.476	0.077	0.272	0.053	0.01	0.084	0.007	0.047	0.349	0.009	0.031	0.002	0.022	0.002	1.827	6.245	0.511	4.552	2.34	10.418
PZH-6	0.165	0.157	0.031	0.119	0.029	0.011	0.027	0.003	0.019	0.134	0.004	0.012	0.002	0.008	0.002	0.723	6.649	1.341	3.556	2.069	12.246
PZH-8	0.554	0.648	0.107	0.41	0.093	0.019	0.112	0.012	0.073	0.43	0.016	0.05	0.007	0.037	0.008	2.576	5.813	0.635	3.723	1.855	8.89
PZH-9	0.141	0.165	0.021	0.09	0.011	0.008	0.033	0.001	0.014	0.091	0.001	0.009	0.001	0.005	0.001	0.592	6.708	1.432	8.011	4.045	16.744
PZH-10	0.331	0.437	0.044	0.16	0.034	0.015	0.048	0.004	0.024	0.18	0.005	0.018	0.001	0.018	0.003	1.322	8.438	1.266	6.085	1.634	10.918
PXH-3	0.074	0.074	0.011	0.061	0.016	0.007	0.036	0.003	0.009	0.083	0.003	0.006	0.001	0.007	0.001	0.392	3.682	0.995	2.891	3.152	6.277
PH-IV-4	0.116	0.155	0.023	0.088	0.016	0.014	0.027	0.003	0.017	0.106	0.004	0.015	0.001	0.013	0.003	0.601	4.964	2.297	4.531	1.273	5.298
花岗岩																					
D9H-1	14	23.55	2.667	9.394	1.475	0.445	1.815	0.225	1.237	6.146	0.271	0.88	0.136	1.011	0.147	63.399	9.006	0.928	5.932	1.1	8.222
弱蚀变钠长斑岩																					
P932H-13	27.94	54.84	5.347	18.02	2.915	1.878	4.291	0.476	2.517	14.16	0.559	1.757	0.278	1.995	0.305	137.28	9.11	1.811	5.991	1.318	8.315
P932H-14	17.04	38.41	4.111	14.09	2.206	2.888	4.087	0.357	1.954	10.84	0.411	1.24	0.161	1.108	0.16	99.063	8.308	3.281	4.828	2.261	9.131
强蚀变钠长斑岩																					
P932H-10	9.346	18.13	1.967	7.356	1.119	0.141	1.407	0.144	0.704	4.513	0.144	0.464	0.062	0.465	0.07	46.032	11	0.383	5.22	1.855	11.934
P932H-11	3.178	8.243	1.135	4.892	0.922	0.171	1.012	0.126	0.68	3.804	0.142	0.436	0.056	0.365	0.042	25.204	6.485	0.604	2.154	1.699	5.17
P932H-12	28.72	54.15	5.678	19.48	2.812	1.175	3.791	0.378	1.781	10.07	0.36	1.12	0.141	0.919	0.126	130.7	13.001	1.228	6.383	2.528	18.556

注:样品由长安大学国土资源部动力地质及成矿重点实验室采用 ICP-MS 测试。* 单位为 1。

稀土元素含量极低,其 ΣREE 介于 $0.392 \times 10^{-6} \sim 2.994 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 1.378×10^{-6} ; LREE/HREE 比值为 $3.682 \sim 13.057$ (La/Yb)_N 为 $5.298 \sim 17.694$,属轻稀土元素富集型,配分曲线均中等程度地向右倾斜(图 5b) (La/Sm)_N 比值普遍大于 (Gd/Yb)_N 比值,说明轻稀土元素的分馏程度高于重稀土元素。而矿石的稀土元素总量远高于蛇纹岩的, LREE/HREE 、(La/Yb)_N、(La/Sm)_N 比值也明显大于蛇纹岩,说明矿石不仅更富集稀土元素,而且其分馏程度、尤其是轻稀土元素的分馏程度也更为显著。

与岩浆铜镍硫化物矿床(如金川、赤柏松、白马寨等)相比,煎茶岭镍矿床矿石稀土元素含量远远高于含矿岩石,具有特殊性。从表 2 和图 5c 可以看出,矿区花岗斑岩和钠长斑岩均具有很高的稀土元素含量,而且钠长斑岩蚀变后, ΣREE 显著降低,矿体中靠近钠长斑岩的样品, ΣREE 也较高。结合野外地质产状,对这种现象较为合理的解释是:由花岗斑岩分异出的气水热液在成矿的同时,也带入了丰富的稀土元素,当然蚀变钠长斑岩的贡献也是不能忽略的。

3.3.3 硫同位素

本次研究共测试硫同位素样品 8 件,其中镍矿及镍矿化体 7 件,花岗斑岩 1 件,所有样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $9.85\text{‰} \sim 13.28\text{‰}$ 之间(表 3)。

甘先平等^①对煎茶岭岩矿石的硫同位素组成进行了系统测试。结果显示,镍矿石中黄铁矿、磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $+6.1\text{‰} \sim +12.9\text{‰}$ 之间(平均值 $+9.3\text{‰}$),蚀变超基性岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $+7.8\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$ 之间(平均值 $+11.8\text{‰}$),钠长斑

岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $+9.0\text{‰} \sim +17.5\text{‰}$ 之间(平均值 12.5‰)。相比之下,本次硫同位素测试结果与前人基本一致。

从测试结果来看,镍矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值无论是变化范围还是平均值均远离镁铁超镁铁质岩石的 $3\text{‰} \sim 0\text{‰}$ (张理刚,1985),明显地富集重硫,这与国内外众多岩浆铜镍硫化物矿床的硫同位素组成特征差异很大。而与矿区中酸性岩相比,两者之间无论是变化范围还是平均值均具有较好的一致性,说明矿石中的硫应来自中酸性岩,而非超基性岩。至于矿石与蚀变超基性岩硫同位素组成的一致性,只能说明后者中的黄铁矿不是超基性岩残留下来的,而是超基性岩在蚀变过程中新形成的(这与野外观察和岩矿鉴定结果一致),因此两者具有相同的硫源。

总之,煎茶岭镍矿床的微量元素、稀土元素和硫同位素组成特征明显不同于岩浆铜镍硫化物矿床,除表现出对超基性岩的继承性外,还与矿区中酸性岩具有密切的内在联系。

4 结 论

在岩浆熔离矿床中,矿体通常受岩相控制,浸染状矿体与母岩呈渐变过渡关系,一般不发育围岩蚀变,矿石具有典型的海绵陨铁结构;在地球化学特征上,矿石对母岩具有明显的继承性。而煎茶岭镍矿呈现出诸多与之不同的特征,矿床受韧性剪切带和花岗斑岩控制,矿体与围岩界线截然,围岩蚀变明显,矿石中交代结构和细脉状构造广泛发育;在时间关系上,金属硫化物显著晚于超基性岩,而与其发生蚀变的时间相当;从矿床地球化学特征来看,矿石微量元素、稀土元素和硫同位素均表现出与中酸性岩的密切关系。因此该矿床应是由中酸性岩浆热液作用形成的,成因类型属岩浆热液改造矿床。

志 谢 在野外调研期间,得到何家岩金矿、实达公司镍矿和煎茶岭镍业公司的大力支持,在此表示衷心的感谢。

表 3 煎茶岭镍矿床黄铁矿硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotope composition of pyrite from the Jianchaling nickel deposit

样品编号	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	产状
D932S	10.3	镍矿体
D950S	12.1	镍矿体
D007-1	9.9	镍矿化体
D007-3	11.4	镍矿化体
X Ⅲ-2-1	11.5	镍矿化体
X Ⅱ-3-1	13.3	镍矿化体
X Ⅱ-6-1	12.3	镍矿化体
D9S	10.0	花岗斑岩

注 样品由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学实验室测试。

① 甘先平,等. 1994. 煎茶岭金矿及超基性岩体研究报告.

References

- Hu J M. 2002. Analysis of controlled auriferous mineralization in Jianchaling gold deposit and exploration direction[J]. Mineral Resources and Geology , 16(1): 17-21(in Chinese with English abstract).
- Nie J T , Wei G F , Jiang X D , Li S S , Ren J B and Ren H. 2010. Determination of the ductile shear zones in Jianchaling and their geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia(in press)(in Chinese with English abstract).
- Pang C Y and Chen M Y. 1993. Isotopic geochronological data and their geological significance in Jianchaling region , Shaanxi Province[J]. Mineral Resources and Geology , 7(5): 354-360(in Chinese with English abstract).
- Ren X H. 1990. The ore-forming geological characteristics of Jianchaling nickel deposit[A]. In : Wang X and Wang D S , ed. Major types of metallic mineralization and discuss on ore-forming perspective of superlarge deposits in Mianxian-Lueyang-Ningshaan volcanic rocks belt , Shaanxi Province[A]. Lanzhou : Lanzhou University Press. 115-123 (in Chinese).
- Tang Z L , Qian Z Z and Jiang C Y. 2006. Magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits and metallogenic prognosis in China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 22-143(in Chinese).
- Wang R T , He Y , Tang Z L , Wang D S and Liu M W. 2002a. Study on minor elements geochemistry in Jianchaling large cobalt-bearing sulfide nickel deposit[J]. Mineral Deposits , 21(Supp.): 1041-1044 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T , He Y , Liu M W , Qi L and Wang D S. 2002b. Geological characteristics of ores from the Jianchaling nickel deposit[J]. Acta Geoscientia Sinica , 23(6): 535-540(in Chinese with English abstract).
- Wang R T , He Y , Wang D S and Liu M W. 2003. The study on ore-forming process of Jianchaling large cobalt-bearing nickel ore deposit [J]. J. Northwest University (Natural Science Edition), 33(2): 185-190(in Chinese with English abstract).
- Wang X , Tang R Y , Li S , Li Y X , Yang M J and Wang D S. 1996. Qinling orogeny and metallogenesis[M]. Beijing : Metallurgical Industry Press. 272-300(in Chinese).
- Yuan J Q , Zhu S Q and Zhai Y S. 1985. Ore deposit[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 106-111(in Chinese).
- Zhang L G. 1985. The application of the stable isotope to geology[M]. Shaanxi : Shaanxi Sci. & Techn. Pub. House(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H. 1982. Methods of studying REE geochemistry[J]. Geology-Geochemistry , 10(1): 26-33(in Chinese).

附中文参考文献

- 胡建明. 2002. 煎茶岭金矿床的控矿因素分析及找矿方向[J]. 矿产与地质 , 16(1): 17-21.
- 聂江涛,魏刚锋,姜修道,李赛赛,任金斌,任 华. 2010. 煎茶岭韧性剪切带的厘定及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学(待刊).
- 庞春勇,陈民扬. 1993. 煎茶岭地区同位素地质年龄数据及其地质意义[J]. 矿产与地质 , 7(5): 354-360.
- 任小华. 1990. 煎茶岭镍矿床成矿地质特征[A]. 见:王 相,等,主编. 陕西勉略阳火山岩带主要金属矿化类型及超大型矿床成矿远景探讨[A]. 兰州:兰州大学出版社. 115-123.
- 汤中立,钱壮志,姜常义. 2006. 中国铜镍钴岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京:地质出版社. 22-143.
- 王瑞廷,赫 英,汤中立,王东生,刘民武. 2002a. 煎茶岭大型含钴硫化镍矿床微量元素地球化学研究[J]. 矿床地质 , 21(增刊): 1041-1044.
- 王瑞廷,赫 英,刘民武,漆 亮,王东生. 2002b. 煎茶岭硫化镍矿床矿石地球化学特征[J]. 地球学报 , 23(6): 535-540.
- 王瑞廷,赫 英,王东生,刘民武. 2003. 煎茶岭含钴硫化镍矿床成矿作用研究[J]. 西北大学学报(自然科学版) , 33(2): 185-190.
- 王 相,唐荣扬,李 实,李永祥,杨铭君,王东生. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京:冶金工业出版社. 272-300.
- 袁见齐,朱上庆,翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京:地质出版社. 106-111.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 陕西:陕西科学技术出版社. 7-23.
- 赵振华. 1982. 稀土元素地球化学研究方法[J]. 地质地球化学 , 10(1): 26-33.