

文章编号: 1000-4734(2017)06-0717-08

川南滇北含自然铜杏仁状玄武岩的 矿物组合与成因

何利^{1,2}, 朱笑青^{1*}, 王富东³, 李晓霞^{1,2}, 盛响元^{1,2}

(1.中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学
院大学, 北京 101408; 3. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 峨眉山玄武岩铜矿与基韦诺超大型铜矿相似, 杏仁状玄武岩中的自然铜矿石就是该类型铜矿床中的主要组成部分之一, 本文称其为“杏仁体式”自然铜矿床。通过矿石矿物标型特征、矿物组合特征以及固溶体分离结构特征等分析研究, 认为川南滇北“杏仁体式”自然铜矿为火山热液矿床, 形成于低温还原环境, 成矿作用发生在岩浆作用结束期及间歇期热液阶段, 成矿经历过热液蚀变改造。铜矿物生成顺序为: 自然铜→斑铜矿、辉铜矿、黄铜矿→赤铜矿、黑铜矿、孔雀石等。玄武岩中广泛分布的沥青与自然铜同时形成, 并为自然铜及铜的硫化物的形成提供了强还原环境。沥青形成温度和斑铜矿-辉铜矿的固溶体分解温度将自然铜形成温度区间限定为 290~225 °C。

关键词: 自然铜; 杏仁状玄武岩; 矿物组合; 固溶体分离; 峨眉山

中图分类号: P571; P578.1; P611.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2017.06.006

作者简介: 何利, 女, 1991年生, 硕士研究生, 从事矿床地球化学研究。E-mail: heli@mail.gyig.ac.cn

Genesis and Mineral Assemblages of Copper-Containing Amygdaloidal Basalt from Southern Sichuan and Northern Yunnan Provinces, China

HE Li^{1,2}, ZHU Xiao-qing^{1*}, WANG Fu-dong³, LI Xiao-xia^{1,2}, SHENG Xiang-yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China; 2. Chinese Academy of Sciences University, Beijing, 101408, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010, China)

Abstract: Emeishan basalt copper deposits are similar to Keweenaw copper deposits. The native copper deposit in amygdaloidal basalt which we called the “Amygdule -type” native copper ore rock, is one of the important components of Emeishan basalt copper deposits. The studies of ore minerals typomorphic characteristics, mineral assemblages and exsolution texture show that the “Amygdule -type” native copper deposits are volcanic hydrothermal ore deposits that formed in low-temperature reducing environment, significantly, the mineralization occurs in the hydrothermal stage, the dormant period or the terminal period of magmatism. The mineral sequence is as the order of copper→bornite, chalcocite, chalcopyrite→cuprite, tenorite, malachite. Bitumen is generated almost simultaneously as the native copper, and provides a kind of strong reducing environment for the deposition of the native copper and copper sulfides. The temperature range of copper is defined as 290~225 °C by the forming temperature of bitumen and the exsolution temperature of bornite-chalcocite.

Keywords: native copper; amygdaloidal basalt; mineral assemblage; exsolution texture; Emeishan

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 华南大规模低温成矿作用(973)项目(批准号: 2014CB440906)

* 通讯作者, E-mail: zhuxiaoqing@mail.gyig.ac.cn

2002 年,朱炳泉等根据滇黔边界一条 NW-SE 向构造隐性地球化学急变带的北东侧存在铜、镍、铂、钯异常,经过野外实地调查,发现在该区存在很富的自然铜-氧化铜工业矿体和广泛的矿化点^[1]。之后,张正伟等^[2]、李厚民等^[3]、薛步高^[4]、张乾等^[5]、王富东^[6]、戴传固等^[17]相继对峨眉山玄武岩铜矿作了进一步研究,王富东^[6]总结出了 3 种与峨眉山玄武岩相关的铜矿类型:①玄武岩之上宣威组中的沉积型铜矿;②玄武岩中的热液型铜矿;③玄武岩(底部)与茅口灰岩接触面上的风化淋滤型铜矿^[7]。本文研究的“杏仁体式”自然铜矿床则是玄武岩中的热液型铜矿床。

杏仁状玄武岩中的自然铜矿床与世界最大的铜矿床——美国基韦诺型铜矿具有相似性,基韦诺铜矿中 60%以上的铜矿赋存在杏仁矿层中^[8-9]。我国的杏仁状玄武岩中的自然铜矿主要分布于川滇黔地区,与地幔柱成矿作用间接相关^[10-11],玄武岩高的铜背景值为该类型矿床提供了物质来源^[12-16],其中矿石矿物以自然铜为主,此外还包括辉铜矿、黄铜矿、斑铜矿、黑铜矿等^[16],伴生一定量的自然银,矿石矿物呈粒状、板片状、网脉状、细脉状、浸染状等^[17]。矿石中含有大量沥青等有机质,有机质来自下部的古油藏,在成矿过程中充当还原剂、吸附剂^[18-20]。矿床围岩蚀变较强烈,包括绿泥石化、沥青化、硅化、沸石化、方解石化等^[6, 21-23]。在火山岩中含有大量沥青物质,且伴有铜矿化,甚至形成有工业价值的铜矿床(如乌坡铜矿、小寨铜矿等),这不仅是一种特殊的地质现象,而且可以据此建立一种新类型的成矿模式,有助于石油及铜等有色金属的找矿工作。

本文采集了川南滇北“杏仁体式”铜矿代表性矿化点样品进行鉴定与分析,通过对全岩地球化学特征、矿石矿物标型特征、铜矿物组合特征以及铜矿物固溶体溶离结构特征等研究,简拟了川滇黔“杏仁体式”自然铜矿成矿模式。

1 地质概况

扬子板块是晚古生代地幔柱成矿系统、中生代大面积低温成矿系统等陆内成矿作用的理想地质构造单元^[10]。研究区处在扬子板块西缘的四川与云南接壤地带(属乐山、凉山、昭通等市州管辖)断裂、褶皱等构造较发育,这里的峨眉山玄武岩及其有关

铜矿广泛分布(图 1),是峨眉山大火成岩省的组成部分。峨眉山玄武岩具有 4 个喷发旋回,每个喷发旋回呈韵律变化,由底部至顶部依次为致密块状玄武岩、斑状玄武岩、气孔状或杏仁状玄武岩^[22],铜矿化则主要发育在第三旋回顶部的杏仁状玄武岩中。峨眉山玄武岩下伏不整合接触的下二叠统含有机质茅口灰岩,上覆整合接触的上二叠统宣威组砂岩、页岩(夹煤层)、砾岩或龙潭组^[2,11]。

2 样品采集与分析

采集了乐山市峨眉山市龙池镇幺店乡、凉山州普格县东山乡、凉山州昭觉县乌坡铜矿、昭通市永善县码口乡等矿化点(图 1)代表性的碱性玄武岩样品,进行室内样品处理之后,通过镜下鉴定,大致确定了铜矿物类型、特征及杏仁状玄武岩中的矿物组合。利用联合能谱的场发射式扫描电子显微镜(FE-SEM)观察并确定了铜矿物的标型特征及样品中的矿物组合。利用电子探针(EPMA)对铜矿物做了原位微区的化学组成分析。以上鉴定分析均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

3 矿物学特征

所采集的峨眉山玄武岩样品斑晶较少,主要为隐晶质或未结晶的非晶物质(图 2)。川南滇北杏仁状玄武岩发育大量杏仁体(图 2a),小到直径约 1 mm,大到 2~4 cm,多呈椭球形,部分杏仁被拉长呈长椭球形,定向排列(图 2b)。杏仁体中主要充填沥青、铜矿物、绿泥石、石英、方解石、沸石、玉髓等矿物,大多可见矿物呈圈层结构。斑状玄武岩(图 2c)发育少量至大量的斜长石斑晶,斜长石斑晶分散分布或呈雪花状集合体,基质中可见少量橄榄石、辉石、黄铜矿、斑铜矿分布,其他多为非晶质。致密块状玄武质熔岩(图 2d)呈深灰色,很少见矿物晶体,多为非晶质。

3.1 杏仁状玄武岩中的主要铜矿物特征

在川南滇北杏仁状玄武岩中,铜主要以自然铜、斑铜矿、辉铜矿、黄铜矿等铜硫化物的形式存在,其次为赤铜矿、黑铜矿、孔雀石(图 3),相互之间存在着较为密切的共生关系。此外,自然铜中还伴生有一定的自然银(图 4e)。

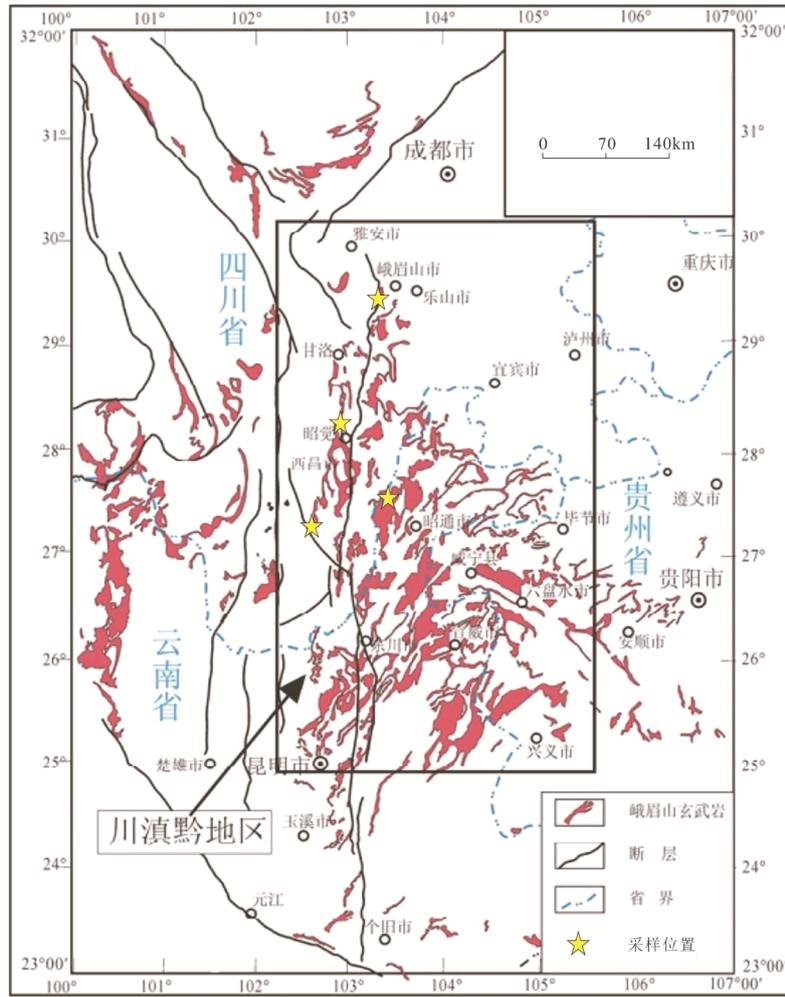


图1 峨眉山玄武岩分布及采样位置示意图 (据骆耀南等^[31](1985)和李厚民等^[32](2009)修改)

Fig. 1. Schematic diagram of Emeishan basalt and sampling location.

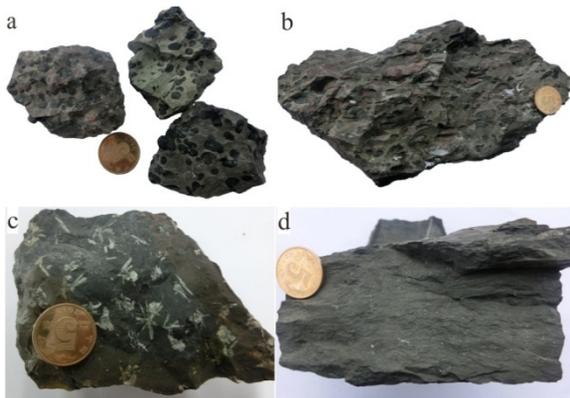


图2 研究区岩石照片

Fig. 2. Rock photos of researched area.

自然铜是杏仁状玄武岩中含量最多的铜矿物, 呈铜红色, 均质矿物, 片状、细粒-粗粒的不规则粒状、细粒状集合体, 硬度较低, 手标本中自然铜片可用手弯折, 薄片自然铜表面可见擦痕。自然铜主要分布于杏仁体中(图 3a, d), 通常与沥青共生

(图 4a), 此外还可见于石英脉中(图 3e)及杏仁体外基质中(图 3d, e)。电子探针分析结果见表 1。

研究区杏仁状玄武岩中斑铜矿呈浅玫瑰黄棕色(图 3b), 为均质矿物, 不规则粒状、细粒状集合体。薄片斑铜矿表面光滑, 易磨光。斑铜矿通常与黄铜矿、辉铜矿、自然铜共生, 分布在杏仁体中或杏仁体外的基质中。电子探针分析结果见表 2。

研究区杏仁状玄武岩中的辉铜矿(图 4c, d)呈灰白色, 带浅黄色调, 为弱非均质, 不规则粒状, 粒度较粗。薄片中的辉铜矿表面光滑, 易磨光, 通常与斑铜矿、自然铜共生, 分布在杏仁体中或杏仁体外的基质中。电子探针分析结果见表 3。

研究区杏仁状玄武岩中的黄铜矿(图 3c)呈浅铜黄色、土黄色, 为弱非均质, 不规则粒状、粒状集合体。薄片中的黄铜矿表面光滑, 易磨光, 通常与斑铜矿共生, 主要分布在杏仁体边缘或杏仁体外的基质中。电子探针分析结果见表 4。

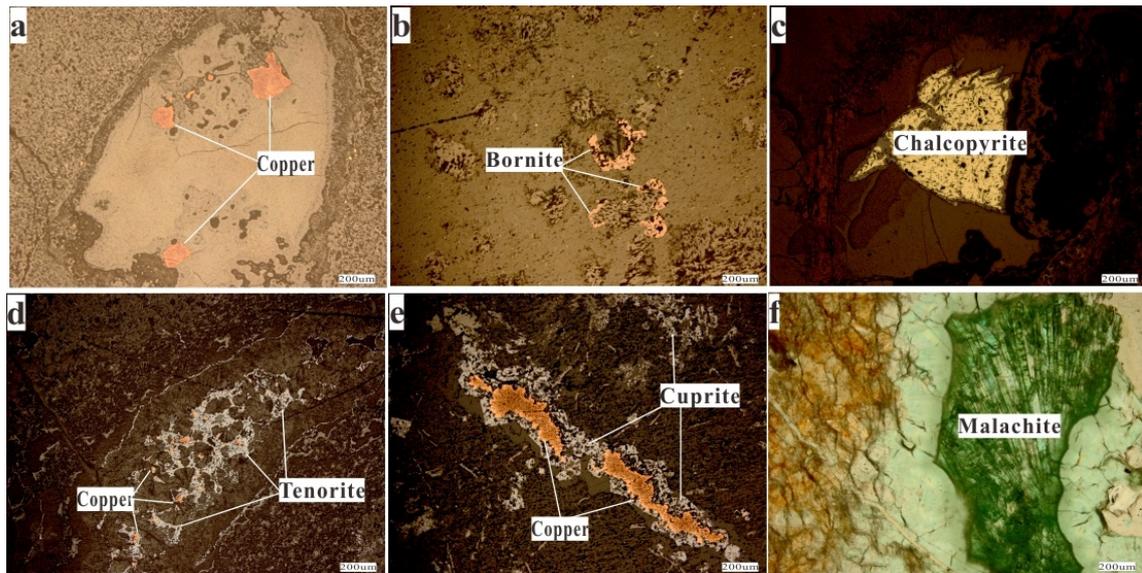


图 3 杏仁状玄武岩中铜矿物特征 (显微镜下照片)

Fig. 3. Copper minerals characteristics of amygdaloidal basalt (microscope photographs).

表 1 杏仁状玄武岩中自然铜电子探针分析结果 ($w_B/\%$)

Table 1. Electron microprobe analyses of native copper in amygdaloidal basalt

样品号	S	Fe	As	Au	Se	Ni	Co	Te	Zn	Ag	Cu	Pb	Total
LCh-05	0.017	0.014	1.108	0.000	0.022	0.007	0.005	0.000	0.000	0.007	96.025	0.000	97.204
LCh-05	0.003	0.157	0.836	0.000	0.000	0.017	0.010	0.000	0.000	0.007	96.385	0.017	97.433
DSh-22	0.026	0.055	2.161	0.035	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.017	95.962	0.000	98.266
WP-03-2	0.008	2.770	0.047	0.000	0.033	0.006	0.000	0.000	0.000	0.002	95.799	0.034	98.699
WP-03-2	0.009	3.561	0.058	0.052	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.030	94.539	0.015	98.272
WP-03-2	0.004	3.446	0.044	0.009	0.000	0.007	0.005	0.000	0.000	0.043	94.729	0.000	98.286
WP-03-2	0.009	2.000	0.065	0.080	0.035	0.001	0.000	0.007	0.000	0.000	94.947	0.000	97.143
WP-03-2	0.000	3.097	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.029	95.840	0.000	99.054
WP-03-2	0.041	2.544	0.064	0.000	0.000	0.012	0.014	0.007	0.000	0.006	94.122	0.05	96.860
MK-02	0.037	0.075	0.142	0.039	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	97.079	0.000	97.381

注: 数据由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分析, 采用 EPMA-1600 型电子探针仪进行 WDS 分析。

表 2 杏仁状玄武岩中斑铜矿电子探针分析结果 ($w_B/\%$)

Table 2. Electron microprobe analyses of bornite in amygdaloidal basalt

样品号	S	Fe	As	Au	Se	Ni	Co	Te	Zn	Ag	Cu	Pb	Total
LCh-15	24.775	11.740	0.270	0.000	0.000	0.020	0.000	0.032	0.000	0.010	61.756	0.000	98.603
LCh-15	24.707	11.304	0.257	0.000	0.057	0.004	0.009	0.000	0.000	0.011	61.347	0.000	97.696
LCh-15	24.474	11.231	0.179	0.000	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	62.655	0.000	98.583
LCh-15	24.709	11.203	0.257	0.037	0.000	0.000	0.01	0.027	0.000	0.000	61.624	0.000	97.868
LCh-15	24.731	11.190	0.292	0.000	0.054	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	61.647	0.000	97.944
LCh-23	24.854	11.155	0.251	0.000	0.028	0.000	0.000	0.007	0.000	0.069	61.041	0.000	97.404
WP-03-2	25.265	12.620	0.319	0.000	0.000	0.006	0.012	0.032	0.000	0.000	59.947	0.000	98.201
WP-03-2	25.349	12.421	0.301	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	59.995	0.000	98.076

注: 数据由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分析, 采用 EPMA-1600 型电子探针仪进行 WDS 分析。

表 3 杏仁状玄武岩中辉铜矿电子探针分析结果 ($w_B/\%$)

Table 3. Electron microprobe analyses of chalcocite in amygdaloidal basalt

样品号	S	Fe	As	Au	Se	Ni	Co	Te	Zn	Ag	Cu	Pb	Total
WP-03-2	19.353	1.073	0	0	0	0	0	0.003	0	0	77.409	0	97.838
WP-03-2	20.016	2.625	0.066	0.013	0	0.004	0.015	0	0	0.009	74.504	0	97.252

注: 数据由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分析, 采用 EPMA-1600 型电子探针仪进行 WDS 分析。

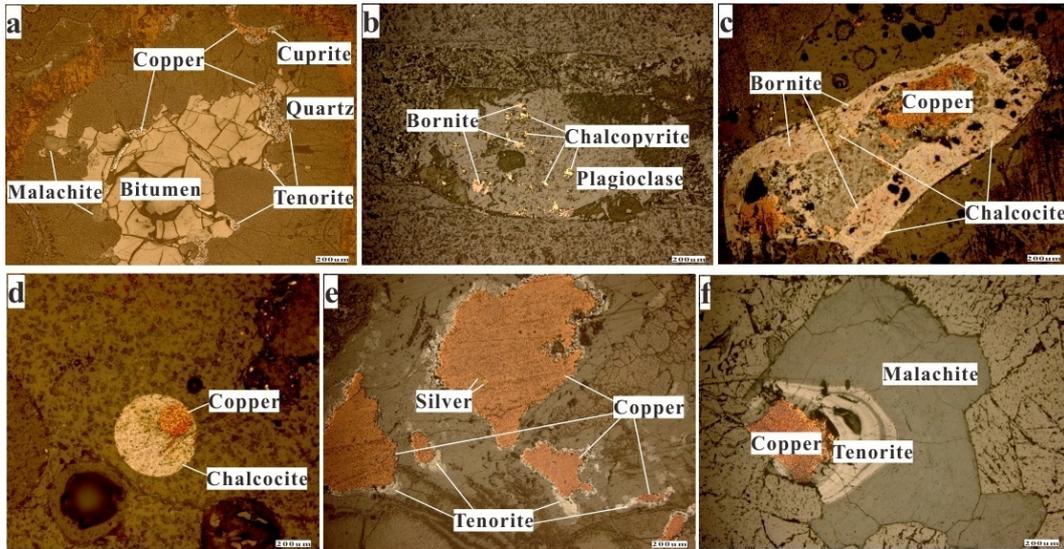


图4 杏仁状玄武岩中矿物共生关系(显微镜下照片)

Fig. 4. Mineral assemblages in amygdaloidal basalt (microscope photographs).

表4 杏仁状玄武岩中黄铜矿电子探针分析结果($w_B/\%$)

Table 4. Electron microprobe analyses of chalcopyrite in amygdaloidal basalt

样品号	S	Fe	As	Au	Se	Ni	Co	Te	Zn	Ag	Cu	Pb	Total
LCh-23	33.299	29.714	0.529	0	0	0	0	0.001	0	0.008	33.548	0	97.099
LCh-23	33.417	29.713	0.333	0	0	0.01	0	0.036	0	0.021	33.606	0	97.136
DSh-02	34.013	29.620	0.506	0.119	0.056	0	0	0	0	0	34.031	0	98.344
DSh-02	33.805	30.439	0.519	0	0	0	0	0	0	0.012	33.934	0	98.709
DSh-02	33.772	30.505	0.525	0.048	0.021	0.002	0	0.063	0	0.010	34.105	0	99.053
DSh-02	33.811	30.265	0.495	0	0.035	0	0	0	0	0	34.207	0	98.813
DSh-02	33.939	30.436	0.534	0	0.028	0	0	0	0	0.005	34.426	0	99.368
DSh-02	33.696	30.282	0.508	0.094	0.004	0.004	0	0	0	0	34.301	0	98.888
DSh-02	33.624	30.293	0.593	0.034	0.011	0	0	0.012	0	0	34.491	0	99.059

注: 数据由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分析, 采用 EPMA-1600 型电子探针仪进行 WDS 分析。

赤铜矿(图 3e)呈浅灰色微带浅蓝色调、浅褐色, 均质, 不规则粒状集合体, 在薄片表面光滑, 易磨光, 通常与自然铜共生, 分布在杏仁体中、石英脉中及杏仁体外基质中。

黑铜矿(图 3d)呈灰白色、浅灰黄色, 非均质, 板片状, 在薄片表面光滑, 易磨光, 常分布在自然铜周围, 产于杏仁体中、石英脉中及杏仁体外基质中。

孔雀石(图 3f)呈鲜绿、暗绿色, 针状、板柱状集合体、肾状, 可见两组完全解理发育, 与自然铜、黑铜矿、石英等共生, 分布在杏仁体中、石英脉中及杏仁体外基质中。

3.2 杏仁状玄武岩中的矿物组合

在川南滇北含自然铜的杏仁状玄武岩中, 自然铜通常与沥青共生(图 4a), 主要分布在沥青裂隙

中。无论是杏仁体中还是杏仁体外的基质中, 只要有沥青分布的地方, 均分布有大量的自然铜, 通常肉眼可见, 且在沥青周围的铜矿物为自然铜及少量赤铜矿、黑铜矿、孔雀石。此外, 杏仁外的基质中(图 4d, e)、石英脉中(图 3e)等也有少量自然铜分布, 与斑铜矿、辉铜矿、黑铜矿等矿物共生(图 4c, e)。

黄铜矿通常与斑铜矿共生(图 4b), 分布在杏仁体之外的基质中, 却很少与辉铜矿共生。辉铜矿与斑铜矿共生, 呈固溶体分离形成的结状结构(图 5), 部分包裹自然铜(图 4c), 分布于杏仁中或杏仁体外的基质中。此外还可见辉铜矿包裹自然铜形成铜矿物球粒(图 4d), 表明辉铜矿晚于自然铜生成。

黑铜矿、赤铜矿等铜的氧化物分布较广, 但均分布在自然铜周围(图 4a, e, f), 形成较薄的圈

层包围自然铜,包括在沥青裂隙中、石英脉中等处,铜的硫化物矿物周围则未见黑铜矿、赤铜矿,表明黑铜矿、赤铜矿为自然铜氧化形成。孔雀石主要分布在既有铜矿物又有石英的地方(图 3f,图 4f),亦为后期蚀变矿物。

通过以上矿物共生关系可以推断,沥青与自然铜几乎同时形成,且早于其他铜矿物,沥青的形成和存在为自然铜以及铜的硫化矿物的形成提供还原环境。随着自然铜的晶出,硫也逐渐参与结晶,之后晶出的铜矿物则为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等铜的硫化物。而赤铜矿、黑铜矿、孔雀石这些铜的氧化矿物则是成矿之后,由自然铜氧化蚀变形成,因为在沥青存在的强还原环境下,不可能形成黑铜矿这样的氧化矿物。

3.3 固溶体溶离温度计

大多数矿物在形成过程中或形成后,对外部温压变化都有敏锐的反应,温度变化的信息包含在矿物的成分、结构、形态、物性及包体中。利用矿物各种标型来判断地质体形成的具体温度和压力,就称为矿物温压计^[24]。矿物温压计包括多种类型,如类质同象温压计、稳定同位素温度计、气液包裹体温压计等等,固溶体分离也可以指示地质体形成的温度。

性质相似的元素或化合物在高温时形成均一的固溶体,随着温度、压力下降变的不稳定,分离形成两种或两种以上的矿物相,则称为固溶体分离,固溶体分离时的温度为“共析点”,可作为地质温度计。当固溶体温度高于矿物结晶温度时,为均匀的熔体或溶液;当固溶体温度下降到矿物结晶温度和“共析点”之间时,则结晶成均匀的固溶体;只有当固溶体温度下降到共析点以下时,才能发生固溶体分离,形成多种矿物相^[25]。并且温度下降不能太快,否则将淬火硬化,不能发生固溶体分离。由此可知,固溶体分离结构均形成于高温逐渐冷却后的低温环境。

在川南滇北含自然铜的杏仁状玄武岩中,可以观察到斑铜矿和辉铜矿共生的固溶体分离结构——结状结构(图 5)。辉铜矿的粒状集合体呈不规则的细脉状,弯曲环绕在斑铜矿边缘,且可见辉铜矿和斑铜矿共生紧密,局部可见成分过渡。由此推断辉铜矿和斑铜矿同时形成,形成于高温冷却后的低温

环境,即玄武岩岩浆作用后期热液阶段。由于斑铜矿-辉铜矿的固溶体分解温度为 175~225 °C^[24],则可推断辉铜矿、斑铜矿的形成温度低于 225 °C。

综上所述,在川南滇北“杏仁体式”自然铜矿中,铜矿物主要为自然铜、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿,形成于成矿期;其次的赤铜矿、黑铜矿、孔雀石则为后期蚀变氧化形成。在峨眉山玄武岩岩浆作用末期及间歇期的热液阶段,成矿热液从下覆地层中萃取的有机质发生裂解,形成沥青,并充填在玄武岩气孔和基质中,形成强还原环境,同时成矿热液富集玄武岩中的铜元素,在含有沥青的强还原环境下沉淀形成自然铜。随着自然铜晶出,硫逐渐参与结晶,之后晶出的矿物为黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿。在成矿作用之后,由于后期蚀变作用,少量自然铜被氧化形成赤铜矿、黑铜矿、孔雀石。

根据矿物共生组合及固溶体溶离温度计推断,研究区“杏仁体式”自然铜矿矿化主要发生在岩浆作用末期及间歇期的热液阶段,形成于低温还原环境,为火山低温热液矿床。

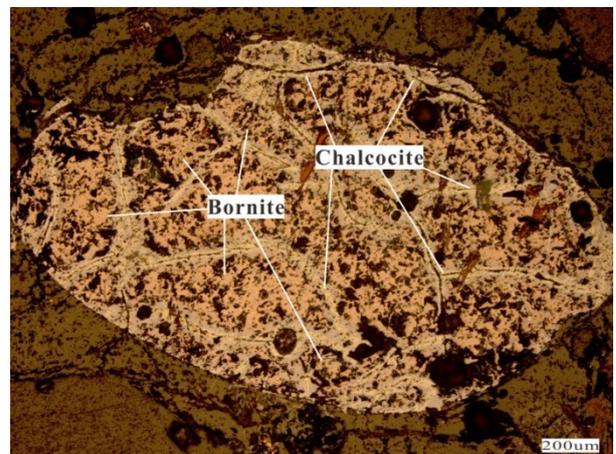


图 5 斑铜矿和辉铜矿固溶体分离结构图(显微镜下照片)

Fig. 5. bornite-chalcocite exsolution texture (microscope photographs).

4 讨论与结论

针对玄武岩中充填于杏仁体内的“杏仁体式”自然铜矿进行了研究,结果表明“杏仁体式”自然铜矿为火山低温热液矿床,峨眉山玄武岩的高 Cu 背景值为自然铜矿床形成提供了物质基础。成矿过程发生在岩浆结晶分异期后,成矿后还经历过后期的热液蚀变改造。

4.1 成矿物质来源

关于似基韦诺型铜矿的成矿物质来源,除了早期李厚民等^[3]认为来自地壳以外,其他人均一致认为来自玄武岩^[11,13-17]。

晚二叠统峨眉山玄武岩是由晚古生代峨眉山大陆地幔柱活动形成,地幔柱活动从壳幔深部带来了大量成矿元素^[12,26],其中就包括大量的铜元素。胡正纲等^[27]、廖震文等^[28]、王富东^[6]等统计发现峨眉山玄武岩具有高的铜背景值,平均可达 170×10^{-6} 。杏仁体玄武岩中的自然铜矿赋存在峨眉山玄武岩主体的高钛玄武岩中,与峨眉山玄武岩紧密相关,甚至玄武岩之上宣威组中的沉积型铜矿和玄武岩底部与茅口灰岩接触面上的风化淋滤型铜矿中的铜都是来自峨眉山玄武岩^[6]。此外,钱壮志等^[13]也通过铅同位素证据证明了玄武岩铜矿中的铜来源于玄武岩。由此推断峨眉山玄武岩为自然铜矿的形成提供了成矿物质来源,应该是没有异议的。

4.2 有机质来源及作用

在玄武岩铜矿中存在大量沥青,前人研究认为玄武岩中铜矿石的沥青为异地来源的腐泥型,来自下伏较老地层;玄武岩间含碳沉积夹层中的铜矿石炭质为原地来源的腐殖型^[13,19]。则“杏仁体式”自然铜矿中沥青为异地来源,来自下部地层中的油气藏。此外,沥青的存在为铜以自然铜形式沉淀成矿提供了必备的还原环境,同时也对铜的富集沉淀起到了吸附作用。

沥青是石油裂解后残留原地的产物,张良钜等通过包裹体测温指出玄武岩铜矿中沥青形成的温度区间为 $230 \sim 290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[29]。由研究区矿石矿物组合及矿物分布特征可知,铜矿物均形成于岩浆作用结束期的温度下降阶段,且与沥青同时或晚于沥青,由此可知自然铜形成温度低于 $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$,即沥青形成温度为自然铜晶出温度的上限。根据固溶体溶离温度计,斑铜矿-辉铜矿的固溶体分解温度为 $175 \sim 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$,则辉铜矿、斑铜矿的形成温度低于 $225 \text{ }^{\circ}\text{C}$,自然铜早于辉铜矿、斑铜矿形成,则自然铜形成温度高于 $225 \text{ }^{\circ}\text{C}$,即辉铜矿、斑铜矿形成温度为自然铜晶出温度的下限。由此可知,自然铜形成温度区间为 $225 \sim 290 \text{ }^{\circ}\text{C}$,即“杏仁体式”自然铜矿主要矿化期为岩浆作用末期及间歇期的热液阶段。

4.3 成矿机制

关于玄武岩铜矿的成因存在争议,部分人认为是同生火山热液成矿,与强还原环境下的有机-无机相互作用有关^[1],大多数人则认为是岩浆气液阶段初富集,后期构造热液叠加成矿^[3-5],但均认可低温热液成因。

本文认为杏仁体玄武岩中的铜矿是岩浆作用结束期及间歇期低温火山热液成因的矿床,并简拟了如下的成矿模式,来诠释峨眉山杏仁状玄武岩中铜矿的形成过程:

扬子板块西缘晚二叠世的地幔柱活动诱发了大规模的玄武岩浆的形成与上侵,随着玄武岩浆的分异作用及穿越上部地壳时与富铜基底所发生的混染作用的进行,形成富含Cu的玄武岩浆。随着岩浆结晶分异作用的进行,Cu的富集作用加强,并在岩浆分异作用晚期,充分富集在具有挥发分的气孔-杏仁状玄武岩中。随后,岩浆作用末期的岩浆热液在上侵过程中萃取古生界古油藏中的有机质,并与结晶分异后形成的富Cu岩浆水以及地表建造水混合形成成矿热液。在岩浆作用结束期及间歇期的热液阶段,随着成矿热液温度下降,至 $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,有机质裂解形成沥青,并在气孔中及连接气孔的微裂隙中析出,同时通过吸附作用使铜富集在杏仁体及微裂隙中而成矿。由于沥青物质的大量存在,使铜矿化处在一个还原的环境,故而铜主要以自然铜的形式晶出。伴随着沥青化的发生,还发生了硅化作用,硅质主要以玉髓、石英等形式充填在杏仁体中^[30]。之后随着自然铜析出,硫逐渐参与结晶,晶出的矿物亦向黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿转变。在成矿作用之后,由于后期构造热液作用,自然铜被氧化形成赤铜矿、黑铜矿、孔雀石。

研究认为,杏仁状玄武岩中的自然铜矿可以是一种有开发价值的铜矿类型,在铜背景值高的玄武岩分布区应注意加强对这种类型铜矿的找矿工作。

致谢: 本文在选题、采样、样品处理、实验分析、数据处理等过程中得到了王中刚研究员、韩涛高级工程师、凌坤跃助理研究员、李金翔同学的指导和帮助,在实验分析过程中得到了周国富研究员、郑文勤高级工程师、胡静高级工程师、黄艳高级工程师、包广萍老师、董小花老师、蔡佳丽老师、李响老师的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献:

- [1]朱炳泉, 胡耀国, 张正伟, 等. 滇-黔地球化学边界似基韦诺(Keweenaw)型铜矿床的发现[J]. 中国科学 (D 辑),2002, 32(S1): 49-59.
- [2]张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 黔西上二叠统玄武岩组上部凝灰岩层发现黄铜矿化[J]. 矿物学报,2003, 23(2): 102.
- [3]李厚民, 毛景文, 张长青, 等. 滇黔交界地区玄武岩铜矿同位素地球化学特征[J]. 矿床地质,2004, 23(2): 232-240.
- [4]薛步高. 峨眉山玄武岩与玄武岩铜矿成矿研究[J]. 化工矿产地质,2007, 29(2): 88-97.
- [5]张乾, 王大鹏, 范良伍, 等. 滇-黔相邻地区峨眉山玄武岩型自然铜-辉铜矿矿床的成矿规律及成矿前景分析[J]. 地质与勘探,2008, 44(2): 8-13.
- [6]王富东. 川滇黔接壤地区与峨眉山玄武岩有关的铜矿床成因研究[D]. 安顺: 中国科学院地球化学研究所(博士论文),2011: 1-97.
- [7]Wang FD, Zhu XQ, Han T, et al. Modeling experimental study on weathering-leaching of Emeishan basalt and its relation with metallogenesis[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*,2010, 29(2): 212-216.
- [8]ZhuBQ, Hu YG, Zhang ZW, et al. Discovery of the copper deposits with features of the Keweenawan type in the border area of Yunnan and GuizhouProvinces[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*,2003, 46(S1): 60-72
- [9]Bornhorst T J, Barron R J. Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan[A]. Miller JD.*Archean to Anthropocene: Field Guides to the Geology of the Mid-Continent of North America*[M].Boulder, Colo.: Geological Society of America,2011: 83-99.
- [10]徐义刚, 王焰, 位荀, 等. 与地幔柱有关的成矿作用及其主控因素[J]. 岩石学报,2013, 29(10): 3307-3322.
- [11]许稳, 王富东, 易发成, 等. 川西自然铜矿床类型及成矿机理浅析[J]. 地质科技情报,2016, 35(3): 112-120.
- [12]Song XY, Zhou MF, Hou ZQ, et al. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalt, Southwestern China[J]. *International Geology Review*,2001, 43(3): 213-225.
- [13]钱壮志, 徐翠玲, 章正军, 等. 滇东北地区峨眉山玄武岩铜矿成矿物质来源[J]. 矿物岩石,2007, 27(1): 78-82.
- [14]王晓刚, 黎荣, 蔡俐鹏, 等. 川滇黔峨眉山玄武岩铜矿成矿地质特征、成矿条件及找矿远景[J]. 地质学报,2010, 30(2): 174-182.
- [15]刘雪敏, 王学求, 徐善法, 等. 华南陆块铜的地球化学块体与成矿省的关系[J]. 地学前缘,2012, 19(3): 59-69.
- [16]戴传固, 刘爱民, 王敏, 等. 贵州西部峨眉山玄武岩铜矿特征及成矿作用[J]. 贵州地质,2004, 21(2): 71-75.
- [17]陈大. 基韦诺半岛与滇黔地区玄武岩铜矿对比研究[J]. 大地构造与成矿学,2015, 39(1): 110-127.
- [18]毛景文, 王志良, 李厚民, 等. 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中铜矿床的碳氧同位素对成矿过程的指示[J]. 地质论评,2003, 49(6): 610-615.
- [19]李厚民, 毛景文, 张冠, 等. 滇黔交界地区玄武岩铜矿蚀变分带和有机包裹体特征及其地质意义[J]. 地质学报,2006, 80(7): 1026-1034.
- [20]武国辉, 金中国, 董家龙. 威宁铜厂河玄武岩铜矿成矿地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质,2005, 19(5): 482-486.
- [21]朱炳泉, 戴植漠, 胡耀国, 等. 滇东北峨眉山玄武岩中两阶段自然铜矿化的⁴⁰Ar/³⁹Ar与U-Th-Pb年龄证据[J]. 地球化学,2005, 34(3): 235-247.
- [22]张良钊, 刘靖娜, 曾伟来, 等. 川南玄武岩气孔中硅铁灰石杏仁体的特征与研究[J]. 岩石矿物学杂志,2014, 35(5): 917-923.
- [23]张良钊, 曾南石, 阮青锋, 等. 川南滇北交界处杏仁状玄武岩中的沥青微形貌特征与成因研究[J]. 岩石矿物学杂志,2013, 32(4): 523-528.
- [24]陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社,1987:320-369.
- [25]尚浚, 卢静文, 彭晓蕾, 等. 矿相学[M]. 2 版. 北京: 地质出版社,2012:122-143.
- [26]侯增谦, 卢仁仁, 汪云亮, 等. 峨眉山火成岩省: 结构、成因与特色[J]. 地质论评,1999, 45(S1): 885-891.
- [27]胡正纲, 贺尚荣, 赵支刚, 等. 康滇地轴东缘(四川部分)玄武岩铜矿远景调查报告[R]. 成都: 四川省地矿局,1995:24-71.
- [28]廖震文, 胡光道. 一种非传统铜矿资源——黔西北地区峨眉山玄武岩铜矿地质特征及成因探讨[J]. 地质科技情报,2006, 25(5): 47-51, 56.
- [29]张良钊, 胡蕙驿, 曾伟来, 等. 川南玄武岩晶洞中的沥青与铜矿物球粒研究[J]. 高校地质学报,2015, 21(2): 177-185.
- [30]朱笑青, 王富东, 黄艳, 等. 滇黔邻接地区与峨眉山玄武岩有关铜矿的多样性与特殊性[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008, 27(Z1): 250-251
- [31]骆耀南, 张云湘, 刘秉光. 中国攀枝花-西昌古裂谷带[A]. 张云湘. 中国攀西裂谷文献 1[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-25.
- [32]李厚民, 毛景文, 张长青, 等. 滇东北峨眉山玄武岩铜矿研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-139.