

西藏甲玛铜多金属矿床斑铜矿特征及其成因意义*

王 焕¹, 王立强¹, 应立娟¹, 郑文宝²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要 甲玛矿床是中国国内少见的以斑铜矿为主要含铜矿物的产于斑岩成矿系统内的铜多金属矿床。斑铜矿是该矿床内普遍存在的重要铜矿物之一, 广泛分布于矽卡岩型矿石、(矽卡岩化)大理岩型矿石中, 有少量产于角岩型矿石中。在硅灰石矽卡岩型矿石内, 斑铜矿分布最广, 含量也最高, 部分矿段中斑铜矿的含量高达 75% 以上, 并与硅灰石呈共生或伴生关系。斑铜矿矿石以细(网)脉状、浸染状、块状构造为主, 斑铜矿与黄铜矿普遍构成固溶体分离结构。在不同类型矿石中, 斑铜矿具有不同的颜色, 角岩中的斑铜矿以蓝色为主, 矽卡岩中以锗紫色、棕红色为主, 大理岩中以紫红色为主。研究表明, 斑铜矿颜色的多样性主要是由 Fe 含量、形成温度及固溶体出溶的黄铜矿的含量多少造成的。斑铜矿固溶体分离结构及矿床中硫铋铜矿形成条件的研究表明, 甲玛矿床中的斑铜矿多形成于中-高温(225~450 °C)阶段, 少数形成于中温(175~225 °C)阶段。金属硫化物硫同位素组成研究表明, 该矿床内的硫主要为岩浆来源。斑铜矿矿物学研究成果表明, 甲玛矿床的形成与中新世岩浆活动有关, 是典型的斑岩型-矽卡岩型铜多金属矿床。

关键词 地质学; 斑铜矿; 岩浆作用; 甲玛铜多金属矿床; 西藏

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Features and genesis of bornite in Jiama copper-polymetallic deposit of Tibet

WANG Huan¹, WANG LiQiang¹, YING LiJuan¹ and ZHENG WenBao²

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract

As one of the most important copper minerals, bornite extensively occurs in the Jiama Cu-polymetallic deposit. Being rare in China, bornite serves as the main copper-bearing mineral in the porphyry mineralization system. Bornite is widely distributed in skarn-type ores and skarnized marble-type ores in this ore deposit, with a small amount of bornite existent in the hornfels-type ore bodies. Bornite most widely occurs in the wollastonite skarn-type ores, characterized by the highest content, with the highest content of bornite in some ore blocks being up to 75%. Bornite has a accompanying or paragenetic relationship with wollastonite. Bornite ores mainly show fine veinlike (stock veinlet), dissemination and massive structures. Bornite and chalcopyrite generally constitute a detachable portion of solid solution. Bornite ores of different colors occur in various ore types. In hornfels it mainly shows blue color, while tarnish-purple and brownish-red colors are the main colors in skarn, and purple color is commonly seen in marbles. Studies show that the color diversity of bornite results from Fe con-

* 本文得到国土资源部公益性行业科研专项经费(200911007-02)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K0911)、国家 973 项目(编号: 2011CB403103)、青藏专项(1212010818089)、中金集团重点勘探项目(E0804)的共同资助

第一作者简介 王 焕, 女, 1983 年生, 在读硕士研究生, 主要从事矿物学及矿床学研究工作。Email: wanghuan0920@tom.com

收稿日期 2010-11-23; 改回日期 2011-02-10。许德焕编辑。

tent, ore-forming temperature and the amount of chalcopyrite melted from solid solution. The research on the detachable portion of bornite ore and the formation conditions of gladiite ore in this ore deposit shows that bornite ores were mainly formed in the medium-high temperature phase ($225^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$), with a few formed in the medium temperature stage ($175^{\circ}\text{C} \sim 225^{\circ}\text{C}$) in the Jiama copper polymetallic deposit. A study of sulfur isotopic composition of copper minerals shows that sulfur was mainly derived from magmatic sources in this ore deposit. Mineralogical studies of bornites have confirmed that the formation of the Jiama copper polymetallic deposit was related to Miocene magmatic activity rather than to SEDEX held by previous researchers.

Key words: geology, bornite, magmatism, Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet

甲玛铜多金属矿床是冈底斯成矿带内具有重大经济意义和科学研究意义的一个超大型矿床,与相邻的驱龙斑岩型铜钼多金属矿床一并成为拉萨经济圈的重要矿业双子星(唐菊兴等,2010)。对该矿床的成矿时代(应立娟等,2009;2010a)、元素分带特征(郑文宝等,2010)、矿床成因(冯孝良等,2001;李光明等,2005;连玉等,2008;应立娟等,2009;唐菊兴等,2010)、矿床模型(唐菊兴等,2010)等方面已做了较深入的研究;但对其矿物学的研究却相对薄弱。迄今,世界上尚未见有哪个斑岩型-矽卡岩型铜多金属矿床有如此多的原生斑铜矿作为主要铜矿物。对中国国内斑岩型-矽卡岩型铜多金属矿床的归纳总结(赵一鸣,1990;黄崇柯等,1999)表明,这类矿床的铜矿石矿物多以黄铜矿为主(其矿石类型为黄铜矿、黄铁矿型),有少数以辉铜矿、蓝辉铜矿为主,个别以次生成因的斑铜矿为主,只有甲玛矿床的铜矿石矿物以斑铜矿、黄铜矿为主,且其斑铜矿为原生硫化物。位于甲玛矿床北东侧约30 km处的帮浦矿床,是冈底斯成矿带内的另一个斑岩型-矽卡岩型铜多金属矿床,该矿床内只有少量斑铜矿产出(孟祥金等,2007)。

作为甲玛铜多金属矿床内最主要含铜矿物之一的斑铜矿,在矿床中的产出和分布特征、与其他矿物之间的关系、矿物组构特征、成分组成特征以及成因等方面的研究,具有十分重要的意义。王焕等(2011)初步分析了该矿床主要金属硫化物的特征;应立娟等(2010c)对该矿床中斑铜矿的特征进行了简要分析。本文对该矿床内斑铜矿的矿物学特征进行了较为全面的研究,以揭示其空间产出和分布规律、研究其形成时的物理化学条件,为矿床成因研究提供成因矿物学方面的佐证。

1 矿床地质特征

甲玛铜多金属矿床在构造上位于冈底斯带的冈底斯-念青唐古拉复合火山-岩浆弧的东部(图1)(潘桂棠等,2006),是产在冈底斯成矿带东段的十分重要的铜多金属矿床之一。该矿床的钼、铅、锌、伴生金和银的含量均达到大型以上规模^①。

该矿区内出露地层较简单,主要为上侏罗统多底沟组(J_3d)、下白垩统林布宗组(K_1l)及少量第四系(Q)。第四系残坡积物仅在该矿区西北部牛马塘附近少量出露。林布宗组的岩性以砂板岩和角岩为主,主要分布于该矿区的北部。多底沟组的岩性为灰岩和大理岩,分布于矿区的南部,有少量出露于矿区西北部牛马塘附近(图2)。

该矿区内岩浆岩期次较多,成矿前和成矿后期均有发育,主要以岩脉、岩枝形式产出,岩性主要为花岗斑岩、黑云二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩等,次为基性-超基性岩脉。

甲玛铜多金属矿床的矿石类型按工业类型可分为矽卡岩型铜铅锌多金属矿石、角岩型铜钼矿石,及斑岩型铜钼矿石(唐菊兴等,2010),以矽卡岩型矿石为主体。矽卡岩型矿体受多底沟组和林布宗组层间构造带及甲玛-卡军果区域推覆体系的控制,角岩型矿体赋存于矽卡岩矿体之上,产在林布宗组角岩内。角岩型矿体的矿石矿物以黄铜矿和辉钼矿为主,含少量斑铜矿、黝铜矿等,其脉石矿物以石英为主,呈脉状产出,其次为绿帘石、绿泥石等,含极少量石膏。矽卡岩型矿体内矿石矿物的种类相对较多,以斑铜矿、黄铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿为主,其次为辉铜矿、硫铋铜矿、铜蓝、孔雀石等,脉

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫佑,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区外围铜多金属矿详查报告. 内部资料.

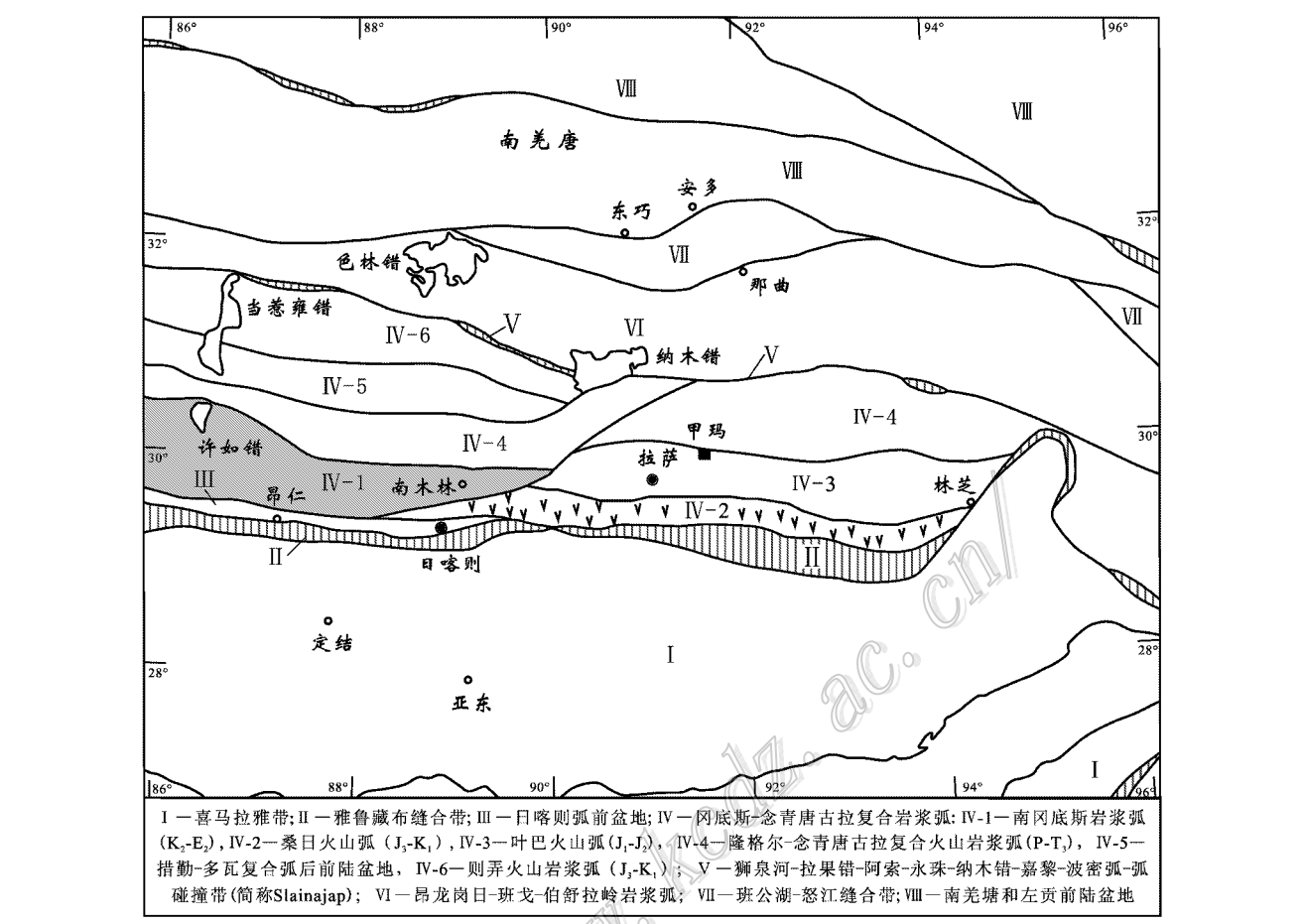


图 1 西藏构造单元划分和冈底斯构造单元细结构(据潘桂棠等, 2006 略作修改)

Fig. 1 Tectonic subdivisions of the Gangdise orogenic belt in Tibet(after Pan et al. , 2006)

石矿物以矽卡岩矿物为主,包括石榴子石(钙铝榴石、钙铁榴石)、硅灰石、透辉石等,其次为石英、方解石、绿帘石、绿泥石、石膏、萤石等。

2 斑铜矿产出特征

2.1 斑铜矿产出形式

在甲玛矿床内,斑铜矿分布十分广泛,每条勘探线中均有产出。矿床中斑铜矿的产出深度不尽一致,钻孔的最大见矿深度可达 716 m 左右,最浅处,近地表即可见。斑铜矿矿石主要产在矽卡岩中,且多分布于矽卡岩下部靠近大理岩的硅灰石矽卡岩中,有少量产于角岩的中-上部及大理岩(弱矽卡岩化)中(图 3)。在硅化角岩中,斑铜矿及其集合体的粒度相对细小、含量较少,多沿裂隙面(图 4a)或伴随强硅化呈细脉状(图 4b)、星散状产出,矿物组合以斑铜矿+黄铜矿、斑铜矿+黄铜矿+辉钼矿、斑铜矿+

黄铁矿为主。在大理岩中,斑铜矿多呈斑点状(图 4c)、团斑状,局部沿裂隙充填呈脉状(图 4d)产出,矿物组合以斑铜矿+黄铜矿、斑铜矿+黄铜矿+黝铜矿、斑铜矿+黝铜矿为主。在矽卡岩中,斑铜矿的产出形态多样,呈星散状(图 4e)、团斑状、脉状(图 4f)、块状等,矿物组合亦多样,主要为斑铜矿+黄铜矿、斑铜矿+辉钼矿、斑铜矿+黝铜矿、斑铜矿+黄铜矿+黝铜矿、斑铜矿+硫盐矿物(硫铋铜矿)等。

甲玛矿床中发育多种矽卡岩,主要有石榴子石矽卡岩、硅灰石矽卡岩、透辉石矽卡岩及绿帘石矽卡岩等。在野外露头观察及编录过程中发现,斑铜矿的产出数量和发育程度与矽卡岩中硅灰石的发育程度密切相关,其次是与石榴子石矽卡岩相关,只有少量斑铜矿与透辉石矽卡岩(共)伴生。斑铜矿的产出形式以矽卡岩矿物粒间充填交代为主(图 5a、b、c),其次以裂隙充填(图 5d、e)和后期石英硫化物脉(图 5f)产出,亦常见以块状(图 5g)或稠密浸染状(图 5h)

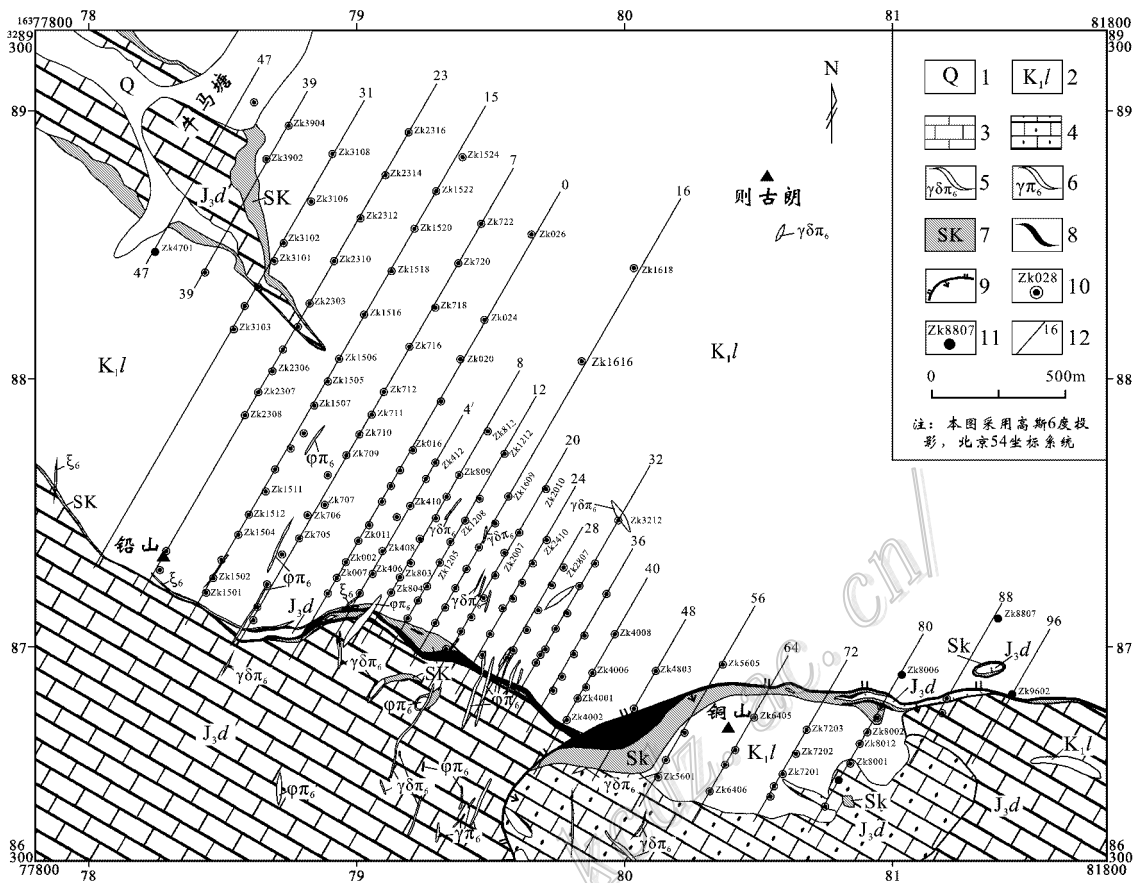


图 2 甲玛铜多金属矿床地质简图(据唐菊兴等 2009^①修改)

1—第四系;2—下白垩统林布宗组砂板岩、角岩(K_1l);3—上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩(J_3d);4—矽卡岩化灰岩、大理岩;5—喜马拉雅晚期花岗闪长斑岩脉;6—喜马拉雅晚期花岗斑岩脉;7—矽卡岩;8—矽卡岩型矿体;9—滑覆构造断裂;10—见矿钻孔;11—未见矿钻孔;12—勘探线及编号

Fig. 2 Simplified geological map of the Jiama Cu polymetallic ore deposit(modified after Tang et al., 2009)

1—Quaternary;2—Sandslate and hornfels in Lower Cretaceous Linbuzong Formation;3—Limestone and marble in Upper Jurassic Duodigou Formation;4—Skarnized limestone and skarnized marble;5—Granite diorite porphyry vein of late Himalayan period;6—Granite porphyry vein of late Himalayan period;7—Skarn;8—Skarn-type ore body;9—Decollement-nappe structure fault;10—Ore-intersecting drill hole;11—Drill hole without ore;12—Exploration line and its serial number

直接产出在硅灰石矽卡岩中。

2.2 矿石结构特征

在甲玛矿床矽卡岩型矿体的矿石中,斑铜矿多与黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿等铜矿物共生,形成原生铜硫化物矿石,包括斑铜矿-黄铜矿矿石、黄铜矿-斑铜矿矿石、黄铜矿-斑铜矿-黝铜矿(辉铜矿)矿石,以及少量独立的斑铜矿矿石。矿石构造以浸染状和团斑状构造为主,其次为脉状和网脉状构造,局部发育块状构造。在矿石结构中,固溶体分离结构十分发

育,其次为交代结构、他形-半自形晶结构等。固溶体分离结构主要表现为黄铜矿与斑铜矿互为主客晶,斑铜矿(或黄铜矿)呈无定向的或定向的乳滴状或叶片状(图 6a)以及格子状(图 6b、c)产于黄铜矿(斑铜矿)中,或者斑铜矿中有辉铜矿、硫铋铜矿等出溶物,或者形成共结边结构(图 6d),表现为两者接触边界平滑、无穿切关系,近于同时形成。交代结构表现为辉铜矿、方铅矿、闪锌矿等沿斑铜矿边缘或结晶方向进行交代,形成交代边缘(图 6e),或斑铜矿交代

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫估,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区外围铜多金属矿详查报告. 内部资料.

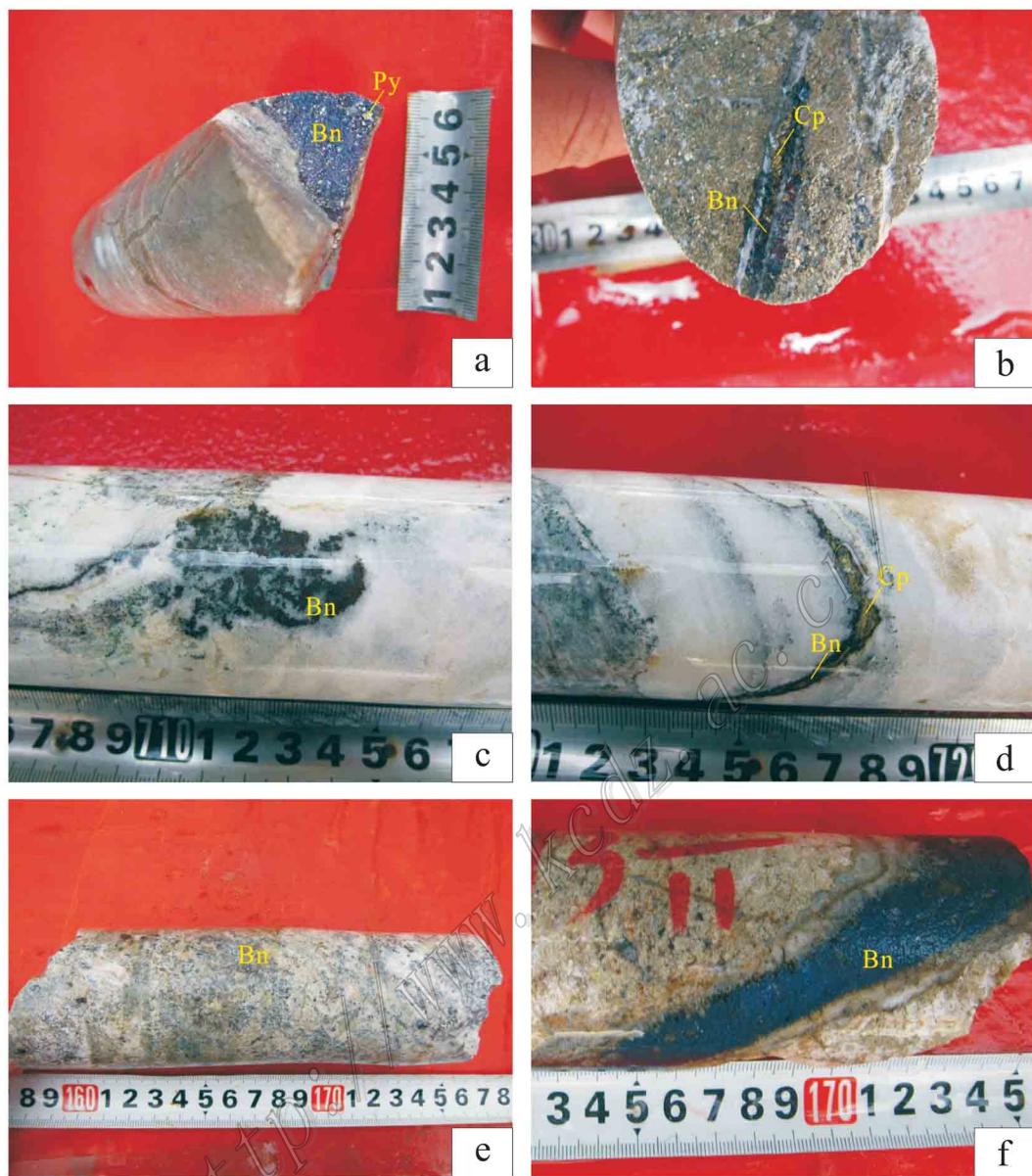


图 4 甲玛铜多金属矿床不同岩性中斑铜矿产出特征

a. ZK3220 孔, -63.3 m 处, 硅化角岩中斑铜矿+黄铁矿; b. ZK2418 孔, -55 m 处, 硅化角岩中斑铜矿+黄铜矿; c. ZK721 孔, -477.2 m 处, 大理岩中团斑状斑铜矿; d. ZK721 孔, -477.8 m 处, 大理岩中脉状斑铜矿+黄铜矿; e. ZK024 孔, -620.4 m 处, 砂卡岩中浸染状斑铜矿; f. ZK024 孔, -511.8 m 处, 砂卡岩中粗脉状斑铜矿; Bn—斑铜矿; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿

Fig. 4 Features of bornite in rocks of different lithologic characters in the Jiaoma Cu polymetallic deposit

a. ZK3220-63.3 m, bornite and pyrite in silicified hornfels; b. ZK2418-55 m, bornite and chalcopyrite in silicified hornfels; c. ZK721-477.2 m, spotted bornite in marble; d. ZK721-477.8 m, bornite and chalcopyrite vein in marble; e. ZK024-620.4 m, disseminated bornite in skarn; f. ZK024-511.8 m, large bornite vein in skarn; Bn—Bornite; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite

其含量极低;基本不含 As、Se,仅极个别样品可见;Co 在角岩型矿石的斑铜矿中未见,而在其他类型矿石的斑铜矿中均有均匀分布;大理岩中的斑铜矿不含 Ni,而在其他类型矿石的斑铜矿中,Ni 分布不均匀;在不同类型矿石的斑铜矿中,Te 和 Au 分布不均匀。

3.2 斑铜矿的颜色

甲玛矿床内斑铜矿的颜色较复杂,手标本上可呈锗紫色、紫红色、锗蓝色、棕色以及蓝色等;显微镜下可见斑铜矿的反射色为玫瑰色、锗紫色和较深的蓝紫色等。斑铜矿的颜色和反射色的多样性可能是由其形成时成矿溶液成分、物理条件以及出溶物含

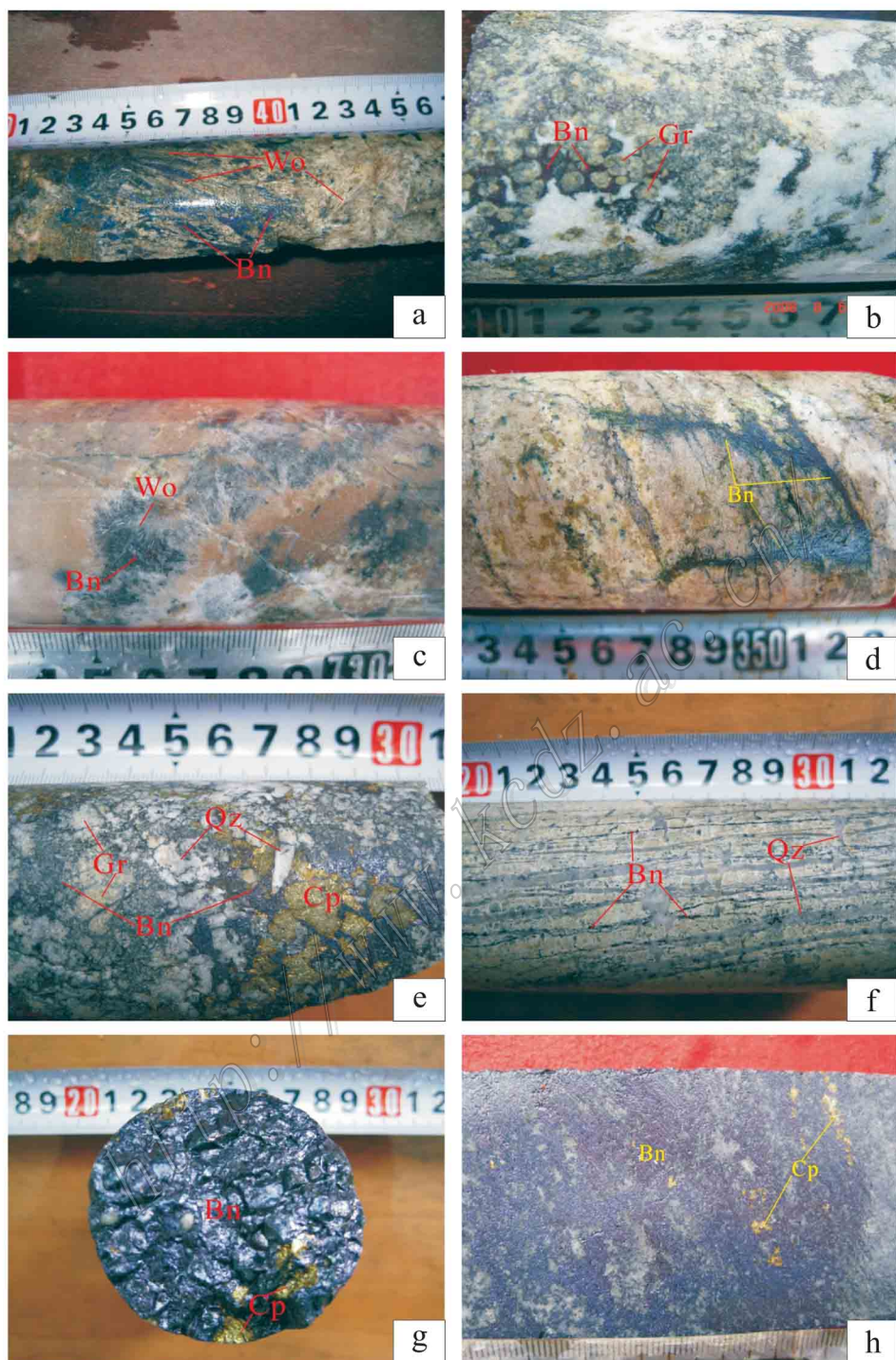


图5 甲玛矿床不同类型矽卡岩中斑铜矿产出特征

a. ZK1208 孔, -262.65 m 处, 硅灰石矽卡岩中斑铜矿; b. ZK1205 孔, -188.6 m 处, 石榴子石矽卡岩中斑铜矿; c. ZK2315 孔, -274.9 m 处, 硅灰石矽卡岩中斑铜矿; d. ZK722 孔, -435.6 m 处, 石榴子石矽卡岩中斑铜矿; e. ZK1602 孔, -64.87 m 处, 石榴子石矽卡岩中斑铜矿+黄铜矿; f. ZK1602 孔, -76.87 m 处, 矽卡岩石英脉中斑铜矿; g. ZK1602 孔, -126.78 m 处, 矽卡岩中团块状斑铜矿+黄铜矿; h. ZK1602 孔, -126.9 m 处, 矽卡岩中斑铜矿; Bn—斑铜矿; Wo—硅灰石; Gr—石榴子石; Qz—石英; Cp—黄铜矿

Fig. 5 Features of bornite in different skarn types of the Jiama ore deposit

a. ZK1208—262.65 m, bornite in wollastonite skarn; b. ZK1205—188.6 m, bornite in garnet skarn; c. ZK2315—274.9 m, bornite in wollastonite skarn; d. ZK722—435.6 m, bornite in garnet skarn; e. ZK1602—64.87 m, bornite and chalcopyrite in garnet skarn; f. ZK1602—76.87 m, bornite in quartz vein of skarn; g. ZK1602—126.78 m, crumbly bornite and chalcopyrite; h. ZK1602—126.9 m, bornite in skarn Bn—Bornite; Wo—Wollastonite; Gr—Garnet; Qz—Quartz; Cp—Chalcopyrite

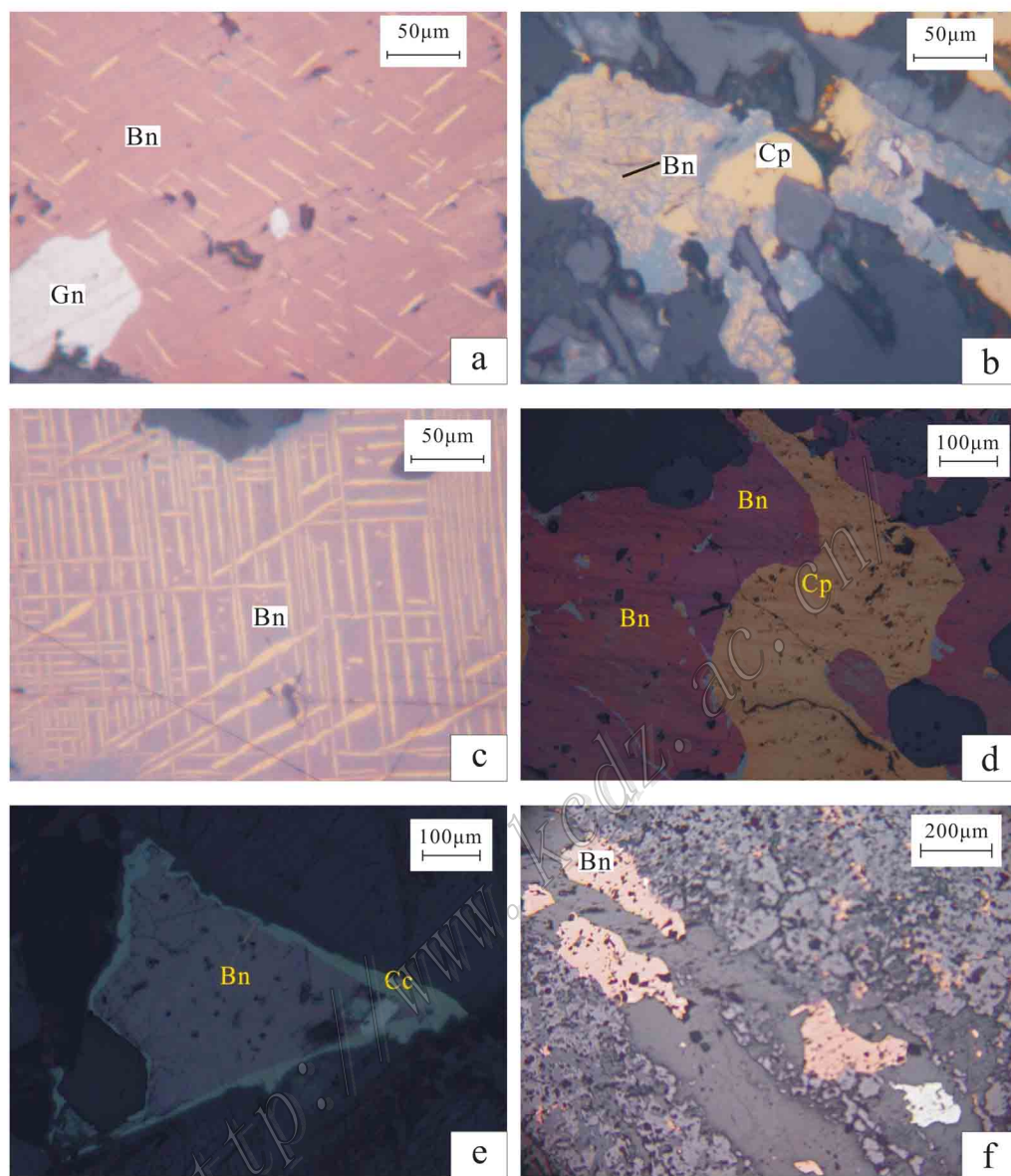


图 6 西藏甲玛铜多金属矿床斑铜矿组构特征

a. JM3901 孔, -77.78 m 处, 矽卡岩, 固溶体分离作用形成叶片状结构(斑铜矿中出溶黄铜矿)(单偏光); b. JM9602 孔, -145.7 m 处, 绢云母板岩, 固溶体分离作用形成格状结构(黄铜矿中出溶斑铜矿)(单偏光); c. JM3901 孔, -90.08 m 处, 矽卡岩, 固溶体分离作用形成格状结构(斑铜矿中出溶黄铜矿)(单偏光); d. JM2309 孔, -148.2 m 处, 矽卡岩, 固溶体分离作用形成黄铜矿与斑铜矿共结边结构(斑铜矿 + 黄铜矿)(单偏光); e. JM2409 孔, -429.75 m 处, 矽卡岩交代结构(单偏光); f. JM803 孔, -66.8 m 处, 矽卡岩, 他形-半自形晶结构(斑铜矿 + 辉铜矿)(单偏光); Bn—斑铜矿; Gn—方铅矿; Cc—辉铜矿; Cp—黄铜矿

Fig. 6 Fabric characteristics of bornite in the Jiama Cu polymetallic deposit

a. JM3901 - 77.78 m, skarn, foliated texture generated by solid solution decomposition: chalcocopyrite in bornite (plainlight); b. JM9602 - 145.7 m, sericite slate, lattice texture generated by solid solution decomposition: bornite in chalcocopyrite (plainlight); c. JM3901 - 90.08 m, skarn, lattice texture generated by solid solution decomposition: chalcocopyrite in bornite (plainlight); d. JM2309 - 148.2 m, skarn, eutectic boundary texture: bornite and chalcocite (plainlight); e. JM2409 - 429.75 m, skarn, metasomatic texture (plainlight); f. JM803 - 66.8 m, skarn, xenomorphic-pseudomorph granular bornite and chalcocite (plainlight); Bn—Bornite; Gn—Galena; Cc—Chalcocite; Cp—Chalcocopyrite

表 1 甲玛铜多金属矿床内不同类型矿石中斑铜矿的电子探针分析数据
Table1 Electron microprobe analyses of bornite from different ores in the Jiama copper-polymetallic deposit

岩性	测点号	w(B)/%													总和
		Fe	Cu	S	Au	Ag	As	Co	Ni	Zn	Bi	Sb	Te	Se	
透辉石 矽卡岩	JM2409-429.75-1-1-4	11.276	63.483	25.681	0	0.1	0	0.022	0	0.024	0	0	0.011	0	100.597
	JM2409-429.75-2-1-2	11.245	64.443	25.744	0	0.097	0	0.04	0.033	0.018	0	0	0	0	101.62
	JM1602-104.3-1-1-1	11.466	63.559	25.946	0.066	0.026	0	0.021	0	0.031	0	0	0.089	0	101.204
	JM1602-104.3-1-1-4	11.496	63.571	25.846	0	0.132	0	0.013	0	0.01	0	0	0	0	101.068
	JM1602-104.3-1-1-5	11.158	63.013	25.942	0.097	0.096	0	0.012	0	0	0	0.032	0.169	0	100.519
	JM1602-104.3-2-4	11.243	64.009	25.867	0.06	0.138	0	0.005	0	0.023	0	0	0	0	101.345
	JM1602-104.3-2-7	11.181	63.424	25.857	0.07	0.112	0	0	0.004	0.002	0	0	0	0	100.65
	JM1604-239.1-1-1-3	11.54	63.192	25.865	0	0.085	0	0.049	0	0.075	0	0	0.112	0	100.918
	JM1604-239.1-1-2-4	11.034	63.372	26.247	0.037	0.076	0.008	0.021	0.004	0.061	0	0	0	0	100.86
	JM1604-239.1-1-2-6	11.262	64.014	25.867	0	0	0	0	0	0.066	0	0.015	0.09	0	101.314
透辉石 矽卡岩	JM1608-388.3-1-1-4	10.444	63.506	25.811	0	0.034	0	0.066	0	0.03	0	0.009	0.122	0	100.022
	JM1608-388.3-1-1-6	10.865	63.164	25.756	0.11	0.045	0	0	0	0.072	0	0	0	0	100.012
	JM1608-388.3-1-2-2-4	10.279	65.164	25.768	0.036	0.1	0	0.007	0	0.029	0	0	0	0	101.383
	JM1608-388.3-1-2-2-5	11.267	63.063	26.167	0.06	0.074	0	0.02	0.017	0.026	0	0.005	0	0	100.699
	JM1608-388.3-1-2-1-1	9.662	64.767	25.643	0.03	0.053	0	0.014	0.002	0.047	0	0	0	0	100.218
	JM1608-388.3-1-2-1-2	10.348	64.298	25.987	0	0.05	0	0.059	0.012	0.047	0	0	0	0	100.801
	JM1608-388.3-1-2-3-5	11.076	63.474	26.057	0	0.041	0	0.026	0	0.038	0	0	0.033	0	100.745
	JM1602-76.3-2	11.531	63.153	26.105	0	0.09	0.024	0.003	0	0.005	0	0	0	0	100.911
	JM1602-76.3-3	11.367	62.809	26.295	0	0.11	0	0.017	0.008	0.064	0	0	0.167	0.043	100.88
	JM1602-76.3-5	11.348	62.114	25.906	0	0.127	0	0	0.001	0.065	0	0	0.111	0.087	99.759
大理岩	JM1602-76.3-4	11.474	63.724	26.045	0.088	0.169	0	0.016	0	0	0	0.006	0.134	0	101.656
	JM1608-396.4-1-1-1	11.545	63.594	26.44	0.033	0.078	0	0.053	0	0.015	0	0	0	0	101.758
	JM1608-396.4-1-1-2	11.169	64.333	25.731	0	0.12	0	0.04	0	0.034	0	0	0.022	0.031	101.48
	JM1608-396.4-1-2-3	11.363	64.151	25.505	0	0.118	0	0	0	0.008	0	0	0	0.057	101.202
硅化 角岩	JM1622-229.9-1-2	14.949	50.486	33.271	0	0.244	0	0	0.007	0	0	0.098	0.454	0.075	99.584
	JM1622-229.9-1-4	14.135	51.273	32.931	0.197	0.056	0.075	0	0	0.111	0	0	0	0	98.778

测试仪器：JXA-8800 型电子探针；测试条件：加速电压为 20 kV，束电流为 20 nA，束斑直径为 5 μm ；测试单位及测试者：中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇。

表 2 甲玛铜多金属矿床内不同颜色斑铜矿的电子探针分析数据

Table 2 Electron microprobe analyses of bornite in different colors in the Jiamia Cu-polymetallic deposit

颜色	测点号	w(B)/%												
		Fe	Cu	S	Au	Ag	As	Co	Ni	Zn	Sb	Te	Se	总和
蓝紫色	JM2805-449.5-3-2-1	9.357	65.948	23.43	0	0.13	0	0.034	0.034	0.04	0.008	0	0.015	98.996
蓝紫色	JM1608-388.3-1-2-1-1	9.662	64.767	25.643	0.03	0.053	0	0.014	0.002	0.047	0	0	0	100.218
锃紫色	JM2805-463-2-1-3	10.7	62.503	25.793	0	0.118	0	0.031	0	0.031	0	0	0.034	99.21
锃紫色	JM2805-463-3-1-3	10.935	63.14	25.893	0.011	0.197	0	0	0	0.044	0	0.067	0.026	100.313
锃紫色	JM2805-449.5-3-1-4	10.47	63.266	25.807	0.051	0.109	0.026	0.007	0	0	0	0.121	0	99.857
锃紫色	JM2805-463-5-1-3	10.49	63.17	25.937	0	0.11	0	0.015	0	0.005	0	0.144	0.037	99.908
锃紫色	JM1608-388.3-1-1-4	10.444	63.506	25.811	0	0.034	0	0.066	0	0.03	0.009	0.122	0	100.022
锃紫色	JM1608-388.3-1-1-6	10.865	63.164	25.756	0.11	0.045	0	0	0	0.072	0	0	0	100.012
锃紫色	JM1608-388.3-1-2-2-4	10.279	65.164	25.768	0.036	0.1	0	0.007	0	0.029	0	0	0	101.383
棕红色	JM2805-463-1-1-1	11.158	63.214	25.81	0	0.217	0	0.042	0.019	0.042	0.004	0.067	0.121	100.694
棕红色	JM2805-463-3-1-1	11.135	61.537	25.594	0.061	0.191	0	0	0	0.016	0.008	0	0.136	98.678
棕红色	JM2805-463-3-1-2	11.164	62.327	25.492	0	0.183	0	0.007	0.003	0.037	0	0.033	0	99.246
棕红色	JM2805-463-5-1-1	11.221	62.347	26.175	0	0.097	0	0.039	0	0.028	0	0.078	0	99.985
棕红色	JM2805-463-6-1-2	11.28	63.145	26.144	0.116	0.062	0.037	0.014	0	0	0	0.067	0	100.865

测试仪器: JXA-8800 型电子探针; 测试条件: 加速电压为 20 kV, 束电流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm; 测试单位及测试者: 中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇。

量等的不同引起的。不同颜色斑铜矿的电子探针分析结果见表 2。

由表 2 可见,不同颜色的斑铜矿,其主元素 Cu、Fe、S 的含量明显不同;在 Fe 含量由低至高的变化过程中,其反射色显示出蓝紫色→锕紫色→棕红色的变化趋势,可见 Fe 含量的高低是斑铜矿颜色变化的一个重要因素。此外,显微镜下观察发现,在锕紫色及蓝紫色的斑铜矿中,多含有出溶物硫铋铜矿、辉铜矿等,斑铜矿-辉铜矿固溶体分离结构反映了分解出斑铜矿的温度条件(175~225℃)有所降低。由此可推测,造成斑铜矿颜色变化的另一个重要因素是,斑铜矿形成温度的降低及由此引起的出溶物的析出。

3.3 斑铜矿形成的温度条件

甲玛矿床矿石中的斑铜矿普遍发育固溶体分离结构,该结构是矿石形成环境的指示剂(陈正等,1985)。斑铜矿-黄铜矿固溶体分离结构的出溶温度为 225~475℃[Schwartz,1931(转引自陈正等,1985)]而且,斑铜矿中发育呈网格状出溶的黄铜矿,反映出该种矿石经历了温度大于 475℃条件下的冷却过程,斑铜矿-辉铜矿固溶体分离结构的出溶温度为 175~225℃[Schwartz,1928(转引自陈正等,1985)]。较之斑铜矿-辉铜矿固溶体分离结构,甲玛矿床中更多发育的是斑铜矿-黄铜矿以及斑铜矿-硫铋铜矿固溶体分离结构。斑铜矿-黄铜矿固溶体分离结构反映出甲玛矿床必然经历了中-高温形成过程,而且,该矿床中铋矿物(硫铋铜矿等)的研究亦表明,其形成经历了中-高温环境(应立娟等,2010b)。据此可断定,甲玛矿床内的斑铜矿多数形成于中-高温条件,有少量可能形成于中温条件,该矿床的形成与岩浆活动关系密切。

3.4 金属硫化物硫同位素特征

前人对甲玛铜多金属矿床主要铜矿物的硫同位素组成进行了研究(表 3)。8 件黄铜矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-1.20\text{‰} \sim -0.10\text{‰}$ 之间,平均值为 -0.64‰ 。6 件斑铜矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-1.20\text{‰} \sim -0.30\text{‰}$ 之间,平均值为 -0.81‰ 。1 件黝铜矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.50‰ 。这 3 种硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围均较窄,表明该矿床硫同位素的均一化程度较高,硫的来源较为稳定。

前人研究认为:地幔来源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近于 0,变化范围为 $(0 \pm 3)\text{‰}$;现代海水硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $+20\text{‰}$,变化较大;还原硫或称生物硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值以较

表 3 甲玛铜多金属矿床主要含铜矿物硫同位素组成
Table 3 Sulphur isotopic composition of main copper-bearing minerals in the Jima Cu-polymetallic deposit

样品号	产出特征	测定对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源
93103	千枚岩围岩	磁黄铁矿	-16.80	杜光树等,1998
JM-19	含矿斑岩	花岗斑岩	-0.20	曲晓明等,2001
JM-21		花岗斑岩	-0.70	
		黄铜矿	-1.00	姚鹏等,2002
		斑铜矿	-1.18	
JM108		黄铜矿	-0.10	
JM111	砂卡岩	黄铜矿	-0.40	余宏全等,2006
JM114	矿石	黄铜矿	-0.30	
JM114		黝铜矿	-1.50	
JMPD12-Y50.3		斑铜矿	-0.50	
JM2804-413.85		斑铜矿	-0.30	
JMKSH4	砂卡岩矿石	斑铜矿	-1.20	李永胜,2009
JM1609-451		斑铜矿	-0.60	
JM2802-324.8		斑铜矿	-1.10	
JM2802-145.2		黄铜矿	-0.20	
JMPD103-CK2-162Y		黄铜矿	-1.20	
JMY-03	砂卡岩	黄铜矿	-0.9	Qu et al., 2007
JMY-17	矿石	黄铜矿	-1.00	
JM-16	含矿斑岩	花岗斑岩	-0.6	

大负值为特征(郑永飞等,2000)。甲玛矿床内主要含铜矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中分布于 $-1.20\text{‰} \sim -0.10\text{‰}$ 之间,平均值为 -0.74‰ ,具深源岩浆硫特征,其矿石内的硫可能主要来源于岩浆。

为了进一步追踪硫的来源,笔者收集到了甲玛矿区与成矿关系密切的 3 件花岗斑岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(-0.7‰ , -0.6‰ , -0.2‰)以及代表地层组成的 1 件千枚岩内磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(-16.8‰)。显然,地层硫具有生物有机硫同位素组成的特征,将甲玛矿床内金属硫化物的硫同位素组成与该区内岩浆岩及地层的硫同位素组成进行对比可见,该矿床成矿物质中的硫主要来源于该矿区内的酸性岩浆岩(花岗斑岩),不排除有少量地层硫的加入,但仍以岩浆硫为主。

矿床成矿温度和硫同位素来源的研究表明,甲玛铜多金属矿床的形成与岩浆作用密切相关,并非前人所谓的喷流-沉积成因矿床,而是典型的斑岩型-砂卡岩型铜多金属矿床。

4 结 论

(1) 甲玛铜多金属矿床矿石中的斑铜矿为原生硫化物,主要产于矽卡岩型矿石中,尤其是硅灰石矽卡岩与斑铜矿形成的关系最为密切,斑铜矿矿石组构类别多样,常与黄铜矿构成固溶体分离结构,发育(网)脉状、浸染状及块状构造。

(2) 角岩型矿石中斑铜矿主元素的含量与理论值相差较大,可能主要是由温度降低、斑铜矿分解造成的。

(3) 斑铜矿的颜色和反射色的多样性受其成分中 Fe 含量、成矿温度及固溶体成分等因素的控制,Fe 含量增高、温度升高条件下形成的斑铜矿,其反射色一般为锖紫色或紫红色,含辉铜矿、硫铋铜矿出溶物的斑铜矿的反射色多为蓝色调。

(4) 甲玛矿床的矿石矿物组合为:斑铜矿 + 黄铁矿,斑铜矿 + 黄铜矿,斑铜矿 + 辉钼矿,斑铜矿 + 黝铜矿,斑铜矿 + 辉铜矿,斑铜矿 + 黄铜矿 + 黝铜矿,斑铜矿 + 硫盐矿物(硫铋铜矿)。

(5) 根据甲玛矿床中广泛发育的固溶体分离结构的研究,可确定其斑铜矿主要形成于中-高温温度条件。

(6) 甲玛矿床内金属硫化物的硫同位素组成特征印证了该矿床内的硫主要为岩浆来源。

(7) 甲玛矿床内斑铜矿的矿物学研究成果表明,该矿床属典型的斑岩型-矽卡岩型铜多金属矿床。

Reference

- Chen Z, Yue S Q and Chen D F. 1985. Ore mineralogy [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 115-123 (in Chinese).
- Du G S, Yao P, Pan F C, Su D K, Li W B and Ning Y Y. 1998. Sedimentation-exhalation skarn and ore-formation-Exemplified by Jiamia copper-polymetallic deposit, Xizang (Tibet) [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. 74-78 (in Chinese).
- Feng X L, Guan S P, Mou C L, Hou Z Q and Li S R. 2001. Geological characteristics and genesis of the Jiamia copper-polymetallic deposit in Tibet [J]. Geology-Geochemistry, 29(4): 40-48 (in Chinese with English abstract).
- Huang C K, Bai Y, Zhu Y S and Wang H Z. 1999. Copper deposits in China [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Li G M, Rui Z Y and Wang G M. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiamia and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenetic belt of Tibet and its significance [J]. Mineral Deposits, 24(5): 481-489 (in Chinese with English abstract).
- Li Y S. 2009. Geological characteristics and genesis of polymetallic copper deposit of Jiamia, Tibet (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Yan G S. Beijing: China University of Geoscience. 49-52 (in Chinese with English abstract).
- Lian Y, Xu W Y, Yang D, Chen W S, Qu X M and Chen D L. 2008. SP-XRF studies of fluid inclusions from the Jiamia and Nanmu deposits in the Gangdise copper-polymetallic metallogenetic belt of Tibet [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(3): 468-479 (in Chinese with English abstract).
- Meng X J, Hou Z Q, Ye P S, Yang Z S, Li Z Q and Gao Y F. 2007. Characteristics and ore potentiality of Gangdese silver-polymetallic mineralization belt in Tibet [J]. Mineral Deposits, 26(2): 153-162 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, Zhu D C, Wang L Q, Li G M, Zhao Z D, Geng Q R and Liao Z L. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic and its evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521-533 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q and Huang W. 2001. Is Gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt [J]? Mineral Deposits, 20(4): 355-366 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q, Zaw K and Li Y G. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results [J]. Ore Geology Reviews, 31: 205-223.
- She H Q, Feng C Y and Zhang D Q. 2006. Study on the fluid inclusions from Jiamia skarn copper polymetallic deposit and Qulong porphyry copper deposit in Gangdese copper belt, Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 689-696 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Wang D H, Wang X W, Zhong K H, Ying L J, Zheng W B, Li F J, Guo N, Qin Z P, Yao X F, Li L, Wang Y and Tang X Q. 2010. Geological features and metallogenetic model of the Jiamia copper-polymetallic deposit in Tibet [J]. Acta Geoscientia Sinica, 31(4): 495-506 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Tang J X, Ying L J, Wang L Q and Qin Z P. 2011. Characteristics of the main ore minerals in the Jiamia polymetallic deposit, Tibet [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 38(1): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- Yao P, Zheng M H, Peng Y M, Lin J G, Su D K and Fan W Y. 2002. Sources of ore-forming materials and the genesis of the Jiamia copper and polymetallic deposit in Gangdise island-arc belt, Xizang [J]. Geological Review, 48(5): 468-479 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Tang J X, Wang D H, Chang Z S, Qu W J and Zheng W B. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite in skarn from the Jiamia copper polymetallic deposit of Tibet and its metallogenetic significance [J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 265-268 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X, Chang Z S, Qu W J, Zheng W B and Wang H. 2010a. Re-Os dating of molybdenite occurring in different

- rocks from and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1165-1174 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X, Wang H, Chen Z Y, Zheng W B and Li F J. 2010b. Bismuth minerals and its relationship with copper mineralization in the Jiamia copper polymetallic deposit, Tibet[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 40(4): 801-809 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X, Wang H and Wang W P. 2010c. Analysis on characteristics of the bornite in the Jiamia Cu polymetallic deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(Supp.): 325-326 (in Chinese).
- Zhao Y M. 1990. *Skarn deposits in China*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zheng W B, Chen Y C, Song X, Tang J X, Ying L J, Li F J and Tang X Q. 2010. Element distribution and geological significance in the Jiamia copper polymetallic deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 29(5): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. *Stable isotopes geochemistry*[M]. Beijing: Science Press. 143-245 (in Chinese).
- Zhou J X and Mao S H. 1988. *Electron probe microanalysis*[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 405-445 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈 正, 岳树勤, 陈殿芬. 1985. 矿石学(上编) [M]. 北京: 地质出版社. 115-123.
- 杜光树, 姚 鹏, 潘凤雏, 栗登奎, 李文彬, 宁英毅. 1998. 喷流成因矽卡岩与成矿——以西藏甲玛铜多金属矿床为例 [M]. 成都: 四川科学技术出版社. 74-78.
- 冯孝良, 管仕平, 牟传龙, 侯增谦, 李胜荣. 2001. 西藏甲玛铜多金属矿床的岩浆热液交代成因——地质与地球化学证据 [J]. *地质地球化学*, 29(4): 40-48.
- 黄崇柯, 白 冶, 朱裕生, 王惠章. 1999. *中国铜矿床(上册)* [M]. 北京: 地质出版社.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义 [J]. *矿床地质*, 24(5): 481-489.
- 李永胜. 2009. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及矿床成因探讨(硕士学位论文) [D]. 导师: 严光生. 北京: 中国地质大学. 49-52.
- 连 玉, 徐文艺, 杨 丹, 陈伟十, 曲晓明, 陈栋梁. 2008. 西藏冈底斯甲玛和南木矿床流体包裹体 SR-XRF 研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 468-479.
- 孟祥金, 侯增谦, 叶培盛, 杨竹森, 李振清, 高永丰. 2007. 西藏冈底斯银多金属矿化带的基本特征与成矿远景分析 [J]. *矿床地质*, 26(2): 153-162.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化 [J]. *岩石学报*, 22(3): 521-533.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄 卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带: 西藏第二条玉龙铜矿带 [J]. *矿床地质*, 20(4): 355-366.
- 余宏全, 丰成友, 张德全. 2006. 西藏冈底斯铜矿带甲玛矽卡岩型铜多金属矿床与驱龙斑岩型铜矿流体包裹体特征对比研究 [J]. *岩石学报*, 22(3): 689-696.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫估, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李 磊, 王 友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型 [J]. *地球学报*, 31(4): 495-506.
- 王 焕, 唐菊兴, 应立娟, 王立强, 秦志鹏. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 38(1): 103-112.
- 姚 鹏, 郑明华, 彭勇民, 李金高, 栗登奎, 范文玉. 2002. 西藏冈底斯岛弧带甲玛铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究 [J]. *地质论评*, 48(5): 468-479.
- 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝. 2009. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义 [J]. *岩矿测试*, 28(3): 265-268.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝, 王 焕. 2010a. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿不同矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义 [J]. *地质学报*, 84(8): 1165-1174.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 王 焕, 陈振宇, 郑文宝, 黎枫估. 2010b. 西藏甲玛铜多金属矿床中铋矿物及其与铜矿化关系 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 801-809.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 王 焕, 王崴平. 2010c. 西藏甲玛铜多金属矿斑铜矿的特征浅析 [J]. *矿床地质*, 29(增刊): 325-326.
- 赵一鸣. 1990. *中国矽卡岩矿床* [M]. 北京: 地质出版社.
- 郑文宝, 陈毓川, 宋 鑫, 唐菊兴, 应立娟, 黎枫估, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿元素分布规律及地质意义 [J]. *矿床地质*, 29(5): 1-10.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. *稳定同位素地球化学* [M]. 北京: 科学出版社. 143-245.
- 周剑雄, 毛水和. 1988. *电子探针分析* [M]. 北京: 地质出版社. 405-445.