

西藏甲玛铜多金属矿床中铋矿物及其与铜矿化关系

应立娟^{1,2}, 王登红¹, 唐菊兴¹, 王 焕², 陈振宇¹, 郑文宝³, 黎枫佶³

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院 研究生院, 北京 100037

3. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059

摘要:西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床中, 矽卡岩型铜矿石的铋质量分数最高可达0.23%, 且分布较广泛, 可作为伴生有用组分综合回收利用。根据化学分析, 铋含量的高低与矿石类型有关。铋与矽卡岩型铜矿石的关系最为密切, 铜矿化越强, 铋含量越高。在垂向上, 中浅部矽卡岩型矿体中的铋含量高于深部的矽卡岩, 与矿化分带中的Cu元素矿化带较一致。通过电子探针分析, 甲玛矿床中含铋矿物主要有硫铋铜矿、辉碲铋矿、针硫铋铅矿、针辉铋铜矿、辉铋锑矿及含铋黝铜矿和斑铜矿等。硫铋铜矿是甲玛矿床中分布最广、最主要的铋矿物, 其主要呈它形粒状、叶片状或乳滴状分布于斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿等硫化物中。根据矿物的产出形态及电子探针分析, 甲玛矿床中存在不同成矿世代的硫铋铜矿: 分布于斑铜矿中呈它形粒状、叶片状的硫铋铜矿和在斑铜矿中呈乳滴状的硫铋铜矿。前者是硫铋铜矿的主要产出形态, 其成分接近硫铋铜矿的理论值; 但后者往往成分发生变化, Bi偏低, Cu、S偏高。甲玛矿石中铋不仅应该被综合利用, 且是铜矿化的重要找矿标志。

关键词: 铋矿物; 硫铋铜矿; 甲玛铜多金属矿床

中图分类号: P618.69; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1671-5888(2010)04-0801-09

Bismuth Minerals and Its Relationship with Copper Mineralization in the Jiama Copper Polymetallic Deposit, Tibet

YING Li-juan^{1,2}, WANG Deng-hong¹, TANG Ju-xing¹,

WANG Huan², CHEN Zhen-yu¹, ZHENG Wen-bao³, LI Feng-ji³

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Department of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The bismuth minerals in the skarn-type copper ore of the Jiama copper polymetallic deposit in Mozhuogongka County, Tibet, has reached 0.23%, and can be used as an associated useful metal element. Based on the geochemical analyses, bismuth is closely correlated to the skarn and copper mineralization. The bismuth content is relatively higher in the skarn copper ore than those in other ores. In the vertical section, bismuth has concentrated in the same zone as copper of the vertical mineralization zoning. Analyzed by electron probe, bismuth mainly occurs in the bismuth minerals and bismuth-bearing sulfides, including wittichenite, tetradymite, aikinite, and bismuth-bearing tetrahedrite and bornite. The wittichenite is the major bismuth mineral in the Jiama deposit. It occurs as two occurrences,

收稿日期: 2010-05-27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K0911); 中金集团重点勘探项目(E0804); 国土资源部地质大调查项目(1212010733803); 国家科技支撑项目(2006BAB01A01); 青藏专项(1212010818089)

作者简介: 应立娟(1981—), 女, 浙江上虞人, 博士研究生, 主要从事矿床学研究, E-mail: biyuntian518@sina.com。

foliated/xenomorphic granular and dropwise in bornite, chalcocite and tetrahedrite. According to the occurrences and electron probe data, the wittichenite may form in two epochs at short time interval with normal chemical component and lower Bi, higher Cu and S, respectively. Therefore, bismuth in Jiama deposit should be comprehensively utilized, and it is also a significant clue for prospecting of copper mineralization.

Key words: bismuth minerals, wittichenite, Jiama copper polymetallic deposit

0 前言

铋作为可安全使用的“绿色金属”,除用于医药行业外,也广泛应用于很多领域,大有取代铅、镉、镉、汞等有毒元素的趋势。除少数独立铋矿床,如湖南苏仙区金船塘铋锡矿床^[1]和广东怀集县沿水蒲屏岭铋矿^[2]等外,我国的铋绝大多数呈共(伴)生组分赋存于其他矿床中。加强对铋矿物赋存状态的研究,提高铋矿物的综合回收利用,将为矿山创造出更高的经济效益,也可提高资源的有效综合利用率。

西藏墨竹工卡县甲玛矿床,有用组分以铜、钼、铅、锌为主,并含有金、银、铋、钨、镍等多种伴生组分。2008年以来的勘探工作表明,该矿床以资源储量大、厚度大、品位高、伴生组分多为特点,成为西藏目前最具有经济价值的矿床之一。但自该矿床发现以来,矿物学的研究较为薄弱^[3]。随着甲玛矿床勘探工作取得的巨大突破,其规模的迅速扩大,急需开展伴生组分的查定和评价工作。铋在铜矿床中作为伴生有用组分,要求其品位是0.05%,铅锌矿中是0.02%,钼矿中是0.03%^[4]。甲玛多金属矿床中,铋品位最高可高达0.23%,局部富集。因此,研究甲玛铜多金属矿床中铋矿物的特征和空间分布规律,不仅为矿床的综合利用提供科学依据,也将对矿床地球化学特征的研究提供翔实的资料。

1 矿床概况

甲玛铜多金属矿床位于西藏特提斯构造域冈底斯成矿带东段,矿区出露地层由上侏罗统多底沟组(J_3d)灰岩、大理岩和下白垩统林布宗组(K_1l)黑色板岩、粉砂岩、角岩等组成(图1)。矽卡岩型主矿体长度4 200 m,倾向方向延深500~2 200 m,真厚度从数米到250余m,角岩型矿体最厚达700 m以上^{①②}。空间上,主矿体位于 J_3d 大理岩与 K_1l 角岩之间的层间接触带和滑脱构造及其次生褶皱中。矿体主要由细脉浸染状原生硫化物型矿石组成,其次为块状、团块状、脉状等硫化物矿石。矿石类型按所

赋存的岩性分类,主要为矽卡岩型,其次为角岩型,少量斑岩型和大理岩型矿石。矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿为主,其次为黝铜矿、辉铜矿等,少量金、银的矿物及含铋、镍、钴、钨的矿物等。

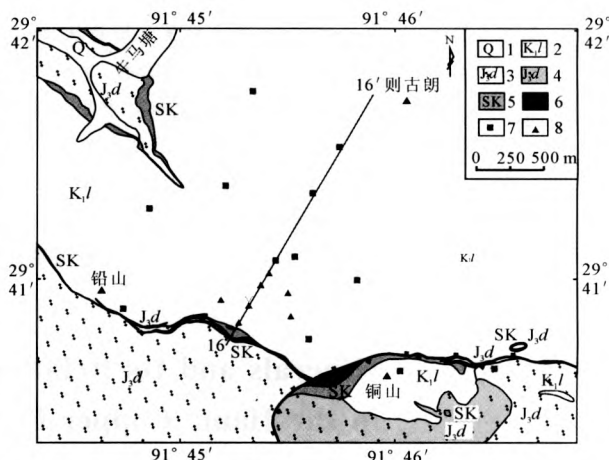


图1 甲玛铜多金属矿床地质简图及主要采样钻孔分布图(据文献[5]修编)

Fig. 1 Simple geological map of Jiama copper polymetallic deposit and distribution of major samples

1. 第四系;2. 下白垩统林布宗组砂板岩、角岩;3. 上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩;4. 矽卡岩化大理岩;5. 矽卡岩;6. 矽卡岩型矿体;7. 含铋元素钻孔;8. 含铋铜矿钻孔

2 矿石中铋含量及其与主成矿元素的关系

铋在地壳中的丰度为 0.17×10^{-6} ^[6],经地质作用铋在地壳中可以富集到百分之几,达到工业可利用的边界品位。

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,等. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区0-16-40-80、0-15线矿段铜多金属矿勘探报告, 2009.

② 唐菊兴,王登红,钟康惠,等. 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, 2009.

西藏甲玛铜多金属矿床 166 件岩、矿石中铋的地球化学分析结果表明,铋质量分数变化大,为 $(0.03\sim 2\,254)\times 10^{-6}$ 。含铋的岩、矿石类型主要为 4 类:矽卡岩(型)、角岩(型)、大理岩(型)和斑岩(型)。其中,铋质量分数大于 100×10^{-6} 的样品,均赋存于矽卡岩型和角岩型铜(钼)矿石中,表明铋的富集与矽卡岩型铜矿石关系密切(表 1)。大理岩和斑岩中的铋含量低,但矿化大理岩中铋含量相对较高。甲玛铜多金属矿床中,铋含量除与岩性相关外,与矿化类型也呈一定的相关性(图 2a)。铋与矽卡岩中铜含量呈明显的正相关,与角岩中的铜含量呈两种倾向:一种是缓斜率的正相关,斜率小于矽卡岩;另一种是斜率近直立的相关性。铋含量与斑岩中的铜也呈近直立的相关性,与大理岩中的铜也是

略显正相关性。

铋元素的离子半径与 Pb 相近,容易在方铅矿中赋存。将不同岩性中的 Bi 和 Pb 进行投图分析,由图 2b 发现,Bi 与 Pb 主要呈两个趋势:Bi 高 Pb 低或 Bi 低 Pb 高,矽卡岩、角岩和大理岩中均较为明显。这也和 Bi^{3+} 可与 Pb^{2+} 相互替代一致。

在甲玛矿床 16 号勘探线的剖面图上(图 3),矿体延深越大,Bi 含量越低;矽卡岩矿体处可见 Bi 的峰值,而未见矽卡岩的位置,Bi 的富集程度很低,表明了 Bi 与矽卡岩型矿体的密切相关性。按照 Bi 含量峰值的分布规律,ZK1622、ZK1626 深部应该存在矽卡岩,矿体也有往下继续延伸的趋势,这也与钻探揭露的矿体延深趋势一致。

表 1 甲玛样品中铋的化学分析数据

Table 1 Geochemical data of samples from Jiama copper polymetallic deposit								$w_B/10^{-6}$
样品号	岩性类型	Bi	Au	Ag	Cu	Mo	Pb	Zn
JM1607-278-GC	矽卡岩	2 254	5.26	189	92 700	6	120	100
JM1602-65.87-GC	矽卡岩	1 541	1.52	77.4	53 300	69	220	150
JM1609-442.9-GC	角岩	498	0.59	41.1	18 300	26	33	18
ZH-14	矽卡岩型 Cu-Mo31 线	476	0.32	28.40	16 088.03	1 358.88	188.93	102.06
JM1616-752.26-GC	矽卡岩	352	0.49	21.5	13 100	412.5	64.6	49.26
JM1616-752.26-GC	矽卡岩	344	0.49	21.5	13 100	412.5	64.6	49.26
JM1616-660.26-GC	矽卡岩	336	0.38	16.3	10 500	1 100	55	47
ZH-07	矽卡岩型 Cu-Mo19 线	319	0.55	25.60	10 266.33	712.85	82.41	136.06
JM1608-392.8-GC	矽卡岩	317	0.92	61	22 600	1	81	49
ZH-09	角岩型 Cu-Mo23 线	315	0.05	3.13	3 109.10	201.82	32.92	99.95
JM1616-798.26-GC	矽卡岩	303	0.33	15.3	10 000	271.6	23.84	50.65
ZH-12	矽卡岩型 Cu-Mo27 线	265	0.39	21.16	10 405.44	329.67	59.41	107.37
ZH-04	矽卡岩型 Cu-Mo15 线	264	0.26	14.98	7 073.69	671.47	80.15	147.89
ZH-18	矽卡岩型 Cu-Mo47 线	185	0.27	15.93	7 488.88	16.54	93.82	152.72
ZH-10	矽卡岩型 Cu-Mo23 线	156	0.36	14.17	7 492.71	916.60	116.03	169.87
JM1616-698.26-GC	矽卡岩	155	0.06	21.2	1 700	1 800	2 800	44
JM1618-725.26-GC	角岩	126	0.06	0.72	340.3	465.8	125.2	88.53
JM1604-200.64-GC	矽卡岩	106	0.3	7.89	6 500	3	140	83
JM1618-725.26-GC	角岩	100	0.06	0.72	340.3	465.8	125.2	88.53
ZH-13	角岩型 Cu-Mo31 线	100	0.06	1.56	2 265.13	206.77	16.47	115

注:数据来自唐菊兴,王登红,钟康惠,等. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区 0-16-40-80、0-15 线矿段铜多金属矿勘探报告. 拉萨:西藏国土资源厅,2009。

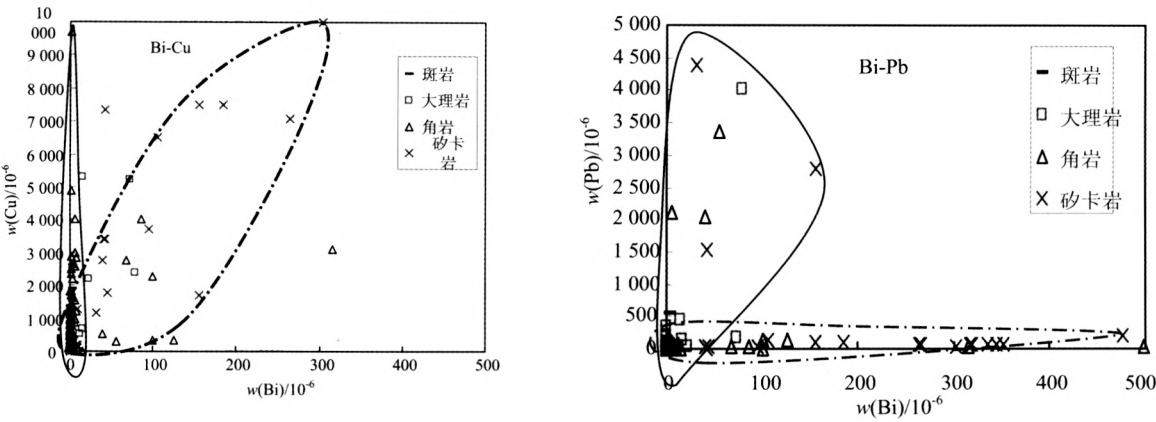


图 2 甲玛不同岩性中 Bi 与 Cu 和 Bi 与 Pb 的相关性图解

Fig. 2 Relationship of Bi - Cu and Bi - Pb from rocks of the Jima

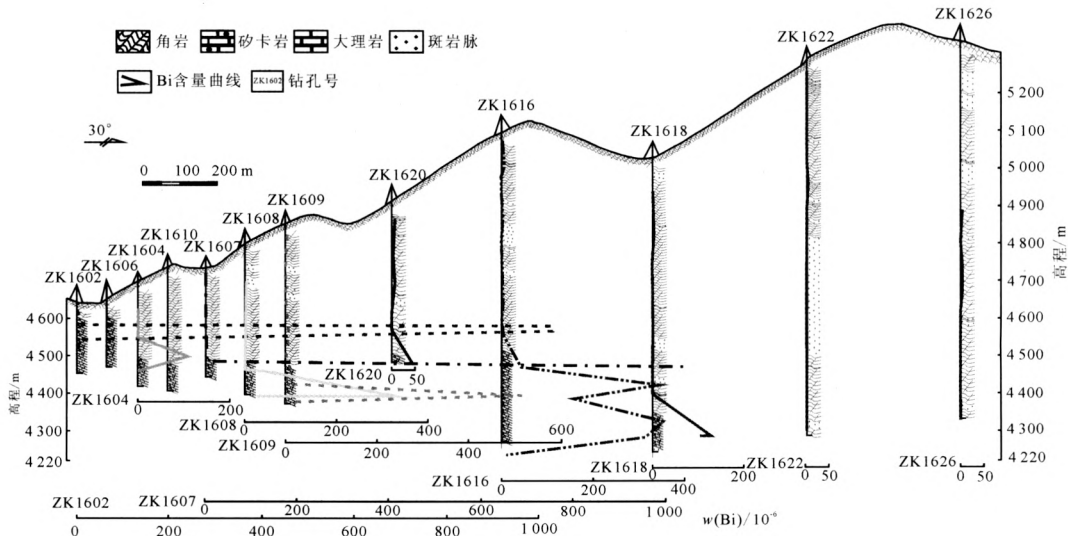


图 3 铋在甲玛矿区 16 号勘探线中各钻孔含量分布图

Fig. 3 Content of Bi in each drillhole on the No. 16 exploration line in the Jima

横坐标为 Bi 含量;起点为每个钻孔的位置

3 铋的赋存状态

铋常呈自然金属、硫化物、硫酸盐,有时以硒化物及碲化物的状态出现,其中以辉铋矿最重要^[6-7]。硫铋铜矿是甲玛铜多金属矿中最主要的铋矿物,故本文以硫铋铜矿作为铋矿物的研究重点。

根据显微镜下鉴定和电子探针分析,铋主要分布在铋矿物中,其次为一些硫化物中。铋的独立矿物以硫铋铜矿为主,其次呈辉碲铋矿、针硫铋铅矿、针辉铋铜矿、辉铋碲矿^①等,多呈乳滴状、它形粒状

等分布于斑铜矿、黝铜矿中^[3]。其他的含铋矿物主要是黝铜矿和斑铜矿,其次为辉铜矿、蓝辉铜矿;含微量铋的矿物有碲镍矿、银金矿、自然金、方铅矿、碲银矿等。

硫铋铜矿分子式为 $\text{Cu}_6\text{Bi}_2\text{S}_6$, 元素质量分数的理论值: Cu38.46%、Bi42.15%、S19.39%^[8], 集中分布于矽卡岩型铜矿石中。硫铋铜矿也在国内的一

① 西藏自治区地质矿产厅第六地质大队. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区铜铅多金属矿详查报告. 2000.

些矿床中存在,如福建碧田铜金银矿床^[9]、云南白秧坪银矿床^[10]、新疆包古图斑岩型铜矿床^[11]、西藏山南克鲁和冲木达矽卡岩型铜金矿^[12]等。甲玛矿床中,硫铋铜矿呈它形粒状、叶片状或乳滴状,多分布于斑铜矿、辉铜矿和黝铜矿等铜的硫化物中,局部可见其呈定向排列。甲玛矿床中硫铋铜矿(42个电子探针数据)与其理论值相比(图4),其Bi含量偏低,Cu含量偏高。从电子探针结果分析,热液中铜的浓度较高,导致硫铋铜矿中的铜含量偏高,且其它微量元素替代了Bi。对比甲玛矿床与其他矿床中硫铋铜矿的电子探针分析值可以发现,西藏克鲁矽卡岩型铜金矿床和云南白秧坪银矿床中的硫铋铜矿与甲玛的硫铋铜矿特征基本相似,相对理论值,Cu略偏高,Bi偏低。但其他矿床的硫铋铜矿含Cu量低于甲玛,但Bi高于甲玛。西藏冲木达矽卡岩型铜金矿床中的硫铋铜矿远离甲玛硫铋铜矿的主体,Cu含量相似,但Bi含量更偏低。限于冲木达硫铋铜矿数据有限,两者区别的原因有待进一步研究。

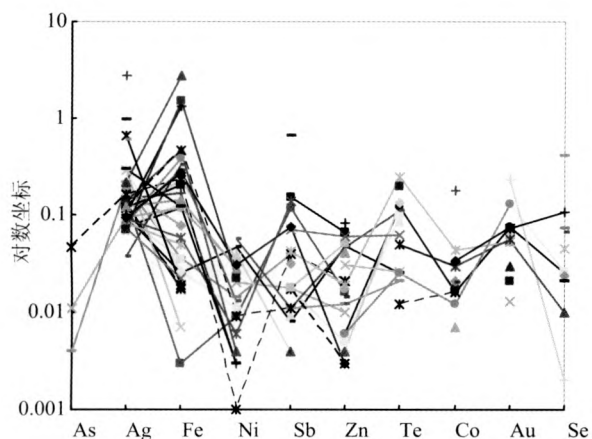


图4 甲玛矿床和其他矿床中硫铋铜矿中Bi和Cu的关系图

Fig. 4 Diagram of Bi and Cu in wittichenite from Jiama and other deposits

甲玛矿床中硫铋铜矿的电子探针分析结果表明,微量元素主要是Ag和Fe,其次是Au、Te、As、Zn、Co等(图5,表2)。而其他铋矿物也往往含有这些元素,或是以这些元素为主的矿物中含有铋。这可能是在硫化物形成过程中,上述元素都较活跃,形成部分的相互替代。

由图4中可知,甲玛矿区JM1608-388.3-1-

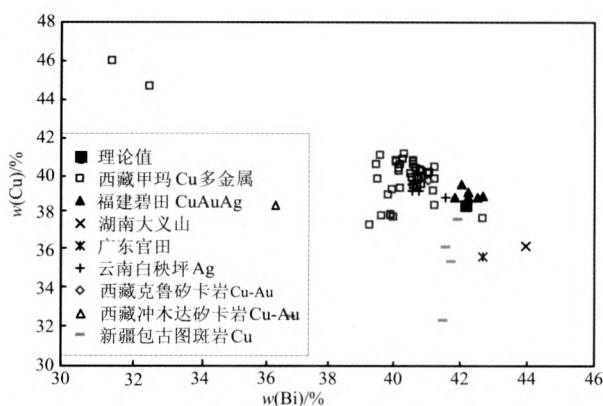


图5 甲玛矿床硫铋铜矿中的微量元素分布图

Fig. 5 Trace elements in wittichenite from the Jiama deposit

1-3和JM2805-463-1-1-7两个点的分析数据中Bi和Cu含量有别于多数的硫铋铜矿。JM1608-388.3-1样品是硅灰石矽卡岩, JM2805-463样品是矿化矽卡岩。根据电子探针的点位图(图6a), JM1608-388.3-1中的3号点是斑铜矿(4号点)中的出溶物,其Bi含量偏低,Cu和S偏高,含微量的Fe和Te等,而2号点则是成分正常的硫铋铜矿。JM2805-463-1-1的点位图中(图6b),7号点是不同斑铜矿(含出溶物与较纯)之间的出溶物,位于界线上。7号点的成分也是Bi含量偏低,Cu和Si偏高,含微量的Fe,几乎与JM1608-388.3-1中的3号点相似,而图中5号点也是成分正常的硫铋铜矿。上述两个点的硫铋铜矿成分可能是在形成过程中受到了主矿物斑铜矿的影响,尤其是在图6b中的1号点和3号点为较纯的斑铜矿,其Fe和Ag的成分相对含出溶物的斑铜矿(2号点)偏高,可能是斑铜矿(2号点)中的Fe、Ag等微量元素,随着出溶物的晶出,而被带入了到了出溶的硫铋铜矿中;且同一视域中均存在成分正常的硫铋铜矿,可能是由于存在不同世代的硫铋铜矿,尽管形态和成分上也有所差别,但形成时间相近。

在样品JM2805-463矿化矽卡岩的另一个视域中,不同颜色斑铜矿(图7a)界线处的出溶物(图7b中的2号点)成分也比较特殊,其Bi质量分数明显偏低,仅13.929%,而Cu质量分数则明显偏高,

表 2 甲玛硫铋铜矿的电子探针数据

Table 2 Data by electron probe of wittichenite from Jiama

$w_B/\%$

点号	Bi	S	Cu	As	Ag	Fe	Ni	Sb	Zn	Te	Co	Au	Se	总计
JM1602-104.3-1-2-2	39.47	19.902	40.561	0	0.095	0.272	0.031	0.076	0.003	0	0.034	0.074	0	100.518
JM1602-104.3-2-1	40.069	20.006	40.706	0	0.092	0.058	0.006	0.138	0	0	0.03	0.057	0	101.162
JM1604-239.1-2-1	40.08	19.997	40.803	0	0.072	0.022	0	0.071	0.06	0.062	0	0	0	101.167
JM1604-239.1-2-4	40.829	19.56	40.231	0	0.096	0.025	0.046	0.008	0.048	0.025	0	0	0	100.868
JM1607-264.3-1-3	40.147	20.012	40.355	0	0.095	0.119	0.03	0	0.017	0	0	0	0	100.775
JM1607-264.3-1-4	40.082	19.932	40.81	0	0.12	0.142	0.028	0	0.041	0	0.007	0	0	101.162
JM1608-388.3-1-1-2	41.016	19.746	40.12	0	0.148	0.165	0.003	0	0.066	0	0.177	0	0	101.441
JM1608-388.3-1-1-3	32.63	21.414	44.661	0	0.071	1.519	0.022	0	0	0.193	0	0.021	0	100.531
JM2409-429.75-1-1-1	40.658	19.69	40.406	0	0.126	0	0.056	0.011	0.047	0.11	0	0	0.065	101.169
JM2409-429.75-2-1-3	40.143	19.39	40.255	0	0.068	0	0	0.018	0.051	0	0	0	0	99.925
JM2409-429.75-2-1-4	40.798	19.703	40.297	0	0.094	0.035	0	0.017	0.005	0.098	0	0.13	0.026	101.203
JM2805-463-1-1-5	40.823	19.521	39.541	0.004	0.197	0.036	0.014	0.04	0	0	0	0	0.073	100.249
JM2805-463-1-1-7	31.513	21.194	45.994	0	0.216	2.814	0	0.004	0	0	0	0.03	0	101.765
JM2805-463-2-1-4	40.571	19.938	40.773	0	0.117	0.221	0.036	0	0.004	0.134	0	0	0	101.794
JM2805-463-2-1-7	40.267	19.766	40.835	0.047	0.162	0.23	0.001	0.04	0.021	0	0	0.073	0	101.442
JM2805-463-3-1-7	39.513	19.445	39.854	0	0.292	0.12	0.003	0	0	0	0	0	0.021	99.248
JM2805-463-4-1-4	40.575	19.791	40.587	0	0.185	0.077	0	0.032	0	0	0.021	0	0.024	101.292
JM2805-463-5-1-4	40.703	19.875	39.404	0	0.161	0	0.039	0.004	0	0.22	0	0.229	0.002	100.637
JM2805-463-6-1-3	41.186	19.609	39.184	0	0.133	0.017	0	0	0	0.049	0.03	0	0	100.208
JM2805-463-6-1-5	39.962	19.656	39.264	0	0.08	0.378	0	0	0.006	0.025	0.012	0.131	0	99.514

注:由中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇分析,2010 年 5 月。

达 53.174%,含有少量 Fe、As、Ag、Te 和微量 Au,可能将之定名为含铋辉铜矿更为合适。而视域内的 4 号点,则是成分正常的硫铋铜矿,基本与理论值相近,仅极少量 Bi 被 Ag、Au 和 Te 替代。

综合 JM2805-463 矿化矽卡岩样品中铋含量的变化情况,推测呈它形粒状或叶片状的硫铋铜矿成分正常,接近理论值,而呈乳滴状的斑铜矿出溶的硫铋铜矿,其铋的含量往往会受到影响,降低其铋的含量,甚至演变为含铋的辉铜矿等矿物。

4 问题与讨论

4.1 硫铋铜矿的产出状态

根据显微鉴定和电子探针分析,甲玛矿床中硫铋铜矿主要分布于斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、蓝辉铜矿及铜蓝等矿物内部、边缘或之间,其中,硫铋铜矿与斑铜矿的关系最为密切。硫铋铜矿的产出形态主要有它形粒状、不规则状和乳滴状等。它形粒状的硫铋铜矿粒度约几十微米,多呈单颗粒,经常可见一

角呈枝状延伸;不规则状的硫铋铜矿多呈集合体分布,相对集中,有条状等形态;乳滴状硫铋铜矿则粒度最细,甚至不到 1 μm,多呈定向排列,且可见两组以上方向。乳滴状硫铋铜矿多分布于斑铜矿中,而往往同一视域内就可见纯的斑铜矿,且两者以它形粒状连成的硫铋铜矿为界。乳滴状硫铋铜矿的成分多发生变化,而界线处硫铋铜矿成分多接近理论值,少数则形成含铋辉铜矿等。硫铋铜矿富集于斑铜矿之中,且硫铋铜矿的成分发生变化,可能是由于其形成于不同世代,热液中微量元素含量变化所致。硫铋铜矿与斑铜矿的密切关系还值得进一步深入研究。

4.2 铋矿物形成的物理化学条件

铋原子的价电子组态是 6s²6p³,在自然界以形成 3 价阳离子为特征,也可以与硫组成络阴离子 (BiS₃)³⁻形成铋的硫盐矿物^[13]。含铋的矿物主要有:(1)自然铋及其合金(软铋银矿、黑铋金矿、铋铅钨矿等);(2)铋的硫化物、硒化物、碲化物,如辉铋矿

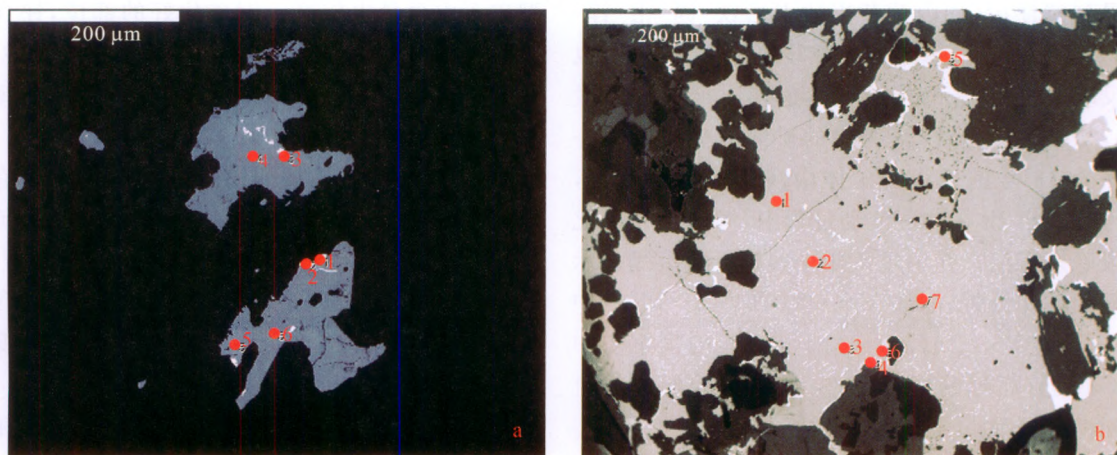


图6 甲玛矿床中 JM1608-388.3-1(a)和 JM2805-463-1-1(b)的电子探针点位图

Fig. 6 Position diagram by electron probe of JM1608-388.3-1(a) and JM2805-463-1-1(b) from Jiama deposit

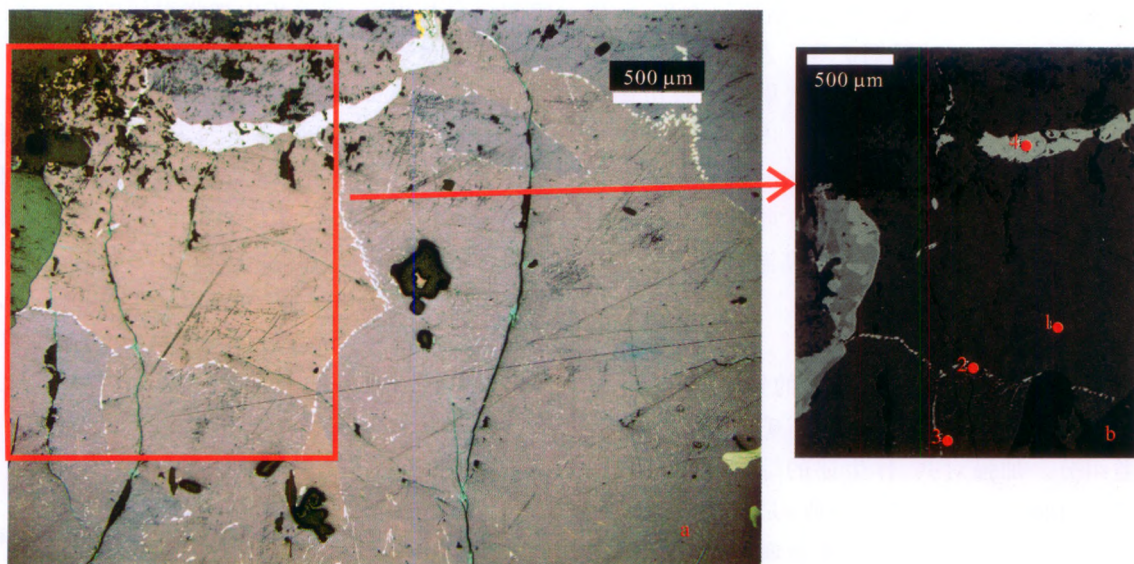


图7 样品 JM2805-463-5-1 显微镜下照片(反光)(a)和对应的电子探针点位图(b)

Fig. 7 Photo by microscope under reflect light of sample JM2805-463-5-1 and its corresponding position diagram by electron probe(b)

(Bi_2S_3)、硒铋矿 $[\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{S})_3]$ 、硫碲铋矿(Bi_2TeS_2)、碲化铋(Bi_2Te_3)，其中，辉铋矿是最重要的铋的工业矿物；(3)含铋的硫盐矿物，如硫铋铜矿($\text{Cu}_6\text{Bi}_2\text{S}_6$)、硫铜铋矿(CuBiS_2)、车轮矿族中的针硫铋铅矿(PbCuBiS_3)、重硫铋铜铅矿($\text{Pb}_2\text{Cu}_2\text{Bi}_4\text{S}_9$)等；(4)氧化物、含氧岩、卤素-含氧盐，如铋华(Bi_2O_3)、泡铋矿 $[(\text{BiO})_2\text{CO}_3]$ 、碳酸钙铋矿 $[\text{Ca}(\text{BiO}_2)(\text{CO}_3)_2]$ 、氟铋矿等，其中铋华也是常见的铋矿物。此外，自然界还存在铋的硅酸盐矿物，如闪铋矿($\text{Bi}_4\text{Si}_4\text{O}_{13}$)、铁

铋矿 $[(\text{BiFe}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH}))^{6-7}]$ 。

西藏甲玛铜多金属矿床中，铋矿物主要属于铋的含硫盐矿物，其氧化还原环境应属于还原环境。由于甲玛矿床中以硫铋铜矿($\text{Cu}_6\text{Bi}_2\text{S}_6$)为主，而非硫铜铋矿(CuBiS_2)，对比两者的分子式，可知在其形成时， S^{2-} 较 Bi^{3+} 多。在岩浆结晶分异作用过程中，铋多富集在残余的热流体中，故铋的主要矿物出现在热液矿床中。我国华南的伟晶岩及高温热液钨矿床中，常见到自然铋和辉铋矿，有的矽卡岩矿床中也

可以见到辉铋矿(如内蒙黄岗砂卡岩铁-锡-铅-铋-钨(铋)矿床)^[7]。而甲玛矿床中几乎未见辉铋矿,也正好反映了携带 Bi 的热液流体也同时携带了大量的 Cu,与矿区形成以 Cu 为主的矿床的地质事实一致。Bi 在 16 号勘探线的矿体中浅部较深部富集,基本可反映出 Bi 在热液流动过程中,倾向于在硫化物阶段晚期沉淀。在甲玛矿床中,16 号勘探线显示了明显的矿化分带,深部 Mo→中深部 Cu—Mo→中部 Cu→浅部 Pb—Zn(Au—Ag)^[5]。Bi 的富集与中部的 Cu 具有相似的形成条件,铋矿物的形成与斑铜矿同期或稍晚。

甲玛矿床的流体包裹体研究显示,硫化物的主要沉淀阶段的均一温度集中在 270~360℃^[14],这与铋矿物主要形成于中-高温环境相一致。福建碧田矿床,是一个以银为主的大型铜金银矿床,在其铜矿石中也发现了大量的含铋矿物,包括硫铋铜矿、针硫铋铅矿、硫铋铜矿、铋砷黝铜矿等^[9]。其与甲玛矿床都为多金属矿床,且在铜矿石中富集铋。碧田矿床中的这些硫盐矿物也形成于 260~380℃,最低成矿压力 20 MPa,硫逸度($\lg f_{S_2}$) = -8.74 ~ -12.06^[9]。因此,甲玛矿床中铋矿物的形成条件与其他矿床中的基本相似,是在中-高温、低压、较高硫逸度的环境下形成的。

4.3 铋的综合利用

我国铋矿资源丰富,但独立的铋矿床甚少,Bi 多作为 W、Sn、Mo、Cu、Pb—Zn 等矿床的共生或伴生有益组分。加强对共、伴生铋的综合评价和提高矿石选冶过程中对铋的综合回收,是提高铋综合利用率的有效途径。目前,我国铋金属生产主要来源于冶炼铋精矿,以及从冶炼铅的阳极泥中进行铋的综合回收。各种原生硫化铋矿物在选矿过程中的行为相似,精选阶段,通过浮选分离产出铋精矿^[15]。矿冶试验报告和开发方案未将铋列入可利用的伴生元素:一方面,可能是受到当时矿物学工作的影响,其列出的含铋矿物仅为含铋黝铜矿,而主要的硫铋铜矿则未提及;另一方面,可能与硫铋铜矿的产出状态有关,其主要呈乳滴状分布于斑铜矿中,在选冶过程中,难度较大,影响了铋的回收利用。在本文研究结果基础上,建议矿山加强对铋的综合利用。

5 结论

(1)甲玛矿床中铋的分布与矿石类型有关。铋主要富集于砂卡岩型矿石中,靠近矿化中心的角岩

型矿石中含量也较高。铜矿化好的部位,铋含量也高。在垂向上,铋的富集带与矿体矿化分带中的 Cu 元素矿化带位置一致。铋元素异常可作为铜矿化的重要找矿标志。

(2)矿石中最主要的铋矿物是硫铋铜矿,存在两个成矿世代,形态和成分上有所差别:其一,硫铋铜矿呈叶片状、它形粒状时,成分正常,接近其理论值;其二,呈乳滴状分布于斑铜矿中时,其 Bi 的含量低于正常值,而 Cu、S 含量高于理论值,甚至演变成含铋的辉铜矿。

(3)甲玛矿床中的铋矿物与福建碧田的铋矿物成分相似,形成的物理化学条件相似,是中-高温、低压、较高硫逸度的环境下形成的。

(4)矿床中 Bi 质量分数较高,最高可达 0.23%,可考虑作为伴生有用组分加以综合利用。为提高资源的综合利用率,建议矿山加强对铋的综合评价,以提高选冶过程中的综合回收。

本文是在陈毓川院士、多吉院士、叶天竺研究员、王瑞江研究员、王成善教授、栗登远高级工程师、李金高教授级高级工程师、陆彦教授级高级工程师、刘鸿飞教授级高级工程师的指导下完成的,在此深表谢意。感谢西藏华泰龙矿业开发有限公司,为作者的野外工作提供了大量的帮助。感谢中国地质大学(北京)的陈晓丹硕士和成都理工大学的黄勇对本文的帮助。岩矿鉴定工作中得到了成都理工大学王志辉教授等的指导,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 陈荣华,刘昌新,许世广. 郴州市金船塘锡铋矿床地质特征及成矿规律探讨[J]. 湖南地质,1997,16(2):101-105.
CHEN Rong-hua, LIU Chang-xin, XU Shi-guang. Jinchuantang Sn—Bi deposit in Chenzhou City and its metallogeny[J]. Hunan Geology, 1997, 16(2): 101-105.
- [2] 吴龙文. 怀集蒲屏岭铋矿床的成因[J]. 冶金丛刊, 1990(4):1-3.
WU Long-wen. Origin of the Pudingling bismuth ore deposit, Huaiji [J]. Metallurgical Collections, 1990 (4): 1-3.
- [3] 杨时惠. 西藏甲玛赤康多金属矿床金银铋钴镍赋存状态及其矿物学特征研究[J]. 矿物岩石,1995,15(1): 26-34.
YANG Shi-hui. A research on the state of occurrence and mineralogy of Au, Ag, Bi, Co, and Ni in

- Jiamachikang polymetallic ore deposit, Xizang [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 1995, 15(1): 26 - 34.
- [4] 全国矿产储量委员会. 矿产工业要求参考手册[M]. 北京:地质出版社, 1987.
- National Committee on Mineral Resources. Reference manual on industry demands on mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [5] 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床铜矿化富集规律研究及应用[J]. *金属矿山*, 2010(2): 87 - 91.
- ZHENG Wen-bao, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, et al. Research and application of copper mineralization enrichment regularity of Jiama polymetallic copper deposit in Tibet[J]. *Metal Mine*, 2010(2): 87 - 91.
- [6] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964(28): 1273 - 1285.
- [7] 牟保垒. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社, 1999:105 - 108.
- MOU Bao-lei. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Peking University Press, 1999:105 - 108.
- [8] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学:上册[M]. 北京:地质出版社, 1982:315.
- WANG Pu, PAN Zhao-lu, WENG Ling-bao. Systematic mineralogy: Vol. 1[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982:315.
- [9] 陈殿芬, 那建国, 熊有恒, 等. 福建碧田铜金银矿床中硫盐矿物及钨锡硫化物研究[J]. *地质学报*, 1998, 72(3): 249 - 259.
- CHEN Dian-fen, NA Jian-guo, XIONG You-heng, et al. Sulphosalt minerals and W - Sn sulphides in the Bitian Cu - Au - Ag deposit, Fujian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998, 72(3): 249 - 259.
- [10] 陈开旭, 何龙清, 魏君奇, 等. 云南白秧坪矿化集中区矿石矿物特征及银、钴赋存状态的初步研究[J]. *矿物学报*, 2004, 24(1): 61 - 67.
- CHEN Kai-xu, HE Long-qing, WEI Jun-qi, et al. Preliminary study on the characteristics of ore minerals and the occurrence states of silver and cobalt in the Baiyangping ore-concentrated field, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(1): 61 - 67.
- [11] 宋会侠, 郭国林, 焦学军, 等. 新疆包古图斑岩铜矿伴生元素金和银赋存状态初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(4): 329 - 334.
- SONG Hui-xia, GUO Guo-lin, JIAO Xue-jun, et al. A preliminary study of the modes of occurrence of associated Au and Ag in the Baogutu porphyry copper deposit, Xinjiang Autonomous Region, China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(4): 329 - 334.
- [12] 李光明, 秦克章, 丁奎首, 等. 冈底斯东段南部第三纪矽卡岩型 Cu - Au $\pm$ Mo 矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(9): 1407 - 1423.
- LI Guang-ming, QIN Ke-zhang, DING Kui-shou, et al. Geology and mineral assemblage of Tertiary skarn Cu - Au $\pm$ Mo deposits in the southeastern Gangdese arc: implications for deep exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(9): 1407 - 1423.
- [13] 潘兆橹, 赵爱醒, 潘铁虹. 结晶学与矿物学:下册[M]. 北京:地质出版社, 1994: 45.
- PAN Zhao-lu, ZHAO Ai-xing, PAN Tie-hong. Crystallography and mineralogy: Vol 2[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 45.
- [14] 余宏全, 丰成友, 张德全, 等. 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*, 2006, 22(3): 689 - 696.
- SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, et al. Study on the fluid inclusions from Jiama skarn copper polymetallic deposit and Qulong porphyry copper deposit in Gandese copper belt, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 689 - 696.
- [15] 廖经桢. 浅析我国铋矿资源的综合回收现状和潜力[J]. *矿产综合利用*, 1990(5): 34 - 37.
- LIAO Jing-zhen. Preliminary analysis on the present situation of the comprehensive recovery of bismuth ore resources and its potential[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 1990(5): 34 - 37.