

# 西藏甲玛铜多金属矿富银矿体地质特征、银赋存状态及富集机理研究

胡正华<sup>1)</sup>, 唐菊兴<sup>1,2)</sup>, 丁枫<sup>1)</sup>, 郑文宝<sup>1)</sup>, 邓世林<sup>3)</sup>, 杨毅<sup>1)</sup>, 张志<sup>1)</sup>,  
王艺云<sup>1)</sup>, 林彬<sup>1)</sup>, 丁帅<sup>1)</sup>

1)成都理工大学, 四川成都 610059;

2)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3)四川省地矿局物探队, 四川成都 610000

**摘要:** 位于西藏墨竹工卡县的甲玛铜多金属矿床是冈底斯中东段近年来新发现的超大型矿床, 已探明伴生银资源量大于 6000 t。根据产出特征可将甲玛矿区的银矿体分为矽卡型与大理岩型两种。通过矿相学、电子显微探针研究发现银均以不可见银和可见银两种形式存在。不可见银以晶格银的形式赋存于铜矿物中; 其次以次显微包体银的形式赋存于方铅矿中。可见银通常以 4 种独立矿物(碲银矿、银金矿、银铅矿、自然银)交代斑铜矿和黄铜矿等硫化物或充填在硫化物和脉石的显微裂隙内。甲玛矿区铜、钼、金、铅、锌、银等金属离子在成矿早期高温阶段以氯络合物的形式搬运, 随着成矿热液温度和氧逸度的降低以及 pH 值的升高, 氯络合物因稳定性降低而解体。解体之后的铜、钼、金、铅、锌、银等金属离子主要以硫氢络合的形式迁移, 在迁移过程中随着温度的降低, 首先是铜、钼等金属硫氢络合物的分解, 形成辉钼矿、黄铜矿和斑铜矿等硫化物, 此时部分银以显微和次显微包体银和晶格银的形式分布于这些硫化物中。随着温度的持续降低矿区铅、锌硫化物的大量沉淀引起成矿热液组成和性质的显著变化, 最终导致银从硫氢络合物中彻底解体, 并与铜等离子结合形成大量独立银矿物, 而溶液中过饱和的银则以自然银的形式沉淀。

**关键词:** 甲玛; 银矿体特征; 赋存状态; 富集机理

中图分类号: P618.52; P595; P611 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.06.04

## A Study of Features, Modes of Occurrence and Enrichment Mechanism of Silver-rich Ore Bodies in the Jiama Copper-Polymetallic Deposit of Tibet

HU Zheng-hua<sup>1)</sup>, TANG Ju-xing<sup>1, 2)</sup>, DING Feng<sup>1)</sup>, ZHENG Wen-bao<sup>1)</sup>, DENG Shi-lin<sup>3)</sup>,  
YANG Yi<sup>1)</sup>, ZHANG Zhi<sup>1)</sup>, WANG Yi-yun<sup>1)</sup>, LIN Bin<sup>1)</sup>, DING Shuai<sup>1)</sup>

1) Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

2) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037;

3) Geophysical Prospecting Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610000

**Abstract:** Located in Maizhokunggar County of Tibet, the Jiama copper-polymetallic ore deposit discovered in recent years has silver reserves of over 6000t, constituting a superlarge ore deposit in the eastern part of central Gangdise. According to modes of occurrence, the silver ore bodies in the Jiama copper-polymetallic ore deposit can be classified into skarn-type and marble-type. Mineragraphic studies and electron probe microanalysis reveal

本文由自然科学基金(编号: 41172077)、中央公益性行业专项(编号: 201011013-3)和国家 973 项目(编号: 2011CB403103)联合资助。

收稿日期: 2011-10-06; 改回日期: 2011-11-08。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 胡正华, 男, 1985 年生。硕士研究生。现从事固体矿体普查与勘探工作。E-mail: hucdut@qq.com。

通讯作者: 唐菊兴, 男, 1964 年生。博士, 研究员。主要从事矿床勘查。E-mail: tangjuxing@126.com。

that silver exists in two types, i.e., visible silver and invisible silver, with visible silver being dominant. Invisible silver exists in copper minerals in the form of lattice silver besides existing in galena in the form of sub-microinclusions. Visible silver generally replaces sulfides such as bornite and chalcopyrite, or fills in the microsection of sulfides and lodestones in the form of four independent minerals, i.e., hessite, electrum, silver-lead ore and native silver. In the premetallogenic and high temperature phases, the metal ions in the Jiama ore deposit such as Cu, Mo, Au, Pb, Zn, Ag were transported in the form of complex compound. With the lowering of the temperature of metallogenic hydrothermal solution and the rising of the oxygen fugacity and pH value, the complex compound disintegrated due to the falling of its stability. S- and H- complex compounds constituted the main transporting form of Cu, Mo, Au, Pb, Zn, Ag. With the lowering of the temperature, the metal S- and H- complex compounds, such as Cu, Mo complex compounds, started to disintegrate and formed sulfides like molybdenum, chalcopyrite and bornite. And at this time, part of silver was distributed in these sulfides in the form of micro and sub-microinclusions and lattice silver. With the continuous lowering of the temperature, the precipitation of large quantities of Pb and Zn sulfides caused remarkable alteration of the components and properties of metallogenic hydrothermal solution, leading to thorough silver disintegration from S- and H- complex compounds and combination with  $\text{Cu}^{2+}$  to form large quantities of independent silver minerals, while the oversaturated silver in the solution was settled in the form of native silver.

**Key words:** Jiama; features of silver ore body; modes of occurrence; enrichment mechanism

矽卡岩含银铜多金属矿以往常不被人重视,很少把它作为一个独立的矿床类型划分出来,可含银矽卡岩矿床在我国银矿床中占有重要位置。矽卡岩型银矿床的含矿地层以石炭-二叠系为主,成矿岩浆岩主要为燕山期壳源重熔型中酸性和酸性浅成侵入岩,矿化与锰质矽卡岩紧密伴生(赵一鸣等, 2001)。冈底斯成矿带东段以矽卡岩型 Cu-Pb-Zn-Ag、Pb-Zn-Ag、Cu-Mo-Ag-Au 矿化为主,已发现的典型矿床有帮浦、巴洛、龙马拉、新嘎果、洞中拉、亚贵拉、甲玛、知不拉等(余宏全等, 2005; 王方国等, 2005)。西段以热液脉型 Ag-Pb-Zn 矿化为主,典型矿床有则学、切穷、容布当、夏龙等(孟祥金等, 2007)。甲玛矿区位于冈底斯-念青唐古拉地体东段中部,是冈底斯成矿带内重要的斑岩-矽卡岩-角岩型超大型矿床。铜、钼、铅、锌、金、银等 6 种有用元素的资源量均达大型以上规模(郑文宝等, 2010)。

近几年通过区域化探勘查工作发现了多处银矿点(郭灵俊等, 2011; 申伍军等, 2010)。冈底斯东段区域化探成果显示银异常明显,具有极大的找矿潜力。近年来共探获甲玛铜多金属矿床伴生 111b~333 银资源量大于 6000 t,为冈底斯成矿带乃至西藏最大的伴生银矿床。而且甲玛银矽卡岩矿床与赵一鸣等(2001)、王静纯等(1994)年所提出的中国含银矽卡岩矿床具有明显不同的特征:甲玛含银矿床赋矿岩石为钙矽卡岩,次为大理岩、灰岩,而不是单一的类型——锰质矽卡岩;成矿时代为中新世(约 15 Ma)

(应立娟等, 2009; 李光明等, 2005)明显晚于赵一鸣等(2001)所提出的以燕山期和印支期为主的成矿时代。通过对甲玛铜多金属矿床银矿体特征、银赋存状态、及其富集机理的研究,将有利于深化中国矽卡岩型银多金属矿床分布特征,同时对于冈底斯成矿带银矿的找矿评价也有重要的意义。

甲玛铜多金属矿床位于西藏特提斯构造域冈底斯晚燕山-早喜马拉雅期陆缘岩浆弧中段北部内 NWW 向延伸的甲玛-卡果果推覆构造系前部带,矿区发育推覆、滑覆构造和轴向 NE 的褶皱系。矿区出露地层为:上侏罗统多底沟组( $J_3d$ )灰岩、大理岩和下白垩统林布宗组( $K_1d$ )黑色板岩、粉砂岩、角岩等(图 1)。主矿体位于大理岩与角岩之间的层间接触带和滑脱构造及其次生褶皱所赋存的矽卡岩中。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,次为角岩型,少量斑岩型和大理岩型矿石。矿石矿物为黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、辉铜矿、金、自然银、碲银矿及含铋、镍、钴、钨的矿物等。非金属矿物主要为石英、黑云母、萤石、红柱石、绢云母、方解石、石英、绿泥石、石榴子石、硅灰石、透辉石、绿帘石等。矿石构造:以浸染状和细脉网脉状为主,团块状构造、角砾状构造、胶状构造次之。矿石结构为结晶结构、交代结构、固溶体分离结构和表生结构四大类。

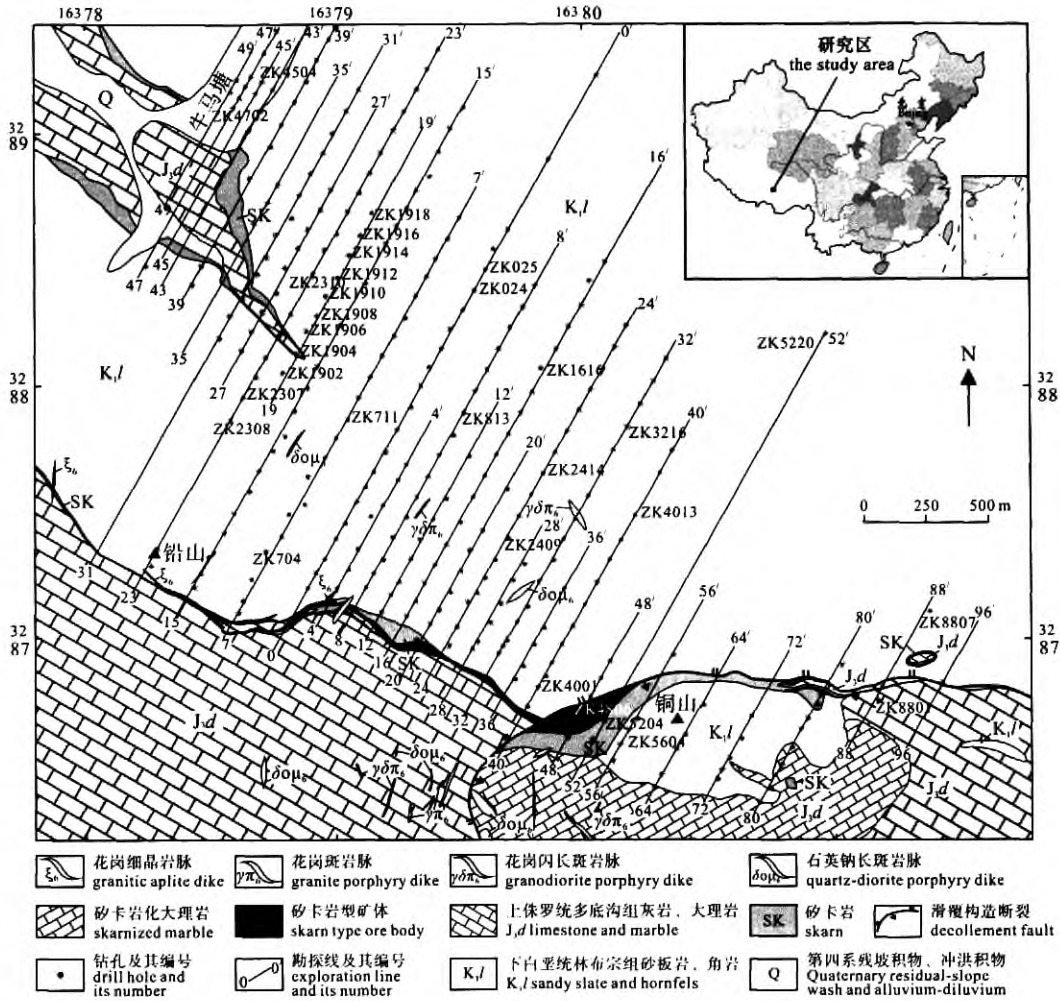


图1 甲玛矿区地质图(据郑文宝等, 2010 修改)

Fig.1 Geological map of the Jiama ore district(modified after ZHENG Wen-bao et al., 2010)

### 1 银矿体特征

甲玛铜多金属矿银矿体就赋矿岩石而言主要有两种类型: 矽卡岩型和大理岩型, 以矽卡岩型为主。依据甲玛铜多金属矿矿区钻孔中样品的化学分析结果, 绘制矿区大于 50 g/t 的银元素品位×厚度分带图(图 2)。从图中可以看出: 银元素矿化强烈, 整个矿区内银的含量均较高, 品位×厚度值一般大于 300 mg/t, 大于 2000 mg/t 集中分布于北西侧 19 线至 31 线、南东侧 52 线附近及每条勘探线的起始部位。从矿区中心向外侧银具有富集趋势, 其 ZK5204、ZK4704 品位×厚度值明显偏大, 这可能是银元素在流体搬运过程中强活动性和形成温度较低的体现。除 ZK4704、ZK1509 孔附近以大理岩型银矿体为主外, 其它区域均为矽卡岩型银矿体。

#### 1) 矽卡岩型银矿体特征

甲玛矽卡岩型铜多金属矿体总体上为隐伏-半

隐伏矿体, 按其产出形态、产状、规模等, 在矿区内共划分出 9 个矿体(见表 1)。

甲玛矽卡岩型银矿体可细分为矽卡岩含银铜多金属矿体及矽卡岩型银铜多金属矿体两种。矽卡岩型含银铜多金属矿体基本分布于整个铜多金属矿体中, 走向北西西, 倾向北北东, 其规模与矽卡岩型铜多金属矿体基本相似。

矽卡岩型银铜多金属矿体主要分布于矿区北西侧 19 线至 31 线、南东侧在 24 线及 52 线附近。从矿区中心向外侧银具有富集趋势。银矿体呈透镜状、层状、似层状, 矿体最厚 82 m(ZK5204), 走向北西西、倾向北北东(图 3、4)。甲玛银矿体不同于一般的矽卡岩型银矿床银矿体分布于矽卡岩上部的特征。甲玛银铜多金属矿体主要分布于 I-1 矽卡岩型铜多金属矿体中部, 其次分布于 I-2 至 I-9 矽卡岩型铜多金属矿体中部。甲玛银铜多金属矿体的分布特征很可能是由于矿床中矽卡岩与含矿矽卡岩多期次

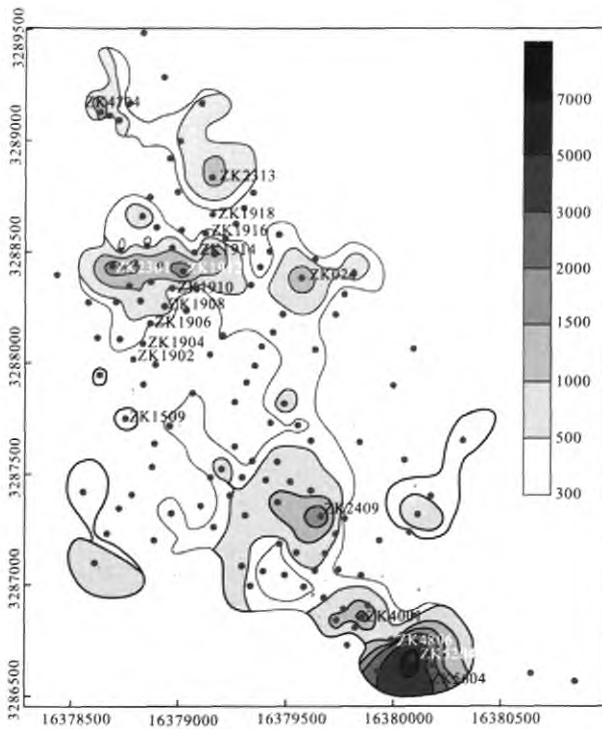


图2 甲玛铜多金属矿 Ag(g/t)×银矿体厚度/m 等值线分布图

Fig. 2 Distribution of contour lines of Ag(g/t) thickness of Ag ore body in the Jiama copper-polymetallic deposit

性所引起。就目前研究程度认为的酸性斑岩的侵位次序以及含矿矽卡岩的关系可以总结如下: 花岗斑岩侵位最早, 侵位时间在 15.31~16.27 Ma 之间, 分别早于矽卡岩和辉钼矿的形成。(石英)闪长玢岩稍晚于花岗斑岩的侵位, 早于矽卡岩的形成。二长花岗斑岩与花岗闪长斑岩均晚于矽卡岩的形成, 但二长花岗斑岩侵位早于花岗闪长斑岩, 其相互关系见表 2。甲玛矿区晚期含矿矽卡岩分布于早期不含矿矽卡岩中部, 于是导致了矽卡岩型银矿体分布于矽卡

岩中部的特征。甲玛银矿体中的伴生元素有 Cu、Mo、Au、Pb、Zn, 以 Cu 为主。矿石组构主要为浸染状、细脉浸染状, 次为稠密浸染状、块状。有用元素组合: Cu-Mo-Ag(Au), Cu-Mo-Pb-Zn-Ag(Au), Pb-Zn-Ag。组成金属矿物: 黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、硫铋铜矿、辉碲铋矿、针硫铋铅矿、铜蓝、蓝辉铜矿、赤铜矿、自然铜、孔雀石、毒砂、黄铁矿及辉银矿、碲银矿、银金矿、自然金、自然银等。脉石矿物: 石榴子石、硅灰石、透辉石、绿帘石、石英、石膏、方解石等。王焕等(2011)研究认为甲玛矿区的矽卡岩均为钙矽卡岩, 矽卡岩矿物主要有石榴子石、硅灰石、透辉石、绿帘石, 石榴子石为钙铁-钙铝榴石系列。银矿体均主要赋存于石榴子石、绿帘石、硅灰石矽卡岩中。矿区围岩蚀变有热接触围岩蚀变和热液交代围岩蚀变两种, 发育角岩化及大理岩化、夕卡岩矽卡岩化、绢云母化、硅化、黑云母化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化、钾化及泥化等(唐菊兴等, 2010)。

2)大理岩型银矿体特征

ZK4704 孔、ZK1509 孔及其附近主要为大理岩型银矿体, 呈透镜状。ZK2316 孔大理岩中也有个别样品品位达 60 g/t。矿石构造以细脉-网脉状为主。有用元素组合: Cu-Pb-Zn-Ag(Au), Ag(Au), Cu-Ag-Au。矿石矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、银金矿、自然银等。脉石矿物以为方解石为主、次为石榴子石、硅灰石、绿帘石、绿泥石等。蚀变有矽卡岩化、大理岩化。

2 银的赋存状态及富集机理

1)赋存状态

一般而言, 银的赋存状态主要有 4 种: 独立银

表 1 甲玛矽卡岩型铜多金属矿各矿体形态产状和规模表(据唐菊兴等, 2010 修改)

Table 1 Shape and size of each ore body in the Jiama skarn-type copper-polymetallic deposit(modified after TANG Ju-xing et al., 2010)

矿体号	形态	产状	规模
I-1	层状、似层状、厚板状, 矿体最厚 257 m	北西西走向, 倾向北东, 浅部矿体陡倾, 向倾向方向缓倾斜	规模最大(约 78%), 分布于勘探线 47 至 56 之间, 矿体长 3400 m, 倾向延伸 3200 m, 铜、钼、铅锌、伴生金银均达到大型以上
I-2	似层状	北西西走向, 倾向北北东	本矿区第二大(约 12%), 分布于勘探线 4 至 36 之间
I-3	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 3%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-4	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 2%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-5	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 2%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-6	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 1%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-7	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 1%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-8	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 0.5%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东
I-9	透镜状	北西西走向, 倾向北北东	较小(约 0.5%), 位于矿区东端, 分布于勘探线 56 线以东

表 2 甲玛铜多金属矿床中酸性斑岩侵位次序以及与含矿矽卡岩的关系(据李光明等, 2005; 应立娟等, 2009; 唐菊兴等, 2009)

Table 2 Acidic porphyry emplacement sequence in relation to the ore-bearing skarn in the Jiama copper-polymetallic deposit (after LI Guang-ming et al., 2005; YING Li-juan et al., 2009; TANG Ju-xing et al., 2009)

岩性	侵位时间	脉体穿切关系	与矽卡岩关系	与成矿的关系
花岗斑岩	15.31~16.27 Ma	—	早于矽卡岩	早于 Cu、Mo 矿化
石英闪长玢岩	—	切穿花岗斑岩	早于矽卡岩	早期 Cu、Mo 矿化
二长花岗斑岩	14.81 Ma±	切穿石英闪长玢岩	晚于矽卡岩	中期 Cu、Mo 矿化
花岗闪长斑岩	—	切穿二长花岗斑岩	晚于矽卡岩	晚期 Cu、Mo 矿化

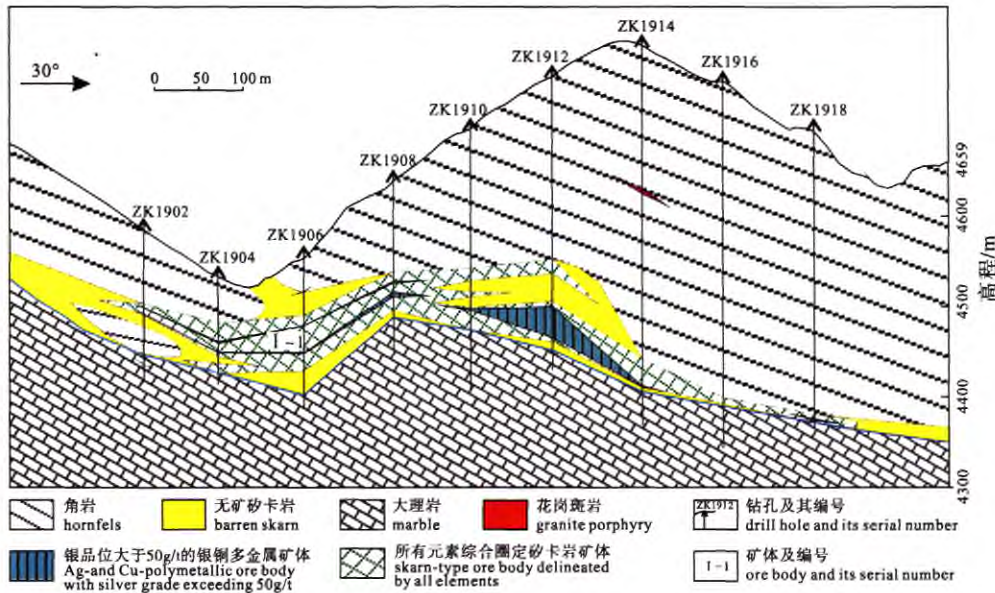


图 3 甲玛 19 号勘探线的高品位银铜多金属共生矿体与矽卡岩型含银铜多金属矿分布图  
Fig. 3 Distribution of high grade Ag- and Cu-polymetallic coexisting ore bodies and skarn-type silver-bearing copper ore bodies along No.19 exploration line of the Jiama ore deposit

矿物、类质同象银、离子吸附银与非晶态银(王静纯等, 1996)。依据矿物在显微尺度上的大小, 银的赋存状态可分为: 可见银(>1~1 μm)和不可见银(<1 μm)。其中可见银分为独立银矿物(> 50 μm)和显微包体银(1~10 μm)两类; 不可见银的赋存状态主要有晶格银和次显微包体银(Sharp et al., 1993; Cosatgliola et al., 2003)晶格银即类质同像银, 次显微包体银则多包含在同银矿化密切相关的硫化物内。本文按照 Sharp 等(1993)的显微尺度来划分银的赋存状态。

对该矿床内各种矿石和银的载体矿物, 通过岩矿鉴定、单矿物分析电子探针分析等多种手段, 进行了综合研究表明: 甲玛铜多金属矿床内发育有大量独立银矿物主要有银金矿、银铅矿、碲银矿、自然银等(图 5), 说明可见银是甲玛矿床中银的主要赋存形式之一。这些银矿物与方铅矿、黄铜矿、斑铜矿等硫化物关系密切。甲玛矿区可见银表现为 3 种产状: (1)在显微尺度上以不规则脉的形式充填在其他矿物的裂隙中((图 5A, B); (2)呈他形-半自形包裹分布于方铅矿等硫化物内部(图 5C); (3)呈集合体状

交代方铅矿和黄铜矿、斑铜矿等硫化物(图 5D)。这些独立银矿物的颗粒大小一般都在 10 μm 以上。同时, 通过矿相显微境发现在斑铜矿、黄铜矿和方铅矿、锌砷黝铜矿、辉碲铋矿等硫化物内常发育一些显微包体银矿物, 它们的形态多不规则, 粒径一般小于 10 μm。一些在显微尺度上(<1 μm)未能观察到银矿物包体的区域, 电子探针分析(表 2)却显示有银的富集, 尤其是斑铜矿、铜蓝、辉碲铋矿、锌砷黝铜矿、方铅矿、银金矿、碲银矿、自然金、银金矿, 说明甲玛矿床的硫化物中存在不可见银(< 1 μm 的银)。已有研究表明, 高温条件下 Ag 通常和 Sb(Bi)一起置换 Pb(如  $Ag^+ + Sb^{3+} = 2Pb^{2+}$ ), 于是方铅矿晶格中形成晶格银(Chang et al., 1988; Foord et al., 1989), 当温度降低到固溶体线以下时, Ag 倾向于同 Sb(Bi)形成银的硫盐矿物(如硫银铋铜矿、锌银砷黝铜矿等)沿方铅矿解理出溶(Gasparriini et al., 1985; Lueth et al., 2000), 此时 Ag 对 Pb 的类质同像替代大大减少, 以致方铅矿中几乎没有晶格银出现。方铅矿单矿物中以类质同像形式存在的银比例

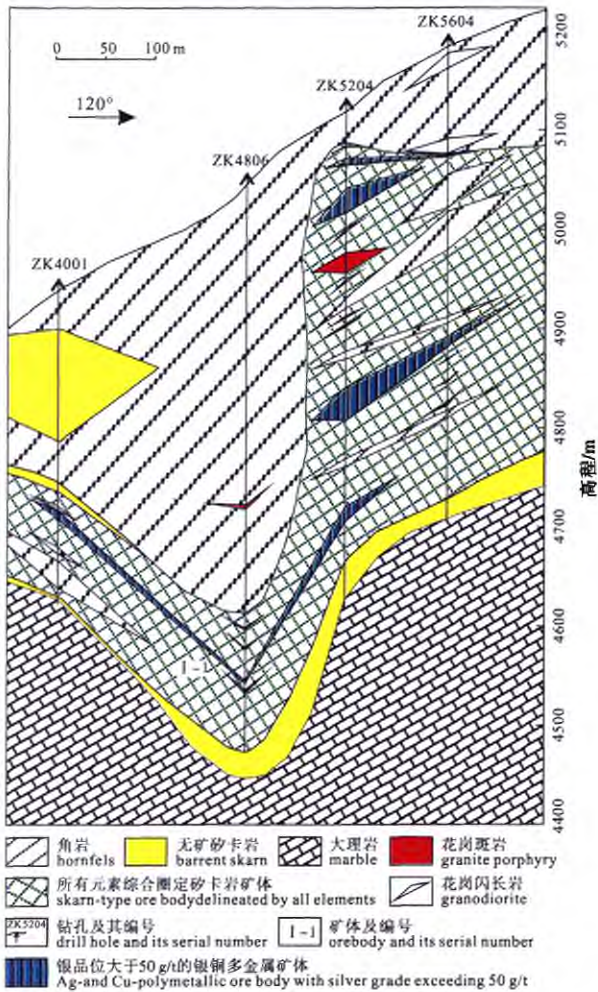


图 4 甲玛纵切面的高品位银铜多金属共生矿体与砂卡岩型含银铜多金属矿分布图  
 Fig. 4 Distribution of high grade Ag- and Cu-polymetallic coexisting ore bodies and skarn-type silver-bearing copper ore bodies along the longitudinal section of the Jiama ore deposit

极小, 其含银较高是由于微细粒、甚至超显微粒级银矿物在矿物晶面或晶隙中存在所致(王静纯等, 1996)。在矿液富含铜的条件下,  $\text{Cu}^+$ 与 $\text{Ag}^+$ 发生类质同象置换(黝铜矿中有 10 个  $\text{Cu}^+$ 空位极易与  $\text{Ag}^+$ 置换形成含银的黝铜矿)析出银硫化物和银碲化物(王静纯等, 1996; 周卫宁, 1994; 何国锦等, 2011)。甲玛矿床成矿流体偏酸性, 富 Cu、Mo、Au、Ag、Pb、Zn(周云, 2010)。说明成矿流体中  $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 的组分浓度高, Cu 极易与 Ag 发生类质同象置换。甲玛矿床矿物电子探针分析数据(表 3)显示含银较高的矿物有银金矿、自然金及铜硫化物。黄铁矿中几乎不含银, 闪锌矿、针硫铋铅矿中不含银。斑铜矿中银的含量均值 0.23%; 黄铜矿 0.018%; 含银量较高的矿物主要有铜蓝 2.379%、自然金 3.637%, 硫铋铜矿 0.743%, 由于甲玛矿床矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿

为主, 占铜总量的 95%以上(唐菊兴等, 2009), 故总体上看甲玛矿床次显微银主要赋存于斑铜矿、黄铜矿、黝铜矿。通过对矿区 200 多个钻孔 4139 个样品分析数据计算得知 Ag-Pb 相关系数为 0.23, Ag-Cu 相关系数为 0.78, Ag-Cu 的高度相关性进一步表明次显微银以晶格银的形式存在于黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、辉铜矿、砷铋黝铜矿、硫铋铜矿中。

2)富集机理

大量实验证明, 金属离子(如  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Au}^+$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 等)在高温高氧逸度偏酸性条件下易以氯络合物形式运移(Seward, 1976; Ruaya et al., 1986); 在中温高硫偏碱性的环境中易形成硫氢络合物运移(Giordano et al., 1979; Gammons et al., 1989; Hayashi et al., 1990; Stefánsson et al., 2003)。热液中银、铅、锌的活化迁移, 沉淀富集是体系温度、pH、Eh 及组分浓度等因素综合作用的结果(尚林波等, 2003)。

图 6 中粗实线区分 Ag、 $\text{Ag}_2\text{S}$ 、 $\text{AgCl}$  固相稳定场; 细实线区分各种溶解硫稳定场; 虚线区分  $\text{AgCl}_2^-$ 、 $\text{AgCl}^{2-}$  和  $\text{Ag}(\text{HS})^{2-}$  的稳定场; 虚线表示  $\text{AgCl}^{2-}$  和  $\text{Ag}(\text{HS})^{2-}$  的溶解度等值线, 浓度均为  $10^{-6}$  mol/L。实验和热力学计算表明(尚林波等, 2003, 2004), 在相同的环境中  $\text{Ag}(\text{HS})^{2-}$ 在中低温条件下比  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 硫氢络合物的溶解度要高。随着温度的降低, 铅、锌硫化物发生饱和并沉淀, 银则以硫氢络合物形式继续稳定存在于热液中, 从而造成银与铅、锌的分离。当物理化学条件超出  $\text{Ag}(\text{HS})^{2-}$ 的稳定场,  $\text{Ag}^+$ 可直接从溶液中沉淀形成砷银矿和自然银等独立银矿物。

周云等(2010)认为甲玛矿床成矿流体主要为 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系和 NaCl-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 体系共存, 成矿溶液为酸性。热液中的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Au}^+$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 等金属离子将与  $\text{Cl}^-$ 络合呈氯络合物形式运移(Seward, 1976; Ruaya et al., 1986); 当自岩浆中源源不断分化出来的金属元素以氯的络合物上升(图 6 箭头 A 所示)至接近地表定位时, 形成强大的内压力, 导致岩体顶部破裂, 压力的突然释放, 造成高温含矿热流体发生减压沸腾, CO<sub>2</sub> 气体的大量释放,  $f_{\text{O}_2}$ 、 $f_{\text{S}_2}$ 降低, pH 增大(钻孔 ZK3216 北东的隐爆角砾岩的存在可作为有力证据), 促使  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mo}^{2+}$ 、 $\text{Au}^+$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 等金属离子的氯络合物解体, 与 HS<sup>-</sup>络合呈硫氢络合物的形式运移(图 6 箭头 B 所示), 随着成矿热液继续向上运移和温度的进一步降低, 先是  $\text{Mo}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 等金属离子的硫氢络合物开始解体,

表 3 甲玛矿床矿物电子探针分析表(单位: %, 数据据王焕等, 2011; 郑文宝等, 2010; 据唐菊兴等, 2009; 杜光树等, 1998 综合)  
 Table 3 Electron microprobe analyses of minerals in the Jiama ore deposit (unit: %, summarization based on WANG Huan et al., 2011; ZHENG Wen-bao et al., 2010; TANG Ju-xing et al., 2009; DU Guang-shu et al., 1998)

矿物	As	Ag	Fe	Se	S	Cu	Sb	Zn	Pb	Co	Ni	Te	Au	Mo	Sn	Bi	Total
黄铜矿	-	-	26.77	0.02	33.87	37.48	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	98.14
黄铜矿	-	0.01	24.75	-	33.67	40.92	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-	99.42
黄铜矿	0.02	0.01	30.55	-	35.26	34.70	-	-	-	0.02	0.01	-	-	-	-	-	100.57
黄铜矿	-	0.02	30.93	-	35.34	34.64	0.04	-	-	0.02	0.01	-	0.12	-	-	-	101.10
黄铜矿	-	0.04	30.29	-	34.83	34.61	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-	99.84
黄铜矿	0.03	0.01	29.84	-	34.88	32.86	-	0.87	-	0.02	-	-	-	-	-	-	98.50
黄铜矿	-	0.03	29.68	0.03	35.29	34.34	-	0.04	-	0.04	-	0.02	-	-	-	-	99.47
黄铜矿	-	0.03	29.63	-	35.17	34.19	-	0.26	-	0.06	0.01	-	0.09	0.03	-	-	99.48
黄铜矿	-	0.03	30.32	-	35.18	34.56	-	0.07	-	0.05	-	-	-	-	-	-	100.20
黄铜矿	-	0.05	29.57	0.03	34.88	34.34	-	-	-	0.01	-	-	0.03	-	-	-	98.90
黄铜矿	-	0.01	30.60	-	34.99	34.69	-	0.04	-	0.07	0.01	-	0.05	-	-	-	100.46
黄铜矿	0.05	-	29.65	0.05	35.14	34.66	0.03	0.07	-	0.04	-	-	-	-	-	-	99.69
黄铜矿	-	0.01	30.58	-	35.25	34.10	-	0.08	-	-	-	-	0.21	-	-	-	100.23
黄铜矿	-	0.03	29.89	-	35.12	34.21	-	0.01	-	0.01	0.03	-	0.04	-	-	-	99.33
黄铜矿	-	0.02	29.85	-	34.80	33.96	-	-	-	-	-	-	0.17	-	-	-	98.79
黄铜矿	0.01	0.02	30.22	-	34.94	34.95	-	0.06	-	-	-	0.02	-	-	-	-	100.22
黄铜矿	-	-	30.60	-	34.89	33.75	-	-	-	0.023	0.037	-	-	-	-	-	99.296
斑铜矿	-	0.20	11.53	0.02	25.59	61.98	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	99.38
斑铜矿	-	0.16	11.43	-	26.06	61.29	-	0.08	-	0.02	-	-	0.02	-	-	-	99.05
斑铜矿	-	0.20	11.12	-	26.43	61.00	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	98.77
斑铜矿	-	0.16	8.86	0.01	25.72	64.22	0.07	0.06	-	0.24	0.54	-	0.05	0.42	-	-	100.34
斑铜矿	-	0.18	10.81	0.01	25.66	62.40	-	0.04	-	0.01	-	-	0.07	-	-	-	99.18
斑铜矿	-	0.42	11.47	-	26.54	61.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.70	100.88
斑铜矿	-	0.43	11.55	-	26.29	56.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.55	90.06
方铅矿	-	0.27	-	0.06	12.92	-	-	-	85.86	-	-	0.25	-	-	-	-	99.36
方铅矿	-	0.09	0.13	0.01	12.97	-	-	-	85.96	-	0.03	0.26	-	-	-	-	99.46
方铅矿	-	0.26	0.03	-	12.78	0.73	-	-	85.84	-	-	0.09	-	-	-	-	99.74

续表 3

矿物	As	Ag	Fe	Se	S	Cu	Sb	Zn	Pb	Co	Ni	Te	Au	Mo	Sn	Bi	Total
方铅矿	-	0.26	0.17	0.06	12.87	0.03	-	0.01	85.49	0.03	-	0.18	-	-	-	-	99.09
方铅矿	-	0.01	0.03	0.09	12.66	0.07	-	0.03	85.77	-	0.01	0.13	-	-	-	-	98.80
方铅矿	-	0.01	0.03	0.09	12.66	0.07	-	0.03	85.77	-	0.01	0.13	-	-	-	-	98.80
方铅矿	-	0.27	-	0.06	12.92	-	-	-	85.86	-	-	0.25	-	-	-	-	99.36
方铅矿	-	0.09	0.13	0.01	12.97	-	-	-	85.96	-	0.03	0.26	-	-	-	-	99.46
方铅矿	-	-	0.40	-	13.50	0.39	-	-	86.45	-	-	-	-	-	-	-	100.73
方铅矿	-	-	0.36	-	13.51	0.38	-	-	86.29	-	-	-	-	-	-	-	100.54
闪锌矿	-	-	4.47	-	33.35	5.05	0.03	56.02	-	0.03	-	-	0.11	0.09	-	-	99.15
闪锌矿	-	-	10.09	-	33.79	0.06	-	54.57	-	0.01	-	-	0.19	-	0.02	-	98.73
锌砷黝铜矿	10.85	0.11	0.39	-	26.89	44.46	10.23	7.55	-	0.07	0.01	-	-	-	-	-	100.55
锌砷黝铜矿	6.32	0.23	1.42	-	26.29	40.19	19.67	5.39	-	0.02	0.11	-	0.01	0.39	-	-	100.03
锌砷黝铜矿	10.20	-	2.16	-	26.82	47.49	1.99	9.69	-	-	-	-	-	-	-	-	98.33
锌砷黝铜矿	10.90	-	2.89	-	27.75	41.57	1.06	15.29	-	-	-	-	-	-	-	-	99.44
硫铋铜矿	-	0.22	-	0.42	19.40	39.45	0.01	0.01	-	-	-	0.02	-	-	-	40.61	100.13
硫铋铜矿	-	0.23	0.41	-	19.82	39.82	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	40.75	101.04
硫铋铜矿	-	0.29	0.03	-	19.49	39.91	-	0.02	-	-	0.01	-	-	-	-	40.82	100.57
硫铋铜矿	-	0.29	0.01	0.05	19.54	39.91	-	0.03	-	-	-	0.03	-	-	-	40.71	100.55
硫铋铜矿	-	1.07	-	-	20.39	37.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40.00	99.74
硫铋铜矿	-	2.75	-	-	19.91	37.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.26	99.97
硫铋铜矿	-	0.97	-	-	19.71	37.87	0.67	-	-	-	-	-	-	-	-	39.64	98.10
辉砷铋矿	-	0.83	0.09	-	4.38	0.31	-	-	0.30	-	-	33.99	-	-	-	60.39	100.02
辉砷铋矿	-	0.15	0.15	-	4.57	0.37	-	-	-	-	-	32.20	-	-	-	61.43	98.88
针硫铋铅矿	-	-	-	-	13.23	10.71	0.17	-	37.91	-	-	-	-	-	-	39.90	98.93
针硫铋铅矿	-	-	-	-	13.82	11.36	-	-	38.52	-	-	-	-	-	-	37.28	100.98
铜蓝	-	2.27	1.00	-	31.59	64.69	-	0.06	-	0.01	-	0.02	0.03	-	-	-	99.66
铜蓝	-	2.49	0.58	-	30.73	67.50	-	0.03	-	-	0.01	-	0.12	-	-	-	101.46
黄铁矿	0.77	0.01	46.31	-	53.02	0.02	-	0.04	-	0.08	-	-	-	0.16	-	-	100.41
黄铁矿	-	-	47.31	-	53.25	0.02	-	-	-	0.34	0.05	0.01	-	-	-	-	100.98



续表 3

矿物	As	Ag	Fe	Se	S	Cu	Sb	Zn	Pb	Co	Ni	Te	Au	Mo	Sn	Bi	Total
黄铁矿	-	-	46.78	-	53.32	0.05	-	0.33	-	0.12	0.02	-	-	0.06	-	-	100.67
自然金	-	1.04	0.03	-	0.02	0.19	-	0.02	-	0.03	-	0.03	99.17	-	-	0.16	100.68
自然金	-	1.10	0.21	-	0.01	0.03	-	0.02	-	-	-	0.04	98.93	-	-	0.22	100.56
自然金	-	5.95	0.12	-	0.16	1.63	-	-	-	0.01	0.01	-	91.98	-	-	0.10	99.96
自然金	-	6.46	0.26	-	0.35	0.57	-	-	-	0.04	-	-	91.48	-	-	0.56	99.71
自然银	-	99.80	-	-	-	1.18	-	-	-	-	-	-	0.44	-	-	-	-
自然银	-	99.80	-	-	-	1.18	-	-	-	-	-	-	0.44	-	-	-	-
银金矿	-	16.43	0.08	-	0.06	0.24	-	-	-	0.01	-	0.23	82.68	-	-	0.71	100.44
银金矿	-	17.08	0.14	-	-	0.62	-	0.01	0.06	-	-	0.12	80.06	-	-	1.04	99.13
银金矿	-	16.43	0.08	-	0.06	0.24	-	-	-	0.01	-	0.23	82.68	-	-	0.71	100.44
银金矿	-	17.08	0.14	-	-	0.62	-	0.01	0.06	-	-	0.12	80.06	-	-	1.04	99.13
碲银矿	-	60.04	-	0.19	0.02	0.28	-	-	-	-	-	37.55	0.02	-	-	0.05	98.14
碲银矿	-	60.67	-	0.17	0.02	0.21	-	-	-	-	-	37.73	0.49	-	-	-	99.30
碲银矿	-	60.78	-	0.13	0.05	0.56	-	0.02	0.03	0.02	0.02	37.97	0.04	-	-	0.03	99.65
碲银矿	-	61.51	0.20	-	-	0.75	-	-	0.26	-	-	36.01	-	-	-	0.29	-
碲银矿	-	59.27	0.12	-	-	0.33	-	-	-	-	-	38.11	-	-	-	-	-

注：电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所测定。

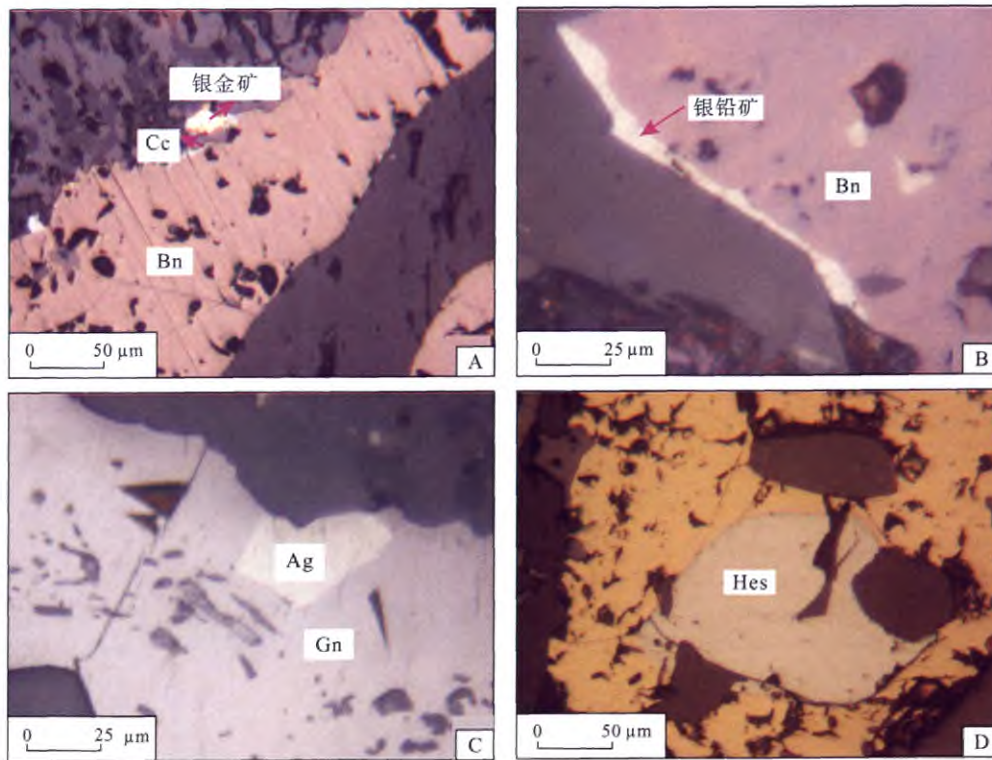


图5 甲玛矿床矿相显微镜下银矿物的产出状态

Fig. 5 Modes of occurrence of silver minerals in the Jiama ore deposit under mineragraphic microscope

A-银金矿: 斑铜矿 Bn 边缘被辉铜矿 Cc 交代, 一粒银金矿与辉铜矿 Cc 连接, JM803-B5; B-银铅矿: 产于斑铜矿 Bn 边缘的淡黄白色矿物银铅矿(暂定名), JM3104-B4; C-自然银: 产于方铅矿 Gn 边部的自然银 Ag, JM8003-B5; D-碲银矿: 产于黄铜矿中的碲银矿 Hes, JM2409-B29

A-Electrum: the edge of bornite replaced by chalcocite, and a grained electrum connected with chalcocite, JM 803-B5; B-Silver-lead mineral: faint yellow silver-lead mineral named temporarily and produced at the edge of bornite, JM3104-B4; C-Native silver: produced at the edge of galena, JM8003-B5; D-Hessite: produced in the interior of chalcopyrite, JM2409-B29

辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿等硫化物的大量沉淀(周云, 2010)。硫氢络合物的解体直接导致  $HS^- = S^{2-} + H^+$  向右进行, 成矿热液中  $S^{2-}$  急剧减少, 随着温度的降低, 闪锌矿、方铅矿形成。温度持续降低, 导致  $Ag(HS)^2$  的大量解体, 由于银与铜属同一副族元素, 它们的晶体化学性质较为相似  $Ag^+$  将与溶液内的  $Cu^+$ 、 $Sb^{3+}$ 、 $S^{2-}$  离子结合直接沉淀或交代早期硫化物(如斑铜矿、黄铜矿、黝铜矿), 形成大量独立银矿物和晶格银。甲玛铜多金属矿床中酸性斑岩的侵位次序为花岗斑岩、石英闪长玢岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩, 且这四期岩体皆形成了矽卡岩, 后三期岩体为矿床的形成提供了物源(唐菊兴等, 2009)。岩浆的多次脉动为 Ag 置换斑铜矿、黄铜矿、黝铜矿等中的 Cu 提供了更多机会。

甲玛矿床含矿岩浆侵位位置在 ZK2414 或 ZK3216 附近或稍向东北(周云, 2010)。流体源位于矿区 NE 部则古朗地区, 自 NE 向 SW 方向运移(唐菊兴等, 2010; 郑元宝等, 2010)。对 16 号勘探线的剖析认为 ZK1616、ZK1617 底部具有一大岩体。ZK1616 正好位于 ZK2414NW 方位约 150 m, 而在内

生热液成矿作用中, 银相对于其它金属元素(Cu、Mo、Au、Sn 等)最为稳定, 它所形成的络合物只有在低温条件下才能离解。热液中的化学成分只决定沉淀出的银矿物的种类, 不改变银矿物后期低温沉淀的规律(战新志等, 1999)。故 ZK1616 附近主要为含 Ag 多金属富集带, 银品位并不高。ZK5204 附近处于滑覆体中, 裂隙发育强烈、容矿空间大, 当成矿流体转移至此处时减压沸腾  $CO_2$  气体的大量释放、温度急速下降,  $fO_2$ 、 $fS_2$  降低, pH 增大引起运矿络合物解离, 速度沉淀成矿, 形成矽卡岩型高品位银矿体的富集中心之一。47 线区域距岩体中心相对较远, Ag、Pb、Zn 沉淀的温度较 Cu、Mo 低, 而且 Ag、Pb、Zn 活动性较 Cu、Mo 高, 于是在远离岩体的 ZK4704、ZK1509 附近 Ag 矿化较富集, 银以主要自然银和次显微银的形式赋存于灰岩、大理岩的方铅矿—闪锌矿脉中, 自然银的沉淀意味着甲玛银的沉淀趋于结束。

### 3 结论

1) 甲玛矿床银矿体根据银矿体的赋矿岩石可分

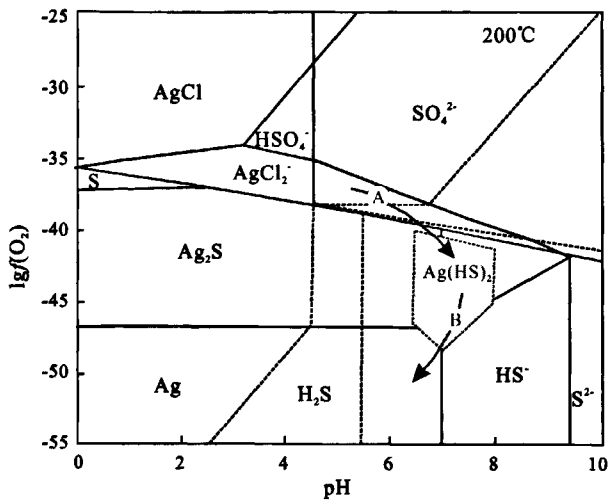


图6 银的氯络合物和硫氢络合物及主要银矿物的  $\lg f(\text{O}_2)$ -pH(据尚林波等, 2003, 2004 修改)  
Fig. 6  $\lg f(\text{O}_2)$ -pH diagram of predominant area of Ag-complexes and major silver minerals at 200°C (modified after SHANG Lin-bo et al., 2004)

为矽卡岩型、大理岩型, 以矽卡岩型为主。两种类型的银矿体的物源可能皆来自矿区 ZK2414 或 ZK3216 附近或稍向北东的岩体。

2) 甲玛铜多金属矿床银的赋存状主要由可见银中的独立银矿物和不可见银中的晶格银组成。(1)可见银主要有碲银矿、银金矿、银铅矿、自然银等呈 4 种银矿物产出, 见以下 3 种产出状态: ①在显微尺度上以不规则脉的形式充填在其他矿物的裂隙中; ②呈他形-半自形包裹于方铅矿等硫化物内部; ③呈集合体状交代方铅矿和黄铜矿、斑铜矿等硫化物。(2)不可见银主要以晶格银的形式赋存斑铜矿、黄铜矿; 其次以次显微包体银的形式赋存于方铅矿中。

3) 甲玛矿区铜、钼、金、铅、锌、银等金属离子在成矿早期高温阶段以氯络合物的形式搬运, 随着成矿热液温度和氧逸度的降低以及 pH 值的升高, 氯络合物因稳定性降低而解体。硫氢络合物为甲玛矿区铜、钼、金、铅、锌、银主要迁移形式, 随着温度的降低, 铜、钼等金属硫氢络合物开始分解, 形成辉钼矿、黄铜矿和斑铜矿等硫化物, 此时部分银以显微和次显微包体银和晶格银的形式分布于这些硫化物中。随着温度的持续降低铅、锌硫化物的大量沉淀引起成矿热液组成和性质的显著变化, 最终导致银从硫氢络合物中彻底解体, 并与铜等离子结合形成大量独立银矿物, 而溶液中过饱和的银则以自然银的形式沉淀, 自然银的沉淀意味着甲玛银的沉淀趋于结束。

致谢: 感谢西藏华泰龙矿业开发有限公司为笔者的

野外和室内工作提供资助。

## 参考文献:

- 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏. 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: 82-113.
- 郭灵俊, 赵志军, 崔来旺, 杨波, 连世恩. 2011. 内蒙古阿巴嘎旗北部铜多金属矿地质矿产特征及找矿方向[J]. 地球学报, 32(1): 57-63.
- 何国锦, 杨晓春, 吴光明, 张国防, 蔡雄翔, 郑剑. 2011. 浙江西北银山银铅锌多金属矿床矿石矿物特征及成矿期次初步研究[J]. 地球学报, 32(3): 304-312.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 林方成, 刘波, 余宏全, 丰成友, 屈文俊. 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.
- 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.
- 尚林波, 樊文苓, 邓海琳. 2003. 热液中银、铅、锌共生分异的实验研究[J]. 矿物学报, 23(1): 31-36.
- 尚林波, 樊文苓, 胡瑞忠, 邓海琳. 2004. 热液中铅-锌-银共生分异的热力学探讨[J]. 矿物学报, 24(1): 81-86.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 潘桂棠, 李光明. 2005. 西藏冈底斯中东段矽卡岩铜-铅-锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. 矿床地质, 24(5): 508-520.
- 申伍军, 王学求. 2010. 内蒙古大型银矿集区地球化学预测[J]. 地球学报, 31(3): 449-455.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 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.
- 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, 黎枫信, 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[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 王方国, 李光明, 林方成. 2005. 西藏冈底斯地区矽卡岩型矿床资源潜力初析[J]. 地质通报, 24(4): 378-385.
- 王焕, 唐菊兴, 应立娟, 郑文宝, 唐晓倩. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛主要矿石矿物特征[J]. 成都理工大学, 38(1): 103-112.
- 王静纯, 陈民扬, 肖孟华. 1994. 中国银矿床的时空分布[J]. 华北地质矿产杂志, 9(1): 111-116.

- 王静纯, 简晓忠. 1996. 银的赋存特征研究[J]. 有色金属矿产与勘查, 5(2): 89-93.
- 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砂卡岩中辉钼矿铼-钨同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 265-268.
- 成新志, 张乾, 董振生, 赵惠兰. 1999. 几个独立银矿床矿物学研究[J]. 矿物学报, 19(4): 465-469.
- 赵一鸣, 李大新, 毕承思, 董永观. 2001. 我国含银夕卡岩矿床的分布和地质特征[J]. 矿床地质, 20(2): 153-162.
- 郑文宝, 陈毓川, 宋鑫, 唐菊兴, 应立娟, 黎枫佶, 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): 775-784.
- 周卫宁. 1994. 中国主要伴(共)生银矿床银的赋存状态研究[J]. 矿产与地质, 8(4): 233-244.
- 周云. 2010. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿成矿流体特征及演化[D]. 成都: 成都理工大学.
- References:**
- CHANG L L Y, WU D Q, KNOWLES C R. 1988. Phase Relations in the System  $Ag_2S-Cu_2S-PbS-Bi_2S_3$ [J]. *Economic Geology*, 83(2): 405-418.
- COSTAGLIOLA P, DI BENEDETTO F, BENVENUTI M, BERNARDINI G P, CIPRIANI C, LATTANZI P F, ROMANELLI M. 2003. Chemical Speciation of Ag in Galena by EPR Spectroscopy[J]. *American Mineralogist*, 88(8-9): 1345-1350.
- DU Guang-shu, LIAO Peng, PAN Feng-chu. 1998. Exhalative origin of skarn and mineralization-Taking Tibet Jiama copper polymetallic deposit as an example[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press: 82-113(in Chinese).
- FOORD E E, SHAW D R. 1989. The Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) Chemistry of Galena and Some Associated Sulfosalts: a Review and Some New Data From Colorado, California and Pennsylvania[J]. *Canadian Mineralogist*, 27(3): 363-382.
- GAMMONS C H, BARNES H L. 1989. The Solubility of  $Ag_2S$  in Near-neutral Aqueous Sulfide Solutions at 25 to 300°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2): 279-290.
- GASPARRINI C, LOWELL G R. 1985. Silver-bearing inclusions in "Argentiferous" Galena From the Silver Mine District in South-eastern Missouri[J]. *Canadian Mineralogist*, 23(1): 99-102.
- GIORDANO T H, BARNES H L. 1979. Ore Solution Chemistry VI. PbS Solubility in Bisulfide Solutions to 300°C[J]. *Economic Geology*, 74(7): 1637-1646.
- GUO Ling-jun, ZHAO Zhi-jun, CUI Lai-wang, YANG Bo, LIAN Shi-en. 2011. Geological and Mineral Resource Characteristics and Oreprospect of Cu-Polymetallic Deposits in the Northern Part of Abag Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 57-63(in Chinese with English abstract).
- HAYASHI K, SUGAKI A, KITAKAZE A. 1990. Solubility of Sphalerite in Aqueous Sulfide Solutions at Temperatures Between 25 and 240°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 715-725.
- HE Guo-jin, YANG Xiao-chun, WU Guang-ming, ZHANG Guo-fang, CAI Xiong-xiang, ZHENG Jian. 2011. A Study of Ore Mineral Characteristics and Metallogenic Stages of the Yinshan Ag-Pb-Zn Polymetallic Ore Deposit, Northwest Zhejiang Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 304-312(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, RUI Zong-yao, WANG Gao-ming, LIN Fang-cheng, LIU Bo, SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, QU Wen-jun. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula Polymetallic Copper Deposits in Gangdese Metallogenic Belt of Tibet and its Significance[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 481-489(in Chinese with English abstract).
- LUETH V W, MEGAW P K M, PINGIORE N E. 2000. Systematic Variation in Galena solid-Solution Compositions at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico[J]. *Economic Geology*, 95(8): 1673-1687.
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, YE Pei-sheng, YANG Zhu-sen, LI Zhen-qing, GAO Yong-feng. 2005. Characteristics and Ore Potentiality of Gangdese Silver-polymetallic Mineralization belt in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 153-162(in Chinese with English abstract).
- RUAYA J R, SEWARD T M. 1986. The stability of chlorozinc(II) Complexes in Hydrothermal Solutions up to 350°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(5): 651-661.
- SEWARD T M. 1976. The Stability of Chloride Complexes of Silver in Hydrothermal Solutions up to 350°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(11): 1329-1341.
- SHANG Lin-bo, FAN Wen-ling, DENG Hai-lin. 2004. An Experimental Study On Paragenesis And Separation Of Silver, Lead And Zinc In Hydrothermal Solutions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 31-36(in Chinese with English abstract).
- SHANG Lin-bo, FAN Wen-ling, HU Rui-zhong, DENG Hai-lin. 2004. A Thermodynamic Study On Paragenesis And Separation Of Silver, Lead And Zinc In Hydrothermal Solutions[J].

- Acta Mineralogica Sinica, 24(1): 81-86(in Chinese with English abstract).
- SHARP T G, BUSECK P R. 1993. The distribution of Ag and Sb in Galena: Inclusions Versus Solid Solution[J]. American Mineralogist, 78(1-2): 85-95.
- SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, PAN Gui-tang, LI Guang-ming. 2005. Characteristics and Metallogenic Potential of Skarn Copper-Lead-Zinc Polymetallic Deposits in Central Eastern Gangdese[J]. Mineral Deposits, 24(5): 508-520(in Chinese with English abstract).
- SHEN Wu-jun, WANG Xue-qiu. 2010. Geochemical Prognosis of Large-size Silver Ore Districts in Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(3): 449-455(in Chinese with English abstract).
- STEFÁNSSON A, SEWARD T M. 2003. Experimental determination of the Stability and Stoichiometry of Sulphide Complexes of Silver (I) in Hydrothermal Solutions to 400°C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(7): 1395-1413.
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper-polymetallic Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, ZHONG Kang-hui, WANG Xiong-wu, GUO Yan-you, LIU Wen-zhou, YING Li-juan, GUO Na, GUO Ke, ZHENG Wen-bao, QIN Zhi-peng, LI Lei, LING Juan, YE Jiang, LI Feng-ji, YAO Xiao-feng, LI Zhi-jun, SUN Yan, WANG You, BAI Jing-guo, TANG Xiao-qian, PEI You-ze, PENG Hui-juan. 2009. Geological Survey Report of the Jiama Copper Polymetallic Deposit Among 0-16-40-80 and 0-15 Exploration Lines, Mozhuogongka County, Tibet Autonomous Region[R]. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science(in Chinese).
- WANG Fang-guo, LI Guang-ming, LIN Fang-cheng. 2005. Ore Potential of Skarn-type Ore Deposits in the Gangdise Metallogenic belt, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 24(4): 378-385(in Chinese with English abstract).
- WANG Huan, TANG Ju-xing, YING Li-juan, ZHENG Weng-bao, TANG Xiao-qian. 2011. Major Ore Mineral Characteristics from Jiama, Mozhuogongka County, Tibet[J]. Chengdu University of Technology, 38(1): 103-112(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-chun, CHEN Ming-yang, XIAO Meng-hua. 1994. The Spacio-temporal Distribution of Silver Deposits in China[J]. Jour. Geo. & Min. Res. North China, 9(1): 111-116(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-chun, JIAN Xiao-zhong. 1996. On Occurrence of Silver[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 5(2): 89-93(in Chinese with English abstract).
- YING Li-juan, TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, CHANG Zhe-sheng, QU Wen-jun, ZHENG Wen-bao. 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite in Skarn from the Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet and its Metallogenic Significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 265-268 (in Chinese with English abstract).
- ZHAN Xin-zhi, ZHANG Qian, DONG Zhen-sheng, ZHAO Hui-lan. 1999. Mineralogical Study of Several Independent Silver Deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 19(4): 465-469(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi-ming, LI Da-xin, BI Cheng-si, DONG Yong-guan. 2001. Distribution and Geological Characteristics of Silver Skarn Deposits in China[J]. Mineral Deposits, 20(2): 153-162(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Wen-bao, CHEN Yu-chuan, SONG Xin, TANG Ju-xing, YING Li-juan, LI Feng-ji, TANG Xiao-qian. 2010. Element Distribution of Jiama Copper-polymetallic Deposit in Tibet and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 29(5): 775-784(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Wen-ning. 1994. Main Partner (of) Born Silver Deposits of Occurrence of State Study, China[J]. Mineral Resources and Geology, 8(4): 233-244(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yun. 2010. Characteristic and Evolution of Ore-forming Fluids from Jiama Polymetallic Copper Deposit, Mozhuogongka county, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).