

甘肃桦树沟(铁)铜矿床成因的地球化学制约

岳书仓* 周涛发

(合肥工业大学资源与环境科学系, 合肥)

提 要: 矿石及含矿岩系的稀土元素、微量元素、稳定同位素、流体包裹体以及同位素年代学等地球化学研究表明, 桦树沟(铁)铜矿床形成于近大陆边缘的海底裂谷环境, 成矿物质主要来自元古宙基性火山岩, 硫、碳主要来自海水。火山-沉积岩系经深循环水-热系统的作用, 成矿物质被浸出和搬运, 并经海底喷溢作用沉淀于海盆洼地中形成含矿层, 后期变质作用使成矿物质活化、转物和富集。矿床成因为喷气(流)沉积-变质改造型(铁)铜矿床。

关键词: 矿床成因 地球化学 喷气(流)沉积-变质改造作用 (铁)铜矿床 甘肃桦树沟

桦树沟(铁)铜矿床地处走廊南山中段, 曾以“桦树沟式铁矿”而闻名, 是我国西北地区重要钢铁基地, 自 80 年代后期于变质海相火山-沉积岩系中原桦树沟铁矿底板发现铜矿化层位之后, 不少学者相继开展了关于矿床成因的研究工作^[1-6]。本文基于矿床地球化学特征研究, 探讨该矿床成矿物质来源及成因。

1 矿床地质特征

桦树沟(铁)铜矿床位于北祁连加里东褶皱带次一级构造单元的大河沟脑—桦树沟复向斜内, 矿区构造主要为北西向的同斜褶皱及伴随的逆断层等, 矿床赋存于镜铁山群下部千枚岩段内。该岩性段以灰黑色、灰绿色千枚岩为主, 夹镜铁矿层、菱铁矿层、重晶石矿层、硅质岩及少量泥灰岩、粉砂岩。铜矿层分布于铁矿主矿层下盘原底板围岩部位。

铁矿石由菱铁矿、镜铁矿、碧玉(石英)、重晶石和铁白云石等组成, 呈条带状, 含少量黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、孔雀石及绢云母、方解石、绿泥石、钠长石、电气石等, 呈层状-层纹状构造、同生角砾构造、同沉积滑塌及包卷构造, 微晶结构。铜矿石可分为四种类型: 含铜铁碧玉型、含铜千枚岩型、含铜石英脉型和含铜硅质岩角砾型, 主要矿物为黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、镜铁矿、菱铁矿和石英(碧玉)、绢云母、铁白云石、重晶石、方解石等, 含少量闪锌矿、电气石、绿泥石、钠长石等, 呈千枚状(变质)构造、浸染状、细脉浸染状构造, 交代结构发育。

含矿岩系经受了低绿片岩相变质作用, 岩、矿石在很大程度上保留了原岩的成分和状态, 动力变质作用特征明显, 导致有用组分活化并充填于片理及破碎带中。围岩蚀变主要为硅化、绢云母化和绿泥石化。

上述地质特征表明, 桦树沟(铁)铜矿床的成矿过程可分为喷气(流)沉积成矿期和变质改造成矿期。

2 矿床地球化学特征及讨论

2.1 稀土元素

含矿岩系岩、矿石稀土元素组成特征显示, 桦树沟(铁)铜矿床下部含矿岩系——镜铁山群下段千枚岩的稀土元素组成和稀土配分模型与正常页岩十分相似, 属正常的海相沉积。上部含矿岩系——铁碧玉岩及部分千枚岩型铜矿石的稀土元素组成及配分模型与下部含矿岩系明显不同, 部分轻稀土元素强烈富集, REE 为非正常的海相沉积。铁碧玉岩与千枚岩型铜矿石稀土元素配分模型的相似性以及稀土总量和特征参

* 岳书仓, 男, 65 岁, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、岩石学及成岩-成矿地球化学研究。邮政编码: 230009

数的规律性变化,说明桦树沟(铁)铜矿床 Si-Fe 建造的形成与铜的成矿作用具密切的成因联系, Cu, Fe, Si 来源相同。铁碧玉岩的 δCe 值在 0.82~1.00 之间, 平均为 0.91, 介于洋盆和大陆边缘的 $\delta\text{Ce}^{[7]}$ 之间, 说明铁碧玉岩形成的构造背景可能是近大陆边缘的海底裂谷, 这与区域构造-岩浆作用的研究结果吻合^[5]。铁碧玉岩、部分含铜千枚岩与朱龙关群基性火山岩的稀土元素组成相似, 表明两者的亲缘关系。因此桦树沟(铁)铜矿床的主要成矿物质 Si、Fe、Cu 及 REE 可能主要来自基性火山岩, 为深循环的成矿热液(海水为主)通过水-岩作用淋滤出火山岩中的成矿物质, 由深断裂或喷口通过喷气(流)作用而汇入沉积盆地内经沉积作用形成的。

2.2 常量和微量元素

矿石的常量元素组成^[4,6]显示, 铁铜矿石中, Si、Fe、Mn、Ba 等组分含量高, Al、Ti、P、K、Ca 含量低, 因此陆源组分显著亏损, 应是热液喷流沉积的产物。铁碧玉岩的化学成分^[2]除具有一般硅质岩高硅($\text{SiO}_2 = 55.55\% \sim 66.46\%$)、低铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.87\% \sim 1.82\%$)、低钾钠($\text{K}_2\text{O} = 0.34\% \sim 0.39\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 0.02\% \sim 0.09\%$)外, 也含较高的 Fe_2O_3 (20.81%~30.32%), 有关特征参数如 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 、 SiO_2/MgO 等类似于广西大厂、日本田野玉川等海底喷气(流)-沉积形成的硅质岩, 而与生物-化学沉积型硅质岩明显不同, 亦说明桦树沟矿床中的 Si 质主要来自深循环的水-热系统。

桦树沟(铁)铜矿床含矿岩系及矿石的有机碳和还原硫的测定结果表明, 含矿岩系的有机碳含量在 0.022%~0.207% 之间, 还原硫含量在 0.035%~19.689% 之间, 与层状铜矿床(周宗孟, 1980; 涂光炽等, 1984)一致。含矿岩系由下往上, 有机碳和还原硫含量逐渐降低, 反映桦树沟(铁)铜矿床喷气-沉积阶段已形成含有机质较高的含矿层, 在后期变质改造作用过程中, 由于有机质干酪根的热降解及其它化学过程的发生, 产生 CO_2 、 NO_3^- 、 H_2S 等, 既为变质成矿作用提供 C、S 源, 也导致下部含矿岩系部分成矿物质的活化转移, 并于上部含矿岩系的破碎、裂隙带中重新沉淀成矿, 上述作用过程可从矿物流体包裹体的成分得到佐证。因此, 形成原始含矿层的 C、S 主要来自海水, 变质成矿过程 C、S 来自下部含矿岩系。

矿石及含矿岩系的微量元素组成^[1,6]中, 千枚岩型铜矿石 Cu 含量高于铁碧玉岩型铜矿石, Ba、Au、Ge 等局部富集, Cu、Au、Ag 具相关性, 结合高 Si 特点, 显示喷气沉积的主导作用, 在 $\text{Fe-Mn}-(\text{Cu} + \text{Co} + \text{Ni}) \times 10$ 三角图解上, 矿石的投影点多集中落入热液沉积物区。矿石及黄铁矿的 Co/Ni 比值大于 1 或小于 1, 表明成矿物质既有火山源, 亦有部分壳源。

据区测资料分析, 桦树沟矿床所在地区地层富集 Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi 等元素, 浓集系数为 1.5~5, Cu 等元素分布不均匀; 桦树沟矿区及外围镜铁山群亦分布有 Cu、Mn、Sb、As、Bi、Hg、Zn、Pb 等异常, 且沿地层分布^[8], 体现了成矿物质的层控性质。微量元素中, Cu、Sb、As、Bi、Mn、Sr 元素组合常与铜矿体密切相关, Fe、Mn、Sr 与铁矿体关系密切, Co、Ni、Cr、V、Ti 元素组合与 Fe、Cu 矿化皆密切相关, 显示了 Fe、Cu 成矿与中基性岩浆岩的某种成因联系。桦树沟(铁)铜矿床含矿岩系微量元素的平均含量相对于地壳元素丰度值(Taylor, 1964)标准化后的配分模型与朱龙关群基性火山岩的微量元素配分模型十分一致, 这一特征证明成矿金属物质可能主要来源于基性火山岩系。基于亲铜元素在火山岩的水-岩作用过程中和在岩浆熔-流分离过程中的地球化学行为的差异^[8,9,12]进一步确定, 成矿金属元素为火山岩通过水-岩作用淋滤释放的。研究还表明, 本区基性火山岩发生水-岩作用导致岩石中铜元素发生亏损, 铜含量降低近一倍, 对铜的成矿具有重要意义, 但火山岩中铅、锌的含量低, 水-岩作用过程中其含量无显著变化, 故本区 Pb、Zn 成矿潜力有限。

2.3 稳定同位素

桦树沟(铁)铜矿床单矿物的硫同位素组成均为正值, 黄铁矿、黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 +8.1‰~+30.7‰, 且随含矿岩系由下而上, 硫同位素组成逐步增大, 其中位于下部含矿岩系似纹层状-浸染条带状矿石中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 +8.1‰~18.3‰, 平均 +13.25‰; 而上部含矿岩系铁碧玉岩的网脉状-角砾状矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 +23.1‰~30.7‰, 平均为 +26.57‰, 与其赋矿围岩铁碧玉岩及顶板铁矿层内石膏、

重晶石等硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (+24.50‰~30.5‰, 平均+27.01‰) 基本一致。

Franklin 等 (1981) 在统计了大量前寒武纪块状硫化物矿床的同位素组成时发现, 这类矿床的绝大多数的硫同位素数据具有惊人的相似, 其组成接近于 0‰ (接近地幔组成), 而变化范围不超过 2‰。桦树沟(铁)铜矿床的硫同位素组成则与此结果明显不符, 其硫同位素组成具较宽的变化范围。桦树沟(铁)铜矿床含铜千枚岩型矿石中金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (27.01‰) 小, 两者平均差为 13.26‰。这种硫同位素组成特征归因于同生沉积期海水硫酸盐的细菌还原作用造成的同位素动力学效应。镜铁山群下段含矿建造形成时的古地理环境为半封闭的半深水局限盆地, 有机地球化学研究显示, 该矿床含矿岩系中有机碳与还原硫之间呈现良好的正相关关系, 指示发生了有机质或细菌对海水硫酸盐的还原作用, 硫同位素分馏效应符合瑞利分馏定律, 形成的硫化物矿物间不存在硫同位素平衡, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值有一定的变化范围^[1]。网脉、角砾状矿石中黄铜矿、黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显高于其下部似纹层状、条带状矿石, 而与铁矿层内重晶石的平均硫同位素组成基本一致, 说明网脉、角砾状矿石中的硫除喷气-沉积来源外, 一部分可能来自围岩, 是后期变质作用使之被活化带入成矿热液体系中形成的。

桦树沟(铁)铜矿床中碧玉的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 10.8‰~19.5‰之间^[4], 接近海底喷流沉积的阿拉斯加 De Long 山硅质岩^[13], 与现代水成沉积或生物沉积硅质岩明显不同。矿床中镜铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化于 -2.3‰~+7.6‰之间^[4], 亦反映海底喷流沉积成因。网脉状矿石中脉石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 +12.6‰~+16.9‰之间, $\delta^{18}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -57‰, 落入变质水范围, 说明桦树沟(铁)铜矿床改造成矿期的成矿热液主要为变质水。此外, 碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 在 14.0‰~19.0‰之间, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 在 -5.0‰~-9.0‰^[4,6] 之间, 显示岩浆来源碳可能经受了一定程度的细菌还原作用。

桦树沟(铁)铜矿床矿石铅同位素组成差异明显, 表现为不同类型矿石如浸染条带状矿石与网脉-角砾状矿石的铅同位素组成不同, 而且同一矿石中不同矿物铅同位素组成亦不一致。在铅的构造模式图^[10]上, 成分点分布于两个不同的范围内: 一部分矿石铅位于 U/Pb、Th/Pb 比值高的上地壳区, 属上地壳铅; 另一部分落于地幔和造山带之间, 后者与区域朱龙关群火山岩及其中铜矿床的铅同位素分布范围相当, 其铜来源相似, 以深源铅为主。铅同位素组成特征表明, 桦树沟(铁)铜矿床的成矿金属组分(铅)一部分来自元古宙沉积岩系, 另一部分来源于元古宙的火山岩。

2.4 流体包裹体

矿物包裹体均一法测温结果显示, 喷气-沉积成矿期的形成温度在 120~180℃ 之间, 平均为 175℃, 变质改造成矿期的形成温度在 150~200℃ 之间, 平均为 200℃。

桦树沟(铁)铜矿床变质改造成矿期网脉-角砾状矿石中石英包裹体的液相成分中, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量高, 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 含量低, Na^+/K^+ 比值 (1.90) 和 Cl^-/F^- 比值 (55.12) 相对较低, 矿液盐度 (6%~15% NaCl) 较高, 组分类型为 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Cl}^- (-\text{SO}_4^{2-})$ 型, 类似于沉积地层的成岩水和变质水, 结合矿床地质特征, 成矿流体可能为沉积岩系的再造水(变质水)。矿液中 NO_3^- 离子含量较高, 表明赋矿地层中存在有机质或有机质参与了成矿作用。另外, 矿液中 SO_4^{2-} 含量较高, 反映了变质改造成矿作用过程中, 变质热液对桦树沟矿床含矿岩系中硫酸盐的淋滤作用, 气相组分中, H_2 、 CO_2 和 CH_4 含量较高, 进一步说明上述过程的存在。

3 矿床形成时代

通过对北祁连地区地层的观察对比以及地层同位素测年^[14,15], 初步确定了古元古代北大河群、中元古代朱龙关群, 新元古代镜铁山群、大柳沟群及震旦系白杨沟群的地层层序, 因此桦树沟(铁)铜矿床喷气(流)-沉积成矿期发生于晚元古代。另据研究^[5], 矿床的变质改造成矿期可能发生于托来运动和加里东运动。

4 矿床成因

基于上述矿床地质地球化学特征分析研究可见,桦树沟(铁)铜矿床的形成经历了喷气(流)沉积成矿期和变质改造成矿期,为喷气(流)沉积-变质改造型矿床。喷气(流)沉积成矿期形成于近大陆边缘的海底裂谷环境,其特征类似于近年来引起重视的古陆边缘弧-槽-盆成矿系统^[11],主要形成含矿层,成矿物质Si、Fe、Cu等来自基底火山岩和部分沉积岩,S主要来自海水,深循环的海水构成了水-热系统中流体的主要成分,元古宙火山-沉积岩系经水-岩作用,其中的成矿物质被浸出和搬运,并经海底喷溢作用沉淀于海盆洼地中形成含矿层;铜矿床的最终形成、富集和定位经历了托来运动和加里东运动两次变质改造作用,镜铁山群产生低绿片岩相的动力变质作用,沉积含矿层中的成矿物质在变质作用过程中发生活化转移,并在有利部位(片理化带和破裂裂隙带)再沉淀和富集。变质改造成矿期,成矿物质(包括S、C等)主要来自含矿岩系本身,成矿热液主要为变质水。

参 考 文 献

- 1 周涛发,岳书仓,刘因,徐晓春.甘肃桦树沟(铁)铜矿床稀土元素及硫同位素地球化学意义.安徽地质,1996,6(3):57~62.
- 2 黄永平,吴健民.甘肃桦树沟(铁)铜矿床成矿条件与成因探讨.矿产与地质,1992,28(6):81~88.
- 3 邬介人等.西北海相火山岩地区块状硫化物矿床.武汉:中国地质大学出版社,1994.
- 4 薛纪春,姬金生,张连昌等.北祁连镜铁山海底喷流沉积铁铜矿床.矿床地质,1997,16(1):21~30.
- 5 周涛发,岳书仓.甘肃桦树沟(铁)铜矿床的成因机制.安徽地质,1997,7(2):36~42.
- 6 刘华山,李秋林,于浦生等.“镜铁山式”铁铜矿床地质特征及其成因探讨.矿床地质,1998,17(1):25~35.
- 7 徐晓春,岳书仓,刘因,周涛发.甘肃走廊南山朱龙关群的时代及其火山岩的岩石化学特征.安徽地质,1996,6(4):1~6.
- 8 王军升等.甘肃桦树沟铜矿床地球化学异常特征及找矿标志.有色金属矿产与勘查,1995,4(1):1~8.
- 9 毛景文,张招崇,杨建民等.北祁连山西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及其地质意义.科学通报,1997,42(3):1414~1417.
- 10 孙海田.古大陆边缘弧-槽-盆成矿系统之探讨.矿床地质,1996,15(2):192.
- 11 周涛发,岳书仓.安徽月山地区成岩-成矿作用关系研究.火山地质与矿产,1995,16(2):55~62.
- 12 Harrover R D, Norman D I, Stable oxygen isotope and crystallize size analysis of De Long Mountain, Alaska, chert: an exploration tool for submarine exhalative deposits. Econ Geol, 1982, 77(2): 1761~1766.
- 13 Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics - the model. Tectonophysics, 1981, 75: 135~162.
- 14 Burnham C W. Water and magmas, a mixing model. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39: 1077~1084.
- 15 Urabe T. Aluminous granite as a source magma of hydrothermal ore deposits: An Experimental study. Econ Geol, 1985, 80: 148~157.