

火山成因块状硫化物矿床研究进展

丁世先¹, 崔俊强²

(1. 河南省有色金属地质勘查总院, 河南 郑州 450052; 2. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

摘 要 :火山成因块状硫化物(VMS)矿床可形成于太古宙至现代各个地质时期。现代海底热液成矿作用是赋存于海相火山岩系中的古代 VMS 矿床成矿作用的再现。VMS 矿床可形成于多种构造环境, 但均与拉张背景有关。按照构造环境和容矿岩系将 VMS 矿床分为黑矿型、塞浦路斯型、别子型和沙利文型。VMS 矿床的热液蚀变由下盘蚀变带和上盘蚀变带两个结构单元组成。下盘蚀变一般有两种类型: (1) 不整合的蚀变岩筒, 直接产在块状硫化物带的下方; (2) 半整合或层控的上盘蚀变带, 并可以在区域范围内展布。与下盘蚀变类似, 上盘蚀变也具有蚀变岩筒和半整合的蚀变带两种类型。成矿金属主要有两种可能的来源: (1) 在岩浆侵入体和浅位岩浆房之上被加热的循环海水对含矿火山岩系及下伏基底物质的淋滤; (2) 深部岩浆房挥发分通过释气作用直接释放。下渗的海水是成矿流体的主要来源。同时流体包裹体和稳定同位素资料显示岩浆流体对成矿流体系统亦有较大贡献。VMS 矿床具有明显的金属分带现象, 其金属序列组合从下至上依次为 Fe→Fe-Cu→Cu-Pb-Zn→Pb-Zn-Ba, 这种金属分带的演化反应了流体的演化和块状硫化物丘的生长机制。根据成矿流体温度变化而不断演化的 4 阶段成矿模式可以很好的解释经典丘堆式矿床的形成过程。

关键词 :火山成因块状硫化物; 构造环境; 物质来源; 流体来源; 成矿机制

RESEARCH PROGRESS ON VOLCANOGENIC MASSIVE SULFIDE DEPOSIT

DING Shi-xian¹, CUI Jun-qiang²

(1. Henan Institute of Nonferrous Metal Geological Exploration, Zhengzhou 450052, China;

2. No.1 Institute of Geology and Minerals Exploration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract :The VMS (Volcanogenic Massive Sulfide) deposits can be classified into four types, i.e. Kuroko-type, Cyprus-type, Besshi-type and Sullivan-type, in respect to their tectonic settings and host lithology. There are commonly two major styles of footwall alteration associated with VMS deposits: footwall alteration pipes which occur immediately below the massive sulfides; and semiconformable or strata-bound footwall alteration which can be regionally extensive. As with footwall alteration, hanging-wall zone alterations vary from pipe shapes to semiconformable zones. There are two alternative sources which have been suggested for the metals in VMS deposits: leaching from the ore-bearing volcanic rocks and related basement rocks by heated seawater above a magmatic intrusion or a volcanic magma chamber; and direct input of a magmatic volatile phase from the magma chamber. The fluids involved are derived dominantly from seawater penetrating downward through the basement rocks. Fluid inclusion and stable isotope studies suggest that abundant magmatic fluid component may have been incorporated into the circulating fluid system. VMS deposits are characterized by well developed metal zonation patterns defined by a typical sequence from Fe to Fe-Cu to Cu-Pb-Zn to Pb-Zn-Ba in an upward and lateral sense and this zonation reflects the evolution of fluids and the growth mechanism of the massive sulfide mound with time. The four-stage model with the change of the fluid temperature through time can interpret the classic massive sulfide mound-type deposit well.

Key words :VMS; tectonic setting; material source; fluid source; ore-forming mechanism

1 火山成因块状硫化物(VMS)矿床概述

1.1 VMS 矿床定义

火山成因块状硫化物矿床 (Volcanogenic Massive

Sulfide Deposits, 简称 VMS 矿床)是指产于海相火山岩系中, 与海相火山-侵入活动有关的, 在海底环境下由火山喷气(热液)作用和喷气-沉积作用形成的块状或

收稿日期: 2012-07-09; 修回日期: 2012-08-23. 编辑: 李兰英.

作者简介: 丁世先(1984—), 男, 工程师, 主要从事矿产资源勘查与勘探. 通信地址: 河南省郑州市二七区中原东路 107 号. E-mail://dsxmenghuan84@163.com

次块状的硫化物矿床^[1],也称作与火山岩有关的或赋存于火山-沉积岩系中的块状硫化物(VHMS)矿床(“块状”并非结构意义)。该类矿床主要由与海底热液对流有关的富金属流体所形成,其直接围岩为火山岩或沉积岩。VMS矿床规模大,品位高,分布广泛,往往成群成带产出,是Zn、Cu、Pb、Ag、Au等金属的重要来源,此外还富含Co、Sn、Se、Mn、Cd、In、Bi、Te、Ga和Ge,部分矿床还含有一定量的As、Sb和Hg。

VMS矿床形成于富含金属的热液流体的排泄通道和海底喷口处及其附近的海底洼地。大多数VMS矿床具有典型的“双层结构”特征,即由下部脉状-网脉状矿带(蚀变岩筒)和上部层控的透镜状矿带组成。透镜状矿体主要由块状硫化物、石英、次生层状硅酸盐、铁氧化物和蚀变硅酸盐组成。下部的脉状、网脉状矿体与上部层状矿体呈不整合至半整合接触,其硫化物主要呈网脉状和浸染状。

1.2 构造环境

从太古宙至现代各个地质时期的VMS矿床可以出现在不同的构造环境中,主要为板块边缘环境(离散的和汇聚的)。Sawkins^[2]按板块构造的观点,将VMS矿床成矿环境分成3类:1)汇聚板块边界环境-亲弧裂谷型(如黑矿矿床、绿岩带矿床和伊比利亚矿带);2)离散板块边界环境,包括洋壳环境(现代洋中脊的矿床和塞浦路斯型矿床)和晚期的大陆裂谷(红海金属沉积物);3)碰撞环境(蛇绿岩容矿的)。

Herzig^[3]将现代VMS矿床的构造环境分为4类:1)洋中脊(如东太平洋隆21°N);2)洋内弧后(如Lau海盆、北Fiji海盆、Manus海盆和Mariana弧后);3)陆内弧后(如Okinawa海槽);4)陆内裂谷(如红海裂谷Atlantis号海渊)。其形成环境为离散的板块边缘或汇聚消减板块边缘的局部引张环境,这些环境均处于一种张性应力状态,断裂发育,渗透性强,且海底底部出现的地幔隆起(浅位岩浆房)可以持续稳定地驱动下渗的海水对流循环,萃取基底岩系中的成矿元素,最终在喷出海底的过程中成矿。其中陆内裂谷(红海裂谷)可看作是早阶段的洋中脊^[4]或晚阶段的大陆裂谷^[2],但是Atlantis号海渊缺少黑烟囱且其矿化围岩为碳酸盐岩和碎屑岩的特征^[5],使得它更接近于SEDEX型矿床^[6]。

1.3 矿床类型

VMS矿床是包含很多矿化类型的一个大类,关于VMS矿床的分类,矿床学家从不同的角度,如矿石成分^[7-10]、成矿金属元素比值(Cu/Pb/Zn)^[11]、容矿岩系和沉积环境^[12-13]、大地构造环境^[14-15]及蚀变特征^[16]等,对VMS矿床进行了分类,尚无一个统一的分类方案。Hutchinson^[7]以矿石组成为基础并考虑构造环境因素将VMS矿床分成Zn-Cu型、Pb-Zn-Cu-Ag型和含Cu黄铁矿型。宋叔和(1982)按岩性和矿床组合将VMS矿床分为蛇绿岩套超基性岩中的黄铁矿型Cu(少量Zn、Co)矿床(德尔尼矿床)、蛇绿岩套基性岩中的黄铁矿型Cu-Zn矿床(塞浦路斯矿床)、酸性偏碱性岩系中的Cu-Zn矿床(伊比利亚黄铁矿带)和偏碱性火山岩中似黄铁矿型Cu-Fe矿床(大红山矿床)。Lydon^[13]按源区基底岩石和成矿金属组合划分为铁镁质基底上的Cu-Zn型和长英质基底上的Zn-Pb-Cu型。在宋叔和分类的基础上,秦克章等(1994)将VMS矿床分为德尔尼型、塞浦路斯型、乌拉尔型(白银厂型)、黑矿型和大红山型。其中结合成矿构造环境和容矿岩系因素进行的分类得到了最广泛的应用。Sawkins^[15]根据成矿环境和容矿岩系将VMS矿床分为以下3种类型。

1)黑矿型:形成于岛弧扩张环境或成熟度低、陆壳基底的年轻弧后环境,赋存于弧间裂谷阶段形成的双峰式火山岩组合中的酸性火山碎屑岩中,主要为Zn-Cu型和Zn-Pb-Cu型矿床。

2)别子型:形成于成熟度高、洋壳基底的弧后扩张盆地环境,一般靠近构造交界处,如洋底与岛弧间,洋底与克拉通间或洋底与大陆壳间^[17],赋存于拉斑玄武质火山-碎屑沉积岩系中,其典型特征是以Cu、Zn成矿为主。

3)塞浦路斯型:产于洋中脊环境,矿体赋存于组成蛇绿岩套的大洋拉斑玄武岩中,其基本特征是以Cu为主,含少量Zn,基本不含Pb,为含Cu黄铁矿型矿床。

世界范围内的867个VMS矿床的统计分析^[18]表明,有421个产于长英质岩系中,272个产于双峰式镁铁质岩系中,174个产于镁铁质岩系中。世界上主要VMS矿床的分布如图1。随着研究的不断深入,结合容矿岩系岩性、成矿构造环境和成矿元素特征,可将VMS矿床进一步划分为8种类型(表1)。

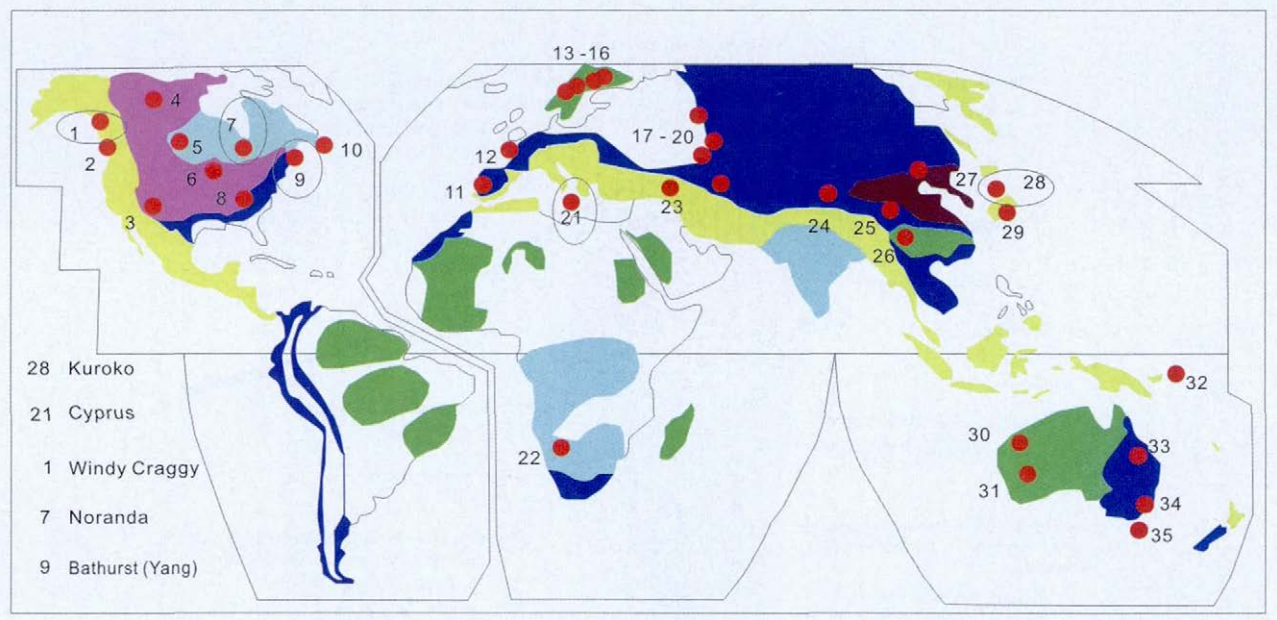


图 1 世界上主要 VMS 矿床的分布图
(据文献[9]修改)

Fig. 1 Distribution of the significant VMS deposits in the world
(modified from Reference [9])

1.4 热液蚀变

与 VMS 矿床有关的热液蚀变对矿床成因的研究和矿床勘查模型的建立有着重要的作用. 通过对古代与现代 VMS 矿床的热液蚀变研究^[8-19]发现,VMS 矿床的热液蚀变由下盘蚀变带和上盘蚀变带 2 个结构单元组成. 典型的 VMS 矿床的垂直剖面如图 2.

下盘蚀变一般有两种类型:1) 不整合的蚀变岩筒,直接产在块状硫化物带的下方;2)半整合或层控的上盘蚀变带,并可以在区域范围内展布. 典型的蚀变岩筒实际上相当少见,普遍存在的是半整合型或层控型蚀变^[10]. 通过对澳大利亚的 Hellyer 等矿区的研究发现^[20]典型的蚀变岩筒实际上代表了热液流体的上升通道,并在蚀变岩筒边缘记录了与海水的反应过程.

其最显著的蚀变分带从内到外依次是:强硅化-黄铁矿化±绢云母化±绿泥石化的硅质核→绿泥石化-黄铁矿化±碳酸盐化带→绢云母化-绿泥石化-黄铁矿化带→绢云母化-石英-黄铁矿化带. 半整合或层控型的下盘蚀变范围可达矿层之下的 30~100 m,沿走向可延伸 2~6 km,其最常见的矿物组合是石英-绢云母±绿泥石-黄铁矿^[21-23].

上盘的热液蚀变对找矿勘探具有重要的意义. 同下盘蚀变一样,上盘蚀变也有两种类型:筒状蚀变或半整合蚀变(Jack, 1989),但是蚀变程度较弱,而且区域变质作用(低级绿片岩相)的叠加更增加了研究的困难. 在澳大利亚的 Hellyer 矿区中的枕状玄武岩中发现有羽状、轻微绿泥母-碳酸盐化的上盘蚀变带,直接产

表 1 火山成因块状硫化物矿床类型划分
Table 1 Classification of the VMS deposits

Cox and Singer (1986)	Prokin and Buslaev (1999)	Franklin et al. (2005)	Mosier et al. (2009)		
黑矿型	Baimak-type	成熟陆缘弧中的长英质-硅质碎屑岩	成熟陆缘弧中的长英质-硅质碎屑岩	长英质-中性岩	长英质岩
		陆缘弧中的双峰式长英质岩	陆缘弧中的双峰式长英质岩 大洋弧中双峰式长英质岩	双峰式长英质岩	
	乌拉尔型	洋内弧中的双峰式镁铁质岩	大洋弧中双峰式镁铁质岩 陆缘弧中双峰式镁铁质岩	双峰式镁铁质岩	双峰式镁铁质岩
别子型	别子型	成熟洋内弧后的镁铁质-泥质岩	成熟的洋内弧后盆地中镁铁质-泥质岩 镁铁质-泥质岩		
塞浦路斯型	塞浦路斯型	原始弧中的镁铁质岩	原始洋弧镁铁质岩 洋中脊中镁铁质岩	镁铁质岩	镁铁质岩

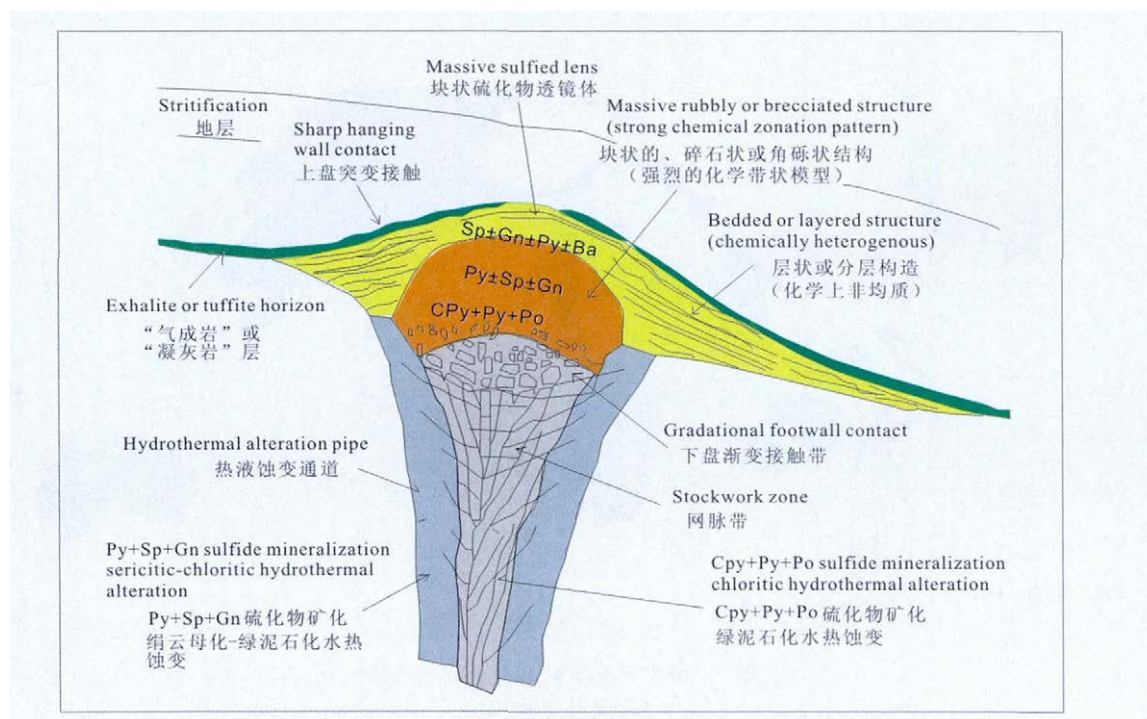


图 2 典型的 VMS 矿床的垂直剖面

(据文献[1])

Fig. 2 Profile of the typical VMS deposit

(from Reference [1])

于下盘蚀变岩筒和矿体的上方,并向上延伸 200m,这被解释为玄武岩喷发并覆盖矿体后的成矿后热液活动的结果.在澳大利亚的 Mount Chalmers^[21]、Scuddles^[24]、Woolkawn^[25]、Thalanga^[26]和 Teutonic Bore^[27]等矿区均存在以石英-绢云母-绿泥石-黄铁矿±碳酸盐为特征的半整合的上盘蚀变.

与热液蚀变有关的地球化学特征受到了研究人员的广泛关注,下盘蚀变带普遍具有明显的 Na 亏损,越靠近蚀变带的核部,蚀变指数 $[(MgO+K_2O)/(Na_2O+Ca+Mg+K_2O) \times 100]$ (Ishikawa et al., 1976)及 S 和 Ba 含量越高, Sr 含量越低^[10].与未蚀变的火山岩围岩相比,蚀变带具有明显的负 Eu 异常和低的 Zr/Y 比值.

1.5 成矿物质来源

20 世纪 60 年代,根据世界许多 VMS 矿床的铅同位素资料,显示玄武岩可以反复地侵入地壳并从地幔带来硫和金属元素,即认为地幔是硫和成矿金属的主要来源^[28].也有一些矿床学家^[29]因幔源观点缺少直接的证据而持怀疑态度.目前认为成矿金属主要有两种可能的来源:1)在岩浆侵入体和浅位岩浆房之上被加热的循环海水对含矿火山岩系及下伏基底物质的淋滤^[30-31, 32-34];2)深部岩浆房挥发分通过释气作用直接释放^[15, 35-38].一般认为,在有沉积物覆盖的洋中脊,热液

沉积物的形成除与深部岩浆活动有关外,沉积物也为海底热液成矿提供了部分甚至是主要的物质来源.而在无沉积物覆盖的洋中脊,洋脊玄武岩是成矿金属的主要来源.在弧后盆地环境,热液沉积物物质来源更为复杂.很明显,基底类型(洋壳/陆壳)及岩石组合(基性/中酸性)制约着金属矿化类型.产于洋壳基底、镁铁质岩中的 VMS 矿床,金属 Cu 和 Zn 具有很高的含量,含少量甚至微量的 Pb 和 Ba,矿床类型为 Cu 型或 Cu-Zn 型.而产于陆壳基底、中酸性火山-沉积岩系或双峰式火山沉积岩系中酸性火山岩中的 VMS 矿床,金属 Pb 具有较高的含量,矿床类型为 Zn-Pb-Cu 型或 Zn-Cu 型, Cu 含量明显减少, Pb 和 Ba 含量显著增加.因此很多矿床学家认为,易溶元素(如 Pb、Zn、Ag 等)主要来自火山-沉积岩系的淋滤,而难溶元素(如 Cu、Sn、Bi、Mo 等)主要源自岩浆.在对东 Manus 弧后盆地现代海底 VMS 矿床容矿火山岩的研究中发现存在普遍富含 CO₂ 的气泡的熔融包裹体^[39],气泡中高度富集氯化物和 Cu、Zn、Fe、Ni 的硫化物.据此,他们认为这是岩浆流体存在的直接证据,并且这种富含金属的岩浆流体能为形成 VMS 矿床的热液系统提供大量的 Cu 和 Zn.

VMS 矿床硫的来源一直存在争议.从寒武纪 VMS

矿床所得到的大量的硫同位素数据^[20 22 40-43]表明海水硫酸盐的还原和岩浆硫是 VMS 矿床的两种主要来源, 其中岩浆硫可直接来源于岩浆释气作用或从火山岩中淋滤出来. 在对澳大利亚的众多 VMS 矿床进行的研究中发现, 绝大多数矿床的块状硫化物矿石和主成矿阶段的网脉状矿石的硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围很小, 在 5‰ 以内. 而在富重晶石层中的矿石和晚阶段形成的网脉状矿石, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 主要呈正值, 且比块状硫化物矿石和主成矿阶段的网脉状矿石高 5‰~15‰. 这表明随着成矿作用的进行, 越来越多的海水在海底和热液流体相混合, 造成还原的海水硫酸盐不断增多^[20 22 43]. 但侯增谦等认为在 Rosebery 矿床, 其早期成矿流体的硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 为 8.5‰ 左右. 在晚期, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 逐渐增加至 15‰^[22], 这种趋势说明硫的来源早期以火山岩系的淋滤或岩浆硫的直接释放为主, 晚期以海水硫酸盐的还原和岩浆硫的混合为主, 且还原的海水硫酸盐比重逐渐增加. 在对东秦岭二郎坪群中火山成因块状硫化物矿床的研究中发现^[44], 矿床硫同位素平均值 $\delta^{34}\text{S}$ 为 6.34‰, 推断其硫可能来源于地幔岩浆硫和海水硫的混合. 从矿体底部(浸染状矿石)到矿体外部(纹层状矿石或矿化重晶石), $\delta^{34}\text{S}$ 值变大, 反映成矿阶段以岩浆硫为主, 到成矿晚期, 海水硫逐渐加入. 侯增谦等^[17]认为, 从深部不可能带来大量的硫, 即岩浆硫的贡献很小, 因为热卤水是还原的, 其中的硫酸根和双硫根不可能很多, 而还原硫多的话, 便与金属结合而沉淀, 无法搬运, 硫主要由海水中的硫酸盐所提供, 并在海底与深部循环上升的还原性卤水发生混合而被还原, VMS 矿床中的绝大部分硫均来源于海水.

1.6 成矿流体的性质和来源

对现代和古代 VMS 矿床的深入研究^[10 45-47]发现, 其成矿流体是一种温度较高(100~400℃)、酸性(3.2~5.3)、富含金属元素(Fe、Cu、Zn、K、Mn、Ba、Na、Pb 等)的还原性流体, 其硫逸度 $\delta\text{H}_2\text{S}$ 约为 0.001, $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_4^{2-}$ 约为 100, Cl 浓度大于 500 mmol, 明显高于正常海水.

成矿流体的来源直接涉及到古代与现代 VMS 矿床的成因, 但至今尚缺乏统一的认识. 强调海水成因的热液淋滤模式认为, 成矿流体及成矿物质源自海水下渗被岩浆房加热并与围岩的相互反应^[8 46]. 这从冲绳海槽 JADE 区热水流体中明显富集碱金属 K、Na、Li 和碱土金属 Ba 得到证实. 大量研究证明, 这些大离子活动性元素通常富集在长英质岩浆或岩石中, 在水-岩反应过程中极其活跃, 容易被流体活化而迁移. 在 JADE 热水区, 直接容矿围岩为双峰式火山岩系中富含 K、

Na、Li、Ba 的长英质岩系^[17], 这反映了下渗海水的对流循环与长英质火山岩系发生了强烈的水-岩反应并成为成矿流体的来源. 通过对海底新鲜火山岩中的熔体包裹体和流体包裹体的研究发现^[39], 岩浆分异晚期产生富含金属的岩浆流体, 这种流体以 CO_2 为主, 含少量 H_2O , 以高盐度、富 ^{18}O 和富气(O_2 , N_2)为特征. 这种岩浆流体很可能成为成矿流体系统的重要来源并形成 VMS 矿床^[40-41]. 在对呷村 VMS 银多金属矿床的研究中发现, 流体包裹体不仅见于呷村矿床的脉状-网脉状矿带, 而且在蚀变最弱的流纹岩的石英斑晶中也有发育, 这种流体包裹体均一温度大于 350℃, 盐度高达 41%^[42-43]. 呷村矿床出现的大量富 CO_2 流体包裹体及包裹体富含 CO_2 和 N_2 也暗示富 ^{18}O 和高盐度的流体来自岩浆(侯增谦等, 2003). 研究人员对冲绳海槽 JADE 热水区做了卓有成效的工作, 发现有异常高热流的出现. 在热水区海底之下 1~1.5 km 处发育浅位长英质岩浆房^[44], 高精度地震法也证实岩浆房一般在海底之下 1~3 km 处存在^[45-46]. 喷流热水极度富集 CO_2 、烃类和 H_2 等气体甚至形成独立气流与热水流体共存; 热水流体系统存在异常高温(330~392℃)和高盐度(6.7%~7.5%)的流体端元, 热水蚀变岩具有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成 R/Ra 比值, 并与岩浆热液的 $\delta^{18}\text{O}$ 相当, 这些特征从不同的角度揭示来自岩浆的流体对海底热液成矿流体系统产生较大贡献(侯增谦等, 2003).

1.7 成矿模式和成矿机制

矿床模式是一组相似(或同一类型)的每一个矿床地质特征的系统整理, 并归纳出具有一定理性认识的、反映该类矿床共性的标准样式(裴荣富等, 1995). 自块状硫化物矿床的理想剖面图提出以来^[47], 随着资料的积累和认识的提高, 有关 VMS 矿床的成矿模式不断的出现并逐步完善^[17]. 经典的 VMS 矿床模式具有典型的双层结构的共同特征并得到广泛的认可^[3]: 1) 上部为块状矿石组成的整合层状、似层状带; 2) 下部为与上部整合矿带垂直交切的不整合的网脉状、浸染状矿石. 但实际的矿床模式更加复杂多变, 根据其矿床形态和式样的不同, 主要分为丘状矿床、席状矿床和筒状矿床 3 种^[17]. Large^[10]对澳大利亚的 30 个从古太古代至二叠纪的大型 VMS 矿床(>1×10⁶ t)进行了详细的总结, 并根据矿体的形态、金属组分、矿化类型和蚀变特征归纳出 10 种矿床式(styles of deposits): 经典丘堆式、不对称丘堆式、筒式、席式、韵律分带式、层状席式夹层控细脉式、叠置透镜式、含铜网脉-浸染式、含金-银-铅-锌网脉-浸染式和远源改造式.

Franklin et al.^[8], Hekinian et al.^[48], Lydon^[1], Large^[10] 和 Scott^[49]等人的研究对 VMS 矿床成矿作用的研究作出了杰出的贡献,使得对古代和现代 VMS 矿床成因模式的研究取得了重大进展. 在对澳大利亚 Hellyer 和 Que River 矿区金属分带的研究和 Eldridge et al.^[50]和 Campbell et al.^[51]提出的矿床成因模式的基础上, Large^[10]提出了经典丘堆式矿床的四阶段成矿模式: 第一阶段, 低温热液流体(150~250℃)排泄至海底沉淀出多孔的方铅矿、闪锌矿、硬石膏和重晶石以及少量的 Au; 第二阶段, 热液流体温度升高(250~300℃), Cu 含量增加, 上升的热液在经过第一阶段形成的矿石丘堆底部时沉淀出黄铜矿或者以交代方铅矿和闪锌矿的方式析出黄铜矿, 同时 Pb、Zn 溶解并随流体向上迁移, 并可在温度降到 250℃以下时沉淀或以交代早期阶段形成的硬石膏或黄铁矿的方式析出; 第三阶段, 热液流体温度继续升高(300~400℃), 不仅 Pb、Zn 进一步随流体向上迁移, 也使 Cu 和 Au 以氯的配合物的形式溶解并向上迁移, 在流体温度达到最高(350~400℃)时, 所有的金属(Cu、Au、Pb、Zn、Ag、Ba 等)都呈溶解状态并随流体迁移, 从而在下部形成缺乏各种贱金属的黄铁矿核; 第四阶段, 流体从最高温度时的 350~400℃降到 200~250℃, 并在早阶段形成的各个矿带上叠加方铅矿、闪锌矿、重晶石和碳酸盐. 在该模式中, 热机制或温度的变化对金属的搬运和沉淀具有重要影响. 与以往所认为的 VMS 矿床的金属主要是由硫化物颗粒从海水中直接沉淀(卤水池模式)或黑烟囱的崩塌堆积形成不同, 该模式认为较晚阶段的成矿流体沿通道上升并对早阶段沉积的矿石交代淋滤和活化迁移, 成矿金属是从下部注入的. 在这个过程中, 形成了丘堆式矿床垂向和横向的金属分带形式, 从下到上依次是: Fe→Fe-Cu→Cu-Pb-Zn→Pb-Zn-Ba. 这种金属不断向上富集、分带边界不断向上迁移的过程被称作带状精炼(zone refining).

参考文献:

- [1] Lydon J W. Some observations on the mineralogical and chemical zonation patterns of volcanogenic sulphide deposits of Cyprus [J]. Paper Geological Survey of Canada, 1984, 84(1A): 611—616.
- [2] Sawkins F J. Metal deposits in relation to plate tectonics (2nd ed)[M]. Berlin: Springer, 1990: 461.
- [3] Herzig P M, Hannington M D. Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor: A review [J]. Ore Geological Review, 1995, 10: 95—115.
- [4] Bischoff J L. Red Sea geothermal brine deposits: Their mineralogy, geochemistry and genesis [A]// Degens E T, Ross D A, eds. Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea. Springer Verlag, 1969: 368—401.
- [5] Pirajno F. Hydrothermal mineral deposits [M]. Springer Verlag, 1992: 709.
- [6] Robb L J. Introduction to ore-forming processes [M]. Blackwell Publishing, 2005: 177—189.
- [7] Hutchinson R W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance [J]. Econ Geol, 1973, 68: 1223—1246.
- [8] Franklin J M, Lydon J W, Sangster D F. Volcanic-associated massive sulfide deposits [A]// Skinner B J, ed. Economic Geology 75th Anniversary Volume. The Economic Geology Publishing Company, 1981: 485—627.
- [9] Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, et al. Volcanogenic massive sulfide deposit [A]// Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al eds. Economic Geology 100th Anniversary Volume. The Economic Geology Publishing Company, 2005: 523—560.
- [10] Large R R. Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits: Features, styles and genetic models [J]. Economic Geology, 1992, 87: 471—510.
- [11] Solomon M. "Volcanic" massive sulphide deposits and their host rocks: A review and an explanation [A]// Wolf K A, ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits (): Regional studies and specific deposits. Amsterdam: Elsevier, 1976: 21—50.
- [12] Sangster D F, Scott S D. Precambrian stratabound, massive Cu-Zn-Pb sulfide ores of North America [A]// Wolf K H, ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Amsterdam: Elsevier, 1976, 6: 129—222.
- [13] Lydon J W. Ore deposit model 14, volcanogenic massive sulfide deposits part : A descriptive model [J]. Geoscience Canada, 1984, 11: 195—202.
- [14] Sawkins F J. Massive sulfide deposits in relation to geotectonics [A]// Strong K F, ed. Metallogeny and plate tectonics. Geol Assoc Canada Spec, 1976, 14: 221—242.
- [15] Sawkins F J, Kowalik J. The source of ore metals at buchans: Magmatic versus leaching models [J]. Geol Assoc Canada Spec, 1981, 22: 255—267.
- [16] Sillitoe B H, Hannington M H, Thompson J F H. High sulfidation deposits in the volcanogenic massive sulfide environment [J]. Econ Geol, 1996, 91: 204—212.
- [17] 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 等. 现代和古代海底热水成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1—394.
- [18] Mosier D L, Berger V L, Singer D A. Volcanogenic massive sulfide deposits of the world-database and grade and tonnage models [A]// HOU Zeng-qian, HAN Fa, XIA Lin-qi, et al, eds. Modern and ancient submarine hydrothermal mineralized activities. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1—394.
- [19] Morton R L, Franklin J M. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulfide deposits [J]. Econ Geol, 1987, 82: 1057—1063.
- [20] Gemmell J B, Large R R. Stringer system and alteration zones underlying the Hellyer volcanogenic massive sulfide deposit, Tasmania [J]. Econ Geol, 1992, 87: 620—649.
- [21] Large R R, Both R A. The volcanogenic ores at Mount Chalmers, eastern

- Queensland: Econ Geol, 1980, 75: 992—1009.
- [22] Green G R, Solomon M, Walshe J L. The formation of the volcanic-hosted massive sulfide deposit at Rosebery, Tasmania [J]. Econ Geol, 1981, 76: 304—338.
- [23] Gregory P W, Hartley J S, Wills J A. Thalanga zinc-lead-copper-silver deposit [J]. Australasian Inst Mining Metallurgy Mon, 1990, 14: 1527—1537.
- [24] Ashley P M, Dudley R J, Lesh, R H, et al. The Scuddles Cu-Zn prospect, an Archean volcanogenic massive sulfide deposit, Golden Grove District, Western Australia [J]. Econ Geol, 1988, 83: 918—951.
- [25] Petersen M D, Lambert I B. Mineralogical and chemical zonation around the Woodlawn Cu-Pb-Zn ore deposit, southeastern New South Wales [J]. Geol Soc Australia Jour, 1979, 26: 169—186.
- [26] Stolz A J, Large R R. Evaluation of the source rock control on precious metal grades in volcanic-hosted massive sulfide deposits from western Tasmania [J]. Econ Geol, 1992, 87: 720—738.
- [27] Greig D D. Geology of the Teutonic Bore massive sulphide deposit, Western Australia [J]. Australasian Inst Mining Metallurgy Proc, 1984, 289: 147—156.
- [28] Russell R D, Farquhar R M. Dating galenas by means of their isotopic constitutions () [J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1967, 19: 41—52.
- [29] Krauskopf K B. Source rocks for metal-bearing fluids [A]// Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: Holt, Rinehart and Winston Inc, 1960: 1—33.
- [30] Spooner E T C, Fyfe W S. Sub-sea floor metamorphism, heat and mass transfer [J]. Contr Mineralogy Petrology, 1973, 42: 287—304.
- [31] Ohmoto H, Rye R P. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions in the kuroko deposits, Japan [J]. Econ Geol, 1974, 69: 947—953.
- [32] Large R R. Chemical evolution and zonation of massive sulfide deposits in volcanic terrains [J]. Econ Geol, 1977, 72: 549—572.
- [33] Solomon M. An introduction to the geology and metallic mineral resources of Tasmania [J]. Econ Geol, 1981, 76: 194—208.
- [34] Stoltz A J, Large R R. Evaluation of the source control on precious metal grades in volcanic-hosted massive sulfide deposits from western Tasmania [J]. Economic geology, 1992, 87: 720—738.
- [35] Urabe T, Sato T. Kuroko deposits of the Kosaka mine, northeast Honshu, Japan: Products of submarine hot springs on the Miocene sea floor [J]. Econ Geol, 1978, 73: 161—179.
- [36] Stanton R L. Stratiform ores and geological processes [J]. Royal Soc New South Wales, 1985, 118: 77—100.
- [37] Stanton R L. Magmatic evolution and the ore type-lava type affiliations of volcanic exhalative ores [J]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Proceeding, 1990, 15: 101—107.
- [38] Urabe T, Marumo K. A new model for kuroko-type deposits of Japan [J]. Episodes, 1991, 14(3): 246—251.
- [39] Yang K H, Scott S D. Possible contribution of metal-rich magmatic fluid to a seafloor hydrothermal system [J]. Nature, 1996, 383: 420—423.
- [40] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Review of Mineralogy, 1983, 16: 491—560.
- [41] Solomon M, Eastoe C J, Heinrich C A. Mineral deposits and sulfur isotope abundancies in the Mount Read Volcanics between Que River and Mount Darwin, Tasmania [J]. Econ Geol, 1988, 83: 1307—1028.
- [42] Huston D L, Taylor T, Fabray J, et al. A comparison of the geology and mineralization of the Balcooma and Dry River south volcanogenic massive sulfide deposits, northern Queensland [J]. Econ Geol, 1992, 87: 542—563.
- [43] Megoldrick P J, Large R R. Geologic and geochemical controls on gold-rich stringer mineralization in the Que River deposit, Tasmania [J]. Econ Geol, 1992, 87: 667—685.
- [44] 燕长海, 徐勇航, 彭翼, 等. 秦岭二郎坪群中火山成因块状硫化物矿床地质地球化学特征及其成因讨论 [J]. 矿床地质, 2008, 27(1): 14—27.
- [45] Von Damm K L, Bischoff J L, Rosenbauer R J. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N East Pacific Rise [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1985, 49: 2197—2220.
- [46] Von Damm K L, Bischoff J L. Chemistry of hydrothermal solutions from the southern Juan De Fuca Ridge [J]. Jour Geophys Res, 1987, 92: 11334—11346.
- [47] Campbell A C, Palmer M R, Klinkhammer G P. Chemistry of hot springs on the Mid-Atlantic Ridge [J]. Nature, 1988, 335: 514—519.
- [48] Cathles L M. A capless 350°C flow zone model to explain megaplumes, salinity various, and high-temperature veins in Ridge Axial hydrothermal system [J]. Economic Geology, 1993, 88: 1977—1988.
- [49] Scott S D. Submarine hydrothermal systems and deposits [A]// Barnes, H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 3rd edn John Wiley, 1997: 797—875.
- [50] Eldridge C S, Barton Jr P B, et al. Mineral textures and their bearing on formation of the Kuroko orebodies [J]. Econ Geol, 1983, 78: 241—281.
- [51] Campbell I H, McDougall T J, Turner J S. A note on fluid dynamic processes which can influence the deposition of massive sulfides [J]. Econ Geol, 1984, 79: 1905—1913.