

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.016

浙江建德铜矿床地质特征及其成因研究的新进展

周济元

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要:通过对建德铜矿床调查研究,总结矿床成矿条件,分析控矿因素,探索矿体分布规律,确定岩浆热液成因后,提出矿液运移理论,首次运用计算机进行数学物理模拟和深部成矿预测,已均被证实,表明所采用理论、方法的合理性和正确性。因矿区发现少量火山岩和硅质岩等而提出海底火山热液沉积成因,经近年矿区地质特征、成矿年龄和流体包裹体等详细研究和开采勘查,认为该矿床为岩浆热液成因,并据此在该矿床外围找到类似的高岭铜矿床。随着矿床研究的深入,在矿床地质特征、成矿时代、成矿流体和成矿物质来源等取得了新进展,矿床成因和成矿机制也因此得到进一步验证。

关键词:铜矿床;地质特征;岩浆热液成因;建德;浙江

中图分类号: P618

文献标识码: A

NEW PROGRESS IN THE STUDY OF GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF JIANDE COPPER DEPOSIT, ZHEJIANG PROVINCE

ZHOU Jiyuan

(Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Jiande copper deposit was discovered in 1958. It was explored by the geological department and mined by the metallurgical department in 1960. By 1980, when the reserves handed over were about to be mined out and became a critical mine, the author was invited to take a group of teachers and students to investigate and study the ore deposit, summarize the ore-forming conditions, analyze the ore-controlling factors, explore the ore-body distribution law, and determine the origin of magmatic hydrothermal fluid. The theory of ore liquid migration was put forward. The mathematical and physical simulation was carried out by computer for the first time. It shows the rationality and correctness of the theory and method adopted. Because a few volcanic rocks and siliceous rocks were found in the mining area, the genesis of submarine volcanic hydrothermal deposits was proposed. Based on the detailed study and exploration of geological characteristics, metallogenic age and fluid inclusions in the mining area in recent years, the deposit is denied to be the origin of submarine volcanic hydrothermal deposit, which is

作者简介:周济元(1936-),男,教授,博导,从事构造地质学、地质力学、矿田构造学、地震地质学、构造动力成矿、成矿预测和非金属矿开发等研究。E-mail: jiyuan_zhou@163.com

引用格式:周济元. 浙江建德铜矿床地质特征及其成因研究的新进展 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (S1): 090-102

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.016

ZHOU Jiyuan. New progress in the study of geological characteristics and genesis of Jiande copper deposit, Zhejiang province [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (S1): 090-102 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.016

further confirmed to be magmatic hydrothermal genesis. A similar Gaoling copper deposit was found on the periphery of the deposit.

Key words: copper deposits; geological characteristics; magmatic hydrothermal origin; Jiande; Zhejiang

0 引言

建德岭后铜矿, 又称建德铜矿, 是 1958 年群众找矿过程中, 由地表褐铁矿向深部追索, 经浙江省地质局第二、三地质队布钻在深部打到铜矿体而发现的; 后经工程勘探, 圈定工业矿体, 计算了储量, 形成规模小于 10 万吨的小型铜矿床。于 1960 年交付浙江省冶金部门开采^[1]。

至 1980 年, 建德铜矿原探明储量即将采空, 生产年年亏损, 成为危机矿山。面对这种状况, 是在矿区挖潜, 寻找新矿体还是到外围寻找新矿区, 这是迫切需要解决的大难题。为此, 很多专家受邀到矿区考察、研究。多数认为, 矿已采完, 拟去外围如石耳山等地寻找新矿区; 只有极少数专家认为, 拟先在矿区内部挖潜, 实在无法找到, 再去外围找矿。为了节省大量搬迁和新矿山建设费用, 矿山设立了“浙江省建德铜矿控矿特征、矿液运移及找矿远景研究”项目, 拟在矿区寻找新矿体。

项目组在收集检阅矿区地质矿产勘查和开采资料基础上, 将重点研究放在井下, 开展了矿区地层, 构造形迹的形态、力学性质、延展方向和相互切割关系, 岩浆岩期次、特征、相互穿切及其与成矿关系, 围岩和围岩蚀变及其类型、分布及其与成矿关系等的详细研究和系统调查, 采集样品标本; 经鉴定、分析测试, 数据统计、编制相关图表, 分析矿床地质特征、成矿条件和控岩控矿因素、成矿过程及其成因机制等, 认为该矿床为岩浆热液成因。在此基础上, 创新性地提出矿液运移理论和数学物理模拟方法, 首次借助电脑技术进行岩层变形场、构造应力场、元素分布趋势、矿液运移势、理论成矿值等计算, 进行深部隐伏矿体预测。对松坑坞向斜北段至新安江边, 从成矿物质(岩浆岩体)、成矿围岩(中石炭统黄龙组下岩性段灰质白云岩)、成矿构造体系(新华夏构造体系)、围岩蚀变、30 线以北的综合物探、化探异常等方面作了有利成矿的评价, 指出了肯

定的找矿前景。果然, 就在 F_2 断裂以南成矿最有利地段、原采矿体南东 50 m 的预测部位出现了新富矿体, 初步验证了预测的合理性和准确性。至 1985 年新增储量为“原储量的 1.5 倍”^[2-6]。其余预测地段通过后续开采、勘查, 也被证实^[7-11], 矿床规模也由小型变为中大型。近年来, 运用建德铜矿床的控矿因素和成矿模式, 在矿区外围东北方的高岭一带找到了新的铜矿床^[12]。同时, 随着矿床研究的深入, 在矿床地质特征、成矿时代、成矿流体和成矿物质来源等取得了新进展, 矿床成因和成矿机制也因此得到进一步验证。

1 矿区地质特征

建德铜矿位于扬子地块与华夏地块间的软杭接合带东北段、南东侧, 受绍兴—江山深断裂控制, 位于浙江西部铜铅锌多金属成矿带内, 以 Cu 为主, Zn、Pb、S 为次, 伴生 Au、Ag 的一个重要铜多金属矿床。

1.1 地层

矿区出露地层主要为晚古生代泥盆系、石炭系、二叠系和中生代侏罗系^[5]。由下而上, 依次为:

(1) 泥盆系 (D)

中下泥盆统唐家坞组 (D_{1+21}): 主要为灰绿色中厚层状砂岩, 厚度 > 100 m。未见底。上泥盆统西湖组 (D_{3s}): 主要为白色中厚层状含砾石英砂岩, 厚度 120 ~ 130 m。分布在松坑坞向斜两翼和铜山背斜轴部。

(2) 石炭系 (C)

下石炭统珠藏坞组 (C_{1z}): 为含砾石英砂岩, 紫色砂质页岩、细砂岩互层, 与上覆中石炭统黄龙组碳酸盐岩层呈假整合接触, 厚度 64 ~ 142 m。主要分布在向斜和背斜两翼。中石炭统黄龙组 (C_{2h}), 为矿区含矿地层, 广泛分布于岭下、松坑坞向斜和铜山背斜。依据黄龙组中上部和下部的岩性差异, 分为上、下两个岩性段: 下岩性段 (C_{2ha}), 黄龙组下部, 主要为灰—浅灰色致密厚层

状灰质白云岩、夹泥灰岩。含动物化石。成分主要为白云石(占50%~70%),炭、泥质较高,并夹泥质条带和薄层泥灰岩(近年在底部发现“伴有少量火山岩、硅质岩和碧玉岩的白云岩”^[13-14])。该岩性段含Cu0.02%~0.03%,为沉积岩丰度值的数倍^[15];岩石性脆易碎,裂隙发育,化学性质活泼,利于成矿流体渗透、交代、蚀变,并提供部分成矿物质。系矿区主要含矿层位,厚度30~35 m。上岩性段(C_{2hb}),黄龙组中上部,为灰—浅灰色厚—中厚层状纯灰岩、白云质灰岩、薄层状灰岩,厚150 m。由于燕山中期花岗闪长玢岩岩浆流体侵入而热接触变质、双交代作用影响,与上述灰岩接触带常有大理岩化、矽卡岩化等蚀变现象。上石炭统船山组(C_{3c}),下部为浅灰色纯灰岩,中部为灰黑色灰岩夹砂岩、泥质灰岩和硅质灰岩,上部为灰色团块状灰岩、生物碎屑灰岩。含动物化石。厚度为174.5 m。

(3) 二叠系(P)

下二叠统(P₁),分为:栖霞组(P_{1x}),下部为中厚层状灰岩,中部为中厚层状灰岩,下部为中厚层状灰岩含灰质白云岩、生物灰岩。含动物化石。厚度110.3 m。茅口组(P_{1m}),含燧石结核灰岩。有动物化石。厚度47 m。丁家山组(P_{1d}),黑色页岩。厚度6 m。

(4) 侏罗系(J)

上侏罗统劳村组(J_{3l}),下部为中厚层状杂色中—粗粒石英砾砂岩,上部为紫色页岩、砂质页岩,有化石。出露面积较小,分布在塘坞、猪头尖一带。厚度>153.5 m。呈角度不整合覆盖在上泥盆统西湖组之上;其又遭褶皱、断裂,组成北北东向塘坞向斜和猪头尖背斜等,后被第三期花岗闪长玢岩(嵌晶花岗闪长玢岩)脉(K-Ar = 117.88 Ma)^[5]穿插。

上述地层中,泥盆系—下石炭统为滨海相碎屑沉积,中石炭统—下二叠统为海相碳酸盐沉积,两者间为平行不整合接触;上侏罗统劳村组为陆相碎屑沉积,与下伏地层呈角度不整合接触,而其又遭受强烈褶皱、断裂,并被燕山中期花岗闪长玢岩岩浆流体侵入穿插,明显反映该区经历河西—印支期和燕山期的两次强烈构造运动。

1.2 构造

矿区构造主要分为印支期北东向褶皱和断裂(华夏构造体系),北西向褶皱和断裂(北西向构

造),燕山期北北东向褶皱和断裂(新华夏构造体系)、北北西向褶皱和断裂(北北西向构造)和近东西向断裂,以及它们的配套构造,彼此呈横跨、归并、交切和偏转,力学性质大多叠加复合、成为复性,为印支期和燕山期不同构造运动方式、方向形成变形和断裂的叠加、复合、改造的结果^[4-5]。其中,在燕山中期成矿过程中起重要作用的新华夏构造体系:北北东向岭下向斜、松坑坞向斜和F₁、F₂₄、F₂₉(又标F₃₁)断裂,北西—北北东向F₂₃断裂,与松坑坞向斜南东东或铜山背斜北西西翼层间破碎带一起,既导岩导矿又控岩控矿,起着导(运)矿、散(储或容)矿和阻(聚)矿的重要作用,控制矿体的空间规律分布。

1.3 岩浆岩

矿区岩浆岩广泛分布,主要在岭下、松坑坞向斜轴部和两翼特别是南东东翼,岩体规模较小,多呈不规则岩枝和岩脉状,主要为中酸性、中性浅成—超浅成侵入体,期次较多。依据结晶粗细及其关系,可分为三期,分别命为粒晶花岗岩、细晶花岗岩和嵌晶花岗岩^[1]。周济元等^[5]将其划分为五期,分别为第一期黑云母花岗闪长玢岩(或粒晶花岗闪长玢岩,122.26 Ma),第二期花岗闪长玢岩(或细晶花岗闪长玢岩,120.22 Ma),第三期花岗闪长玢岩(或嵌晶花岗闪长玢岩,117.88 Ma),早期安山岩(116.00 Ma)和晚期安山岩(115.00 Ma)。其中,与成矿关系最为密切的是第一期黑云母花岗闪长玢岩和第三期花岗闪长玢岩,其余也均有矿化。矿体多分布在岩体与中石炭统黄龙组下岩性段灰质白云岩接触带及其外侧。依据为K37探槽的第三期花岗闪长玢岩、猪头尖长英岩脉等侵入穿插褶皱了的上侏罗统劳村组地层。近年来,张伯声^[16]获得I、II号矿体附近花岗闪长玢岩的年龄分别为(164.2±2.5) Ma~(160.8±1.6) Ma和(164.5±3.1) Ma~(160.6±1.3) Ma。贾少华等^[17]在33线、-100 m中段采集与矿体有密切关系的花岗闪长玢岩样品进行锆石U-Pb年龄测定,获167.1~173.4 Ma。唐燕文等^[18]选择沿松坑坞向斜分布的不同相态花岗闪长玢岩样品,获得3个锆石U-Pb年龄值为158.3~160.6 Ma。这些锆石U-Pb年龄与地质事实比较,其值明显偏大,值得进一步研究。尽管如此,K-Ar法与U-Pb法所测年龄值均表明成岩年龄值为燕山中期这一点是一致的,不过,前者较后者要更接近地质

事实。

特别要指出的是, 在岩体内部常见大小不等的灰质白云岩、大理岩和砂岩等捕虏体, 其中, 在第一期黑云母花岗闪长玢岩中灰质白云岩捕虏体周围矿化较好, 铜含量较高, 为工业矿体, 如 +50 m 中段 N7 北壁; 而砂岩捕虏体的矿化较差, 仅在裂隙中充填含黄铁矿、黄铜矿石英脉, 如 0 m 中段 23-25 间 9 号采场。

1.4 矿床特征

矿区大小矿体有 60 余个, 其中规模较大的有 I、II、VI、VII、VIII 号矿体, 而又以 I、II 号矿体为最大, 已查明主要分布于 38-30 线间的岭下向斜(岭后矿段)和松坑坞向斜(松坑坞矿段)南东东翼或铜山背斜北西西翼; 其次为向斜槽部, 向斜北西西翼则较少。

1.4.1 矿体的形状、产状、规模及品位

I 号矿体主要为单铜矿体, 呈似层状、透镜状, 局部为鞍状或囊状, 赋存于中石炭统黄龙组下岩性段下部灰质白云岩层, 底板常为下石炭统珠藏坞组顶部细砂岩, 顶板为中石炭统黄龙组下岩性段下部白云岩或大理岩或花岗闪长玢岩或断裂; 主要分布在 38-30 线北自松坑坞向斜南东东翼、槽部及其以北, 向南经铜山背斜南倾伏端至岭下向斜南东东翼, 呈 S 形展布; 产状变化较大, 34 线附近矿体膨大, 整个黄龙组下岩性段灰质白云岩都被交代成矿, 向南南西、北北东分为两层, 并逐渐变薄以致尖灭; 由于矿体产状变化, 在剖面的形态也不相同, 31-36 线倾向 $290^{\circ} \sim 300^{\circ}$, 36-37 线倾向 $300^{\circ} \sim 330^{\circ}$, 38 线又倾向 300° ; 倾角在向斜翼部为 $50^{\circ} \sim 72^{\circ}$, 槽部则为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$; 矿体埋藏标高从北向南, 其顶板由高到低再略高; 最高位 34 线, 为 150 m, 最低位 33 线, 为 -150 m; 底板由低到高, 总体呈北宽南窄的楔形; 矿体全长 800 余米, 斜深一般为 100~200 m, 最大达 300 m^[5]。-50 m 中段的矿体连续性最好, 长达 620 m, 最厚 36.84 m (34 线, CK12), 最薄 1.95 m (CK30)。矿体的 Cu 含量变化较大, 最高含量 5.3% (CK71)~5.85% (CK106), 最低 0.55% (CK16) 至更低, 平均为 1.25%~1.40%。据统计, 铜含量与矿体厚度一般成正相关, 即矿体厚(34 线), Cu 含量高, 反之亦然, 向北北东、南南西厚度减薄、Cu 含量变低, 沿走向或倾向皆是。矿体在垂直方向, 由上往下 Cu 含量趋势变

富, 向斜槽部增高。垂直含矿层, 由底板到顶板, Cu 含量增高或变低, 但其中有两个较明显的峰值, 即距底板(细砂岩) 2~4 m 和含矿层顶部。表明成矿物质与底板—珠藏坞组细砂岩关系较小, 更谈不上“硅钙面”的影响, 倒显示与顶板以上的花岗闪长玢岩体有密切的物质来源关系。Cu 与矿石的微量元素(除 Ti 外)含量变化关系类同; 与 Zn、Pb、S、Mo 等元素的含量, 大多成正相关, 特别与 Mo, 不但成正相关, 而且其含量较高, 还有综合利用价值^[5]。

从 33 线至 32 线以北 F23 下盘, I 号矿体平均厚度 4.79 m, 厚度变化系数 65.79。其中平均厚度 -50 m、-100 m 中段分别为 5.24 m、5.10 m, ω (Cu) 平均品位 1.8%。沿矿体倾向, 由 -50 m、-100 m 和 -100 m 中段以下, Cu 含量由低到高再低, Au、Ag 含量基本类似^[11]。与上述变化基本一致。

II 号矿体, 为铜锌硫矿体, 主要分布(已控)在 36-30 线的岭下、松坑坞向斜槽部, 长度 600 m 以上, 矿体连续性好。标高 24~150 m 以下。为隐伏盲矿体。据周济元等^[5]资料, 矿体呈马鞍状、似层状, 赋存于中石炭统黄龙组下岩性段上部灰质白云岩中, 围岩主要为热变质的白云岩、大理岩和花岗闪长玢岩, 遇断裂有下石炭统珠藏坞组砂页岩。矿体产状与组成向斜的岩层基本一致, 倾向北西西—南东东, 倾角槽部缓、两翼陡, 顶板缓、底板陡, 虚脱空间控矿。矿体厚度, 向斜槽部大、两翼变薄至歼灭。岭下向斜槽部最大厚度 17.64 m, 向两翼迅速分叉、尖灭, 平均厚度 8.80 m。在松坑坞向斜 32-30 线间, 因垂直或大角度穿切向斜的 F23 断层上盘大幅下滑, 容矿岩层变厚, 向斜槽部虚脱空间加大, 成为含矿热液运移通道、储集和矿质沉淀场所, 形成富而厚的铜锌硫多金属矿体^[11]。矿体呈似层状、凸透镜状, 走向北 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 东, 倾向北西西, 倾角一般为 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 最缓处在向斜转折部位, 近于 0° , 最陡达 73° (30 线翼、浅部)。矿体厚度, 一般为 6~30 m, 平均厚度 13.77 m, 厚度变化系数 86.92, 平均厚度, -50 m 中段 13.74 m, -100 m 中段 11.80 m, -100 m 中段以下 18.60 m。矿体平均品位, ω (Cu) 3.77%、 ω (Zn) 3.58%、 ω (TS) 26.16%。矿体产状与厚度关系, 在顶板缓、底板陡, 向斜转折部位缓、两翼陡, 厚处缓、薄处陡;

矿体标高. 顶板最高位 24 m (31 线, 向斜北西西翼), 向北北东倾伏, 最低 -150 m 以下; 矿体与 Cu、Zn、TS、Au、Ag 元素含量的变化关系, 沿矿体倾向, 由上向下, Cu 由低到高, Zn 由高到低, TS 由低到高, Au、Ag 由低到高再低的变化趋势。以上特征充分显示成矿受构造动力、空间, 岩层、岩性和矿液运移、聚集、渗透、分异、交代、沉淀等因素的控制。

VI、VII、VIII 号矿体, 呈脉状, 倾向南东东, 倾角 55°, 上部, 平均厚度 1.3 ~ 1.8 m, 三者互相平行, 斜长 80 ~ 150 m, 产于 36 线西段向斜西翼灰质白云岩层的断裂破碎带中^[5]。

1.5 矿石

1.5.1 矿石类型

矿区有不同类型的矿石, 周济元等^[5]依据矿物成分、结构、构造、分布和主要元素及其含量不同, 主要分为铜矿石、铜锌矿石、多金属黄铁矿石和含铜黄铁矿石。其中铜矿石又分为含铜白云岩、含铜绿泥石绢云母岩和含铜矽卡岩等类型矿石。俞跃平^[11]则依据矿物共生组合、化学成分和选冶性能等分为铜矿石、含银铜锌硫矿石、含锌铜硫矿石和含铜硫矿石。不难发现, 两者并无实质区别, 主要类型且可一一对应 (详后)。

1.5.2 矿石结构、构造

矿石结构主要有自形—半自形花岗变晶结构、他形变晶花岗结构、斑状变晶结构、残余结构、骸晶结构、乳浊状结构等。

矿石构造主要有侵染状、星散状、团块状、角砾状、条带状、褶皱纹状、细脉状和网脉状等构造。不同类型矿石的构造有所差异。

1.5.3 不同类型矿石特征

(1) 铜矿石, 又称单铜矿石。呈紫红、浅紫—暗灰色, 粒度细小的半自形、他形显微花岗变晶和交代结构, 侵染状、星散状、斑点状、团块状、角砾状、细脉状, 局部有条带状、褶皱纹状、同心圈状和网脉状构造。 $\omega(\text{Cu})$ 一般为 0.8% ~ 3.0%, 平均为 1.8%。赋存在中石炭统下岩性段下部灰质白云岩层组成的岭下—松坑坞向斜南东东翼层间破碎带, 局部与花岗闪长玢岩体接触热蚀变和双交代作用形成含铜矽卡岩。该类型矿石多分布在 I 号矿体, 其中 33—34 线为最。Cu 含量底部为 1% ~ 2%, 中上部为 0.5% ~ 0.7%。

(2) 含银铜锌硫矿石, 又称铜锌矿石。呈浅

灰—灰褐色, 半自形—他形花岗变晶结构, 侵染状、团块状构造。一般 $\omega(\text{Cu})$ 为 1% ~ 5%, $\omega(\text{Zn})$ 1% ~ 7%, $\omega(\text{S})$ 15% ~ 35%, $\omega(\text{Ag})$ 50×10^{-6} ~ 90×10^{-6} 。该类型矿石为 II 号矿体的最主要矿石类型; 当矿体厚度 < 10 m 时, 该矿石类型分布在矿体中部; 矿体厚度 > 10 m 时, 则分布在中部—顶部。在 37—35 线, 分布在向斜槽部和北西西翼, 31—30 线, 分布在向斜槽部和南东东翼 I 号矿体之上。37—35 线 I 号矿体主要元素含量: Cu 0.7%, Zn 2% ~ 8.8%, Pb \geq 1.9%。

(3) 含锌铜硫矿石, 又称多金属黄铁矿石。呈浅灰—灰褐色, 中、细粒半自形—他形花岗变晶结构 (粒度 0.2 mm), 侵染状、致密块状和团块状构造。矿石品位, Cu、S 一般与含银铜锌硫矿石相当或略高; Zn 不足 1%, 平均为 0.46%。该类型矿石是 I、II 号矿体的重要矿石类型, 分布在 I 号矿体与断裂破碎带或黑云母花岗闪长玢岩接触带和 36—35 线向斜槽部, 以及 II 号矿体顶板和底板附近; 当后者的矿体厚度 > 18 m 时, 一般靠近底板一半左右厚度处, 并较为集中。I 号矿体主要元素含量: Cu > 3.6%, Zn 1 ~ 3%, S 8 ~ 27%。

(4) 含铜硫矿石, 又称含铜黄铁矿石。呈铜黄色, 细—粗粒花岗变晶结构 (粒度 0.1 ~ 0.4 mm), 致密块状、团块状、星散状构造。一般 $\omega(\text{Cu})$ < 0.5%, 平均 0.3%; $\omega(\text{S})$ 10% ~ 40%, 平均 30.11%。该类型矿石分布在 35 线向斜槽部, 31 线、-100 m 以下较为集中外, 其余地段均较零散。35 线南, 主要元素含量: Cu 2.5%, S 28%。

1.6 围岩蚀变

矿区围岩蚀变较为复杂。主要有磁铁矿化、赤铁矿化、矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、滑石-蛇纹石化、硅化、碳酸盐化和大理岩化, 蚀变分段明显, 由岩体向外接触带, 依次为矽卡岩化、磁 (赤) 铁矿化、绿泥石化、粗晶大理岩化、细晶大理岩化; 由接触面向岩体内部, 常为绿泥石化、绿帘石化、钾化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化、硅化; 不同矿体的蚀变类型也有差异^[5]。其中, 矽卡岩化、磁 (赤) 铁矿化、绿泥石-绿帘石化、绢云母化、硅化和大理岩化与矿化关系密切, 且矽卡岩化、磁 (赤) 铁矿化和绿泥石化等与 I 号矿体, 硅化、碳酸盐化和大理岩化等与 II 号矿体关系尤为密切^[5,11]。

(1) 矽卡岩化, 主要分布在花岗闪长玢岩与

白云岩和大理岩接触带。其形态不规则，呈小团块状、透镜状、囊状和脉状。矽卡岩矿物组成本较简单，由石榴子石（铁铝榴石、钙铝榴石）、透辉石（钙铁辉石）、绿泥石和绿帘石等组成，但因后期热液蚀变矿化影响，变得复杂化。囊状矽卡岩分布在第一、三期花岗闪长玢岩外接触带，以棕红、浅绿色石榴子石矽卡岩和浅白-谈绿色硅灰石矽卡岩为主。由磁铁矿、镜铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿呈团块状、脉状-网脉状、浸染状，充填、交代、富集成为含铜矽卡岩矿石。脉状矽卡岩主要沿大理岩和第一、三期花岗闪长玢岩中的裂隙分布，往往呈不规则网脉状，均为石榴子石矽卡岩，常呈工业矿体。对于这一重要蚀变-矿化，主张海底火山热液沉积者不屑一顾，但该现象是矽卡岩型矿床十分重要的依据；也是岩浆热液成因的重要地质依据^[19-21]。

(2) 磁（赤）铁矿化，常与矽卡岩化、蛇纹石化相伴。磁铁矿化、赤铁矿化常呈致密块状、细脉状等，一般均伴有铜矿化。主要分布在灰质白云岩中下部，是 I 号矿体主要近矿围岩蚀变，在 34 线及其两侧最为强烈，向北北东、南南西则逐渐变弱。

(3) 滑石-蛇纹石化，常与矽卡岩化、磁（赤）铁矿化相伴，主要分布在岭下—松坑坞向斜南东东翼灰质白云岩中，是 I 号矿体附近常见的围岩蚀变，与矽卡岩化、磁（赤）铁矿化一起，是成矿早期阶段的围岩蚀变。

(4) 绿泥石-绿帘石-绢云母化，主要分布在第一、三期花岗闪长玢岩中及其边部。常沿裂隙发育，呈脉状。大多伴随多金属黄铁矿化、含铜黄铁矿化等。其中黄铜矿、黄铁矿呈浸染状、星点状。晶形良好。当岩体中裂隙密集，蚀变强烈，便伴有工业矿体形成。0 m 中段 015-017 连接巷所见此类蚀变与铜矿的密切关系即属此例。为云英岩型矿（床）体，在成矿结构体系^[20]和成矿体系^[21]中与伟晶岩型矿（床）体一起，统称为地下室。

(5) 硅化，主要分布在 II 号矿体顶、底板围岩中，是该矿体主要围岩蚀变类型。矿体顶板围岩蚀变常为硅化白云岩，呈显微花岗变晶结构；矿体底板砂页岩硅化，常呈网脉状石英脉，其中伴有星散状黄铁矿化和黄铜矿化。显示矿液由矿体向两侧运移、渗透、充填的趋势。

(6) 大理岩化，分布广泛，自 38-30 线尤其

34-35 线，均可见及。主要由纯灰岩和灰质白云岩受岩浆流体侵入热变质产生重结晶所致。呈花岗变晶结构。近岩体特别明显，方解石或白云石晶体大，向两侧逐渐变小，与纯灰岩或灰质白云岩呈过度关系。当后期岩浆或热液沿大理（白云）岩中的裂隙运移，常使岩脉两侧蚀变重叠、增强。该类蚀变一般无矿化，但可作为远矿围岩蚀变或寻找隐伏岩体、矿体的找岩、找矿标志。

(7) 碳酸盐化，以白云石化和方解石化，呈细脉状、网脉状和团块状，主要分布在 II 号矿体顶板围岩中，常见铅、锌矿化相伴。可能为成矿晚期的围岩蚀变，与铅、锌矿化关系密切。

(8) 黄铁矿化，分布最为广泛，有赋矿岩层（含胶体）沉积产生，有岩浆流体侵入、热液活动过程中蚀变矿化伴生的黄铁矿。前者在后期岩浆流体侵入、热液活动过程中往往被熔融、溶蚀和交代形成新的黄铁矿，与铜、金多金属矿化关系较为密切。

矿区不同岩体的围岩蚀变类型不尽相同。如第一期黑云母花岗闪长玢岩多矽卡岩化、绿泥石化、硅化、高岭土化；第二期花岗闪长玢岩多绢云母化、黄铁矿化；第三期花岗闪长玢岩多绢云母化、黄铁矿化、高岭土化，碳酸盐化少见；安山岩则碳酸盐化强烈，绢云母化、黄铁矿化也较常见。矿区围岩蚀变具明显分带性，如 +50 m 中段 S-5 采场，自黑云母花岗闪长玢岩向外：富黄铜矿体→矽卡岩（含铅锌矿、含铜黄铁矿）矿体→赤（磁）铁矿化蚀变带→绿泥石-绿帘石化带→粗晶大理岩化带→细晶大理岩化带；自岩体与围岩接触面往岩体内部，则为硅化、绢云母化、钾化、绿泥石-绿帘石化，常沿裂隙分布，呈脉状、网脉状，并伴生含铜黄铁矿化、多金属黄铁矿化等，其中，黄铁矿、黄铜矿呈浸染状、星点状，晶形良好。在蚀变强烈部位形成工业矿体，称为云英岩型矿体（床）。可见，矿区围岩蚀变具类型多，次数众、分带性、渐变性和重叠增强等特征。I 号矿体与矽卡岩化、磁（赤）铁矿化、滑石-蛇纹石化和绿泥石-绿帘石化-绢云母化，II 号矿体与硅化、大理（白云）岩化和碳酸盐化关系较为密切。

2 矿床成因

2.1 争论焦点

从该矿床发现起，对建德铜矿床成因的认识，

争议从未停止过。80 年以前主要有沉积成因、热液成因和沉积-热液叠加成因^[1,5]。1981 年,周济元等提出“岩浆热液成因”^[2-6],曹淑英等^[13-14]提出“海相火山热液沉积成因”,刘家军等^[22-23]提出“海底喷发沉积成因”,王执均^[8]的“中低温热液成因”以及陈雷等^[19]的“海底热水沉积-热液叠加改造成因”等等。该矿床成因争论主要在于:是岩浆热液成因还是海相火山热液沉积成因;是一期(海西-印支期或燕山期)还是二期叠加改造成因?文章认为该矿床是在燕山中期(早白垩世),由岩浆热液的、灰质白云岩层及其深部岩层的成矿物质混合,在断裂、褶皱、岩层及其层间破碎带控制导岩、导矿,运岩、运矿和储岩、储矿的成矿作用过程中形成的。

2.2 成因研究新进展

30 多年来,一些学者围绕矿床成因,开展较为深入系统研究,特别在成矿时代、成矿流体、成矿物质来源、矿床成因及成矿机制等方面取得了新进展。

2.2.1 成矿时代

该矿床成矿时代研究先后通过 Pb 同位素和 Re-Os 同位素方法测定成矿年龄。由于矿物形成条件不同,同一种方法用不同矿物所得年龄值也不相同。刘家军等获得矿石中黄铁矿和方铅矿的 Pb 同位素单阶段模式年龄为 309 ~ 458 Ma^[22];徐跃通^[14]获得方铅矿的 Pb 同位素单阶段模式年龄为 385 ~ 461 Ma。据此,刘家军等^[22]认为其单阶段 Pb 模式年龄 309 Ma,与赋矿地层年龄大致相当,将其作为“指示最新成矿年龄及矿石年龄”;其余 355 ~ 461 Ma,均大于赋矿地层年龄,解释为“成矿物质来源于基底”,作出“据此至少可以否定‘燕山期岩浆热液成矿(115.00 ~ 122.26 Ma)^[2],且成矿物质来源于含矿地层本身’的认识。该文中 9 个 Pb 同位素单阶段模式年龄只有一个与赋矿地层(中石炭世)年龄大致相当;其余 8 个,均大于赋矿地层年龄(泥盆纪~奥陶纪)。故这一组数据能否作为“最新成矿年龄及矿石年龄”,还需要更多数据和资料佐证。

陈雷等^[19]和唐燕文等^[18]用矿石中的辉钼矿进行 Re-Os 同位素年龄测定,分别获得 $(121 \pm 12) \sim (122.5 \pm 8.7)$ Ma 和 $160.3 \sim 164.1$ Ma 的年龄数据,前者为早白垩世,后者为中侏罗世。依据矿区上侏罗统劳村组地层褶皱并被第 3 期花岗闪长玢岩脉

穿插的地质事实来检验,所得数据与前者较为接近,并与 K-Ar 法所测花岗闪长玢岩年龄值一致。但二者均为燕山中期,没有发现一个海西-印支期年龄值。是否可表示用单阶段 Pb 模式年龄而非矿物结晶年龄值作为“指示最新成矿年龄及矿石年龄”是不够的,还可用以示踪物质来源的地层年龄值作为参考,即中石炭统及其以下(泥盆纪~奥陶纪)地层提供部分成矿物质来源。

2.2.2 岩体地球化学

周济元等^[5]认为黑云母花岗闪长玢岩为硅酸盐过饱和、中酸性、钙碱性系列。

张伯声^[16]采集 8 个花岗闪长玢岩样品的化学分析结果, SiO₂ 为 60.04% ~ 75.02%,也系中酸性钙碱性系列,与上述认识一致。微量元素分析结果显示其富集 Th 和 LREE (La 和 Pr),强烈亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti 和 Y。岩体稀土元素分析结果显示为右倾型, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 13.4 ~ 21.7, 平均 18.7, 系轻稀土富集型。由稀土元素分馏程度 (La/Yb)_n 为 27.65 - 53.29, 平均 45.33 显示, 稀土分馏程度较高。由轻稀土分馏程度 (La/Sm)_n 为 7.78 ~ 10.34, 显示轻稀土中等程度分异; 重稀土分馏程度 (Gd/Yb)_n 为 3.21 ~ 4.03, 表明轻稀土较重稀土分异程度高。δEu (几何平均值) 为 0.98 ~ 1.36, 平均 1.10, Eu 为微弱正异常。δCe (几何平均值) 为 0.92 ~ 1.01, 平均 0.98, Ce 无明显异常。在 Rb - Y + Nb 构造判别图上, 投点落在岛弧或活动大陆边缘构造区。就锆石 Hf 同位素示踪来看, 矿区花岗闪长玢岩按 SHRIMP 单点年龄计算, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 0.7 ~ 13.7, 主要在 -3 ~ -1 间, 表明岩浆源于地幔, 混有少量地壳物质, 表明岩浆物质可能来自地壳岩石部分熔融, 壳幔混合, 为同熔 (I) 型花岗岩类, 与德兴含矿花岗闪长斑岩相同^[17]。两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM}) 为 1.16 ~ 2.07 Ga, 主要在 1.2 ~ 1.4 Ga 间, 表明在 1.30 Ga 左右发生过地壳增生。

2.2.3 成矿流体

周济元等^[5]依据成矿与燕山期第一、三期花岗闪长玢岩的密切关系, 将找矿作用划分为第一成矿期、第二成矿期和表生作用期。第一成矿期与第一期黑云母花岗闪长玢岩有关, 分为气化-高温热液期和中-低温热液期。前者, 随气化-高温热液活动, 在岩体周围 400 m 范围内的中石炭统黄龙组上部灰岩和下部灰质白云岩热接触蚀变成为大理岩、结晶

白云岩，并由于接触蚀变和双交代作用形成石榴子石、透辉石、硅灰石、磁铁矿和含铜黄铁矿—黄铜矿等组成矽卡岩和含铜矽卡岩；后者为矿床主要成矿期，按照矿物共生组合分为黄铁矿—黄铜矿阶段、黄铜矿—闪锌矿阶段、含铜黄铁矿阶段和碳酸盐阶段。第二成矿期与第三期花岗闪长玢岩有关，随着岩浆侵入相伴产生的热液成矿作用，主要形成黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、石英和方解石。矿物颗粒细小，构成致密块状构造。闪锌矿、方铅矿颜色较浅，呈灰—灰白色。穿插主矿体时，叠加部位铜含量变富，成为富矿体。据刘若兰^[5]研究，10个矿物20次包裹体测温结果为330~170℃；其中6个黄铁矿为330~170℃，温度变化大、范围宽；3个黄铜矿为200~220℃，温度中、范围窄；1个闪锌矿为330~300℃，温度高、范围较窄。从占比组成看330~300℃为4个，占20%；200~240℃为12个，占60%；170~180℃为4个，占20%。总体显示为中低温。表生作用期，主要形成褐铁矿、赤铜矿、蓝铜矿等表生矿物。

据李保华^[22]对该矿床主要矿体不同类型矿物的包裹体测温结果显示I号矿体块状含铜黄铁矿石，石英、黄铁矿均一温度为(281±15)℃，爆裂温度为310℃；II号矿体块状含铜黄铁矿石，石英、黄铁矿均一温度为(286±19)℃，爆裂温度为315℃；两者矿物的包裹体少，直径2~8 μm，气液两相为主，气液比15%~60%，以30%~50%为主。块状黄铜矿石，石英、黄铁矿、黄铜矿均一温度为(262±14)℃，爆裂温度为290℃，包裹体小而少，气液比10%~20%。块状多金属矿石，石英、闪锌矿爆裂温度为270℃。条带状闪锌矿石、石英均一温度为(154±27)℃。包裹体少而小，气液比为5%~15%。刘家军等^[22]依据共生硫化物对 $\delta^{34}\text{S}$ 计算硫同位素平衡温度为339~245℃。这些测温、计算数据和包裹体特征都较为一致。

张伯声^[16]认为包裹体有三种类型：I类富液相包裹体，均一温度为220~377℃，大多为280~340℃，盐度0.63%~8.00% NaCleqv，中低盐度。II类富气相包裹体，均一温度为296~334℃，盐度为1.22%~2.00% NaCleqv，低盐度。III类含石盐子晶包裹体，均一温度为290~326℃，盐度为31.87%~38.16% NaCleqv，高盐度。可见，II、III类包裹体均一温度相近、盐度一低一高；而I类包裹

体均一温度高于II、III类包裹体，盐度则位于II、III类包裹体之间。充分显示中高温、中低盐度流体因强烈沸腾而分离为中高温、低盐度的气相和中高温、高盐度含子晶（透明立方体石盐和不透明黑色固体）的流体不均匀捕获。表明该矿床在成矿过程中流体发生强烈沸腾作用。此与国内及世界一些斑岩型、矽卡岩型和热液型矿床成矿流体特征相似，而与海底喷流沉积型矿床成矿流体：中温(200~350℃)、中低盐度(4%~8.4% NaCleqv)不同，说明该矿床是岩浆热液成因，而非海底喷流沉积成因。

张伯声^[16]对该矿床主成矿期石英H-O同位素测试结果显示I号矿体的 $\delta^{18}\text{O}=8.1\text{‰}\sim 9.5\text{‰}$ ， $\delta\text{D}=-61\text{‰}\sim -70\text{‰}$ ；II号矿体的 $\delta^{18}\text{O}=9.6\text{‰}\sim 10.6\text{‰}$ ， $\delta\text{D}=-72\text{‰}\sim -75\text{‰}$ 。与Sheppard et al. (1969)^[24]岩浆水的数据($\delta^{18}\text{O}=5.5\text{‰}\sim 9.5\text{‰}$)，I号矿体(8.1‰~9.5‰)一致，II号矿体(9.6‰~10.6‰)接近。该矿床成矿热液（特别是I号矿体）主要来自岩浆水，即岩浆热液。

2.2.4 成矿物质来源

周济元等^[5]对该矿床矿石中4个黄铁矿硫同位素测定结果显示， $\delta^{34}\text{S}$ 为1.12~2.13‰， $\delta^{32}\text{S}$ 为22.173~22.195‰。变化范围窄，与陨石硫同位素组成相近。张伯声^[16]对18个黄铁矿和黄铜矿硫同位素测定结果显示，I号矿体， $\delta^{34}\text{S}$ 为0.78~4.04‰，绝大多数为0.93~2.22‰；II号矿体为1.33~4.77‰，绝大多数为1.57~3.23‰；变化范围较窄，呈塔式分布，也与陨石硫同位素组成相近；I号矿体略小于II号矿体，黄铁矿(0.78~4.04‰)略小于黄铜矿(1.33~4.77‰)。显示其来自岩浆分异出或围岩^[8,10]淋滤出的硫^[18]。

在刘家军等^[22]和徐跃通^[14]的研究中，7个方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.958\sim 18.148$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.549\sim 15.661$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.976\sim 38.341$ ，2个黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.130\sim 18.148$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.580\sim 15.586$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.054\sim 38.120$ ，变化较小，且较为均匀，属正常铅范围。将这些数值投入Pb构造模式图，Pb同位素组成投点主要分布在造山带附近。显示Pb来自地壳和地幔物质的混合。

周济元等^[5]用该矿床矿石中二个方解石进行C-O同位素测定，其 $\delta^{13}\text{C}=-2.259\text{‰}\sim -4.397\text{‰}$ (PDB)， $\delta^{18}\text{O}=-20.545\text{‰}\sim -16.117\text{‰}$ (PDB)，

变化范围较小,显示成矿物质来自深部,与同期岩浆活动密切相关,与 D E White^[25]研究秘鲁卡萨帕尔卡多金属热液矿床的 $\delta^{13}\text{C} = -3.6\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$ (PDB) 接近,也认为成矿物质主要来自深部的结论一致。

对于海底沉积矿床 $\delta^{34}\text{S}$,依据 Sangster^[26]对显生宙 110 个块状硫化物矿床硫同位素数据的研究,把某一特定地质时代层状硫化物矿床硫同位素平均值与同时代海水硫酸盐硫同位素值对比,结果表明,块状硫化物矿床硫来源于同时代海水硫酸盐。以海水硫酸盐为硫源的块状硫化物矿床, $\delta^{34}\text{S}$ 值往往呈较大的正值和较小的负值。如, $\delta^{34}\text{S} = 20\text{‰}$ 的海水硫酸盐,在 $>250\text{ }^\circ\text{C}$ 、经还原, $\delta^{34}\text{S}$ 可变为 $-7\text{‰} \sim 20\text{‰}$,峰值位 $5\text{‰} \sim 15\text{‰}$ ^[27-28]。将这一结果与建德铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 对比,差异十分显著。证明建德铜矿床的硫非来自海水硫酸盐沉积硫化物,而与东乡铜矿床、德兴斑岩铜矿床和锡矿山锑矿床等类似的岩浆热液矿床的硫同位素组成相近。

2.2.5 矿床成因和成矿机制

(1) 矿床成因

由上可见,该矿床成因争论焦点是岩浆热液成因还是海相火山热液沉积成因。二者的主要区别是在地表以下还是以上;是由地下岩浆热变质、热液蚀变交代、结晶充填成矿,还是在地表以上火山热液喷涌海底、被海水稀释后结晶沉积成矿;是一期(燕山期或海西—印支期)还是二期叠加改造形成。

提出海相火山热液沉积成因的主要依据是,在中石炭统黄龙组下岩性段灰质白云岩中发现少量火山岩、硅质岩和碧玉岩,胶黄铁矿,条带状、褶皱状和角砾状构造等火山热液或热水沉积“标志”,以及依据角砾岩圈出所谓“喷流口”,以 Pb 同位素单阶段模式年龄 (309 Ma) 作为“指示最新成矿年龄及矿石年龄”等^[13-14,22-23]。

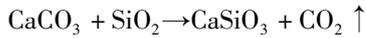
众所周知,火山热液是岩浆期后热液的一种特殊形式。它与岩浆期后热液的区别是,火山热液中的水主要不是岩浆水,而往往以地表水为主,海相则以海水为主。火山热液析出的时间是在剧烈火山爆发以后,或两次火山爆发的间歇期^[29]。由此看来,上列火山热液沉积“标志”,并非与火山热液或热水成矿有必然的联系。所谓胶黄铁矿,是指凝胶状黄铁矿,成分中富含水,外观作蛋白

状或肉冻状,是胶体成因的黄铁矿。胶黄铁矿不是一个矿物名称的种^[29]。同样,硅质岩、碧玉岩等也是胶体成因的。而胶体成因可以是岩浆热液,也可以是海水溶液。陈雷等^[19]的镜下光片照片显示,条纹状、揉褶状构造矿石中的金属矿物晶体颗粒虽细,但都完整地撒落在褶皱和条带中,未有变形和破裂的迹象,表明褶皱和条带构造都是在成矿前已形成,成矿后未有任何变化;角砾状构造矿石中,黄铁矿形成、破碎后被黄铜矿充填胶结,并完整保存^[16],表明黄铜矿充填胶结后也未发生变化。前者是海西—印支期沉积或变形过程中形成的条带和褶皱,在燕山期成矿后未发生变形、破裂;后者在黄铁矿形成、破裂后,被黄铜矿充填胶结后也未再发生变形和破裂。依据采矿和勘查资料,以角砾岩圈出的所谓“喷流口”也没有证实^[10]。磁黄铁矿和辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄分别为 $(121 \pm 12) \sim (122.5 \pm 8.7)$ Ma (早白垩世)^[19] 和 $160.3 \sim 164.1$ Ma (中侏罗世)^[18],均为燕山中期,没有发现一个海西—印支期。因此以 Pb 同位素单阶段模式年龄 (309 Ma) 作为“指示最新成矿年龄及矿石年龄”的假设也就不能成立。因而,“叠加改造形成”的观点支撑依据不足,而该矿床是燕山中期岩浆热液成因的可能性更大。

由上可见,该矿床的形成,与花岗闪长玢岩、灰质白云岩围岩和断裂、褶皱有密切关系。近来研究^[29]认为,在岩浆熔融体中存在“群聚态组”,即由硅氧四面体聚合而成 $[\text{Si}_x\text{O}_y]^{z-}$ 类型的络阴离子,和氧离子围绕金属阳离子而成的配位氧合离子。因此,认为岩浆主要是离子的熔体。当熔体的浓度和成分变化时,群聚态组会发生各种复杂的分解和结合,从而结晶各种结构的硅酸盐岩。而通常认为,岩浆是一种成分极其复杂的高温硅酸盐熔融体。

在矿区,当中酸性岩浆流体侵入与围岩-灰质白云岩接触时,首先发生热变质作用,引起矿物重结晶,颗粒变粗,产生大理岩化,并随远离岩浆岩体结晶变细以致消失,没有发生交代或交代作用很微弱,且局限在围岩部分,即外接触带。其次,岩浆熔融体中富含挥发性组分的气体和溶液进入围岩-灰质白云岩,带出 SiO_2 、 Al_2O_3 等组分,使灰质白云岩的 CaO、MgO 等组分被交代带出而进入熔融体,产生所谓双交代作用。这样,

以熔融体与围岩接触面为界, 在内、外接触带发生成分、结构、构造的不同变化, 形成一系列接触蚀变交代矿物。例如: 硅灰石 $\text{Ca}_3 [\text{Si}_3\text{O}_9]$, 其中 CaO 48.25%, SiO_2 51.75%, 常见于不纯灰岩的接触变质带, 其由 SiO_2 与方解石 (CaCO_3) 反应而成:



在外接触带, 早期有透辉石 ($\text{CaMg} [\text{Si}_2\text{O}_6]$)、石榴子石 (钙铁榴石, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2 [\text{SiO}_4]_3$); 钙铝榴石, $\text{Ca}_3\text{Al}_2 [\text{SiO}_4]_3$)、硅灰石 ($\text{Ca}_3 [\text{Si}_3\text{O}_9]$) 等无水硅酸盐矿物; 晚期有透闪石 ($\text{Ca}_2\text{Mg}_5 [\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2 (\text{OH})_2$)、绿帘石 ($\text{Ca}_2 (\text{Al}, \text{Fe})_3 [\text{SiO}_4] [\text{Si}_2\text{O}_7] \text{O} (\text{OH})$) 等含水硅酸盐矿物, 后者还往往交代前者, 组成不同类型矽卡岩及其分带。矽卡岩的形成温度约为 600 ~ 400 °C, 其中的金属矿物形成温度则在 400 ~ 200 °C, 形成深度一般不大, 约在地表以下几百米至 2 km, 如果深度过大, CaCO_3 和 CO_2 不易分解和逸散, 碳酸盐岩也就不能形成矽卡岩^[29]。在内接触带, 有绿泥石 ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_{12} [(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$)、绿帘石、绢云母 ($\text{KAl}_2 [\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] (\text{OH}, \text{F})_2$)、石英 (SiO_2)、钾长石 ($\text{K} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)、高岭石 ($\text{Al}_4 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_8$) 和黄铁矿 (FeS_2) 等。

岩浆热液是当岩浆流体往上侵入并冷却过程中分泌出来的以 H_2O 为主的含挥发性组分的流体 (据张伯声^[16]对矿石石英中流体包裹体激光拉曼光谱图谱研究, I 类包裹体含 CO_2 、 H_2O ; II 类包裹体含 CO_2 、 N_2 、 H_2O ; III 类包裹体含 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 H_2O)。随着温度、压力的下降, 由气水溶液转变为热水溶液。相应, 接触交代作用也呈现阶段性, 前期以气化作用为主, 后期则以热液作用为主。在这个过程中, 形成磁铁矿、赤铁矿、辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿等。因此, 在外接触带常富集含铜等矽卡岩型及其他类型矿 (床) 体; 在内接触带则形成含铜云英岩型及其他类型矿 (床) 体。

依据包裹体测温 and 激光拉曼光谱分析结果^[16], I、II 号成矿流体矿体具有相近的性质: 均一温度、盐度分布范围基本相近; I 号矿体的均一温度相对较高、分布范围较宽, II 号矿体相对较为集中, 在视域内同时出现 II、III 类包裹体的均一温度相近, 而盐度却变化较大, 呈现一低一高两个端员, 显示在沸腾条件下捕获的特征。同时,

I 类包裹体的均一温度较高, 且高于 II、III 类包裹体, 而盐度则介于其两个端点之间, 又显示不均匀捕获的特征。表明中高温、中低盐度流体发生强烈沸腾而分离出中高温、低盐度富气相流体和中高温、高盐度液相流体, 残留中温、中盐度流体的演化过程。

(2) 成矿机制

当岩浆流体从深部向浅部沿断裂、褶皱虚脱空间上升运移过程中, 一方面对围岩产生热变质, 另一方面从围岩中萃取成矿物质, 并经历降温、降压过程。当围压降至流体饱和气体压力时, 分异出高温含矿流体, 沿着断裂、褶皱虚脱空间和灰质白云岩层及其层间破碎带运移、储存, 随着温压继续下降, 发生强烈沸腾作用, 引起相分离, 形成高盐度、较高浓度的液相流体和低盐度的气相流体^[30-31]。而流体中的一部分气体逸散, 提高了金属元素浓度, 使 Cu 过饱和而沉淀; 同时, 由于挥发性组分如 CO_2 等酸性组分逸散, 流体的 pH 值上升, 还原硫浓度增加, 随着温压和氧逸度变化, Cu 的络合变得不稳定而发生分解, 与硫反应而沉淀。可见, 流体沸腾作用可能是该矿床形成的重要成矿机制。

3 结论

(1) 该矿在原探明储量即将采空, 成为危机矿山之际, 经系统调查研究后认为, 该矿床系岩浆热液成因, 并提出矿液运移理论, 首次采用计算机进行数学物理模拟, 对矿区变形场、构造应力场、元素分布趋势、矿液运移势和理论成矿值等计算, 进行成矿预测, 所圈预测部位均被后来开采和勘查验证, 由不到 10 万吨的小型变为 35 万吨以上的中大型矿床, 并在外围找到类似的高岭铜矿床。表明对该矿床成矿条件和控矿因素的分析、矿液运移理论和成矿预测的技术方法是合理的、可行的和正确的。

(2) 矿区花岗闪长岩的 K-Ar 同位素年龄为 117.88 ~ 122.26 Ma (早白垩世), 锆石 U-Pb 同位素年龄为 158.3 ~ 160.6 Ma、(160.6 ± 1.3) ~ (164.5 ± 3.1) Ma 和 167.1 ~ 173.4 Ma (中侏罗世), 以其穿插褶皱了的上侏罗统老村组地层检验, 前者更接近地质事实。据磁黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 (121 ± 12) ~ (122.5 ± 8.7) Ma

(早白垩世)和160.3~164.1 Ma(中侏罗世),没有一个其它时代年龄。同样表明,前者较后者更接近地质事实,并与K-Ar同位素成岩年龄相近。结合地层及其相互关系,华夏系与新华夏系构造及其复合关系等表明,该区经历海西-印支期和燕山中期二次褶皱构造、岩浆喷出或侵入活动。

(3) 岩石地球化学研究表明花岗闪长玢岩系中酸性、钙碱性系列,微量稀土元素特征、Pb同位素组成主要分布在造山带附近;锆石Hf同位素显示岩浆源于地壳岩石部分熔融,具有壳幔混合特征;两阶段Hf模式年龄揭示1.3 Ga左右发生过地壳增生;为同熔(I)型花岗岩类,产于岛弧或活动大陆边缘构造环境。

(4) 成矿流体包裹体有三种类型: I类富液相包裹体,均一温度为220~377℃,大多为280~340℃,盐度0.63%~8.00% NaCleqv,中低盐度; II类富气相包裹体,均一温度为296~334℃,盐度为1.22%~2.00% NaCleqv,低盐度。III类含石盐子晶包裹体,均一温度为290~326℃,盐度为31.87%~38.16% NaCleqv,高盐度。充分显示中高温、中低盐度流体强烈沸腾而分离出中高温、低盐度的气相和中高温、高盐度含子晶的液相不均匀捕获。矿石的黄铁矿和方铅矿的Pb同位素单阶段模式年龄为461~309 Ma,显示部分成矿物质源于奥陶纪—中石炭世地层;其中中石炭统黄龙组下岩性段灰质白云岩层的含Cu 0.02%~0.03%,为沉积岩丰度的数倍,表明可能为成矿提供部分物质。H-O同位素投点落在岩浆水区,结合S、Pb、C-O同位素特征,认为成矿物质主要来源于地壳岩石部分熔融、壳幔混合的岩浆分异热液,而非海底热液和热水。

(5) 该矿床是在岩浆流体自下而上侵入、运移过程中发生热变质作用;同时,从围岩特别从灰质白云岩中析出部分成矿物质进入流体。然后,随温压下降,岩浆结晶、沉淀、固结,气液流体分离,与围岩接触带发生双交代作用,接触面两侧分别产生矽卡岩和云英岩蚀变矿化。之后,随温压继续下降,发生强烈沸腾而相分离,气相逸散,金属离子浓度增加,并沿断裂、层间破碎带和向斜转折虚脱部位等低压空间运移聚集,随pH、Eh变化,发生结晶、沉淀、聚集成矿。为典型岩浆热液成因矿床。

(6) 该矿床主要控矿因素为花岗闪长玢岩、

中石炭统黄龙组下岩性段下部灰质白云岩和新华夏系北北东、北北西和北西西向断裂、岭下一松坑坞向斜及其南东翼层间破碎带等构造,结合矿液运移数学物理模拟结果,大理岩化、矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化和硅化等围岩蚀变,地球化学、地球物理异常和褐铁矿-铁帽为找矿标志,可有效指导矿区深部挖潜—探边摸底、区域拓展—寻找新的矿产地。

参考文献/References

- [1] 浙江省地质局第三地质队. 建德铜矿详查地质报告 [R]. 1965.
Third Geological Team of Geological Bureau of Zhejiang Province. Geological report of detailed investigation of Jiande Copper Mine [R]. 1965. (in Chinese)
- [2] 周济元, 余祖成. 浙江建德铜矿床特征及矿液运移理论的研究 [J]. 成都地质学院学报, 1983, (4): 1-22.
ZHOU Jiyuan, YU Zucheng. A study on ore deposit characteristics and ore liquid migration theory in Jiande copper deposit, Zhejiang [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1983, (4): 1-22. (in Chinese)
- [3] ZHOU Jiyuan, MAO Yuyuan, YU Zucheng, et al. The theory of migration of mineralgenetic fluid and the prognosis for ore-prospecting [C] //International Symposium on Geomechanics. Abstracts. Beijing China: Organized by Institute of Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences, 1986.
- [4] 周济元, 黄继钧. 浙江建德铜矿的构造特征及其控岩控矿作用 [J]. 中国地质科学院562综合大队集刊, 1987: 73-87.
ZHOU Jiyuan, HUANG Jijun. A structural characteristics and its rock-controlling and ore-controlling actions of Jiande copper deposits, Zhejiang province [J]. Chinese Academy of Geological Sciences 562 Comprehensive Brigade Journal, 1987: 73-87. (in Chinese)
- [5] 周济元, 黄继钧, 余祖成. 浙江省建德铜矿控矿特征、矿液运移及找矿远景的研究 [J]. 矿物岩石, 1988, 8 (3): 4-5, 1-82.
ZHOU Jiyuan, HUANG Jijun, YU Zucheng. A study on ore-controlling characteristics, ore liquid migration and prospecting prospects of Jiande Copper Mine, Zhejiang Province [J]. Mineral Rocks, 1988, 8 (3): 4-5, 1-82. (in Chinese)
- [6] 周济元, 余祖成, 毛玉元, 等. 动力驱动矿液运移的若干问题与成矿预测 [C] //地质力学文集 (9). 北京: 地质出版社, 1989: 47-58.
ZHOU Jiyuan, YU Zucheng, MAO Yuyuan, et al. Some problems of dynamic-driven ore fluid migration and ore-forming prediction [C] //Commemorating the 100th Anniversary of the Birth of Famous Geologist Professor Li Siguang and the Papers of the International Symposium on Geomechanics. No. 9, Institute

- of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Geology Press, 1989: 47–58. (in Chinese)
- [7] 浙江有色地质勘探公司. 浙江建德铜矿 II 号矿体金银详查地质报告 [R]. 1988.
Zhejiang Nonferrous Geological Exploration Co., Ltd. Geological report on gold and silver detailed investigation of No. 2 ore body in Jiande copper mine, Zhejiang province [R]. 1988. (in Chinese)
- [8] 王执钧. 浙江建德铜矿 II 号矿体勘查模式 [J]. 华东矿产地质, 1990, (2): 11–22.
WANG Zhijun. The II ore body exploration model of Jiande copper mine, Zhejiang [J]. East China Mineral Geology, 1990, (2): 11–22. (in Chinese)
- [9] 浙江省有色地质矿产勘查院. 浙江省建德铜矿松坑坞矿段 33–30 线详查地质报告 [R]. 2000.
Zhejiang Nonferrous Geology and Mineral Resources Survey Institute. Geological report of detailed investigation of Line 33–30 in Songkengwu section, Jiande copper mine, Zhejiang Province [R]. 2000. (in Chinese)
- [10] 杨平舒, 郑平. 浙江建德铜矿区深边部找矿实践与体会 [J]. 矿产勘查, 2010, 1 (5): 468–471.
YANG Pingshu, ZHENG Ping. Exploration practice and experience in the depth and marginal area of Jiande Copper mine area in Zhejiang Province [J]. Mineral Exploration, 2010, 1 (5) 468–471. (in Chinese with English abstract)
- [11] 俞跃平. 浙江建德铜矿松坑坞矿段矿床地质特征及矿石主元素分布规律 [J]. 矿产与地质, 2010, 24 (5): 407–413.
YU Yueping. Geological characteristics of deposit and distribution law of main ore elements in Songkengwu ore block of Zhejiang Jiande copper mine [J]. Mineral Resources and Geology, 2010, 24 (5): 407–413. (in Chinese with English abstract)
- [12] 童明先. 建德高岭铜矿勘查设计暨可行性报告 (预) [R]. 2018.
TONG Mingxian. Exploration design and feasibility report of Jiande Gaoling copper mine (Preview) [R]. 2018. (in Chinese)
- [13] 曹淑英, 刘家军, 李元林. 浙江岭后多金属矿床的海相火山热液沉积成矿特征和成矿模式 [J]. 成都地质学院学报, 1988, 15 (4): 11–20.
CAO Shuying, LIU Jiajun, LI Yuanlin. Geologic characteristics and metallogenetic model of submarine volcanic hydrothermal sedimentary mineralization of the polymetallic deposit in Linghou, Zhejiang, China [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1988, 15 (4): 11–20. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐跃通. 建德铜矿热水沉积硅质岩的发现及其地质意义 [J]. 山东师大学报 (自然科学版), 1997, 12 (1): 54–59.
XU Yuetong. The discovery of hydrothermal sediment cherts in Jiande copper deposit and its geological significance [J]. Journal of Shandong normal University (Natural Science), 1997, 12 (1): 54–59. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郑俊洪. 建德铜矿成矿地质构造研究及应用 [J]. 矿业快报, 2003, 19 (8): 7–8.
ZHENG Junhong. Study and application of geological structure of ore-formation in Jiande copper mine [J]. Express Information of Mining Industry, 2003, 19 (8): 7–8. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张伯声. 浙江省建德铜矿成矿机制研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.
ZHANG Bosheng. Ore-forming mechanism study on Jiande copper deposit, Zhejiang province, China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [17] 贾少华, 赵元艺, 王宗起, 等. 浙江建德岭后铜矿花岗岩闪长斑岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其意义 [J]. 地质学报, 2014, 88 (11): 2071–2085.
JIA Shaohua, ZHAO Yuanyi, WANG Zongqi, et al. Zircon U–Pb dating and geochemical characteristics of granodiorite–porphyry in the Linghou copper deposit, western Zhejiang, and their geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (11): 2071–2085. (in Chinese with English abstract)
- [18] 唐燕文, 杨建领, 梁松松, 等. 建德岭后铜多金属矿床矿床地质特征、成矿期次划分及矿床成因 [J]. 矿物学报, 2015, 35 (S): 57.
TANG Yanwen, YANG Jianling, LIANG Songsong, et al. Geological characteristics, metallogenic stages and genesis of copper polymetallic deposits of Jiandelinhou [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35 (S): 57. (in Chinese)
- [19] 陈雷, 王宗起, 赵元艺, 等. 浙江建德岭后铜矿磁黄铁矿 Re–Os 年代学特征及成矿意义 [J]. 地质学报, 2013, 87 (12): 1864–1873.
CHEN Lei, WANG Zongqi, ZHAO Yuanyi, et al. Re–Os isotopic dating of pyrrhotite in the Linghou Cu deposit, Jiande, Zhejiang province and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (12): 1864–1873. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周济元, 肖惠良. 成矿结构体系及其钨矿找矿意义 [J]. 资源调查与环境, 2006, 27 (2): 110–119.
ZHOU Jiyuan, XIAO Hui-liang. Metallostructural system and its significance of search for tungsten deposit [J]. Resources Survey & Environment, 2006, 27 (2): 110–119. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周济元, 崔炳芳. 成矿体系研究和应用新进展 [J]. 华东地质, 2018, 39 (4): 271–278.
ZHOU Jiyuan, CUI Bingfang. New progress in research and application of metallogenetic system [J]. East China Geology, 2018, 39 (4): 271–278. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘家军, 曹淑英, 李元林. 建德铜矿床的海底喷流沉积成因 [J]. 矿床与地质, 1996, 10 (3): 145–154.
LIU Jiajun, CAO Shuying, LI Yuanlin. Origin of the Jiande copper deposit, Zhejiang [J]. Mineral Resources and Geology, 1996, 10 (3): 145–154. (in Chinese with English abstract)

- [23] 刘家军, 曹淑英. 浙江建德块状硫化物矿床同生沉积成矿地质标志 [J]. 浙江地质, 1998, 14 (1): 50 - 54.
LIU Jiajun, CAO Shuying. The geological sign of syndeositional minerlization of Jiande massive sulfide deposit in Zhejiang province [J]. Geology of Zhejiang, 1998, 14 (1): 50 - 54. (in Chinese with English abstract)
- [24] SHEPPARD S M F, NIELSEN R L, TAYLOR H P. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits [J]. Economic Geology, 1969, 64 (7): 755 - 777.
- [25] WHITE D E. 热液含矿流体的多种来源 [M]. 科学文献出版社, 1979.
WHITE D E. Multiple sources hydrothermal ore-bearing fluids [M]. Scientific Literature Publishing House, 1979. (in Chinese)
- [26] SANGSTER D F. Sulphur and lead isotopes in Strata-bound deposits [M] //WOLF K H. Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits. Amsterdam; Elsevier, 1976: 219 - 266.
- [27] RYE R O, OHMOTO H. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review [J]. Economic Geology, 1974, 69 (6): 826 - 842.
- [28] OHMOTO H, RYE R O. Isotopes of sulfur and carbon [M] //BARNES H L. Geochemistry of Hydrothermal ore Deposits. New York; Wiley, 1979: 509 - 567.
- [29] 南京大学地质系岩矿教研室. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1978.
Department of Geology and Mineralogy of Nanjing University. Crystallography and mineralogy [M]. Beijing: Geology Press, 1978. (in Chinese)
- [30] PICHAVANT M, RAMBOZ C, WEISBROD A. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data; I. Phase equilibria analysis-a theoretical and geometrical approach [J]. Chemical Geology, 1982, 37 (1 - 2): 1 - 27.
- [31] HEINRICH C A. Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2007, 65 (1): 363 - 387.