2017年9月 September 2017

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.09.21

湘东大垄铅锌矿床成矿机理



邵拥军^{1,2}, 隗含涛^{1,2}, 郑明泓^{1,3}, 刘忠法^{1,2}, 熊伊曲^{1,2}, 徐卓彬^{1,2}, 蒋梦同^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院,长沙 410083;

3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局,贵阳 550005)

摘 要: 大垄铅锌矿床位于湘东新华夏构造体系中坊楼北北东向构造带中部南东侧, 邓阜仙复式岩体北端, 矿体 受南北向断裂控制。通过电子探针、流体包裹体和 S、Pb、H、O 同位素研究,分析矿床的成矿物质来源、成矿 物理化学条件,探讨矿床成因及成矿过程。结果表明:矿床的形成与燕山期岩浆活动密切相关,成矿物质具有壳 幔混合的特征,成矿流体主要源于岩浆水,有大气降水的加入;成矿温度属于中低温,成矿初期流体处于弱碱性、 弱氧化的环境,后期向低温、低氧逸度、低硫逸度的环境转换,成矿深度为中深成。综合认为大垄铅锌矿床属于 与燕山期岩浆活动有关的中低温热液铅锌矿床。

关键词: 电子探针; 流体包裹体; 同位素; 成矿机理; 大垄铅锌矿床 中图分类号: P611.1

文章编号: 1004-0609(2017)-09-1916-13

大垄铅锌矿床位于茶陵县城北八团乡境内,大地 构造上位于赣南隆起与湘桂坳陷的交接部位,邓阜仙 复式花岗岩体的北端(见图 1(a))。邓阜仙地区钨锡铌钽 铅锌等资源丰富,代表性矿床有岩体东南部的邓阜仙 钨矿(即湘东钨矿)床、东部的卸甲山铅锌矿床、北部 的金竹垅铌钽矿床和大垄铅锌矿床等(见图 1(a))。前人 围绕邓阜仙岩体地质特征、成岩年龄,邓阜仙钨矿成 矿年龄、成矿流体等方面做过研究,将邓阜仙复式花 岗岩体从早到晚分为3个期次,分别为中粗粒斑状黑 云母花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为(230.0±1.6) Ma、 (225.70±1.6) Ma、(218.22±0.85) Ma^[1])、中细粒二云 母花岗岩(成岩年龄存在争议, 锆石 U-Pb 年龄为 (222.9 ± 1.6) Ma_s (224.3 ± 2.4) Ma^[2]_s (154.4 ± 2.2) Ma^[1] 和(159±0.8) Ma^[3])和细粒白云母花岗岩(白云母 K-Ar 年龄为136 Ma)。蔡杨等^[4]测得邓阜仙钨矿中的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(150.5±5.2) Ma, 与燕山期二云 母花岗岩年龄接近,说明邓阜仙钨矿是二云母花岗岩 岩浆成矿作用的产物。邓阜仙钨矿床成矿流体表现为 中高温、低盐度特征,混合作用与流体温度的降低是 形成矿床的主要因素^[5]。虽然对于邓阜仙岩体及钨矿 床的研究已较为成熟,但针对区内铅锌矿的研究却鲜

有报道,这在一定程度上制约了该区成矿规律的研究。 本文作者以大垄铅锌矿床为研究对象,在矿床地质特 征研究基础上,通过电子探针、同位素以及流体包裹 体研究,探讨了矿床的成矿物质来源、成矿物理化学 条件、矿床成因和成矿过程,总结了成矿机理,对深 化本区成矿理论具有一定促进意义。

文献标志码: A

1 成矿地质背景

大垄铅锌矿床所在的邓阜仙地区出露地层由下至 上依次为中寒武统的变质砂岩、板岩和千枚岩,上泥 盆统锡矿山组灰岩和页岩,上二叠统龙潭组石英砂岩 和炭质页岩, 侏罗系石英砂岩与粉砂岩, 上白垩统戴 家坪组钙质泥岩和泥质砂岩,以及第四系冲积层。区 内断裂广泛发育,主要有 NE 向、NNE 向和 NNW 向 3组,其中 NE 向断裂最为发育。

矿区出露地层主要为第四系,由花岗岩的风化物 组成,分布于矿区北部和西部的低洼地带(见图 1(b))。 矿区内构造较为简单,以断裂为主,按其走向可分为 NE、NW、近 EW 及 SN 向 4 组,其中以 SN 向断裂

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

基金项目: 中国地质调查局资助项目(12120114052101, 12120114052201); 国家自然科学基金资助项目(41472302); 有色金属成矿预测与地质环境 监测教育部重点实验室发展基金资助项目; 中南大学博士生自主探索创新基金资助项目(2015zzts069) 收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2016-12-26



图1 大垄铅锌矿床区域构造关系图(据文献[5]修改)及地质简图:1一燕山期花岗岩;2一印支期花岗岩;3一矿区位置;4— 第四系地层;5一铅锌矿脉及编号;6一煌斑岩脉;7一地质界线;8一断层及编号

Fig. 1 Regional tectonic framework of Dalong region (modified after Ref. [5]) (a) and simplified geological map of Dalong Pb-Zn deposit (b): 1—Yanshan granite; 2—Indosinian granite; 3—Mining area position; 4—Quaternary; 5—Pb-Zn vein number; 6—Lamprophyre vein; 7—Geological boundary; 8—Fault number

规模最大,呈压扭性,为区内控矿、导矿及容矿构造。 SN向断裂总体走向350°~10°,倾向东,局部倾向南, 倾角52°~87°,被硅质所充填,形成六条彼此平行排 列的硅化带(V₁~V₆)。NE向断裂主要为张性,呈雁行 排列,被煌斑岩脉所充填,一般长10~220 m,宽0.1~6 m,走向42°~60°,倾向SE或NW,倾角49°~79°。 NW 及近 EW 向断裂规模较小。矿区岩浆岩主要为燕 山早期(γ²₅)八团岩体,岩性为中粒二云母花岗岩和中 细粒少斑状二云母花岗岩,呈岩基产出,是大垄铅锌 矿床的主要赋矿围岩。

2 矿床地质特征

矿体赋存于硅化带(V₁~V₆)中,主要富集在硅化破碎带具有膨大、分支复合,挤压破碎强,硅化、绿泥

石化发育的地段,均呈短脉状和板状。6 条硅化带中 以 V₁带规模最大,宽 0.5~8.5 m,总体倾向东,倾角 52°~85°,由 V₁-I、V₁-II和 V₁-III等 3 个工业矿体组 成。其中 V₁-I 矿体厚度 0.80~4.33 m,平均 1.81 m, 倾向东,倾角 70°~85°(见图 2)。矿石组份简单,金属 矿物以方铅矿、闪锌矿为主,次为黄铁矿、毒砂,含 少量黄铜矿、斑铜矿。脉石矿物以石英为主,次为萤 石、硅质、绿泥石、绢云母及粘土矿物等。矿石结构 以它形粒状为主,次为包含结构、交代溶蚀结构、碎 裂结构等;矿石构造主要为浸染状、块状构造,次为 条带状、团包状、网脉状和角砾状构造等(见图 3)。

矿区围岩蚀变发育,包括硅化、绿泥石化、绢云 母化、电气石化、叶腊石化、高岭土化、碳酸盐化、 钾化,其中硅化与成矿关系最为密切。根据矿脉穿插 关系及矿物共生组合、矿石组构等特征,将大垄铅锌 矿床成矿过程划分为3个阶段。① 石英-多金属硫化



图 2 V₁-I号矿脉勘探线剖面图: 1一燕山期花岗岩; 2一 硅化带; 3一矿体

Fig. 2 Prospecting line profile map of No. V₁- I vein: 1— Yanshan granite; 2—Silicon zone; 3—Orebody 物阶段(I): 典型矿物组合为石英+闪锌矿+方铅矿± 黄铁矿±黄铜矿,闪锌矿为棕褐色,呈浸染状、块状、 条带状和细脉状产出。②石英-黄铁矿-闪锌矿阶段 (II): 以石英+黄铁矿+闪锌矿组合为标志,闪锌矿为 浅黄色,呈浸染状、条带状和细脉状产出。③石英-萤石-闪锌矿阶段(III): 典型矿物组合为石英+萤石+ 闪锌矿,闪锌矿为浅黄色,呈浸染状和团包状产出。 其中石英-多金属硫化物阶段及石英-黄铁矿-闪锌矿 阶段为主成矿阶段。

3 样品采集及测试方法

本研究用于电子探针分析的样品均采自大垄矿区 第3中段采场或采空区,其中绿泥石样品采自靠近矿 体的蚀变花岗岩,而黄铁矿、黄铜矿样品则采自第3 中段采场处的矿体;流体包裹体及氢氧同位素样品均



图 3 大垄铅锌矿床典型的矿石组构: (a) 黄铜矿包含粒状黄铁矿,呈包含结构,方铅矿穿插交代黄铜矿,呈交代结构(-); (b) 黄铁矿的碎裂结构,以及不规则粒状的第一世代闪锌矿(-); (c) 浸染状构造,闪锌矿集合体呈浸染状分布于石英中; (d) 块状构造,块状方铅闪锌矿矿石; Sp一闪锌矿; Gn一方铅矿; Ccp一黄铜矿; Py一黄铁矿; Qtz一石英

Fig. 3 Typical ore fabrics of Dalong Pb-Zn deposit: (a) Chalcopyrite including granular pyrite presented included texture and metasomatism occurring of galena along edge of chalcopyrite presented rimmed texture(-); (b) Fragmentation texture of pyrite and sphalerite of first generation presented irregular granular texture(-); (c) Impregnation structure, sphalerite aggregate distributed in quartz as dissemination; (d) Massive structure, massive lead-zinc ore; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Q—quartz

来自第3中段采场的新鲜铅锌矿石,且均按成矿阶段 进行了分类(流体包裹体测温及成分分析样品 I 阶段2 件、II 阶段4件、III阶段2件,氢氧同位素分析样品 I、II、III阶段均2件);硫、铅同位素分析的样品采 自第3中段采场,测试对象为铅锌矿石中的黄铁矿、 方铅矿和闪锌矿。

电子探针微区常量元素点分析测试工作在中南大 学地球科学与信息物理学院教育部有色金属成矿预测 重点实验室电子探针微区分析实验室完成。采用日本 岛津公司生产的 EPMA-1720 型电子探针(EPMA),加 速电压选择为 15 kV,电子束流大小为 2.0×10⁻⁸ A, 束斑大小一般为 1 μm,检出限 0.001%,校正方法为 ZAF 校正。元素的峰值计数时间和背景计数时间分别 为 20s 和 10s。绿泥石主要测试 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、 FeO、MnO、MgO、CaO、Na₂O 及 K₂O 共 9 种氧化物 的含量,黄铁矿、黄铜矿测试元素有 As、S、Fe、Pb、 Co、Ag、Ni、Te、Se、Cu 及 Zn 共 11 种元素。

流体包裹体显微测温在中南大学地球科学与信息 物理学院流体包裹体实验室进行,使用仪器为英国产 Linkam THMS-600型地质用冷热台,仪器可操作的温 度范围在-196~600 ℃之间。经校准,温度范围为 -196~30℃时,精度为 0.1 ℃;温度范围为 30~600 ℃ 时,精度为 1 ℃。本次实验主要通过显微冷热台测定 了包裹体的均一温度,水溶液包裹体的冰点温度或二 氧化碳络合物的熔化温度,利用 BROWN^[6]的 FLINCOR 计算机程序,计算了包裹体的盐度和密度, 采用经验公式估算了成矿压力。

流体包裹体气液相成分分析在核工业北京地质研 究院分析测试研究中心完成。测试气相成分仪器为美 国 PerkinElmer 公司 Clarus600 气相色谱仪。实验条件 为温度 25 °C,载气气体 Ar₂气,载气气流 25 mL/min, 载气压力 100 kPa,检测器 TCD,柱箱温度 120 °C, 热导检测器温度 150 °C,包裹体的爆裂温度为 550 °C。 测试液相成分使用仪器为美国 DIONEX-500 型离子 色谱仪。

硫铅同位素测试在广州澳实矿物实验室完成。硫 同位素组成由 MAT-251 质谱仪测定,采用标准为国 际标准 VCDT,分析精度为±0.2×10⁻³;铅同位素样 品溶解、分离后,在相对湿度 36%,室温 20 ℃的条 件下,根据标准 GB/T17672—1999《岩石中铅锶钕同 位素测定方法》,利用英国 GV 公司生产的 ISOPROBE-T 热电离质谱仪测定其同位素比值,结果 用国际标样 NBS981 进行校正,误差在 2σ 以内。

氢氧同位素测试在核工业北京地质研究院分析测 试中心完成,使用仪器为德国 Finnigan 公司生产的 MAT-253 稳定同位素质谱仪, 氢同位素组成通过锌还 原法测定, 氧同位素组成采用常规 BrF_5 法测定, 氢氧 同位素测试精度分别为 $\pm 2 \times 10^{-3}$ 和 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 。

4 实验结果

4.1 电子探针分析

4.1.1 绿泥石

在蚀变岩体中绿泥石较为常见,多呈自形片状结构,可见呈黑云母假象(见图 4)。由于个别绿泥石粒径较小,且与其他矿物共生,导致分析结果可能会出现误差,因此,首先利用 FOSTER^[7]提出的绿泥石判定指标(w(Na₂O+K₂O+CaO)<0.5%时,绿泥石没有被混染)将被混染的绿泥石进行了剔除。由于通过电子探针直接测试得的 Fe 氧化物数据只有 FeO^T的含量,故而采用郑巧荣^[8]提出的电价差值法计算了绿泥石中 FeO 与 Fe₂O₃的含量,进而以 14 个 O 原子为基础计算了绿泥石的特征值。绿泥石成分分析结果及计算的特征值如表 1 所 lie。

本区蚀变岩体中绿泥石 SiO₂ 含量为 25.13%~ 25.95%, 平均值为 25.40%; Al₂O₃ 含量为 17.73%~ 20.50%, 平均值为 20.37%; FeO 含量为 25.21%~



图 4 绿泥石镜下特征(-): Chl—绿泥石; Ms—白云母; Pl— 斜长石; Q—石英; Mc—微斜长石

Fig. 4 Microscopic characteristics of chlorite mineral: Chl— Chlorite; Ms—Muscovite; Pl—Plagioclase; Q—Quartz; Mc— Microcline

中国有色金属学报

27.33%, 平均值为 26.14%; MgO 含量为 15.08%~ 16.44%, 平均值为 15.66%。总体上具有低硅高铝高镁的特征。

4.1.2 黄铁矿

黄铁矿在矿床中分布较为广泛,主要呈现自形-半自形粒状及碎裂状产出(见图 3(a)和(b))。电子探针 测试数据表明(见表 2),第一阶段的黄铁矿中 w(S)为 53.608%~54.533%,平均值为 54.006%;w(Fe)为 44.625%~46.079%,平均值为 45.421%。严育通等^[9] 提出用 δ Fe 和 δ S 进行黄铁矿的主量元素标型特征分 析,其中 δ Fe=[w(Fe)×100-46.55]/46.55×100, δ S= [w(S)×100-53.45]/53.45×100,w(Fe)和w(S)理论值 分别为 46.55%和 53.45%。 δ Fe 和 δ S 既可表示质量的 偏离程度,也可表示原子个数的偏离程度。矿区中黄 铁矿的 w(Fe)/w(S)值范围为 0.828~0.845, 平均值为 0.84, 小于标准值 0.875; S 和 Fe 的原子个数比为 2.07~2.11, 平均值为 2.08; δFe 和 δS 值分别为 -4.14~-1.01、0.30~2.03, 平均值分别为-2.43 和 1.04, 表现出亏 Fe、富 S 的特征。

BRALIA 等^[10]对不同成因类型黄铁矿的 Co、Ni 含量进行系统研究后认为:沉积黄铁矿 w(Co)/w(Ni) 小于 1,平均值为 0.63;热液(脉状)黄铁矿的 Co、Ni 含量变化较大,1.17<w(Co)/w(Ni)<5;火山喷气块状 硫化物矿床 w(Co)/w(Ni)比值变化范围为 5~50,平均 值为 8.7。研究区内黄铁矿的 w(Co)/w(Ni)值为 1.70~6.92,平均为 3.99,除个别数值外,大多落入热 液黄铁矿的范围内,表明本区的黄铁矿属于热液成因。 一般来说,w(Co)/w(Ni)比值越大,矿物的形成温度

表1 绿泥石电子探针成分及特征值

Measuring		w/%										tionic r	(n)	Temperature/	
ivicusuring						/0					Cu	cionic i	unioer	(n)	°C
point No.	SiO ₂	TiO ₂	Al_2O_3	FeO^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	Total	Si	Al^IV	Fe ²⁺	${\rm Mg}^{2^+}$	178
1	25.38	0.56	20.35	25.37	0.63	15.65	0.17	0.07	0.2	88.39	2.66	1.34	2.1	2.44	167
2	25.58	0.11	20.85	25.21	0.46	16.44	0.22	0.03	0.23	89.12	2.64	1.36	1.98	2.53	173
3	25.23	0.08	21.5	25.71	0.59	16.32	0.17	0.05	0.26	89.92	2.59	1.41	1.94	2.49	165
4	25.95	0.37	20.78	27.33	0.44	15.39	0.06	0.16	0.21	90.68	2.66	1.34	2.18	2.35	161
5	25.17	2.18	17.73	25.89	0.44	15.28	0.06	0.14	0.23	87.12	2.7	1.3	2.26	2.45	170
6	25.27	0.19	20.63	27.32	0.51	15.52	0.2	0.01	0.28	89.93	2.61	1.39	2.09	2.39	165
7	25.13	1.31	20.09	25.28	0.49	15.08	0.13	0.07	0.29	87.85	2.66	1.34	2.22	2.38	166
8	25.46	0.16	20.24	26.75	0.5	15.42	0.13	0.02	0.34	89.02	2.66	1.34	2.11	2.4	171
9	25.3	0.09	20.98	26.97	0.5	15.65	0.09	0.11	0.17	89.87	2.61	1.39	2.07	2.41	165
10	25.56	0.37	20.6	25.54	0.61	15.81	0.06	0.08	0.28	88.9	2.66	1.34	2.07	2.45	178

表2 黄铁矿电子探针成分

Table 2 EMPA analysis results of pyrite

Measuring						W/	/%					
point No.	S	Fe	Te	Co	Ni	Cu	Zn	Mn	Se	As	Pb	Total
1	54.481	45.767	0.003	0.019	0.007	0.07	0	0	0.032	0.287	0.05	100.716
2	53.628	45.28	0.012	0.083	0.012	0.039	0.004	0.021	0.019	0.909	0.08	100.087
3	53.853	45.456	0.004	0.073	0.043	0.012	0.014	0.015	0.021	0.524	0.08	100.095
4	53.676	45.332	0.014	0.009	0.004	0	0	0.016	0.011	0.237	0.07	99.369
5	54.533	46.079	0.042	0.024	0.004	0.052	0.027	0.005	0.034	0.186	0.09	101.076
6	53.608	45.128	0.021	0.06	0.012	0.199	0	0	0.024	0.195	0.16	99.407
7	53.855	44.625	0.011	0.043	0.014	0.015	0.058	0	0.018	0.461	0.05	99.15
8	54.229	45.747	0.06	0.057	0.019	0.101	0.046	0	0.007	0.223	0.17	100.659
9	54.349	45.778	0.001	0.083	0.013	0.086	0.001	0.007	0.002	0.298	0.08	100.698
10	53.844	45.019	0.035	0.064	0.022	0.116	0.014	0	0.034	0.412	0.03	99.59

1921

越高,研究区内黄铁矿 w(Co)/w(Ni)比值不大,表明其 形成温度不高。

Se、Te 为黄铁矿的标型元素, w(S)/w(Se)和 w(Se)/w(Te)同样具有标型意义^[9,11],可用于区分不同 成因的黄铁矿。沉积成因的黄铁矿 w(Se)、w(Te)分别 为 0.5×10⁻⁶~2.0×10⁻⁶ 和 0.35×10⁻⁶~3.0×10⁻⁶, w(S)/w(Se)比值为 25×10⁻⁶~50×10⁴, w(Se)/w(Te)比值 为 0.2~4;而岩浆热液成因的黄铁矿 w(Se)、w(Te)分别 为 20×10⁻⁶~50×10⁻⁶和1×10⁻⁶~2.67×10⁴, w(Se)/w(Te) 比值为 0.4~75^[9,12]。研究区内黄铁矿的 w(Se)介于 20×10⁻⁶~340×10⁻⁶之间,平均值为 20.2×10⁻⁶; w(Te) 介于 10×10⁻⁶~600×10⁻⁶,平均值为 20.3×10⁻⁶; w(Se)/w(Se)比值介于 1584~27175之间,平均值为 5530; w(Se)/w(Te)比值介于 0.1~10.7 之间,平均值为 2.5, 这些特征均与岩浆热液成因的黄铁矿接近。

4.1.3 黄铜矿

研究区内黄铜矿主要呈团包状、脉状,与黄铁矿、 方铅矿等共生,可见其包含黄铁矿形成包含结构(见图 5),或被方铅矿交代,呈镶边结构。

黄铜矿电子探针分析结果(见表 3)显示,黄铜矿中 w(Cu)为 30.441%~34.396%,平均值为 32.711%;w(Fe) 为 28.153%~30.028%,平均值为 29.346%;w(S)为



图 5 黄铜矿的镜下特征: Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp— 黄铜矿; Py—黄铁矿



34.400%~35.810%, 平均值为 34.976%。黄铜矿中常 量元素含量与标准值(Cu: 34.56%, Fe: 30.52%, S: 34.92%)相比,均显示 Cu、Fe 含量偏低, S 含量偏高 的特征,这可能与成矿流体中含有大量的 SO₄²⁻有关, 同时也反映了成矿过程处于氧化环境^[11]。

4.2 流体包裹体特征

4.2.1 包裹体岩相学特征

流体包裹体岩相学研究表明,大垄铅锌矿床与矿 化伴生的石英中发育原生、次生及假次生等 3 种类型 包裹体,大小多为 4~6 μm。其中原生包裹体含量最多, 主要为以液相为主的气液两相包裹体,且不同成矿阶 段的流体包裹体岩相学特征具有相似性。包裹体大小 为 2~12 μm,外形多为椭圆状、长条状及不规则状, 多呈孤立状分布(见图 6)。室温条件下,包裹体气相充 填度介于 10%~25%之间,所测包裹体加热过程中都均 一至液相。

4.2.2 包裹体温度、盐度和密度

对各成矿阶段石英中的包裹体进行了冷冻法及均 一法测温,测温结果及计算所得的盐度、密度等物理 参数列于表 4,并绘制了温度、盐度直方图(见图 7)。

结合表 4 和图 7 可知,石英-多金属硫化物阶段 石英中的包裹体均一温度范围为 172~297 ℃,平均为 222 ℃,峰值为 220~260 ℃;石英-黄铁矿-闪锌矿阶 段石英中的包裹体均一温度范围为 136~201 ℃,平均 为 163 ℃,峰值为 140~180 ℃;石英-萤石-闪锌矿阶 段石英中的包裹体均一温度范围为 102~180 ℃,平均 为 130 ℃,峰值为 100~140 ℃。总体看来,随着成矿 作用的进行,温度逐渐降低。

各成矿阶段盐度(NaCl_{eq})分别为 2.79%~9.45%、 3.48%~9.32%和 2.79%~9.45%,平均值分别为 6.25%、 6.38%和 6.01%,盐度相差不大,主要集中于 5%~7%。 计算得出各阶段成矿流体的密度范围相似,介于 0.76~0.99 g/cm³之间,小于 1 g/cm³。综上所述,研究 区成矿流体属于中低温、中低盐度的低密度流体。 4.2.3 成矿压力

根据流体包裹体均一温度和盐度,应用邵洁涟^[13] 计算盐水流体压力的经验公式: *p=p*0t_h/t₀(式中: *p*o=219+2620*ω*s; *t*0=374+920*ω*s; *t*h 为均一温度; *ω*s 为成矿流体盐度; *p* 为成矿压力, 10⁵Pa), 求得相应 成矿流体压力。各成矿阶段成矿流体压力分别为: I 阶段 47.5~83.0 MPa,平均值为 61.5 MPa; II阶段 37.2~56.0 MPa,平均值为 45.3 MPa; II阶段 28.3~49.1 MPa,平均值为 36.0 MPa。成矿压力从 I 到III阶段, 逐渐减小。

表 3	黄铜矿	电子排	探针成分
-----	-----	-----	-------------

 Table 3
 EMPA analysis results of chalcopyrites

Measuring	w/%										
point No.	Se	S	Fe	As	Со	Te	Ni	Cu	Mn	Total	
1	0	34.478	28.954	0.114	0.04	0.007	0	33.604	0.008	97.21	
2	0	34.938	29.133	0.177	0.073	0.007	0	33.583	0.04	97.95	
3	0	34.669	29.454	0.164	0.001	0.011	0	33.19	0.004	97.49	
4	0	34.593	29.369	0.156	0.047	0.016	0	33.503	0	97.68	
5	0	34.868	29.797	0.13	0.016	0	0	33.228	0	98.04	
6	0	35.81	29.52	0.121	0.033	0.038	0	33.165	0.025	98.71	
7	0	35.338	29.155	0.142	0.031	0.002	0	31.637	0.013	96.32	
8	0.025	34.95	29.414	0.152	0.026	0.046	0	31.155	0	95.77	
9	0	35.214	29.081	0.102	0.037	0	0	31.628	0.009	96.07	
10	0.008	35.279	29.763	0.19	0.013	0.014	0	32.155	0.004	97.43	
11	0.007	34.4	28.153	0.099	0.062	0.002	0	30.441	0	93.16	
12	0	35.189	29.059	0.155	0.059	0.027	0	32.431	0.02	96.94	
13	0	35.17	30.028	0.162	0.051	0.031	0	32.484	0.001	97.93	
14	0.032	35.052	29.778	0.038	0.021	0.019	0	33.52	0	98.46	
15	0	35.071	29.81	0.062	0.007	0.014	0	31.755	0.016	96.74	
16	0.006	34.757	29.156	0.181	0.048	0.024	0	34.213	0	98.39	
17	0.012	34.819	29.26	0.172	0.071	0.047	0	34.396	0	98.78	



图6 大垄铅锌矿床中包裹体的显微照片: V—气相; L—液相

Fig. 6 Microphotos of fluid inclusions from Dalong Pb-Zn deposit: V-Gaseous phase; L-Liquid phase

表4 大垄铅锌矿床流体包裹体特征及参数

Table 4	Characteristics and	parameters of	f fluid inc	lusions	from	Dalong	Pb-Zn c	deposit
---------	---------------------	---------------	-------------	---------	------	--------	---------	---------

Sample No.	Mineralization stage	Host mineral	Fluid inclusions' type	Measurement time	$t_{\rm h}/^{\circ}{\rm C}$	t _m (ice)∕ ℃	Salinity/% (NaCl _{eq})	Density/ (g·cm ⁻³)	Pressure/ 10 ⁵ Ma
KSD021	Quartz-Polymetallic	Quartz	V+L	20	173–266	-6.22.1	3.44-9.45	0.80-0.92	483-737
DL002-1	Sulfide Stage (I)	Quartz	V+L	20	170-297	-5.81.7	2.79-8.92	0.76-0.93	475-830
KSD001		Quartz	V+L	10	142-201	-5.42.9	4.70-8.36	0.84-0.95	401-559
KSD015	Quartz-Pyrite-	Quartz	V+L	10	137-177	-6.12.6	4.23-9.32	0.85-0.94	372-493
KSD022	Sphalerite Stage (II)	Quartz	V+L	10	136-193	-5.62.1	3.48-8.65	0.90-0.98	384-534
DL007-1		Quartz	V+L	10	140-201	-5.13.7	5.93-7.80	0.90-0.95	387-560
KSD024	Quartz-Fluorite-	Quartz	V+L	20	102-180	-5.13.7	2.79-9.45	0.90-1.00	284-491
KSD007	Sphalerite Stage (III)	Quartz	V+L	20	102-169	-5.62.2	3.60-8.65	0.93-0.99	283-470



图 7 流体包裹体均一温度以及盐度统计直方图

Fig. 7 Histogram showing homogenization temperatures (a) and salinities (b) of fluid inclusions

4.3 同位素特征

4.3.1 硫同位素

大垄铅锌矿床金属硫化物硫同位素分析结果如表 5 所列。硫同位素分馏平衡是其示踪应用的前提,郑 永飞等^[14]研究发现,如果共生硫化物中 δ³⁴S 值符合黄 铁矿>闪锌矿>方铅矿的特征,则说明硫同位素分馏 达到平衡。研究区硫化物的 δ³⁴S 值按黄铁矿→闪锌 矿→方铅矿递减,表明其同位素分馏达到平衡。硫化

表6 大垄铅锌矿床铅同位素特征

 Table 6
 Composition of lead isotope of Dalong Pb-Zn deposit

物的 δ³⁴S 值均为负值,介于-8.28×10⁻³~-6.22×10⁻³ 之间,离差 2.06×10⁻³,平均值为-7.07×10⁻³,反映 成矿体系在近地表相对开放的高氧逸度环境和较低温 度条件下发生了较强的硫同位素分馏作用。

表5 大垄铅锌矿床硫同位素特征

Table 5Composition of sulfur isotope of Dalong Pb-Zndeposit

No.	Sample number	Test object	δ^{34} S/10 ⁻³
1	KSD015-1	Pyrite	-6.54
2	KSD015-2	Galena	-8.28
3	KSD009	Sphalerite	-7.50
4	KSD021	Sphalerite	-6.89
5	KSD001	Sphalerite	-6.22

4.3.2 铅同位素

大垄铅锌矿床金属硫化物铅同位素分析结果见表 6。硫化物的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb为18.03~18.16,平均为18.09, 极差为0.13;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb为15.57~15.67,平均为15.63, 极差为0.10;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为38.15~38.63,平均为38.48, 极差为0.48。矿石中的铅同位素比值变化不大,反应 其组成比较稳定,同时黄铁矿、方铅矿和闪锌矿的铅 同位素均无明显差别,显示铅源较为一致。

4.3.3 氢-氧同位素分析

大垄铅锌矿床石英的氢、氧同位素直接测定,流体的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 利用 CLAYTON 等^[15]提出的石英与水体系同位素平衡方程计算(t 为各成矿阶段包裹体均一温度平均值):

 $\delta^{18}O_{Q-H_2O} \approx 3.38 \times 10^6/t^2 - 3.40 \times 10^3/t \ (t=200 - 500 \ ^{\circ}C) \ (1)$ $\delta^{18}O_{Q-H_2O} \approx 3.65 \times 10^6/t^2 - 2.59 \times 10^3/t \ (t=100 - 200 \ ^{\circ}C) \ (2)$

结果如表 7 所列,石英 δD_{v-SMOW} 为-65.5×10⁻³~

 -83.4×10^{-3} , $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 为 $8.8 \times 10^{-3} \sim 11.1 \times 10^{-3}$, 均

Sample No.	Test object	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	t/Ma	μ	ω	Th/U	$\Delta \beta$	$\Delta \gamma$
KSD015-1	Pyrite	18.16	15.67	38.63	430	9.63	39.43	3.96	22.45	36.61
KSD015-2	Galena	18.09	15.61	38.59	410	9.56	39.08	3.97	18.54	35.54
KSD007	Galena	18.08	15.64	38.61	452	9.58	39.53	3.99	20.50	36.07
KSD009	Sphalerite	18.03	15.57	38.15	406	9.45	37.16	3.81	15.93	23.73
KSD021	Sphalerite	18.09	15.64	38.43	445	9.58	38.69	3.91	20.50	31.24
ZK1707-4	Granite	18.52	15.71	38.77	223	9.67	38.31	3.83	72.25	58.25
ZK1707-5	Granite	18.78	15.75	38.72	87	9.72	37.07	3.69	77.73	72.47
ZK1707-6	Granite	18.87	15.76	38.78	35	9.73	36.92	3.67	81.48	76.44

表7 大垄铅锌矿床氢氧同位素特征

Table / Compo	and r composition of nyarogen and oxygen isotope of Darong r o Zir deposit									
Sample No.	Mineralization stage	Test object	$\delta D_{V-SMOW}/10^{-3}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/10^{-3}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/10^{-3}$	Ore-forming temperature				
KSD021	I	Quartz	-70.3	10.2	-0.11	242				
DL002-1	1	Quartz	-65.5	8.8	-1.81	243				
KSD015	П	Quartz	-73	10.4	-6.86	171				
KSD022	11	Quartz	-71.8	9.3	-7.96	1/1				
KSD024	Ш	Quartz	-83.4	9.6	-8.57	144				
KSD007	111	Quartz	-80.5	11.1	-7.07	144				

 Table 7
 Composition of hydrogen and oxygen isotope of Dalong Pb-Zn deposit

属于正常岩浆水的范围^[14];石英的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 各阶段 平均值分别为 9.5×10⁻³、9.8×10⁻³、10.3×10⁻³,随 流体演化有增大的趋势,反映可能存在流体的沸腾^[14]。 计算得到流体的 $\delta^{18}O_{H_{2}O}$ 为-0.11×10⁻³~-7.07×10⁻³, I、II、III阶段平均值分别为-0.96×10⁻³、-7.41×10⁻³、 -7.82×10⁻³,呈减小趋势。

5 讨论

5.1 成矿物质来源

5.1.1 成矿物质来源

矿石 δ^{34} S同位素组成为-8.28×10⁻³~-6.22×10⁻³, 处于壳源重融型花岗岩的硫同位素组成范围内,表现 出岩浆硫的组成特点。本区主要金属硫化物(黄铁矿、 闪锌矿、方铅矿)μ 值接近或大于 9.58, Th/U 值和 ω 值接近平均地壳铅的 Th/U 值(4)和 ω 值(36.84)^[17],表 明矿石的铅可能主要来自于上地壳,但有部分外来物 质的混入。研究区内花岗岩的μ值介于 9.67~9.73, ω 值介于 36.92~38.31, Th/U 比值介于 3.67~3.83, 而硫 化物的 μ 值介于 9.45~9.63, ω 值介于 37.16~39.53, Th/U 比值介于 3.81~3.97, 两者铅同位素特征参数相 似,表明岩体与成矿有密切的关系。在铅同位素构造 模式图上(见图 8(a)),样品点主要分布于造山带与上地 壳演化线之间,在铅同位素构造环境分类图上(见图 8(b)),样品点主要分布于上地壳与地幔混合的俯冲带 铅的岩浆作用区,表明矿石中铅属于壳幔混合铅,成 矿作用与岩浆作用有关。综合认为,成矿物质具有壳 幔混合的特征,矿体的形成与燕山期岩浆活动密切相 关。

5.1.2 成矿流体来源

氢氧同位素分析结果在 $\delta D - \delta^{18} O_{H_2O}$ 图解中(见图 9),所有样品点均落入岩浆水与大气降水的过渡带中, 且早期样品点更加靠近岩浆水的范围,晚期样品点往 大气降水线迁移,同时 δD 、 $\delta^{18} O_{H,O}$ 具有从早到晚逐 渐降低的趋势,说明成矿流体主要来源于岩浆水,随 着成矿作用的进行有大气降水的加入。

5.2 成矿物理化学条件

肖荣阁等^[18]认为在热液矿床中伴生的黄铜矿与 黄铁矿中微量元素 Co 的分配系数与温度有一定的关 系,根据实验提出黄铜矿-黄铁矿地质温度计经验公 式:

$t=10^{3}/(1.2921 \times \lg K_{D}^{Cpy-Py}+2.382)-273.15$	(3))
--	-----	---

$$K_{\rm D}^{\rm Cpy-Py} = w(\rm Co)_{Cpy} / w(\rm Co)_{Py} \times 1.53$$

$$\tag{4}$$

式中: *t* 代表黄铜矿与黄铁矿的形成温度, ℃; *K*_D^{Cpy-Py} 为黄铜矿与黄铁矿中微量元素 Co 的分配系数。 *w*(Co)_{Cpy}和 *w*(Co)_{Py}分别代表黄铜矿与黄铁矿中的 Co 含量。通过计算可以得出研究区的 *K*_D^{Cpy-Py} 介于 0.51~0.83 之间,得出两者的形成温度介于 166~225 ℃ 之间。

研究区硫化物 δ³⁴S 值按黄铁矿→闪锌矿→方铅矿 递减,表明其同位素分馏达到平衡^[15],因此可根据共 生硫化物对计温法计算其成矿温度。选用的样品为共 生但无明显交代穿插关系的方铅矿与闪锌矿,采用的 计算公式为 CZAMANSKE 等^[19]提出的共生硫同位素 分馏方程:

$$1000 \ln \alpha_{\rm Sp-Gn} = 7.0 \times 10^5 / t^2 \tag{5}$$

式中: *a*_{Sp-Gn}为分馏系数,*t*为两者的形成温度, ℃。 计算得到矿床硫化物沉淀温度为 184~229 ℃, 与流体 包裹体测温结果一致。

前人研究发现^[20-22]通过绿泥石中 Al、Fe、Mg 的 阳 离 子 数 可 以 计 算 绿 泥 石 的 形 成 温 度 。 采 用 KRANIDIOTIS 等^[20]提出的温度计算公式:

$$t=10^{6} \times [n(\text{Al}^{\text{IV}})+0.35 \times n(\text{Fe}^{2+})/(n(\text{Mg}^{2+})+n(\text{Fe}^{2+}))]+18$$
(6)

式中: t 为形成温度, °C; $n(Al^{IV})$ 、 $n(Fe^{2+})$ 和 $n(Mg^{2+})$ 分别表示基于 O 原子数为 14 计算得到的绿泥石中四 次配位铝的阳离子数、Fe²⁺离子数和 Mg²⁺离子数。通 过计算可以得出大垄矿床中绿泥石的形成温度为 161~178 ℃,平均为 168 ℃。

主成矿阶段的成矿压力介于 37.2~83.0 MPa之间, 平均为 50.7 MPa,采用静岩压力进行计算,得到成矿



图 8 大垄铅锌矿床铅同位素构造模式图和构造环境分类 图:1一地幔源铅;2一上地壳源铅;3一上地壳与地幔混合 的俯冲带铅((3a) 岩浆作用;(3b) 沉积作用);4一化学沉积 作型铅;5一海底热水作用铅;6一中深变质作用铅;7一深 变质下地壳铅;8一造山带铅;9一古老页岩上地壳铅;10一 退变质

Fig. 8 Structure model map(a) and classification of lead isotope tectonic environment(b) of Dalong Pb-Zn deposit: 1—Slow lead source; 2—Upper crustal source lead; 3—Upper crust and mantle mixed subduction zone lead ((3a) Magma magmatism; (3b) Deposition magmatism); 4—Chemical deposition for type lead ; 5—Submarine hot water lead; 6—Deep metamorphism lead lead; 7—Deep metamorphic lead under crust; 8—Orogenic belt lead; 9—Ancient shale upper crustal lead; 10—Retrograde metamorphism lead



图9 大垄铅锌矿床石英氢氧同位素图解

Fig. 9 Hydrogen and oxygen isotope diagram of Dalong Pb-Zn deposit

深度介于 1.38~3.07 km 之间, 平均为 1.88 km。

采用刘斌^[23]给出的计算方法,可估算 NaCl-H₂O 体系包裹体的 pH 值。大垄铅锌矿床石英-多金属硫化 物阶段捕获温度平均值为 242.5 ℃,盐度平均值为 6.25%,捕获压力取 61.5 MPa,经估算 pH=5.75(在 250 ℃,压力 40 MPa 下,纯水的 pH=5.60^[24]);石英-黄铁矿-闪锌矿阶段温度平均值为 171.3 ℃,盐度平均 值为 6.38%,捕获压力取 45.3 MPa,经估算 pH=5.74(在 175 ℃,压力 40 MPa 下,纯水的 pH=5.72^[24]);石英-萤石-闪锌矿物阶段温度平均值为 144.2 ℃,盐度平均 值为 6.02%,捕获压力取 36.0 MPa,经估算 pH=5.79(在 150 ℃,压力 40 MPa 下,纯水的 pH=5.80^[24])。各成 矿阶段流体 pH 值接近纯水,有助于硫化物沉淀。

根据 RYZHENKO 等^[24]给出的公式计算 Eh,得到 各成矿阶段流体 Eh 值分别为 0.089、0.195 和 0.254 V, 均呈弱氧化性。随着成矿的进行流体 Eh 值呈增大趋势,反应流体在成矿过程中一直发生氧化反应,有助 于硫化物的沉淀。

WALSHE^[25]将绿泥石的组成分成了 6 个端元,以 热力学为基础,结合各个端元之间的关系,提出了一 套根据其组分来分析各个端元的活度,再利用活度计 算绿泥石形成时的氧逸度和硫逸度的方法。据此计算 得到研究区绿泥石形成的氧逸度为-57.3~-51.0,平均 值为-53,硫逸度为-16.1-11.9,平均值为-13.4,表明 绿泥石的形成环境属于低氧逸度、低硫逸度的环境, 这与绿泥石中 Fe³⁺离子数远小于 Fe²⁺离子数的特征相 符合。

综上所述认为,大垄铅锌矿床成矿温度属于中低 温,成矿初期流体处于弱碱性、弱氧化环境,后期向

2017年9月

低温、低氧逸度、低硫逸度的环境转换,成矿深度为 中深成。

5.3 矿床成因

综合矿床地质特征、矿物学特征以及同位素地球 化学特征,总结大垄铅锌矿床具有如下基本特征:

1) 硫化物石英脉是矿体的主要产出形态,且严格 受 SN 向断裂控制产出,与围岩界限明显。主成矿阶 段(石英-多金属硫化物阶段和石英-黄铁矿-闪锌矿阶 段)所形成的矿物组合(石英-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿 和石英-黄铁矿-闪锌矿)和矿石组构(半自形-他形粒 状结构、裂隙充填结构、包含结构、交代溶蚀结构; 块状、条带状、网脉状、梳状构造)等特征均与热液矿 床的特征相似。

2) 矿区广泛发育有钾化、电气石化-硅化、黄铁 绢云岩化-高岭石化及绿泥石化等围岩蚀变,这些蚀 变从早期到晚期,从高温到低温均有分布,反映了岩 浆热液始终贯穿着成矿过程,说明矿体的形成是岩浆 热液活动的结果。

3) 矿物学特征表明,金属矿物属于岩浆热液成因,其形成与岩浆作用密切相关。同时通过黄铜矿-黄铁矿地质温度计,硫同位素温度计、绿泥石温度计等估算硫化物的形成温度主要介于 150~250 ℃,结合流体包裹体显微测温结果,认为成矿温度属于中低温范围。

4) 通过 S、Pb、H、O 同位素研究表明,本区成 矿物质具有壳幔混合的特征,矿体的形成与燕山期岩 浆活动密切相关,成矿流体主要来源于岩浆水,但有 大气降水的加入。

综合以上分析可知,大垅铅锌矿床成矿温度属于 中低温范围,矿床的形成与燕山期中酸性岩浆的侵位 有密切的成因联系,岩浆活动为矿床的形成提供了大 量的成矿物质和运移能量,各级断裂为流体的运移和 定位提供了有利的空间,矿体产状具有明显的充填特 征,大垄铅锌矿床属于与燕山期岩浆活动有关的中低 温热液型铅锌矿床。

5.4 成矿过程

燕山期在大规模构造运动和岩浆活动作用下,深 部岩浆沿构造裂隙上侵,在有利部位就位形成八团岩 体,先形成的八团岩体在后期构造运动作用下,形成 SN 向切割较深的断裂,起源于深部岩浆房内的流体沿 着区域上的 SN 向断裂上升,在上升过程中,与围岩 发生交代作用,带入碱质成分,带出硅质成分,产生 硅化、绿泥石化等蚀变,早期的成矿热液随之产生。

随着流体的上升,压力及温度快速下降,加之外界流 体的混入,成矿流体性质发生变化,承载成矿物质的 络合物的稳定性遭受破坏,从而促使金属硫化物在有 利的构造位置大量淀积成矿。同时,由于成矿热液的 温度逐渐下降, 热液中大量的 H₂S 与 Zn²⁺、Pb²⁺、Fe²⁺、 Cu²⁺等金属元素反应形成大量的闪锌矿(此时温度较 高,以深色闪锌矿为主)、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿; 到了石英-闪锌矿-黄铁矿阶段,随着流体中成矿元素 比例的变化以及温度的降低,形成的金属矿物以低温 闪锌矿和黄铁矿为主;到了成矿末期(石英-萤石-闪锌 矿阶段),外界流体混入成分(主要为大气降水)显著增 加,成矿流体的温度进一步降低,成矿流体系统逐渐 冷却,只有少量的 H₂S 与 Zn²⁺发生反应,生成少量闪 锌矿,成矿过程逐渐结束,该阶段石英大量生成,萤 石次之。由此可见,前面两个阶段是本区的主要成矿 阶段,石英-萤石-闪锌矿阶段只是对前面两个成矿阶 段矿质的沉淀起到了一定程度的叠加富集作用。

6 结论

1) 通过 S、Pb、H、O 同位素研究表明,本区成 矿物质具有壳幔混合的特征,矿体的形成与燕山期岩 浆活动密切相关,成矿流体主要来源于岩浆水,但是 有大气降水的加入。

2) 通过电子探针分析及流体包裹体研究表明成 矿温度属于中低温,成矿初期成矿流体处于弱碱性、 弱氧化的环境,后期向低温、低氧逸度、低硫逸度的 环境转换,成矿深度为中深成。

3)综合认为大垄铅锌矿床属于与燕山期岩浆活动有关的中低温热液铅锌矿床。

REFERENCES

 [1] 黄 卉, 马东升, 陆建军, 蔡杨, 谢 旭. 湖南邓阜仙复式花 岗岩体的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 590-591.

HUANG Hui, MA Dong-Sheng, LU Jian-jun, CAI Yang, XIE Xu. The study of zircon U-Pb geochronology of Dengfuxian composite granite mass in eastern Hunan Province, China[J]. Acta Minalogica Sinica, 2011, 31(S1): 590–591.

[2] 蔡 杨,陆建军,马东升,黄 卉,张怀峰.湖南邓阜仙印支
 晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义[J].岩石
 学报,2013,29(12):4215-4231.
 CAI Yang, LU Jian-jun, MA Dong-Sheng, HUANG Hui,

ZHANG Huai-Feng. Chronology and geochemical

1926

characteristics of late indosinian Dengfuxian two-mica granite in eastern Hunan Province, China and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4215–4231.

[3] 黄鸿新,陈郑辉,路远发,叶诗文,朱浩峰. 湘东钨矿成矿岩 体锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科 学版),2014,37(1):26-36.

HUANG Hong-xin, CHEN Zheng-hui, LU Yuan-fa, YE Shi-wen, ZHU Hao-feng. Zicron U-Pb dating for Xiangdong tungsten mineralization rocks and its geological significance[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2014, 37(1): 26–36.

[4] 蔡 杨,马东升,陆建军,黄 卉,章荣清,屈文俊.湖南邓 阜仙钨矿辉钼矿铼-锇同位素定年及硫同位素地球化学研究[J]. 岩石学报,2012,28(12):3798-3808.

CAI Yang, MA Dong-sheng, LU Jian-jun, HUANG Hui, ZHANG Rong-qing, QU Wen-jun. Re-Os geochronology and S isotope geochemistry of Dengfuxian tungsten deposit, Hunan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3798–3808.

[5] 叶诗文. 湖南邓埠仙钨矿流体包裹体研究[D]. 荆州: 长江大学, 2014: 1-57.

YE Shi-wen. The characteristics of fluid inclusions in Dengbuxian tungsten deposit, Hunan[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2014: 1–57.

- [6] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data[J]. American Mineralogist, 1989, 74(11): 1390–1393.
- [7] FOSTER M D. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites[R]. Washington: US Geology Survey Professional Paper, 1962, 414–A: 33.
- [8] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe³⁺和 Fe²⁺[J]. 矿物学报, 1983(1): 55-62.
 ZHENG Qiao-rong. Calculation of the Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EPMA data[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1983(1): 55-62.
- [9] 严育通,李胜荣,贾宝剑,张 娜,闫丽娜.中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J].地学前缘, 2012, 19(4): 214-226. YAN Yu-tong, LI Sheng-rong, Jia Bao-jian, ZHANG Na, YAN

Li-na. Composition typo orphic characteristics and statistical analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 214–226.

- [10] BRALIA A, SABATINI G, TROJA F A. Revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite and geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium Deposita, 1979, 14(4): 353–374.
- [11] 徐国风,邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质 论评, 2012, 26(6): 75-80.
 XU Guo-feng, SHAO Jie-lian. Typomorphic characteristics of pyrite and its practical significance[J]. Geological Review, 2012, 26(6): 75-80.
- [12] 郑 伟, 陈懋弘, 赵海杰, 郝宏达, 常利忠, 胡耀国, 赵辛敏.

广东天堂铜铅锌多金属矿床矿物学、硫化物 S-Pb 同位素特征 及地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1830–1846.

ZHENG Wei, CHEN Mao-hong, ZHAO Hai-jie,HAO Hong-da, CHANG Li-zhong, HU Yao-guo, ZHAO Xin-min. Characteristics of sulfides and S-Pb isotope composition in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit of Guangdong Province and their Geological implications[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1830–1846.

[13] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1988: 38-45.

SHAO Jie-lian. Prospecting mineralogy of gold deposits[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1988: 38–45.

- [14] 郑永飞,徐宝龙,周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 299-320.
 ZHENG Yong-fei, XU Bao-long, ZHOU Gen-tao. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(2): 299-320.
- [15] CLAYTON R N, O'NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1972, 77(17): 3057–3067.
- [16] SHEPPARD S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 1986, 16(3): 165–183.
- [17] 段其发. 湘西-鄂西地区震旦系-寒武系层控铅锌矿成矿规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014: 1-105. DUAN Qi-fa. The research of metallogenic regularity of stritabound zinc-lead deposits from Sinian-Cambrian in western Hunan and western Hubei[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014: 1-105.
- [18] 肖荣阁, 刘敬党, 费红彩, 刘 军, 原振雷. 岩石矿床地球化 学[M]. 北京: 地震出版社, 2008: 288-292.
 XIAO Rong-ge, LIU Jing-dang, FEI Hong-cai, LIU Jun, YUAN Zhen-lei. Geochemistry on rock and mineral deposit[M]. Beijing: Seismological Press, 2008: 288-292.
- [19] CZAMANSKE G K, RYE R O. Experimental determined sulfur isotope fractionations between sphalerite and galena in the temperature range 600 to 275 °C[J]. Economic Geology, 1974, 69(1): 17–25.
- [20] KRANIDIOTIS P, MACLCAN W H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. Economic Geology, 1987, 82(7): 1898–1911.
- [21] CATHELINEAU M. Canon site occupancy in chlorites and illites as function of temperature[J]. Clay Minerals, 1988, 23(4): 471–485.
- [22] JOWETT E C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer[J]. GAC-MAC-SEG Joint Annual Meeting. Program with Abstracts, 1991, 16: A62.
- [23] 刘 斌. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算[J]. 岩石学 报, 2011, 27(5): 1533-1542.

LIU Bin. Calculation of pH and Eh for aqueous inclusions as simple system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(5): 1533–1542.

[24] RYZHENKO B N, BRYZGALIN O V. Reference neutrality points for the redox and acid-base properties of aqueous solutions at the parameters for hydrothermal ore formation[J]. Geokhimiya, 1984, 7: 1056-1106.

[25] WALSHE J L. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems[J]. Economic Geology, 1986, 81(3): 681–703.

Mineralization mechanism of Dalong Pb-Zn deposit, eastern Hunan Province, China

SHAO Yong-jun^{1, 2}, WEI Han-tao^{1, 2}, ZHENG Ming-hong^{1, 3}, LIU Zhong-fa^{1, 2}, XIONG Yi-qu^{1, 2}, XU Zhuo-bin^{1, 2}, JIANG Meng-tong^{1, 2}

 Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China)

Abstract: Dalong Pb-Zn deposit is located in the southeast of the middle Fanglou NNE structural belt of Neocathaysian structural system and the north head of the Dengfuxian composite granite. Ore occurrence is controlled by south-north faults. Through the electron microprobe analysis, fluid inclusions and S, Pb, H, O isotope characteristics research, the source of ore-forming materials, ore-forming physicochemical conditions were analyzed, and the ore deposit genesis and metallogenic process were discussed. The results indicate that the formation of ore bodies is closely related to the Yanshanian magmatic activity; the ore-forming materials have the feature of crust-mantle mixing; the ore-forming fluid is mainly derived from magmatic water, but with the mixing of atmospheric precipitation; the metallogenetic temperature is low-medium temperature; the ore-forming fluid is weak alkali, weak oxidizing environment, and late it transforms to low temperature and low oxygen fugacity of low sulfur fugacity environment; the metallogenetic depth is shallow-moderate depth. Dalong Pb-Zn deposit belongs to low-medium temperature magmatic activity.

Key words: electronic mircoprobe; fluid inclusion; isotope; metallogenic mechanism; Dalong Pb-Zn deposit

Foundation item: Projects(12120114052201, 12120114052201) supported by the China Geological Survey; Project (41472302) supported by the National Natural Sciences Foundation of China; Project supported by the Development Foundation of Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor, Ministry of Education, China; Project(2015zzts069) supported by the Independent Innovation Program for Doctoral Candidates of Central South University, China

Received date: 2016-07-21; Accepted date: 2016-12-26

Corresponding author: SHAO Yong-jun; Tel: +86-13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

(编辑 何学锋)