

水晶晶体中的球粒状与管状铁氧化物包裹体的形貌结构与成因

张良钜¹⁾, 饶灿¹⁾, 张昌龙²⁾, 阮青锋¹⁾, 雷威¹⁾, 廖宝丽¹⁾, 何涛¹⁾

1) 桂林工学院资源与环境工程系, 广西桂林, 541004;

2) 桂林矿产地质研究院, 广西桂林, 541004

内容提要: 产出在四川美姑峨眉山玄武岩中的水晶有两种类型, 即产出在玄武岩气孔中第一成矿阶段紫色水晶和“三色”层水晶与玄武岩层间滑(错)动裂隙或晶洞中第二成矿阶段的浅色水晶。晶体中铁氧化物包裹体为镜铁矿、赤铁矿、纤铁矿。包裹体的形貌结构有两种类型: 其一具三圈层构造球粒(0.15~0.5 mm), 它由球核、球壳与表层三部分组成, 球核与表层为红棕色, 球壳为铁黑色, 称“红夹黑”。扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)表明, 球壳由绕球核呈放射状排列的片状镜铁矿组成, 表层为红色半透明鳞片状纤铁矿, 球核由微晶赤铁矿定向聚合呈圆球形或向外伸出的圆柱形, 球粒产出在“三色”层水晶的红棕色间歇层的夹层(0.4~0.7 mm)中; 其二具两圈层构造的中空管, 管的长轴方向垂直水晶的菱面体单晶面方向。SEM及EDS测试表明, 管中心为空管, 内圈为铁黑色片状镜铁矿, 外圈为厚度不一的红棕色赤铁矿, 管的形貌有滴管状、钟乳状、倒葫芦状, 晶出在第二成矿阶段第一世代条带状水晶的条带中。“三色”层及条带状水晶中的包裹体是强酸性氧逸度高、且热动力生长环境条件极不稳定的产物。水晶流体包裹体均一温度及拉曼光谱分析研究, 水晶矿属低温热液(150~190℃)成矿, 成矿流体的盐度较低, 5.7%~13.2% NaCl_{eq}, 其中紫晶盐度最高(13.2% NaCl_{eq}), 条带状水晶盐度较低(6% NaCl_{eq})。流体包裹体主要由H₂O和SO₂及微量CH₄组成。这项研究对了解铁氧化物生长机理、生长速率、生长环境热动力条件变化及成矿阶段划分都具有重要意义, 同时对研究现今表生氧化环境所形成铁氧化物种类、机理也有现实指导意义。

关键词: 峨眉山玄武岩; 成矿阶段、成矿世代; 水晶; 圈层构造; 铁氧化物、氢氧化物; 强酸性、高氧逸度; 四川

铁的氧化物及氢氧化物在自然界中主要有赤铁矿、镜铁矿、针铁矿、纤铁矿等矿物。赤铁矿(α -Fe₂O₃)是分布较广的铁矿物, 它可产出在由沉积表生作用、接触变质作用、热液作用所形成的矿床中, 但以热液作用和区域变质作用形成为主。赤铁矿的形成需要铁的溶解搬运和沉淀, 它是还原环境含二价铁的成矿溶液在强氧化条件下与氧结合形成的三氧化二铁。根据资料(蔡向民等, 1999; 陈济舟等, 1990; 孙振亚等, 2002; 王恩德等, 2001; 徐宝龙等, 2000, 2002; Busigny et al., 2007; Psyrillos et al., 2001), 前人主要对表生氧化环境, 如生物细菌作用或含铁的岩石或矿物在氧化环境所形成铁氧化物的种类与机理进行研究报道。而对于产出在水晶晶体中具明显方向性并有规律圈层构造的铁氧化物的结构形貌特征与成因研究未见报道。本次是以产出在四川美姑县的峨眉山玄武岩晶洞中的水晶晶体为研

究对象, 运用矿物学微观研究方法(偏光显微镜与体视显微镜)以及矿物的形貌结构与微区的化学成分分析方法(扫描电子显微镜与能谱), 对晶出在水晶晶体中的铁氧化物成分种类、大小、形貌、结构特征进行研究, 同时对水晶的流体包裹体进行均一法测温及拉曼光谱分析, 为矿区水晶矿的成因及成矿阶段、成矿世代的划分与成矿环境条件的演化, 如成矿溶液的酸碱度、盐度与氧逸度等提供重要的信息。同时对现今表生氧化环境中所形成铁氧化物种类、机理等研究也有现实的指导意义。

1 水晶矿的地质概况

矿区水晶矿产出在四川美姑的纳普, 水晶矿的围岩为上二叠统峨眉山玄武岩(P₃β), 其下为下二叠统(P₂)茅口组碳酸盐岩, 其上为上二叠统龙潭组(P₃x)硅质岩夹泥岩、粉砂岩, 玄武岩呈北东向展

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号40572026)、广西自然科学基金资助项目(编号0640177); 广西地质工程中心重点实验室主任资助项目(桂科能0710901-Z01)的成果

收稿日期: 2008-04-16; 改回日期: 2008-09-22; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 张良钜, 男, 1949年生。教授。成因矿物学与宝石学研究。Email: zljpgig@yahoo.com.cn。

布。据野外和偏光显微镜下研究,矿区的玄武岩为杏仁半玻晶玄武岩,具典型的玻晶交织和间隐结构,由自形条板状斜长石搭成三角架,其间被隐晶质、玻璃质、他形粒状橄榄石和辉石充填。在基质中普遍见有条板状钢灰色镜铁矿,粒径为0.15~0.25mm \times 0.01~0.015mm,其含量可达5%~10%左右(图版I-1)。玄武岩中普遍有斜长石的绿帘石化、橄榄石的伊丁石化、辉石的绿帘石化、玻璃质、隐晶质的绿纤石化、绿泥石化等;它们是后退构造变质热液蚀变作用的产物(周志东等,1999),岩石的铁染较明显。研究表明矿区玄武岩应为喷发旋回顶部的表面熔岩的产物,条板状镜铁矿是火山升华作用的产物。

2 水晶矿的成矿阶段与矿物组合

根据矿区的矿物种类、共生组合及空间地质产出特征和镜下研究,矿区的成矿作用可划分出三个不同的成矿阶段。

第一成矿阶段也是矿区最早发生的成矿作用,它产出在玄武岩的气孔中,在气孔壁产出淡紫色的紫水晶(图版I-2),在部分气孔中产出紫晶的“三层层”(图版I-3),即内层的淡紫色与外层无色水晶之间夹一极薄的红棕色间歇层(0.4~0.7mm)(图版I-4)或绿帘石夹层。第二成矿阶段是矿区最主要的成矿阶段,根据水晶的颜色、透明度、晶体中铁氧化物形貌结构、晶体形貌的对称性与矿物的共生组合、产出部位,从裂隙或晶洞壁往晶洞中心依次产出有四个世代的水晶。

(1) 第一世代水晶为条带状水晶,在条带中或间歇层面(相邻两条带间的界面)上发育有不同形貌、不同内部结构、不同颜色与粒度的铁氧化物(图版I-5)。

(2) 第二世代为乳白色雾状水晶与自形方板状黄绿色绿帘石。

(3) 第三世代水晶为对称性较好的浅色柱状水晶与黄色黝帘石。

(4) 第四世代为R型水晶与暗绿色自形绿帘石等矿物的共生组合(图版I-6),它们呈对称梳状产出。

根据野外地质产出及镜下研究,从裂隙或晶洞壁往晶洞中心,矿物的晶出顺序为:第一世代条带状水晶 \rightarrow 第二世代白色雾状水晶与自形方板状黄绿色绿帘石 \rightarrow 绿纤石球粒 \rightarrow 第三世代对称性较好的柱状水晶与黄色黝帘石 \rightarrow 第四世代R型水晶与暗绿色自形板状绿帘石。在晶洞中心往往产出有

结晶极好的无色纯净透明的第四世代R型水晶与暗绿色自形板状绿帘石晶体的共生组合(图版I-6)。

第三成矿阶段主要是指与火山碎屑岩有关的成矿热液所形成的矿物组合,根据晶腺、晶洞及脉中矿物产出特征,其结晶顺序依次为:暗绿色绿帘石 \rightarrow 暗红色赤铁矿 \rightarrow 黄绿色绿帘石 \rightarrow 鲜红色赤铁矿 \rightarrow 玉髓、玛瑙,即以暗绿色绿帘石首先晶出,最后晶出的是玉髓或玛瑙。根据水晶晶体中的流体包裹体的均一温度及激光拉曼光谱分析结果(表1与图1),表明水晶矿的结晶温度属低温热液成矿(150~190 $^{\circ}$ C),气液比5%~10%,成矿流体的盐度为5.7%~13.2% NaCl_{eq},其中第一成矿阶段的紫晶盐度最高,可达13.2% NaCl_{eq},而第二成矿阶段的水晶盐度较低(6% NaCl_{eq}),气液包裹体主要由H₂O和SO₂及微量的CH₄组成。

表1 两相流体包裹体测温数据及盐度

Table 1 Measured temperature data and salinities by two phase fluid inclusions

样品	编号	包裹体类型	点号	气液比	完全均一温度($^{\circ}$ C)	盐度(%, NaCl _{eq})	
晶	第一成矿阶段的紫	CM-1	L+V	1	10%	160	13.72
			L+V	2	5%	153	13.94
			L+V	3	5%	165	13.18
			L+V	4	5%	150	12.62
			L+V	5	5%	158	12.58
			平均			155	13.21
条带状水晶	第二成矿阶段	CM-5	L+V	1	10%	145.2	5.71
			L+V	2	5%	158.5	6.16
			L+V	3	5%	125.3	6.59
			L+V	4	5%	171.5	6.30
			平均			150.1	6.19
型水晶	第二成矿阶段R	CM-8	L+V	1	5%	160	5.71
			L+V	2	5%	175	4.96
			L+V	3	10%	205	6.74
			L+V	4	10%	196	7.17
			L+V	5	10%	210	6.16
			平均			189.2	6.15
雾状水晶	第二成矿阶段乳白色	CM-9	L+V	1	5%	160.3	5.71
			L+V	2	5%	162.5	6.16
			L+V	3	5%	167.4	6.88
			L+V	4	5%	165.1	5.41
			L+V	5	5%	178.3	5.11
			L+V	6	5%	177.4	6.30
			平均			168.5	6.15

注:样品由南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室流体包裹体室测定。

3 铁氧化物包裹体的形貌结构与成分特征

矿区水晶晶体主要有两种产出类型,即产出在

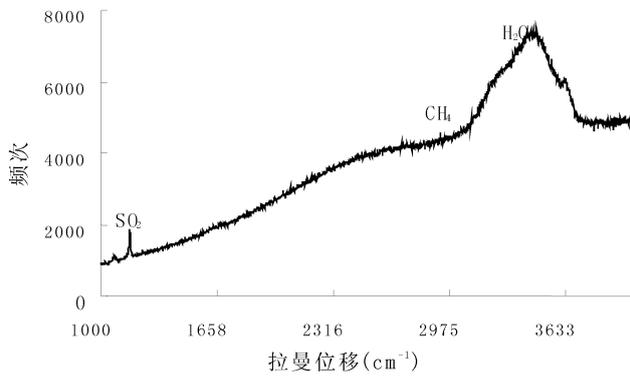


图 1 水晶晶体中流体包裹体的激光拉曼光谱图
Fig. 1 Laser Raman spectra of fluid inclusions in rock crystal

玄武岩气孔中第一成矿阶段“三色”构造层水晶、淡紫色水晶与产出在玄武岩的层间滑(错)动裂隙或晶洞中第二成矿阶段浅色、无色水晶。不同成矿阶段水晶晶体中的铁氧化物包裹体的成分、形貌结构等特征有明显的差异。

3.1 “三色”构造层水晶晶体中铁氧化物包裹体

“三色”构造层水晶,即内部的淡紫色水晶与外部无色透明水晶之间的菱面体单形晶面上夹一极薄的含有铁氧化物包裹体球粒的红棕色间歇层(图版 I-4)或绿帘石夹层。红棕色间歇层底部,即内部淡紫色水晶的菱面体单形晶面上的溶蚀坑中产出有分布密度、直径不等铁氧化物的球粒(0.15~0.25 mm)(图版 I-3)。在红棕色间歇层与无色水晶层的接触部位局部可见蓝灰色的绿纤石球粒,个别球粒中见黄铜矿的包裹体(图版 I-7)。根据红棕色间歇层中铁氧化物球粒的颜色及形貌与内部结构特征,有如下几种类型。

(1) 具三圈层构造的球粒:球粒的结构类似板栗的结构组成,即球粒的球核(he)、球壳(qi)、表层(bi)分别与板栗的栗核、栗壳、栗刺相当,其中球核与表层为红色或红棕色,球壳为钢灰色、铁黑色,又称“红夹黑”(图版 I-8)。扫描电镜(SEM)及能谱分析(EDS)表明,球壳是由绕球核呈放射

状排列的片状、板状镜铁矿组成,球壳本身又由两圈层镜铁矿所组成,第一圈层厚 10~15 μm,第二圈层厚 50~60 μm,球核与球壳间有一圈明显的间断缝线,表明球核与球壳是在不同的条件下经历了两次的结晶生长(图版 II-1);表层(40~50 μm)是由红色自形鳞片状纤铁矿组成,纤铁矿边缘在透射光下为透明的红色、橙色(图版 I-8);球核(60~100 μm)是由赤铁矿组成(图版 II-2),呈圆球形或向外伸出的圆柱形,多数球核为单球粒,少数球核为双球粒,扫描电镜(SEM)表明它们是由自形板状微晶呈定向似层状聚合组成(图版 II-2)。球壳的厚度越大,则红色表层越薄,反之,红色表层越厚(图版 II-1)。

(2) 无圈层构造的黑色球粒:球粒大小为 200~300 μm,大者可达 500 μm。多数为圆球状,少数为一大一小的连体球,产出在内层紫晶晶面的溶蚀坑中。SEM 与 EDS 研究表明,球粒全部由钢灰色呈波状起伏的片状镜铁矿组成(表 2、图版 II-3),球内部镜铁矿片理有顺时针排列的趋势,片与片之间有较大的空隙或缝隙(图版 II-3)。这种片状镜铁矿与三圈层构造球粒中的球壳相当,即缺失三圈层构造球粒中的球核与表层。

3.2 条带状水晶中的铁氧化物包裹体

第二成矿阶段水晶产出在玄武岩的层间滑(错)动的裂隙或晶洞中,自洞壁往晶洞中心,水晶可划分出四个世代,其中第一世代水晶的条带中或间歇层面上发育有铁的氧化物包裹体(图版 II-4),它们的颜色、形貌、内部结构等方面都有显著的特征。从水晶晶体的中心往晶体的 C 轴的尖锥状方

表 2 球粒状、管状铁的氧化物化学成分的 EDS 分析 (%)
Table 2 EDS analyses of pelletoidal or tubular iron oxides (%)

样号	图号	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	CoO	备注
9-3-3	图版 II-1	0.59	2.19	0.37	96.84		三圈层构造球粒中的球核
23-2-3	图版 II-2		1.08		98.39		三圈层构造球粒中的球核
23-2-4	图版 II-1		0.84		98.95		三圈层构造球粒中的球壳
23-3-2	图版 II-1	0.60	1.33		98.07		三圈层构造球粒中的球壳
9-3-4	图版 II-1	0.80	5.82		93.35		三圈层构造球粒中的球壳
6-4-1	图版 II-3	0.92	5.97		93.12		无圈层构造黑色球粒
6-4-2	图版 II-3		1.26		98.47		无圈层构造黑色球粒
27-1-2	图版 II-8	0.95	5.70		88.70	4.64	二圈层管状中的内圈
27-1-2-1	图版 II-7		2.13		93.48	4.39	二圈层管状中的内圈

注:样品由桂林工学院有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室扫描电镜能谱分析(EDS)。

向,不同厚度的条带中或间歇层面上的铁氧化物包裹体有如下特征。

(1) 第一间歇层面(j₁):间歇层面下的水晶条带(S₁)内部有来自洞壁玄武岩中被氧化或溶蚀的片状镜铁矿。菱面体单形晶面的间歇层面上发育有一层半球形的钢灰色、铁黑色镜铁矿,球径一般为0.10~0.15 mm,最大的球径约0.4 mm。

(2) 第二水晶条带(S₂):水晶条带内无铁氧化物,带宽约160 μm。

(3) 第二间歇层面(j₂):在菱面体单形晶面上,即间歇层面上晶出有红色赤铁矿微粒,其直径约5~10 μm,断断续续分布,形成一红色细界线层。

(4) 第三水晶条带(S₃):水晶条带厚约330~350 μm,在其内部发育有密集又规整划一的铁氧化物,它们呈中空的滴管状,长280~300 μm,滴头为球形,球径30~40 μm,由钢灰色鳞片状镜铁矿组成;滴杆呈楔形,长200~300 μm,滴杆的方向垂直水晶晶体的菱面体单形晶面,它是由许多密集层纹构造堆叠组成(图版II-5),这种层纹是由鳞片状镜铁矿垂直滴杆所致,层纹的间距代表每个鳞片状镜铁矿厚度,滴杆上粗下细并有明显的收缩膨大现象。多数滴杆为铁黑色、钢灰色,少数滴杆表面有一红棕色、黄棕色皮,但内部是铁黑色。

(5) 第三间歇层面(j₃):间歇层面上分布有红色赤铁矿,形貌有粒状及球粒状,粒径一般为10~20 μm,在间歇层面上形成一条明显的红色界线层。

(6) 第四水晶条带(S₄):条带厚1260~1270 μm,在其内部发育有两层铁氧化物,第一层铁的氧化物的形态与第三水晶条带(S₃)中的滴管相类似,滴管的长度都规整划一。第二层铁的氧化物其形貌呈钟乳状,其方向也是垂直菱面体单形晶面,其长度差别较大,一般为200~300 μm,最长达600~700 μm,管径20~30 μm,同一管的粗细变化并不明显,稀疏分布(图版II-4)。

(7) 第五水晶条带(S₅):条带厚3200~3300 μm,铁氧化物呈长管状贯穿整个水晶条带的厚度并密集分布,长管上粗下细,类似钟乳形态,管长3100~3200 μm,管径20~40 μm(图版I-5、II-4、6)。

(8) 第六水晶条带(S₆):水晶的条带厚1500 μm,铁的氧化物形貌有明显的收缩膨胀,其特点是管愈短则管径愈粗,反之愈细,愈近菱面体单形晶面的锥顶三角形区间,管的形貌以“倒葫芦”为主,管长400~600 μm,膨大部分的管径200~300 μm,收缩部分50~100 μm。“倒葫芦”是空心管,仅在管壁

内有一层薄薄的钢灰色片状镜铁矿,其外由红色赤铁矿包绕。

(9) 第六间歇层面(j₆):间歇层面上晶出有红色赤铁矿,厚约250 μm。其上为绿帘石及第二世代白色雾状水晶。自第二世代水晶开始晶出后,直到第四世代R型水晶的晶出,水晶晶体内不再出现有铁氧化物包裹体。

上述特征表明,产出在间歇层面上的铁氧化物主要呈球粒状,而产出在水晶条带中的铁氧化物包裹体则主要呈不同形貌的中空管,管的长轴垂直水晶晶体的菱面体单形晶面方向的间歇层面。研究表明管内部为空管,而管壁由鳞片状的镜铁矿(图版II-6、7、8)的平面垂直管的长轴层层叠堆组成(图版II-5、6、7、8),形成管的层纹构造,管的表面由厚薄不一的红棕色或鲜红色的赤铁矿层包绕(图版II-5、6)。

4 讨论

半玻基玄武岩在后期的构造应力作用下,所产生的热水溶液对岩石中的斜长石、橄榄石、辉石、镜铁矿等矿物进行热液蚀变或溶蚀,使斜长石绿帘石化、橄榄石伊丁石化、辉石绿帘石或绿泥石化、基质玻璃普遍绿泥石化,条板状镜铁矿遭到溶蚀或氧化和水化。

根据资料,玄武岩中未变质的斜长石、辉石的SiO₂含量约55%,它们蚀变为绿帘石时,其SiO₂含量约为35%。因此,斜长石、辉石蚀变成绿帘石时,除部分SiO₂参加绿帘石形成外,剩余SiO₂则转入蚀变热液中,显而易见随蚀变作用不断进行与深入,转入热水溶液的SiO₂的含量也不断增加,同时FeO的含量也增多,并含有一定量的CaO。

这些由蚀变作用形成的含铁、含钙的二氧化硅溶液,为矿区的水晶矿床的成矿作用提供了物质基础,随成矿作用的物理、化学条件变化,成矿溶液也发生相应的演化,从而形成矿区不同成矿阶段的矿物种和同种矿物的不同世代。

第一成矿阶段也是矿区最初发生的成矿作用,在玄武岩气孔中产出淡紫色水晶及部分“三色”构造层水晶。气孔中的紫晶是在成矿环境相对稳定、成矿溶液的盐度相对较高(13.2%)并含少量铁的二氧化硅的还原、弱碱性低温(155℃)条件下形成(张良钜等,2003,2005;赵淑霞^①)。随着紫晶的不断晶出,含矿溶液的饱和度不断减少,含矿溶液逐渐酸化,早先晶出的紫晶遭到溶蚀,并在紫晶的菱面体

单形晶面上留下深浅不一、形状各异的溶蚀坑,在强酸性的氧化环境下(蔡向民等,1999;孙振亚等,2002;王恩德等,2001;徐宝龙,2000,2002;Busigny et al.,2007;Psyrillos et al.,2001),成矿溶液中的铁与氧结合,首先形成由微米级板片状红色赤铁矿聚合的球核,随后间断一定的时间,在成矿环境的温度相对较高并相对稳定的条件下,包绕球核结晶出呈放射状排列钢灰色的片状镜铁矿球壳,成矿环境进一步氧化与水化时,在球壳的表层结晶出鳞片状微透明红色纤铁矿,从而在紫晶晶面上或晶面的溶蚀坑中逐步晶出三圈层构造的铁氧化物球粒与红棕色的间隙层。随后成矿环境由红棕色的间隙层的强酸性的氧化条件再次转变为弱碱性的还原条件,在红棕色的间隙层的顶层面上相继晶出球粒状绿纤石及绿纤石中的黄铜矿与外层的无色水晶与自形板状绿帘石晶体,形成“三色”构造层水晶晶体。红棕色间隙层的厚度在不同的“三色”构造层水晶晶体中有一定的变化差异,间歇层的厚度能表征内部紫色层与外部无色层之间水晶停止生长间断时间的相对长短,初步认为水晶停止生长间断时间相当于第二成矿阶段的第一世代条带状水晶中的铁的氧化物形成过程,因“三色”构造层水晶晶体中的间歇层面上的球粒状绿纤石的形成时间相当于第二成矿阶段的第二世代乳白色雾状水晶晶出之后,但在第三世代对称性较好的柱状水晶晶出之前;而外层的无色水晶及自形板状绿帘石晶体的形成时间则相当第二成矿阶段的第四世代R型水晶及与之共生的绿帘石。“三色”构造层水晶的形成,表明成矿环境经历由最初内部紫色水晶的弱碱性的还原条件向红棕色的间隙层的强酸性氧化条件及外层的无色水晶与绿帘石弱碱性的还原条件的演变过程。紫晶晶面上或晶面的溶蚀坑中无圈层构造的黑色球粒,它缺失三圈层构造铁氧化物球粒中的棕红色赤铁矿球核及表层鲜红色微透明鳞片状纤铁矿而与呈放射状排列的片状、板状镜铁矿的球壳相当。无圈层构造的黑色球粒只在局部的“三色”构造层水晶中出现,是发育不完全的球粒,是环境条件的局部差异所致,但绝大多数“三色”构造层水晶中的球粒都具有发育完全的三圈层构造铁氧化物包裹体球粒。

第二成矿阶段是矿区最主要成矿阶段。从玄武岩中的裂隙或晶洞壁往晶洞中心依次产出四个世代水晶。其中在第一世代条带状水晶的条带中或间歇层面上晶出具有一定方向性、规律性的不同形貌特征的铁氧化物包裹体。

(1) 晶出在不同条带间的间歇层面上的铁氧化物包裹体呈球形或半球形,从第一间歇层(J1)至第三间歇层的层面(J3)上铁氧化物由半球形向球形转变,球径由大变小,颜色由铁黑色、钢灰色逐步转变为棕红色、红色,第六间歇层面(J6)上铁的氧化物为鲜红色,成分由铁黑色镜铁矿转变为棕红色、红色赤铁矿。

(2) 晶出在不同的水晶条带中的铁氧化物则呈不规则的滴管状、钟乳状、倒葫芦状等中空管状形貌特征,它们的长轴方向垂直菱面体单形晶面方向。从第二(S2)至第五(S5)的水晶条带中铁的氧化物管的长度由短变长、管径由细变粗,分布密度由稀变密,沿管的长轴方向收缩膨大现象由不明显变为非常明显。虽然管的形貌有明显的差异,但每个管都是由垂直管的长轴方向的宽窄不一的层纹圈构造堆叠组成,这种层纹圈是由钢灰色鳞片状镜铁矿的平面垂直管的长轴方向所致,管的层纹间距有明显的宽窄变化,且每个管的中心都具有空腔构造。管的表层由红棕色赤铁矿包绕,形成所谓的“外红内黑”的圈层构造。

上述特征表明第二阶段的成矿作用首先在构造应力的作用下,玄武岩破碎产生裂隙或晶洞,随后含有被溶蚀或氧化的镜铁矿的成矿溶液开始水晶的结晶,致使在第一条带(S1)水晶内包裹有来自玄武岩中不规则溶蚀氧化状的条板状镜铁矿包裹体,到第一间歇层时,水晶停止生长,在氧化强酸性的环境的条件下,溶液中的铁与氧结合形成半球粒的镜铁矿。从第二条带至第五条带,水晶的条带厚度由薄逐步增厚(160 μm \rightarrow 3300 μm),表明热动力环境由相对稳定转变为相对不稳定,水晶的生长速度由较慢转变为较快,水晶的内部缺陷由少变多,即条带中管状铁的氧化物不断增多、增长、增粗,成矿环境经历了由强酸性 \rightarrow 弱碱性 \rightarrow 强酸性的多次交替演化过程。在这个结晶过程中成矿环境以氧化强酸性条件为特点,其中第一、二、三条带水晶的成矿环境条件以弱碱性还原为主向酸性过渡,其间有过两次短暂的酸性氧化条件的出现;第四、五、六条带水晶的成矿环境条件以强酸性氧化为主,特别是第五条带水晶中大量的长而粗的管状赤铁矿包裹体晶出,此时成矿环境为第二成矿阶段最典型强酸性氧化条件并持续到第六条带水晶晶出的末尾的第六间歇层面上鲜红色赤铁矿的晶出,鲜红色赤铁矿的形成表明成矿环境氧逸度高且有部分地下热水作用的参与。自第二世代乳白色雾状水晶与绿帘石及相继晶出的

绿帘石、黝帘石、第四代无色透明的 R 型水晶与绿帘石晶出,表明自第六间歇层面上鲜红色赤铁矿的晶出后,成矿环境由强酸性氧逸度高逐渐演化为弱碱性还原环境并持续到第二成矿阶段末期 R 型水晶的最后晶出。绿帘石、绿帘石、黝帘石的先后相继晶出,表明自第二世代水晶的结晶开始,成矿溶液中出现钙、铝,而铁则以类质同象的形式参与绿帘石、绿帘石、黝帘石的形成,而不是与氧结合形成铁的氧化物,第二世代乳白色雾状水晶是快速结晶的产物,第三世代对称性较好的柱状水晶是在过饱和度和较弱碱性的稳定环境中形成,第四世代 R 型水晶的出现则表明水晶是在过饱和度较低弱碱性的稳定环境中形成(张良钜等,2003,2005;赵淑霞^①)。

5 结论

(1) 根据水晶晶体中的流体包裹体的均一温度及激光拉曼光谱分析结果,矿区水晶矿属低温热液型(150~190℃),成矿流体的盐度为 5.7%~13.2% NaCl_{eq},气液包裹体主要由 H₂O 和 SO₂ 及微量的 CH₄ 组成。

(2) 矿区的成矿作用可划分出三个不同的成矿阶段。其中第二成矿阶段是矿区最主要的成矿阶段,根据水晶的颜色、透明度、晶体中铁氧化物包裹体形貌结构、晶体形貌的对称性与矿物的共生组合等特征,该阶段产出有四个世代的水晶。

(3) 水晶晶体中铁氧化物、氢氧化物包裹体的形貌结构有两种类型:其一是产出在“三色”层水晶间歇层面的溶蚀坑中的球粒,间歇层面与水晶晶体菱面体单形晶面方向相一致;其二是产出在条带状水晶晶体中的中空管,管的长轴方向垂直水晶的菱面体单形晶面方向。无论球粒或管都具圈层构造,内圈为铁黑色片状镜铁矿,外圈为厚度不一的红棕色赤铁矿或红色半透明鳞片状纤铁矿。球粒与管都是在强酸性、氧逸度高且温度相对较低的环境条件下形成。

(4) 产出在“三色”层水晶间歇层面顶部的绿帘石及黄铜矿球粒,表明成矿作用曾经历过弱碱性—还原环境条件的结晶。

(5) 条带状水晶晶体中的不同条带间的间歇层,表明晶体的生长不是连续一次生长成,而是多次反复时长时停长成的。从第二条带至第五条带,水晶的条带厚度由薄逐步增厚,管状铁的氧化物包裹体由少增多,由稀变密,管由短变长,表明热动力环境由相对稳定转变为相对不稳定,水晶的生长速度

相应由较慢转变为较快,相应水晶的内部缺陷由少变多,即条带中管状铁的氧化物包裹体不断增多、增长、增粗,成矿环境经历了由弱碱性—强酸性的多次交替演化过程。

注 释 / Note

- ① 赵淑霞. 2003. 热液型水晶的形貌特征及成因研究(硕士学位论文). 桂林: 桂林工学院.

参 考 文 献 / References

- 蔡向民, 于卫平. 1999. 红色花岗岩中的赤铁矿及岩石中赤铁矿的人工合成. 岩石矿物学杂志, 18(2): 134~140.
- 陈济舟, 蒋世承, 王加林, 王俊桥. 1990. α -FeOOH 的脱水温度与 α -Fe₂O₃ 结构变化间关系的 X 射线衍射研究. 应用科学学报, 8(1): 55~60.
- 孙振亚, 牟善彬, 叶先贤, 孙有斌. 1995. 一种显微管状构造的羟铁矿. 科学通报, 40(23): 2196~2198.
- 王恩德, 王丹丽, 王毅. 2001. 铁矿物形成过程中的细菌作用研究. 岩石矿物学杂志, 20(4): 414~415.
- 徐宝龙. 2000. 赤铁矿的化学合成. 地学前缘, 7(1): 258~259.
- 徐宝龙, 周根陶, 郑永飞. 2002. 针铁矿—四方纤铁矿—水体系氧同位素分馏的实验研究. 地球化学, 31(4): 365~374.
- 张良钜, 雷威. 2003. 小秦岭金矿含金石英脉矿床中的石英晶体微形貌研究. 岩石矿物学杂志, 22(2): ????
- 张良钜, 赵淑霞. 2005. 热液型水晶晶体形貌标型特征研究. 桂林工学院学报, 25(1): 133~134.
- 周志东, 苏生瑞. 1999. 玄武岩中石英绿帘石型层内错动带成因初探. 四川水力发电, 18(1): 75~77.
- Psyrillos A, Manning D A C, Burley S D. 2001. The nature and significance of illite associated with quartz—hematite hydrothermal veins in the St. Austell pluton, Cornwall, England. Clay Minerals, 36, 585~597.
- Busigny Vincent, Dauphas Nicolas D. 2007. Tracing Paleofluid circulations using iron isotopes: A study of hematite and goethite concretions from the Navajo Sandstone (Utah, USA). Earth and Planetary Science Letters, 254, 272~287.

图 版 说 明 / Explanation of Plates

图 版 I / Plate I

- 杏仁半玻基玄武岩。
- 玄武岩气孔中的紫晶。
- “三色”构造层水晶。
- 红棕色间歇层。
- 第二成矿阶段第一世代条带状水晶的条带(S)与间隙层(J)及不同形貌结构铁氧化物。
- 第四世代 R 型水晶及绿帘石晶体。
- 红棕色间歇层面上的绿帘石(Pu)及黄铜矿(Cp)。
- 具三圈层构造铁氧化物球粒(球核、球壳、表层)。

图 版 II / Plate II

- SEM 具三圈层构造铁氧化物球粒(球核、球壳、表层)。
- SEM 的铁氧化物球粒中心球核的形貌结构。
- 无圈层构造的黑色球粒中的铁氧化物形貌结构(SEM)。
- S1—S5 中及 j1—J4 面上的铁氧化物的形貌结构。
- S3 水晶条带中层纹构造的滴管状(dg)铁氧化物。
- S5 水晶条带中的具空腔管的钟乳状铁氧化物。

7. 管的纵切剖面内壁与层纹构造(SEI)。

8. 管的横切剖面(SEI)。

注:Olv—橄榄石;Plg—斜长石;Spe—条状镜铁矿;Chl—绿泥石;
Id—伊丁石;Q—铁的氧化物球粒;Ep—绿帘石;WQ—外层无色
水晶;ZQ—淡紫色紫晶;S1、S2、S3、S4、S5、S6—水晶条带编号;

J1、J2、J3、J4、J5、J6—水晶中条带间的间歇层编号;RQ—R型水晶
晶体;Bi—球粒的表层;qi—球粒的球壳;qi-1 球壳的第一圈层;
qi-2 球壳的第二圈层;he—球粒的球核;Le—纤铁矿;Hm—赤铁
矿。

The Shape Texture Feature and Genesis of Pelletoidal and Tubular Iron Oxides Inclusion in Rock Crystals

ZHANG Liangju¹⁾, RAO Can¹⁾, ZHANG Changlong²⁾, RUAN Qingfeng¹⁾,
LEI Wei¹⁾, LIAO Baoli¹⁾, HE Tao¹⁾

1) Department of Resource and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, 541004;

2) Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin, 541004

Abstract: There occur two types of rock crystals in Emeishan basalt from Meigu county, Sichuan province: amethyst and the "trichroic" rock crystal of the first ore-forming stage in vesicles of basalt and the light color rock crystal of the second ore-forming stage in interlayer-gliding (faulted) fissures or vugs of basalt. The iron oxides in rock crystals are specularite, hematite and lepidocrocite. There are two iron oxides of two types of shape textures: The one is three-circle layered structure peloids occurring within partings (0.4 ~ 0.7 mm) of red—brown interstitial layers of "trichroic" rock crystals, with the diameter of 0.15 ~ 0.5 mm, consisted of the spherulite, coccosphere and the surface, the spherulite and the surface are red—brown, but the coccosphere is ferri-black, so called "maily red with black". Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) analysis indicated that the coccosphere is consisted of the sheet specularite arranged radially around the nucleus. The surface is red semitransparent scale-like, the form of circular spheres or epitaxial growth circular prisms. The other is the two-circle layered structure central-cavity tube, was crystallized in bandings of banded rock crystals of the first generation of the second ore-forming stage. The direction of the macro-axis of the tube is vertical to the direction of the simple-form crystal face of rhombohedron of the crystal. SEM and EDS analysis indicated that the center of the tube is hollow. The endocircle is ferri-black sheet specularite. The direction of the sheet is vertical to the macro axis of the tube. The exocircle is different-thickness red—brown hematite. The tube is drip-like, stalactitic and inversion calabash-like. Both three-circle layered structure peloids and the two-circle layered structure central-cavity tube were formed on the condition of the strongly acidic and highly oxygen fugacity environment. By using the analysis of the homogenization temperature of the fluid inclusion and Raman spectrum of the crystals, the rock crystals were formed on the condition of epithermal (150° ~ 190°C) ore deposit genesis. The salinity of the ore-forming fluid is lower, 5.7% ~ 13.2% NaCl_{eq}. The salinity of amethyst is highest (13.2% NaCl_{eq}). The salinity of banded rock crystals is lower (6% NaCl_{eq}). The fluid inclusion is consisted mainly of H₂O, SO₂ and a small amount of CH₄. This study has important significance to understand the growth mechanism, the growth rate, the variation of thermodynamics under the given condition in ferrous oxide and the differentiation of mineralization stage. It also provides a useful guide to studying the species and mineralization of ferrous oxide under the supergene oxidation condition.

Key words: Emeishan basalt; ore-forming stage, ore-forming generation; rock crystal; circle layered structure; iron oxide, iron hydroxide; strongly acidity, highly oxygen fugacity; Sichuan

