

文章编号: 0258-7106(2008)04-0531-08

不同产状和成因类型的金红石矿物学特征及其研究意义*

蔡剑辉, 王立本, 李锦平

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 文章通过综述中国金红石矿物学研究的成就, 系统论述了不同产状和成因类型的金红石的矿物学特征及其研究意义, 为进一步深化金红石矿物学研究、加强金红石资源的找矿和评价工作、广泛开展与金红石有关的地质问题的探讨提供了较为全面的基础性认识。

关键词 地质学; 金红石; 矿物学特征; 产状; 成因类型; 研究意义; 综述

中图分类号: P578.4⁺7

文献标志码: A

Mineralogical features of rutiles of different modes of occurrence and genetic types and their research significance

CAI JianHui, WANG LiBen and LI JinPing

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

Based on summarizing achievements in the study of rutile mineralogy in China, the authors have dealt systematically with mineralogical characteristics of rutiles of different modes of occurrence and genetic types and their research significance. Relatively comprehensive fundamental knowledge is provided in this paper for further studies of rutile mineralogy, strengthening of rutile resource prospecting and evaluation work, and deep-going discussion of some geological problems related to rutiles.

key words: geology, rutile, mineralogical features, mode of occurrence, genetic type, research significance, comprehensive

金红石(Rutile)的简化分子式为 TiO_2 ,是天然 TiO_2 同质三象(其他两象为锐钛矿和板钛矿)中的最稳定者,乃自然界最常见的矿物之一。金红石分布极为广泛,不但在地壳中存在,而且在月岩和陨石中也已发现(张惠芬等,1988a)。金红石的成因及产状十分复杂,几乎可以在各种地质条件下形成,并赋存于各类岩石中。它既是许多类型岩石中常见的重要副矿物,又是金红石矿床的矿石矿物。

金红石矿物学研究对于有效开发和利用中国严重短缺的金红石资源、开展相关的地质科学问题的探讨等均具有十分重要的科学意义。首先,金红石是一种重要的矿产资源,其矿物学研究不但可以为确定找矿标志、选择找矿方法提供矿物学依据,还可以为揭示金红石矿床的成矿规律和成因、提高矿石的综合利用水平、选择合理的选矿和冶炼方法提供必要的基础数据;其次,作为构成地质体的基本物质

* 本文得到科技基础性工作专项(2006FY220200)资助。

第一作者简介: 蔡剑辉,女,1966年出生,博士,研究员,岩矿及地球化学专业。E-mail: caijh-cags@163.com。

收稿日期: 2008-02-06; 改回日期: 2008-05-08。李德先编辑。

之一,金红石矿物是特定地质作用的产物,它本身蕴含着丰富的成因学信息,故金红石的矿物学研究还可以为探讨相关的地质作用过程与性质,以及所赋存岩石的成因、物质来源和地球动力学背景等提供丰富的信息。

中国有关金红石的研究起步较早,但较系统性的研究工作始于20世纪80年代。金红石的矿物学研究由最初的描述矿物学逐渐发展为晶体结构分析、矿物化学以及成因矿物学等方面的深度研究(张惠芬等,1988a;1988b;吕宪俊等,1999)。近年来,金红石的微量、微区和微观矿物学研究(易礼均,1996;吴秀玲等,2000;汪汝成等,2005;陈振宇等,2006;余金杰等,2006a;2006b)越来越得到重视,在此方面的研究已取得了一些重要进展,对中国金红石矿床和超高压俯冲变质带的研究具有非常重要的意义。本文通过综述国内金红石矿物学研究的成就,较系统地论述了不同产状和成因类型的金红石的矿物学特征及其意义,为进一步深化金红石矿物学研究、加强金红石这一紧缺资源的找矿和评价工作、广泛开展与金红石有关的地质问题的探讨提供较全面的基础性认识。

1 金红石的一般矿物学特征

化学组成:金红石是一种重要的氧化物矿物,其理论化学组成(质量分数)为:钛含量60%,氧含量40%,并常含有 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Nb^{5+} 、 Ta^{5+} 、 Sn^{4+} 、 Cr^{3+} 和 V^{3+} 等混入物,因此类质同象置换现象较为复杂,易形成一系列钛矿物(或变体),如钛铁矿、铌(Nb^{5+})铁金红石及钽(Ta^{5+})铁金红石等。

晶体结构:金红石晶体结构的基本单元是 Ti-O_6 配位八面体,该八面体由氧离子近似呈六方紧密堆积而成,钛离子位于变形八面体空隙中,其中钛离子的配位数为6,氧离子的配位数为3。在金红石的晶体结构中, Ti-O_6 八面体沿 c 轴呈链状排列,与上下的 Ti-O_6 配位八面体各共用一条棱,链间以 Ti-O_6 配位八面体的共用角顶相联结。金红石矿物晶体属于四方晶系,对称型为 L^44L^25PC ,空间群为 $P4_2/mnm$,单位晶胞参数 $a_0=4.56\text{\AA}$, $c_0=2.95\text{\AA}$;主要粉晶衍射数据 $d(\text{\AA})$ (hkl)参考ICDD-JCPDS-21-1276:3.247(100),2.487(50),2.297(8),2.188(25),2.054(10),1.6874(60),1.6237(20),1.4797(10),1.4528(10),1.3598(20),1.3465(12),1.2441(4),

1.1702(6),1.1483(4),1.1143(2),1.0936(8),1.0827(4),1.0425(6),1.0364(6)。

物理特征:金红石的单晶体常呈四方柱状或针状、纤维状,并常以(011)为双晶面成膝状双晶、三连晶或环状双晶。而集合体通常呈致密块状构造。金红石的颜色以暗红色和褐红色为多,少见黄色和橘黄色,富铁者呈黑色。条痕为浅黄色至浅褐色。金红石通常为半透明至不透明,金刚光泽,{110}解理完全,{100}解理中等,裂理平行于{092}和{011},摩氏硬度为6~6.5,测量密度为 4.23 g/cm^3 ,计算密度为 4.25 g/cm^3 ,性脆。

光学特征:在偏光显微镜下,金红石为一轴晶(+), N_e —暗红色至暗褐色, N_o —黄色至褐色;折光率 $N_o=2.605\sim 2.613$, $N_e=2.899\sim 2.901$ 。在反光显微镜下,反射色为灰色,有时微具淡蓝色调,内反射为浅黄色到褐红色,多色性明显,具强非均质性;反射率 $R_d(525\text{nm})$ 为21.0%~21.1%, $R_d(548\text{nm})$ 为19.8%~20.0%, $R_o(589\text{nm})$ 为19.4%~19.6%, $R_d(650\text{nm})$ 为18.8%~19.1%; $R_e(525\text{nm})$ 为24.0%~24.6%, $R_e(548\text{nm})$ 为23.0%~23.5%, $R_e(589\text{nm})$ 为22.3%~23.0%, $R_e(650\text{nm})$ 为22.0%~22.6%。

资源和环境属性:金红石用途非常广泛,主要是提炼金属钛和生产钛白粉的重要矿物原料,可用于化工、航空航天、潜艇制造等行业。此外,由于它具有金刚光泽和高的色散能力,加工后其耀目的程度尤甚于钻石,所以有少量金红石可以作为珍贵的宝石加工材料。近年来,随着纳米技术的广泛应用,金红石的应用范围得到了极有意义的新拓展,即利用金红石的光催化活性,用它制作光触媒这种当今国际上治理空气环境污染最为理想的材料。

成因、产状及共生组合:在自然界的钛矿物中,金红石的分子体积是最小的,因而趋向于在高压、高温条件下形成。各种地质作用(包括内生、变质和外生作用)均可能形成金红石,在内生条件下,金红石常作为副矿物呈细小颗粒产于岩浆岩中,或呈巨晶产于某些伟晶岩中,或与白云母、钛铁矿、磁铁矿共生于石英-长石热液脉中;在变质条件下,金红石常由钛铁矿等含钛矿物转变而成,赋存于角闪岩、榴辉岩、片麻岩和片岩等变质岩中;在外生条件下,由于金红石化学稳定性大,在岩石风化后常转入砂矿,可形成独立矿床。与金红石共生的矿物种类繁多,在不同岩石类型中有不同的矿物共生组合。

由此可见,金红石的产状和成因类型十分丰富,参照金红石矿床成因类型的划分方案(徐少康,2001a)结合金红石的产状及其形成的地质作用性质,可将其划分为岩浆热液型、变质型和沉积型。中国金红石的著名产地主要分布在陕西、河南、江苏、浙江、辽宁、四川和湖北等省。

2 不同产状和成因类型金红石的矿物学特征

2.1 岩浆热液型金红石

该类型金红石产于岩浆岩中,偶见于伟晶岩脉和热液脉中。主要形成于与岩浆活动有关的地质作用,包括深成岩浆、伟晶、热液、火山等作用。岩浆型金红石可由初始岩浆分异产生的高硅低铁低钛岩浆结晶形成,或由碳酸盐岩浆捕获高钛富铁物质后形成的高钛铁岩浆冷凝固晶产生;热液脉型金红石通常是在氧化环境下沿构造裂隙运移并就位的高钛热液中的钛形成的,而热液蚀变型金红石是由富含钛铁矿、黑云母和角闪石等矿物的高钛岩石在热液作用下发生蚀变而释放出来的钛形成的。

2.1.1 岩浆型金红石

四川德昌巴洞金红石是辉石岩的主要副矿物,其质量分数达5%~15%。该区金红石可分为2个世代,主要是由岩浆直接晶出的第一代原生岩浆型金红石和含量甚微的第二世代次生金红石(包含在次生角闪石中的细小的颗粒0.006~0.01 mm)。原生岩浆型金红石颜色为褐红色,晶体呈半自形,与他形粒状钛铁矿及不规则状的榍石连生嵌布于辉石颗粒间,明显被钛铁矿交代成孤岛状、港湾状。由于在光、薄片中从未见有钛铁矿晶体中具有定向连生的金红石,说明这些金红石不是由钛铁矿蚀变而成,其形成早于钛铁矿。该区金红石粒度非常细小,一般在0.03~0.3 mm之间,大于0.5 mm的极少。常见{110}和{111}单形,呈短的锥柱体,似橄榄状。偶见膝状双晶、简单双晶及聚片双晶。松脂或金刚光泽。条痕浅黄棕色。实测硬度VHN=763.50~1088.26 kg/mm²,相当于摩氏硬度6.25~6.9。实测密度为4.191 g/cm³;比磁化系数为1.12×10⁻⁶ cm³/g。偏光镜下,呈红褐色至棕黄色,多色性不明显,反射色为灰色,略带淡兰色调,非均质性明显,双折射率极高。实测折光率为No=2.57,Ne>2.787,平均反射率为20.26%。根据X射线粉末衍射数据d(Å)(I,hkl):3.246(9,110),2.463(7,

101),1.684(10,211),1.6722(10,211),1.3485(8,301),计算出其晶胞参数a₀=4.599 Å,c₀=2.969 Å。红外吸收带的主要波数值(cm⁻¹)为:1650,1390,1025,530,470。化学成分分析结果表明,该区金红石具高Cr₂O₃(最高达0.67%)和V₂O₅、低Fe和Al、无Nb和Ta的成分特点,反映了其成因特征,其计算的经验化学式为(Ti_{0.922}Cr_{0.4}V_{0.042})_{1.004}O₂(龚夏生等,1980)。

2.1.2 伟晶岩脉中的金红石

伟晶岩脉中的金红石通常富含Nb、Ta和Fe。在金红石的成分中,如果钛原子的位置被Fe³⁺(Fe²⁺)和Nb⁵⁺(Ta⁵⁺)所置换就形成了铌(钽)金红石变种,所以在伟晶岩脉中常发现铌(钽)金红石。

中国阿尔泰伟晶岩中金红石不具工业意义,其主要共生矿物有石榴子石、钠长石、白云母、黑色电气石、石英和磷灰石等。金红石晶体平行于c轴延长,呈柱状,见明显的平行于c轴的晶面纵纹。偶见膝状双晶,双晶面为(011)。矿物颜色为红色,条痕呈淡黄色,柱状解理完好,断口参差状,摩氏硬度为6,密度为4.2 g/cm³,无磁性。偏光镜下金红石呈金黄色,多色性明显:Ne—棕黄色,No—黄色。折光率大于2%,干涉色极高。一轴晶(+),平行消光,正延长。根据X射线衍射数据计算得出的晶胞参数为a₀=4.59 Å,c₀=2.60 Å,V=54.78 Å³。

阿尔泰伟晶岩脉中铌金红石的伴生矿物有铌铁矿-钽铁矿、细晶石、锆英石、锂云母和锂辉石等。铌金红石呈黑色,为不规则的粒状,最大粒径可达0.5 mm,矿物具半金属光泽,断口面上为树脂光泽,无解理,条痕为黑褐色,实测密度为4.62~4.65 g/cm³,实测硬度VHN=953.83~1046.24 kg/mm²,相当于摩氏硬度6.6~6.8。在反光显微镜下,该区铌金红石是不透明的,反射色为灰白色,或略带有浅蓝色的灰白色,内反射褐红色,具明显非均质性,反射多色性为暗红到红褐色,有聚片双晶。测得反射率为19.79%(470 nm),18.56%(540 nm),18.71%(560 nm),18.57%(650 nm)。化学分析结果(ω_B)表明:TiO₂为72.82%,FeO为7.77%,Nb₂O₅为15.04%,Ta₂O₅为2.74%,SnO₂为0.33%,ZrO₂为0.47%,WO₃为0.53%,总计99.70%,由此计算出该区铌金红石的晶体化学式为(Ti_{2.41}Nb_{0.3}Ta_{0.03}Fe_{0.28}Zr_{0.01}Sn_{0.005}W_{0.005})_{3.04}O_{5.976}。主要粉晶衍射数据d(Å)(I,hkl)为3.272(10,110),2.495(9,101),1.687(10,211),1.364(5,112),1.047(4,

411)。单位晶胞参数 $a_0 = 4.624 \text{ \AA}$, $c_0 = 2.958 \text{ \AA}$, $V = 63.878 \text{ \AA}^3$, $Z = 2$ (张如柏等, 1983)。

阿尔泰钽金红石产于中粗粒伟晶岩及块状微斜长石中, 共生矿物是钛铁矿和铌钛铀矿等。钽金红石呈不规则柱状晶体或不规则粒状集合体, 他形钽金红石颗粒互相穿插, 粒径一般为 1~5 mm。颜色为红褐色, 表面常附着一层淡棕-灰色被膜, 具锃色晕彩, 半金属光泽, 不透明, 断口不平坦。反光镜下钽金红石呈无色或灰色。反射率与闪锌矿相近。正交偏光下具明显的非均性, 颜色从暗棕-暗灰-灰色。矿物晶体中可见薄板状三角形和较复杂几何图形双晶。该区钽金红石除含有 Ti、Ta、Fe、Nb、Al、Mn、Si 元素外, 还含有 Sc、U、Be、Cu、Zn、La 等微量元素。根据其化学分析结果计算该区钽金红石的经验分子式为 $(\text{Ti}_{1.92}\text{Ta}_{0.49}\text{Fe}_{0.43}^{3+}\text{Nb}_{0.11}\text{Mn}_{0.02})_{2.97}\text{O}_6$ 或 $(\text{Ti}_{2.01}\text{Ta}_{0.41}\text{Fe}_{0.37}^{2+}\text{Nb}_{0.19}\text{Al}_{0.03}\text{Si}_{0.02})_{3.03}\text{O}_6$, 钽金红石化学性质较为稳定, 与一般无机酸均不反应 (易爽庭等, 1989)。

2.1.3 热液型金红石

如前所述, 热液型金红石按成因又细分为 2 类, 其中一类系高钛热液沿断裂运移至适当部位冷凝结晶形成, 常产于金红石矿床或高钛岩石附近的断裂带中, 赋存于石英脉、石英斜长石脉、碳酸盐岩脉或重晶石脉中; 另一类是高钛岩石经热液蚀变作用形成的, 该类金红石常呈钛铁矿假晶, 或呈针状、网状分布于黑云母、角闪石解理中以及蚀变边上。前者见于河南西峡金红石矿床, 后者产在陕西安康的大河金红石矿床中。

河南西峡金红石矿床中的金红石主要有 2 种成因产状类型, 其中最多的是产在各种角闪质片岩中的火山-沉积成因的经区域变质作用形成的金红石, 与此有关的金红石粒度细, 分布均匀 (张银波, 1992, 1994), 详细情况将在后文中介绍。还有一种就是从高钛热液中直接析出形成的金红石, 主要赋存于热液脉中。与这种金红石共生的矿物主要是角闪石、绿泥石、斜长石、磷灰石、方解石 (白云石)、黑云母、榍石及白云母等热液矿物。它一般色泽较鲜艳, 呈橘黄色、棕黄色。粒度较粗, 自形程度较高, 通常为自形短柱状, 容易被热液矿物交代呈筛状或港湾状。有时呈其他矿物 (如钛铁矿、赤铁矿、黄铁矿和角闪石等) 的假晶, 假晶棱角易被溶蚀呈圆滑状, 也常被

其他矿物交代呈港湾状。该类金红石通常呈单晶, 单晶多具黑边 (可能是铁含量较高所致), 少量呈不规则状集合体均匀分布于其他矿物晶间或者被角闪石或斜长石等矿物包裹 (徐少康等, 1997)。

陕西安康市大河金红石矿床为大型热液蚀变型矿床, 金红石分别产于花岗伟晶岩、斜长岩、各类片岩 (绢云母石英片岩、绿泥石绢云母石英片岩、含碳绢云母石英片岩) 和石英重晶石脉中。不同产状的金红石有不同的伴生矿物组合, 其矿物学特征也不尽相同, 总体上来说, 该区金红石呈黑色、红黑色和红色; 自形柱状-半自形柱、粒状; 微透明-半透明; 半金属光泽; 不平坦断口; 条痕颜色为褐色-黄色; 硬度为 893~1236.5 kg/mm²; 偏光下多色性明显, 具弱红褐色-强血红色内反射。该区金红石的晶胞参数 $a_0 = 4.582 \sim 4.589 \text{ \AA}$, $c_0 = 12.970 \sim 12.985 \text{ \AA}$; 主要粉晶衍射数据 $d(\text{ \AA})$ 为 3.24(10)、1.690(9)、2.50(7)、1.62(5) 和 3.59(4)。从化学成分上来看, 该区金红石纯度较高, TiO₂ 含量为 97.40%~99.15%, 此外还含有少量 Fe、V、Si、Cr、Nb、Ta、Zr、S 和 Mn 等元素 (叶芳等^①, 1980)。

2.2 变质型金红石

金红石通常见于角闪岩、榴辉岩、片麻岩和片岩等变质岩中。在变质作用下, 钛含量高的岩浆岩或高钛岩系沉积岩中的含钛矿物 (如钛铁矿) 均可以转变成金红石。变质型金红石按照其变质作用程度高低, 可进一步细分为超高压、中高压、中低压区域变质型和变质蚀变型; 按照原岩的类型又可划分为正变质 (岩浆变质) 型和负变质 (沉积变质) 型。在中国各种类型的变质金红石均有产出, 而且多构成大、中型金红石矿床, 正变质型的典型产地有江苏东海 (超高压正变质型)、湖北枣阳大阜山 (中高压正变质型)、河南方城柏树岗和西峡八庙-青山 (中低压正变质型)、山西省代县碾子沟 (变质蚀变型); 负变质型较典型的除河南新县中高压片麻型金红石、陕西平利低温低压绢云母片岩型金红石外, 近年来在内蒙古羊蹄子山发现的首例沉积变质钛矿床中的金红石是经中级区域变质作用改造的沉积变质型金红石的典型代表。

2.2.1 超高压正变质型金红石

在高-超高压变质基性岩中, 金红石普遍出现

① 叶芳, 曹恩魁, 雷宗英, 薛立先, 魏长风, 周胜利. 1980. 陕西矿物. 陕西省地质矿产局测绘队印 (内部资料).

(即便在岩石中 TiO_2 较低的情况下)。榴辉岩中 TiO_2 绝大部分以金红石形式出现,含金红石(TiO_2)可达5%以上,基本不出现(或很少出现)钛铁矿、榍石、磁铁矿及赤铁矿等非金红石钛矿物及铁质矿物(徐少康等,2005)。在榴辉岩中,超高压正变质型金红石常呈细-中粒,与石榴子石和绿辉石形成栅状构造,呈红(金红石),白(石榴子石),绿(绿辉石)相间,色彩很有特色(刘源骏,1991)。

中国榴辉岩型金红石主要产于苏鲁超高压变质带,在江苏北部新沂、东海一带的榴辉岩体中已发现20多个金红石矿体(黄建平,2002),除此之外,超高压变质带地表出露的其他变质岩也含有数量不等的金红石;从中国大陆科学钻探(CO2)的各种超高压变质岩钻孔岩心、矿心中也发现不同程度的金红石富集现象(徐珏等,2004)。超高压正变质型金红石纯度较高, TiO_2 含量达97%。颜色随矿物成分中Fe、V、Mn等元素含量的增加而加深,一般以暗红色为主,也见棕黄色或黑色等。矿物晶体通常呈半自形-他形,亦见有少量针状、双锥聚形以及不规则晶体,且晶面常具纵纹。粒径介于0.04~0.6 mm之间,通常约为0.25 mm。在矿物表面和解理裂隙处常可见金红石转变为钛铁矿、榍石和白钛石。榴辉岩中金红石的赋存状态比较多样,属于变质成因的主要是以0.2~0.3 mm大小的颗粒呈分散状分布在石榴子石、绿辉石等矿物晶隙之间,但变质早期的产物常以细小颗粒呈包裹体的形式包裹于石榴子石、绿辉石、磷灰石、黝帘石等矿物中。此外,尚有部分金红石呈细脉状或串珠状分布在矿物的解理裂隙中,这种金红石晶粒大,有的呈块状,属于变质后期热液作用的产物(程振香,1990;樊华,1997;黄建平,2003)。

作为高压超高压变质岩重要副矿物的金红石,其矿物结构和成分特征必然反映岩石的形成环境、构造演化及成因机制等信息。近年来,通过对超高压变质带和中国大陆科学钻探(CO2)主孔榴辉岩中金红石开展精细的矿物研究,特别是关于矿物微量元素、同位素特征的研究(王汝成等,2005;Chen et al.,2005;余金杰等,2006a,2006b;陈振宇等,2006;2007),为高压俯冲带的地质作用、榴辉岩形成的物化条件和原岩恢复以及相关金红石矿床的成矿作用研究提供了新的思路和方法。

2.2.2 中高压正变质型金红石

该类型金红石主要赋存于角闪岩相、榴辉岩相基性-超基性变质岩中,中国湖北枣阳大阜山金红石

即属此类。该区金红石赋存于石榴角闪岩中,伴生矿物有少量钛铁矿、磁铁矿、榍石、白钛矿、黄铁矿、磷灰石(张云等,2000)。矿物通常为桔红色、鲜红色、黑红色或黑色,颜色随矿物成分中含铁量的增高而变深;主要呈半自形短柱状单晶均匀分布于角闪石间,受角闪石解理控制有时也呈定向排列;晶粒大小不一,大多数介于0.1~0.5 mm之间,其次是小于0.1 mm的晶粒,大于0.5 mm的晶体最少,但如果角闪石被次闪石交代,则金红石颗粒变粗且晶形一般比较完整,显示出重熔再结晶的现象;贝壳状断口,强金刚光泽;镜下呈深红色,晶体透明度取决于矿物颜色深浅,呈半透明-透明;晶体中偶见橙红-深褐色条纹以及钛铁矿和石英等包体;密度为4.215 g/cm³。矿物化学成分分析结果为(w_B): TiO_2 为97.8%, Al_2O_3 为0.45%, Fe_2O_3 为1.365%, SiO_2 为0.87%, Cr_2O_3 为0.043%, P_2O_5 为0.005%,总计100.57%,尚含微量Zr和V(刘源骏,1966)。

2.2.3 中低压区域变质型金红石

河南柏树岗金红石由火山-沉积岩系经区域变质作用形成,主要赋存于角闪片岩中,也见于变粒岩、斜长片岩、石英片岩、云母片岩、绿帘片岩及石英脉岩中。该区金红石按照形成时间的先后可分为3期,前2期应属于中低压区域变质型,第3期则为热液蚀变型。该区不同期次金红石在矿物学特征上略有差异:早期金红石呈褐红色、棕褐色、棕黄色或棕红色,一般为半自形-自形短柱状,粒度相对较粗,多以单晶呈星点状均匀分布,与角闪石、绿帘石共生,有的被角闪石和绿帘石“交代”成港湾状、筛状和不规则状,但仍可见原晶形,有的被角闪石包裹,有的充填角闪石、绿帘石晶隙,主期金红石为褐红色、黄褐色、棕红色或棕黄色,也呈半自形-自形短柱状,但粒度相对最细,多呈较完整的单晶嵌布于主变质期脉石矿物晶间,偶见膝状双晶,但有少量金红石与钛铁矿、赤铁矿连生,这些金红石可能产生于后两者的变质过程中,还有少量金红石与角闪石、磁铁矿等共生并共同组成金红石假象,这些金红石可能由早期金红石变质形成,晚期金红石呈半自形短柱状-他形粒状,粒度较细,主要呈单晶或不规则条带状等集合体产出,沿脉石矿物晶隙呈串珠状分布、或沿片理呈细脉状分布、或呈数米厚的脉(石英+金红石脉等)。从化学成分分析结果来看,该区金红石纯度较高, TiO_2 含量一般大于或等于95.83%,含量最多的杂质成分是FeO,其次为 Cr_2O_3 ,再次是CaO(张云等,2000;徐少康等,2002)。

河南西峡八庙-青山金红石矿床系大型变质热液改造的火山-沉积变质矿床,金红石主要富集于黑云角闪片岩中。该区金红石晶体多呈柱状、针状和他形粒状,晶面上可见纵纹及溶蚀糙面,有的晶体残损、弯曲、裂纹,具有膝状、心状、网状双晶及三连晶,粒度细小均匀,一般为 $0.10\text{ mm} \times 0.05\text{ mm} \sim 0.17\text{ mm} \times 0.42\text{ mm}$,通常呈单晶均匀分布于黑云母、角闪石晶间,或与钛铁矿(有时是榍石)连生,集合体少见。矿物颜色呈暗红色、褐红色、橘红色和浅黄色,薄片则呈橘黄色、灰黄色、棕黄色、黄棕色及棕红色等。与标准金红石相比,该类金红石纯度较高, TiO_2 含量通常大于97%,含少量杂质(主要为FeO和CaO),不含MnO,主量元素化学分析结果(w_B): TiO_2 为97.85%,FeO为0.66%, SiO_2 为0.87%,CaO为0.58%;并具独特的稀土元素特征,稀土元素分配模式属中稀土元素亏损型(张银波,1992;徐少康等,1997)。

2.2.4 变质蚀变型金红石

该类型金红石通常形成于岩浆或变质作用后期,前述的东海榴辉岩和柏树岗矿床中呈细脉状或串珠状分布的金红石多属于此类。

山西省代县碾子沟金红石矿床是典型的变质蚀变型矿床,其中金红石主要就是蚀变成因的,少量为变质成因,主要赋存于由斜长角闪片岩、榴闪岩和基性侵入岩蚀变成的直闪(片)岩和滑石岩中。变质型金红石为棕红色、黑色,自形-半自形短柱状或不规则粒状,与角闪石共生或与钛铁矿连生,自然颗粒主要为单晶,粒度一般 $0.02 \sim 0.3\text{ mm}$,总体上呈均匀分布趋势。蚀变型金红石为半自形短柱状,自然颗粒有2种:一种呈单晶与直闪石或滑石等共生,粒度一般为 $0.1 \sim 0.75\text{ mm}$;另一种呈不规则团块状集合体充填于直闪石、角闪石晶间空隙和解理中,大小一般介于 $0.5 \sim 80\text{ mm}$;或呈等轴状与滑石共生,其大小一般为 $0.25 \sim 2.2\text{ mm}$,总的来说,蚀变型金红石在宏观及微观方面均有局部富集趋势,常呈脉状、条带状、团块状或富集的浸染状出现(徐少康等,2001b)。金红石矿物的平均化学组成(w_B)为: TiO_2 为98.11%, Fe_2O_3 为0.76%, Al_2O_3 为0.35%,MnO为0.013%, SnO_2 为0.0013%, V_2O_5 为0.18%, Ta_2O_5 为0, Nb_2O_5 为0.009%,合计99.4233%(贾明等,2006)。

显然,同为区域变质作用下形成的金红石因变质作用程度不同,产状呈现出不同的矿物学特征。

一般说来,从低压到高压,金红石粒度有逐渐变粗的趋势(徐少康等,2005);变质程度越高越利于金红石的形成;在相同变质条件下,低Fe/Mg,高Al/Ca的原岩更利于金红石的形成(刘源骏,1996)。区域变质型与变质蚀变型金红石在形态和分布特征上有明显差别,前者主要为单晶、粒度较细且分布均匀;后者则主要以集合体产出、自然颗粒较粗、具有局部富集的分布特征。

2.2.5 沉积变质型金红石

沉积变质型金红石按变质程度高低又可划分为不同种类,如中高压片麻型金红石、低压绢云母片岩型金红石等等。内蒙古羊蹄子山钛矿床是国内最新发现的首例沉积变质型钛矿床,其中的矿石矿物金红石是经中级区域变质作用改造的沉积变质型金红石的典型代表,尤其富集在磨石山的北矿带中,该带矿床中金红石与钛铁矿的体积比约3:2~4:1。该区金红石主要产在条纹状钛铁矿金红石石英岩内,矿物晶体以他形-半自形粒状为主,少数呈自形短柱状,常与钛铁矿连生。矿物粒度较细,大的为 $0.01 \sim 0.3\text{ mm}$,小的仅有 $20 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$,自然颗粒通常为集合体。根据电子探针分析结果,本区金红石的纯度极高, TiO_2 含量高达99.41%~99.61%,其余为少量Fe、Si、Ca、Al、Cr、Mn、Mg、Na元素(赵一鸣等,2006)。

2.3 沉积型金红石

由于金红石化学稳定性强,又是重矿物,所以在暴露于地表的原生金红石矿床或含金红石的岩石遭到风化、剥蚀、搬运后常保留在砂矿中,有时可富集形成独立的沉积型金红石砂矿床。国内一些著名的原生金红石产地通常也是沉积型金红石的典型产地,如河南省方城柏树岗、湖北枣阳的大阜山、江苏新沂-东海等地,此外沉积型金红石也产在海南、广东、广西等省区的滨海地区。该类型金红石的共生矿物为重矿物钛铁矿、赤铁矿、锆英石、石榴子石、榍石、磷灰石、电气石等,通常晶体呈浑圆状或碎块状,晶体具完整晶形者极少,依稀能辨认出不完整的晶面,但有时可见自形程度不等的短柱状,排列方向紊乱,矿物粒度小,一般为 $0.01 \sim 0.4\text{ cm}$,极少数大于 1 cm ,矿物颜色通常较深,呈暗褐色、暗红色、红褐色或黑色。从电子探针分析结果(张惠芬等,1988b)来看,该类型金红石的纯度极高, TiO_2 含量为97.88%~98.47%,其余有 Fe_2O_3 (0.29%~0.73%)、MnO(0.01%~0.73%)、 V_2O_5 (0.48%~0.81%)和 Nb_2O_5 (0.04%~0.1%)。

References

- Chen Z Y ,Chen Y C and Wang D H. 2005. Rutiles in eclogite from Sulu UHPM terrane :A preliminary study[A]. In :Mao J W and Bierlein F P , ed. Mineral deposit research :Meeting the global challenge(Proceeding of the 8th Biennial SGA meeting) [C]. Springer . 731-733.
- Chen Z Y , Wang D H , Chen Y C , Xu J , Yu J J and Wang P A. 2006. Mineral geochemistry of rutile in eclogite and its implications[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences ,31(4) : 533-540(in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y and Li Q L. 2007. Zr thermometer of rutile in eclogite from Jianheqiao , Dabieshan and its implications[J]. Chinese Science Bulletin 52(22) : 2638-2645(in Chinese).
- Cheng Z X. 1990. Basic characteristics of the Donghai eclogite type rutile deposit in Jiangsu Province[J]. Mineral Deposits , 9(11) : 86-90(in Chinese with English abstract).
- Fan H. 1997. Geologic characters of Donghai rutile deposit and its multipurpose utilization[J]. Geology of Chemical Minerals , 19(4) : 263-266 , 271(in Chinese with English abstract).
- Gong X S , Tian H X , Fan L M and Zhang X Y. 1980. Primary research on mineralogy of rutile in Badong complex in Dechan , Sichuan Province [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) , (1) : 62-72(in Chinese with English abstract).
- Huang J P , Ma D S , Liu C and Wang C L. 2002. Rutile deposit in eclogite of ultrahigh pressure metamorphic belt in the northeast of Jiangsu Province and ore genesis[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) , 38(4) : 514- 524(in Chinese with English abstract).
- Jia M , Li S R , Yue L Q and Zhang B. 2006. Geological features and economic significance of rutile deposit in Nianzigou , Shanxi[J]. Geology and Prospecting , 42(6) : 42-46 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J. 1966. A study on a rutile-bearing " garnet-amphibolite " [J]. Acta Geologica Sinica , 46(2) : 224-231 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J. 1996. Further discussion on the metallization of rutile in metamorphic process—As an example from a suocer large—scale rutile ore deposit of Dafu mountain , Hubei[J]. Hubei Geology , 10(1) : 26-37(in Chinese with English abstract).
- Lv X J and Gao Q S. 1999. A study on the process mineralogy of rutile ore from Ankang , Shanxi[J]. Conservation and Utilization of mineral Resources , 6 : 37-40(in Chinese with English abstract).
- Wang R C , Wang S , Qiu J S and Ni P. 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drillhole (Donghai , eastern China) : Trace element geochemistry and metallogenetic implications[J]. Acta Petrologica Sinica , 21(2) : 465-474(in Chinese with English abstract).
- Wu X L , Mu T and Han Y Q. 2000. An electron microscope observation on ultrastructure of rutile crystal in metamorphic rocks[J]. J. Chin. Electr. Microsc. Soc. , 19(4) : 489-490(in Chinese).
- Xu J , Chen Y C , Wang D H , Wang J J , Li C J , Fu X J and Chen Z Y. 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100- 2000 m main hole[J]. Acta Petrologica Sinica , 20(1) : 19-26 (in Chinese with English abstract).
- Xu S K , Su Y , Zhou X X , Li B Y and Liu Z S. 1997. Characteristics and genesis of rutile of the Bamiao - Qingshan rutile deposit[J]. Henan Geology , 15(4) 252-259(in Chinese with English abstract).
- Xu S K. 2001a. Genetic types of mineralizing province of rutile deposits in China[J]. Geology of Chemical Minerals , 23(1) : 11-18 (in Chinese with English abstract).
- Xu S K. 2001b. Occurrence and granularity of natural rutile from main rutile deposits in China[J]. Geology of Chemical Minerals , 23(2) : 101-103 , 108(in Chinese with English abstract).
- Xu S K and Li B Y. 2002. Ore types and rutile characteristics of Baishugang rutile deposit[J]. Geology of Chemical Minerals , 24(2) : 85-95(in Chinese with English abstract).
- Xu S K , Zhou X X and Xi G Q. 2005. Some questions of high-pressure and super high pressure metamorphic ore formation of rutile[J]. Geology of Chemical Minerals , 27(1) : 6-14 , 20(in Chinese with English abstract).
- Yi L J. 1996. X-ray diffraction quantitative analysis of rutile and anatase type TiO₂[J]. Iron Steel Vanadium Titanium , 17(2) : 66-68(in Chinese).
- Yi S T , Ning G J and Yang H C. 1989. Minerals in rare element deposit from Altai , China[M]. Xinjiang People ' s Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Yu J J , Chen Z Y , Wang P A , Li X F , Huang J P and Wang H. 2006a. Trace element geochemistry of rutile in eclogites in northern Jiangsu [J]. Acta Petrologica Sinica , 22(7) : 1883-1890(in Chinese with English abstract).
- Yu J J , Xu J , Chen Z Y , Wang D H , Chen Y C , Wang P A and Li X F. 2006b. Trace element geochemistry of rutiles in the eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project main hole [J]. Acta Geologica Sinica , 80(12) : 1835-1841(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F and Cai X C. 1988a. A study of the existing forms of iron in rutile[J]. Acta Mineralogica Sinica , 8(4) : 348-356 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F , Li W Y and Wu Q X. 1988b. The influence of impurity iron on the unit cell parameters of rutile[J]. Acta Mineralogica Sinica , 8(2) : 119-126(in Chinese with English abstract).
- Zhang R B and Yu W Z. 1983. The discovery of ilmenorutile in Altai pegmatite[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) , (2) : 27-30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y , Guan Y S and Tian Y Z. 2000. The exploitation and utilization of natural rutile in China[J]. Conservation and utilization of mineral resources , (5) : 27-30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y B. 1992. Ore characteristics and probability distribution of grade of ore from Xixia rutile deposit[J]. Henan Geology , 10(4) :

241-250 (in Chinese).

Zhang Y B. 1994. Metallogenic features of the Xixia rutile deposit, Henan Province [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 16(4): 227-238 (in Chinese with English abstract).

Zhao Y M, Li D X, Chen W M, Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: Discovery of new genetic type of titanium deposit [J]. *Mineral Deposits*, 25(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈振宇, 王登红, 陈毓川, 徐珏, 余金杰, 王平安. 2006. 榴辉岩中金红石的矿物地球化学研究及其意义 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 31(4): 533-540.

陈振宇, 李秋立. 2007. 大别山金河桥榴辉岩中金红石 Zr 温度计及其意义 [J]. *科学通报*, 52(22): 2638-2645.

程振香. 1990. 江苏东海榴辉岩型金红石矿床基本特征 [J]. *矿床地质*, 9(11): 86-90.

樊华. 1997. 东海金红石矿床地质特征及其综合利用研究 [J]. *化工矿产地质*, 19(4): 263-266, 271.

龚夏生, 田惠新, 范良明, 张效廷. 1980. 德昌巴洞金红石矿物的初步研究 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, (1): 62-72.

黄建平, 马东升, 刘聪, 王辉. 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 38(4): 514-524.

贾明, 李胜荣, 岳来群, 张彪. 2006. 山西代县碾子沟金红石矿床地质特征及经济意义研究 [J]. *地质与勘探*, 42(6): 42-46.

刘源骏. 1966. 一种含金红石“石榴子石角闪岩”的初步研究 [J]. *地质学报*, 40(2): 224-231.

刘源骏. 1996. 再论金红石矿床在编制过程中的成矿机制(以湖北大阜山金红石矿床为例) [J]. *湖北地质*, 10(1): 26-37.

吕宪俊, 高清寿. 1999. 陕西安康金红石矿工艺矿物学研究 [J]. *矿产保护与利用*, 6: 37-40.

王汝成, 王硕, 邱检生, 倪培. 2005. CCSD主孔揭示的东海超高压榴辉岩中金红石微量元素地球化学及其成矿意义 [J]. *岩石学报*, 21(2): 465-474.

吴秀玲, 牟涛, 韩郁菁. 2000. 变质岩中金红石晶体超微结构的电子显微镜研究 [J]. *电子显微学报*, 19(4): 489-490.

徐珏, 陈毓川, 王登红, 余金杰, 李纯杰, 傅旭杰, 陈振宇. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩中的钛矿化 [J]. *岩石学报*, 20(1): 19-26.

徐少康, 苏茵, 周希贤, 李博昀, 刘振山. 1997. 八庙—青山金红石矿床金红石特征及成因 [J]. *河南地质*, 15(4): 252-259.

徐少康. 2001a. 我国金红石矿床成因类型及成矿区带 [J]. *化工矿产地质*, 23(1): 11-18.

徐少康. 2001b. 我国主要金红石矿床金红石自然颗粒产状及粒度特征 [J]. *化工矿产地质*, 23(2): 101-103, 108.

徐少康, 李博昀. 2002. 柏树岗金红石矿床矿石类型及金红石特征 [J]. *化工矿产地质*, 24(2): 85-95.

徐少康, 周希贤, 郝国庆. 2005. 金红石高、超高压变质成矿作用的几个问题 [J]. *化工矿产地质*, 27(1): 6-14, 20.

易礼均. 1996. 金红石和锐钛型 TiO₂ 的 X 射线衍射定量分析 [J]. *钢铁钒钛*, 17(2): 66-68.

易爽庭, 宁广进, 杨汉臣. 1989. 中国阿尔泰稀有元素矿床矿物志 [M]. 新疆人民出版社.

余金杰, 陈振宇, 王平安, 李晓峰, 黄建平, 王辉. 2006a. 苏北榴辉岩中金红石的微量元素地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 22(7): 1883-1890.

余金杰, 徐珏, 陈振宇, 王登红, 陈毓川, 王平安, 李晓峰. 2006b. 中国大陆科学钻探过程主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征 [J]. *地质学报*, 80(12): 1835-1841.

张惠芬, 蔡秀成. 1988a. 金红石中铁的存在形式的研究 [J]. *矿物学报*, 8(4): 348-356.

张惠芬, 李文瑛, 伍勤宪. 1988b. 铁杂质对金红石晶胞参数的影响 [J]. *矿物学报*, 8(2): 119-126.

张如柏, 余文照. 1983. 阿尔太伟晶岩中的铌金红石 (Ilmenorutile) [J]. *成都地质学院学报*, (2): 27-30.

张云, 管永诗, 田玉珍. 2000. 我国金红石矿资源开发利用现状矿产保护与利用 [J]. *矿产保护与利用*, (5): 27-30.

张银波. 1992. 河南西峡金红石矿矿石特征及品位的概率分布 [J]. *河南地质*, 10(4): 241-250.

张银波. 1994. 河南西峡金红石矿床成矿特征 [J]. *化工地质*, 16(4): 227-238.

赵一鸣, 李大新, 陈文明, 丰成友, 孙文泓. 2006. 内蒙古羊蹄子山沉积变质型钛矿床——一个新的钛矿床类型的发现 [J]. *矿床地质*, 25(2): 113-122.