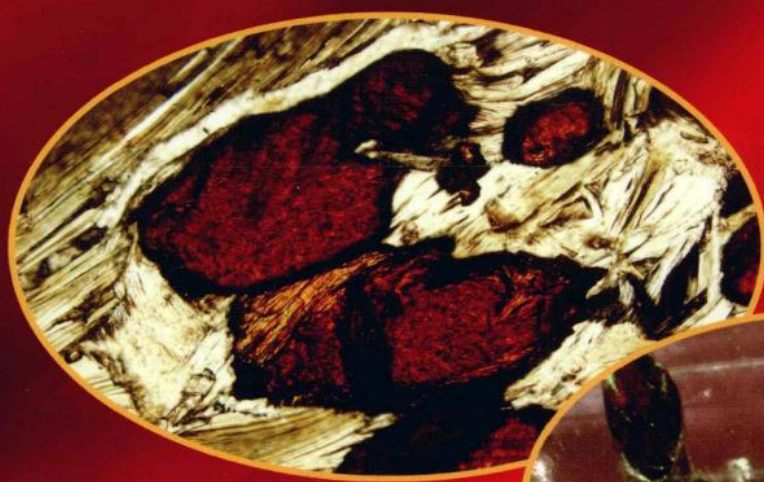


山西省代县金红石矿的矿物学 及矿床成因研究

庞尔成 施光海 贾琇明 著
梁眉龙 徐永婧 刘爱荣



地质出版社

山西省代县金红石矿的 矿物学及矿床成因研究

庞尔成 施光海 贾琇明 著
梁眉龙 徐永婧 刘爱荣

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

山西省代县金红石矿是中国一超大型金红石矿,目前探明总资源量达到369.67万t,该金红石矿分布于恒山西段,矿体产于北西-南东走向的超基性岩带中,整个含矿带长达11km。通过对该区金红石矿的区域地质、矿物特征、年代学及应用前景的研究,认为该矿床为一产于太古宙,曾发生多期变质作用,原岩可能为发生结晶分异作用的基性-超基性岩类。对该金红石矿的形成、演化等研究对于指导该矿的开发与利用具有重要的现实意义。

本书可供从事相关矿产的生产、科研人员,以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

山西省代县金红石矿的矿物学及矿床成因研究 / 庞成等著. —北京:地质出版社, 2010.4

ISBN 978-7-116-06634-2

I. ①山… II. ①庞… III. ①金红石-矿物学-研究-代县②金红石-非金属矿床-矿床成因-研究-代县
IV. ①P578.4②P619.230.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第065332号

责任编辑:张荫芳 李 莉

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324567(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:5.5 图 版:4 面

字 数:100千字

印 数:1—700册

版 次:2010年4月北京第1版·第1次印刷

定 价:20.00元

书 号:ISBN 978-7-116-06634-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

金红石是一种重要的工业矿物，是提取金属钛的主要矿物原料之一。由于钛具有低密度、高强度、耐腐蚀、抗高温等优良性能，故合金钛广泛用于化工、军事和空间技术等领域。尽管中国钛资源非常丰富，但 98% 的钛资源来源于钛铁矿，源于金红石的钛资源仅占钛资源总量的 2%。因此对于金红石矿产资源的研究，有很重要的实际意义。

中国天然金红石资源除少量的金红石砂矿外（占金红石资源总量的 14%），绝大部分为原生矿石，占金红石资源总量的 86%（徐少康，2001a, 2001b）。原生金红石矿床多赋存于变质岩系中，矿床成因类型主要有变基性岩矿床和沉积变质矿床两种，以前者更为普遍（张银波等，1996；温同想，1976）。变质基性原生金红石矿床的矿体一般呈似层状、脉状或不规则透镜状产出。其特点是矿床规模较大，但矿石品位低， TiO_2 含量一般为 2% 左右，典型矿床如湖北省枣阳大阜山金红石矿和江苏省北部变质榴辉岩型金红石矿（黄建平等，2002；徐少康，2006）。枣阳大阜山金红石矿是中国目前探明储量最大的原生金红石矿床，该矿床既含有原生矿又含有砂矿，原生矿体多呈不规则透镜状赋存在变基性岩中， TiO_2 平均含量为 2.32%（徐少康，2006）。山西省代县金红石矿是中国又一超大型金红石矿，初步探明矿石储量为 3 亿 t（金属储量 600 多万 t），其储量仅次于大阜山金红石矿。其矿体也呈似层状产出，该矿虽然矿石品位较低，但具有储量丰富，易选且金红石纯度高，杂质含量少，并可综合回收钛铁矿、磁铁矿等优点（董月田等，2002；李沛光等，1976；梁眉龙等，2003a, 2003b）。

山西省代县金红石矿分布于恒山西段，为一超大型金红石矿床。金红石矿体产于走向北西-南东的超基性岩带中，矿带长达 11 km。从 20 世纪 60 年代末期至今，前人在该区进行了大量的地质勘查工作，基本查明了矿体的规模、产状和储量等。早期的工作主要是围绕超基性岩开展，包括雁门关超基性岩普查评价报告（山西省地质局区调队，1971），山西省雁门关基性-超基性岩带 1:20 万地质普查找矿报告（山西省地质局二一一地质队，1975）。有关该区金红石矿的勘查，早在 1976 年就提交了山西省代县碾子沟矿区金红石矿初步勘探报告（李沛光等，1976），之后与该区相关的地质工作开展较少，进展缓慢，直到 1990 年才提交另外两个矿区金红石矿的普查地质报告（山西

省代县洪塘、羊廷寺金红石矿区普查地质报告,赵福庆等,1990)。近10年来,由于矿产资源的需求量增加及其在国家发展日益彰显的战略地位提高,加之经济发展与利润驱动,该金红石矿得到了应有的足够重视,于20世纪90年代中期提出金红石矿的开发建议(陈光荣,1995)。到21世纪,围绕该矿开展的多学科交叉的生产和研究工作进行得如火如荼,如对山西代县羊廷寺一张山沟直闪岩矿床特征及其成因进行初步分析(董月田等,2002),提交了该金红石矿的普查(梁眉龙等,2003a)与详查地质报告(梁眉龙等,2003b),以及对矿床基本地质特征的研究(徐少康等,2000),矿床的变质作用研究(徐少康等,2002)及与成矿关系的探讨(徐少康等,2004),近年来又开展了矿物学研究(贾琇明等,2007)及选矿研究(庞尔成,2005)。尽管如此,目前所投入的研究力度对于该金红石矿位居全国第二位的矿石储量的矿床而言,显然是不够的。目前对于该矿的形成时代、演化历史、原岩属性等基础研究仍为空白,且该区金红石矿的开发利用前景和矿床经济价值尚不十分清楚,其研究程度还很不够。因此,对该区金红石矿的区域地质、矿物特征、年代学及应用前景进行研究,对于了解该金红石矿的形成演化历史等有重要的理论意义,对于指导该矿的开发与利用具有重要的现实意义。

另外,金红石是一种在自然界赋存十分广泛的矿物,它有两个变体,即板钛矿、锐钛矿。二氧化钛在自然界有3种结晶形态:金红石型、锐钛型和板钛型。板钛型属斜方晶系,是不稳定的晶型,在650℃以上即转化成金红石型,因此在工业上没有实用价值。锐钛型在常温下是稳定的,但在高温下要向金红石型转化。其转化强度视制造方法及煅烧过程中是否加有抑制或促进剂等条件有关。一般认为在165℃以下几乎不进行晶型转化,超过730℃时转化得很快。因此,二氧化钛的3种同分异构体中只有金红石型最稳定,也只有金红石型可通过热转换获得。天然板钛矿在650℃以上即转换为金红石型,锐钛矿在915℃左右也能转变成金红石型。

金红石形成于高温条件下,主要产于变质岩系的含金红石石英脉中和伟晶岩脉中。此外,在火成岩中作为副矿物出现,也常呈粒状见于片麻岩中;金红石由于其化学稳定性大,在岩石风化后常转入砂矿。作为一种副矿物,金红石在地质研究中有很重要的地位。如用激光消融感应耦合等离子体质谱法对天然金红石晶体的快速Pb-Pb定年可以用来作为约束地质温度-时间关系的历史工具(Vry & Baker, 2006);金红石-榍石可以作为热年代学研究的矿物对来研究地质事件,如造山期后冷却速率等(Bibikova et al., 2001)。

山西代县金红石矿为我国第二大金红石矿,矿床地处华北地台之中央造山带中台隆——恒山隆起西段,草垛山-分水岭背斜构造之南翼,矿区地层

多为遭受了多期变质变形的古老变质岩系。金红石矿床的含矿岩石按岩石中矿物组成可以划分以下几种类型：阳起透闪岩、直闪阳起透闪岩、石榴石阳起透闪岩、十字石阳起透闪岩、阳起黑云透闪岩、阳起直闪岩、蓝晶石直闪岩、滑石阳起透闪岩、绿泥阳起透闪岩等。按金红石的颜色可以划分为两类，即红色金红石矿石、黑色金红石矿，红色金红石矿一般位于矿体的上部，黑色金红石矿则位于矿体的下部。这两种矿石在矿物组合上存在明显的不同，红色金红石矿中矿物组合为：直闪石 + 斜长石 + 金红石 + 镁角闪石 + 碱性长石，黑色金红石矿的矿物组合为：直闪石 + 金云母 + 绿帘石 + 金红石。根据岩相学观察，认为红色金红石矿中存在如下反应：镁角闪石 + 碱性长石 $\rightarrow$ 直闪石 $\pm$ 斜长石 $\pm$ 金云母 (?)，斜长石很可能只是过渡相，反应最终将形成直闪石 + 金云母 (?)。黑色金红石矿中的矿物组合似乎是进行得更为彻底的上述反应。红色金红石矿中金红石成分均匀，未见有钛铁矿的出溶现象，黑色金红石矿中金红石存在明显的厚度大于 $2\ \mu\text{m}$ 的钛铁矿出溶叶片。我们认为正是这种出溶叶片导致上述两种矿石出现颜色差异。目前的资料表明该矿为角闪岩相的变质岩，但要确定该金红石矿的原岩属性还需要更深入的研究。上述研究结果对于帮助指导该矿的开采、选矿与利用均有一定意义。

岩石地球化学特征表明， TiO_2 含量高的样品主要采于基性岩区， SiO_2 含量低于 45% 和高于 55% 的样品中 TiO_2 含量均低于 1%。说明如果该金红石矿为正变质型，其相关关系应是最符合岩浆岩的元素分布的一般规律，因为 TiO_2 最为富集的岩石多属于基性岩类。总体上 MgO 与 TiO_2 之间也无明显的相关关系，但当 TiO_2 含量大于 2% 时， MgO 的含量均大于 16%。这构成该区金红石矿的一大特色。综上所述，矿石中有益组分 TiO_2 含量一般为 1.5% ~ 3.76%，最高为 5.05%。 TiO_2 含量大于 2% 时， SiO_2 含量为 45% ~ 55%， MgO 的含量均大于 16%，而 Al_2O_3 和 CaO 则明显偏低。这一化学特征显示了与岩相学观察的结果相一致，即富含金红石的岩石为透闪石含量偏低的直闪岩类。4 种不同含矿岩石的地球化学特征总体上与发生钙长石结晶分异的大洋拉斑玄武岩相似。由稀土元素分布模式推测，该矿物质来源可能与玄武质岩浆有关，为正变质岩型。 Ca 含量较低和明显的负 Eu 异常表明，该矿的原始岩浆在演化过程中发生了结晶分异作用，且分离结晶过程中经历了去斜长石化的阶段。在微量元素蛛网图中，大离子亲石元素含量的变化范围较大，而高场强元素，特别是 Nb ， Ta 分异不明显，表明岩浆受到陆壳物质的混染较少， Ti ， Zr ， Hf ， Y 的轻微亏损可能是由于在部分熔融过程中，它们被保存在锆石、金红石和钛铁矿等残留相之中的缘故。 Sr ， Ba 与 Ca 为同族元素，具有相似的化学性质，彼此间常发生类质同像替换，基于它们的这种地球化学性质，

致使其呈负异常, 由于 Ba 相对于 Ca 比 Sr 相对于 Ca 的离子半径更大, 因此 Sr 的负异常相对于 Ba 表现得更明显。以上结果表明, 去斜长石化过程使得富钛的玄武质岩浆物质钛含量增高, 因为斜长石的钛含量通常很低。玄武质岩浆去斜长石化后, 通常形成含钛较高的辉石岩或角闪石岩。这些岩石在发生角闪岩相或麻粒岩相的变质作用时, 辉石岩或角闪石岩中的含钛矿物角闪石、钛辉石及钛铁矿等钛矿物中的钛则易于形成金红石为主的钛矿物。

从锆石的阴极发光图像来分析, 按形成的先后顺序至少存在 3 期锆石, 即 I 期、II 期和 III 期。第 III 期锆石为边部或以脉状充填于第 I 和第 II 期锆石内的裂隙中, 其阴极发光最亮, 第 I 期和第 II 期锆石在最佳观察的亮度时几乎不见生长环带, 但若仅以其合适亮度获取图像, 其仍具有显著的平直韵律环带。第 III 期锆石往往以互补形态包裹早期锆石并多数以修复原锆石形态后以完好晶体形态出现, 或单独结晶成完好的晶体形态, 第 I 期锆石阴极发光强度最暗, 但具规则平直的韵律环带, 具备典型的岩浆锆石所具有的特征。

3 个样品年龄值除第 III 期锆石所占比例不同外, 其分析结果很相似, 按锆石的 ^{204}Pb 校正的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值可分出两组, 其中一组的加权平均值为 2.5 Ga 左右, 一组为 1.8 Ga 左右。后一年龄组的锆石由阴极发光图像可确定为第 III 期锆石。结合岩相学分析资料, 这一年龄对应的地质事件应为角闪岩相变质作用, 即该金红石矿的变质年龄为 $1\,831 \pm 10\text{ Ma}$, 位于古元古代与中元古代交界处。而第一组锆石年龄值的解释, 不宜简单地用“继承”二字, 因为在第一组锆石中有两期锆石, 且第 II 期锆石包裹第 I 期锆石。第一年龄组的锆石韵律环带发育, Th, U 含量及 Th/U 比值均较大, 有较明显的岩浆锆石特征。耐人寻味的是第 I 期和第 II 期锆石的年龄如此接近, 以至于用 SHRIMP U-Th-Pb 法难以将其年龄差异分辨出来。这可能有两种原因: ①这两期锆石形成年龄差别本来就很小; ②这两期锆石形成年龄差别大于测试误差范围, 产生第 II 期锆石的热事件发生时十分强烈, 足以导致第 I 期锆石的 U-Th-Pb 体系发生重新分配。无论是哪一种情况, 第 I 期和第 II 期锆石形成时的热事件都应是十分强烈的, 并且温度应远大于锆石 U-Pb 封闭体系被破坏 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 临界值。也有学者认为锆石封闭温度可达 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Watson et al., 1983, 2006), 如果后者成立, 第 I 期锆石 U-Pb 封闭体系又是被第 II 期锆石的热事件所破坏, 那么形成第 II 期锆石的热事件温度应大于 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从上述 3 个样品中的锆石 U-Th-Pb 年龄分析, 尽管上述 3 个样品的矿物组合、金红石的颜色、产地及形成的 $P-T$ 条件有所不同, 但其中锆石的特征及年龄结果却有惊人的相似, 甚至完全相同。上述锆石特征至少说明了一个结果, 即在大于或等于锆石的封闭温度条件下, 3 个样品经历了相同的地质

事件。

上述结果显示：红色金红石样品（RZ-1）中的白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温年龄谱坪年龄为 $1767 \pm 84.80 \text{ Ma}$ ，红-黑色金红石样品（RZ-3）中的白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温年龄谱坪年龄为 $1421.62 \pm 108.33 \text{ Ma}$ 。与SHRIMP锆石年龄相比较，样品RZ-1的坪年龄为 $1767 \pm 84.80 \text{ Ma}$ ，与锆石的变质年龄较为吻合，说明该样品中白云母形成时期与该矿石的变质作用时期近乎同时。这一结果表明了红色金红石矿石形成于ca. 1.8 Ga，之后几乎没有经历过大于白云母封闭温度（350℃）的热事件；对于红-黑色金红石矿，则出现另一种情况，样品RZ-3中锆石SHRIMP的U-Th-Pb主要变质作用年龄为ca. 1.8 Ga，而其中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $1421.62 \pm 108.33 \text{ Ma}$ ，说明在ca. 1.8 Ga之后应发生过大于白云母封闭温度（350℃）的热事件。这一热事件的温度却又低于锆石的封闭温度，其温度范围应在350~800℃。这一热事件是否是导致红色金红石变成黑色金红石的热事件，目前还无法论证，这也是下一步深入工作的重点。

代县金红石矿的形成与已知的金红石矿均不相同，其成因模式为由结晶分异的玄武质岩浆形成岩石发生角闪岩相及以上变质相的变质作用形成，这一成因模式在世界上也属于首次发现。因此我们将其定为“代县式金红石矿”。形成代县式金红石矿，有两个必要条件，即先形成发生分异的层状基性岩，尔后发生角闪岩相及以上变质作用。形成这种类型的矿床的条件相对苛刻，目前只有在代县发现了这种成矿条件的特征。找寻代县式金红石矿，找矿方向首先应在角闪岩相及以上高级变质作用的变质岩区寻找，其次或在与层状岩类似岩性的岩石建造中寻找。

本次研究工作得到了山西省国土资源厅和山西省地质勘查局二一一地质队有关领导和专家的大力支持，得到了中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室、地球化学分析室、Ar/Ar年代学实验室，北京离子探针中心，钢铁研究院，中国地质大学（北京）地质矿产国家重点实验室、磨片室，河北省区域地质调查队实验室等单位的大力支持，在此一并表示诚挚的感谢！

目 录

前 言

第 1 章 金红石及金红石矿概述	(1)
1.1 金红石的晶体化学特征综述	(1)
1.1.1 化学组成	(1)
1.1.2 晶体结构	(2)
1.1.3 形态	(3)
1.1.4 物理性质	(3)
1.1.5 显微镜下特征	(3)
1.2 中国金红石矿的特点及其成因综述	(4)
1.2.1 中国主要金红石矿	(4)
1.2.2 成因类型及成矿区域	(5)
1.3 金红石的用途	(7)
第 2 章 矿区地质特征	(8)
2.1 地层	(8)
2.2 构造	(9)
2.3 岩浆活动	(9)
第 3 章 矿体特征	(12)
3.1 矿体的一般特征	(12)
3.1.1 绿泥直闪岩含矿层 (体)	(12)
3.1.2 石英滑石片岩矿化层	(12)
3.2 含矿岩石特征	(13)
3.2.1 矿物成分及结构特征	(13)
3.2.2 矿物化学成分特征	(17)
3.2.3 红色与黑色金红石矿石的形成	(21)
3.2.4 对金红石矿开采与选矿的指导意义	(24)

3.3 围岩和夹石特征	(24)
3.4 矿体变化	(25)
第4章 矿石特征	(27)
4.1 矿石类型	(27)
4.2 结构构造特征	(27)
4.2.1 矿石的结构	(27)
4.2.2 矿石的构造	(28)
4.3 矿物组成及其化学成分特征	(29)
4.3.1 矿石中矿物及赋存状态	(29)
4.3.2 矿石中矿物的化学成分	(29)
4.3.3 含钛矿物及其他金属矿物的特征	(30)
第5章 岩石地球化学特征	(36)
5.1 地球化学特征	(36)
5.2 主量元素特征	(42)
5.3 微量元素特征	(43)
第6章 锆石的内部特征和矿物包裹体	(45)
6.1 锆石的研究意义	(45)
6.2 分析方法	(45)
6.3 锆石特征及其矿物包裹体	(46)
6.3.1 第 I 类锆石	(49)
6.3.2 第 II 类锆石	(49)
6.3.3 第 III 类锆石	(49)
6.3.4 第 IV 类锆石	(49)
第7章 年代学研究	(52)
7.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究	(52)
7.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学研究	(63)
第8章 源区特征及岩石成因探讨	(67)
8.1 源区特征	(67)
8.2 岩石成因及演化	(68)

8.3 成矿预测	(69)
参考文献	(71)

图 版

第1章 金红石及金红石矿概述

金红石是一种应用广泛的矿物，不仅用于工业的多个方面，而且可用做宝石材料。工业中是提取钛的矿物原料之一，钛具有密度小、强度高、耐腐蚀、抗高温等优良性能，故合金钛可用于化工、军事和空间技术中。宝石级金红石具有强光泽、优良的色调，也可成为其他多种宝石中的包裹体并可形成特殊的光学效应而为宝石增值。

中国钛资源非常丰富，但主要是钛铁矿型资源，金红石资源含钛量仅占钛资源总量的2%，另外，98%的钛资源来自钛铁矿，因此国内天然金红石资源是非常宝贵的。中国天然金红石资源绝大部分为低品位的原生矿石，其储量占全国金红石资源总量的86%，而金红石砂矿仅为14%。由于金红石资源品位低、粒度细小、矿石成分复杂，因而选矿工艺流程长，多采用重选、磁选、浮选的联合工艺流程。

金红石虽属于稀有宝石品种，产于火成岩、变质岩、花岗伟晶岩和石英脉中，但宝石级金红石矿产地主要为巴西、挪威、瑞士、苏联、法国、美国、墨西哥等地，中国缺少宝石级金红石矿。

1.1 金红石的晶体化学特征综述

1.1.1 化学组成

金红石的化学组成主要是 TiO_2 ，常含有铁、铌、钽等混入物。富铁的黑色变种称铁金红石，随着铁的含量增加，其密度和折射率随之增大。在富含铌、钽的变种（常含铁）中，在含量上，铌大于钽者称铌铁金红石（原名钛铁金红石）；钽大于铌成为钽铁金红石。 Ti^{4+} 与 Nb^{5+} ， Ta^{5+} 离子半径相近，致使后者有可能进入钛的晶格。在这种异价类质同象代换中，为了达到静电的平衡，一种可能是阳离子缺席；另一种可能是引进2价离子 Fe^{2+} ，由两个 Nb^{5+} （ Ta^{5+} ）离子与一个 Fe^{2+} 代换3个 Ti^{4+} 离子，即 2Nb^{5+}

$(\text{Ta}^{5+}) + \text{Fe}^{2+} \rightarrow 3 \text{Ti}^{4+}$ 达到平衡。随着 Nb 和 Ta 的进入晶格, 可使晶胞参数略有增大。

某些金红石及其共生的含钛矿物的化学资料表明, 其中铌和钽的含量往往具有一定的和一致的消长关系。根据中国科学院地质与地球物理研究所研究, 表 1.1 所列的 $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ 的含量为其共生矿物钛铁矿中含量的 1 倍, 进一步可以计算出两种共生矿物中 $(\text{Nb} + \text{Ta}) / \text{Ti}$ 的原子比值相同, Nb/Ta 的原子比值也相同。这说明了微量铌、钽对钛的类质同象置换程度, 取决于系统中铌、钽和钛的相对浓度。但当铌和钽浓度很高时, 类质同象的置换显然就复杂多了 (王濮等, 1984)。

表 1.1 金红石的化学成分

单位:%

成分	1	2	3	4	5
	金红石	金红石	铌铁金红石	钽铁金红石	铁金红石
CaO	0.47	0.61	痕	0.15	—
MgO	0.10	0.15	痕	痕	—
MnO	未测	—	0.19	0.38	—
Fe_2O_3	1.03	0.93	13.23	12.12	6.68
TiO_2	93.92	97.90	63.04	33.66	91.96
SiO_2	0.57	0.07	—	0.33	—
Nb_2O_5	0.036	—	23.67	13.41	—
Ta_2O_5	0.017	—	0.13	38.20	—
总计	99.523	100.76	100.26	99.96	100.04

注: 引自王濮等, 系统矿物学, 1984。

1.1.2 晶体结构

金红石属四方晶系 (图 1.1), $D_{4h}^{14} - P4_2/mnm$ 。 $a_0 = 4.58$, $c_0 = 2.95 \text{ \AA}$ ^①。

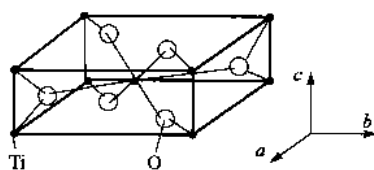


图 1.1 金红石晶体结构

(据潘兆璜, 1984)

金红石结构是 AX_2 型化合物的典型结构之一。O 离子作六方最紧密堆积, Ti 离子位于相似规则的八面体空隙中, $\text{CN} = 6$; O 离子位于以 Ti 离子为角顶所组成的平面三角形中心, $\text{CN} = 3$ 。这样就形成了一种以 $[\text{TiO}_6]$ 八面体为基础的晶体结构。 $[\text{TiO}_6]$ 八面体彼此以棱相连形成了沿 c 轴方向延伸的比较稳定的 $[\text{TiO}_6]$ 八面体链, 链间

① $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

则以 $[\text{TiO}_6]$ 八面体的共用角顶相连接。 $[\text{TiO}_6]$ 的共用棱 $\text{O—O} = 2.46 \text{ \AA}$, 非共用棱 $\text{O—O} \approx 2.95 \sim 2.78 \text{ \AA}$; 而对于未扭曲的正常的 $[\text{TiO}_6]$ 八面体而言, $\text{O—O} = 2.77 \text{ \AA}$ 。共用棱的缩短, 非共用棱的增长, 系由于中心阳离子斥力的影响所致, 从而使八面体稍有畸变。这一结构特征可以明显地解释金红石沿 c 轴伸长的柱状或针状晶形和平行延长方向的解理。 TiO_2 的 3 种变体金红石、板钛矿和锐钛矿的晶体结构都是以 $[\text{TiO}_6]$ 八面体共棱为基础的, 但每个 $[\text{TiO}_6]$ 八面体共棱或共面使中心阳离子间距缩短, 降低了晶体结构的稳定性。从多种 AX_2 化合物具有金红石结构, 以及自然界中金红石分布较广, 而锐钛矿比较少见, 也正说明了由金红石、板钛矿至锐钛矿, 结构的稳定性是递减的 (王濮等, 1984)。

1.1.3 形态

复四方双锥类, $D_{4h} - 4/mmm$ 。常具有良好的四方柱状或针状晶形。常见单形为四方柱 $m \{110\}$, $a \{100\}$ 和四方双锥 $s \{111\}$, $e \{101\}$, 有时出现复四方柱 $r \{230\}$, $h \{120\}$ 和复四方双锥 $z \{231\}$ 。晶体常具平行 c 轴的柱面条纹。常以 (011) 为双晶面成膝状双晶、三联晶或环状双晶。依 (031) 成的接触双晶罕见。针状双晶连生成网状称网状金红石。针状、纤维状晶体有时作为包裹体见于透明水晶中。集合体有时呈致密块状。

1.1.4 物理性质

常呈暗红、褐红色; 黄、橘黄; 富铁者黑色。条痕浅黄色至浅褐色。金刚光泽, 铁金红石呈半金属光泽。解理 $\{110\}$ 完全, $\{100\}$ 中等。裂开平行于 $\{092\}$ 和 $\{011\}$ 。硬度 6 ~ 6.5。性脆, 密度 $4.2 \sim 4.3 \text{ g/cm}^3$, 富铁或铌、钽者密度大, 有些可达 5.5 g/cm^3 以上。

1.1.5 显微镜下特征

透射光下, 黄至红褐色。多色性弱至清晰, N_o —黄至褐色, N_e —暗红色至暗褐色。一轴晶 (+)。 $N_o = 2.605 \sim 2.613$, $N_e = 2.899 \sim 2.901$ 。铌铁金红石: 多色性显著, N_o —黄绿、红褐, N_e —暗褐绿色、褐黑色, $N_o = 2.50 \sim 2.66$ 。钽铁金红石: N_o —灰、黄、棕黄色, N_e —绿、红棕色, $N_o = 2.50$ 。反射光下, 灰色, 有时微具淡蓝色。内反射色浅黄到褐红色。铌铁金红石和钽铁金红石的反射色和内反射色均较一般金红石为暗。

1.2 中国金红石矿的特点及其成因综述

金红石是自然界中二氧化钛分布最广的变体。在二氧化钛的各种变体中，它的分子体积最小，因而趋向于在高压、高温条件下形成。在岩浆岩中作为副矿物成细小颗粒产出，也见于某些伟晶岩和热液脉中。在伟晶岩中可成巨晶，如中国山东所产晶体长达数十厘米。有时在石英-长石脉中与白云母、钛铁矿、磁铁矿共生。在区域变质条件下，金红石常由含钛矿物（如钛铁矿）转变而成。见于角闪岩、榴辉岩、片麻岩和片岩中。

1.2.1 中国主要金红石矿

1.2.1.1 原生金红石矿

原生金红石矿是中国金红石矿的主要工业类型，占国内金红石总量的86%。该类型矿床多赋存在寒武纪古老变质岩系中，矿床成因类型主要有变基性岩浆矿床和沉积变质矿床两种，以前者最为重要。变基性原生金红石岩浆矿床的矿体一般呈似层状、脉状或不规则透镜状，矿床规模较大，但矿石品位低， TiO_2 含量一般为2%左右，典型矿床如湖北省枣阳大阜山金红石矿和山西省代县碾子沟金红石矿。枣阳大阜山金红石矿是中国目前探明储量最大的原生金红石矿床，该矿床既含有原生矿又含有砂矿，矿体多呈不规则透镜状赋存在变基性岩中， TiO_2 平均含量2.32%（徐少康，2006）。河南省方城柏树岗金红石矿床为典型的沉积变质型金红石矿床，矿区长26 km，分5个矿区，远景储量巨大（温同想，1976）。山西省代县金红石矿共有3个矿区，碾子沟矿区为一特大型金红石矿床， TiO_2 平均含量为1.92%，矿体呈似层状产出，该矿虽然矿石品位偏低，但矿石易选，储量丰富，金红石纯度高，杂质少，且可综合回收钛铁矿、磁铁矿等。近年来在江苏省北部新沂东海一带发现一区域变质榴辉岩型的大型原生金红石成矿带，如新沂县郝湖金红石矿和东海毛北-新沂蒋庄金红石矿等，矿体产于榴辉岩中，矿石中 TiO_2 平均含量为1.84%（杨文采等，2005；黄建平等，2002；王大志等，2006；Li et al., 2003；Zhang et al., 2000）。该地区金红石资源的蕴藏量十分丰富，且矿体埋藏较浅，矿石类型简单，交通方便，开采条件优越。据估算苏北地区金红石矿储量可达千万吨以上，可望成为我国重要的金红石资源基地。

1.2.1.2 金红石砂矿

金红石砂矿包括海滨砂矿和残坡积风化壳型金红石矿，海滨砂矿型金红石矿主要分布在海南、广东、广西等地。其中海南省有28个锆英石矿中伴生

有金红石矿，平均金红石含量为 $1 \sim 2 \text{ kg/m}^3$ ，总储量 1.9 万 t。风化壳型金红石主要分布在河南、湖北、山东、湖南、陕西、安徽、江苏等省。其中河南省方城柏树岗金红石矿为全国最大的风化壳型金红石砂矿，其次为陕西省安康大河熊山金红石矿和山东省莱西南墅石墨矿与石墨矿伴生的金红石矿。该类型矿床虽然规模较小，储量低，但由于具有易采、易碎、易选等特点，目前是中国金红石矿开发的主要矿石类型（张云等，2001）。

1.2.2 成因类型及成矿区域

我国金红石矿有十大成因类型和五大成矿区域。变质型是主要类型。

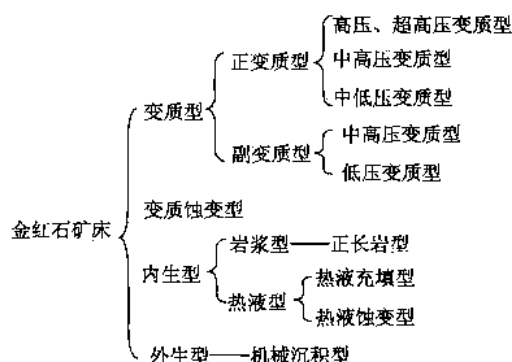


图 1.2 金红石矿成因分类

（据徐少康，2001）

1.2.2.1 矿床成因类型

（1）高压、超高压正变质型金红石矿床（榴辉岩型）

含矿岩系主要为前寒武系片麻岩；矿体呈透镜状，具尖灭侧现特征，产状与围岩（片麻岩）片麻理一致；矿石岩性为榴辉岩，矿物组合主要为绿辉石（主）+ 铁铝榴石（次）+ 金红石（少）， TiO_2 品位平均为 2.32%、最高为 6% 左右；矿床规模一般为大型。

矿床形成过程主要为：形成于大陆板块内热点或岛弧区的玄武岩，由于岩浆的阶段性的溢出，而与围岩呈互层状产出。由于板块运动，岩石被推入地幔处，温压的增高使岩石变质为金红石榴辉岩；在此过程中，由于与围岩岩性的差异，矿层被拉断，呈“尖灭侧现，无根”的产出特征。

（2）中高压正变质型金红石矿床（榴闪岩型）

含矿岩系主要为前武系石英云母片岩、白云石英片岩及白云斜长片麻岩等；矿体为榴闪岩（呈岩株状、透镜状，围岩主要为片麻岩、石英云母片岩及白云石英片岩）的一部分，呈似透镜状、透镜状及不规则板状等；矿石岩

性主要为墨绿色、黑色榴闪岩，矿物组合主要为角闪石（主）+ 铁铝榴石（次）+ 金红石（少）， TiO_2 品位平均为 2.17% ~ 3.25%、最高达 5.88%；矿床规模属中、大型。

（3）中低压正变质型金红石矿床（角闪片岩型）

含矿岩系为泥盆系大理岩及前寒武系云母斜长片岩、云母石英片岩；矿体呈层状，与大理岩（或云母斜片长岩和云母石英片岩）呈互层状产出；矿石岩性为黑云角闪片岩、角闪片岩、黑云母片岩及绿帘片岩等，主要矿物组合为角闪石（主）+ 斜长石（次）+ 黑云母（次）+ 金红石（少）；角闪石（主）+ 斜长石（次）+ 绿帘石（次）+ 金红石（少）；角闪石（主）+ 斜长石（次）+ 金红石（少）；绿帘石（主）+ 金红石（少）等， TiO_2 品位一般为 2.14% ~ 4.86%、最高达 9.46%；矿床规模一般为大型。

（4）中高压副变质型金红石矿床（片麻岩型）

含矿岩系为前武系片麻岩；矿体大致呈层状；矿石岩性主要为斜长片麻岩、花岗片麻岩。矿物组合主要有 3 种：① 以斜长石和石英为主，次为白云母和石榴子石，少量金红石、榍石、磷灰石及锆石；② 以石英和白云母为主，次为斜长石和石榴子石，少量金红石、磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿和锆石；③ 以斜长石和石英为主，次为角闪石和石墨，少量金红石、黄铁矿、磁黄铁矿、黑云母、磁铁矿、锆石、磷灰石及石榴子石等。金红石分布均匀， TiO_2 含量一般为 1% ~ 10%，矿床规模为中、大型。

（5）低压副变质型金红石矿床（绢云石英片岩型）

含矿岩系为由前寒武系绿泥绢云片岩、绢云石英片岩、变晶屑凝灰岩、绿泥钠长片岩、大理岩及变石英粉砂岩等岩石组成的低级变质岩系；矿体呈层状、似层状，产状与地层一致；矿石岩性为千枚岩、绢云石英片岩等；矿物成分主要为绢云母、斜长石及石英等，少量金红石、黄铁矿等；品位稳定， TiO_2 含量一般为 1.5% ~ 4.7%；规模为大型。

（6）变质蚀变型金红石矿床

含矿岩系为前寒武系斜长角闪片岩、榴闪岩及变粒岩，含矿岩系中常有古老基性岩侵入。斜长角闪片岩、榴闪岩中常含有一定量的金红石，基性岩也常轻度变质，也常含有金红石。斜长角闪片岩、榴闪岩及基性岩常发生蚀变，形成的蚀变岩中金红石含量大幅提高。矿体主要为透镜状、纺锤状、似板状。矿石主要为蚀变岩，岩性为细粒直闪片岩、粗粒直闪岩及滑石岩等；主要矿物组合为直闪石（主）+ 滑石（次）+ 金红石（少）；滑石（主）+ 金红石（少）等；矿石品位一般为 1.8% ~ 9%，最高可达 20% 左右。矿床规模为大型。