

新疆阿克陶红蓝宝石矿床矿物学研究^{*}

王礼胜

何明跃

王 濮

张建洪

(材料系 北京 100083)

(地矿系 北京 100083)

帕拉提 阿布都卡迪尔

(新疆工学院地质系 乌鲁木齐 830008)

摘 要 新疆阿克陶红蓝宝石矿床含矿岩石具有典型的眼球状、条带状混合岩化构造。浅色脉体中的钾长石有序度很低,属单斜正长石,其中部分发育钠长石出溶条纹。基体中出现富铝矿物矽线石和电气石,黑云母中 Al_2O_3 含量高;斜长石 A_n 值低,为钠长石。含矿岩石为富铝贫硅低钙质岩石。脉体中的红蓝宝石晶体中发现大量流体熔融包裹体。红蓝宝石矿床为混合岩化作用成因,形成于高温低压条件下。

关键词 红蓝宝石矿床 流体熔融包裹体 混合岩化作用 矿物学 新疆

分类号 P575

新疆阿克陶红蓝宝石矿床发现于80年代初期,前人曾对红宝石和蓝宝石的矿物学特征开展过研究^[1],但对与刚玉共生的矿物及矿床成因研究未见报道。作者通过对宝石的改善工作发现,该矿床的红蓝宝石具有潜在的开发远景,因此有针对性地开展有关矿物学方面的研究,所获得的矿床成因信息对于该矿床的找矿勘探工作具有指导意义。

1 含矿岩石产状及结构构造

阿克陶红蓝宝石矿床产于昆仑山西段的寒武—奥陶系米汁干群变质岩中。矿区出露岩石主要为黑云斜长片麻岩、角闪黑云二长片麻岩、石榴矽线二长片麻岩,夹有少量方柱石和透辉石大理岩。矿体产于黑云二长片麻岩中,呈透镜状分布。

含矿岩石出露于深变质岩中的强烈混合岩化作用地段,周围岩石中普遍出现顺层条带状混合岩。含矿岩石——刚玉黑云二长片麻岩中普遍发育眼球状、条带状浅色脉体。基体中矿物组合以黑云母+斜长石+钾长石为主,黑云母分解形成矽线石、电气石和金红石(图版 1,2)。脉体中矿物组成以刚玉和钾长石为主,其次出现少量钠长石和金红石等。与基体的中细粒鳞片粒状变晶结构明显不同,脉体中呈现典型的粗粒花岗结构或伟晶结构。刚玉分布于浅色眼球体或条带的核部,钾长石环绕在其周围。这种现象在河北太行山和安徽大别山的刚玉矿床中分别被称为“红眼圈”和“白眼圈”^[2,3]。这种结构构造是混合岩的典型结构构造,

收稿日期:1996—06—06

^{*} 为305项目06—06课题的部分成果。

第一作者简介:王礼胜,男,1963年出生,讲师,宝石学及矿物学专业。

因此含矿岩石实际上是眼球状或条带状刚玉黑云二长混合片麻岩。

偏光显微镜下的薄片研究发现，浅色脉体的一些钾长石颗粒中分布有定向排列的钠长石客晶，客晶呈条纹状（图版 3）。这种条纹结构是一种出溶结构。它的出现说明浅色脉体形成于高温条件下。

2 造岩矿物化学成分

鉴于前人已对刚玉开展过化学成分等方面的研究，本文主要着重于矿床成因方面的矿物学研究。表 1 列出了阿克陶矿床含矿岩石脉体和基体中的钾长石、斜长石、黑云母等造岩矿物的电子探针分析结果及单位化学式中的阳离子数。

2.1 长石

表 1 中的 A_{222} 和 A_{120} 样品分别为阿克陶红蓝宝石矿床含矿岩石脉体和基体中的钾长石。虽然两者化学成分相近，但仍然存在一些差别。前者的 SiO_2 含量较低（64.96 %），而后的相对较高（66.51 %）；前者的 TiO_2 含量（0.21 %）高于后者的含量（0.01 %）；后者的 FeO^* 含量（0.27 %）高于前者的含量（0）。说明脉体中的钾长石形成于贫硅、富钛和低铁的环境中。脉体中出现刚玉和金红石，基本上不出现含铁矿物这一点，与此推论吻合。脉体中的钾长石 Cr_2O_3 含量为 0.15 %，反映脉体成分中 Cr_2O_3 含量有一定的背景值，因此本区脉体中的刚玉多呈粉红色和紫红色。从图版 3 可见脉体中的一些钾长石中有钠长石出溶条纹，不难推测其初始形成时含钠长石组分较高。

表 1 中 A_{122} 、 A_{140} 和 A_{151} 样品均为含矿岩石基体中的斜长石。3 个斜长石样品的 An 值分别为 9.91、9.67 和 9.18，均属钠长石。变质岩中斜长石的 An 值大小主要受岩石化学成分和变质程度两个因素制约。变质岩石学的研究表明，斜长石的 An 值随变质程度的升高而增大，一般情况下绿片岩相岩石中斜长石为钠长石，角闪岩相—麻粒岩相岩石中斜长石为奥长石—中长石。本区含矿岩石基体中黑云母的标型特征及矽线石的出现反映其形成温度较高，属角闪岩相。可见由斜长石 An 值指示的变质程度与实际情况不符，因此必须考虑影响斜长石 An 值的另一个重要因素——岩石化学成分，即全岩中的 CaO 含量。从含矿岩石的基体和脉体的矿物组合（前者：钠长石 + 钾长石 + 黑云母 + 矽线石 + 少量电气石；后者：刚玉 + 钾长石 + 金红石等）可见，含矿岩石中不出现含钙质高的矿物，说明含矿岩石是一种贫钙岩石。这也是泥质变质岩中刚玉宝石形成的有利条件之一。从钠长石端员组分和钙长石端员组分的晶体化学式 $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 和 $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ 可知，其中的 Al/Si 值分别为 1/3 和 2/2。可见，在 Al_2O_3 和 SiO_2 含量一定或相近的岩石中，若富含 CaO ，在形成钙长石端员组分较高的斜长石后，易形成相对富硅贫铝的化学成分环境（因为形成钙长石消耗的铝较多、硅较少），这种环境不利于刚玉的形成和稳定。反之，富钾、钠而贫钙质的泥质变质岩中，则有利于刚玉的形成和稳定。作者在河北太行山的研究中发现，阜平群的刚玉矿床（点）均产于贫钙质的岩石中，其中的斜长石 An 值亦均较低，与上述认识是吻合的。根据基体中共生的二长石（ A_{120} 和 A_{122} 样品）的化学成分，并利用 J. C. Stormer, Jr (1975) 和 L. L. Perchuk (1989) 二长石温度计，可估算出基体中二长石的平衡温度为 500 左右。

2.2 黑云母

黑云母的理论化学式为 $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 。在实际成分中存在着广泛的类质同象现象。层间阳离子 K 可被少量 Na、Ca 取代，四面体位置中的 Si 可被 Al 取代，八面体位置的阳离子 (Mg, Fe) 可被 Ti、Al、Mn 甚至 Ni、V、Cr 取代。由表 1 中的单

位化学式中的阳离子数（其中 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 根据电价差法计算）可见，本区含矿岩石基体中的黑云母（ A_{230} 、 A_{141} 样品）的化学成分中，主要的类质同象形式有：

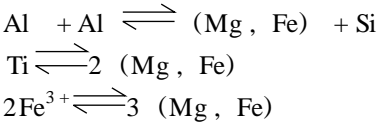


表 1 阿克陶红蓝宝石矿床造岩矿物的化学成分（ $w_B\%$ ）
Table 1 Chemical composition of rock-forming minerals in Aketao deposit

	A ₂₂₂ Or	A ₁₂₀ Or	A ₁₂₂ Pl	A ₁₄₀ Pl	A ₁₅₁ Pl	A ₂₃₀ Bi	A ₁₄₁ Bi	A ₁₁₀ Sill	A ₁₄₂ Tou
SiO ₂	64.96	66.51	66.02	65.29	65.29	36.82	36.61	37.10	37.03
TiO ₂	0.21	0.01	0.03	0.00	0.00	3.40	4.02	0.08	0.68
Al ₂ O ₃	18.49	18.55	21.54	21.57	21.05	20.18	18.37	62.42	34.25
Cr ₂ O ₃	0.15	0.00	0.00	0.04	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00
FeO *	0.00	0.27	0.02	0.29	0.00	14.75	14.63	0.24	4.54
MnO	0.00	0.18	0.02	0.00	0.01	0.26	0.18	0.00	0.00
MgO	0.03	0.00	0.30	0.23	0.26	11.93	11.94	0.49	7.79
NiO	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.24	0.19
V ₂ O ₅	0.00	0.15	0.12	0.05	0.00	0.35	0.28	0.12	0.23
CaO	0.11	0.18	1.96	1.90	1.84	0.03	0.16	0.07	0.27
Na ₂ O	2.08	2.00	9.60	9.66	9.65	0.52	0.72	0.16	2.79
K ₂ O	13.04	12.63	0.36	0.33	0.56	9.46	9.57	0.00	0.12
总和	99.25	100.49	99.98	99.38	98.73	97.96	96.49	100.91	87.87
Si	2.991	3.010	2.894	2.885	2.902	2.644	2.657	0.996	5.868
Al	1.003	0.990	1.113	1.123	1.103	1.356	1.343	1.004	0.132
Al						0.352	0.229	0.972	6.262
Ti	0.007	0.001	0.001	0.000	0.000	0.184	0.219	0.002	0.081
Cr	0.006	0.000	0.000	0.002	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺						0.161	0.321		
Fe ²⁺	0.000	0.010	0.001	0.011	0.000	0.725	0.568	0.006	0.600
Mn	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000	0.013	0.009	0.000	0.000
Mg	0.002	0.000	0.020	0.015	0.017	1.276	1.291	0.020	1.840
Ni	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.005	0.025
V	0.000	0.005	0.003	0.002	0.000	0.016	0.013	0.002	0.025
Ca	0.006	0.009	0.092	0.090	0.087	0.002	0.013	0.002	0.047
Na	0.186	0.176	0.816	0.828	0.831	0.072	0.101	0.009	0.855
K	0.766	0.730	0.020	0.018	0.032	0.866	0.887	0.000	0.025

注：Or. 钾长石；Pl. 斜长石；Bi. 黑云母；Sill. 矽线石；Tou. 电气石。中国地质大学（北京）电子探针室分析。

黑云母的化学成分主要受岩石化学成分的控制，因此其化学成分具有指示变质岩原岩性质的意义。表 1 中 A₂₃₀ 和 A₁₄₁ 两个黑云母样品，在陈光远等^[4]的 $(Al + Fe^{3+}) - (Fe^{2+} + Mn) - (Mg + Ti)$ 三角成因图解上，投影点落在沉积变质成因区和中性岩浆成因区之间，说明其原岩应属火山沉积岩，这是本区黑云母 Mg、Ti、Al 含量较高的原因。

黑云母化学成分中 Al₂O₃ 的含量是寄主岩石富铝程度的标志。作者在河北太行山的研究发现，阜平群中含刚玉矿的岩石中黑云母 Al₂O₃ 含量均大于 18.0%，而黑云母 Al₂O₃ 含量小于 18.0% 的大量岩石中均无刚玉产出。本区含矿岩石基体中的黑云母 Al₂O₃ 含量为 18.37% ~ 20.18%，说明含矿岩石属富铝岩石。可见刚玉的形成与其寄主岩石的化学成分密切相关。

偏光显微镜下含矿岩石中的黑云母呈现棕红色，从表 1 可见其 TiO₂ 含量高达 3.40% ~ 4.02%，根据前人总结的黑云母的标型特征可知其形成于高温变质条件下。薄片中可见到黑云母分解形成矽线石、金红石等，亦说明变质作用温度较高。

2.3 矽线石和电气石

含矿岩石基体中出现矽线石和电气石，它们的化学成分见表 1 (A₁₁₀ 和 A₁₄₂ 样品)。矽线石和电气石是富铝矿物，它们的出现标志着寄主岩石本身富铝。从表 1 可见矽线石中 Al 被少量 Mg、Fe 等元素取代；电气石为镁电气石 (Mg, Fe²⁺)，可被少量 Ti、Ni、V 等元素取代，Na 可被少量 Ca、K 取代。电气石是花岗岩、花岗伟晶岩和气成-热液矿床中的特征矿物，在一些变质矿床和交代岩石中亦可出现，它的化学成分中富含 B₂O₃ 和 H₂O。电气石的出现说明形成环境中存在含挥发分的流体。

3 钾长石 X 射线粉晶衍射特征

根据钾长石 (K [Al Si₃ O₈]) 结构状态的不同，可将其分为透长石 (单斜，完全无序)、正长石 (单斜，部分有序)、中间微斜长石 (三斜，部分有序) 和最大微斜长石 (三斜，完全有序)。透长石形成于高温条件下，并在快速冷却条件下得以保存。正长石形成于较高温度条件下，多为含碱质熔体的结晶产物，主要产状为中酸性—酸性岩浆、碱性岩浆的中浅成侵入体及其脉岩。微斜长石的形成温度较低，广泛见于深成岩、伟晶岩和区域变质岩中。

表 2 列出了阿克陶含矿岩石浅色脉体中的钾长石 X 射线粉晶衍射特征峰数据。与 JCPDS 卡片对照可知该钾长石属单斜晶系的正长石，其衍射线与卡片中的 No. 31—966 近于一致。由于不出现 $(\bar{1}31)$ 和 $(\bar{1}30)$ 衍射线，因此其三斜度 $_{(131)}$ 和 $_{(130)}$ 均为 0。根据 2_{060} 和 $2_{\bar{2}04}$ 值，利用 Ragland^[5] 的有序度 计算公式：

$$= \frac{9.063 + [2_{060} - 2_{\bar{2}04}]}{0.340}$$

得出其有序度 = 0.1265。

根据卡敏采夫等^[5]的计算公式：

$$t_1(o) + t_1(m) = 13.015 + 0.695 \times 2_{060} - 0.813 \times 2_{\bar{2}04}$$

$$t_1(o) - t_1(m) = 1.264 \times 2_{(131 - \bar{1}31)}$$

计算出该钾长石中 Al 在不同结构位置的占位率： $t_1(o) = t_1(m) = 0.3817$ ； $t_2(o) = t_2(m) = 0.1183$ 。

表 2 钾长石 X射线粉晶衍射特征峰值
Table 2 Values of characteristic peaks for X-ray powder diffraction of potassium feldspar

2	d	I/ I ₀	hkl	2	d	I/ I ₀	hkl
13.36	6.622	2	110	27.56	3.234	100	002
21.06	4.215	8	20 $\bar{1}$	29.84	2.992	14	131
23.54	3.776	17	130	41.68	2.156	8	060
26.92	3.309	16	220	50.70	1.799	10	$\bar{2}$ 04

注：仪器型号：日本理学 D/MAX-RC 转靶粉晶衍射仪； $\text{CuK}\alpha_1$ 。中国地质大学（北京）X 光室分析。

根据马鸿文^[6]的钾长石平衡温度（保持最终结构状态的平衡温度） T （ $^{\circ}\text{C}$ ）与 t_1 位置 Al 的占位率的相关公式：

$$T = 1355.7968 - 908.7196 \text{ Al} (t_1)$$

计算出平衡温度 $T = 662^{\circ}\text{C}$ 。

根据所获得的 39 个衍射峰数据，利用 9214 程序计算和最小二乘法修正得出钾长石的晶胞参数为： $a = 0.856$ （1）nm； $b = 1.299$ （2）nm； $c = 0.72$ （1）nm； $\beta = 116.0$ （1） $^{\circ}$ ， $V = 0.719 \text{ nm}^3$ 。

4 刚玉中的流体熔融包裹体

在阿克陶含矿岩石的刚玉中，除含有以金红石为主的晶质包裹体外，笔者还首次发现了大量原生和假次生流体熔融包裹体。这种流体熔融包裹体是近年来发现的一种新类型包裹体，是熔融包裹体和流体包裹体的过渡类型^[7]。在同一包裹体中流体相与熔体结晶相共存。迄今为止，这种包裹体仅在伟晶岩、火山岩和花岗岩中有发现。

刚玉中的流体熔融包裹体按成因类型划分为原生包裹体（图版 4—4）和假次生包裹体（图版 4—5，6）。它们均为红蓝宝石（刚玉）成矿作用期间所捕获。按物理相态组合可将其分为 4 种类型：（1）单个熔体结晶相 + 单个流体或流体组合相（液相或气液相）（图 1a）；（2）单个熔体结晶相 + 多个流体或流体组合相（图 1b）；（3）多个同种熔体结晶相 + 多个流体或流体组合相（图 1c）；（4）多种熔体结晶相（图 1d 中的 C_1 、 C_2 ）+ 多个流体或流体组合相。这 4 种类型中均可出现子矿物。

熔体结晶相由于它与包裹体主晶结晶方位不同，在正交偏光镜下可见有干涉色。根据突起、糙面、干涉色及解理可知，熔体结晶相以刚玉为主，其次为长石。液相边界多为暗色，总体上透明度亦较差，颜色较暗，推测为含 CO_2 或碳氢化合物的水溶液。气相包裹体部分的活动性强，推测以 CO_2 为主。子矿物以金红石为主。

在国产 T1350 热台上进行测温，原生包裹体中的液相和气相之间的均一温度（部分均一温度）为 520°C 左右，假次生包裹体中的液相和气相的均一温度（部分均一温度）为 $560 \sim 610^{\circ}\text{C}$ 。熔体结晶相与流体相之间在高达 1100°C 的温度下仍未均一化，说明包裹体被捕获后，发生了不可逆变化（如形成刚玉等熔体结晶相），很难再获得反映形成温度的完全均一温度。

原生流体熔融包裹体中，熔体结晶相所占体积比例较大，近于 50 %；假次生流体熔融包裹体中，熔体结晶相所占体积比例变化较大，从近于 50 %到小于 20 %。

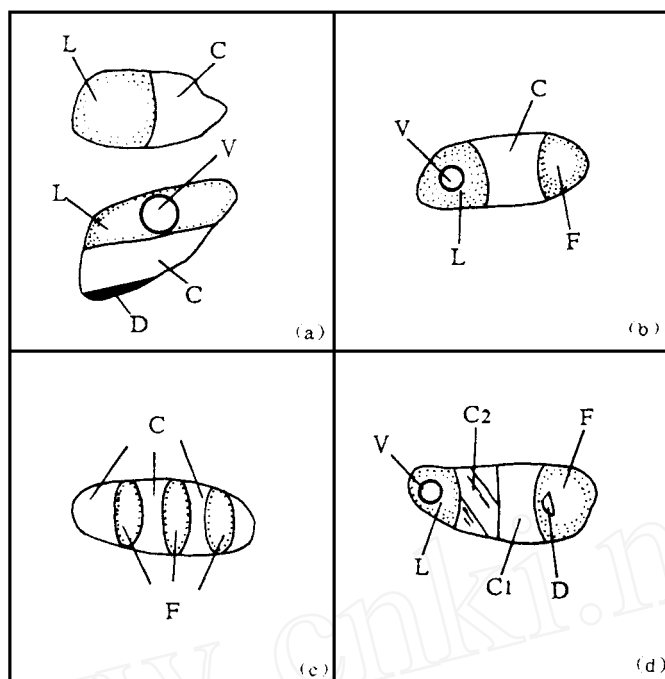


图 1 刚玉中流体熔融包裹体的类型

Fig. 1 Types of fluid-melt inclusions in corundum

C. 熔体结晶相; L. 液相; V. 气相; F. 流体相; D. 子矿物

流体熔融包裹体的特征表明，红蓝宝石（刚玉）形成于含流体的熔融体中，形成温度的下限为 600 ℃（部分均一温度得出的此下限温度远低于实际捕获时的温度）。可见，含矿的眼球状、条带状刚玉黑云二长混合片麻岩不是由单纯变质分异作用所形成，而是经过部分熔融阶段形成的。

5 矿床成因

综合上述研究获得以下认识：

(1) 阿克陶红蓝宝石矿床含矿岩石为眼球状、条带状刚玉黑云二长混合片麻岩；

(2) 含矿岩石中的斜长石为 A_n 值小的钠长石，反映含矿岩石为贫钙岩石；黑云母中 Al_2O_3 含量高，岩石中出现富铝矿物矽线石、电气石，说明含矿岩石为富铝质岩石。因此，刚玉（红蓝宝石）的形成与寄主岩石的化学成分（富铝贫硅贫钙）密切相关，并不是异地岩浆带来的物质所形成的。

含矿岩石脉体中的钾长石为单斜晶系的低有序度结构状态，属正长石。其保持结构状态的平衡温度为 662 ℃。一些部位的正长石中发育钠长石条纹。

(3) 红蓝宝石（刚玉）中大量的原生、假次生流体熔融包裹体的发现，说明其形成于熔融体中，形成温度应远高于假次生包裹体部分均一温度 600 ℃ 左右。

根据上述认识，可以总结出红蓝宝石矿床的形成模式：

富铝贫硅贫钙质岩石 $\xrightarrow{\text{高温变质作用}}$ 矽线黑云二长片麻岩 $\xrightarrow{\text{部分熔融作用}}$ 含流体的富铝质熔融

体——^{结晶分异作用}刚玉（红蓝宝石）+ 钾长石。

红蓝宝石形成的温压条件可从图 2 进行分析。图中的 BOD 区为熔融体结晶作用区，此区刚玉与钾长石为稳定矿物； AOC 为白云母在熔融体中结晶并稳定的区域。由图 2 可见，熔融体若沿路线 2 进行结晶作用，即在较高压力条件下结晶，则形成白云母，而不出现刚玉 + 钾长石的稳定组合。因此，熔融体只有沿路线 1，即在低压条件下的 BOD 区，才能形成刚玉 + 钾长石的稳定矿物组合。

结合含矿岩石脉体中的钾长石的有序度及平衡温度、刚玉中的流体熔融包裹体与图 2 的形成条件分析，可知阿克陶红蓝宝石矿床是在混合岩化作用下，部分熔融形成的熔融体在高温低压条件下结晶作用的产物。

根据以上研究，新疆阿克陶地区红蓝宝石的找矿方向及找矿标志应为：强烈混合岩化作用地段；富铝贫硅贫钙质岩石；斜长石为 An 值小的钠长石、黑云母 Al_2O_3 含量大于 18% 并出现矽线石等富铝矿物的岩石。

钱一雄高级工程师提供了部分野外资料、岩石和矿石标本；刘瑾璇教授和张文淮教授在包裹体研究中给予了指导，在此一并致谢。

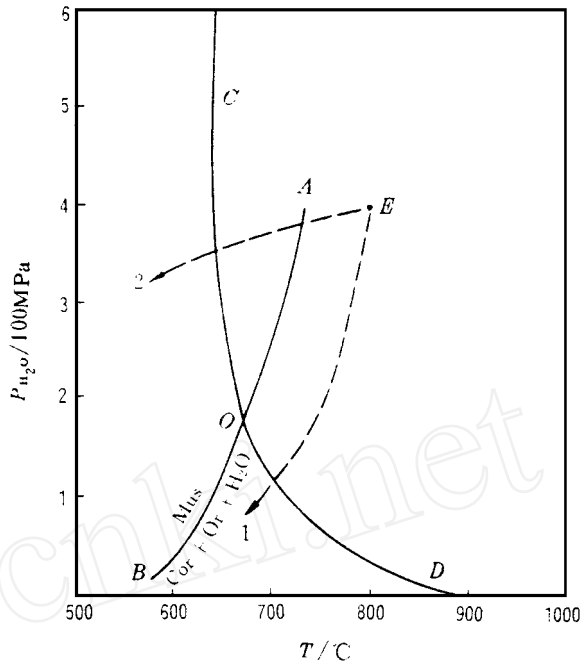


图 2 红蓝宝石形成条件相图^[8]

Fig. 2 Phase diagram for forming conditions of ruby and sapphire

A B: 白云母—刚玉 + 钾长石 + H_2O 平衡曲线; C D: 花岗岩熔融曲线; 1. 熔融体的低压结晶路线; 2. 熔融体的较高压力条件下的结晶路线

参 考 文 献

- 1 帕拉提·阿布都卡迪尔, 汪立今. 新疆某地红宝石蓝宝石矿物学研究. 7 矿物岩石, 1993, 13 (4): 68~74
- 2 王濮, 潘兆鲁, 翁玲宝等. 系统矿物学 (上册). 北京: 地质出版社, 1982. 420
- 3 海恩慈, 徐树桐, 周海渊等. 安徽省大别山北部的红刚玉. 科学通报, 1986, 31 (11): 857~861
- 4 薛君治, 陈武, 白学让. 成因矿物学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 158~161
- 5 叶大年, 金成伟. X 射线粉末法及其在岩石学中的应用. 北京: 科学出版社, 1984. 242~250
- 6 马鸿文. 钾长石 X 射线与红外有序度的对比及与 Al 占位和平衡温度的关系. 矿物学报, 1988, 8 (2): 143~150
- 7 卢焕章. 流体熔融包裹体. 地球化学, 1990, (3): 225~229
- 8 Carmichael I S E, Turner F J, Verhoogen J. Igneous petrology. New York: McGraw-Hill Book Co, 1974

MINERALOGICAL STUDY ON RUBY AND SAPPHIRE DEPOSIT OF AKETAO, XINJIANG

Wang Lisheng He Mingyue Wang Pu Zhang Jianhong

(*China University of Geosciences, Beijing, 100083*)

Parat ·Abdukadir

(*Xinjiang Institute of Technology, Wulumuqi, 830008*)

Abstract

The gemmiferous rocks in ruby and sapphire deposit of Aketao (Xinjiang) are characterized by augen and banded structures of migmatization. The potassium feldspar with perthitic albite in the leucosome is much disordered ($X_{\text{An}} = 0.1265$) and belongs to orthoclase. Some Al_2O_3 -rich minerals as sillimanite and tourmaline are found in the melanosome. Biotite in the melanosome is with high Al_2O_3 content ($w_B = 18.37\% \sim 20.18\%$) and plagioclase is with low X_{An} value, which is albite. The gemmiferous rocks are Al_2O_3 -rich, SiO_2 -poor and CaO -low. Abundant fluid-melt inclusions are found in the crystals of ruby and sapphire. The deposit is formed by migmatization with high temperature and low pressure.

Key words : deposit of ruby and sapphire, fluid-melt inclusion, migmatization, mineralogy, Xinjiang

图 版 说 明

图版

1. 含矿岩石基体中的矿物组合：黑云母 + 斜长石 + 钾长石。×40，单偏光。
2. 基体中的黑云母分解形成矽线石、金红石等。×40，单偏光。
3. 脉体中正长石的条纹结构（出溶结构）。×40，正交偏光。
4. 刚玉中的原生流体熔融包裹体。×200，正交偏光。
5. 刚玉中的假次生流体熔融包裹体。×200，正交偏光。
6. 刚玉中的假次生流体熔融包裹体群。×400，正交偏光。

