

文章编号:1673-9469(2013)01-0045-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2013.01.012

西大别高压-超高压片麻岩中电气石化学特征

张景森^{1,2},周俊杰^{1,2},张静³

(1. 河北工程大学 资源学院,河北 邯郸 056038;2. 河北工程大学 河北省资源勘测研究实验室,河北 邯郸 056038;
3. 河北工程大学 图书馆,河北 邯郸 056038)

摘要:报道了大别山西段高压、超高压片麻岩中电气石矿物化学特征。所研究含电气石片麻岩为深色、呈夹层或透镜体状分布于广泛的浅色片麻岩中,主要由石榴石、黑云母、斜长石、石英、角闪石和钛铁矿组成,少量矿物有多硅白云母、金红石、绿泥石、绿帘石和磷灰石,电气石零星分布。电子探针分析结果表明,电气石化学成分贫铝、贫钙、富镁,为镁电气石;晶体具有弱成分环带,从核部到边缘呈钙增加、钠减少的趋势。根据电气石成分与成岩环境图解,电气石形成于变泥质岩和变砂质岩环境,与片麻岩产出地质环境相一致。根据电气石化学成分确定其变质温度和变质压力,目前仍然需要积累更多资料进行论证。

关键词:电气石;化学特征;片麻岩;高压-超高压变质作用;大别山西段

中图分类号:P571;P574.2;P575.1

文献标识码:A

Chemistry of the tourmaline in the HP - UHP gneisses from the western Dabie Mountain, central China

ZHANG Jing - sen^{1,2}, ZHOU Jun - jie^{1,2}, ZHANG Jing³

(1. College of Resource Sciences, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Hebei Handan 056038, China; 3. Library, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: It is reported that the mineralogic chemistry of the tourmalines in the high - pressure (HP) and ultrahigh - pressure (UHP) gneisses from the western Dabie Mountain. The tourmaline - bearing gneisses are dark - colored and occur as interlayer or lentoid mass in the extensive light - colored gneisses. They are mainly composed of garnet, biotite, plagioclase, quartz, amphibole and ilmenite, and in the minor of phengite, rutile, chlorite, epidote and apatite, while the tourmaline crystals are scattered. By the electron microprobe analysis, the tourmalines are poorer in aluminum and calcium, richer in magnesium, and belong to dravite; their crystals show weak compositional zonation with calcium increase and sodium decrease from core to rim. In the diagram of tourmaline composition and their genetic environments, the tourmalines are formed in the metapelites and metapsammites, which are consistent with the geologic setting of the gneisses. As for determination of the temperature and pressure in metamorphic rocks by the tourmaline composition, more information and discussion are still necessary at present.

Key words: tourmaline; chemistry; gneiss; HP - UHP metamorphism; western Dabie Mountain

电气石是一种具环状结构、成分复杂、性质稳定的含硼硅酸盐矿物,具有许多独特的物理化学性质,如热电性、压电性、天然电极性、红外辐射、

释放负离子等,因而其在环境保护、医疗保健、电磁屏蔽等应用领域的研究受到人们的普遍重视^[1-6]。电气石是地壳各类岩石中普遍存在的副

收稿日期:2012-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40872056)

特约专稿

作者简介:张景森(1966年-),男,山东泗水人,博士,副教授,从事岩石学、地质资源与地质工程领域的研究与教学。

矿物,其寄主岩石的化学成分变化范围很大,包括花岗质岩、热液交代蚀变岩、各类变质岩和沉积岩,电气石的物理化学稳定性使之成为沉积岩中常见的重砂矿物之一。电气石具有十分宽广的温度-压力稳定范围,可以在从低温低压到超高温超高压的条件下保持稳定^[7]。电气石的晶体结构还可以容纳各种电荷和半径的微量元素和稀土元素离子,也可以反映其形成环境。电气石还常常形成电气石岩和矿床,以及与许多矿床具有成因联系^[8-13]。因此,电气石被许多学者认为是非常适合作为成岩成矿环境条件的指示矿物^[7,14],在利用变质岩中电气石的成分确定其变质温度条件方面也有所尝试^[15]。

大别山造山带是我国华北板块与扬子板块之间的碰撞缝合带的一部分,发育了大量的超高压变质岩,作为研究板块碰撞、陆壳俯冲和折返地球动力学问题的重要场所,近二十几年来受到中外地质学家的重视和广泛而深入的研究,取得了大量重要成果。许多研究者都注意到大别山高压与超高压变质岩中普遍存在副矿物电气石,除了对大别山地区现代河流沉积物及沉积盆地侏罗纪地层中电气石碎屑进行的成分分析和论证沉积物的源区特征^[16]外,至今未见有关大别山高压和超高压变质岩中原生电气石分析资料的报道。本文研究了大别山西段高压-超高压片麻岩中原生电气石的化学特征,并分析其对高压和超高压变质作用的指示意义及存在的问题。

1 区域地质背景

位于我国中东部的秦岭-大别-苏鲁造山带由高压-超高压变质带组成,是华北板块和扬子板块两大陆在晚三叠纪发生的板块碰撞和陆壳俯冲作用中形成的。大别山西段作为这一高压-超高压变质带的一部分,分布于河南省南部和湖北省北部,其西侧由大悟断裂与桐柏山地区分隔、东侧由商-麻断裂与东大别接壤,呈一相对独立的块体,文献中通常称其为红安地块。这一地区以新县高压-超高压变质地体为核心呈一构造穹隆,南北两翼由高压至中低压变质带组成。岩石构造单元从北到南可以划分为五个部分:南湾变质复理石单元(I)、八里畷构造混杂岩单元(II)、浒湾-红安高压榴辉岩单元(III₁、III₂)、新县高压-超高压榴辉岩单元(IV)和木兰山蓝片岩-绿片岩单元(V),各单元之间大多由碰撞造山后伸展

作用形成的多层拆离带所分隔^[17](图1)。其中新县高压-超高压榴辉岩单元主要由花岗质到花岗闪长质片麻岩和少量的副片麻岩和白云母片岩等组成,富含超高压榴辉岩透镜体或布丁块体;红安高压榴辉岩单元主要岩石类型除了花岗质到花岗闪长质片麻岩类外,还有大量浅粒岩和白云母片岩夹层,高压榴辉岩呈透镜体、夹层状或布丁产出。区内花岗岩类岩石主要是在白垩纪侵入形成的。

2 含电气石片麻岩产状

含电气石的片麻岩见于样品 X074 和 X122。样品 X074 采自红安高压单元内,地点位于七里坪镇东南侧的石灰山采石场,附近岩石主要是呈层状产出的浅灰色白云钠长片麻岩,夹有白云母片岩、斜长角闪岩等,原有的透镜体大理岩业已开采殆尽;含电气石的片麻岩为石榴黑云斜长片麻岩,呈夹层状或透镜状产于浅色片麻岩中,颜色较暗,与浅色片麻岩界限明显。样品 X122 采自新县超高压单元内,取样点位于西张店东南 G45 广大高速公路穿山隧道处,周围岩石以浅灰色白云斜长片麻岩为主,样品则为暗色的石榴角闪黑云斜长片麻岩,呈夹层状产于浅色片麻岩中。取样位置见图1所示。另外,图1中还标注了大别山南缘现代河流重砂样 XH9 的位置^[16]。

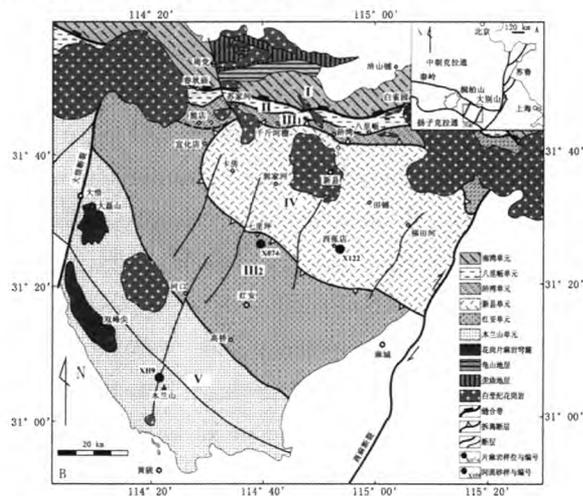


图1 西大别区域地质简图及取样位置(据文献^[17]修改)

Fig.1 The geological map of the western Dabie Mountain and the sampling location of gneisses

图 A - 大别山西段在秦岭-大别-苏鲁造山带中的位置;图 B - 西大别区域地质简图,图中:I - 南湾变质复理石单元,II - 八里畷构造混杂岩单元,III1 和 III2 - 高压榴辉岩单元,IV - 高压-超高压榴辉岩单元,V - 蓝片岩-绿片岩单元。现代河流沉积砂样 XH9 取样点见文献^[16]。

为叙述方便,样品 X074 和 X122 将根据其产出的高压和超高压岩石构造单元分别称其为高压片麻岩和超高压片麻岩。实际上,它们和其它产于高压、超高压变质带中的片麻岩一样,由于后期的退变质作用改造,岩石中已经难以见到直接的高压或超高压指示矿物证明它们经历过高压或超高压变质作用。相反,这些片麻岩围限的榴辉岩块体则存在岩石经历高压或超高压变质作用的证据。当然,也有学者在一些片麻岩的锆石中发现了高压或超高压矿物的超微包裹体。现在一般认为这些片麻岩和它们所包围的榴辉岩一起经历了高压或超高压变质作用。

3 含电气石片麻岩岩相学特征

高压片麻岩样品 X074 手标本呈灰黑色,具不等粒粒状变晶结构,片麻状构造。在偏光显微镜下进行详细观察,岩石的矿物组成主要有石榴石(12%)、斜长石(40%)、石英(20%)和黑云母(15%),还含有少量多硅白云母(3%)、绿泥石(3%)、绿帘石(2%)、角闪石(2%)、钛铁矿(2%)、金红石(1%)、磷灰石(<1%)和电气石(<1%),如图2-a、b所示。电气石呈短柱状,长宽尺寸约0.4×0.6 mm²,发育有垂直长轴方向的裂纹,共生矿物有斜长石和黑云母,晶体内部包裹有斜长石(图2a)。

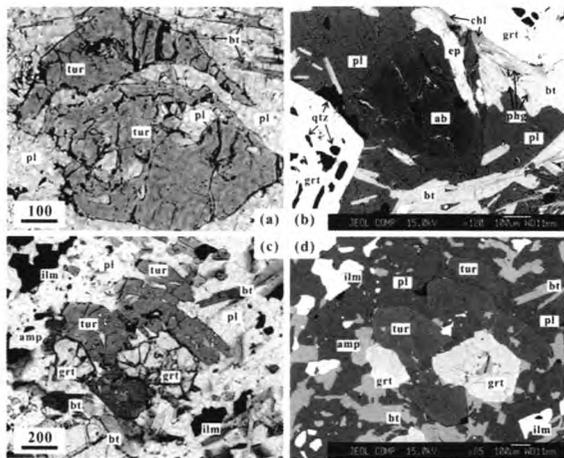


图2 片麻岩矿物组成与电气石关系显微及BSE图像

Fig. 2 The micrographs and BSE images showing the relationships between tourmaline and other minerals in gneisses

(a) X074 样品电气石显微图像(单偏光)显示其与斜长石、黑云母的共生关系;(b) X074 样品电子背散射(BSE)图像显示片麻岩石榴石、斜长石(部分钠长石)、黑云母、多硅白云母、绿泥石、绿帘石、石英的组合关系;(c) X122 样品电气石显微图像(单偏光),矿物组合为石榴石、

斜长石、黑云母、钛铁矿、角闪石和电气石;(d) X122 样品与图(c)对应的电子背散射(BSE)图像。图中矿物缩写代号[18-19]:ab-钠长石,amp-角闪石,bt-黑云母,ep-绿帘石,grt-石榴石,ilm-钛铁矿,phg-多硅白云母,pl-斜长石,qtz-石英,tur-电气石。

超高压片麻岩样品 X122 手标本呈深灰色,不等粒粒状变晶结构,片麻状构造。显微镜下观察表明,岩石的主要矿物组成为石榴石(10%)、斜长石(40%)、黑云母(15%)、石英(12%)、角闪石(15%)、绿泥石(3%)、钛铁矿(5%)、磷灰石(<1%)和电气石(<1%),石榴石变斑晶中包裹的少量矿物有钠云母、角闪石、绿泥石、石英(图2c、d)。电气石呈柱状变晶,晶粒大小不等,长宽尺寸从0.1×0.4 mm²到0.2×0.7 mm²,共生矿物有石榴石、斜长石、黑云母、钛铁矿,斑晶内包裹体矿物有斜长石、角闪石和钛铁矿,晶体沿垂直长轴方向发育裂纹(图2-c、d)。

4 电气石化学特征

电气石具有复杂的化学成分变化。化学结构式通常记为 $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$,其中各离子位置的配位情况及常见离子为^{IX}X: Na⁺、K⁺、Ca²⁺和□(空位);^{VI}Y: Ti⁴⁺、Al³⁺、Fe³⁺、Cr³⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺、Zn²⁺、Li⁺;^{VII}Z: Al³⁺、Fe³⁺、Cr³⁺、Mg²⁺、Fe²⁺;^{IV}T: Si⁴⁺、B³⁺、Al³⁺;^{III}B: B³⁺;^{IV}V: OH⁻、O²⁻;^{II}W: OH⁻、F⁻、O²⁻ [20]。不同位置的离子替代以及离子有序无序排列形成了电气石复杂的化学特征。

对片麻岩中电气石化学成分进行了电子探针测试。分析工作在核工业北京地质研究院分析测试实验室完成。所用电子探针分析仪器型号为 JEOL JXA-8100,分析条件为加速电压 15 kV,束流为 10 nA,束斑直径为 1 μm,标准样品使用美国 SPI 公司的标准矿物。

电气石电子探针数据标准化处理使用 Win-Clastour 程序 [21] 进行,标准化条件为 Si = 6、B = 3,并估算 Li 含量。标准化后电气石分子中未出现 Fe³⁺。电气石成分分析结果如表 1 所示。

电气石族矿物的分类首先是根据其标准分子式中 X 位置(Na⁺ + K⁺)、Ca²⁺和空位的占位情况区分为碱质组、钙质组和 X 位置空位组;其次根据 W 位置 OH⁻、F⁻和 O²⁻的占位情况区分为羟基亚组、氟亚组和氧亚组 [22]。由表 1 可以看出,电气石属于碱质组;本例中未测定 F 元素,电气石只能属于羟基亚组。

表1 电气石电子探针分析及标准化结果

Tab.1 Electronic microprobe analysis of Tourmalines and their normalization

样品号	X074			X122				
	核部	幔部	边部	核部	核部	幔部	幔部	边部
SiO ₂	37.36	37.31	36.94	35.98	35.87	36.55	36.14	36.15
TiO ₂	0.50	0.31	0.79	0.57	0.48	0.59	0.59	0.55
Al ₂ O ₃	31.07	31.18	30.82	29.84	30.25	30.15	29.72	30.06
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.08	0.07	0.00	0.03	0.01	0.03
FeO*	5.87	5.73	6.10	6.94	6.81	7.03	7.03	7.33
MnO	0.02	0.02	0.03	0.00	0.09	0.00	0.04	0.02
NiO	0.04	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.04
MgO	8.25	8.35	8.03	8.48	8.39	8.49	8.35	8.34
CaO	0.50	0.45	0.93	0.62	0.62	0.64	0.75	0.78
Na ₂ O	2.37	2.25	1.96	2.44	2.42	2.40	2.29	2.34
K ₂ O	0.02	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03	0.05
Σ	86.01	85.62	85.69	84.97	84.97	85.90	84.97	85.69
Si	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Ti	0.06	0.04	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
Al	5.88	5.91	5.90	5.86	5.96	5.83	5.82	5.88
Cr	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.79	0.77	0.83	0.97	0.95	0.97	0.98	1.02
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Ni	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mg	1.98	2.00	1.95	2.11	2.09	2.08	2.07	2.06
Ca	0.09	0.08	0.16	0.11	0.11	0.11	0.13	0.14
Na	0.74	0.70	0.62	0.79	0.79	0.76	0.74	0.75
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Li**	0.29	0.28	0.22	0.00	0.00	0.05	0.06	0.00
B	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Σ	18.84	18.78	18.79	18.92	18.98	18.87	18.89	18.94
Fe [#]	0.29	0.28	0.30	0.32	0.31	0.32	0.32	0.33
FeO [#]	0.42	0.41	0.43	0.45	0.45	0.45	0.46	0.47

FeO* 为总铁; Li** 为计算值; Fe[#] = Fe/(Fe + Mg), FeO[#] = FeO/(FeO + MgO)。

根据表1分析结果,电气石分子式中T位置为6个Si占据,Z位置几乎全被Al占据,Y位置以Fe²⁺和Mg²⁺为主,对于高压片麻岩X074中的电气石Y位置估计含有少量Li。电气石Fe/(Fe + Mg)比值为0.28~0.33,属于黑电气石-镁电气石系列中富镁的成员,应定名为镁电气石(Dravitite)^[22]。

根据电气石的成分与测试点在矿物晶体中的位置关系显示(图3):电气石晶体从核部到边缘显示出具有弱的成分环带特征,最明显的变化是Ca²⁺呈增加趋势、Na⁺呈减少趋势。

总的来看,片麻岩中电气石具有贫铝、贫钙、富镁的特点,但两类片麻岩中的电气石成分略有

差异。高压片麻岩中电气石Mg、Fe²⁺、Na、Ca含量较低,Li较多,但Fe/(Fe + Mg)比值较低;超高压片麻岩中电气石不含Li,Mg、Fe²⁺、Na、Ca含量较高,但Fe/(Fe + Mg)比值较高(图3、表1)。

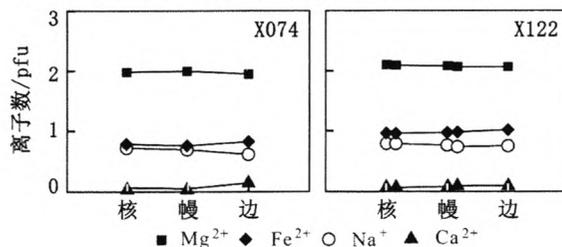


图3 电气石成分剖面图

Fig.3 The compositional profile of tourmaline in gneisses

5 电气石对变质成岩指示意义的讨论

5.1 电气石的成岩环境

电气石成分中的 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 比值能灵敏地反映其寄主岩石类型及其成因:与花岗岩有关的电气石 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 值最高,大于 0.7;与变泥、砂质岩石有关的电气石 $\text{FeO}/(\text{Fe} + \text{MgO})$ 值中等,约 0.4 - 0.7;块状硫化物矿床中电气石 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 值最低,只有 0.2 左右^[9]。本文电气石 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 比值为 0.41 ~ 0.47,反映了其成因与变泥、砂质沉积岩形成的片麻岩、片岩有关,这与含电气石片麻岩产出的地质条件是一致的。

判断电气石与其寄主岩石成因类型的关系最常用的方法是根据 Henry 等^[23]对电气石成分数据统计后制作的 $\text{Al} - \text{Al}_{50}\text{Fe}_{50} - \text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}$ 三元图解和 $\text{Ca} - \text{Fe} - \text{Mg}$ 三元图解。在 $\text{Al} - \text{Al}_{50}\text{Fe}_{50} - \text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}$ 三元图解(图 4 - a、b)中,高压片麻岩中的电气石成分点分布于 5 区,其寄主岩石属于不含铝饱和矿物的变泥质岩和变砂质岩;超高压片麻岩中电气石分布于 6 区,其寄主岩石属于变质泥岩。在 $\text{Ca} - \text{Fe} - \text{Mg}$ 三元图解(图 4 - c)中,两种片麻岩中的电气石均分布于 10 区,其寄主岩石为贫钙的变泥质岩、变砂质岩。因此,结合与电气石共生矿物的岩相学观察,电气石应该经历了寄主岩石的高压或超高压变质作用过程。

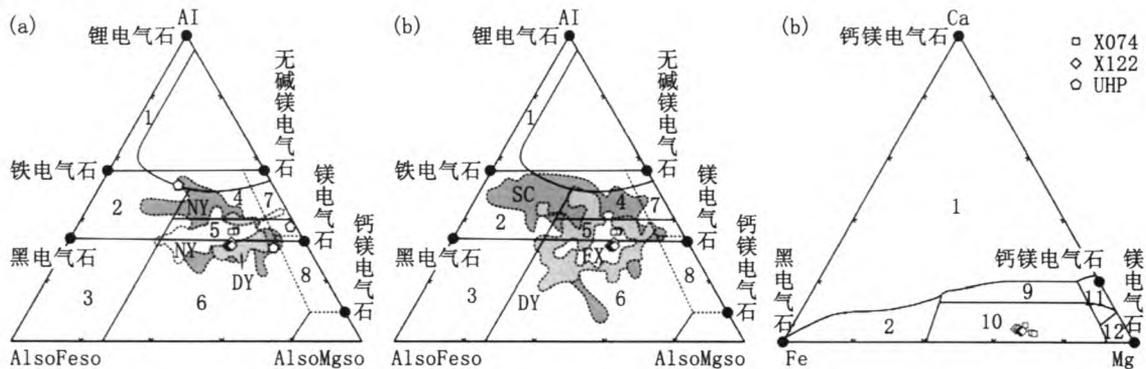


图4 电气石成分与其形成环境关系判别图

Fig. 4 The $\text{Al}-\text{Al}_{50}\text{Fe}_{50}-\text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}$ and $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Mg}$ diagrams (in molecular proportions) for tourmalines and their genetic environments

(a) 片麻岩电气石成分与现代河流碎屑电气石成分比较图, BY - 大别山北缘河流、DY - 东缘河流、NY - 南缘河流^[16], UHP 样品为超高压电气石^[15]; (b) 片麻岩电气石成分与侏罗纪地层碎屑电气石成分比较图, SC - 商城盆地、FX - 肥西盆地、HF - 合肥盆地^[16]; (c) 电气石 $\text{Ca} - \text{Fe} - \text{Mg}$ 三元图解。图中 Fe 为总铁。电气石成分与形成环境关系分区图^[23]: 1 - 富锂花岗质伟晶岩和细晶岩, 2 - 贫锂花岗质伟晶岩和细晶岩, 3 - 富高铁石英电气石岩(热液交代花岗岩), 4 - 含铝饱和矿物的变泥质岩和变砂质岩, 5 - 不含铝饱和矿物的变泥质岩和变砂质岩, 6 - 富高铁石英电气石岩、钙硅质岩和变泥质岩, 7 - 低钙变质超基性岩和富铬、钒变沉积岩, 8 - 变质碳酸盐岩和变质辉石岩, 9 - 富钙变泥质岩、变砂质岩和钙硅质岩, 10 - 贫钙变泥质岩、变砂质岩和石英电气石岩, 11 - 变质碳酸盐岩, 12 - 变质超基性岩; 7 和 8 区与 4、5、6 区有重叠。

从图 4 中可以看到,与片麻岩中电气石成分相近的电气石碎屑几乎在大别山北缘、东缘和南缘所有现代河流沉积物中都有出现,也出现在大别山北侧的商城盆地、肥西盆地和合肥盆地的侏罗纪地层中。与片麻岩电气石成分最相似的沉积碎屑电气石集中分布于东大别的现代河流沉积物和肥西盆地侏罗纪地层中。东大别出露大面积的高压、超高压变质岩石,与东缘河流沉积物中电气石成分相一致。南大别河流域内主要出露高压变质岩,电气石碎屑成分分布趋势明显有别于大别东缘河流沉积电气石成分特征。大别北缘的河

流和合肥、商城盆地侏罗纪地层中的电气石碎屑成分分布范围更大,它们除了来源于高压和超高压变质岩外,还具有其他来源如花岗质伟晶岩、富铝的变泥质岩和砂岩等。侏罗纪地层中电气石碎屑也进行比较,是因为在晚侏罗世之前大别山高压-超高压岩石已经折返抬升到地表、成为侏罗纪时期盆地沉积物的物源剥蚀区^[24]。

5.2 电气石形成的 P - T 条件

电气石稳定的 P - T 范围非常宽广,电气石的成分特征能够反映其形成的 P - T 条件,如有学者

提出超高压变质岩石中电气石的^{VI}Al含量(电气石分子Y和Z位置的Al)与其形成的最高温度具有良好的相关关系^[15]。

目前根据电气石化学成分确定其形成的P-T条件仍然是困难的,但如果对电气石寄主岩石的变质作用研究很深入,将有可能找到电气石化学成分与其形成的P-T条件之间的内在联系。对大别山西段变质作用P-T条件的研究,目前已经取得了许多重要的进展,主要体现在对榴辉岩变质作用的研究方面^[25]。如在七里坪附近、与高压片麻岩X074取样地点相距仅2 km的高压榴辉岩变质峰期P-T条件为2.4 GPa~2.6 GPa和570~585 °C,同时榴辉岩中石榴石成分环带还记录了从1.8 GPa~1.9 GPa和500~510 °C开始升温升压的进变质过程^[26]。又如,与超高压片麻岩X122取样点距离约9 km的超高压榴辉岩也获得了2.8~2.9 GPa和610~614 °C的变质峰期P-T条件,同样石榴石成分环带记录的进变质P-T轨迹从1.8 GPa和520 °C到2.2 GPa和580 °C具有显著的升温 and 稍有升压、再到峰期的显著升压过程^[27]。有关大别山西段片麻岩的变质作用研究成果不多。对本文同一高压片麻岩样品所进行的金红石与钛铁矿的退变质演化关系分析未能很好地约束片麻岩的退变质P-T条件^[28];对同一地点高压片麻岩样品所进行的相平衡模拟表明,片麻岩中的石榴石成分环带记录了岩石从1.8 GPa和496 °C到2.2 GPa~2.3 GPa和555~561 °C的高压进变质过程,以及岩石在1.0 GPa~1.1 GPa和608~611 °C的角闪岩相的退变质改造作用,同时也给出了压力和温度各有±0.15 GPa和±15 °C的误差估计^[29]。目前学者们普遍认为在大别山高压和超高压变质带内,广泛存在的片麻岩和其中的榴辉岩块体一起经历了高压或超高压变质作用。因此,电气石的变质P-T条件与其寄主岩石片麻岩的变质P-T条件是相当的。

根据对超高压电气石的研究,电气石中^{VI}Al与其变质峰期温度具有正相关关系^[15]。把本文片麻岩中电气石成分的^{VI}Al含量与岩石变质最高温度的关系进行投影,如图5所示。高压与超高压片麻岩中电气石^{VI}Al含量相近,两处岩石也有十分接近的最高变质温度(高压榴辉岩温度较低可能是由于岩石没有明确的记录或方法原因),它们在图5中投影位置较接近超高压电气石的^{VI}Al-T关系曲线,当然也存在一定的偏离。这说明,一方面

如果电气石的^{VI}Al-T相关性正确,则可能并不限于超高压形成的电气石,而是可以推广到高压电气石的情况;另一方面,电气石成分与形成温度的确切关系仍然需要更多数据资料的佐证。另外需要注意的是,本文的片麻岩如果都经历了从约500 °C到610 °C升温的高压进变质过程,则电气石成分环带显然没有对这一温度变化有所显示。

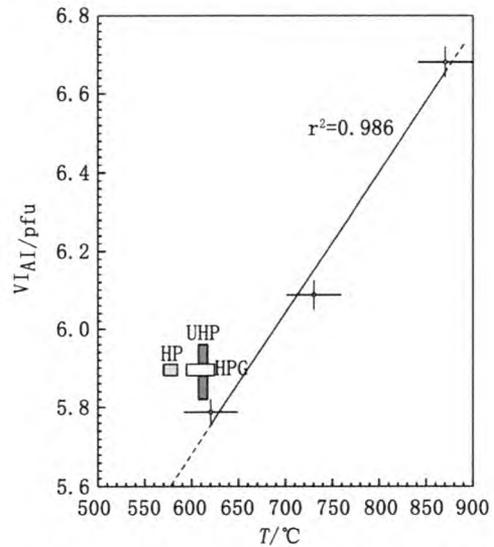


图5 电气石^{VI}Al含量与其形成温度的关系

Fig. 5 The relationship between the ^{VI}Al content (sum of Al at the Y and Z sites) and the temperature of tourmaline formation

图中:HP-高压榴辉岩[26],UHP-超高压榴辉岩[27],HPG-高压片麻岩[29];超高压电气石^{VI}Al-T关系曲线^[15]。

至于电气石形成的压力条件,从Al-Al₅₀Fe₅₀-Al₅₀Mg₅₀三元图解(图4a、b)来看,高压片麻岩的电气石成分点落入5区,超高压片麻岩中电气石成分落入6区,高压和超高压变质岩分布区现代河流沉积碎屑电气石也分布于5区和6区、且电气石与变质岩分布特征具有明显的相关性。因此可以推论,5区可能代表高压变质条件、6区代表超高压条件。然而根据文献[15],超高压电气石成分可以分布于6区、5区(或7区)和2区(图4a),不符合上述推论。因此,有关电气石成分与其形成压力的关系仍然是不明确的。

6 结论

1) 大别山西段高压-超高压变质带中,所研究的含电气石片麻岩野外呈深灰色夹层或透镜体分布于浅色片麻岩中;片麻岩主要由石榴石、黑云母、斜长石、石英、角闪石、钛铁矿组成,少量矿物

可见多硅白云母、金红石、绿泥石、绿帘石、磷灰石,电气石零星分散其中。电气石具有贫铝、贫钙、富镁的特征,Fe/(Fe + Mg)比值0.28 ~ 0.33,为黑电气石-镁电气石混溶系列中的镁电气石。电气石晶体具有弱成分环带,从核部到边缘,钙略增加、钠略减少。

2) 根据电气石成分与其成岩环境分区图解判别,电气石形成于变泥质岩和变砂质岩环境,它们应该经历了其寄主片麻岩的高压或超高压变质作用过程。

3) 超高压电气石^{VI}Al含量与其形成温度的相关关系可以推广到高压电气石的情况,但确切的相关性仍然需要更多数据加以佐证;电气石成分与其形成压力之间的关系目前仍不明确。

致谢:核工业北京地质研究院分析测试实验室的于阿朋工程师对样品电子探针分析工作给予了极大的帮助,在此谨表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 莫尊理,孙豫,郭瑞斌,等. 电气石的性能及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30 (4): 822 - 826.
- [2] 印万忠,韩跃新,任飞,等. 电气石在环境工程中应用的基础研究[J]. 矿冶, 2005, 14 (3): 64 - 68, 45.
- [3] 梁岩,商平,孙恩呈,等. 电气石粉对油田采出废水处理效果实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26 (4): 375 - 380.
- [4] 魏存弟,孙彦彬,杨殿范,等. 电气石活化水效应的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40 (6): 1450 - 1455.
- [5] 朱华静,陈则立,张青,等. 电气石净化处理含Pb²⁺、Cu²⁺、Cd²⁺ + 废水的研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30 (11): 205 - 207.
- [6] 陈健芬,陈美华. 人类健康与绿色环保新材料-托玛琳(Tourmaline)及其在牙膏中的应用研究[J]. 牙膏工业, 2006(1): 16 - 21.
- [7] VAN HINSBERG V J, HENRY D J, MARSCHALL H R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment [J]. The Canadian Mineralogist, 2011, 49: 1 - 16.
- [8] 王进军,赵枫. 电气石的化学特征与相关矿床的关系[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17 (3): 161 - 163, 174.
- [9] 廖忠礼,莫宣学,潘桂棠,等. 藏南过铝花岗岩中电气石的矿物化学特征及成因意义[J]. 现代地质, 2007, 21 (2): 291 - 295, 420.
- [10] 卢宗柳. 我国电气石矿床类型及其地质特征[J]. 矿产与地质, 2008, 22 (2): 174 - 178.
- [11] 王劲松,周家喜,杨德智,等. 贵州大坪电气石岩的发现及其找矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29 (1): 32 - 40.
- [12] 薛建玲,许虹,高一鸣,等. 辽宁后仙峪硼矿床中电气石的矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. 中国地质, 2006, 33 (6): 1386 - 1392.
- [13] ZHANG A C, WANG R C, JIANG S Y, et al. Chemical and textural features of tourmaline from the spodumene - subtype Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, Northwestern China: A record of magmatic to hydrothermal evolution [J]. The Canadian Mineralogist, 2008, 46: 41 - 58.
- [14] 毛景文,王平安,王登红,等. 电气石对成岩成矿环境的示踪性及应用条件[J]. 地质论评, 1993, 39 (6): 497 - 507.
- [15] ERTL A, MARSCHALL H R, GIESTER G, et al. Metamorphic ultrahigh - pressure tourmaline: Structure, chemistry, and correlations to P - T conditions [J]. American Mineralogist, 2010, 95: 1 - 10.
- [16] 李任伟. 大别山周缘盆地物源研究: 新结果及应用[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 102 - 117.
- [17] LIU X, WEI C, LI S, et al. Thermobaric structure of a traverse across the western Dabieshan: implications for collisional tectonics of the Sino - Korean and Yangtze cratons [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22 (3): 361 - 379.
- [18] 沈其韩. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28 (5): 495 - 500.
- [19] WHITNEY D L, EVANS B W. Abbreviations for names of rock - forming minerals [J]. American Mineralogist, 2010, 95: 185 - 187.
- [20] HAWTHORNE F C, HENRY D J. Classification of the minerals of the tourmaline group [J]. European Journal of Mineralogy, 1999, 11: 201 - 215.
- [21] YAVUZ F, YAVUZ V, SASMAZ A. WinClastour - a visual basic program for tourmaline formula calculation and classification [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 1156 - 1168.
- [22] HENRY D J, NOVAK M, HAWTHORNE F C, et al. Nomenclature of the tourmaline - supergroup minerals [J]. American Mineralogist, 2011, 96: 895 - 913.
- [23] HENRY D J, GUIDOTTI C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite - grade metapelites of NW Maine [J]. American Mineralogist, 1985, 70: 1 - 15.
- [24] 王道轩,刘因,李双应,等. 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限: 大别山北麓晚侏罗世砾岩中

2009(501):94-98.

- [3] 陈亦凡,葛学贵,魏建新,等. 超细改性硅灰石/橡胶硫化胶片力学性能研究[J]. 化工矿物与加工,2007(1): 9-11.
- [4] 彭小芹,何丽娟,刘艳萌. 水热法制备水化硅酸钙纳米粉体[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2005,28(5): 59-62
- [5] 彭小芹,赵会星,蒋小花,等. 水化硅酸钙超细粉体制备及表面改性[J]. 硅酸盐学报,2008,36(s1):176-179.
- [6] 彭小芹,赵会星,杨巧,等. 水化硅酸钙粉体补强橡胶的性能[J]. 高分子材料科学与工程,2008,27(8):90-92.
- [7] 彭小芹,顾淑英,黄涛,等. 水化硅酸钙粉体对硅橡胶的补强作用[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(5): 109-113.
- [8] 彭小芹,赵会星,杨巧,等. 水化硅酸钙超细粉体补强橡胶及其生产方法[P]. 重庆:CN100999594,2007-07-18.

(责任编辑 刘存英)

(上接第51页)

- 发现榴辉岩砾石[J]. 科学通报,2011,46(14): 1216-1220.
- [25] 张红芬,闫纲丽,张景森. 榴辉岩变质演化P-T轨迹研究的新进展[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2011,28(1):85-90.
- [26] 姜玉行,魏春景,初航,等. 西大别造山带红安高压榴辉岩的变质演化:岩相学与 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 体系中的相平衡关系[J]. 岩石学报,2009,25(1):124-138.
- [27] WEI C J, LI Y J, YU Y, et al. Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the Western Dabieshan Terrane, Central China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2010, 28(6): 647-666.
- [28] 张景森,张静,张红芬,等. 西大别石榴黑云片麻岩中金红石的退变质演化[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2011,28(2):40-46,55.
- [29] ZHANG J S, ZHANG J, ZHOU J J, et al. Phase equilibria and metamorphic evolution of garnet-mica-plagioclase gneisses from the Qiliping terrane in the western Dabie Orogen, central China [J]. Island Arc, 2012, in press.

(责任编辑 马立)

作者: [张景森](#), [周俊杰](#), [张静](#), [ZHANG Jing-sen](#), [ZHOU Jun-jie](#), [ZHANG Jing](#)
 作者单位: [张景森,周俊杰,ZHANG Jing-sen,ZHOU Jun-jie\(河北工程大学资源学院,河北邯郸056038;河北工程大学河北省资源勘测研究实验室,河北邯郸056038\)](#), [张静,ZHANG Jing\(河北工程大学图书馆,河北邯郸,056038\)](#)
 刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC**
 英文刊名: [Journal of Hebei University of Engineering\(Natural Science Edition\)](#)
 年,卷(期): 2013,30(1)

参考文献(29条)

1. [莫尊理;孙豫;郭瑞斌](#) 电气石的性能及应用研究进展[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 2011(04)
2. [印万忠;韩跃新;任飞](#) 电气石在环境工程中的应用的基础研究[期刊论文]-[矿冶](#) 2005(03)
3. [梁岩;商平;孙恩呈](#) 电气石粉对油田采出废水处理效果实验研究[期刊论文]-[岩石矿物学杂志](#) 2007(04)
4. [魏存弟;孙彦彬;杨殿范](#) 电气石活化水效应的应用[期刊论文]-[吉林大学学报\(地球科学版\)](#) 2010(06)
5. [朱华静;陈则立;张青](#) 电气石净化处理含Pb²⁺、Cu²⁺、Cd²⁺废水的研究[期刊论文]-[煤炭技术](#) 2011(11)
6. [陈健芬;陈美华](#) 人类健康与绿色环保新材料-托玛琳(Tourmaline)及其在牙膏中的应用研究 2006(01)
7. [VAN HINSBERG V J;HENRY D J;MARSCHALL H R](#) [Tourmaline:an ideal indicator of its host environment](#) 2011
8. [王进军;赵枫](#) 电气石的化学特征与相关矿床的关系[期刊论文]-[地质找矿论丛](#) 2002(03)
9. [廖忠礼;莫宣学;潘桂棠](#) 藏南过铅花岗岩中电气石的矿物化学特征及成因意义[期刊论文]-[现代地质](#) 2007(02)
10. [卢宗柳](#) 我国电气石矿床类型及其地质特征[期刊论文]-[矿产与地质](#) 2008(02)
11. [王劲松;周家喜;杨德智](#) 贵州大坪电气石岩的发现及其找矿意义[期刊论文]-[岩石矿物学杂志](#) 2010(01)
12. [薛建玲;许虹;高一鸣](#) 辽宁后仙峪硼矿床中电气石的矿物学特征及其成岩成矿意义[期刊论文]-[中国地质](#) 2006(06)
13. [ZHANG A C;WANG R C;JIANG S Y](#) [Chemical and textural features of tourmaline from the spodumene-subtype Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, Northwestern China:A record of magmatic to hydrothermal evolution](#) 2008
14. [毛景文;王平安;王登红](#) 电气石对成岩成矿环境的示踪性及应用条件[期刊论文]-[地质论评](#) 1993(06)
15. [ERTL A;MARSCHALL H R;GIESTER G](#) [Metamorphic ultrahigh-pressure tourmaline:Structure,chemistry,and correlations to P-T conditions](#) 2010
16. [李任伟](#) 大别山周缘盆地物源研究:新结果及应用[期刊论文]-[沉积学报](#) 2010(01)
17. [LIU X;WEI C;LI S](#) [Thermobaric structure of a traverse across the western Dahieshan:implications for collisional tectonics of the Sino-Korean and Yangtze cratons](#) 2004(03)
18. [沈其韩](#) 推荐一个系统的矿物缩写表[期刊论文]-[岩石矿物学杂志](#) 2009(05)
19. [WHITNEY D L;EVANS B W](#) [Abbreviations for names of rock-forming minerals](#)[外文期刊] 2010(1)
20. [HAWTHORNE F C;HENRY D J](#) [Classification of the minerals of the tourmaline group](#) 1999
21. [YAVUZ F;YAVUZ V;SASMAZ A](#) [WinClastour-a visual basic program for tourmaline formula calculation and classification](#) 2006
22. [HENRY D J;NOVAK M;HAWTHORNE F C](#) [Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals](#) 2011
23. [HENRY D J;GUIDOTTI C V](#) [Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral:an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine](#) 1985
24. [王道轩;刘因;李双应](#) 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限:大别山北麓晚侏罗世砾岩中发现榴辉岩砾石 2011(14)
25. [张红芬;闫纲丽;张景森](#) 榴辉岩变质演化P-T轨迹研究的新进展[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(01)
26. [娄玉行;魏春景;初航](#) 西大别造山带红安高压榴辉岩的变质演化:岩相学与Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O(Fe₂O₃)体系中的相平衡关系[期刊论文]-[岩石学报](#) 2009(01)
27. [WEI C J;LI Y J;YU Y](#) [Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the Western Dabieshan Terrane, Central China](#)[外文期刊] 2010(06)
28. [张景森;张静;张红芬](#) 西大别石榴黑云片麻岩中金红石的退变质演化[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(02)
29. [ZHANG J S;ZHANG J;ZHOU J J](#) [Phase equilibria and metamorphic evolution of garnet-mica-plagioclase gneisses from the Qiliping terrane in the western Dabie Orogen, central China](#) 2012

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb201301012.aspx