

新疆绿色电气石颜色成因研究

王进军¹, 陶晓风¹, 王武军²

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 济南新型建筑材料厂, 山东 济南 250100)

摘要: 新疆绿色电气石颜色成因比较特殊, 为了更好地了解其颜色的形成, 主要采用化学分析、吸收光谱、穆斯堡尔谱等测试手段对绿色电气石颜色成因进行研究。化学分析结果显示每个样品中均含有少量不同过渡元素离子, 如 Fe^{2+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 等, 影响着绿色的形成; 利用吸收光谱测试方法确定了致色离子的吸收带位置及主要离子的种类、价态, 并根据化学成分计算出相应的化学式, 利用穆斯堡尔谱确定了铁离子在晶体中的占位。综合运用上述测试方法, 确定了绿色电气石的颜色成因。

关键词: 新疆; 电气石; 颜色成因; 过渡离子; 价态; 占位

中图分类号: P578.953

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)04-0319-05

Color Characteristics of green tourmaline from Xinjiang

WANG Jin_jun¹, TAO Xiao_feng¹ and WANG Wu_jun²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Jinan New Type Architectural Stuff Factory, Jinan 250100, China)

Abstract: The color of Xinjiang green tourmalines is very peculiar. In order to learn their color genesis, the authors used various testing means such as chemical analysis, absorption spectrometry and Mössbauer spectrometry to study the color of green tourmalines. The content of transitional ions in each sample was determined by chemical analysis. Such ions as Fe^{2+} , Ti^{4+} and Cr^{3+} affect green tourmalines. Their occupation, ionic category, valence state and action in the absorption spectra were confirmed by absorption spectra. The chemical formulae of tourmalines were calculated on the basis of oxide contents, and the ion occupation was defined by Mössbauer spectra. An integrated utilization of the above three means has led the authors to understand that the color of the green tourmalines is caused by transitional ions in the crystal.

Key words: Xinjiang; tourmaline; color genesis; transitional ions; valence state; occupation

电气石属于环状硼硅酸盐矿物, 化学通式为 $\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$, 晶体中的多面体空隙常被阳离子充填, 其中 X 位被大阳离子 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 占据, Y 位被 Li^+ 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 V^{3+} 、 Fe^{3+} 占据, Z 被 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 V^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 占据。离子间的类质同像替代形成不同种的电气石。电气石族包括几个端员矿物组

分, 其中主要有镁电气石、黑电气石和锂电气石(陈武等, 1985)。镁电气石-黑电气石之间以及黑电气石-锂电气石之间形成两个完全类质同像系列, 镁电气石和锂电气石之间为不完全类质同像。离子间替代不但有同价离子的替代, 而且还有异价离子的替代, 离子间替代受离子的大小、温度、电价、能量大小、组分浓度、压力等因素限制(Foit *et al.*, 1977; 陈茂勋等, 1998)。目前已被国际矿物学协会确认的电气石种属有11个(陈中惠, 1999)。由于各种电气石

收稿日期: 2004-11-30; 修订日期: 2005-04-13

基金项目: 四川省构造重点学科建设项目经费资助发表成果(学科代号: SZD0408)

作者简介: 王进军(1971-), 男, 汉, 在读研究生, 助理工程师, 构造与矿物学研究方向, E-mail: wangjinjun9114@sina.com.cn.

颜色成因复杂,本文只对产自新疆的绿色电气石进行系统研究。

1 样品的矿物学特征及其化学式计算

1.1 矿物学特征

本文采用的样品来自新疆阿尔泰地区的花岗伟晶岩脉,单晶体,颗粒较大,呈六方柱,裂纹发育,柱面纵纹发育。从众多样品中精心挑选出最具有代表性的几块样品,具体描述如下:样品 XJ1,浅绿色, $N_o = 1.635$, $N_e = 1.616$, $d = 3.04$,晶体粗大,长约 5 cm,直径约 1.5 cm,内部裂纹较多,半透明;样品 XJ2,绿色, $N_o = 1.641$, $N_e = 1.628$, $d = 3.08$,晶体

断块,半透明;样品 XJ3,绿色, $N_o = 1.632$, $N_e = 1.617$, $d = 3.06$,柱状,微透明。3块样品都具有热电性和压电性,但热电性表现不是很明显。晶体含有大量的气液包裹体,一般呈水滴状、椭圆状、管状及不规则状,气液比高,气泡可占包裹体总体积 1/5,还偶见石英、白云母、铁质等矿物包裹体。样品的化学性质稳定,不为酸、碱腐蚀。

从化学全分析得到样品的化学成分(表 1)可以看出,XJ2、XJ3 铁的总量比 XJ1 高得多,它们的颜色比 XJ1 要深,而 Al_2O_3 的含量则相反;XJ2 样品中不含 Cr_2O_3 和 K_2O ,XJ1 和 XJ2 均不含 MgO ,导致其镁铁比低,应与 XJ3 不是产于同一地区(王登红等,1996)。

表 1 绿色电气石的化学成分

Table 1 Chemical composition of green tourmaline

编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	CoO	Li ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	F	B ₂ O ₃	H ₂ O	总量
XJ1	38.87	0.07	39.30	0.01	1.83	0.00	0.84	0.00	0.94	0.12	0.51	0.03	2.11	0.23	10.87	3.76	99.49
XJ2	38.29	0.38	36.41	0.00	3.46	0.09	1.79	0.00	-	0.00	1.71	0.00	3.40	-	10.76	4.59	100.88
XJ3	38.20	0.30	35.37	0.21	2.74	0.00	1.01	3.45	1.51	0.00	0.87	0.08	1.89	-	10.05	3.51	99.19

由成都理工大学材料工程学院化实验室用化学分析法在常温下测定。

1.2 计算电气石的化学式

由氧原子算法(徐登科,1988)计算所测样品的分子式,其理论基础是矿物单位晶胞中所含氧原子数固定不变,不以阳离子相互间的类质同像替代而改变。计算公式为:

$$Y_2 = n_0 \times Y_1 / \Sigma O$$

其中 Y_2 为单位晶胞中阳离子数, Y_1 为阳离子原子数, n_0 为已知通式中氧原子数, ΣO 为氧原子总数。由于 XJ2 样品中铁的含量较高,可能存在不同价态的铁,它们也可能占据不同的位置,就以它为例计算化学式,计算后得到数据见表 2,求得 XJ2 的化学式为 $Na_{1.04} (Li_{1.08} Fe_{0.45}^{2+} Mn_{0.24} Fe_{0.01}^{3+} Al_{0.79}) (Al_{5.96} Ti_{0.04}) B_{3.04} O_9 Si_{6.02} H_{4.81} O_{22}$ 。化学式中各离子的位置是根据晶体场理论、元素性质和电气石晶格结构来分配的。同理得 XJ1 的化学式为 $(\square_{0.182} Na_{0.652} Ca_{0.16} K_{0.006}) (\square_{1.117} Li_{0.125} Mn_{0.113} Fe_{0.244}^{2+} Co_{0.015} Cr_{0.001} Al_{1.385}) (Al_{5.992} Ti_{0.0028}) B_{2.99} O_9 Si_{6.191} O_{18} (OH_{3.99} F_{0.01})$, XJ3 的化学式为 $(\square_{0.13} Na_{0.59} Ca_{0.26} K_{0.02}) (Li_{0.68} Mg_{0.83} Fe_{0.37}^{2+} Mn_{0.14} Cr_{0.03} Al_{0.78}) (Al_{5.96} Ti_{0.04}) (BO_3)_3 Si_{6.17} O_{18} (OH)_4$ 。

表 2 氧原子法计算的样品 XJ2 的化学式数据

Table 2 Chemical formula data of sample XJ2

组分	含量 (w _B /%)	分子数	原子数		阳离子 系数
			阴离子	阳离子	
SiO ₂	38.29	0.637 2	1.274 4	0.637 2	6.02
TiO ₂	0.38	0.004 7	0.009 5	0.004 7	0.04
Al ₂ O ₃	36.41	0.357 2	1.071 5	0.714 3	6.75
FeO	3.46	0.048 1	0.048 1	0.048 1	0.45
Fe ₂ O ₃	0.09	0.000 6	0.001 7	0.001 1	0.01
MnO	1.79	0.025 2	0.025 2	0.025 2	0.24
Li ₂ O	1.71	0.057 2	0.057 2	0.114 4	1.08
Na ₂ O	3.40	0.054 8	0.054 8	0.109 7	1.04
B ₂ O ₃	10.76	0.160 8	0.482 5	0.321 6	3.04
H ₂ O	4.59	0.254 8	0.254 8	0.509 5	4.81
总和	100.88		3.279 7		

公约数 = 3.279 7/31 = 0.105 79。

将绿色电气石样品的化学式和成分投入锂电气石-黑电气石-镁电气石三角图,可以得出结论: XJ1、XJ2 和 XJ3 均属于锂电气石系列。颜色的深浅与所含的过渡元素离子种类、价态、占位都有关系,比如不同价态的铁离子的含量和位置不同,必然导致电气石深浅不同的绿色色调。

2 绿色电气石的吸收光谱研究

根据不同元素在吸收光谱中的峰值大小不同,由特征吸收峰可确定致色离子的种类,从而研究电气石的颜色成因。笔者对 XJ1、XJ2 和 XJ3 进行吸收光谱研究所使用的仪器型号为 Leitz MPV_III 光源 100 W, 钨卤灯, 放大倍数 320 倍, 电压 830 V, 电流 8.30 A, 测试单位为中国地质大学(北京)珠宝学院。该仪器只能测可见光的吸收光谱, 所得谱图见图 1。

由图 1 可见, 在 420 nm 处, 样品 XJ1 的吸收峰比样品 XJ2 和 XJ3 吸收峰稍弱些; 640 nm 处, 有一宽的吸收峰, XJ2 为三者中吸收峰最弱的, 其次为 XJ1, XJ3 较强; 在 700 nm 处有一强吸收边, 且此处的峰值仍呈现上升的趋势。

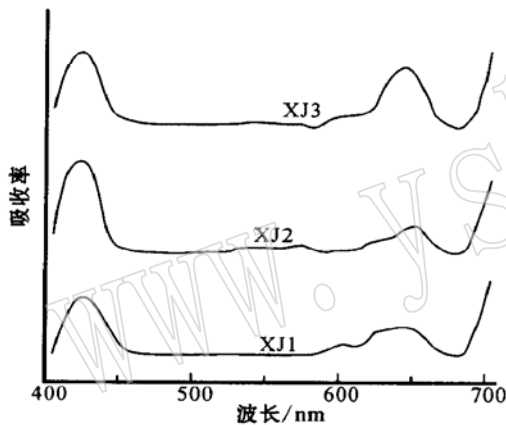


图 1 样品 XJ1、XJ2 和 XJ3 的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectra of samples XJ1, XJ2 and XJ3

把电气石的吸收谱线和致色离子外层电子特征相结合, 并参考前人(Manning, 1969; de Camargo & Isotani, 1988; Ivan, 1990; 王元龙等, 1996; 吴瑞华等, 1998) 对其他颜色电气石的研究成果, 可通过峰值的变化来指派形成各个吸收峰的离子种类。

由于过渡离子在自由状态下一般不呈现颜色, 但当处于晶体场中时, 其能级发生分裂, 自由电子不等量吸收可见光的能量发生跃迁, 可产生电气石的特征吸收谱线。 Fe^{2+} 的 ${}^5\text{T}_{2g} \rightarrow {}^5\text{E}_g$ 跃迁在红光和红外光边界可出现强而宽的吸收带, 而 Fe^{2+} 的自旋禁戒跃迁会在 670 nm 附近产生窄的弱吸收峰; Ti^{4+} 外层无自由电子, 处于稳定态, 也不形成谱线, 谱线中 420 nm 吸收峰不符合任何离子的吸收线。吸收线的强度不仅依赖某种元素离子的聚集, 而且与其在

晶体结构中的价态、位置以及电荷转移有关, 有可能是它的低价聚集。这里绿色电气石中占 Y 位的 Fe^{2+} 与占 Z 位的 Ti^{4+} 发生电价转移, 从而产生强的吸收峰。一般认为 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ 电荷转移吸收峰位于 400~500 nm 间, 所以当 Fe^{2+} 和 Ti^{4+} 处于共棱的八面体时, 二者可能发生离子间的电荷转移, 形成 420 nm 处的吸收峰。按理论铬离子产生双峰, 它主要的特征吸收峰在 650 nm 附近, 而 Fe^{2+} 自旋禁戒跃迁产生的吸收峰在 670 nm 附近, 因此把 640 nm 处吸收峰指派给 Cr^{3+} 与 Fe^{2+} 吸收峰的叠加, 因 XJ2 中几乎不含铬, 导致此处的峰值较小。 Fe^{2+} 除了部分与 Ti^{4+} 发生电价转移在 420 nm 处形成强吸收峰外, 应还有少量低能量的 Fe^{2+} 吸收峰位于红外区, 由于只测定了可见光范围的吸收光谱, 有明显的吸收边, 虽然看不到其主峰值, 也能基本了解该吸收峰的特征。虽然 XJ1、XJ2、XJ3 的吸收峰强弱不完全相同, 但吸收光谱谱图的形态基本一致, 所以对 XJ1、XJ2、XJ3 颜色形成起主要作用的离子是 Fe^{2+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 。

3 绿色电气石的穆斯堡尔谱研究

上述通过电气石的吸收光谱确定了绿色电气石的致色离子种类, 但样品 XJ2 中既含有 Fe^{2+} 又含有 Fe^{3+} , 它们的不同占位会对该电气石的颜色产生影响。当二者位于相同的八面体中时, 其间不发生电荷转移, Fe^{3+} 表现为惰性, 对颜色形成无影响; 当二者处于共棱的八面体中, 对颜色形成有很大影响(王濮等, 1984), 因此用穆斯堡尔谱确定 Fe^{3+} 的位置很重要。穆斯堡尔谱的参数(张宝峰, 1991; 李哲等, 1996) 有两个: 同质异能位移 IS(又称化学位移) 和四极矩分裂 QS。笔者采用美国 Austin 公司的 S_600 谱仪, 在常温等加速模式下对样品 XJ2 进行穆斯堡尔谱测试, 谱图见图 2(其中 A、B 代表两个吸收峰), 获得的参数值见表 3。将求得的 XJ2 穆斯堡尔谱参数值与前人研究的蓝色、黑色电气石的参数值(应育浦等, 1977; Bhandari and Varma, 1975) 分别投入参数分布图中(图 3, 其中 IVCT 是价间电荷转移值), 可以观察出不同价态铁的分布。

不同价态的铁离子处于不同的共棱八面体时, 其间发生次近邻和电子离域效应, 导致 Y 位和 Z 位上的 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 的吸收峰有所变化(谢先德等, 1999)。将谱图吸收峰与参数相结合来指派铁的占位, 吸收峰 A 的参数投点落在 Y 位的 Fe^{2+} 区域, A

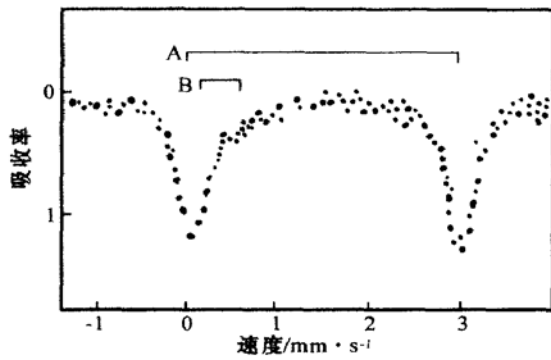


图2 样品XJ2的穆斯堡尔谱

Fig. 2 Mössbauer spectrum of sample XJ2

表3 样品XJ2蓝色及黑色电气石的穆斯堡尔谱参数

Table 3 Mössbauer parameters of sample XJ2, blue and black tourmaline

样品	同质异能位移/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	四极矩分裂/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	半高宽/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	指派	资料来源
绿色 (XJ2)	1.186	2.595	0.325	Fe^{2+} (Y)	本文测试
	0.187	0.551	0.336	Fe^{3+} (Y)	
	1.192	2.431	0.289	Fe^{2+} (Y)	
蓝色	0.861	1.905	0.328	Fe^{2+} (Y) - Fe^{3+} (Z)	应育浦 (1977)
	0.302	1.024	0.351	Fe^{3+} (Z)	
	1.087	1.963	0.321	Fe^{2+} (Y)	
黑色	1.062	1.410	0.322	Fe^{2+} (Z)	Bhandari and Varma (1975)
	0.853	1.184	0.412	Fe^{2+} (Y) - Fe^{3+} (Z)	
	0.482	0.695	0.391	Fe^{3+} (Z)	

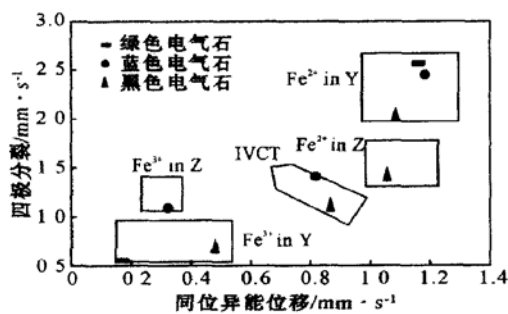


图3 电气石同质异能位移与四极分裂分布图

Fig. 3 Graph of tourmaline isomer shift and quadrupole splitting

峰值应该指派给 Fe^{2+} (Y) 位; 吸收峰 B 的参数投点在 Y 位的 Fe^{3+} 区域, 峰值较小, B 峰应指派给 Fe^{3+} (Y)。这样 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 同处于 Y 位, 对绿色电气石颜色 Fe^{2+} 贡献大, Fe^{3+} 几乎不显示颜色, 参数投图

没有点落在 IVCT 区域, 也说明二者不发生电荷转移。蓝色电气石中 Fe^{2+} 占 Y 位, Fe^{3+} 占 Z 位, 黑色电气石中 Fe^{2+} 既占 Y 位又占 Z 位, 同样 Fe^{3+} 占 Z 位, 且二者发生电荷转移, 增强了电子活动能力, 导致吸收峰增强, 使颜色变深。根据穆斯堡尔谱图和参数得出铁在绿色电气石中的分布规律, 从而弄清楚铁对绿色成因的作用, 又验证了前面计算的 XJ2 化学式中各离子的分派。XJ1 和 XJ3 化学分析中无 Fe^{3+} , 它们的颜色主要由 Fe^{2+} 等产生, 所以化学式中 Y 位只有 Fe^{2+} 出现。

4 结论

本文借助各种测试手段, 研究新疆的绿色电气石颜色成因。把化学分析、吸收光谱和穆斯堡尔谱有机结合, 对新疆绿色电气石中的致色元素离子进行系统研究, 得出以下结论:

(1) 由化学分析得到电气石各种氧化物的含量, 结合穆斯堡尔谱及其参数投图验证了铁离子的占位, 晶体中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 优先占 Y 位, 只有 Y 位占满后才进入 Z 位, 但样品 XJ2 中 Fe^{2+} 不足充填 Y 位, 所以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 都占据 Y 位; XJ1 和 XJ3 中铁含量较少, Fe^{2+} 均占据 Y 位。这些过渡离子在电气石晶格中的不同占位对绿色形成有较大贡献。

(2) 绿色电气石的吸收谱图中 420 nm 处的吸收峰是由 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ 电荷转移形成, 650 nm 处的吸收峰是 Cr^{3+} 与 Fe^{2+} 吸收强度的叠加形成的, Fe^{2+} 在红外区有很强的吸收边, 所以 Fe^{2+} 、 Ti^{4+} 和 Cr^{3+} 对绿色电气石颜色形成起主要作用。

Reference

- Arem J E. translated by Chen Maoxun and Xu Zhonghua. 1998. Cyclopaedia of Color Gemstone[M]. Chengdu: Sichuan Technology Publishing House, 242~ 245 (in Chinese).
- Bhandari S S and Varma J. 1975. Mössbauer studies natural tourmaline [J]. Nuclear Physics and Solid State Physics Symposium Proceedings, 18c: 552.
- Chen Wu and Ji Shouyuan. 1985. Guide of Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 206~ 207 (in Chinese).
- Chen Zhonghui. 1999. English_Chinese and Chinese_English Dictionary of Gemstone[M]. Chinese Geological University Publishing House, 17~ 20 (in Chinese).
- de Camargo M B & Isotani S. 1988. Optical absorption spectroscopy of natural and irradiated pink tourmaline[J]. American Mineralogist,

- 73: 172~ 180.
- Foit F F Jr and Rosenberg P E. 1977. Coupled substitutions in the tourmaline group[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 62: 109~ 127.
- Ivan P. 1990. Role of natural radiation in tourmaline coloration: Discussion[J]. American Mineralogist, 75: 237~ 239.
- Li Zhe and Ying Yupu. 1996. Mössbauer Spectroscopy of Minerals [M]. Beijing: Science Publishing House, 177~ 179 (in Chinese).
- Manning P G. 1969. Optical absorption spectra of chromium-bearing tourmaline, black tourmaline, and buergerite[J]. Canadian Mineralogist, 10: 57~ 70.
- Wang Denghong and Chen Yuchuan. 1996. A preliminary study on the composition and origin of tourmalines in Dachang, Guangxi[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, (15) 3: 280~ 288 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao, et al. 1994. Systematic Mineralogy (2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 159~ 163 (in Chinese).
- Wang Yuanlong, Kang Xu, Wang Shuzhen, et al. 1996. Study of color tourmalines for their color genesis from altav. Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 10(3): 172~ 178 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ruihua, Lin Shanyuan, Bai Feng, et al. 1998. The effects of irradiation on some physical properties of tourmaline[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 4(12): 371~ 376 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xiande, Zha Fubiao, Liu Guobin, et al. 1999. Mineralogy Physics of Gemstone in China[M]. Guangzhou: Guangdong Science Publishing House, 79~ 89 (in Chinese).
- Xu Dengke. 1988. Chemistry Numeration of Minerals[M]. Metallurgy Industry Publishing House, 5~ 60 (in Chinese).
- Ying Yupu and Li Zhe. 1977. Mössbauer Spectroscopy Effect Application in Mineralogy[M]. The Geological Publishing House, 1~ 128 (in Chinese).
- Zhang Baofeng. 1991. Mössbauer Spectroscopy[M]. Beijing: Science Publishing House, 1~ 105 (in Chinese).

附中文参考文献

- 阿雷姆 J.E. 陈茂勋, 许仲华译. 1998. 彩色宝石大全[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 242~ 245.
- 陈武, 季寿元. 1985. 矿物学导论[M]. 北京: 地质出版社, 206~ 207.
- 陈中惠. 1999. 珠宝首饰英汉-汉英词典(下)[M]. 中国地质大学出版社, 17~ 20.
- 李哲, 应育浦. 1996. 矿物穆斯堡尔谱学[M]. 北京: 科技出版社, 177~ 179.
- 王登红, 陈毓川. 1996. 广西大厂电气石的成分与成因初探[J]. 岩石矿物学杂志, (15) 3: 280~ 288.
- 王濮, 潘兆楹, 翁玲宝, 等. 1984. 系统矿物学(2)[M]. 北京: 地质出版社, 159~ 163.
- 王元龙, 康旭, 王淑珍, 等. 1996. 新疆阿尔泰彩色电气石的颜色成因研究[J]. 矿产与地质, 10(3): 172~ 178.
- 吴瑞华, 林善园, 白峰, 等. 1998. 辐照处理对碧玺物理性质的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 4(12): 371~ 376.
- 谢先德, 查福标, 刘国彬, 等. 1999. 中国宝玉石矿物物理学[M]. 广州: 广东科技出版社, 79~ 89.
- 徐登科. 1988. 矿物化学计算法[M]. 冶金工业出版社, 5~ 60.
- 应育浦, 李哲. 1977. 穆斯堡尔谱效应在矿物学中的应用[M]. 地质出版社, 1~ 128.
- 张宝峰. 1991. 穆斯堡尔谱学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1~ 105.

• 新书介绍 •

《实验及理论岩石学》

周金城, 王孝磊 编著 2005 北京: 地质出版社 402千字 256页 定价: 25元

实验岩石学研究岩石和矿物在高温、高压条件下的各种特征和变化, 在模拟各种变质过程、地幔和地壳各层圈物质组成和相变、岩浆生成及岩浆演化规律方面做出了重要贡献。实验岩石学与岩相学相结合构造了岩石学的基本理论框架。实验岩石学研究得出的成果、从实验中获得的思维成为理论岩石学的精髓。本书从介绍岩石物理化学知识和高温、高压实验技术入手, 围绕固相线下的矿物反应、地幔结构、各种地质环境中岩浆的形成、熔体结构特征以及矿物结晶动力学等方面, 介绍实验岩石学的新近研究成果和经实验证实的岩石成因理论。该书可作为教材, 也可供地质、岩石地球化学专业的本科生、研究生、教学和科研人员参考。作者联系方式为 E-mail: j. c. zhou@public1. ptt. js. cn。