

# 拉长石晕彩成因的电子探针研究

彭艳菊<sup>1,2</sup>, 何雪梅<sup>1,2</sup>, 方勤方<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 矿物材料国家专业实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

**摘要:** 本文从拉长石晕彩色的空间分布特征研究出发, 采用显微镜观察、粉晶 X 射线衍射及电子探针分析等手段, 查明了拉长石不同晕彩区域的结构和成分特征, 建立了晕彩拉长石的晕彩色与成分之间的耦合关系, 并对拉长石晕彩成因进行了有效的约束。研究表明, 拉长石的晕彩色是由层状结构对光的干涉所致, 其结构单元层由贫钙和富钙两相长石共同组成, 当结构层厚度处于 128~292 nm 之间时出现可见光范围内的干涉色, 但结构层表面并不绝对平坦, 因而出现了有如地形图中等高线似的干涉色。结构层厚度与钙含量有关, 随着钙含量的增加, 结构层相应地增厚, 晕彩色波长也随之增大。但由于产地和结晶环境的不同, 干涉色相同的拉长石钙含量不一定相等, 但对于同一产地的拉长石而言, 干涉色波长与钙含量呈正相关关系。

**关键词:** 拉长石; 晕彩成因; 电子探针; 干涉色; 层状结构

中图分类号: P578.968; P575.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)05-0474-07

## EPMA studies of iridescence of labradorite

PENG Yan-ju<sup>1,2</sup>, HE Xue-mei<sup>1,2</sup> and FANG Qin-fang<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Gem Studies, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, the authors used such means as microscope, XRD and EPMA to study the origin and distribution characteristics of iridescent in labradorite. The results indicate that the inner lamellar structure of labradorite causes interference effects which contribute to the iridescent colors. Furthermore, each unit lamellar structure is made up of calc-poor and calc-rich plagioclase feldspar. Only when the thickness of the lamellar structure varies between 128 nm and 292 nm can the interference colors be visible. Because the surface of the lamella is not absolutely smooth, iridescence always looks like the contour line of a map. Additionally, the thickness of the lamella is related to calcic content, i. e., the more the calcic content and the thicker the lamellar, the longer the wavelength of color. The uniform interference color may have different calcic contents, varying from place to place and from environment to environment. Nevertheless, it is demonstrated that the relationship between the iridescence and the calcic content of labradorite is positive at the same place.

**Key words:** labradorite; iridescent; EPMA; interference; lamellar structure

拉长石属钠钙长石系列的斜长石亚族, 其  $A_n$  (钙长石) 分子变化在 50%~70% 之间, 晕彩拉长石是指具有晕彩效应的一类拉长石。1770 年, 在加拿

大布拉多首次发现晕彩拉长石, 此后, 关于拉长石晕彩成因的研究便拉开了序幕。然而, 对拉长石系统的研究工作要追溯到上世纪 20 年代 (Rayleigh,

收稿日期: 2007-06-06; 修订日期: 2007-07-15

基金项目: 中国地质大学矿物材料国家专业实验室开放基金课题 (519002310062)

作者简介: 彭艳菊 (1978-), 女, 汉族, 硕士研究生, 宝石学专业, E-mail: pengyanju@sina.com

1923)。Bøggild(1924)通过光学显微镜测定了产生晕彩色的平面方位。上世纪70~80年代,拉长石的晕彩成因引起了极大关注,通过电子探针、透射电子显微镜、X衍射等手段基本确定了晕彩拉长石的内部结构,并认识到拉长石的晕彩色并非其晶体内部的杂质或包裹体所致,而更可能是由拉长石晶体内部的周期性层状结构对光的干涉作用而产生的(Grundy and Brown, 1974; Olsen, 1975, 1977; Ribbe, 1983)。然而,拉长石内部的层状结构有很多(谢浩等, 2006),究竟是哪一种或哪几种结构起主导作用,目前尚存争议。部分学者认为引起拉长石晕彩的层状结构主要为聚片双晶(周国平, 1989; 李兆聪, 1998; 郭守国等, 2005; 张蓓莉, 2006; 崔文元等, 2006),而另外一些学者则倾向于认为斜长石博吉尔德连生区内出溶的连生片晶是引起拉长石产生晕彩的主要原因(Ribbe, 1983; Howie, 1998; 谢浩等, 2006)。然而,笔者在研究中发现,拉长石晕彩可呈单一颜色均匀分布,也可以呈不同颜色的类似地形图中的等高线分布。对于前者,上述两种观点均可很好地解释;然而对于后者,以前的研究中均未提及。造成这种现象的原因是什么?晕彩色的这种空间分布特征与拉长石成分特征之间是否存在联系?

本文试图从拉长石的晕彩色空间分布特点研究入手,采用电子探针分析技术,以期建立晕彩色空间分布特点与成分特征之间的关系,进而解释拉长石晕彩色空间分布规律,并由此约束拉长石的晕彩成因。

## 1 样品描述

本次研究的拉长石样品产自斜长岩中,拉长石晶体呈板柱状,颗粒较大,有些甚至长达10 cm以上,宽4 cm左右,厚1~3 cm。两组解理,裂隙发育,性脆易碎。另外,岩石中还含有一些黑云母及少量的辉石,黑云母被交代现象明显,显微镜下可见清楚的交代残余现象。拉长石内部暗色包体发育,肉眼可见,样品抛光后呈玻璃光泽,半透明至不透明,密度为 $2.67 \text{ g/cm}^3$ (静水称重法实测,室温),折射率1.56(点测)。

单偏光镜下,拉长石无色透明,有晕彩的表面更干净,正低突起。正交偏光镜下干涉色为一级灰白,消光角 $(010) \wedge Np'$ 约为 $27^\circ$ ,聚片双晶发育,两组解理夹角约 $86^\circ$ ,可见大量定向排列的透明及不透明针、片状包体。电子探针分析结果(表1)显示,针状包体为钛铁矿,片状包体为透辉石-钙铁透辉石。

表1 拉长石内部包裹体电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of inclusions in the labradorites

包裹体类型	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	Total
片状	49.83	0.70	4.76	11.78	0.25	20.78	0.87	10.22	0.13	99.32
针状	0.26	50.19	0.16	46.18	0.76	0.38	0.33	1.47	0.00	99.73

测试单位:中国地质大学(北京)电子探针室,仪器型号:EMPA-1600,加速电压15 kV,电流 $7 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。

## 2 拉长石晕彩色分布特征

样品中所见的晕彩色以桃红、橙红、亮蓝以及橙黄、黄褐色为主(图1)。晕彩色主要成片状分布,边缘按光谱色顺序依次排列,有时中间缺失一至两个颜色,整体上与地形图的等高线相似。另外,还有些样品只呈现出单一的颜色或两种相近的颜色。

转动样品时,从不同方向观察,颜色只出现深浅变化,并不随入射角的变化而出现颜色的转变,垂直入射时颜色最鲜艳。这与欧泊的变彩色不同,欧泊的颜色会随转动方向的不同不时地出现可见光波长的各种色彩(陈显求等, 1997)。除此之外,拉长石的

晕彩色定向性非常明显,本次样品的晕彩面近于平行晶体的(010)面,其他方向未见晕彩色。

## 3 不同晕彩色区成分特征研究

### 3.1 粉晶X射线衍射分析

已有的研究表明,晶体结构可能会引起拉长石特殊的光学效应,如产于美国俄勒冈州的拉长石,其日光效应就是因晶体中含有的自然铜包体对光的反射所致(Johnson *et al.*, 1991)。鉴于此,本次研究首先通过粉晶X射线衍射分析,查明拉长石晕彩是否与晶体结构有关。粉晶X射线衍射在中国地质大学(北京)X射线衍射实验室完成,仪器型号D/MAX-

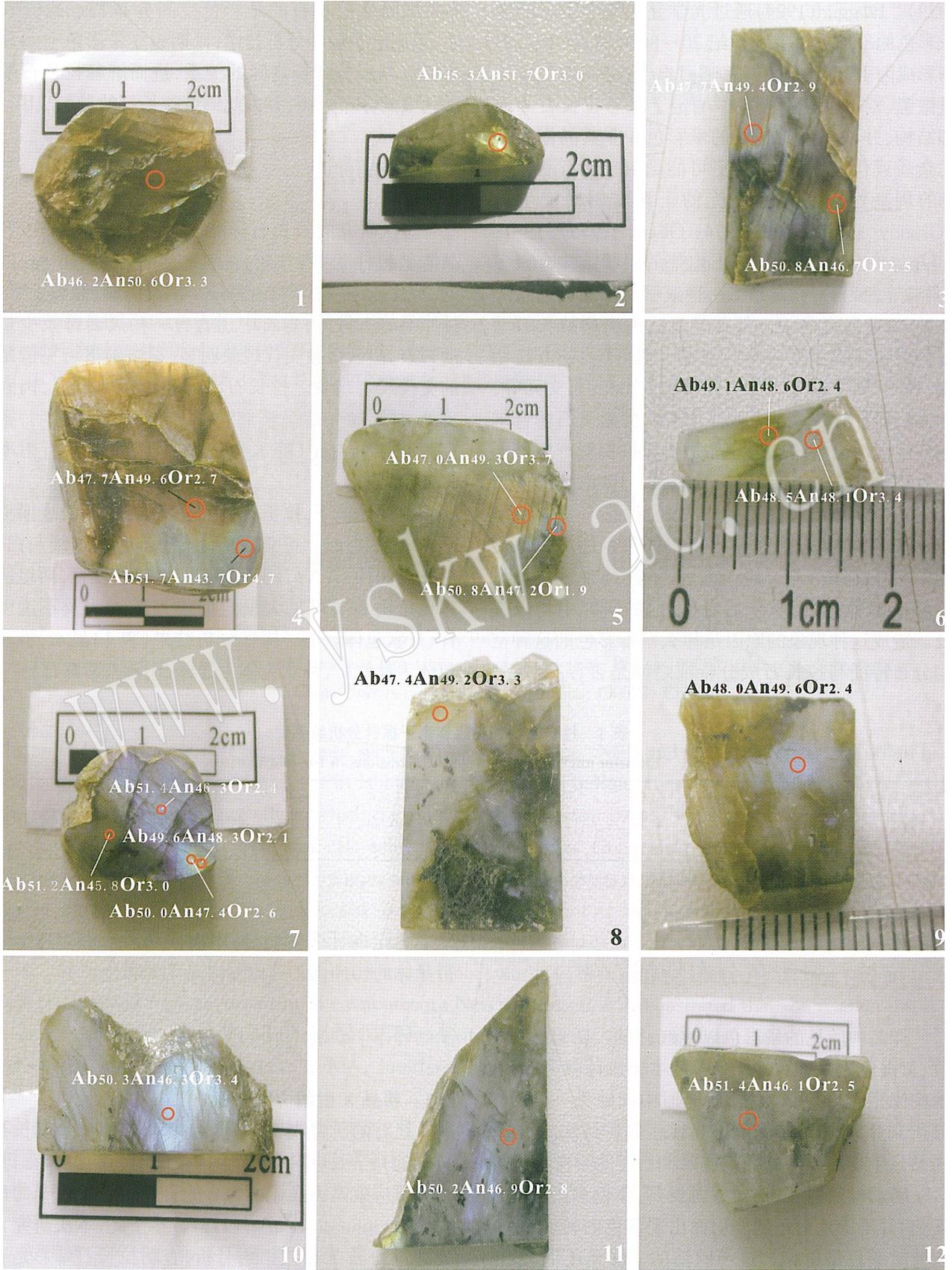


图 1 晕彩拉长石原石手标本照片  
 Fig. 1 Photos of rough stone of labradorite

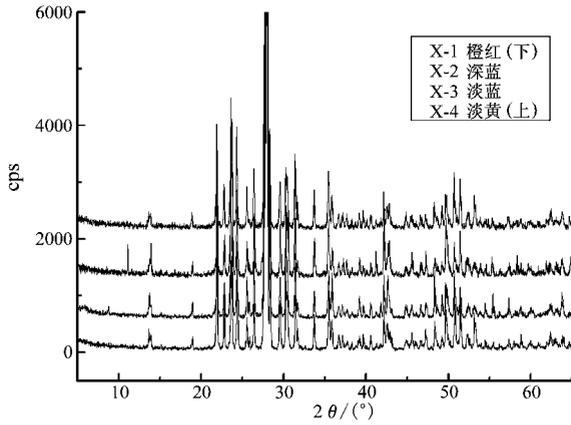


图 2 不同晕彩色的拉长石单晶 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray powder diffraction spectra of labradorite with different colors

RC, Cu Kα1 辐射, 工作电压 40 kV, 电流 80 mA, 连续扫描。选取了 4 种具有代表性的晕彩色进行实验, 所得衍射图谱如图 2 所示。其中, 样品 X-1 橙红色的  $d$  值(主要谱线)为 3.184、3.211、4.048、3.757Å; X-2 深蓝色的  $d$  值为 3.184、3.213、4.048、3.767Å; X-3 淡蓝色的  $d$  值为 3.184、3.209、3.767、4.048Å; X-4 淡黄色的  $d$  值为 3.189、3.213、4.055、3.751Å。从图 2 可以看出, 被测矿物的衍射峰位置和强度均与 JCPDS 标准卡片中的拉长石( $d$  值为 3.1821、3.2012、4.0406、3.7612Å)接近, 表明其矿物组成为拉长石。并且 4 种晕彩色不同的拉长石的衍

射峰峰形皆尖锐, 尽管样品颜色差异很大, 但  $d$  值几乎没有变化。用 checkcell 软件对橙红和深蓝两种颜色样品的衍射数据进行计算后发现, 两者实测晶胞参数基本相同, 且与理论晶胞参数相差甚微(表 2), 这说明了拉长石的晕彩色与其晶体结构无关, 即这些拉长石晕彩并非因某些微量元素进入矿物晶格所致。

表 2 不同晕彩色的拉长石晶胞参数

Table 2 Crystal cell data of labradorite with different colors

拉长石 类型	nm			(°)		
	$a$	$b$	$c$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
标准数据	0.81736	1.28736	0.71022	93.462	116.054	90.475
X-1 橙红	0.81711	1.28686	0.71051	93.440	116.060	90.440
X-2 深蓝	0.81764	1.28700	0.71044	93.480	116.030	90.430

### 3.2 电子探针分析

根据拉长石晕彩色的分布特点, 选取了具有代表性的 12 块原石(图 1)进行电子探针分析, 以期探讨晕彩色与成分之间的耦合关系。所有样品均沿晕彩面磨制成光片, 测试由中国地质大学(北京)电子探针室完成, 仪器型号 EMPA-1600, 加速电压 15 kV, 电流  $7 \times 10^{-8}$  A, 电子束斑  $1 \mu\text{m}$ 。所得结果见表 3。

从拉长石端员组分的摩尔分数可以看出, 本次实验样品的  $A_n$  值处于 43.7~51.7 之间, 普遍略低于典型拉长石  $A_n$  值的 50~70, 接近于中拉长石。此外, 样品中还含有 3% 左右的钾长石分子, 其中  $K$

表 3 拉长石的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of labradorite

样品	晕彩色	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	MnO	Total	端员分子式
1	紫红色	54.52	28.81	0.03	5.34	0.56	10.61	0.00	0.10	99.98	Ab <sub>46.2</sub> An <sub>50.6</sub> Or <sub>3.3</sub>
2	橙红色	54.03	28.25	0.00	5.41	0.54	11.20	0.00	0.04	99.46	Ab <sub>45.3</sub> An <sub>51.7</sub> Or <sub>3.0</sub>
3	橙红色	53.01	27.84	0.11	6.01	0.56	11.29	0.26	0.00	99.08	Ab <sub>47.7</sub> An <sub>49.4</sub> Or <sub>2.9</sub>
3	橙黄色	53.76	28.18	0.25	6.42	0.47	10.65	0.28	0.05	100.06	Ab <sub>50.8</sub> An <sub>46.7</sub> Or <sub>2.5</sub>
4	橙红色	53.78	28.05	0.03	5.78	0.49	10.86	0.34	0.00	99.33	Ab <sub>47.7</sub> An <sub>49.6</sub> Or <sub>2.7</sub>
4	蓝绿色	53.29	28.02	0.03	6.73	0.91	10.29	0.00	0.23	99.49	Ab <sub>51.7</sub> An <sub>43.7</sub> Or <sub>4.7</sub>
5	浅红色	53.99	28.80	0.01	5.64	0.67	10.68	0.11	0.00	99.89	Ab <sub>47.0</sub> An <sub>49.3</sub> Or <sub>3.7</sub>
5	蓝绿色	53.76	28.60	0.05	6.28	0.37	10.57	0.13	0.04	99.81	Ab <sub>50.8</sub> An <sub>47.2</sub> Or <sub>1.9</sub>
6	橙色	53.89	28.07	0.12	6.08	0.46	10.90	0.36	0.00	99.88	Ab <sub>49.1</sub> An <sub>48.6</sub> Or <sub>2.4</sub>
6	浅蓝色	54.10	28.74	0.12	5.86	0.63	10.50	0.05	0.00	99.99	Ab <sub>48.5</sub> An <sub>48.1</sub> Or <sub>3.4</sub>
7	黄色	54.54	28.26	0.25	5.95	0.39	10.49	0.00	0.00	99.87	Ab <sub>49.6</sub> An <sub>48.3</sub> Or <sub>2.1</sub>
7	黄色	54.00	28.06	0.00	6.05	0.47	10.37	0.05	0.19	99.19	Ab <sub>50.0</sub> An <sub>47.4</sub> Or <sub>2.6</sub>
7	深蓝色	54.76	28.16	0.05	6.15	0.42	10.04	0.06	0.00	99.63	Ab <sub>51.4</sub> An <sub>46.3</sub> Or <sub>2.4</sub>
7	无晕彩	54.43	28.05	0.18	6.08	0.54	9.84	0.02	0.00	99.14	Ab <sub>51.2</sub> An <sub>45.8</sub> Or <sub>3.0</sub>
8	橙黄色	53.38	27.75	0.07	5.90	0.63	11.11	0.14	0.10	99.08	Ab <sub>47.4</sub> An <sub>49.2</sub> Or <sub>3.3</sub>
9	深蓝色	54.83	28.48	0.00	5.72	0.43	10.70	0.00	0.06	100.22	Ab <sub>48.0</sub> An <sub>49.6</sub> Or <sub>2.4</sub>
10	浅蓝色	54.18	27.57	0.00	6.09	0.62	10.13	0.21	0.28	99.08	Ab <sub>50.3</sub> An <sub>46.3</sub> Or <sub>3.4</sub>
11	无晕彩	55.15	27.39	0.16	6.20	0.54	10.48	0.23	0.05	100.19	Ab <sub>50.2</sub> An <sub>46.9</sub> Or <sub>2.8</sub>
12	无晕彩	55.07	27.85	0.00	6.20	0.45	10.08	0.04	0.00	99.68	Ab <sub>51.4</sub> An <sub>46.1</sub> Or <sub>2.5</sub>

的来源可能与围岩中大量黑云母的存在有关。

按不同颜色分组,将表3端员分子式中Ab与An的摩尔分数投点后得图3a。从图3a中可以看出,拉长石的晕彩色因An含量的变化而变化,且随着An含量的增加,所呈颜色的波长逐渐增大。无晕彩的拉长石An含量总体上低于有晕彩的拉长石,只有一个蓝色晕彩点(An<sub>43.7</sub>)出现异常。橙黄色与蓝色、蓝色与无色之间的An值有少部分重叠,但各晕彩色的An含量平均之后与波长呈正相关关系(图3b),且相邻颜色之间的An含量相差1%~2%。

这与Ribbe(1983)的实验结果一致。但本次实验中红、黄、蓝色的拉长石平均An含量分别为50.1、48.0、46.9,普遍低于Ribbe(1983)所统计的58、54、50。

虽然在相邻晕彩色之间An值有少量重叠现象,但就同一样品而言,晕彩色波长较长(颜色较深)的拉长石An含量比波长较短(颜色较浅)的拉长石低,具有很好的规律性,如图4所示(样品3~7)。

### 3.3 讨论

上述研究表明,本次研究的拉长石的晕彩成因与矿物的晶体结构无关,而与钙含量有着密切的

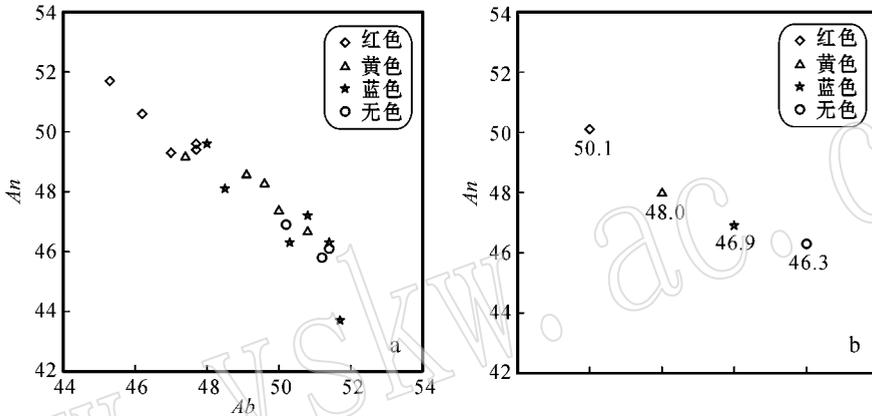


图3 拉长石An含量与晕彩色的关系

Fig. 3 Relationship between calcic content and iridescence of labradorite

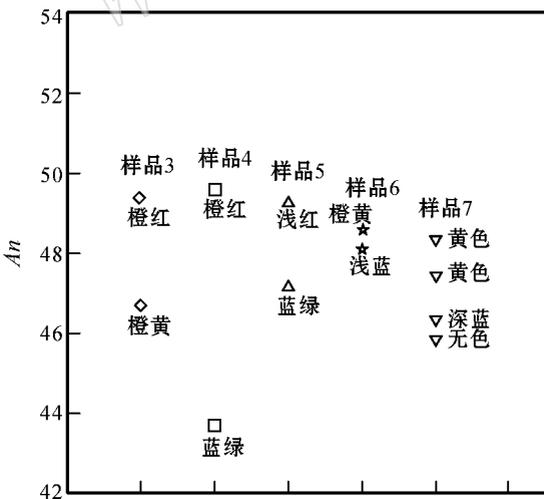


图4 同一样品中晕彩色与An含量的关系

Fig. 4 Relationship between calcic content and iridescence of the same sample

关系,这与Ribbe(1983)的研究结果基本一致。结合样品晕彩色呈类似地形图中等高线分布的特点,可以确定此晕彩色是由光的干涉所致。前已述及,这

些晕彩色受入射角的影响不大,与薄膜干涉所出现的七彩色明显不同。对于拉长石的成分与颜色之间的关系,前人曾做过部分研究工作,Laves等(1965)最早认为晕彩色波长遵循布拉格方程 $\lambda = 2nd\sin\theta$ ,随后Ribbe(1983)也归纳出晕彩色与An含量呈正相关关系。然而,本文的实验结果显示,具有红、黄、蓝晕彩色的拉长石平均An含量分别为50.1、48.0、46.9,与Ribbe(1983)对应晕彩色的拉长石平均An含量有较大差距,差距幅度达4%~8%。为解释这一现象,笔者将从光学原理上进行具体分析。

根据光的干涉条件可知,两个振动方向相同、频率相同的单色光波叠加时会发生干涉现象。但实际光波不是理想单色光波,要使实际入射光波发生干涉作用,必须要有一个使光源发出的光波分离成两个或以上的相干光波的分振幅装置(梁铨廷,1987)。通过透射电镜观察发现,拉长石的内部结构基本符合这一条件(Bolton et al., 1966; Ribbe, 1983; 谢浩等, 2006),且属于平行平板的分振幅干涉(图5)。

干涉作用的强度由下式决定:

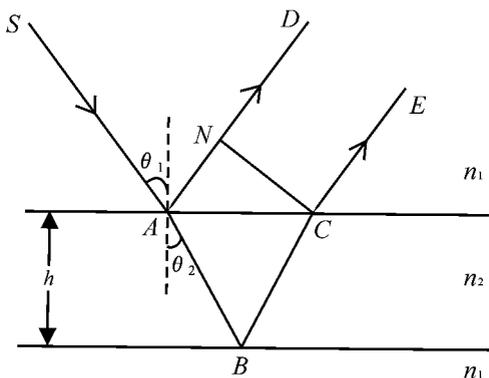


图 5 光在拉长石平行平板结构中传播示意图  
Fig. 5 Sketch of light transmission in the labradorite with layered lamellar structures

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\right) \quad (1)$$

其中  $I_1$  和  $I_2$  为两束反射光的强度,  $\Delta$  为上下表面反射光的光程差, 可通过下式算出:

$$\Delta = n_2(AB + BC) - n_1 AN \quad (2)$$

$n_1$  和  $n_2$  分别为两相邻结构层的折射率,  $h$  为结构单元层的厚度, 入射光在平板上表面的入射角和折射角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 则光程差可表示为  $\Delta = 2n_2 h \cos\theta_2$ 。由于平板的折射率介于两边结构层的折射率之间, 两支反射光都发生或都没有发生“半波损失”, 因此没有附加光程差(梁铨廷, 1987)。另据干涉条件, 当  $\Delta$  为波长  $\lambda$  的整数倍时, 干涉色加强, 即:

$$2n_2 h \cos\theta_2 = k\lambda \quad (k=1, 2, \dots) \quad (3)$$

从电子探针数据得知相邻颜色之间的  $An$  含量相差 2% 左右, 因此, 折射率  $n_1$  和  $n_2$  相差甚微 (3) 式中  $n_2$  可用拉长石的平均折射率 1.56 来替代, 而  $\theta_2$  可依据全反射临界角算出其取值范围为  $0 \sim 40^\circ$ 。至此 (3) 式中只剩下  $h$  和  $\lambda$  两个变量, 当单元结构层厚度也已知时, 可推导出晕彩色波长, 反之亦然。若将可见光波长的最大值 700 nm 和最小值 400 nm

分别代入 (3) 式可求得单元结构层厚度应处于 128 ~ 292 nm 之间。

将 (3) 式与布拉格方程  $\lambda = 2nd \sin\theta$  比较发现, 由于两者  $\theta$  的取值范围不同, 当单元结构层厚度  $d$  值固定时, 前者所能观察到的晕彩色显然要少于后者, 换言之, 前者受入射角的影响要少的多, 这与实际观察到的结果一致。因此, 笔者认为 (3) 式更符合实际情况。

若只从公式的角度考虑  $h$  和  $\lambda$  这两个变量之间的关系, 拉长石的晕彩色似乎只与其内部结构层的厚度有关, 与  $An$  的含量无关。事实上, 当拉长石的钙含量增加时晕彩色波长也随之增大, 但对于具有相同晕彩色的拉长石, 本文所测的  $An$  含量却低于 Ribbe (1983) 的测试数据 4% ~ 8%, 由此说明结构单元层并不是由单一物相组成, 否则相同的晕彩色应具有相同的钙含量, 其结构层应由贫钙 (b) 和富钙 (a) 两相长石共同组成, 如图 6 所示, 且随着富钙相长石 (a) 的厚度增加, 结构层也相应增厚, 从而导致晕彩色波长增大。Bolton 等 (1966) 以入射角  $53^\circ$  在红色晕彩区测量了 106 个条纹的厚度及它们的标准误差  $\sigma$ , 得到的结果为  $d_a$  平均值 = 176.6 nm ( $\sigma = 34.9$  nm),  $d_b$  平均值 = 87.4 nm ( $\sigma = 26.1$  nm), 单元厚度为 264.0 nm, 代入 (3) 式得:  $\lambda = 2 \times 1.56 \times 264.0 \times \cos 30.8^\circ = 707.6$  nm, 与本文所推导的数值基本吻合。因本次样品的晕彩面近于平行晶体的 (010) 面, 其他方向没有颜色, 进一步说明此结构层也具有方向性且近于平行 (010) 面, 即晶体的晕彩面。

由于拉长石的产地和结晶环境不同, 致使结构单元层厚度虽相等, 其中富钙相长石的厚度 ( $d_a$ ) 也不一定相同, 换言之, 产地不同, 干涉色相同的拉长石其钙含量也不一定相等, 所以出现了本次样品干涉色的钙含量低于 Ribbe (1983) 所测的数据。但对于同一样品而言, 干涉色波长与钙含量呈正相关关

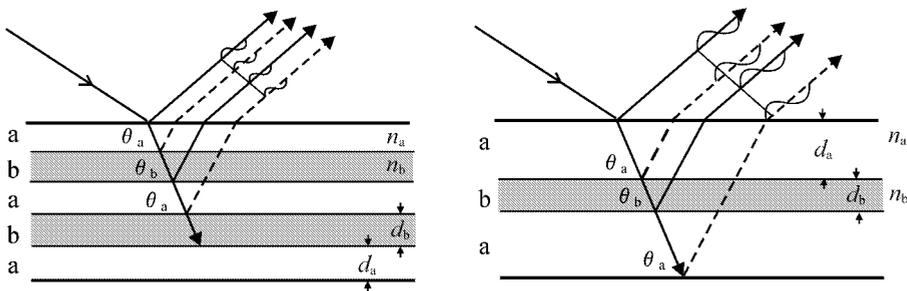


图 6 拉长石结构单元层厚度变化示意图 [据 Ribbe (1983) 修改]

Fig. 6 Different proportions of thickness of two alternating lamellae in labradorite (modified from Ribbe, 1983)

系。另外,即便是同一产地,拉长石结晶时随着温度和压力等环境的改变,其结构单元层不可能是理想状况下的绝对平行,表面也不可能完全平坦,可能是任意形状或楔形边等,因而同一颗晶体的晕彩色可能变化多样,或出现有如地形图上等高线似的干涉色。至此,关于控制拉长石晕彩成因的内部层状结构为何种类型,这一解决拉长石晕彩成因机理最为重要问题又摆在我们面前。首先,若此层状结构为双晶或解理缝(周国平,1989;李兆聪,1998;郭守国等,2005;张蓓莉,2006;崔文元等,2006),则晕彩色不同的拉长石样品的钙含量应该均匀分布,不会出现本文试验结果所显示的晕彩色与钙含量之间的规律性变化;并且,笔者观察到拉长石的聚片双晶和解理肉眼可见,在垂直晕彩面的薄片下测得双晶纹宽度平均 $50\ \mu\text{m}$ 左右,最窄 $5\ \mu\text{m}$ ,解理缝间距宽窄不一, $10\sim 500\ \mu\text{m}$ 不等,两者数据均远大于产生干涉色的结构层厚度。因此,笔者认为,引起拉长石产生晕彩的内部层状结构可能为斜长石博吉尔德连生区内出溶的连生片晶(Ribbe,1983;Howie,1998;谢浩等,2006)。

## 4 结论

(1) 拉长石的晕彩色是因内部特有的平行平板状结构对光的干涉所致,且结构层的方向平行于晕彩面。晕彩色波长受方程 $2n_2h\cos\theta_2 = k\lambda$ 控制,当结构层厚度处于 $128\sim 292\ \text{nm}$ 之间时出现可见光范围内的干涉色。受环境影响,结构层不一定绝对平行,表面也并不完全平坦,因而同一颗晶体的晕彩色可能变化多样,或出现有如地形图上等高线似的干涉色。

(2) 拉长石内部的结构单元层是由贫钙和富钙两相长石共同组成的,结构层的厚度与钙含量有关,随着钙含量的增加,结构层相应增厚,晕彩色波长也随之增大。

(3) 由于拉长石的产地和结晶环境不同,即使结构单元层厚度相等(干涉相同色),其中富钙相长石的厚度( $A_n$ 含量)也不一定相同,但对于同一产地而言,干涉色波长与钙含量呈正相关关系。

致谢 在样品测试过程中得到了中国地质大学(北京)电子探针室尹京武老师、X射线衍射实验室高翔老师的帮助,在此深表感谢!同时也衷心地感谢审稿人对本文所提的宝贵意见。

## References

- Bolton H C, Bursill L A, McLaren A C, *et al.* 1966. On the origin of the color in labradorite[J]. *Physica Status Solidi*, 18: 221~230.
- Bøggild O B. 1924. On the labradorization of the feldspars[J]. *K. danske vidensk. selsk. Mat.-Fys. Meddel.*, 6: 1~79.
- Chen Xianqiu and Wong Zhenpei. 1997. The mechanism of play-of-color of opal[J]. *Jewellery Science and Technology*, 3: 17~19(in Chinese with English abstract).
- Cui Wenyuan and Wu Guozhong. 2006. *GAC Course of Gemmology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 358(in Chinese).
- Grundy H D and Brown W L. 1974. A high-temperature X-ray study of low and high plagioclase feldspars[A]. Mackenzie W S & Brown W L. *The Feldspar* [C]. Manchester University Press, 162~173.
- Guo Shouguo and Wang Yiqun. 2005. *Gemmology* [M]. Shanghai: Xuelin Publishing House, 193(in Chinese).
- Howie R A. 1998. Iridescence in plagioclase feldspars [J]. *Journal of Gemmology*, 26(1): 13~16.
- Johnson C L, Gunter M E and Knowles C R. 1991. Sunstone labradorite from the Ponderosa Mine, Oregon [J]. *Gems & Gemology*, 27(4): 220~233.
- Laves F, Nissen H U and Bollmann W. 1965. On schiller and submicroscopical lamellae of labradorite [J]. *Naturwissenschaften*, 52: 427~428.
- Li Zhaocong. 1998. *Gem Identification* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~123(in Chinese).
- Liang Quanting. 1987. *Physical Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industrial Publishing House(in Chinese).
- Olsen A. 1975. Study of peristerites using transmission electron microscopy and energy dispersive X-ray analysis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 51(4): 297~302.
- Olsen A. 1977. An electron microscopic study of some twinning and exsolution textures in microcline amazonites [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1(3): 313~324.
- Rayleigh L. 1923. Studies of iridescent colour and the structure producing it. III. The colours of labrador felspar, proceedings of the Royal Society of London [J]. Series A, 103: 34~45.
- Ribbe P H. 1983. *Feldspar Mineralogy* [M]. Washington: Mineralogical Society of America, 1~362.
- Xie Hao, Pei Jingcheng and Li Liping. 2006. Relation between labradorescence and internal structure of labradorite [J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(2): 35~40(in Chinese and English abstract).
- Zhang Beili. 2006. *Systematic Gemmology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 293~301(in Chinese).
- Zhou Guoping. 1989. *Gemmology* [M]. Beijing: China University of Geosciences Publishing House, 252~254(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈显求,翁臻培. 1997. 欧泊的变形机理[J]. *珠宝科技*, 3: 17~19.
- 崔文元,吴国忠. 2006. *珠宝玉石学 GAC 教程* [M]. 北京:地质出版社, 358.
- 郭守国,王以群. 2005. *宝玉石学* [M]. 上海:学林出版社, 193.
- 李兆聪. 1998. *宝石鉴定法* [M]. 北京:地质出版社, 1~123.
- 梁铨廷. 1987. *物理光学* [M]. 北京:机械工业出版社.
- 谢浩,裴景成,李立平. 2006. 拉长石晕彩与内部结构的关系[J]. *地质科技情报*, 25(2): 35~40.
- 张蓓莉. 2006. *系统宝石学* [M]. 北京:地质出版社, 293~301.
- 周国平. 1989. *宝石学* [M]. 北京:中国地质大学出版社, 252~254.