

芬兰晕彩斜长石晕彩成因探讨 ——包裹体及其与晕彩的关系

王晨波¹, 陈廷礼², 陈南²

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 北京大学附属中学, 北京 100080)

摘要: 对芬兰斜长岩中斜长石的宏观和微观观测显示, 无晕彩的斜长石包裹体不发育, 有晕彩的斜长石发育定向排列的针状包裹体。依据斜长石中包裹体的发育程度, 可将包裹体分为两类: 密集型包裹体(35~50条/mm)和稀疏型包裹体(25~35条/mm)。发育密集型包裹体的斜长石的晕彩以蓝色为主, 发育稀疏型包裹体的斜长石的晕彩以红色或橙红色为主。电子探针、扫描电镜和激光拉曼光谱的分析结果表明, 该晕彩斜长石中的所有包裹体在成分上一致, 均为磁铁矿, 有晕彩的斜长石和无晕彩的斜长石的成分也一致。这表明该斜长岩中的斜长石是否具有晕彩与斜长石的成分、包裹体的成分及斜长石的双晶发育程度无关, 而与包裹体的发育程度有关。斜长石和其中定向排列的磁铁矿针状包裹体类似于光学中的光栅效应, 斜长石中晕彩的出现可能是光栅衍射和干涉造成的。

关键词: 晕彩斜长石, 包裹体, 衍射, 光栅

中图分类号: P578.968

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)01-0150-11

The origin of iridescent plagioclase from Finland: a perspective from the relationship between the inclusions and the iridescence

WANG Chen-bo¹, CHEN Ting-li² and CHEN Nan²

(1. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. High School Affiliated to Peking University, Beijing 100080, China)

Abstract: Macroscopic and microcosmic observations of the plagioclases from plagioclasite of southern Finland indicate that the plagioclases with parallel needle-like inclusions has iridescence, while the plagioclases without inclusions do not have iridescence. The inclusions can be divided into two types based on their degrees of development. Dense-type inclusions are 35~50 stripes/mm with 0.01~0.03 mm in length and 0.004 mm in width, while sparse-type inclusions are 25~35 stripes/mm with 0.005~0.015 mm in length and also 0.004 mm in width. The plagioclases with dense-type inclusions are mainly blue while the sparse-type inclusions are orange and red in color. A compositional analysis by means of scanning electron microscope, electron microprobe and laser Raman spectrometry shows that the inclusions are magnetite in composition, and the plagioclases with or without inclusions have the same composition. It is suggested that the composition of the plagioclase and inclusions and the twin of the plagioclases are not the causes for the iridescence of the plagioclases, and the parallel distribution of the needle-like opaque inclusions in the plagioclase seems to be the factor responsible for the iridescent plagioclase. The needle-like parallel inclusions in plagioclases resemble the grating in physics. The iridescence of the plagioclase is probably generated by the diffraction and interference of the light.

Key words: iridescent plagioclase; inclusion; diffraction; grating

收稿日期: 2010-03-21; 修订日期: 2010-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872054)

作者简介: 王晨波(1990-), 女, 应用化学专业, E-mail: amandawang1990@hotmail.com; 通讯作者: 陈廷礼, 男, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: todd6603@163.com。

斜长石是自然界中常见的一种矿物,通常为白色,也有呈灰白色、浅灰、浅红、浅绿或浅黄色的。但有些斜长石呈灰黑色,特别是其中一些斜长石有晕彩,即在特定的方向上,可见带有蓝、橙红、紫或紫红等色彩,故称其为晕彩斜长石(或变彩斜长石)(谢浩 2002; Howie, 1998)。由于其特征的色彩,可视之为宝石(董振信, 1994)。

斜长石为什么会有不同的色彩?为什么会形成晕彩石或色谱石?一些研究者认为变彩是一种物理上的光学现象,是由斜长石的特殊结构(双晶、连晶、出溶)对光的干涉和衍射造成的(Grundy and Brown, 1974; Olsen, 1975, 1977; Ribbe, 1983; 谢浩等 2006; 彭艳菊等 2007, 2008a, 2008b)。也有一些研究者认为,这些色彩可能与斜长石中的包裹体有关(雷威 2000),但对二者的关系没有进行详细的研究。斜长石的晕彩究竟有哪些可能的成因?包裹体的存在是否是产生晕彩的原因?包裹体的特征与晕彩有什么具体关系?其机理是什么?这些都是值得探讨的问题。本文在前人研究的基础上,对芬兰斜长石中包裹体与晕彩的关系进行观察和研究,初步查明了二者的关系,为进一步探讨斜长石晕彩的成因机理提供新的依据。

1 样品来源和特征

晕彩斜长石在加拿大、芬兰、挪威、俄罗斯、马达加斯加等地较为发育和典型。中国的山东也有类似的岩石,但不太典型。通过北京大学附属中学与芬兰罗素中学的校际合作交流,笔者有幸获得了芬兰南部斜长岩中非常典型的晕彩石(色谱石)标本。

该标本来自芬兰南部著名环斑花岗岩中的斜长岩(图 1a)。该岩石为灰黑色,主要由斜长石(95%)组成。晕彩斜长石为灰色-灰黑色,呈板状和板柱状,透明度差,具玻璃光泽,自形。在一块 20 cm×15 cm 的岩石标本中(图 1b),可见到不同粒度的晕彩斜长石,大者为 10 cm×5 cm(图 1b),小者为 1 cm 左右,一般 1 cm×1.5 cm(图 1c)。晕彩以蓝和橙红色为主,也见蓝绿、紫色等。在通常情况下,单个颗粒以一种色彩为主,但有的出现多种色彩,呈现条带状、环带状。条带状晕彩可见蓝色-浅蓝色-砖红(图 2e)。环带状晕彩从外到里依次由蓝绿、蓝变化到黄、橙红色(图 1b、1d)。

在显微镜下,这些斜长石无色透明,正低突起,具有

两组解理,干涉色为灰白-黄白,发育聚片双晶,可见肖纳双晶和卡纳复合双晶,多数斜长石中可见一组或两组针状的不透明矿物包裹体,定向排列(图 2b、2c、2d)。

2 观察和测试方法

通过显微镜下的观察,分析对比有晕彩和无晕彩斜长石的结构、成分,特别是斜长石中包裹体的特征及不同色彩晕彩斜长石中包裹体的特征,并采用电子探针分析确定斜长石的成分,用扫描电镜和激光拉曼光谱确定包裹体的成分。

斜长石的电子探针分析在北京大学地质系 JXA-8100 电子探针上完成。分析条件:加速电压 15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑 $1 \mu\text{m}$,标准样品为美国 SPI 公司 53 种矿物。

包裹体的扫描电镜分析在北京大学物理系电镜实验的 Nano 扫描电镜上完成。分析条件:加速电压 20 kV,放大倍数 45 443,倾斜角 0° 。

包裹体的激光拉曼光谱分析在国土资源部大陆动力学实验室激光拉曼光谱仪(Renishaw)完成。分析条件:激光波长 514 nm,缝宽 $100 \mu\text{m}$,物镜 50 倍。

3 显微镜下的观察结果

通过对无晕彩和有晕彩斜长石的观察发现,无晕彩的斜长石中包裹体几乎不发育(如图 2a)。其原因可能有二:一是斜长石本身不含有包裹体;二是由于切面方向不同,在一些切面上难以观察到包裹体。在有晕彩的斜长石中包裹体很发育(如图 2b),可达到 50 个(条)/mm。包裹体的长度一般为 0.005~0.03 mm,宽度小于 0.004 mm。可见,包裹体的发育程度不同是有晕彩和无晕彩斜长石的差别之一。

3.1 晕彩斜长石的双晶及其他特征

芬兰晕彩斜长石以发育钠长石双晶为主,也可见其他类型双晶。但不同的颗粒上双晶的发育程度不同,有的颗粒双晶很发育(图 2a),有的颗粒双晶不太发育(图 2c),有的甚至不发育(图 2d)。也有的颗粒双晶很发育,但包裹体并不发育(图 2a),而有的颗粒双晶弱或不发育,但包裹体很发育,并有明显的晕彩(图 2c、2d)。可见,双晶的发育程度与包裹体及晕彩的发育没有明显的对应关系。另外,偏光显微镜和扫描电镜的观察显示,这些斜长石不发育连晶和钠长石的出溶结构。

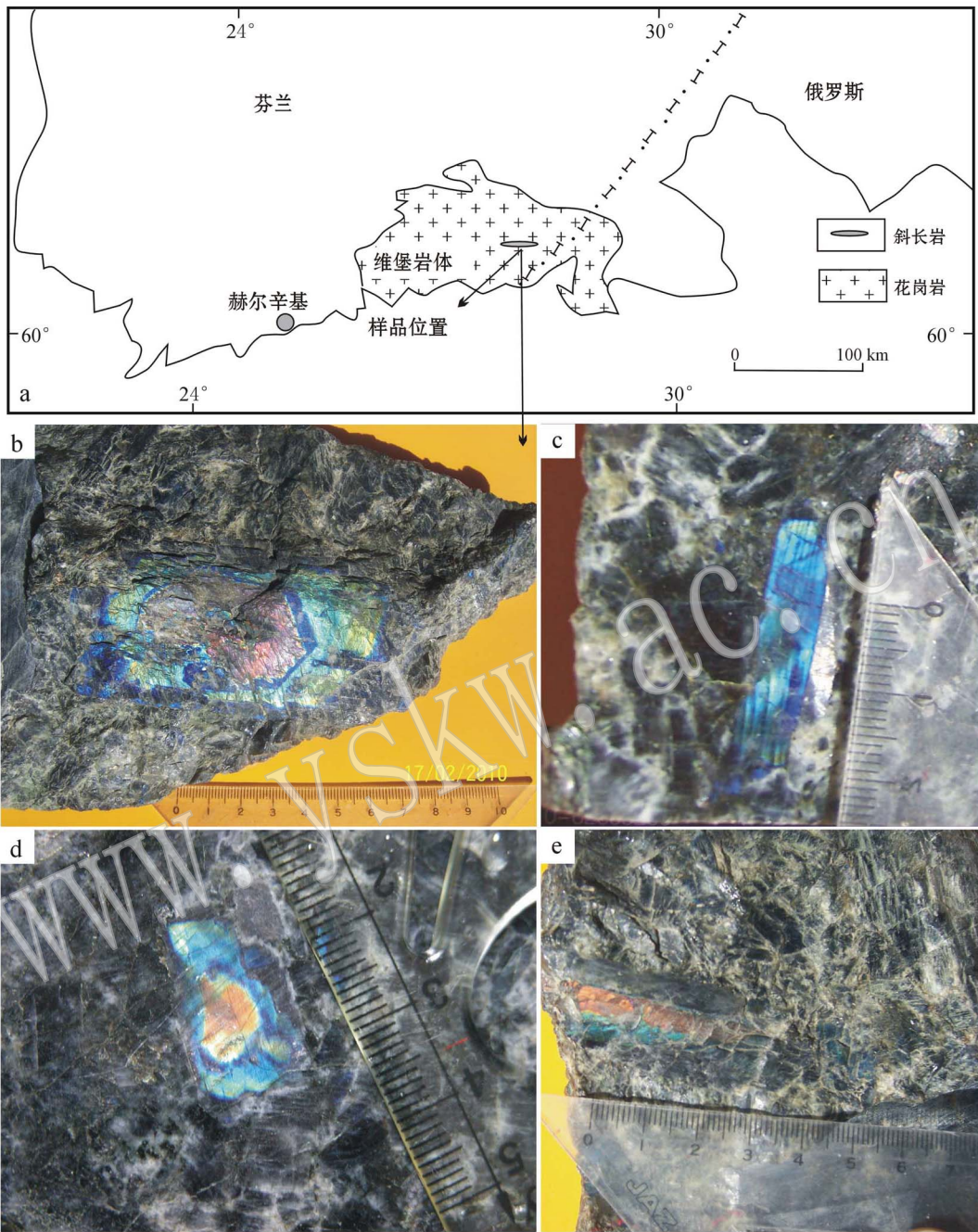


图1 样品来源位置和晕彩斜长石的手标本特征

Fig. 1 Location of the specimen and iridescent plagioclase specimen

a—采样位置; b, d—环带状晕彩斜长石; c—单色晕彩斜长石; e—彩虹状晕彩斜长石

a—location of the specimen; b, d—iridescent plagioclase with concentric iridescence; c—iridescent plagioclase with monochromaticity; e—rainbow-like iridescent plagioclase

3.2 包裹体的密度和大小及与晕彩的关系

芬兰晕彩斜长石的针状包裹体很发育,定向性很强,至少可见2组包裹体,一组很发育,与双晶面呈 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的夹角;另一组不太发育,与 c 轴方向基本一致。按发育程度可把包裹体分为两类:密集型

和稀疏型。

密集型包裹体为单位长度上包裹体的个(条)数较多者,其密度较高,达 $35\sim 50$ 个(条)/mm,长度一般为 $0.01\sim 0.03$ mm,宽度小于 0.004 mm(图3a);稀疏型指单位长度上包裹体的个(条)数较少,这类

包裹体的密度为 25~35 个(条)/mm,长度一般为 0.005~0.015 mm,宽度小于 0.004 mm(图 3b)。

包裹体在不同斜长石颗粒上的发育程度不同,有的颗粒上主要出现密集型,有的颗粒上则以稀疏型为主,还有的颗粒上两种类型同时出现。如图 4a

所示,在颗粒的边部包裹体为密集型,向颗粒中心,逐渐变为稀疏型。有的颗粒边部为密集型,中心几乎不发育包裹体(图 4b)。也有一些斜长石颗粒几乎不发育包裹体。

显微镜下的观察显示,斜长石中包裹体的发育

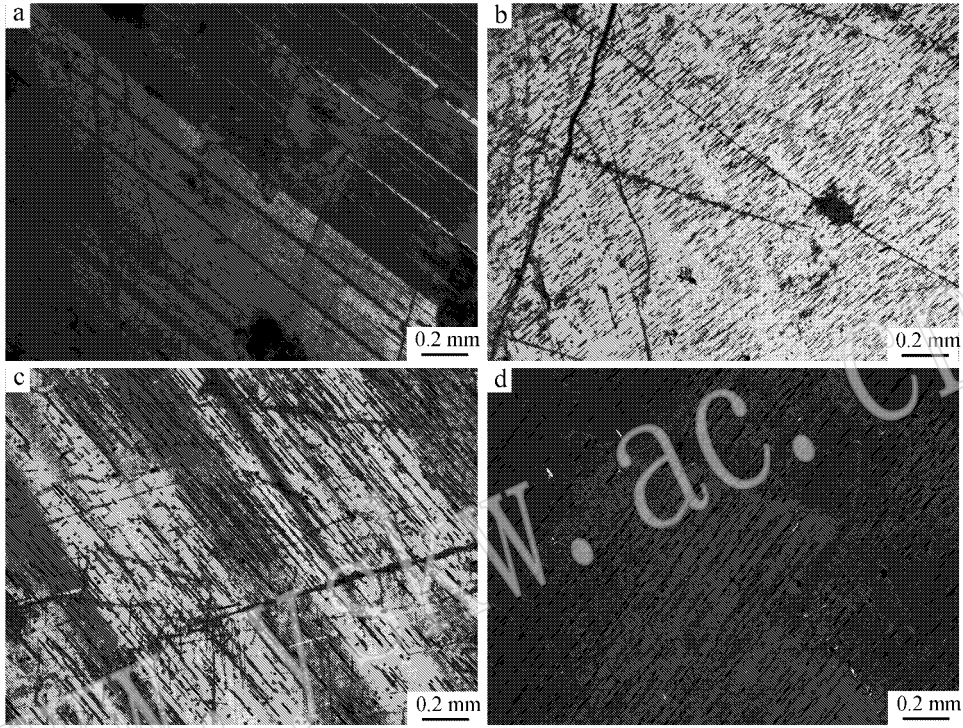


图 2 斜长石在显微镜下的特征

Fig. 2 Microscopic features of the plagioclase

a—包裹体极少的斜长石颗粒,可见聚片双晶(正交偏光);b—斜长石中的包裹体(照片中黑色针状体为包裹体,单偏光);c—斜长石具钠长石双晶,同时发育密集的针状包裹体,具有蓝色晕彩(正交偏光);d—斜长石不发育双晶,但发育密集的针状包裹体,具有蓝色晕彩(正交偏光)

a—plagioclase with very few inclusions but with twin (crossed nicols); b—plagioclase with quite a few inclusions (plainlight); c—plagioclase blue with twin and dense inclusions (crossed nicols); d—plagioclase without twin but blue with needle-like dense inclusions (crossed nicols)

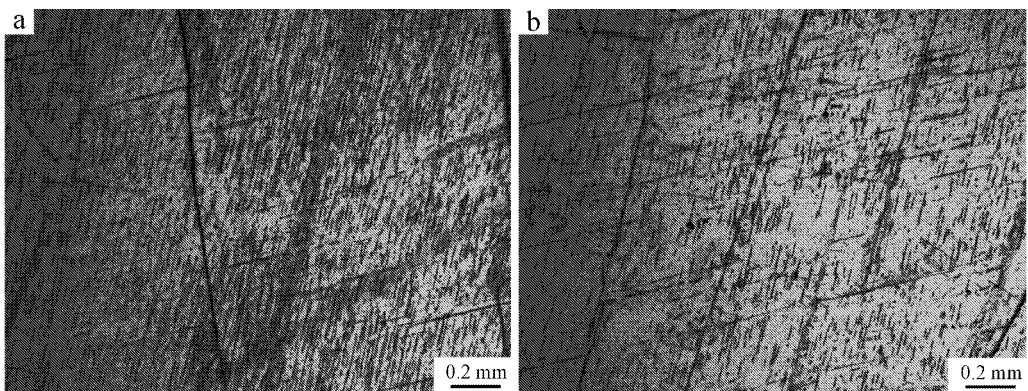


图 3 斜长石中包裹体的类型

Fig. 3 Types of inclusions in the plagioclase

a—密集型包裹体(35~50 条/mm,单偏光);b—稀疏型包裹体(25~35 条/mm,单偏光)
a—dense inclusions (plainlight); b—sparse inclusions (plainlight)

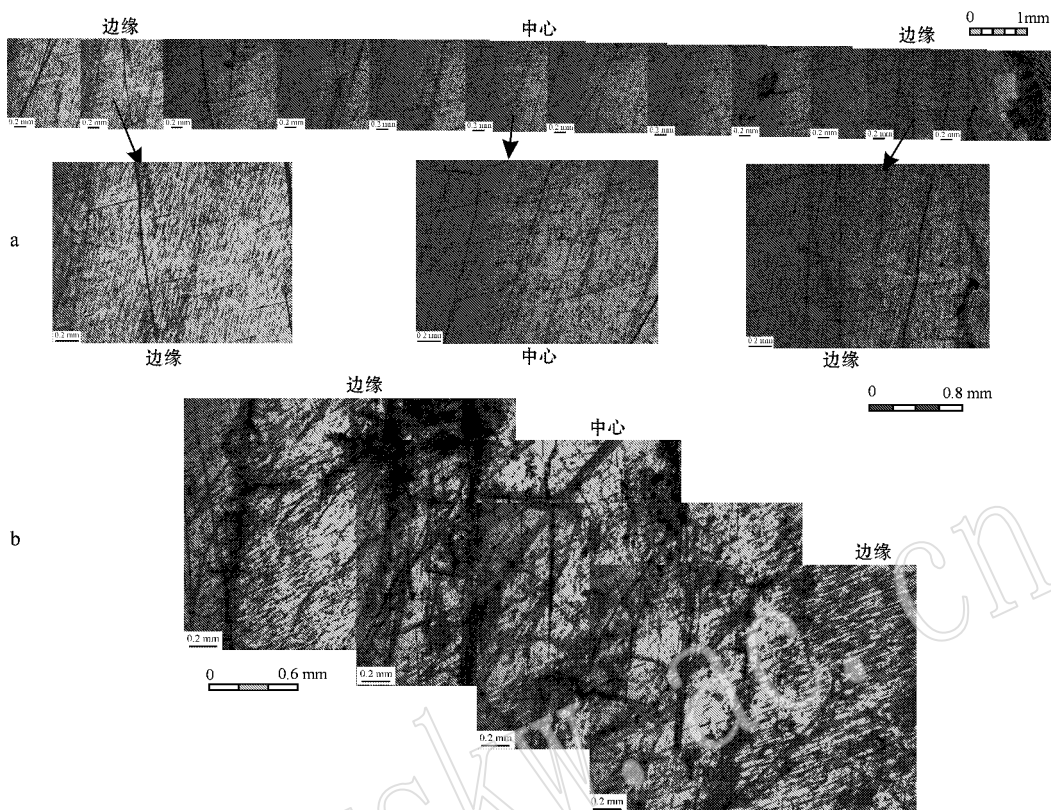


图4 同一斜长石颗粒中包裹体的发育程度

Fig. 4 Features of inclusions in the same plagioclase grain

a—斜长石颗粒边部的包裹体为密集型包裹体,中心为稀疏型包裹体(单偏光);b—斜长石颗粒的边部发育密集型包裹体,中心几乎无包裹体(单偏光)

a—plagioclase with dense inclusions on the margin and sparse inclusions at the center (plainlight); b—plagioclase with dense inclusion on the margin but without inclusion at the center (plainlight)

程度与颗粒的切面有关,在平行针状包裹体的切面上,包裹体发育最好,长度最长;在近乎垂直针状包裹体的切面上,包裹体长度最短,其他切面上包裹体的发育程度介于这两者之间。

此外,不同晕彩部位的包裹体特征不同。在出现蓝色晕彩的颗粒中,包裹体呈密集型,包裹体的发育程度为35~50条/mm。包裹体的长度平均值为0.01974 mm(100个包裹体的平均值),其中大多数包裹体的长度为0.015~0.025 mm(图5)。在出现橙色晕彩的颗粒中,包裹体以稀疏型为主,为20~35条/mm。包裹体的长度平均值为0.00886 mm(100个包裹体的平均值),其中大多数包裹体的长度以0.005~0.015 mm为主(图5)。

4 测试结果

4.1 晕彩斜长石的成分

斜长石的电子探针分析结果见表1,其中1号

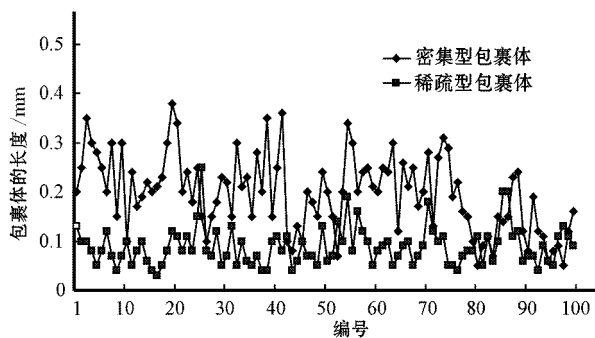


图5 不同类型包裹体长度的统计

Fig. 5 Statistics of the lengths of different types of inclusions

样为具环带色彩的晕彩斜长石颗粒,2号样为蓝色色彩的晕彩斜长石颗粒,3号样为无晕彩的斜长石颗粒。

分析结果显示,具环带色彩的晕彩斜长石(1号样),从边缘到中心主要氧化物的含量变化很小,仅表现为 SiO_2 和 Na_2O 略有减少, CaO 和 Al_2O_3 略有增加(图6a);边部斜长石 $A_n = 52$ (除一个点的 A_n

表 1 斜长石的电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of the plagioclase

样号	分析区域	点号	MnO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	NiO	FeO	Total	An	Ab	Or
1	边部	1	0	5.4	0	0.41	0	56.44	27.12	9.81	0.05	0	0.24	99.47	48.88	48.69	2.43
		2	0	4.94	0.04	0.47	0.05	55.77	27.76	10.29	0.03	0.03	0.35	99.73	52.00	45.17	2.83
		3	0	4.69	0.04	0.46	0	55.06	28.7	11.2	0.01	0	0.24	100.39	55.35	41.94	2.71
		4	0	4.33	0.05	0.52	0	54.72	28.22	11.23	0.03	0	0.36	99.46	57.05	9.80	3.15
		5	0.07	4.89	0.03	0.48	0	55.85	28.33	10.79	0	0.06	0.27	100.77	53.39	43.78	2.83
		6	0.03	4.47	0.02	0.48	0.01	54.65	28.54	11.51	0.02	0	0.3	100.04	57.06	40.10	2.83
		7	0	4.48	0.03	0.48	0	54.58	28.66	11.36	0.02	0	0.29	99.9	56.69	40.46	2.85
	中心	8	0.03	4.44	0.01	0.46	0.06	54.48	28.98	11.65	0.03	0	0.3	100.43	57.58	39.71	2.71
		9	0	4.43	0.06	0.5	0.03	54.49	28.95	11.75	0.07	0.01	0.33	100.6	57.71	39.37	2.92
		10	0	4.65	0.02	0.5	0	54.46	28.81	11.56	0.04	0.02	0.31	100.36	56.20	40.91	2.89
		11	0	4.35	0.03	0.51	0.02	54.15	28.67	11.74	0.05	0	0.35	99.88	58.06	38.93	3.00
		12	0	4.54	0.02	0.54	0	54.2	28.59	11.57	0	0	0.3	99.76	56.64	40.22	3.15
		13	0.04	4.52	0.07	0.5	0	55.25	28.64	11.48	0.03	0.07	0.33	100.92	56.68	40.38	2.94
		14	0.06	4.75	0.02	0.51	0.02	55.61	28.93	11.12	0.02	0	0.26	101.3	54.72	42.29	2.99
	边部	15	0	4.72	0.03	0.56	0.01	55.84	28.08	11.05	0.01	0	0.31	100.61	54.55	42.16	3.29
		16	0.03	4.52	0.02	0.49	0.01	55.35	28.37	11.3	0	0	0.26	100.34	56.32	40.77	2.91
		17	0	4.73	0.03	0.51	0.02	55	28.78	11.31	0.02	0	0.3	100.7	55.23	41.80	2.97
		18	0	4.54	0.02	0.48	0.07	55	28.58	11.18	0	0	0.25	100.12	55.99	41.15	2.86
		19	0	4.61	0.01	0.46	0	55.08	28.39	11.2	0.03	0.05	0.29	100.12	55.75	41.52	2.73
		20	0	4.96	0.03	0.5	0	56.03	28.24	10.56	0	0	0.25	100.56	52.46	44.59	2.96
2	边部	1	0.01	4.86	0	0.34	0	55.1	28.19	10.83	0.07	0	0.23	99.63	54.07	43.91	2.02
	↓	2	0	4.99	0	0.32	0.01	54.98	28.22	10.59	0	0.01	0.24	99.35	52.95	45.15	1.90
	中心	3	0.03	4.72	0.07	0.46	0	54.86	28.56	11.18	0.01	0.03	0.26	100.17	55.16	42.14	2.70
	↓	4	0	4.99	0.05	0.53	0	55.69	27.79	10.37	0.01	0.07	0.24	99.75	51.77	45.08	3.15
	↓	5	0	4.98	0.01	0.47	0	55.58	27.57	10.5	0.04	0.03	0.26	99.43	2.31	44.90	2.79
	边部	6	0.01	5.2	0.04	0.43	0.03	55.77	27.87	10.58	0.01	0	0.32	100.25	51.61	45.90	2.50
3	边部	1	0.04	5.03	0.02	0.42	0	54.99	28.06	10.8	0	0	0.23	99.6	52.94	44.61	2.45
	↓	2	0	5.12	0.03	0.3	0	55.96	27.8	10.43	0.02	0.1	0.22	99.97	52.01	46.20	1.78
	中心	3	0	5.03	0.04	0.24	0.01	55.61	28.08	10.41	0.01	0.04	0.18	99.65	52.58	45.98	1.44
	↓	4	0.12	4.93	0.03	0.39	0	55.76	27.83	10.39	0	0	0.28	99.73	52.54	45.11	2.35
	边部	5	0.01	4.88	0.02	0.42	0.02	55.24	27.94	10.46	0	0.07	0.22	99.28	52.85	44.62	2.53

=48),中心 $An = 58$ 。一般的晕彩斜长石(2号样)和无晕彩的斜长石(3号样)从边缘到中心主要氧化物的含量几乎无变化(图 6b、6c), $An = 51 \sim 54$ 。可见,不同特征斜长石的成分基本一致,均为拉长石。

4.2 包裹体的成分

包裹体的扫描电镜能谱分析结果显示,斜长石中包裹体的成分以 Fe、Ti 氧化物为主(图 7)。从包裹体扫描图像上可以看出,其表面亮度不同,有的地方亮,有的地方暗,表明包裹体的成分不太均匀,同时扫描的结果也显示包裹体内部的成分不均匀,有的部位 Ti 峰强度较大,有的部位 Fe 峰强度较大(图 7c、7d),有的部位几乎没有 Ti 峰(图 7b)。

包裹体的激光拉曼光谱分析结果见图 8。可见,这些图谱中均出现了 $667 \sim 662 \text{ cm}^{-1}$ 和 $507 \sim 516 \text{ cm}^{-1}$ 两个峰,这两个峰值与磁铁矿激光拉曼图谱中 665 cm^{-1} 和 605 cm^{-1} 的两个峰形态相似,因此,可以

推断这些包裹体在矿物属性上与磁铁矿一致。

5 讨论

5.1 芬兰斜长石晕彩的成因

根据前人的认识,斜长石晕彩的成因有可能与斜长石的成分、结构和双晶等有关(如 Olsen, 1975, 1977; Ribbe, 1983; 彭艳菊等, 2007, 2008a, 2008b)。但以上对芬兰斜长岩中晕彩斜长石的观察和研究结果表明:①芬兰晕彩斜长石的出溶结构不发育,可见晕彩与出溶结构关系不大。②双晶发育、包裹体不发育的斜长石颗粒不具有晕彩现象(图 2a);而双晶不很发育或几乎不发育但发育包裹体的斜长石出现晕彩(图 4);可见,晕彩与双晶关系不大。③晕彩斜长石(2号样)和无晕彩的斜长石(3号样)从边缘到中心的成分几乎没有差异,故斜长石的成分对晕彩

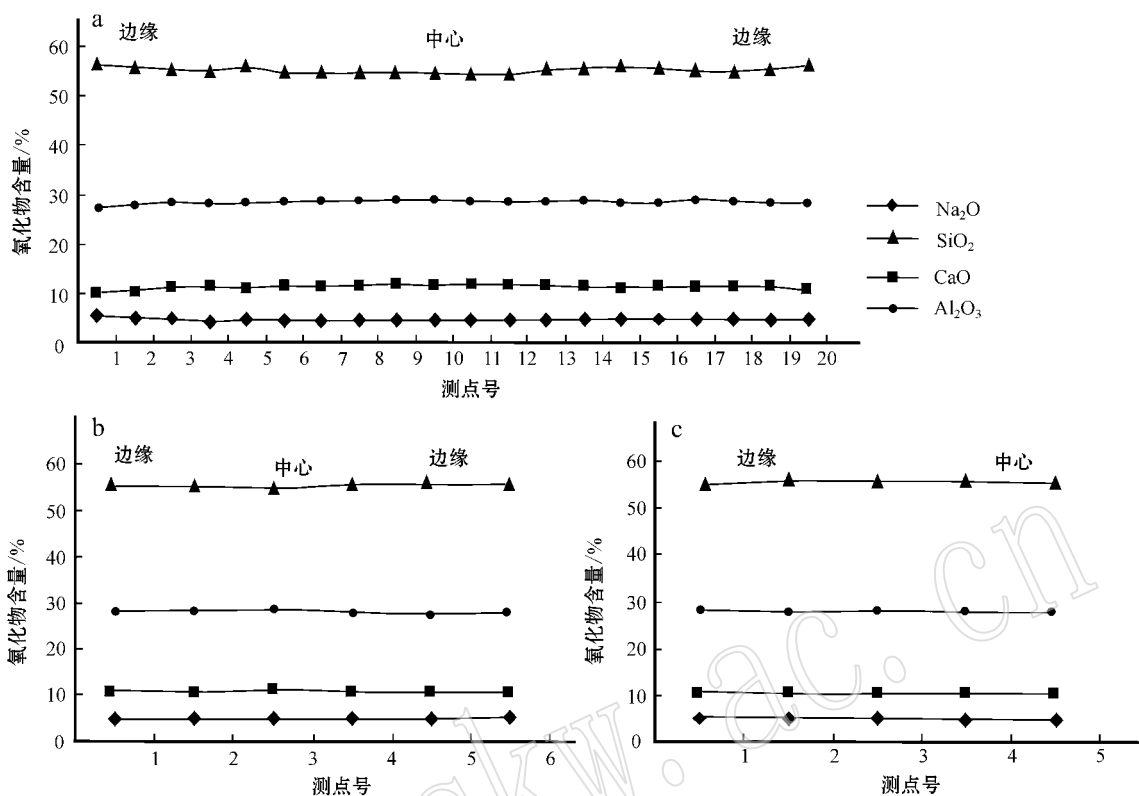


图6 不同特征斜长石的成分变化

Fig. 6 Composition of different plagioclase grains

a—具环带状色彩的晕彩斜长石；b—不具环带的晕彩斜长石；c—无晕彩的斜长石

a—plagioclase with concentric iridescent；b—plagioclase with iridescent；c—plagioclase without iridescent

的出现影响不大。④ 斜长石中包裹体的成分分析结果显示,密集型和稀疏型包裹体的成分一致,与磁铁矿相似,均为不透明矿物(图8),可见,包裹体的成分不是影响斜长石出现不同晕彩的因素。

上述的观察和研究结果十分明确地显示,芬兰斜长岩中斜长石的晕彩与其中包裹体的发育程度有着密切的关系。有晕彩的斜长石发育针状包裹体,不出现晕彩的斜长石包裹体不发育,即使同一个颗粒也是如此。例如如图4b中的斜长石,边部针状包裹体很发育,出现蓝色晕彩,中心部位几乎无包裹体,也就没有晕彩。可见,包裹体的发育程度在很大程度上决定了晕彩是否出现。当包裹体比较发育时才出现晕彩,而包裹体不发育时不出现晕彩。因此,可以说包裹体的发育程度是出现晕彩的必要条件。这也表明不同产地的晕彩斜长石其成因可能是有差异的。

芬兰斜长石晕彩的颜色与包裹体的发育程度也密切相关。包裹体密集的斜长石颗粒以蓝色和蓝绿色为主,如图4a、4b中斜长石的边部;包裹体稀疏的

颗粒以橙红色为主,如图4a中斜长石的中心部分。

最特征的是同一颗粒从边部到中心,包裹体的密度从密到疏(图9),相应的晕彩颜色从蓝绿、蓝变化到黄、橙红。可见,包裹体的疏密和长短在很大程度上决定了晕彩的颜色。当包裹体密且长时,晕彩的颜色以蓝色为主,而当包裹体疏且短时,晕彩的颜色以橙色为主。

因此,可以说包裹体的疏密程度和长短的变化是引起晕彩色彩变化的重要原因。

斜长石的晕彩是否出现似乎还与颗粒的切面有关,在近于平行针状包裹体的切面上晕彩出现的最好,在近于垂直的切面上看不到晕彩。但其实质还是切面上包裹体的发育程度,即在平行针状包裹体的切面上能观察到发育的包裹体。

由上可见,芬兰斜长石是否出现晕彩、出现什么样的晕彩与斜长石的成分、双晶和包裹体的成分无关,而与包裹体的发育程度(即密度和长度)关系密切,因此,包裹体的发育程度是控制斜长石晕彩出现和晕彩特征的关键因素。

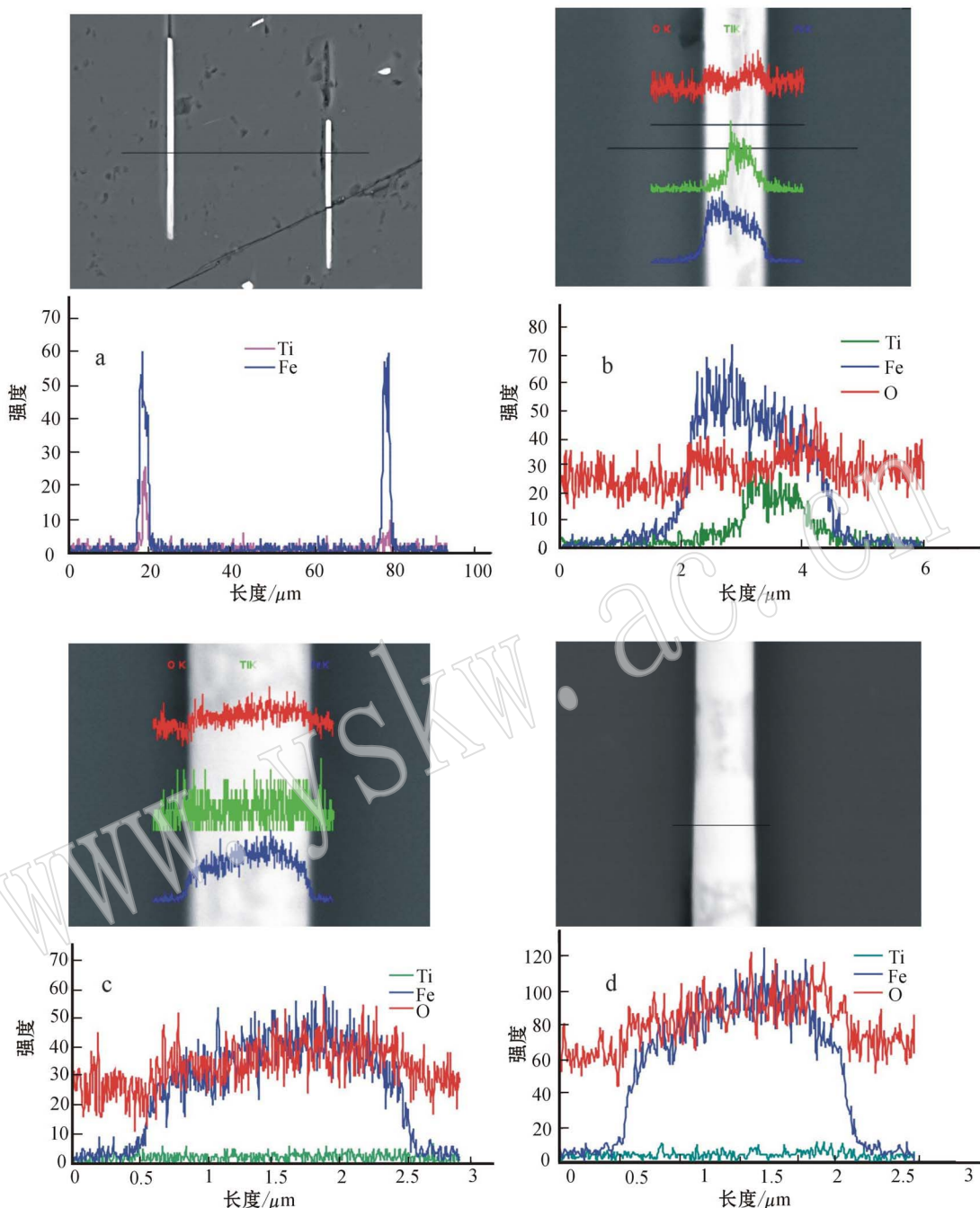


图 7 斜长石中包裹体的扫描电镜(SEM)图像及能谱分析结果

Fig. 7 Scanning electron microscopic image and spectral analyses of inclusions in the plagioclase

a—密集型包裹体中的相邻包裹体; b、c—密集型包裹体中的一条; d—稀疏型包裹体中的一条

a—two inclusions from dense inclusion type; b, c—an inclusion of dense inclusion type; d—an inclusion of sparse inclusion type

具有晕彩的斜长岩是一种昂贵的装饰板材,特别好的晕彩斜长石也是珍贵的宝石(色谱石)。可见,要获得好的斜长石晕彩宝石,应该寻找包裹体发育的斜长石。在宝石加工中应注意其包裹体的发育特征,应选择弧面款式,并使其底面与包裹体的延长方向平行。这样有可能获得较佳的晕彩。

5.2 斜长石晕彩形成机理的探讨

斜长石晕彩是一种物理现象,是光干涉和衍射的结果。前人就斜长石双晶、连晶和斜长石中钠长石的出溶造成干涉作用使斜长石出现晕彩的机制做过研究(谢浩等,2006;雷威,2000;Ribbe,1983;彭艳菊等,2007,2008a,2008b)。关于斜长石晕彩的衍

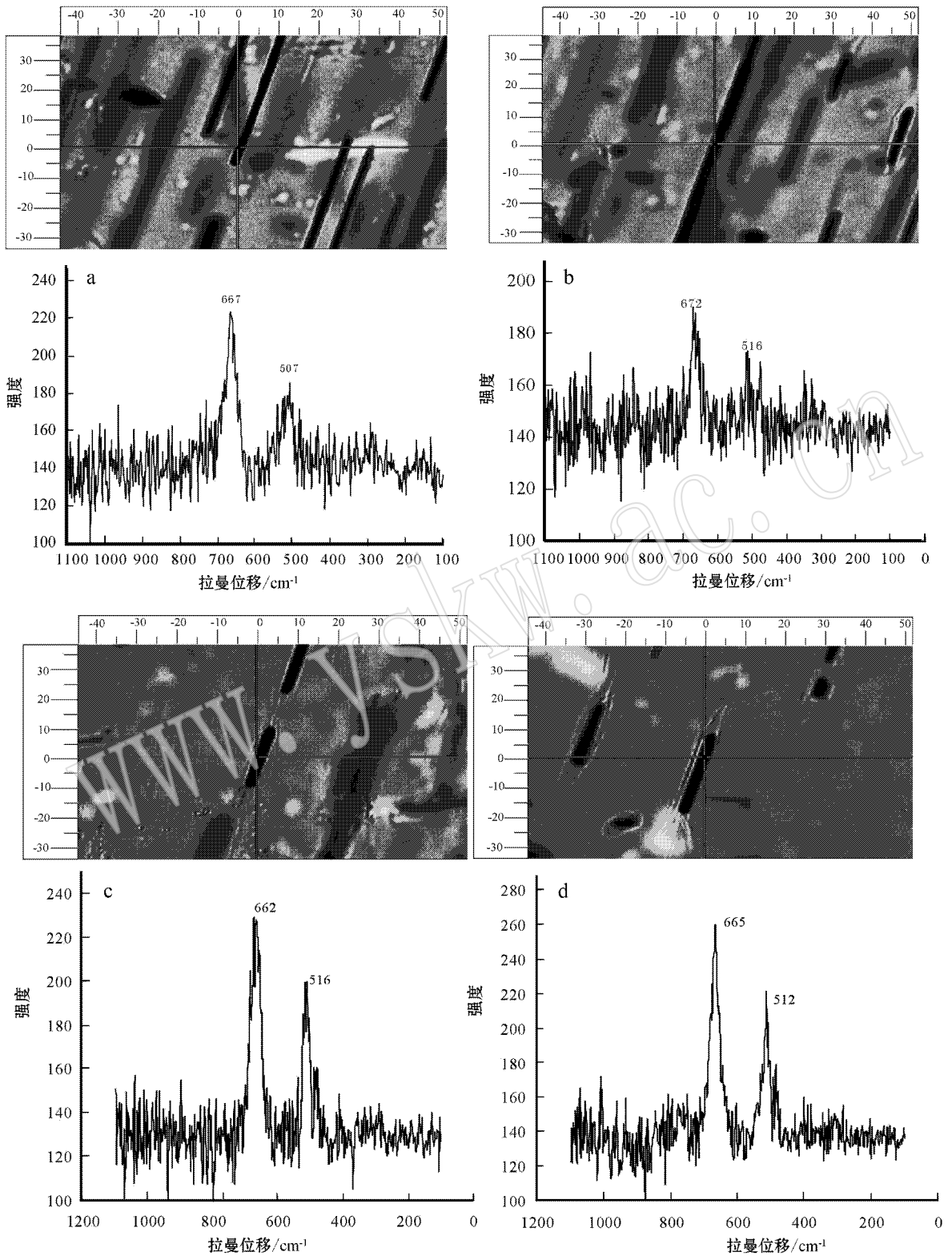


图8 包裹体的激光拉曼分析图谱

Fig. 8 Laser Raman spectrometry of inclusions in the plagioclase

a, b—密集型包裹体; c, d—稀疏型包裹体

a, b—dense inclusions; c, d—sparse inclusions

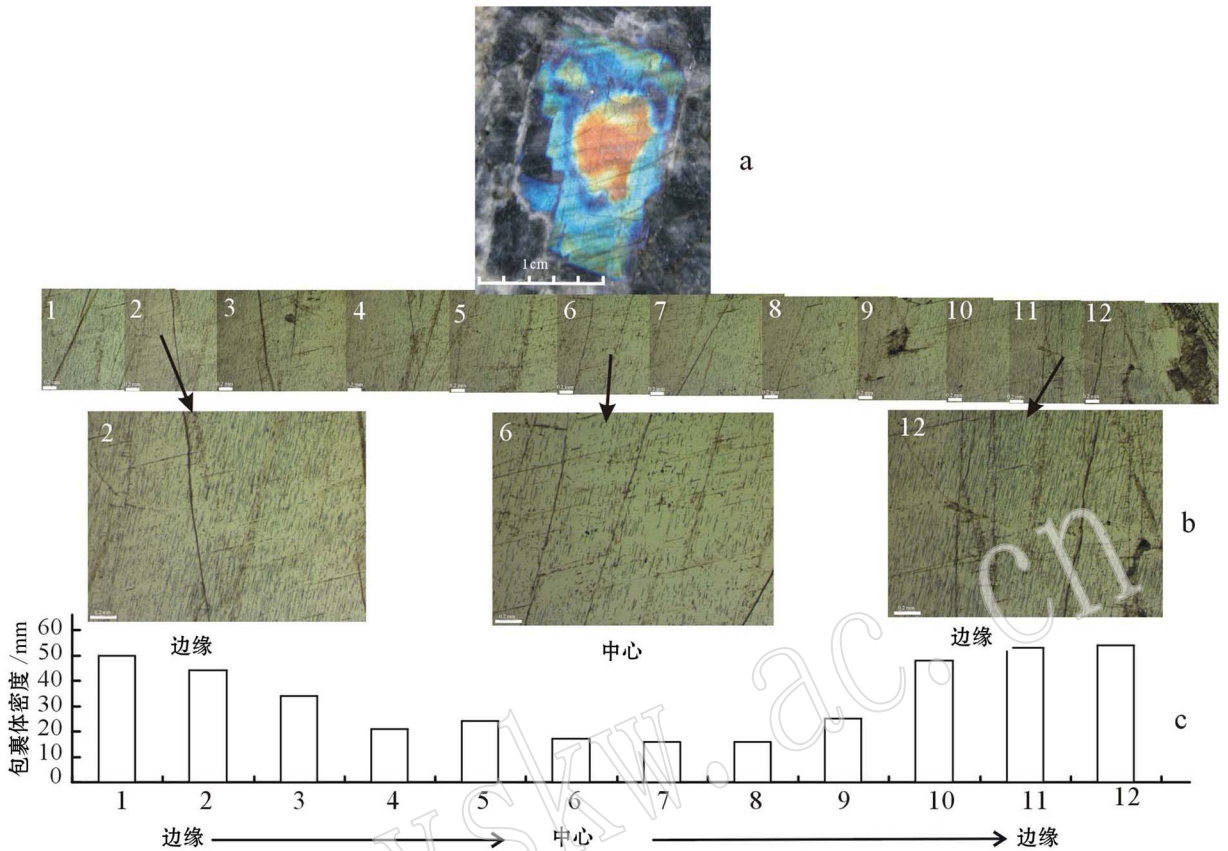


图 9 包裹体与晕彩颜色的关系

Fig. 9 Relationship between the inclusion and iridescent

a—手标本上观察到的斜长石晕彩；b—显微镜下横穿颗粒连续照相下的包裹体发育程度；c—对连续照相下的包裹体发育程度的统计

a—iridescent plagioclase specimen；b—section of inclusion distribution across the iridescent plagioclase under microscope；c—statistics of inclusion distribution across the iridescent plagioclase

射成因也进行过探讨。但没有对包裹体的大小、包裹体的分布密度及其与斜长石晕彩颜色的对应关系进行过详细的研究。

本文研究发现芬兰晕彩斜长石和其中的不透明矿物包裹体的强烈定向分布特征符合光栅衍射条件。

光栅是大量等宽等间距平行狭缝(或反射面)构成的光学元件,如在玻璃片上划出一系列平行等距的划痕,刻过的地方不透光,未刻地方透光,这样就可制成光栅(程守洙等,2006)。光栅方程为:

$$d \sin \theta = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

光线垂直入射

$$d (\sin \theta + \sin \varphi) = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

光线以 φ 角入射

其中, λ 为入射光波的波长, θ 为衍射光线方向的余角, φ 为入射角, d 为光栅常数, $d = a + b$, a 透光缝宽度, b 不透光缝宽度, 光栅常数与光栅单位长度的刻痕数 N 的关系: $d = a + b = 1/N$; 通常为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mm, 如果 $d < 4 \times 10^{-4}$ mm, 即刻线

密度高于 2 500 条/mm, 则观察不到衍射。光栅衍射图样是由来自每一个单缝上许多子波以及来自各单缝对应的子波彼此相干叠加而形成。因此,它是单缝衍射和多缝干涉的总效果。如果入射光是单色光,衍射的结果出现明暗相间的条纹,如果入射光是白光,将出现彩色光谱(光栅光谱)。

芬兰斜长石晕彩的出现可能是光栅衍射的结果。这些斜长石中包裹体的密度为 20~50 条/mm, 即其 $d = 0.05 \sim 0.02$ mm。由光栅方程可知,波长与 d 和 $\sin \theta$ 成正比,如果 θ 一定,波长与 d 成正比。也就是包裹体分布的密度大,其相应的波长小,反之波长就大。从观察的结果可以看出,发育密集型包裹体的斜长石衍射干涉时其波长应较短,这与在标本上观察到的蓝色和蓝绿色晕彩是一致的;发育稀疏型包裹体的斜长石衍射干涉所出现波长应较长,这与在标本上观察到的橙红和黄色晕彩相符合。几乎不发育包裹体的颗粒或部位就没有晕彩,如图 4b

中斜长石的中心部分。

由此可见,包裹体的密度、长度与斜长石晕彩有着直接的关系,这为包裹体密度、长度与斜长石晕彩的成因关系提供了直接证据,表明包裹体的密度、长度可能是造成斜长石晕彩的原因之一。目前在芬兰晕彩斜长石中还没有看到明显的连晶和斜长石中钠长石的出溶现象,因此斜长石的出溶可能与晕彩关系不大。另外,本研究显示,包裹体的成分没有太大的差异,因此,包裹体的成分可能也不是造成晕彩的主要因素。所以,包裹体的发育程度应该是造成斜长石晕彩的主要原因。

6 结论

(1)通过对斜长石中包裹体发育程度的研究,结合电子探针、激光拉曼、扫描电镜对斜长石和包裹体成分的分析,认为芬兰斜长岩中的斜长石是否出现晕彩、出现什么样的晕彩与斜长石的成分、双晶和包裹体成分无关,而与包裹体的发育程度关系密切。因此,包裹体的发育程度是斜长石晕彩的成因所在。

(2)芬兰斜长岩中的晕彩主要出现在包裹体十分发育的斜长石颗粒和部位,无包裹体或包裹体不发育的颗粒和部位不出现晕彩。而且,在近于平行包裹体的切面上,斜长石的晕彩最发育,在近于垂直的切面上几乎观察不到晕彩。包裹体密集(35~50条/mm)的斜长石常呈现蓝色、蓝绿色、紫色等,包裹体稀疏(20~35条/mm)的斜长石出现橙红色。

(3)该斜长石的晕彩是斜长石和其中的包裹体组成了类似光栅的物质衍射和干涉造成的,衍射和干涉出现的色彩所对应的波长与包裹体的发育程度成正比。包裹体越密集,出现的色彩所对应的波长越短,反之亦然。

致谢 北京大学地质系王式洸教授给予了热情的指导,芬兰罗素中学提供了标本,北京大学地球与空间学院电子探针室的舒桂明教授、物理学院电镜室的陈丽、陈晶教授及国土资源部大陆动力学实验室激光拉曼室的阎玲工程师在分析和测试上给予很大的帮助,在此一并表示衷心感谢!

References

Cheng Shouzhu and Jiang Zhiyong. 2006. *Physics* [M]. Beijing: Higher

Education Press (in Chinese).

Dong Zhenxin. 1994. *Gem* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Grundy H D and Brown W L. 1974. A high-temperature X-ray study of low and high plagioclase feldspar [A]. Mackenzie W S & Brown W L. In the *Feldspars* [C]. Manchester University Press, 162~173.

Howie R A. 1998. Iridescence in plagioclase feldspars [J]. *Journal of Gemology*, 35(1): 13~16.

Lei Wei. 2000. Study on gemological characteristics and play of color mechanism of the plagioclase in certain region of China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 14(76): 114~118 (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.

Peng Yanju, He Xuemei and Fang Qinfang. 2007. EPMA studies on iridescence of labradorite [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 474~480 (in Chinese with English abstract).

Peng Yanju, He Xuemei and Fang Qinfang. 2008a. Exsolution lamellar structure causes of iridescence in labradorite: evidence from TEM [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 15~19 (in Chinese with English abstract).

Peng Yanju, He Xuemei and Fang Qinfang. 2008b. The origin of iridescence in the gem [J]. *Gems and Gemology*, 10(1): 15~19 (in Chinese with English abstract).

Ribbe P H. 1983. *Feldspar Mineralogy* [M]. Washington: Mineralogical Society of America, 1~362.

Xie Hao. 2002. Variety of iridescent plagioclase [J]. *Journal of Gems & Gemology*, 4(2): 22~24 (in Chinese with English abstract).

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 with English abstract).

附中文参考文献

程守洸,江之永. 2006. *普通物理学* [M]. 北京: 高等教育出版社.

董振信. 1994. *天然宝石* [M]. 北京: 地质出版社.

雷威. 2000. 某地变彩斜长石宝石学特征及变彩机理研究 [J]. *矿产与地质*, 14(76): 114~118.

彭艳菊,何雪梅,方勤方. 2008a. 层状出溶结构导致拉长石晕彩形成——来自透射电镜的证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 27(5): 483~488.

彭艳菊,何雪梅,方勤方. 2008b. 宝石晕彩效应的成因综述 [J]. *宝石和宝石学杂志*, 10(1): 15~19.

彭艳菊,何雪梅,方勤方. 2007. 拉长石晕彩成因的电子探针研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 474~480.

谢浩. 2002. 晕彩斜长石的种类 [J]. *宝石与宝石学杂志*, 4(2): 22~24.

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.