

萤石的矿物学特征及其资源分布

杨桂芳¹, 刘宸羽²

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²城乡院(广州)有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年5月21日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月23日

摘要

萤石是一种常见的钙卤化物矿物, 因其能在紫外线、阴极射线照射或加热状态下发出蓝绿色荧光而得名。化学成分是氟化钙(化学式CaF₂), 其中钙、氟含量分别约为51%和49%, 含少量的硅、铝、锰等元素, 是自然界中氟含量最高的矿物, 因此又称为“氟石”。萤石形态多样, 色彩纷呈, 可依据颜色、净度及颗粒大小确定其用途。萤石用途广泛, 主要用于氟化工业和高价值附加产品的制造。也有一部分萤石因其形态、光泽和颜色较好而成为宝石、观赏石。萤石在全球的储量丰富, 已探明的萤石矿储量达到3.1亿吨, 是一种不可再生的战略非金属矿产资源。萤石资源储量第一为墨西哥, 6800万吨; 中国以4200万吨位列第二; 南非以4100万吨位列第三。品质好的精品萤石在全球均有产出, 且各具特色。如欧洲的德国、英国、法国, 美洲的加拿大、美国、墨西哥和秘鲁, 亚洲的中国、俄罗斯等国家和地区, 产出的精品萤石在矿晶收藏界颇受欢迎。本文综合前人的研究成果, 对萤石的矿物学特征及资源分布做出概述。

关键词

萤石, 观赏石, 资源分布, 矿物学特征

Mineralogical Characteristics and Resource Distribution of Fluorite

Guifang Yang¹, Chenyu Liu²

¹College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Urban-Rural Planning & Design Institute (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: May 21st, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

Fluorite, a common calcium halide mineral, is named for its ability to fluoresce blue-green when

文章引用: 杨桂芳, 刘宸羽. 萤石的矿物学特征及其资源分布[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(7): 1016-1024.

DOI: 10.12677/ag.2025.157095

exposed to ultraviolet light, cathode rays or heat. The chemical composition is calcium fluoride (chemical formula CaF_2), in which the content of calcium and fluorine is about 51% and 49% respectively, containing a small amount of silicon, aluminum, manganese and other elements, which has the highest content of fluorine in nature, so it is also called "fluorspar". Fluorite has a variety of forms and colors, and its use can be determined by color, clarity and particle size. Fluorite is widely used in the fluorine industry and in the manufacture of high value add-on products. There are also some fluorite because of its shape, luster and color which makes it better and becomes gems, Decoration Stones. Fluorite is a non-renewable strategic nonmetallic mineral resource with abundant reserves in the world, and the proven reserves of fluorite ore reach 310 million tons. The first fluorite resource reserves is Mexico, 68 million tons; China was second with 42 million tons; South Africa was third with 41 million tonnes. Good quality boutique fluorite in the world is produced, and each has its own characteristics. Such as Germany, the United Kingdom, France in Europe, Canada, the United States, Mexico and Peru in the Americas, China, Russia and other countries and regions in Asia, the output of high-quality fluorite in the crystal collection industry is very popular. This paper summarizes the mineralogical characteristics and resource distribution of fluorite based on previous research results.

Keywords

Fluorite, Decoration Stones, Resource Distribution of Fluorite, Mineralogical Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

萤石是一种钙卤化物矿物, 化学成分主要是氟化钙(化学式 CaF_2), 其中钙、氟含量分别约为 51%和 49%, 含少量的硅、铝、锰等元素。萤石应用广泛, 且历史悠久, 最早可以追溯到中国新石器时期。萤石形态多样, 色彩纷呈, 几乎汇聚了大自然所能看到的颜色。可依据颜色、净度及颗粒大小确定其用途。萤石主要用于工业用途, 但不乏有一些萤石晶体因形态多样, 颜色丰富, 被当作宝石及观赏石。萤石在全球的储量丰富, 已探明的萤石矿储量达到 3.1 亿吨, 是一种不可再生的战略非金属矿产资源。萤石是我国的优势矿种, 资源储量以 4200 万吨位列世界第二。品质好的精品萤石在全球均有产出, 且各具特色。如欧洲的德国、英国、法国, 美洲的加拿大、美国、墨西哥和秘鲁, 亚洲的中国、俄罗斯等国家和地区, 产出的精品萤石在矿晶收藏界颇受欢迎。

2. 萤石概述

萤石是一种常见的钙卤化物矿物, 因其在紫外线、阴极射线照射或加热状态下能发出蓝绿色荧光而得名。化学成分是氟化钙(化学式 CaF_2), 其中钙、氟含量分别约为 51%和 49%, 含少量的硅、铝、锰等元素, 是自然界中氟含量最高的矿物, 因此又称为“氟石” [1]。

萤石应用广泛, 且历史悠久。在古罗马时期, 紫色条纹相间的萤石极著名, 名曰“蓝色约翰”。其广泛用于制做酒杯和花瓶, 古罗马人迷信这种酒杯会使人千杯不醉[2]。古埃及时期, 人们常把萤石来制作雕像或者雕刻; 在中国在新石器时期的河姆渡人就将其用作装饰品[3]。

萤石是一种重要的非金属矿物原料, 具有广泛的工业的用途。如冶金工业中, 当作熔剂, 起到降低冶炼温度的作用。化学工艺中, 萤石主要用来制造氢氟酸及其衍生物。玻璃工业中, 萤石熔制玻璃

时加入少量萤石, 可起到助熔作用, 萤石可降低玻璃液的粘度, 因此有利于玻璃的均化及澄清, 提高玻璃质量[4]。无色和浅色萤石的透明晶体又称光学萤石, 曾经和水晶一样用来磨制光学透镜。欧洲古老的望远镜片有许多就是用萤石制作。纯净的萤石晶体仍是制造消色差、消球面差透镜的优良原料, 萤石还有透红外线、紫外线能力强等特性。如今, 萤石主要用来制造光学棱镜和透光镜, 属于高附加值产品。

有部分萤石晶体形态多样, 颜色丰富, 各具特色, 被当作宝石及观赏石, 又或是用作装饰品加工和使用。特别是萤石晶体还常与解石、闪锌矿、方铅矿等共生形成萤石晶簇, 广受矿晶收藏界人士的喜爱。

3. 萤石的矿物学特征及致色机理

3.1. 萤石矿物学特征

萤石原石多数呈现为粒状、条带块状, 少量为包壳状、球状和钟乳状, 四组八面体完全解理, 故性脆易碎, 不溶于水, 可溶于酸[5]。矿物晶体为弱玻璃至玻璃光泽, 部分可见呈油脂光泽的解理面。含较多裂隙时透明度较低, 透明至不透明。萤石硬度比小刀低, 摩氏硬度4, 相对密度为3.18, 折射率1.433~1.434, 无双折射[6]。

萤石晶体属于等轴晶系(图 1), $Oh_5-Fm\bar{3}m$ 空间群。萤石的晶体结构中, Ca^{2+} 处于立方单胞的八个顶角和六个面的中心。F⁻位于单位晶胞小立方体的中心。Ca 的配位数为8, F 的配位数为4, 因此F的配位多面体彼此共棱[7] [8]。晶体形态通常为立方体、四方双锥体或菱形十二面体。

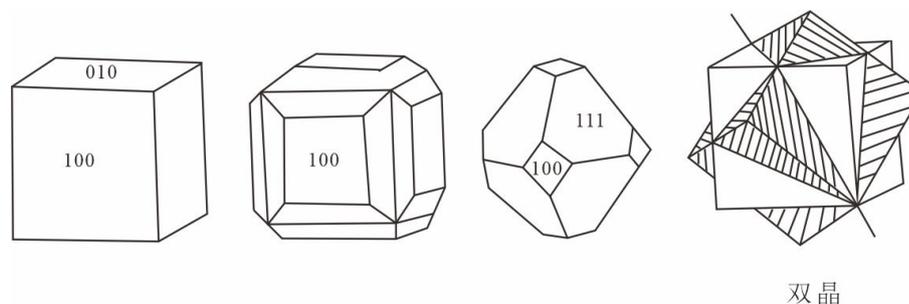


Figure 1. The crystal structure diagram of fluorite [5]
图 1. 萤石的晶体结构图[5]

$N = 1.433\sim 1.435$

萤石的化学组成又名氟石。大多数萤石中 CaF_2 含量在 99%以上, 仅含有少量 Si 或 Al、Mg 等杂质。在少数情况下, Ca 可被 Y 或 Ce 替代。其中, 含 YF_3 较高(可达 10%~20%, 甚至 50%)的萤石变种称为钇萤石; 含 CeF_3 较高者(CeF_3 可达 55%)称为铈萤石(自然界中尚未发现)。钇萤石和铈萤石的混晶被称作铈钇萤石, 或称稀土萤石(yttrocerite)。此外, 萤石中偶尔还含有 U。

萤石在结晶形态上独具特色, 其晶体通常呈现为立方体或八面体结构。不过在薄片观察中, 萤石多以不规则粒状形态存在, 填充于其他矿物间隙之间, 偶尔也能发现具有方形或菱形面的晶体。萤石的解理性质较为特殊, 沿八面体的{111}方向解理表现完全, 而钇萤石在此方向解理并不完全; 有时还能观察到(001)方向的解理。所以在薄片状态下, 常见到两组菱形解理, 或者三组交角约为 60 度的解理。

在光性特征方面, 萤石的颜色丰富多样, 涵盖无色、黄色、蓝色、紫色、绿色等。制成薄片后, 萤石通常呈现无色透明状态, 但有时也会显现出紫色、粉红色, 并且颜色分布并不均匀, 呈现出带状或斑点状。萤石具有负中-高突起, 糙面现象明显。值得注意的是, 随着 Y 元素含量的增加, 萤石的折射率会相应升高, 例如当 YF_3 含量为 10%时, 折射率 $N = 1.4425$; 当 YF_3 含量达到 13%时, 折射率 $N = 1.455$ 。

萤石具备均质性, 虽然存在依(111)面形成的穿插双晶, 但在薄片观察中难以发现这一特征。

萤石的鉴别可依据多种特征。从晶形和解理来看, 它与蛋白石有着明显差异: 在折射率和突起表现上, 萤石折射率较低, 呈现显著负突起, 借此能与石榴石、方钠石区分开来。当方英石和磷石英的特征不明显时, 易与萤石混淆, 但萤石具备良好的解理, 且折射率较小、呈负中-高突起, 由此可作辨别。冰晶石则因突起更低($N = 1.34$), 也能与萤石区分。若萤石带有颜色, 同一晶体中颜色分布不均是其重要鉴别特征。

在产状方面, 萤石主要属于气成热液矿物, 常见于矿脉或交代蚀变岩中。比如在发生云英岩化或黄玉化的花岗岩、花岗伟晶岩中, 常能发现萤石伴生。在矿脉内, 萤石常与石英、方解石、重晶石、方铅矿、闪锌矿共同出现。此外, 萤石在正长岩、碱性岩中也较为常见。在沉积岩领域, 萤石主要存在于碳酸盐岩层, 与方解石、白云石、重晶石、石膏、硬石膏等矿物共生。有时, 隐晶质萤石分布在碳酸盐岩层间, 将整个夹层染成紫色, 这类萤石被称为土状萤石; 萤石还可作为碎屑矿物或胶结物存在于砂岩之中。

萤石在工业上用途广泛, 是炼钢过程中的助熔剂, 也是生产氢氟酸的重要原料之一。而用于光学领域的萤石晶体, 主要通过人工合成获取。

3.2. 萤石的致色机理

萤石矿物颜色十分丰富, 除了无色透明的纯净萤石晶体外, 几乎汇聚了大自然所能看到的颜色, 且大部分萤石的颜色呈条带分布。通常, 晶体中因含银、钇、铈、镨、铁等微量元素而致色, 呈现绿、蓝、黄、紫、红及其混合或过渡色, 其中绿色和紫色的萤石较普遍。不仅如此, 还存在少数的变色萤石, 其具有“变色效应”。变色效应是针对宝石而言, 即有色宝石在日光下和白炽灯光下可显示不同颜色的现象。它是宝石中致色离子或色心选择性吸收和不同类型的光源共同作用的结果[9]。

关于萤石的致色, 目前有学者将原因归纳为三类: 1) 杂质元素致色, 特别是稀土元素的加入; 2) 晶体缺陷致色; 3) 沥青质加入导致的致色[10]-[12]。

杂质元素致色: REE、U、Th、Fe、Al 等元素容易以类质同象或多或少存在于萤石矿物中[13] [14]。REE 是重要的杂质元素, 其含量是影响萤石颜色的重要因素[15]。前人已有实验证明, Ca^{2+} 与 REE^{3+} 常共沉淀。所以, 萤石常被认为是 REE 的携带矿物之一[8]。萤石晶格中 REE 常以类质同象充填其中, 引起萤石结构的某些变化, 致使萤石物化性质的变化[7]。Василько 研究证明: 通常情况下, 溶液中 REE 浓度随着 PH 和温度的降低而减小, 萤石颜色从深色变为浅色或无色[12]。矿物中 REE 的分配机制, 一是受溶液中 REE 络合物稳定性的影响[16]; 二是受晶体化学因素的制约[16] [17]。

如英国威尔溪谷萤石样品的紫外线-可见吸收光谱在 425 nm、446 nm、612 nm 及 690 nm 处的谱峰与 Sm^{2+} 的特征吸收带十分吻合(422 nm, 440 nm, 611 nm, 690 nm), 可见, 该地区的萤石致色机理与稀土离子相关, 如图 2 所示[18]。

晶体缺陷致色: 萤石颜色多种多样, 其晶体缺陷产生原因也复杂多样。萤石中产生缺陷的途径主要有 4 种: 1) 放射性辐照; 2) 钠、钾元素进入晶格造成 F 空位形成的缺陷; 3) 变价杂质离子(稀土等)的氧化; 4) 压力产生的晶格损伤等[19]。

有机质致色: 有些深色的萤石其致色机理为混有演化程度较高的有机质, 以细小包裹体形式存在于萤石晶体中, 造成萤石颜色变深。通过对花垣铅锌矿进行有机碳分析、红外光谱分析、电子自旋共振波谱测量研究发现, 认为黑色萤石是由于存在演化程度较高的有机质造成, 根据其特征与实验裂解温度表明属于脆性沥青之列, 混入方式存在于萤石晶体中。电镜扫描图黑色萤石的发现有大量似定向的微小孔洞存在, 许多无定形固态物质附着于洞壁, 可能引起颜色变异的沥青物质[6] [20]。

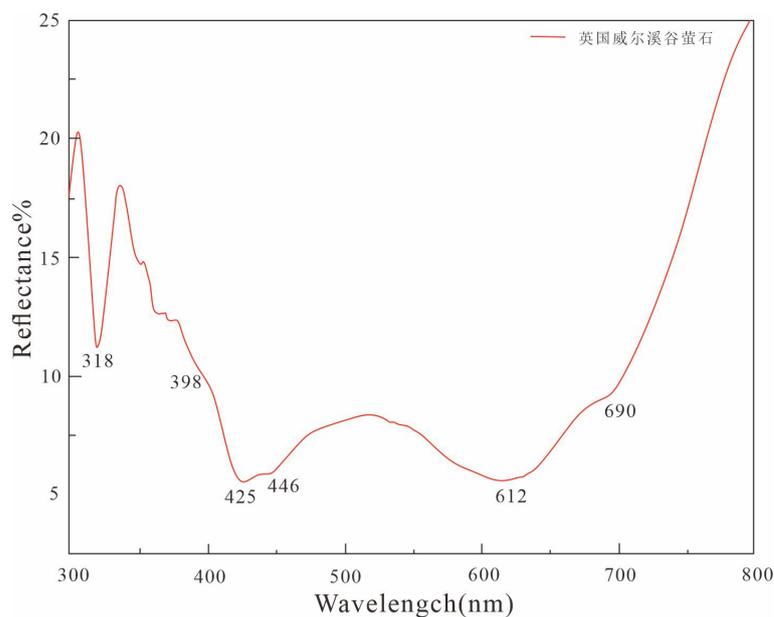


Figure 2. Ultraviolet-visible light absorption spectra of samples from Weil Creek Valley, UK [18]

图 2. 英国威尔溪谷样品的紫外线 - 可见光吸收光谱[18]

4. 萤石矿产资源分布

4.1. 全球萤石矿产资源分布

萤石矿产资源在世界分布广泛, 在 40 多个国家都可探明到萤石资源的存在, 其主要分布在墨西哥、中国、南非等国家[21]。萤石在一些国家和地区极度匮乏, 如西班牙只发现了小部分具有工业价值的萤石矿床, 欧盟、日本和韩国萤石资源十分稀缺。2011 年世界已查明的萤石资源储量约 2.4 亿吨[22]。2013 年后随着矿产勘探工作的推进, 世界已探明的萤石储量持续稳步上升(图 3)。

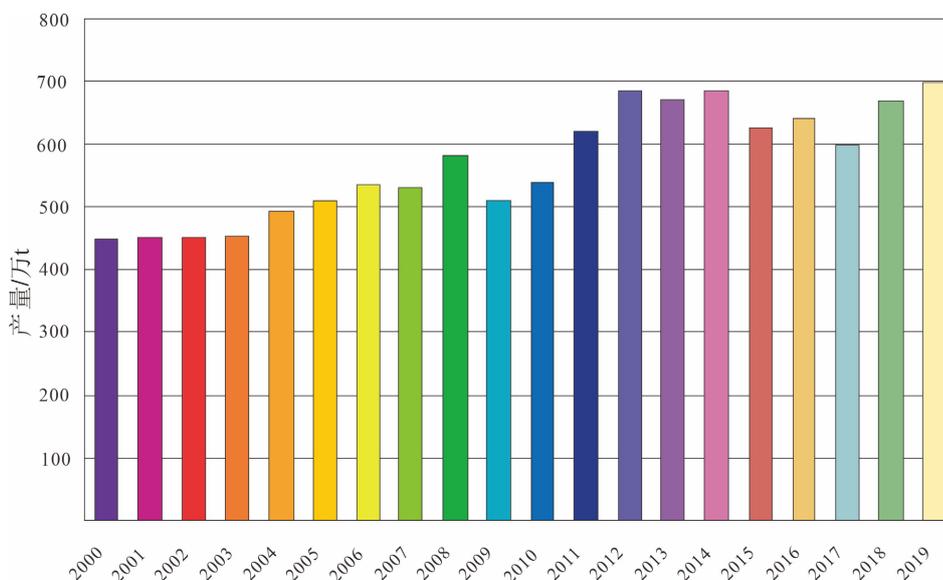


Figure 3. Global fluorite production changes from 2000 to 2019 [23]

图 3. 2000~2019 年全球萤石产量变化[23]

美国地质调查局(USGS)数据表明, 2019 年世界萤石的查明储量跨越式增长至 3.1 亿吨(表 1), 其中墨西哥萤石资源储量位列世界第一, 为 6800 万吨, 占世界萤石储量的 21.9%左右; 然后依次是中国 4200 万吨、南非 4100 万吨、蒙古 2170 万吨, 分别占世界萤石储量的 13.5%, 13.2%, 7.1% [23]。其他国家已知储量约为 13,730 万吨, 主要分布在西班牙、越南、英国、伊朗、泰国和法国等地, 约占全球储量的 41.9%, (图 4) [23]。

Table 1. Global distribution of fluorite resources
表 1. 全球萤石资源分布

国家	储量(万吨)
墨西哥	6800
中国	4200
南非	4100
蒙古	2170
其他国家	13730

全球萤石储量分布

■ 墨西哥 ■ 中国 ■ 南非 ■ 蒙古 ■ 其他国家

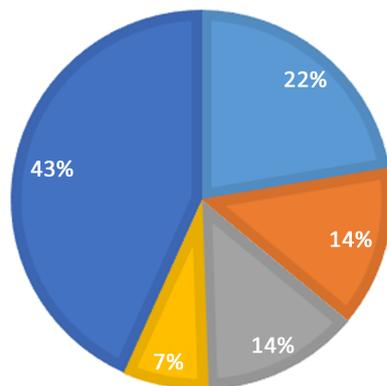


Figure 4. The proportion of global fluorite reserves [23]
图 4. 全球萤石储量占比情况[23]

4.2. 中国萤石矿产资源分布

萤石矿是中国的战略矿产资源, 截至 2018 年底, 中国萤石查明资源储量(CaF_2) 2.57 亿吨, 但储量只有 4200 万吨[24]-[26]。萤石矿床在中国分布广泛, 除上海、天津、宁夏部分省(市、区)外, 其余省(市、区)均有分布, 主要分布于浙江、内蒙古、湖南、江西、福建、河南等地区。大中型萤石矿床集中分布于东部沿海、华中和内蒙古中东部。

值得一提的是, 中国现有的萤石矿资源中, 单一型高品质萤石矿床多、储量少, 而伴(共)生型矿床数少、储量大。现有矿床中富矿少、贫矿多。在查明资源储量中, 单一萤石矿绝大部分 CaF_2 品位为 35%~40%, CaF_2 品位大于 65%的富矿(可直接作为冶金级块矿)资源量仅占单一萤石矿床总量的 20%, CaF_2 品位大于 80%的高品位富矿占总量的不到 10% [27]。

4.3. 精品萤石矿产资源分布

品质好的精品萤石在全球均有产出, 如欧洲的德国、英国、法国, 美洲的加拿大、美国、墨西哥和秘鲁, 亚洲的中国、俄罗斯、巴基斯坦和南非纳米比亚、赞比亚、和摩洛哥等国家和地区, 在矿晶收藏界颇受欢迎。



Figure 5. Comparison of mu yield and mu increase rate between control group and experimental group [28]

图 5. 彩虹条带立方体萤石, 产自德国萨克森州, 高 3 cm [28]

欧洲是萤石研究与收藏的发源地。德国和英国是最早发现萤石的国家, 随后在奥地利、瑞士、法国的阿尔卑斯山区和捷克、匈牙利、西班牙、希腊等地的矿业开发中也均发现了很多精美的萤石。英国的绿色与黄色萤石是矿晶收藏界认为最具有代表性和收藏价值。英国精品萤石产地有杜哈姆县(Durham), 其主要产出无色透明、绿色与棕色的萤石; 还有紫罗兰与黄色萤石的产地席姆布利敖(Cumbria)。威尔士地区(Walcs)是著名的“Bluc John”彩色条带状萤石的唯一产地。此外, 在英国东南角的泥盆(Devon)和科沃尔(Cornwall)地区也均有精美萤石产出。德国的精美萤石产地有萨克森州弗莱堡地区的矿石山、东南部黑森林地区的银铅锌与萤石矿区、东南部巴伐利亚中的多金属矿山。德国萤石矿床常与铅、锌和银等金属矿共生, 以蓝、绿、黄色调为主。在德国其他地方也有少量萤石发现, 如德国中宝石小镇(Idar-Oberstein)附近, 萤石常与玛瑙组合, 主要产出紫色和彩虹条带立方体萤石(图 5)[28]。法国最好的萤石主要产自阿尔卑斯最高处的勃朗峰地区, 八面体晶型, 颜色以红色、粉红色、紫红色为主, 是世界上最鲜艳、最受欢迎的精品萤石。近年来在 4000 多米高的勃朗峰北坡岩石晶洞发现了一批极其珍贵的红色萤石。这是由于全球气候变暖, 冰川后退, 一些岩石露头从融化的冰盖中显现出来了。另外, 法国中部和西班牙北部奥威多(Oviedo)及东北部贝塔(Berta Mine)矿区也产出有漂亮的紫色与蓝色萤石晶体。

在北美洲和南美洲众多的地区与国家中, 加南大、美国、墨西哥和秘鲁的萤石品质最好。特别是美国, 其萤石的色彩、晶形和矿物组合极具特色。田纳西部斯密斯县境内产出的各种紫色萤石具有最完美的立方体晶型, 有与方解石、闪锌矿和方铅矿等丰富的矿物组合[29]。伊利诺伊南部的蓝色与绿色萤石有最多变的颜色组合和最多层次的内部结构(图 6) [28]。

亚洲最重要的萤石产地为中国和俄罗斯, 同时也是世界上两个重要的精品萤石产出国。就中国的萤石晶体而言, 其丰富多彩的特点成为大家争相购买的热手货。湖南省的萤石晶体在产量和质量上都堪称

一流。湖南郴州上堡黄铁矿矿山产出的萤石晶莹剔透, 以紫色立方体为主, 与水晶、黄铁矿共生。湖南北部桃林的萤石立方体与八面体共生, 颜色以绿色、蓝绿色为主。湖南郴州临武县香花岭矿区产出的萤石世界闻名, 以绿色为主, 蓝色为辅。香花铺矿山产出的绿色萤石晶莹剔透, 为立方体晶型(图 7) [28]。



Figure 6. Colored cubic fluorite, produced in southern Illinois, USA, is 2.5 cm tall [28]

图 6. 彩色立方体萤石, 产自美国伊利诺伊南部, 高 2.5 cm [28]



Figure 7. Green cubic fluorite, produced in Xianghuapu Mine, Linwu County, Chenzhou City, Hunan Province, with a width of 12.2 cm [28]

图 7. 绿色立方体萤石, 产自湖南郴州临武县香花铺矿山, 宽 12.2 cm [28]

5. 结语与展望

萤石化学成分主要是氟化钙(化学式 CaF_2), 其中钙、氟含量分别约为 51%和 49%, 含少量的硅、铝、锰等元素。

萤石的矿物学特征: 原石多数为粒状、条带块状, 少量为包壳状、球状和钟乳状, 四组八面体完全解理。矿物晶体为玻璃光泽, 部分可见呈油脂光泽的解理面。裂隙影响晶体透明度, 导致透明度较低。萤石硬度比小刀低, 摩氏硬度 4, 相对密度为 3.18, 折射率 1.433~1.434, 无双折射。萤石形态多样, 色彩纷呈, 几乎汇聚了大自然所能看到的颜色。多种致色因素是导致其颜色丰富的原因。

萤石在全球的储量丰富, 已探明的萤石矿储量达到 3.1 亿吨, 是一种不可再生的战略非金属矿产资源。萤石是我国的优势矿种, 资源储量以 4200 万吨位列世界第二。萤石矿床在中国分布广泛, 主要分布于浙江、内蒙古、湖南、江西、福建、河南等地区。大中型萤石矿床集中分布于东部沿海、华中和内蒙古中东部。

参考文献

- [1] 张超. 试论多彩宝石——萤石[J]. 华北自然资源, 2021(1): 24-25.
- [2] 彭德祥. 幽幽萤石 烁烁闪铉[J]. 珠宝科技, 2001(3): 33-34.
- [3] 刘如春. 闲话夜明珠[J]. 国土资源, 2004(8): 59.
- [4] 白林宝, 贺巧玲. 萤石的开发利用及发展动向[J]. 内蒙古石油化工, 2008(14): 38-39.
- [5] 常丽华, 陈曼云, 金巍. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [6] 刘宁. 河南嵩县竹园沟萤石矿的宝石矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [7] 张惠芬, 曹俊臣, 谢先德. 天然萤石的喇曼光谱和发光光谱研究[J]. 矿物学报, 1996(4): 394-402.
- [8] 张冠英. 非金属矿产矿物学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1989.
- [9] 张蓓莉. 系统宝石学[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [10] Bill, H. and Calas, G. (1978) Color Centers, Associated Rare-Earth Ions and the Origin of Coloration in Natural Fluorites. *Physics and Chemistry of Minerals*, **3**, 117-131. <https://doi.org/10.1007/bf00308116>
- [11] 黄从俊, 王奖臻, 李泽琴. 扬子西南缘拉拉 10CG 矿床萤石稀土元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2015, 35(1): 95-102.
- [12] 刘文均. 花垣铅锌矿床中黑色萤石再研究[J]. 成都理工学院学报, 1999(2): 4-9.
- [13] 马鸿文. 工业矿物与岩石[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] 郑大中, 郑若锋. 萤石成矿机制的探讨[J]. 四川地质学报, 2005, 25(3): 149-155.
- [15] Zhu, Z., Wang, D., Li, Y., Ke, C., Yu, H., Chen, Z., et al. (2024) Detail Mineralogical Study and Geochronological Framework of Bayan Obo (China) Nb Mineralization Recorded by *in Situ* U-Pb Dating of Columbite. *Ore Geology Reviews*, **165**, Article ID: 105874. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105874>
- [16] Morgan, J.W. and Wandless, G.A. (1980) Rare Earth Element Distribution in Some Hydrothermal Minerals: Evidence for Crystallographic Control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **44**, 973-980. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90286-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90286-0)
- [17] 彭建堂, 胡瑞忠. 晴隆锑矿床中萤石的稀土元素特征及其指示意义[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 277-287.
- [18] 叶小蒙, 白峰. 英国威尔溪谷萤石的致色及发光机理研究[J]. 中国宝玉石, 2021(3): 7-12.
- [19] 李新安, 刘铁庚, 赵云龙. 白云鄂博萤石染色机制研究[J]. 矿物学报, 1985(2): 164-168, 196.
- [20] 郑惠, 李葆华, 罗英, 等. 萤石颜色研究现状[J]. 河南科技, 2015(12): 105-107.
- [21] Harlan, C.J., Xu, Z., Walker, C.M., Michel, K.A., Reed, G.D. and Bankson, J.A. (2021) The Effect of Transmit B₁ Inhomogeneity on Hyperpolarized [1-¹³C]-Pyruvate Metabolic MR Imaging Biomarkers. *Medical Physics*, **48**, 4900-4908. <https://doi.org/10.1002/mp.15107>
- [22] 张紫桐. 萤石的研究现状及其地质学意义[J]. 地球科学前沿(汉斯), 2021, 11(4): 473-479.
- [23] 商朋强, 焦森, 屈云燕, 等. 世界萤石资源供需形势分析及对策建议[J]. 国土资源情报, 2020(10): 104-109.
- [24] 李敬, 高永璋, 张浩. 中国萤石资源现状及可持续发展对策[J]. 中国矿业, 2017, 26(10): 7-14.
- [25] 邢志芬, 申佳奇, 许博, 等. 西藏错那洞萤石的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2025, 27(1): 21-29.
- [26] 张西文, 金中国, 郑明泓, 等. 黔西南白层萤石矿床成矿流体演化特征及其成因指示意义[J]. 矿物学报, 2025, 45(3): 500-511.
- [27] 中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告 2017 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [28] 刘光华, 杰夫·斯科费尔, 张亚男. 国际萤石晶体产地及特征[C]//国家珠宝玉石质量监督检验中心, 中国珠宝玉石首饰行业协会. 中国国际珠宝首饰学术交流会论文集(2017). 2017: 152-155.
- [29] Carlson, E.H. (1991) Minerals of Ohio Divison of Geology Survey Bulletin. Ohio Department of Natural Resources.