

电气石的研究现状及其在地质学意义

刘 欢

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年3月24日; 发布日期: 2022年3月31日

摘 要

电气石是电气石族矿物的总称, 以含B为特征的一种硅酸盐矿物。电气石凭借绚丽多彩的颜色在宝石市场上占有重要的地位。从19世纪末期开始, 电气石电学性质的发现让学者展开了研究新热潮, 而电气石具有独特的矿物学特征、地球化学性质等引来地质学家的关注, 我国作为少有的电气石产出大国, 对不同地区电气石的矿床成因研究已取得较大的进展。本文在前人研究的基础上初步概述了电气石的结构特征、物理性质、电学性质、分类、颜色成因等, 通过矿床实例介绍了电气石的三种成因类型, 最后结合全文探讨电气石在不同领域的应用研究, 重点突出电气石在地质学领域中的应用及存在的地质意义。

关键词

电气石, 结构性质, 地质学意义

Research Status of Tourmaline and Its Geological Significance

Huan Liu

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 28th, 2022; accepted: Mar. 24th, 2022; published: Mar. 31st, 2022

Abstract

Tourmaline is the general name of tourmaline minerals, a silicate mineral characterized by element B. It occupies an important position in the gem market with its brilliant and colorful colors. Beginning in the late 19th century, the discovery of tourmaline's electrical properties led to a new wave of research. Tourmaline has unique mineralogical characteristics and geochemical properties, attracting geologists' attention. As a rare tourmaline producing country, great progress has been made in the genesis of tourmaline deposits in different areas in China. In this paper, the structural characteristics, physical properties, electrical properties, classification and color origin

of tourmaline are summarized on the basis of previous studies. Then this paper introduces three genetic types of tourmaline through examples of ore deposits, and finally discusses the application and research of tourmaline in different fields, focusing on the application and geological significance of tourmaline in the field of geology.

Keywords

Tourmaline, Structure Properties, Geological Significance

Copyright © 2022 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/>



1. 引言

电气石是一种广泛分布于花岗岩矿床、与花岗岩有关的岩浆热液型矿床的矿物，在变质作用地质成因中也有发现[1]。电气石最早发现于斯里兰卡，人们发现在受热条件下会使其产生电荷即热释电效应，由此称为电气石[2]；18世纪初期荷兰人首次发现电气石晶体可以吸附周围灰尘和草屑，故又得名“吸灰石”[3][4]。电气石色彩丰富绚丽、物理性质稳定，也被列入宝石品类中，称为碧玺。优质的电气石(碧玺)主要产于巴西东南部地区、美国、俄罗斯等地，而我国优质电气石代表产地包括云南、内蒙古、新疆等地区[5][6]。电气石的用途十分广泛，不仅可以因色泽丰富多彩而成为宝石材料；因其特殊的晶体结构及电场效应导致电气石具热电性、压电性，从而产生红外辐射、释放负离子等特性，使其在环境、医疗保健、轻工业、材料、农业等领域均产生广泛应用[6][7]。

前人针对电气石电学性质的研究及在不同领域的应用已经展开了大量研究，然而电气石在地质领域的应用也不能被忽视，因此本文通过对国内外文献阅读及分析，系统总结了电气石的基本特征，通过实例将电气石的成因分为三种类型，对电气石在不同领域的应用进行总结概述，重点讨论了电气石的物理性质、化学成分及不同颜色特征在成岩成矿、勘探工作中的作用，为电气石的合理开发利用及其在地质中的指示意义提供理论依据和见解。

2. 电气石的结构及性质

2.1. 电气石的结构

电气石具三方晶系特征，晶体结构如图1所示，其中6个[SiO₄]共角顶形成复三方环，硼(B)与周围3个氧组平面三角形；镁(Mg)配位数是6(其中2个是OH⁻)，组成八面体，与[BO₃]共氧相连；在硅氧四面体的复三方环上方的空隙中有配位数为9的一价阳离子钠分布；环间以[AlO₆(OH)]八面体相连接[7]。

2.2. 电气石的性质

电气石的晶体形态以柱状产出为主，集合体常呈放射状、棒状、致密块状或隐晶质块状等，柱面常见纵纹是电气石的特征之一(图2)；玻璃光泽，透明至不透明，摩氏硬度可达7~7.5，相对密度3.03~3.25，相对密度会随着Fe、Mn等元素的增加而增加。垂直C轴的方向常常会产生色带[7][8]。

此外，电气石还具有电学性质，包括电气石的热释电性、压电性、天然电级性、红外辐射特性等性质。热释电性和压电性是指将外力(加温或加压)施加于电气石晶体的某一特定方向上，在晶体对称轴的两

端会产生等量的异号电荷[7] [9]; 研究指出在目前存在的矿物晶体中, 电气石是唯一带有永久电极的矿物, 被称为“天然电池”, 这是电气石的天然电极性[2]; 红外辐射特性是电气石在具热释电性和压电性前提下, 温度和压力的变化引起电气石内部离子发生电子跃迁, 通过红外辐射的形式释放出多余的能量[7]。这些性质导致电气石在不同的领域中具有广泛的应用。

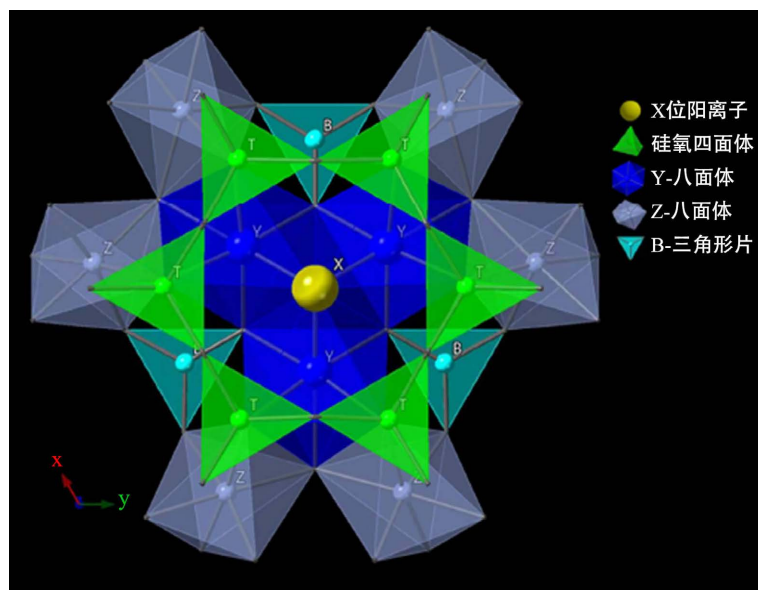
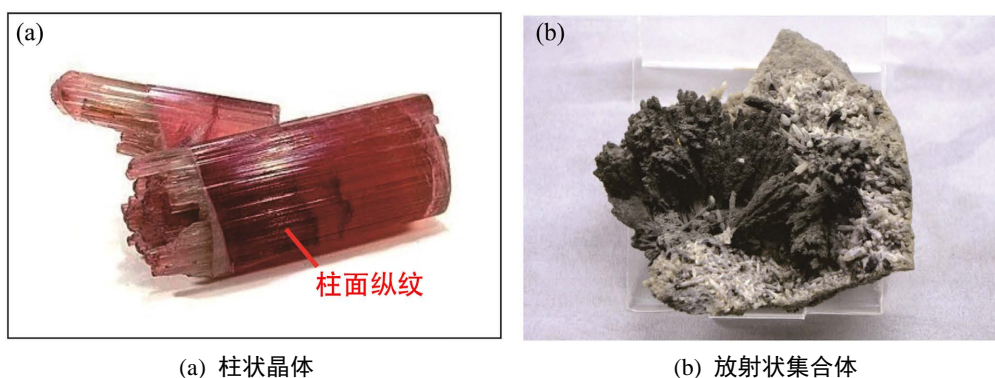


Figure 1. Image of tourmaline crystal structure (according to literature [1])

图 1. 电气石的晶体结构图(据文献[1])



(a) 柱状晶体

(b) 放射状集合体

Figure 2. Crystal morphology of tourmaline

图 2. 电气石的晶体形态

3. 电气石的分类

电气石是一种极为复杂的含 B 的环状硅酸盐矿物, 其理想晶体化学式可表示为 $\text{NaR}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3(\text{OH}, \text{F})_4$, 其中 Na 会被离子半径大的 K^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子取代, R 充填半径较小的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Li^+ 等离子[2] [10]; 电气石具有复杂多变的类质同象, 依据成分的差异会形成铁镁锂电气石、钙镁电气石、锰电气石等; 其中铁镁锂电气石分为镁电气石、铁电气石、锂电气石三个亚种, 铁电气石分别与镁电气石、锂电气石之间可形成完全类质同象系列, 锂电气石和镁电气石形成不完全类质同象[11]。具体划分及化学成分见表 1:

Table 1. Division of tourmaline**表 1.** 电气石的分类

| 分类 | 化学成分 |
|------------|--|
| 铁电气石(黑电气石) | $\text{NaFe}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ |
| 镁电气石 | $\text{NaMg}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ |
| 锂电气石 | $\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH},\text{F})_4$ |
| 钙镁电气石 | $\text{CaMg}_4\text{Al}_5[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ |
| 锰电气石 | $\text{NaMn}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ |

4. 颜色成因

电气石的颜色种类十分丰富，几乎包含了整个可见光中呈现出的颜色，包含红色、橙色、黄色、绿色、蓝色、紫色及它们之间形成的混合色。电气石可在同一晶体上出现多种颜色，例如西瓜碧玺(图 3)：内部颜色呈玫瑰红色、外部呈绿色或蓝绿色。电气石的颜色成因主要以过渡金属元素的致色离子有关，在电气石中这些致色离子以类质同象的形式占据晶体结构中的某个晶格位置，使原本的结构发生变化，从而导致颜色的形成。例如粉色电气石的是 Mn^{2+} 进入 R 位而引起的，绿色电气石与 Fe^{3+} 有关，黑色电气石主要是 Fe^{2+} 所引起的[5] [12]。不同颜色的电气石具有不同标型性特征，在一定程度上可以反应矿物的成因特征。



Figure 3. Color characteristics of tourmaline (Watermelon tourmaline)

图 3. 电气石的颜色特征(西瓜碧玺)

5. 电气石的成因分类

电气石具十分复杂的成因环境，通过情况下作为副矿物形成于不同的矿床中。根据成因类型，大致将电气石分为三种成因类型：岩浆成因、热液成因、变质成因。岩浆作用形成的电气石主要分布于云南、河北、新疆、福建、湖南、江西等地；热液作用成因形成的电气石分布在广东、山西、甘肃等地；变质作用成因形成的电气石分布在辽宁、南极等地。

5.1. 岩浆成因

岩浆作用形成的电气石可划分为花岗岩型、伟晶岩型、火山-次火山热液型等三个亚类。花岗岩型通常是指在底侵作用下，幔源岩浆添加到地壳中使沉积物质发生熔融形成花岗质岩浆，晚期冷却结晶形成电气石。湘南上堡的电气石便是花岗岩型形成的矿床，矿体的主要围岩为铝质花岗岩，并且伴有大理岩化、矽卡岩化，主要矿物为原生电气石[13]。伟晶岩型矿床主要分布在我国华南、西部、华北等地区，包括福建南平、河北曲阳县等地区[14] [15]，这里以河北曲阳县发现的电气石为例进行简要介绍，该地区的电气石是在高温下岩浆熔体和围岩发生同化混染作用后的结晶产物，电气石形态大多以黑色自形镁电气石为主，柱面可见细密的裂纹，伴有石英、云母等矿物，电气石形成的物质来源于围岩中 Mg、Fe 等物质成分；火山-次火山热液型成因形成的矿床与不同时期火山活动有关，内蒙古突泉县电气石形成于燕山中期火山活动，矿体主要赋存在中酸性凝灰岩或闪长玢岩中，矿体严格受北西向断裂控制，围岩蚀变强烈，包括电气石化、绿泥石化、方解石化、绢云母化等，矿物呈粒状变晶结构、柱状结构等[16]。

5.2. 热液成因

岩浆活动产生含矿热液的岩体发生侵入作用后，在外接触带附近的断裂中富集而成矿。我国热液型成因电气石矿的侵入岩体多为燕山期岩体，偶见喜山期[17]。粤东鸿沟山矿区的电气石以伴生矿物的形式产出，是高水/岩比热液作用的产物。电气石产于石英砂岩、杂砂岩、粉砂岩、花岗闪长斑岩中，以自形-半自形柱状、他形粒状等形态产出，还可见呈放射状集合体形态，局部电气石会与石英组成电英岩[18]。

5.3. 变质成因

变质成因是指在不同岩相中发生变质作用后形成的电气石，电气石在变粒岩相变质阶段、角闪岩相变质阶段、麻粒岩相变质阶段均有产出。位于南极中山站区的电气石属典型的变质作用形成的产物，研究表明该地区不同类型的电气石形成于不同阶段的变质作用中，在角闪岩相变质时期形成棕绿色电气石，伴生矿物包括黑云母、夕线石等；随着温度及熔体组分的提升，在麻粒岩相变质阶段形成蓝绿色的电气石，此次阶段出现了石英矿物；在最终温度降低的变质阶段，在角闪岩相变质作用中形成绿色电气石[19]。

6. 电气石的应用

电气石因具有独特的电学性质，这些性质在环保领域、健康产业、材料领域、电子领域、种植业等诸多领域中被广泛的应用。环保领域主要体现在水污染和空气污染的治理上，因电气石电极性发挥作用，水中加入电气石可改变溶液的 PH 值，在酸雨、土壤酸化中可起到作用[20]；利用电气石释放负离子与空气带正电荷的有害漂浮物进行电荷中和，达到净化空气的效果。在日常生活中电子产品产生的电磁波会对人体产生影响，电气石负离子的释放中和阳离子，阻断电磁波的传播；对食品进行杀菌、保鲜等也有电气石的功劳；将电气石制作成微粉加入到纺织衣物中，可活化人体细胞膜中的电位，改善人体的精神状态[3]；电气石的硼元素具有使农作物健硕成长的作用；电气石的摩氏硬度可达 7~7.5，硬度较高，可以制作成磨抛石，同时吸附性作用的影响，在抛磨过程中可吸附灰尘，减少灰尘对人体呼吸道的影[7]。

7. 电气石的地质学意义

电气石作为我国主要矿产资源之一，在地质学领域中占有举足轻重的作用。地质的形成过程具有复杂多变性，许多学者会借助某些矿物或矿物组合的特征去追溯地质的形成成因。矿床成因角度表明电气石在花岗岩、伟晶岩、火山岩或热液成因矿床中均有广泛分布，物理性质角度指示电气石具有硬度大、耐受性强等特征，容易形成残留矿物，其次，电气石垂直 C 轴方向的色带可以追踪不同时期电气石形成

时原岩演化过程的变化,因此电气石可以保存原岩的信息,成为成岩成矿过程中一种灵敏的示踪剂[21]。

电气石的化学成分在地质中也有贡献,据前人研究在岩浆热液作用下形成的电气石,不同围岩中形成的电气石成分有明显差异,若围岩属于基性火山岩时,形成的往往是富 Mg 或富 Fe 的电气石,若围岩属中性岩,电气石往往富 Na 的镁电气石,因此根据电气石的主微量特征可以反推其赋存母岩的化学组成[22]。此外,电气石化学成分在勘探工作中也具有指导意义,大量富镁电气石的存在可以指示金属矿床的存在,铁电气石可以指示斑岩型矿床的存在[23]。

不同颜色的电气石可以反映出不同岩石的物理化学条件,例如高温环境下形成的黑色电气石反应花岗岩伟晶岩矿床早期的特征,较低温度形成的绿色电气石反应花岗岩伟晶岩晚期的特性[5]。

8. 结论

电气石因色泽鲜艳,清澈透明已经成为宝石领域中不可或缺的原料之一,随着经济的不断发展,环保意识、健康意识的不断增强,电气石特有的电学性质在不同领域中发挥着重大的作用,有着广阔的前景。在地质领域中,电气石也扮演着十分重要角色。首先受电气石自身性质稳定性的影响,当在经历风化、变质等多种复杂的地质作用后,可以有效地记录及保留成岩成矿的特征,为成岩成矿的示踪研究提供证据支撑,再者,电气石不同的化学成分对赋存母岩的特征及不同类型矿床的勘查均有指示意义;最后不同颜色电气石的标型性特征对矿体的成因也作出了贡献。然而我国作为世界少有的电气石储量丰富的国家,需要对电气石进行合理的开发利用,因此对电气石资源要具有质量性的整合规划,促进我国电气石产业的健康发展。

参考文献

- [1] 吴李明. 彩色电气石颜色成因机制研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- [2] 孙双. 电气石矿物材料的加工及其应用基础研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [3] 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.
- [4] 黄云龙, 郑水林, 李杨, 等. 电气石的加工应用现状及发展前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2003(4): 18-21.
- [5] 刘宏. 电气石颜色标型特征[J]. 新技术新工艺, 2014(4): 75-78.
- [6] 王晓燕, 冀志江, 王静, 等. 我国电气石资源分布及应用进展[C]//全国地震灾区固体废弃物资源化与节能抗震房屋建设研讨会论文集, 重庆: 中国硅酸盐学会, 2009: 509-514.
- [7] 孙南翔, 徐志强. 电气石的研究现状和发展趋势[C]//第十四届全国非金属矿加工利用技术交流会论文集, 恩施: 中国硅酸盐学会, 中国非金属矿工业协会, 2013: 9-12.
- [8] 李胜荣, 许虹, 申俊峰. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [9] 吴瑞华, 汤云晖, 张晓晖. 电气石的电场效应及其在环境领域中的应用前景[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 474-476.
- [10] 张丽佳. 电气石的矿物学研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 中山大学, 2004.
- [11] 陈武, 钱汉东. 电气石族宝石矿物(碧玺)的成分与其成因产状的关系[J]. 宝石和宝石学杂志, 2001, 3(4): 11-14.
- [12] 洪汉烈, 李晶, 杜登文, 等. 彩色电气石致色离子的化学状态研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2011, 13(2): 6-12.
- [13] 郭海锋, 夏小平, 韦刚健, 等. 湘南上堡花岗岩中电气石 LA-MC-ICPMS 原位微区硼同位素分析及地质意义[J]. 地球化学, 2014, 43(1): 11-19.
- [14] 杨岳清, 王勇, 吕庆田, 等. 福建南平花岗岩伟晶岩中的电气石研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(3): 235-242.
- [15] 侯江龙, 王登红, 王成辉, 等. 河北曲阳县中佐伟晶岩脉中电气石的类型和成岩成矿环境研究[J]. 岩矿测试, 2017, 36(5): 529-537.
- [16] 李长城, 李可. 内蒙古突泉县电气石矿体特征及成因分析[J]. 现代矿业, 2019, 35(7): 73-79.
- [17] 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.

- [18] 高凤颖. 粤东鸿沟山金矿区地质特征, 矿床成因及电气石对金富集成矿的贡献[J]. 矿产与地质, 2018, 32(2): 257-262.
- [19] 任留东, 刘小汉. 南极中山站区电气石及其与变质作用的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(2): 169-174.
- [20] 冀志江, 金宗哲, 梁金生, 等. 电气石对水体 pH 值的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 515-519.
- [21] 黄雪飞, 张宝林, 李晓利, 等. 电气石研究进展及其找矿意义[J]. 黄金科学技术, 2012, 20(3): 57-65.
- [22] 郭佳, 严海波, 凌明星, 等. 广西大厂地区黑云母花岗岩中电气石的化学组成及其对岩浆热液演化的指示[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 171-183.
- [23] 蒋少涌, 于际民, 倪培, 等. 电气石——成岩成矿作用的灵敏示踪剂[J]. 地质论评, 2000, 46(6): 594-604.