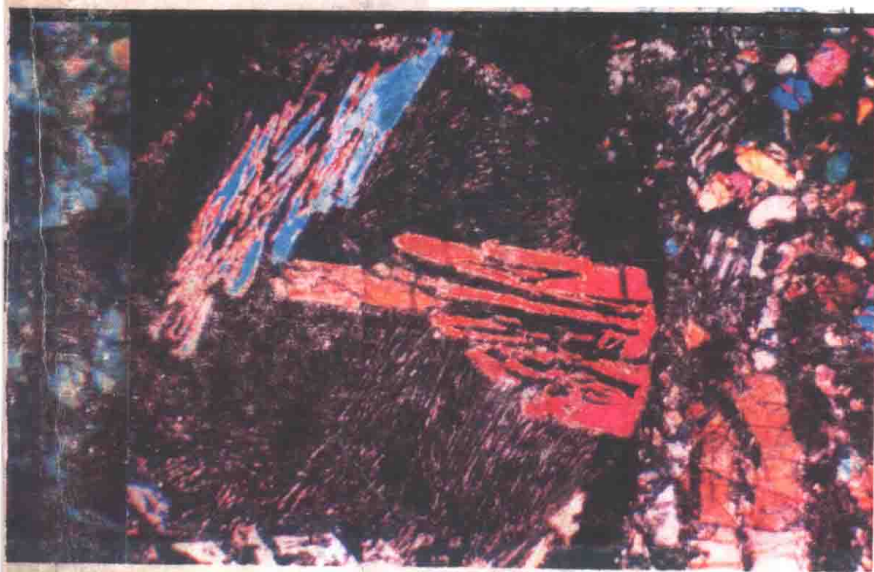


王奎仁 编著

地球与宇宙 成因矿物学



安徽教育出版社



王奎仁 编著

地球与宇宙 成因矿物学



责任编辑: 王宏金

封面设计: 王国亮

地球与宇宙成因矿物学

安徽教育出版社出版

(合肥市金寨路283号)

安徽省新华书店发行 合肥杏花印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张17.25 插页6 字数460,000

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数: 3,000

ISBN 7-5336-0424-5/G·924

定价: 7.90元

内容提要

地球与宇宙成因矿物学是矿物学的一个重要的新兴分支学科。本书总结了国内外专家及作者20年来的科研成果。全书共分十三章。第一章，成因矿物学研究方法及当前任务。第二章至第八章，标型矿物及矿物标型特征；矿物的形态、微形貌、物性、化学成分、晶体结构、稳定同位素、波谱学等标型特征。第九章至第十二章，矿物包裹体在成因矿物学中的应用；常用的地质温度计和压力计简介；矿物的共生分析以及成因矿物学在构造地质学中的应用。第十三章，宇宙成因矿物知识，即地球起源、天体起源与演化问题的矿物学成因信息。本书还表述了现代科学发展中多学科——物理化学、宇宙化学、地球化学、岩石学、构造地质学与矿物学相互渗透和结合的特点。

序

在地学领域中，矿物学具有悠久的历史，因而它的重要分支之一的成因矿物学也是源远流长。但成因矿物学成为独树一帜、别具风格、内容丰富的学问，不过是近20余年的事。

成因矿物学的兴起和找矿的需要是密切相关的，但近年来它的突飞猛进的发展，除了与找矿有关外，也与大至天体演化、岩石圈演化，小到某些矿物、岩石、矿床或其它地质体的发生、发展联系在一起；反过来，上述实践和理论的提高及取得的丰硕成果，又进一步刺激了成因矿物学的进展。另外，晶体结构、固体物理、矿物物理、地球化学等学科理论、方法的引进，使成因矿物学有了新的生命力。

可以毫不夸张地说，目前的成因矿物学已是一门内容十分丰富的学科，它已有着特定的范围、体系、理论、特点及方法，它和矿物学的其它分支既有区别，又有不可分割的联系。在国内外少数大学中，已开始讲授成因矿物学，但无论是国内还是国外，成因矿物学的教科书和专著仍寥若晨星。

因此，此时此刻，王奎仁同志编著的《地球与宇宙成因矿物学》的问世，对本学科的科

研和教学是十分有益的。另外，本书还具有若干特点：

1. 将陨石、宇宙尘等天体矿物也包括在成因矿物学的研究范围内，这为研究太阳系、地球和地幔的组成及演化，提供了成因矿物学的线索和信息。

2. 将地球化学领域中的一些重要新进展、新成果，如同位素、包裹体等有机地与标型矿物及矿物标型特征融合在一起，丰富了成因矿物学内容。

3. 书中引用了作者多年来从事矿物成因、晶体结构、矿物物理等方面的研究成果与心得。由于作者长期从事这方面的科研和教学工作，从而使得本书内容丰富，融会贯通，既具有大学教科书的完整体系，又带有专著性质。

为此，我深信，本书对于推动我国成因矿物学的教学和科研工作具有重要意义。

涂光灿

1988年4月

目 录

第一章 引论	1
§ 1.1. 成因矿物学研究方法	1
§ 1.2. 成因矿物学发展简史	8
§ 1.3. 成因矿物学研究现状	12
第二章 标型矿物和矿物标型特征	14
§ 2.1. 标型矿物和矿物标型特征的概念	14
§ 2.2. 标型矿物实例及其地质意义	15
§ 2.3. 矿物标型特征的地质意义	20
第三章 矿物形态及微形貌标型特征	21
§ 3.1. 矿物形态标型特征的概念	21
§ 3.2. 矿物形态标型特征应用实例	24
§ 3.3. 矿物微形貌研究概述	57
§ 3.4. 矿物晶体表面微形貌图的一般特征	58
§ 3.5. 矿物微形貌一般标型特征	60
§ 3.6. 黄铁矿及石英微型貌标型特征	61
第四章 矿物的物理性质标型特征	67
§ 4.1. 概述	67
§ 4.2. 几种常用矿物的物理性质标型特征	75
第五章 矿物的化学成分标型特征	100
§ 5.1. 黄铁矿的化学成分标型特征	100
§ 5.2. 磁铁矿的化学成分标型特征	108
§ 5.3. 金矿物的化学成分标型特征	129

§ 5.4. 铬尖晶石类矿物化学成分标型特征·····	133
§ 5.5. 钛铁矿的化学成分标型特征·····	141
§ 5.6. 石榴石的化学成分标型特征·····	145
§ 5.7. 橄榄石的化学成分标型特征·····	173
§ 5.8. 辉石的化学成分标型特征·····	177
§ 5.9. 角闪石的化学成分标型特征·····	186
§ 5.10. 云母的化学成分标型特征·····	196
§ 5.11. 绿泥石的化学成分标型特征·····	218
§ 5.12. 蛭石的化学成分标型特征·····	224
§ 5.13. 磷灰石的化学成分标型特征·····	227
第六章 矿物的晶体结构标型特征·····	241
§ 6.1. 历史的回顾·····	241
§ 6.2. 矿物的晶体结构标型特征研究方法简介·····	242
§ 6.3. 矿物的同质多象变体标型特征·····	247
§ 6.4. 矿物多型及多型标型特征·····	259
§ 6.5. 矿物的有序-无序结构及其标型特征·····	277
§ 6.6. 矿物的晶胞参数或特征的面网间距的标 型特征·····	300
§ 6.7. 晶体化学标型特征·····	318
§ 6.8. 微结构标型特征·····	327
第七章 稳定同位素标型特征·····	334
§ 7.1. 概述·····	334
§ 7.2. 硫同位素标型特征·····	334
§ 7.3. 碳同位素标型特征·····	342
§ 7.4. 氢、氧同位素标型特征·····	348

§ 7.5. 用碳、氢、氧同位素测定洞穴中石笋古温度	362
第八章 矿物波谱学标型特征	365
§ 8.1. 波谱学概述	365
§ 8.2. 几种常见矿物波谱学标型特征	368
第九章 矿物包裹体研究在成因矿物学中的应用	397
§ 9.1. 概述	397
§ 9.2. 矿物包裹体的地质意义	399
§ 9.3. 矿物包裹体研究方法	402
§ 9.4. 矿物包裹体应用实例	415
第十章 矿物地质温度计和压力计	420
§ 10.1. 概述	420
§ 10.2. 矿物成分地质温度计	421
§ 10.3. 矿物晶体结构地质温度计	441
§ 10.4. 稳定同位素地质温、压计	441
第十一章 矿物共生分析	449
§ 11.1. 概述	449
§ 11.2. 矿物共生分析的基本理论	449
§ 11.3. 矿物共生分析的基本方法	452
§ 11.4. 矿物共生关系的图解表示	453
§ 11.5. 矿物共生分析举例	454
第十二章 成因矿物学在构造地质学中的应用	463
§ 12.1. 概述	463
§ 12.2. 不同力学性质断裂带应力矿物的应变特	

征	464
§ 12.3. 古应力值的估算	466
§ 12.4. 利用矿物机械双晶度量剪应力大小	472
§ 12.5. 利用方解石的 $e(0112)$ 滑动双晶纹的空间指数作为变形程度的标型特征	475
§ 12.6. 糜棱岩的超微构造标型特征	476
§ 12.7. 糜棱岩的化学成分及物质组分标型特征	480
第十三章 宇宙成因矿物学	488
§ 13.1. 宇宙成因矿物学研究意义	488
§ 13.2. 陨石分类及球粒陨石的化学-岩石分类特征	490
§ 13.3. 陨石矿物表及主要陨石矿物特征	501
§ 13.4. 陨石矿物的球粒结构及其成因	511
§ 13.5. 陨石的形成与演化过程	514
§ 13.6. 月岩矿物表及主要矿物特征	517
§ 13.7. 宇宙尘特征	521
主要参考文献	526
后 记	544

第一章 引 论

§ 1.1 成因矿物学研究方法

成因矿物学是研究矿物成因的一门学科。它的内容包括：研究地壳及地幔中矿物及其共生组合的形成和演化过程、具有一定专属性的矿物及其共生组合在时间上和空间上的分布规律、古气候和古温度的变化规律、太阳星云中矿物凝聚及演化过程。成因矿物学通过矿物形态、微形貌、物性、成分、结构、同位素、包裹体、波谱学参数等特点来研究不同物理化学条件下形成的矿物、岩石、矿床、构造、古气候等成因信息，从而解决矿物的寄主岩体的岩石成因和变质程度、矿床成因、构造成因、宇宙体成因、古气候及古温度的变化等问题。

研究成因矿物学目的是为人们寻找矿产资源指出方向，为国家急需的矿物原料提出人工合成的理论依据和有效途径；为深入开展地幔研究提供基础资料和可靠的信息；为开拓古气候及古温度变化研究新领地；为深入研究地球演化、天体演化提供原始信息和理论依据。

随着科学技术的不断发展，成因矿物学的研究内容不断地充实，相应地它的研究方法也不断地完善。现将其研究方法归纳为如下几点：

1. 经典矿物学研究法

用双目镜研究矿物的形态，用双圈反射测角仪测量晶面夹角

而绘出晶体形态图。这种测角的方法对于研究非理想晶体形态更为重要，因为非理想晶形的晶面发育不等，在双目镜下有时很难辨别，但经过测角后，可以完整地恢复其晶体形态图。这种晶体形态研究对于矿物形态标型特征有一定意义。例如：锡石、锆石、磷灰石、黄铁矿、刚玉、金绿宝石、黝铜矿、闪锌矿、辰砂、方解石、橄榄石、石榴石、绿柱石、石英、长石、自然硫、磁铁矿、自然金等晶体形态都能反映出它们的形成条件（详见第三章）。此外，如矿物光性的变化、折射率、反射率、显微硬度测定等，也都是研究矿物物理性质标型特征的常用方法（详见第四章）。

2. X射线研究法

主要有X射线粉末法、单晶魏森堡（Weissenberg）法、四圆衍射仪法。它们主要用于研究矿物的点阵参数精确测定；有序无序现象、多型及同质多象变体的确定；键长及键角的变化研究等。X射线研究法不仅是近代矿物学研究的主要手段，而且是成因矿物学中研究结构标型特征最重要的方法。在此必须强调指出，这种X射线研究方法在成因矿物学研究中是最富生命力的，将来应给予足够的重视和发展。例如：长石有序度及结构状态的测定是研究长石形成条件的最好方法。石墨的有序结构可以确定沉积岩后生和变质作用的发育程度。在变质作用范围内，沉积岩的有机质发生变化，在后生阶段它转变为石墨。石墨的初始阶段，三个方向都是无序结构，随着变质作用加强，逐渐过渡为有序，到角闪岩相则变为完全有序石墨。某些矿物的晶胞参数或特征面网间距能直接反映其成因关系，如毒砂、磁黄铁矿、堇青石、多硅白云母、橄榄石、锆石、磁铁矿、石榴石、铬尖晶石等（见第六章）。某些矿物键长、键角的变化测定，是目前用来研究矿物成因的一种有效方法。某些矿物多型的研究能直接指示成因关系，应予推广和发展。只有不断地探索和研究，才能总结出规律性。例如：辉钼矿在伟晶岩中和赋存于石英矿床中是一种 $2H$ 多型，而

在铜钼矿床中则是3R多型或为2H+3R的混合型。又如钾云母的各种多型也同样地反映它们各自的生成环境，钾云母在花岗岩中为1M和3T型，在喷出岩中为1M型；在热液矿床中为1M₄、1M和2M₁型；在沉积岩中为1M₄和1M型；在变质岩中为1M、3T和2M₁型；而3T型多硅白云母可作为低温高压变质带的标型特征。

3. 化学成分研究法

主要是指矿物的主成分、微量元素、稀土元素分析等。通常采用容量法、重量法、比色法、电化学法、中子活化、X光、荧光、等离子光谱、火焰及无火焰原子吸收光谱、分光光度等。此外，对于微量矿物的成分可采用电子探针分析及离子探针分析，显然，在矿物主成分分析方面，电子探针与离子探针分析将起着越来越重要的作用。化学成分分析法是用于研究成因矿物学中成分标型特征的，而成分标型特征又是一切标型特征的基础。因此，掌握好矿物化学成分分析和如何对分析的数据进行讨论是非常必要的。对不同的矿物化学成分，分别进行成因三角图解或直角图解，以便确定其成因类型或形成时温度压力的状况；或进行含铁系数($\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn} + \text{Mg})$)的计算；或进行氧化系数($\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$)确定；或进行某些有意义的比值的讨论，如对磁铁矿可进行Ni/Co、Ti/V、 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 讨论，对黄铁矿可进行Co/Ni、S/Sc讨论，对锆石可进行 $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 讨论；对铬铁矿可进行 MgO/FeO 讨论， $\text{MgO}/\text{FeO} > 2$ 为岩浆矿床， $\text{MgO}/\text{FeO} = 1 \sim 1.5$ 为交代型铬铁矿。有人提出内生矿床中 $\text{Co}/\text{Ni} > 1$ ，接触变质带中尖晶石 $\Sigma\text{Fe}/(\Sigma\text{Fe} + \text{Mg})$ 随产出部位不同而有变化，在内矽卡岩带为40~50%，外矽卡岩内带为20~30%，外矽卡岩外带为10~20%，大理岩中为0~12%，锡石中 $\text{In}/(\text{Nb} + \text{Ta})$ 、方铅矿中 Sb/Bi 、黄玉中 Ga/Ge 、硫化物中 Au/Ag 的比值与成矿深度有一定的依从关系；此外也有人利用 Hf/Zr 、 Ta/Nb 、 $\Sigma\text{Y}/\Sigma\text{Ce}$ 比值确定矿物的酸碱度，利用

$(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})/\text{Fe}^{2+}$ 、 $(\text{Ti}^{4+} + \text{Ti}^{2+})/\text{Ti}^{2+}$ 、 $(\text{Mn}^{3+} + \text{Mn}^{2+})/\text{Mn}^{2+}$ 可以推测Eh高低，明矾石中 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(C)可以反映原岩特点，安山岩中明矾石(C)=0.7，英安岩中明矾石(C)=2.5，流纹岩中明矾石(C)=8；对于某些矿物稀土元素，分析数据一方面可以进行 $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Sm}^{2+}/\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{2+}/\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 的比值讨论，另一方面可以作出球粒陨石标准化稀土分布模式，以便分析对比。

4. 稳定同位素研究法

稳定同位素研究在成因矿物学中占有很重要的位置。地壳中稳定同位素共有274种，比较常用的是 D/H 、 $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ 、 $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ 、 $\text{S}^{34}/\text{S}^{32}$ 、 $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 、 $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ 等。通过矿物中稳定同位素研究，可以解决同位素交换反应的分馏平衡因素，以便定量解释自然界物质的演化，也即解决岩浆演化、成岩历史、岩石分类、变质岩中矿物分馏和变质序列的关系、矿床成因、物质来源、矿液性质、成矿条件、结晶温度以及找矿等问题。例如：对与基性-超基性岩有关的铜镍硫化物矿床，长期以来几乎都看成是传统的岩浆成因的熔离矿床。但是，通过对矿床中硫同位素组成特点的研究，发现某些矿床与硫源来自地幔的说法有矛盾；现有人认为硫源来自地壳岩石圈（雨水和海水），因而提出了“硫化作用”的新成矿假说。我国煎茶岭镍硫化物矿床的硫同位素组成分析结果，与陨石硫相比大大富集 δS^{34} （各种类型矿石的31个样品的 δS^{34} 值为+6.0~11.90‰），与地幔硫截然不同，这显然不是超基性岩浆所固有的。富含黄铁矿的围岩很可能就是煎茶岭镍硫化物矿床的硫源层，它因晚期酸性岩浆活动的水热作用而活化转移，并沿着构造裂隙进入超基性岩体，与硅酸镍反应形成硫化镍。

又如对氢、氧同位素组成的研究，可以确定成矿溶液的来源。日本的第三纪火山岩中的“黑矿”（以铅锌为主的多金属矿床）矿床的成矿溶液来源，经人们研究被认为成矿溶液以海水为主，岩浆水和雨水的参与数量一般不超过25%。

碳、氢、氧、硫同位素地质温度计也已广泛地用于成因矿物学研究，与其它地质温度计相比，同位素温度计的优点是不受压力变化的影响。

5. 热发光研究法

热发光法在成因矿物学中的应用，主要是根据热发光峰的存在与否，以及它们的绝对强度和相对强度来查明矿物的标型意义。据现有材料来看，热发光法能解决以下几个问题：①用于划分矿物世代；②用于进行地层对比；③探讨矿体接触带和矿体附近及断层附近的热发光变化，从而提出有关标志问题；④用于讨论矿化形成的热历史；⑤用于讨论矿物的形变、巨大构造运动、陨石坑及地下核爆炸产生的应力影响；⑥用于测定岩石年龄（但必须考虑其附加条件）。

6. 波谱学研究法

波谱学研究是近20余年来迅速发展起来的，并在成因矿物学中得到了广泛的应用。具体解决以下几个问题：①杂质元素在矿物中的分布状态或存在形式；②矿物中元素之间的类质同象问题；③元素的价态以及不同价态杂质离子在矿物晶格中的分配；④矿物的化学键性；⑤矿物的多形（即同质多象变体）；⑥矿物的有序度测定；⑦矿物中的电子-空穴中心及其前身——晶体中的点缺陷；⑧晶体性质与成分（特别是杂质）和结构之间的关系。在上述研究的基础上确定矿物的标型特征，进而探讨矿床成因和成矿作用特点。例如：用红外光谱对钾长石的结构状态进行研究，在解释岩石形成机理、岩浆分异状态、岩浆期后地质作用对岩体的改造、含矿性等方面取得了有成果。钾长石结构中Al-Si分布的有序性对其红外光谱中位于 640cm^{-1} 及 540cm^{-1} 吸收谱带的频率有影响。根据这个关系，人们找到了判断钾长石结构中Al-Si有序程度的方法，用此分析结果成功地解释了许多地质作用。穆斯堡尔谱已广泛地用来研究含一定量铁、锡的矿物，它

的主要贡献在于确定矿物中 $\text{Fe}(\text{Sn})$ 的价态、电子组态与化学键性、铁的配位、阳离子有序-无序现象。例如：用穆斯堡尔谱研究斜方辉石中阳离子的位置分布，可进一步为该矿物的热历史、冷却史提供信息；用穆斯堡尔谱研究球粒陨石类型的划分以及确定辉石中 Fe^{2+} 离子的有序分布与无序分布，可判别所研究的球粒陨石是否属于平衡球粒陨石。顺磁共振谱研究磷灰石的成因是卓有成效的，В.И.索特尼科夫（Согников）等利用顺磁共振谱研究了花岗岩和次火山岩型花岗斑岩有关的磷灰石，发现这两类磷灰石在 Mn^{2+} 和缺陷中心等方面有着明显的差别。Г.Л.基林斯卡娅（Глинская）等利用顺磁共振谱研究了陆相和海相磷块岩中磷灰石的不同特点。蔡秀成等1981年研究了不同成因类型磷灰石的顺磁共振谱，发现它们的发光离子的组合和相对强度不同。

7. 电子显微镜研究法

电子显微镜虽然问世已近50年，但真正在矿物学和成因矿物学领域中得到迅速发展则始于70年代，这大概归功于高分辨率和超高压透射电镜，以及分辨率为 $60 \text{ \AA}$ 的扫描电子显微镜的诞生。电子显微镜在成因矿物学中主要用来研究以下几个问题：①形态研究对粘土矿物的鉴定及成因解释做出了显著的贡献，如解决某些矿物的热液蚀变、某些矿床的成矿母岩的蚀变及其成矿溶液性质、矿化作用过程等；②微形貌研究。有些矿物晶面上微形貌是能反映其形成条件的，不同矿物微形貌的表现形式不同，如黄铁矿晶面微形貌是条纹。同一单形上的微形貌是相同的，据此，对于发育不好的晶形可根据微形貌研究来确定其晶体形态及其演化历程；③矿物的显微双晶、有序无序、多形、出溶作用等，这些都是成因矿物学中的微区研究新课题；④矿物的形变。通过观察晶体中位错来确定其形变，是需要开拓的构造成因矿物学的重要内容。

8. 矿物包裹体研究法

矿物包裹体研究法在成因矿物学中应用广泛。通过对矿物流体包裹体和熔融包裹体的研究，可以探讨其形成时的物理化学条件；用均一法、爆裂法、淬火法能确定成岩、成矿时的温度；据所测盐度和温度的资料可以确定形成时的压力状况；据盐度、温度、体积等参数可确定成矿流体密度；据包裹体的超微量分析和气相色谱仪分析可确定成矿流体的成分。此外，利用矿物包裹体所作的热晕图可以圈定和寻找隐伏矿体。

9. 矿物成因模拟研究法

主要用来研究不同物理化学条件下（温度、压力、介质）的人工合成矿物的形成、相变过程、形成机理及其共生组合等特点，以便比较和探讨天然矿物及其共生组合形成时的物理化学环境，为正确解释地质体、矿体、宇宙体的成因和演化提出理论依据。

10. 野外地质工作法

①无论对地质体或矿体都要进行系统剖面的详细观察和采样；一般沿垂直方向和水平方向要进行系统取样；对矿体的围岩及其附近的侵入体也要进行系统取样。

②根据所研究的目的不同，分别要满足矿物学、岩石学、构造地质学、矿床学的取样要求，其中对于构造地质学一定要取定向标本。

③在野外要搞清矿物的产状及其变化特点，研究彼此宏观的穿插关系，研究蚀变及交代现象，作好详细记录与素描图、照相相等，为进一步在室内确定矿物世代、矿物共生组合、矿物生成顺序收集好基础资料。

④对于副矿物标型特征研究一定要取大样，为进一步分析研究提供足量的样品。