



相山热液铀矿床实验 地球化学

姚莲英 仇宝聚 著



中国原子能出版社

相山热液铀矿床实验地球化学

姚莲英 仇宝聚 著



中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

相山热液铀矿床实验地球化学 / 姚莲英著. — 北京:
中国原子能出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-5022-6355-3

I. ①相… II. ①姚… III. ①铀矿床—实验地球化学
—研究—江西省 IV. ①P619.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 201864 号

内 容 简 介

本书对相山铀矿田的“双混合”成因理论模式进行了大量系统的模拟实验研究总结, 模拟合成了 10 类矿物共生组合和 20 多种胶状结构形态的沥青铀矿, 揭示了胶状沥青铀矿矿物的基本结构——球晶的成因, 以及具有晶质铀矿的内核胶状结构形态外貌的沥青铀矿, 查明了六价铀在四价铀矿物晶体结构中的位置和作用; 详细论述了交代蚀变矿物的胶态化和交代吸附作用是矿质高度富集的重要因素, 酸碱中和是热液铀成矿的基本机制; 应用水的临界奇异效应探索岩浆活动、火山作用、构造变动等系统成矿作用中的重大意义。书内附有大量矿物实物照片、实验数据和各类图表。

本书可供实验地球化学、成因矿物学、铀及其他金属矿产勘查有关的教学、科研、生产人员参考应用。

相山热液铀矿床实验地球化学

出版发行	中国原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑	韩 霞
装帧设计	马世玉
责任校对	冯莲凤
责任印制	潘玉玲
印 刷	中国文联印刷厂
经 销	全国新华书店
开 本	880mm×1230mm 1/32
印 张	4.125
字 数	111 千字
版 次	2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5022-6355-3 定 价 20.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

谨以此书庆祝核工业
北京地质研究院 55 周年华诞

献给为我国原子能事业献出青春的
第一代核地质工作者们

作者简历

姚莲英，原名姚惠芳，1933 年出生，女，上海人，核工业北京地质研究院高级工程师（现享受正处级离休待遇）。1948 年秘密加入中国共产党，1956 年毕业于南京大学地质系，曾任东华理工大学（原华东地质学院）讲师、教研组长，讲授构造地质和自然辩证法，1962 年任北京铀矿地质研究所所长学术秘书，1976 年调任三室（岩石矿物地球化学研究室）成岩成矿实验组从事研究工作，1988 年被聘为高级工程师，1990 年元月离休。离休后任核工业部研究生部放射性地质教研室副主任和第一届部退（离）休科学技术工作者协会理事。为国家培养了第一批铀矿地质中、高级技术人才，长期从事教育科技管理和研究工作。



姚莲英自主完成的三项岩石中铀的浸出实验获 1980 年省部级重大技术改进四等奖，“表生汲取成矿作用模拟实验研究”评为 1985 年院优秀成果，其自行设计的实验装置属国内先进水平，“双混合”铀成矿作用沉淀机制的模拟实验研究获 1992 年省部级重大技术进步三等奖；与他人集体协作的“热液铀矿床成矿作用物理化学条件的实验研究及其在找矿上的应用”获 1983 年国防科工委授予的重大科研成果四等奖，“华南花岗岩型铀矿床成矿机理综合研究和成矿作用定量判别”获 1985 年国防科工委授予的重大科研成果三等奖，“热液铀矿床富矿富集的物理化学因素”获核工业总公司授予的科技进步三等奖。

以第一作者身份与他人合作在国内外刊物和国际会议发表论文共计 30 篇, 其中, “花岗岩型铀成矿条件下铀性状的实验研究——铀的可溶性及富铀溶液的酸性演化” (Experimental study on uranium behavior in granites under endogenic conditions: solubility of uranium and evolution of acidity of uranium-bearing solutions) 发表于 1985 年法国南锡国际地球化学会议; “表生汲取成矿作用及模拟实验研究” (A Simulated Experiment of Ore-Formation in Granite by Supergene Extraction, 409-410) 一文发表于 1987 年中国广州国际花岗岩成岩成矿作用学术讨论会文集; “Experiment on concentration mechanism of uranium in hydrothermal solutions” 一文曾刊登于《Progress in Geosciences of China (1985—1988) - Papers to 28th IGC》上 (北京: 地质出版社, 1989)。参与赵斌等著《高温高压实验地球化学》有关铀的部分编写 (北京: 科学出版社, 1995: 142-165)。

姚莲英曾于 1958 年荣获二机部颁发的“跃进献礼积极分子”证章, 1987 年获中国地质学会颁发的 1985—1986 年度地质学会工作积极分子荣誉证书, 1986 年获核工业地质局颁发的献身铀矿地质事业 32 年荣誉证书, 1988 年荣获中华人民共和国国防科学技术委员会颁发的“献身国防科技事业”证章和荣誉证书。

序 一

火山岩型铀矿是我国重要的铀矿成因类型之一，以江西相山特大型铀矿为其典型代表。相山为一巨型破火山口，其中分布大量典型的S型流纹质碎斑流纹熔岩，孕育了我国最大的火山岩型铀矿床。1979年著名铀矿地质学家陈肇博在大量生产实践和科学研究的基础上，以相山铀矿为主要研究对象，提出了铀源的“双混合”成因模式，即原生流体与大气降水相混合，以及深熔作用带出的铀与表生汲取的铀相混合，这一“双混合”理论模式已为大量地质实践所证实。

任何成矿模式除了必须接受找矿勘探实践的检验外，还必须辅以室内成矿作用模拟实验，才能成为可信度高的成矿模式。本着这一原则，自20世纪80年代末至90年代初，姚莲英高级工程师对“双混合”模式开展了大量成矿模拟实验，重点模拟成矿过程中的沉淀富集机制，主要内容为：①成矿流体与酸性火山岩反应沉淀实验；②与大气降水成因的地下水混合沉淀实验；③铀钼成矿流体混合共沉淀实验，模拟实验取得了可喜成果。以上成果为“双混合”成因模式提供了有力的支撑性结论。

值得赞许的是，姚莲英的工作是在举步维艰的条件下进行的。整个实验过程体现了严谨求实的科学态度，形成了大量图表和图像，并进行了物化条件分析，堪称一项不可多得的优秀成果。这一优秀成果至今尚未发表，殊为可惜。最近，她将多年积累的研究成果加以系统整理，并补充了现时认识，多半是创新性认识，予以正式出版，实属难能可贵。相信该成果的发表，对今后进一步开展相关的成矿实验具

有启迪性的现实意义，在成矿理论上有很高的学术价值，在成矿条件进行找矿方面也有一定的实际意义。

中国科学院院士 王德滋

2013 年 4 月于南京

序 二

姚莲英是多年从事铀矿成矿实验的专家，有扎实的科学功底和丰富的经验。特别是其独立思考能力和对流行的理论认识进行科学修正，并开列出真凭实据，这在当今学界难能可贵。本人遵嘱勉为作序实际上是一次学习，现把觉得立论精彩之处，按章节顺序依次阐述如下。

1. 书中谈及以往许多学者都认为铀呈氟合铀酰离子形式迁移而后解离沉淀，“其实不然”；“氟合铀酰不可能成为中低温热液铀矿床的主要成矿形式”。

2. 只是“强调铀元素易聚、易散、易变的普遍性，尚不足以阐明矿床形成的特殊性。”必须考虑“与其他伴生或共生的元素以及蚀变、脉石、矿物组合才能判定其沉淀机制。”这是认识方法的一条重要指导原则，不宜于孤立只对单一铀元素进行各种鉴定测试而忽视其所在共生体系。

3. 作者对沥青铀矿经常出现的球形聚合体给予了专门考察，并进行了大量的精细测定，发现一二十种各类雏晶变体（详见附录2图片）。在此基础上指出“成矿流体是在漩涡式的剧烈变动环境中溶解与沉淀交替快速沉淀过程”，并进一步强调“胶状沥青铀矿不是胶体凝聚产物”，“其中心内核是具有晶格的晶质铀矿”。

4. 对沥青铀矿偏胶体的内核是晶质铀矿，而外围则是胶体沉淀似乎矛盾的现象，本书作者进行了以下深入剖析。沥青铀矿的组分不只是四价铀（ U^{4+} ），另外总是存在大量的六价铀（ U^{6+} ）。作者认为这反映成矿过程中的环境变化：① 此环境既非还原环境，又非氧化环境，而是还原-氧化的交替转换；② 反映成矿时的构造变动，作者就强调“铀的富集因素除受铀含量多寡决定之外，构造因素是首要

的，后者会使介质破碎，增大比表面积、微孔隙，利于对铀矿物的吸附”，这一见解是精辟的；③ 还反映热液温度由缓慢下降转为快速冷却；④ 另外还取决于当时共存的其他有关元素（如 Th、REE、Nb、Ta 等）及含水量的多少。

5. 书中特别强调了热液铀成矿过程中各类矿物均易形成胶体的重要性和普遍性。这也是成矿理论中的一个创见，反映作者具备胶体地球化学理论素养。作者作出热液成矿学的一条重要结论——“交代、吸附作用是铀与多金属元素沉淀和高度富集的重要机制。”

6. 此书另一个重要成果是通过众多地球化学成矿实验结果确认“热液成矿中沥青铀矿的沉淀富集机制是酸-碱中和作用。”书中的图 2 相当精彩和说明问题。

以上是本人一些粗浅学习心得（另外书中还有不少可圈可点之处，恕不赘述）。最后预祝此书早日出版。

研究员

杨东天

2014 年 1 月于北京

前 言

铀成矿理论及其成因模式的研究为铀矿地学工作者所关注。中国铀矿地质的勘查工作从 20 世纪 50 年代起步, 由于受到世界铀成矿理论的制约和影响, 自然地接受了“岩浆分异说”、“中低温浅成说”等学说, 到了 80 年代初, 我国才开始有了自己的成因模式, 如岩浆残余热液分泌说、表生汲取(热液)成矿说、“双混合”成因说、岩浆分异—热水浸出—地表水下降三类混合成因、三源(热、水、矿)成矿说、岩浆分异热液与渗流热液组成的上升的含矿热液与大气降水混合成因说、富铀花岗岩体风化和含铀地表水下降并被岩浆活动和地幔热流加热说、红盆—火盆—煤盆(包括热盖—火盖—变质基底)三层结构成矿说、热液混合和沸腾垂直分带模式, 又称三元(大气降水—地幔热流体—岩浆残留热液)成矿模式, 与 S 型火成岩(花岗岩与火山岩)有关的综合成矿模式等多达数十余种, 其中最为突出的是“双混合”成因模式。代表第一代铀矿学者陈肇博率先在 1979 年提出, 至 1982 年历经几年的发展, 1985 年完善, 提出了“双混合”成因模式。模式认为, 成矿溶液和成矿物质两者都具有“混合”性质, 成矿溶液中的水主要是岩浆作用所发动起来的巨大热水体系中的大气成因水, 而决定成矿溶液性质的主要矿化剂(F、Cl、CO₂、Na、部分 S 和 P 等)则主要来自活动大陆边缘或中央地块的深部硅铝壳深熔作用带(酸性岩浆发生带)和过渡岩浆室凝固结时导出的原生流体, 有一部分流体可能来自上地幔。富含矿化剂的高浓度原生流体与大气成因水混合形成成矿溶液。热液中所含的铀也具有混合成因, 遭受深熔作用的富铀地层中的铀转入酸性岩浆和残余原生流体中, 构成成矿中铀的第一个来源; 原生流体及其与大气成因水混合生成的热液在上升和地热体系循环过程中, 所经过的富铀地质体是铀的另一个重要来

源。“双混合”的意义不是互相混合没有主次的，是介于“上升说”和“下降说”之间、兼具两者特色，本质上说，属于“上升说”范畴。此模式不仅正确解答了“岩浆分异说”难以解释的岩矿时差问题，也圆满解释了“下降说”不能解释的成矿溶液的还原性问题、围岩蚀变问题以及铀钍共迁移共沉淀等问题。此模式不仅适用于火山岩型铀矿床，也适应于花岗岩型铀矿床，以至扩展到整个显生宙脉型铀矿床。它把综合地质特征和地球化学特征结合起来考察研究，特别强调拉张构造和裂隙作用对热液铀矿床的控制作用，尤其是具体详尽地分析了原生流体的析出，流体上升和大气成因水的混合，铀的四种来源（富铀层位中、混合过程中、活化铀、渗流地下水）以及酸碱中和（酸碱转折）接近中性或弱碱性阶段的铀沉淀富集机制。如此科学合理的理论广度和如此精细翔实的深度是其他模式（限于本学科范畴）所未能达到的，对于此后的成矿模拟实验研究具有主导意义。

成矿实验技术和方法，也有称高温高压实验地球化学或者称成矿作用实验研究，是地球化学一门分支学科。我国在 20 世纪 70 年代初开始起步，各个大学和研究院所先后建设高温高压实验室。我院也随之建立高温高压实验室急起直追，初具规模。历经迅猛发展前期，各院校所相继都取得了系列成果，然而大都着重于金属元素的分配及其溶解度的实验研究。对于铀元素也只侧重于溶解度的实验研究以及单一铀矿物的合成实验，国外的成矿实验也大都是单个铀矿物的合成实验，有关成矿作用、成矿机制、成矿模式和矿物共生组合等实验研究的报道少见，跟不上地质勘查长足发展的步伐，许多成因模式停留在地质推断水平，得不到实验研究的支撑和检验，将不可避免地影响成矿理论的提高，拖了地球科学的后腿。

作者为了提高我国自己在生产实践基础上总结得出的成因模式理论的知名度和可信度，采用高温高压的实验技术，突破惯常的实验思路，将室内的实验研究与野外的地质勘查研究相结合，矿化与蚀变相吻合，单一的铀元素成矿作用与其相关金属元素组合的系列成矿作用相统一的模拟实验研究方法，以期系列成果确认模式理论的真实性、科学性、预见性。

实验涵盖三大部分内容：(1) 单一性质的成矿热液与中酸性火山岩反应；(2) 深熔作用带原生成矿流体与大气降水混合反应；(3) 铀钼混合成矿热液共沉淀实验反应。

三大部分 66 次实验（包括条件实验近百次），共获得结果 1 697 项数据，各类照相近 200 张，其中 37 次实验获得了沥青铀矿、晶质铀矿、辉钼矿、硫钼矿、黄铁矿等 10 类共生组合产品，还原率均在 95% 以上，取得系列创新成果：

(1) 富集沉淀出了 10 类矿物共生组合：① 沥青铀矿单一的组合；② 沥青铀矿—萤石—蒙脱石组合；③ 沥青铀矿—磁黄铁矿组合；④ 沥青铀矿—磁黄铁矿—硬石膏组合；⑤ 沥青铀矿—赤铁矿组合；⑥ 沥青铀矿—黄铁矿组合；⑦ 沥青铀矿—方解石组合；⑧ 沥青铀矿—蒙脱石—方解石组合；⑨ 沥青铀矿—硫钼矿组合；⑩ 沥青铀矿—晶质铀矿—硫钼矿—辉钼矿组合。

(2) 突破了高温形成晶质铀矿的固有概念，在低温 150 °C 热液条件下模拟合成了具有六方体和八面体晶质铀矿内核，胶状结构形态外貌的四、六价铀共同组成的偏胶相沥青铀矿矿物，从而查明了 U^{6+} 在 U^{4+} 铀矿物晶体结构中的位置和作用，厘清了它的形成机制，富铀成矿溶液由真溶液状态向胶体溶液转化成成矿物质组成的真胶体胶粒，经水解和沉淀以离子缩聚形式形成。

(3) 新模拟合成了一批普遍具有胶状结构的沥青铀矿，为铀矿物的微观世界增添了许多新的物种，同时也揭示胶状沥青铀矿矿物的基本结构——球晶成因的新观点。

(4) 首次得到从二氟化合铀酰形式的成矿溶液中在无还原剂、400 °C 条件下析出沥青铀矿的结果。

(5) 首次完成了铀钼共迁移共沉淀的实验，明确了铀钼成矿机制，获得了 2 项微观发现：即低温合成晶质铀矿和球状沥青铀矿。同时，在解读系列成果基础上，对于与铀矿化密切相关的硅化、红化、蒙脱石化、胶黄铁矿、黑化、铀钼矿化等成因提出了系列独特的看法。

系列创新成果为“双混合”成因模式提供了有力佐证，并把它提

升到了一个新的理论高度。

此书是在 20 世纪 90 年代完成的科研成果报告基础上经过近两年的修改、整理，三易原稿写成，公开与大家见面。回想当初，当我们取得了第一个数据结出第一炉沥青铀矿成果时，喜悦之情难以言表，决心日夜奋战、艰苦探索，正如古人所说，“几分耕耘几分收获”，获得系列创新成果，取得系列新认识。近几年在我的老师王德滋院士和胡受奚博导的鼓励下，下定决心重新整理，公开发表，以正误传。由于本人已到耄耋之年，思维迟钝、力不从心，不免多有错误疏漏之处，请同行专家、年轻后人批评指正。如果我的拙文能使读者获有滴水启示，这就是我最衷心的愿望。

致谢：首先感谢原核工业部副部长陈肇博对此成果的好评；感谢核工业北京地质研究院李子颖院长、王驹副院长的大力支持；感谢中国矿物岩石地球化学学会第 14 届年会上胡瑞忠、蒋少涌教授对报告的肯定。还要感谢仇宝聚、张家富、刘正义、沈才卿的协作。另外要感谢帮助我完成各项测试、鉴定、分析的张宜、谭发兰、宋社娟、王玉芬、沈珠琴、李清贞、张淑苓、张鸿德、李建中、范梅英、尹金双、王鹤、孙传敏、范光、于阿朋以及中国地质科学院黄家山；特别感谢中国地质大学（北京）电镜室聂伟和核工业北京地质研究院地矿所李月湘研究员、王文全博士、张玉燕工程师付印出版成文；感谢核工业北京地质研究院地矿所所长范洪海、科技信息研究所张书成研究员对此书修订刊印的全力支持，诚致谢意！最后感谢戎嘉树、徐国庆两位研究员帮助英文目录、摘要的翻译、校对！

敬向王德滋资深院士、杜乐天研究员为本专著作序深表衷心感谢！

作 者

2014 年 1 月

Abstract

The text consists of three major parts: (1) Reaction of single ore-forming fluid with intermediate-acidic volcanic rocks; (2) Mixture reaction of initial ore-forming fluid from anatexis zone with meteoric water; (3) Simulation experiment of co-precipitation of U-Mo minerals from mixed ore-forming solution. 66 experiments and nearly 100 conditional tests have been conducted. 1697 data and 200 microphotographs of pitchblende, uraninite, molybdenite, jordanite, pyrite in 37 experiments were obtained. The reduction rate reached up $>95\%$ and a series of innovative results have been achieved:

(1) 10 groups of mineral paragenesis have been precipitated; ① single pitchblende, ② pitchblende-fluorite-montmorillonite, ③ pitchblende-pyrrhotite, ④ pitchblende-pyrrhotite-anhydrite, ⑤ pitchblende-hematite, ⑥ pitchblende-pyrite, ⑦ pitchblende-calcite, ⑧ pitchblende-montmorillonite-calcite, ⑨ pitchblende-jordanite, ⑩ pitchblende-uraninite-jordanite-molybdenite.

(2) The metacolloidal pitchblende is composed of the core of cubic or octahedral uraninite and the appearance of colloidal pitchblende, accounting for the simultaneous existence of U^{4+} and U^{6+} in it. It shows that crystalline uraninite may also be formed at low temperature 150°C , not only at high temperature as thought previously and the ore-forming fluid was transformed from true to colloidal solution, then precipitated by hydrolysis in ionic cohesion form.

(3) A series of colloidal pitchblende with new species have been

produced and a new genesis of spherocrystal for their basic colloidal structure has been proposed.

(4) Pitchblende has been firstly synthetised from ore-forming fluid (in form of uranyl bifluoride) at 400°C (without reductant).

(5) Experiment for co-migration and co-precipitation of U and Mo has been firstly and successfully conducted, explaining the paragenetic mechanism of U-Mo mineralization. Either spherocrystal pitchblende or crystalline uraninite can be formed at lower temperature. Meanwhile, a series of unique point of view for the genesis of silicification, hematitization, montmorillonitization, colloidal pyrite, melanism, U-Mo mineralization, closely related to uranium mineralization, have been proposed and discussed.

The innovative experimental results above mentioned have provided powerful evidences and deepened the understanding to the "double mixture" model for hydrothermal uranium mineralization.

目 录

第一章 概述	1
第一节 研究意义和目的	1
第二节 实验设计思路	1
第三节 实验条件	2
第四节 实验设备和测试方法	2
第五节 实验内容和主要结果	3
第二章 单一性质成矿热液与中酸性火山岩反应	4
第一节 实验的物化条件	4
一、单铀型沥青铀矿独立组合	4
二、沥青铀矿—萤石—蒙脱石组合	4
第二节 富集因素及其地质意义讨论	5
第三章 深熔作用带原生成矿流体与大气降水混合反应	9
第一节 实验结果的物化条件	9
一、单铀型沥青铀矿系列组合	9
二、U—Fe 元素共生组合系列	12
三、沥青铀矿—方解石、沥青铀矿—方解石—蒙脱石组合	17
第二节 富集因素及其地质意义讨论	19
一、沥青铀矿是真溶液经还原作用快速沉淀的结果	19
二、“双混合”成矿溶液与单一性质成矿溶液沉淀的沥青铀矿区别	19
三、控制混合成矿溶液矿质沉淀的五要素	19
第四章 铀钼混合成矿热液共沉淀模拟实验	23
第一节 沥青铀矿—胶硫钼矿组合	24
一、实验的物化条件	24