

中国矽卡岩和矽卡岩矿床 形成机理的实验研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MECHANISM
OF THE FORMATION OF SKARNS AND
SKARN ORE DEPOSITS IN CHINA

梁 祥 济 著

學苑出版社
ACADEMY PRESS

中国矽卡岩和矽卡岩矿床 形成机理的实验研究

(九五地质行业科学技术发展基金资助项目 编号 959603)

梁 祥 济

學苑出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究/梁祥济著. —北京: 学苑出版社,
2000.11

ISBN 7-5077-0636-2

I. 中… II. 梁… III. 矽卡岩矿床-矿床成因论-研究-中国 IV. P618.210.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 61674 号

学苑出版社出版发行

北京市万寿路西街 11 号 100036

北京争锐图文设计制作有限责任公司照排

永清印刷厂印刷 新华书店经销

787×1092 16 开本 25 印张 570 千字

2000 年 11 月北京第 1 版 2000 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 001—500 册 定价: 40.00 元

内 容 简 介

本书是作者三十多年来从事矽卡岩和矽卡岩矿床实验研究的系统总结，也是矽卡岩和矽卡岩矿床成因机理研究的最新专著。

作者在全国 18 个不同类型和典型的矽卡岩和矽卡岩矿床野外工作和深入研究的基础上，在高温高压下进行了近 6000 次的交代作用实验。实验结果打破了矽卡岩和矽卡岩矿床只是由中酸性侵入岩和碳酸盐岩地层接触交代所形成的传统框框，证明了超基性、基性侵入岩与碳酸盐岩地层接触交代，火山气热液交代火山岩（次山火岩），层控 - 沉积变质交代和变质 - 混合岩化交代以及富碱中基性 - 中酸性岩浆和灰岩（或白云质灰岩）同熔混合、分离结晶作用都能形成矽卡岩和矽卡岩矿床。这不仅揭示了矽卡岩和矽卡岩矿床多成因的机理，丰富和发展了岩石学、矿床学成岩成矿的内容和理论，而且为寻找和开发具有重要工业类型的贵金属、有色金属、黑色金属和稀有金属等矿床拓宽了视野和范围。

本书地质基础扎实，实验指导思想正确，实验方法先进，测试手段齐全，内容丰富，资料翔实，数据可靠，观点新颖，论证有据，文图并茂，具有很高的理论深度，是一份反映矽卡岩及其矿床实验研究的当今高水平优秀的科研成果。

本书可供矿床学、岩石学、矿物学、地球化学和物理化学等专业的地质院校师生和科研、实验、矿山地质人员参考。

作者简介

梁祥济，男，研究员、教授，九三学社社员，曾任九三学社北京市委科学委员会和科教文委员会委员，中国地质科学院地质研究所高温高压实验室主任，1937年6月生，浙江省苍南县人。

1964年毕业于北京地质学院地质矿产三系，同年分配到中国地质科学院从事矿床地质和实验岩石、矿物和地球化学研究。曾为中国岩石、矿物和地球化学学会实验岩石、矿物和球化学专业委员会副主任、国际地球化学和宇宙化学协会会员等。三十多年来，坚持野外实际第一性，研究了伟晶岩与锂、铍、铌、钽矿床，金伯利岩与金刚石矿床和超基性岩与钽铌磁铁矿矿床的地质特征；以新的思路、先进的技术路线在高温高压下进行成岩成矿实验，研究了花岗岩类岩石和全国20多个典型的金、银、钨、钼、锡、铋、铁、铜、铅、锌等矽卡岩和热液交代型金属矿床及明矾石等非金属矿床形成的物理化学条件，揭示了水-岩相互作用和成岩成矿的机理。1972—1978年编辑和主编了《铁铜矿产专辑》1至8集。1981年以来，主持了国家、部、省和院级的攻关、重点项目和课题10多个，先后荣获部、省级科研成果一、二、三、四等奖8项，其中6项以他为首。《光明日报》(1991)、《中国矿业报》(1997)和《中国地质矿产报》(1997)曾分别报导了他对金矿研究的突破，水-岩相互作用研究的新进展和对实验地球化学的贡献。先后在《地质学报》和《The Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits》等国内外22种地学核心刊物上发表了《桂北含锡花岗岩形成机理的实验研究》和《Experimental study of the mechanism for the formation of Honglazi type gold deposit in China》等论文80余篇，其中20多篇被国际著名《Chemical Abstracts》、《Mineralogical Abstracts》、《Geological Abstracts》、《Bibliography and Index of Geology》、《Реферативный Журнал》和《科学技术速报》等六种英、俄、日刊物收录和应用。出版了我国首次发行的《水-岩相互作用和成矿物质来源》、《中国红砷子型金矿床形成的物理化学条件》和《中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究》等4部著作。1988年以来，先后多次单独应邀去德国、法国、苏联、俄罗斯和美国等国家讲课、学术访问、乘直升飞机考察高山地质和出席国际学术会议作报告等。参加和组织数十次全国专业学术会议。1989年开始，被英国(剑桥)和美国国际名人传记中心列入“国际有突出成就的人”和“世界5000名人录”等版本。1995年以来，他的成就和业绩陆续被选录入国内公认的《当代中国科学家和发明家大辞典》(第三卷)，《中华成功者》(第三卷)、《世界名人录》(中国卷③)和《国魂——中华新世纪兴国英才传略》等权威传典中。1999年10月世界著名机构联合庆祝1999—2000年活动委员会授予千年之交荣誉纯金勋章。

序

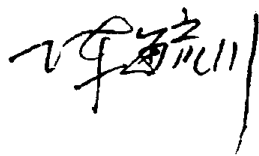
矽卡岩作为一种交代成因的岩石，长期来受到矿床界及岩石界的关注，因为不仅它与成矿关系密切，而且其成岩作用涉及各种地质因素的复合，深至地幔，表至天水。因此，国际上对此问题的研究长期不衰。

原苏联学者柯尔仁斯基提出的矽卡岩形成的双交代、查理可夫的矽卡岩形成的实验研究都在此研究领域有较大影响。我国赵一鸣研究员对矽卡岩及其矿床作过较系统的研究。而对矽卡岩形成的较系统的实验研究应推梁祥济研究员，三十多年来他涉足各类矽卡岩矿床；结合成岩成矿地质条件的野外调查，开展细致的成岩实验研究工作，积累了丰富的有关矽卡岩形成的科学资料。在他退休之际，又难能可贵地进行系统地综合研究，作了深入地总结，把一生为地质科学辛勤垦耘的主要精华凝固在这本专著里，奉献给广大地质界同行。

在这本专著中作者提出了矽卡岩不但形成于中酸性侵入岩与碳酸盐岩接触带，亦可形成于超基性、基性侵入岩与围岩的接触带，火山汽热液交代火山岩、次火山岩，沉积岩层中可形成层控矽卡岩及地层变质过程中亦可形成矽卡岩，并有益地探讨了混合岩化及岩浆成岩过程中形成矽卡岩的问题；专著中对各主要矽卡岩矿物及其共生组合形成的物理—化学条件比前人作了更为系统、全面的厘定；对成岩与成矿的关系亦作了有益的探索。无疑，本专著是国内目前有关矽卡岩成岩实验研究最为系统的总结，不但对于从事矽卡岩及有关矿床研究的同行有重要的参考意义，而且对矿床界、岩石界的同行们一定亦不失其参考价值。

在本书出版之际，我仅借此机会，向梁祥济研究员致以衷心的祝贺。同时，深为其为祖国地质事业的奉献精神和工作科学态度所感动，深表钦佩，并致以最良好的祝愿。

中国工程院院士
原地质矿产部总工程师
原中国地质科学院院长



2000年3月14日

前 言

本书是作者三十多年来从事矽卡岩和矽卡岩矿床实验研究的系统总结。它以“九·五”期间地质行业科学技术发展基金的《安徽铜陵矽卡岩金矿床形成机理的实验研究》项目最终研究报告为基础，吸收了作者已在国内外地学杂志上发表的 60 多篇有关矽卡岩及其矿床研究论文的新内容，融汇入加以分析和深化的以前国家重点项目中“攀枝花—红格铁矿成矿规律”，“马坑、大冶和尖山矽卡岩铁矿床形成物理化学条件”研究课题；地质矿产部和中国地质科学院的“火山气热液交代火山岩、次火山岩形成铁矿床实验”，“层控—沉积变质交代”和“变质—混合岩化交代”生成矽卡岩铁矿实验以及“钨、钼、锡、铋矽卡岩型矿床形成机理实验”等研究项目和课题的成果。它是作者继“水—岩相互作用和成矿物质来源”一书之后，完整和系统的矽卡岩和矽卡岩矿床多成因机理的最新研究专著。

我国是世界上矽卡岩矿床最发育、分布最广和采冶历史最悠久的国家之一。我国的矽卡岩矿床成矿地质条件复杂，类型和矿种比较齐全。现已探明的该类型矿产储量和矿石生产量在金属矿床中占有重要地位。一些矽卡岩矿床在世界上属于较罕见，其规模也名列前茅。长期以来，国内外不少研究者对矽卡岩型矿床进行了一系列专题研究，但是对矽卡岩和矽卡岩矿床成因机理和形成物理化学条件还没有完全搞清楚，尤其是 90 年代以来才发现的不同类型的矽卡岩金矿床，更需深入探索。作者抓住这个国际前沿的课题，坚持不懈地进行实验研究。

三十多年来，作者自始至终坚持野外地质工作和实验研究密切相结合，在全国 18 个不同类型的、典型的和有代表性的矿床——如侵入接触交代型的矽卡岩矿床（四川攀枝花铁矿接触带、福建马坑铁矿、安徽铜陵白芒山和包村金矿、湖北大冶铁矿、湖南柿竹园钨、钼、锡、铋多金属矿和广东尖山铁矿）；火山气热液交代火山岩（包括次火山岩）型的矽卡岩矿床（新疆磁海和雅满苏铁矿、内蒙古黄岗铁矿）；层控—沉积变质交代型矽卡岩矿床（安徽铜陵冬瓜山、大团山、老鸦岭金矿、海南石碌铁矿、黑龙江孟家岗铁矿）和变质—混合岩化交代型矽卡岩矿床（黑龙江西麻山、天宝山和河南桐柏山铁矿）野外工作和实践深入研究的基础上，对每个矿床总结出实验地质依据。根据这些地质依据，进行了近 6000 来次交代作用的实验。实验样品采自上述 18 个矿区的天然侵入岩、火山岩、沉积岩、变质岩和混合岩。实验反应溶液根据各矿床矿物包裹体成分、岩石和矿物中挥发分、火山气热液成分和变质、混合岩化流体成分模拟配制。应用先进的实验仪器设备、技术方法和测试手段，前后共获得 70000 多个可靠和有效的实验数据。有的是在极端困难，甚至威胁到生命安全的情况下（包括野外和实验室）获得，确实来之不易。最后将这些实验、测试、计算结果的资料进行分析、综合、制表、绘图，并适当引用部分前人成果（直到 1999 年 8 月）作为协助解释，进行系统总结。

矽卡岩和矽卡岩矿床形成的机理和形成的物理化学条件一直是国际实验界热衷研究的课题。总体来说,欧美开始早,苏联后来居上。近二、三十年来,该领域的实验研究达到历史上最高水平。但欧美、苏联和现在俄罗斯的学者仍局限于研究中酸性侵入岩和碳酸盐岩地层接触交代型。我国开始晚,70年代才投入实验,而且仪器设备也比欧美和苏联差。但作者发现和抓住矽卡岩和矽卡岩矿床系不平衡体系、不可逆反应的产物和多成因的新观点,系统地进行了成岩和成矿的实验研究。实验结果打破了矽卡岩及其矿床只是由中酸性侵入岩(闪长岩和花岗岩)和碳酸盐岩地层接触交代所形成的传统框框,证明了超基性、基性侵入岩与碳酸盐岩地层接触交代,火山气热液交代火山岩,层控-沉积变质交代和变质-混合岩化交代也能形成矽卡岩和矽卡岩矿床。数千次实验业已证明:只要具备 Si、Al、Ca、Mg、Fe 五种主要物质组分,而且比例较合适 $[\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}:\text{MgO}:\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (总)}]$ (包括 FeO 换算成 Fe_2O_3 在内) $= 30 \sim 50:10 \sim 15:30 \sim 40:5 \sim 10:3 \sim 6$, 在 $\text{pH} = 2.0 \sim 11.0$ 的、含 CO_2 、Cl、F 挥发分和 K、Na 的热液流体作用下,在 $265 \sim 750^\circ\text{C}$ 和 $200 \times 10^5 \sim 2000 \times 10^5 \text{ Pa}$ 温压范围内和弱氧化-弱还原环境中进行交代作用,或者在 $850 \sim 1200^\circ\text{C}$ 温度和 $3000 \times 10^5 \sim 6000 \times 10^5 \text{ Pa}$ 压力下,富碱中基-中酸性岩浆+灰岩(或白云质灰岩)同熔混合作用,分离出钙矽卡岩岩浆,都能形成矽卡岩和矽卡岩矿床。这不仅揭示了矽卡岩和矽卡岩矿床成岩成矿多成因的机理,丰富和发展了岩石学、矿床学成岩成矿的内容和理论,而且为寻找和开发具有重要工业类型的 Au、Ag 贵金属, W、Sn、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn 有色金属和 Fe 等黑色金属及 Li、Be、Nb、Ta 等稀有金属矿床拓宽了范围。同时,作者在这大量和可靠的实验资料的基础上明确地指出:矽卡岩是交代岩,而不是各种类型的变质岩。它是由含 Si、Al、Ca、Mg、Fe 等比例合适的五种主要成分的岩石(一种或多种岩石)或岩石与流体(含有岩石内缺少这五组分中某几种成分的流体),在热液(岩浆期后热液、火山气热液、地下循环热液和变质热液等)作用下,在上述温度、压力和氧化-还原环境等的物理化学条件中进行了交代作用、或矽卡岩岩浆直接分异结晶,形成了以钙铁-钙铝系列石榴子石、透辉石、透闪石、硅灰石、方柱石、符山石、黄长石、硅镁石和钙镁橄榄石等交代特征标型矿物为主体的地质体。

由于作者有关该领域的实验研究论文陆续在国内外地学核心刊物上发表,逐渐引起了国际同行科学家的关注。自 1986 年以来,应 Halldor A. 教授(冰岛,1986)、Johannes W. 教授(德国,1988) Жариков В.А. 院士(苏联,1991)、Соболев Н.В. 院士(俄罗斯,1992)、Yoder H.S.Jr. 教授(美国,1998)和 Liang C.Hsu 教授(美国,1998)等著名实验矿床和岩石学家邀请(对方资助经费),前往德国、法国、苏联、俄罗斯和美国等国家科学院有关实验岩石、矿物、地球物理和地球化学研究所,有关大学地质系或地球、行星科学系等,就矽卡岩和矽卡岩矿床多成因的实验思路、技术和理论为主要内容进行讲课,作学术报告和在国际学术会议上交流,得到同行学者的认可和赞扬。

本书除前言和结束语外,共分十二章。明矾石矿床不是矽卡岩矿床,但它属于火山气热液交代沉火山岩矿床,故把它列入最后一章论述和探讨。第一章叙述矽卡岩和矽卡岩矿床实验的简史、发展和现在研究的方向;第二章简略介绍实验样品的采集,交代作用实验的主要仪器设备和实验采用的技术和方法;第三章总结了模拟实验矽卡岩交代分带的机理和条件;第四章介绍了实验形成的石榴石子族、辉石族、闪石族和硅灰石等常见矽卡岩矿物的特征和它们形成的条件;第五章介绍了实验形成的方柱石族、黄长石族、硅镁石族和

符山石等标型矽卡岩矿物的特征和它们形成的条件；第六章介绍了实验形成的石膏族、明矾石及其共生组合、蛇纹石族和钙镁橄榄石等特殊交代矿物的特征和它们形成的条件；第七章论述了侵入接触交代型（从超基性－基性－中性－酸性侵入岩和碳酸盐岩地层侵入接触）矽卡岩和矽卡岩矿床形成的机理和内在因素；第八章论述了火山气热液交代火山岩（次火山岩）型矽卡岩和矽卡岩矿床形成的机理和内在因素；第九章论述了层控－沉积变质交代型矽卡岩和矽卡岩矿床形成的机理和内在因素；第十章论述了变质－混合岩化交代型矽卡岩和矽卡岩矿床形成的机理和内在因素；第十一章简要介绍了岩浆型矽卡岩及其矿床的主要地质特征和成因机理，讨论和分析了矽卡岩矿床多成因的物理化学条件；第十二章阐明了明矾石矿床交代特征、形成机理和条件。此外，应该提出的是第七章～第十章中涉及的成矿物质来源问题，已在作者的《水－岩相互作用和成矿物质来源》专著中进行分析和评述。为了配合该四章成矿机理的讨论，仅引入部分实验资料作为证据。

在本项目研究和本书完稿的过程中，承蒙地质行业科学技术发展基金委员会、以前的国家科学技术委员会、地质矿产部和中国地质科学院给予研究经费上的资助，中国地质科学院地质研究所给予工作上的关怀；在野外工作期间，先后得到了四川省地质局 106 地质队、攀枝花矿山、福建省地质八中队、湖北省大冶矿山、广东省地质局 723 地质队、甘肃省地质局第四地质队、新疆雅满苏矿山、新疆维吾尔自治区地质局第六地质队、内蒙古自治区地质局黄岗地质队、海南省石碌矿山、黑龙江省地质局第四地质队、第六地质队和第一地质调查研究所、河南省地质局第八地质队、湖南省地矿局湘南地质队、湖南省柿竹园矿山、浙江省平阳矾矿、安徽省地矿局 321 地质队、白芒山矿山等单位的领导和同志们的大力支持；在实验研究中，宋叔和院士、沈其韩院士、常印佛院士、苏良赫教授、黄蕴慧研究员、陆春榕研究员、邓晋福教授、黄枝高研究员、林盛中研究员、李鹏九教授、周珣若教授、赵斌研究员、赵一鸣研究员、曾贻善教授、施性明教授、兰玉琦教授、尚如相研究员、吴才来研究员、郭占保研究员、吴厚泽研究员、程莱仙高级工程师和辛玉美高级工程师等曾对某些问题给予指教；同时得到曾经和作者一起工作过的缪婉萍、张桂兰、曲国林、李德兴、杨崇辉和廖志杰等同志的帮助；实验原始样品和实验结果的固、液样品由国家地质实验测试中心、北京大学地质系化学测试室、中国地质大学（北京）化学分析室、国家建材局化学分析室和中国地质科学院矿床地质研究所第八研究室 X 光组等单位承担分析或协助测试；在本书撰写中，王清新（清图）、刘红（植字）、贾秀敏（计算机制图）、刘蕾（打字）、史丽（打字）和凌碧伦（校对）等同志协助完稿。

地质行业科学技术发展基金委员会委托中国地质科学院地质研究所组织和聘请陈毓川院士（中国地质科学院）、周珣若教授（中国地质大学）、施性明教授（首都钢铁地质勘探公司地质研究所）、刘正义教授级高级工程师（核工业部第三研究所）和兰玉琦教授（浙江大学地球科学系）组成评审委员会对本书初稿进行审评。他们认真细致地审阅，给予该项研究成果进入世界同类学科的先进行列的评价，并提出了宝贵的修改意见。

中国工程院院士、原地质矿产部总工程师 原中国地质科学院院长陈毓川研究员一贯支持基础地质和成岩成矿实验研究，并在百忙中热情地为本书写了序。

由于出版经费困难，承蒙九三学社中央学苑出版社主动为本书提供出版经费的支持，并给予精心编辑，使得本书能及时和顺利问世，和广大读者见面。

对上述给予作者该项目研究直至本书出版的资助、关怀和帮助的单位和个人，在此一

并表示最衷心的感谢，并致最崇高的敬意。

谨将此书献给共和国五十周年，献给曾经培养过作者的小学、中学和大学老师，献给长期奋斗在第一线（健在和逝世）的地质工作者。

作者于北京

写于1999年国庆节前夕

改于2000年春节前夕

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MECHANISM OF THE FORMATION OF SKARNS AND SKARN ORE DEPOSITS IN CHINA

Liang Xiangji

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

ABSTRACT

This book is a systematic summing-up of the experimental studies of skarns and skarn ore deposits that the author has engaged in for more than 30 years. It is the latest monograph of studying the genetic mechanism of skarns and skarn ore deposits.

The author has persisted in combining field work with experimental studies closely for more than 30 years. He has participated in intensive investigations of 18 different types of typical and representative ore deposits in China, e.g. skarn ore deposits of intrusive contact metasomatic type (the contact zone of the Panzhihua iron deposit in Sichuan, Makeng iron deposit in Fujian, Baimangshan and Baocun gold deposits in Tongling of Anhui, Daye iron deposit in Hubei, Shizhuyuan W, Mo, Sn and Bi polymetallic deposit in Hunan and Jianshan iron deposit in Guangdong), skarn ore deposits of volcanic exhalative-hydrothermal metasomatic type (formed by reaction of volcanic gas and hydrothermal fluids with volcanic rocks including subvolcanic rocks) (Chihai and Yamansu iron deposits in Xinjiang and Huangang iron deposit in Inner Mongolia), skarn ore deposits of stratabound metamorphosed sedimentary metasomatic type (Dongguashan, Datuanshan and Laoyaling gold deposits in Tongling of Anhui, Shilu iron deposit in Hainan and Mengjiagang iron deposit in Heilongjiang) and skarn ore deposits of metamorphic-migmatized metasomatic type (Ximashan and Tianbaoshan iron deposits in Heilongjiang and Tongbaishan iron deposit in Henan). On that basis the author has summarized the geological basis for experiments on the above-mentioned ore deposits. According to the geological basis, the author has carried out nearly 6000 experiments of metasomatism.

All of the experiments were performed in quick-quenching apparatus at high temperatures and high pressures. Experimental samples were collected from natural intrusive rocks, volcanic rocks, sedimentary rocks, metamorphic rocks and migmatites in the above-mentioned 18 ore deposits or districts. Experimental reactive solutions were simulatedly prepared from chemical reagents according to the compositions of mineral inclusions, volatile constituents of rocks and minerals, composition of volcanic gas and hydrothermal solutions, and compositions of metamorphic and migmatization fluids in the ore deposits. Experimental starting materials and reactive solutions were sealed in gold or silver capsules, and placed in reactive cavities of high-pressure vessels which were situated in the constant temperature areas of experimental furnaces. Experimental temperatures were controlled by automatic fine temperature

controllers TWK-703 (error within 1°C). Experimental pressures were read from manometers. Experimental products were studied under the microscope and by x-ray analysis. More than 70000 reliable experimental data were obtained.

Experimental results show that the author has made a breakthrough in experimental studies of skarns and skarn ore deposits. They have not only broken away from the monogenetic view of skarns and skarn ore deposits and revealed the polygenetic mechanism of skarns and skarn ore deposits, but also furnished strong evidence for the establishment of new concepts and theories on the origin of the skarn type of rocks and ore deposits, and widened the field of vision for looking for the same major commercial type of ore deposits in the world.

The author's more than 6000 experiments have proved the following:

(1) Skarns and skarn ore deposits can be formed not only by contact metasomatism of intermediate-acid rocks with carbonate rocks, but also by contact metasomatism of basic-ultrabasic rocks with carbonate rocks, metasomatism of volcanic gas-hydrothermal solutions with volcanic rocks (subvolcanic rocks), stratabound metamorphosed sedimentary metasomatism and metamorphic-migmatized metasomatism as well as the syntax-mixing crystallization differentiation of alkali-rich intermediate-basic and intermediate-acid magmas with limestones (or dolomitic limestones).

(2) No matter what type and composition of rocks are and no matter what structural location, contact zone or interformational unconformity discontinuity surface, junction surface and facies change surface a single type or multiple type of rocks lie in, so long as the five material components Si, Al, Ca, Mg and Fe are present and $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}:\text{MgO}:\text{Fe}_2\text{O}_3$ (total) (including FeO calculated as Fe_2O_3) = $(30 \sim 50) : (10 \sim 15) : (30 \sim 40) : (3 \sim 6)$, skarns and skarn ore deposits can be formed by metasomatism in the presence of hydrothermal fluids containing CO_2 -, Cl- and F-bearing volatiles and K and Na with $\text{pH} = 2.0 \sim 11.0$, in weak redox environments at $265 \sim 750^{\circ}\text{C}$ and $200 \times 10^5 \sim 2000 \times 10^5$ Pa, or by crystallization of skarn magmas separated by syntax and mixing of alkali-rich intermediate-basic and intermediate-acid magmas with limestones (or dolomitic limestones) at $850 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ and $3000 \times 10^5 \sim 6000 \times 10^5$ Pa. If the concentrations of the ore-forming elements in rocks or hydrothermal fluids or skarn magmas are high enough to form ores, the ore-forming elements will precipitate and form skarn ore deposits concomitant with the occurrence of skarns.

(3) Skarn is a metasomatic rock rather than a metamorphic rock. It is a geologic body composed of the characteristic and typomorphic, metasomatic, paragenetic minerals andradite, grossular, hedenbergite, diopside, tremolite, wollastonite, vesuvianite, monticellite, scapolite, melilite, humite etc. formed by metasomatism (including contact metasomatism, outometasomatism, diffusive metasomatism, infiltration metasomatism etc.) of Si-, Al-, Ca-, Mg- and Fe-bearing rocks (one type or multiple types of rocks), or rocks and fluids (containing some elements of the elements Si, Al, Ca, Mg and Fe that the rocks lack in the presence of hydrothermal solutions (including hydrothermal solutions volcanic exhalative-hydrothermal solutions, subsurface circulated hydrothermal solutions, metamorphic and migmatized hydrothermal solutions etc.), in weak redox environments at $265 \sim 750^{\circ}\text{C}$ and $200 \times 10^5 \sim 2000 \times 10^5$ Pa, or by crystallization of skarn magma at $850 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ and $3000 \times 10^5 \sim 6000 \times 10^5$ Pa.

(4) According to the theory on the formation of the metasomatic column (skarn) advanced by Korzhinskii D.S. (1995), the famous ore geologist of the former USSR, generally, the chemical reactions in the formation of a metasomatic column are not in equilibrium or reversible, but as far as a small local mass in the column is concerned, these reactions may be regarded as equilibrium products. The author conducted experiments by using natural rocks from the mines as starting materials. In the experiments, the paragenetic assemblage of metasomatic minerals was formed which are not equilibrium products, but coincide with the paragenetic assemblage of skarn minerals in the mines. The author also performed experiments of the equilibrium system on the small local masses in the metasomatic columns of the mines. The resulting paragenetic minerals of the experiments also accord with the phase rule and topology. These experimental results more closely approximate the geological fact.

目 录

第一章 矽卡岩实验研究的进展	(1)
第一节 矽卡岩实验进展的历史回顾.....	(1)
第二节 矽卡岩实验进展的主要基础.....	(2)
第三节 矽卡岩实验进展的延续方向.....	(9)
主要参考文献	(10)
第二章 实验技术方法	(15)
第一节 实验的地质基础	(15)
第二节 实验样品、反应溶液及其 pH 值	(16)
第三节 实验温度、压力和氧化-还原环境	(22)
第四节 实验主要仪器设备	(26)
第五节 实验产物鉴定、测试和有关问题	(30)
主要参考文献	(31)
第三章 矽卡岩交代分带	(33)
第一节 实验地质依据	(33)
第二节 实验技术方法	(36)
第三节 实验结果及其地质意义	(37)
第四节 交代分带形成的机理	(44)
主要参考文献	(54)
第四章 常见矽卡岩矿物	(56)
第一节 石榴子石族矿物	(56)
第二节 辉石族矿物	(62)
第三节 闪石族矿物	(71)
第四节 硅灰石	(80)
主要参考文献	(89)
第五章 标型矽卡岩矿物	(91)
第一节 方柱石族矿物	(91)
第二节 黄长石族矿物.....	(101)
第三节 硅镁石族矿物.....	(108)
第四节 符山石.....	(116)
主要参考文献.....	(120)
第六章 特殊交代矿物	(122)

第一节	石膏族矿物	(122)
第二节	明矾石及其共生矿物	(133)
第三节	蛇纹石族矿物	(140)
第四节	钙镁橄榄石	(146)
	主要参考文献	(149)
第七章	侵入接触交代型矽卡岩矿床	(152)
第一节	超基性、基性侵入岩与碳酸盐岩接触形成矽卡岩 矿床(交代带)的实验	(152)
第二节	中性侵入岩与碳酸盐岩接触交代形成矽卡岩矿床的实验	(161)
第三节	酸性侵入岩与碳酸盐岩接触交代形成矽卡岩矿床的实验	(175)
第四节	矿床形成的物理化学条件	(186)
	主要参考文献	(192)
第八章	火山气热液交代火山岩(次火山岩)型矽卡岩矿床	(195)
第一节	磁海铁矿床形成机理的实验	(195)
第二节	雅满苏铁矿床形成机理的实验	(202)
第三节	黄岗铁(锡)矿床形成机理的实验	(207)
第四节	矿床形成的物理化学条件	(215)
	主要参考文献	(218)
第九章	层控-沉积变质交代型矽卡岩矿床	(220)
第一节	冬瓜山等金矿床形成机理的实验	(220)
第二节	石碌铁矿床形成机理的实验	(235)
第三节	孟家岗铁矿床形成机理的实验	(243)
第四节	矿床形成的物理化学条件	(252)
	主要参考文献	(259)
第十章	变质-混合岩化交代型矽卡岩矿床	(261)
第一节	实验地质依据	(262)
第二节	实验技术方法	(264)
第三节	实验结果和讨论	(265)
第四节	矿床形成的物理化学条件	(273)
	主要参考文献	(275)
第十一章	矽卡岩和矽卡岩矿床形成的物理化学条件	(278)
第一节	岩浆型矽卡岩及其矿床的主要地质特征和实验研究	(278)
第二节	物质成分是矽卡岩和矽卡岩矿床形成的 内在根本因素	(284)
第三节	热液流体是矽卡岩和矽卡岩矿床形成的重要物质条件	(292)
第四节	H ₂ O 和 CO ₂ 在矽卡岩和矽卡岩矿床形成中的作用	(299)
第五节	钾、钠、氯、氟化物在矽卡岩和矽卡岩矿床形成中的影响	(313)
	主要参考文献	(321)
第十二章	明矾石矿床形成机理和物理化学条件	(325)

第一节 矿床主要地质特征和交代作用 (325)

第二节 矿床形成的热力学条件 (333)

第三节 矿床形成的机理实验 (345)

第四节 矿床中钒、镓萃取和综合利用 (353)

主要参考文献 (360)

结束语 (363)

实验参数和度量单位说明

矿物名称缩写代号

图版和说明

CONTENTS

Chapter I Advance on the experimental studies of skarn	(1)
Section 1 Historical review of skarn experimental advance	(1)
Section 2 Chief bases of skarn experimental advance	(2)
Section 3 Continuing direction of skarn experimental advance	(9)
Chief references	(10)
Chapter II Techniques and methods of the experimentation	(15)
Section 1 Geological foundation of experimentation	(15)
Section 2 Experimental samples, solutions and the pH values of solutions	(16)
Section 3 Experimental temperatures, pressures and oxidation reduction environments	(22)
Section 4 Experimental main equipments	(26)
Section 5 Identification, determination and analyses of experimental products as well as related questions	(30)
Chief references	(31)
Chapter III Metasomatic zoning of skarn	(33)
Section 1 Geological bases of the experimentation	(33)
Section 2 Experimental technique and method	(36)
Section 3 Experimental results and their significances in geology	(37)
Section 4 Mechanism of the metasomatic zoning formation in skarn	(44)
Chief references	(54)
Chapter IV Common skarn minerals	(56)
Section 1 Garnet minerals	(56)
Section 2 Pyroxene minerals	(62)
Section 3 Amphibole minerals	(71)
Section 4 Wollastonite	(80)
Chief references	(89)
Chapter V Typomorphic skarn minerels	(91)
Section 1 The minerals of scapolite family	(91)
Section 2 The minerals of melilite family	(101)
Section 3 The minerals of humite family	(108)
Section 4 Vesuvianite	(116)
Chief references	(120)