

工藝礦物

PROCESS MINERALS

第四届全国工艺矿物学学术会议论文专辑

中国有色金属学会选矿学术委员会
中国选矿科技情报网

第四届全国工艺矿物学学术会议论文专辑

工艺矿物学在有色金属
地质、选矿、提取冶金中的应用研讨会
论 文 集

中国选矿科技情报网工艺矿物网编

一 九 八 七 年 十 月

· 北 京 ·

编者的话

自1985年第三届全国工艺矿物学术会议以来，有色金属行业各有关科研单位、大专院校、厂矿企业的广大工艺矿物学工作者在密切结合有色金属地质、采、选、冶工艺等各方面以提高经济效益为主要目的研究方面作了大量工作，取得了可喜的成绩。

为了总结前一段的科研成果，交流应用工艺矿物手段解决各类问题的经验和方法，通报各大厂矿企业存在的工艺问题和探讨重要有色金属基地开发中的合作途径，进一步发挥工艺矿物学工作者在我国矿产资源开发利用中的作用和提高我国工艺矿物学学科水平，中国有色金属学会选矿学术委员会、中国选矿科技情报网工艺矿物网、中国有色金属总公司科技部工艺矿物科技协作组决定联合召开第四届全国工艺矿物学学术会议，其中心议题是研讨“工艺矿物学在有色金属地质、选矿、提取冶金中的应用”。

编辑出版本论文集的目的就是为大会交流和深入讨论创造条件。由于广大工艺矿物学、地质、选矿、冶金等科技工作者的热情支持，来稿十分踊跃。但因篇幅有限，不得不删去来稿中所有照片和部分插图，在内容上也作了大量的压缩；有些论文因收到较晚，未能编入论文集；有些论文在审稿中虽有些争议，但为便于争鸣也编入文集中；有些论文虽然收到较早，但因篇幅过长也未收录于文集中，敬希作者和读者见谅。此外，由于时间仓促和编者水平有限，文集中难免会出现一些错误，请予批评指正。

编者

1987.7

全国工艺矿物学在有色金属地质、选矿、提取冶金 中的应用研讨会论文目录

一、综合论评

世界矿相学的新进展

——国际矿物学协会第十四届大会矿相学学术讨论会综述·····

	徐国风 邵克忠 马新兴 蔡长金 (1)
有色金属工艺矿物学年评·····	田福纯 (10)
铅锌工艺矿物学的某些进展·····	许志华 (16)
从工艺矿物学角度谈提高钨选厂效益问题·····	许德清 (22)
工艺矿物学—成长中的一门边缘学科·····	周乐光 (28)
从茶山锡矿看我国中小矿山存在的问题·····	金云虹 (32)
加强工艺矿物学研究更好地为“四化”建设服务·····	张施展 潘武军 (37)
深入开展工艺矿物研究的初步探讨·····	张英男 (40)
金川镍矿物质组成研究工作近期评述·····	王瑞琦 周贵珍 (43)

二、地质找矿及选矿过程工艺矿物学研究

寻找金矿床的地质标志·····	张振儒 陈伟 (50)
云南云龙锡矿锡石的标型特征·····	胡泽宁 (54)
河台金矿的矿物标型特征·····	张慧珠 (55)
某些矿物中次显微金及晶格金的研究·····	张振儒 杨思学 易闻 (60)
砂金性状研究及其在选冶提取和金矿找矿中的应用·····	李铁公 (64)
选矿工艺中金的工艺矿物学研究·····	王广文 赵镜 (72)
河北东坪金矿金的赋存状态研究·····	王素娟 (76)
黑龙江团结沟金矿金的赋存状态及工艺性质·····	丁力南 王素芬 王金桃 唐宝彬 (81)
金在“铁帽”中的行为及回收途径探讨·····	李正勤 (85)
金银的赋存状态及对选矿的影响·····	周清文 (87)
育城子铅矿银矿物工艺特性研究·····	应瑞良 (91)
浅论江西冷水坑银路岭银矿床铅锌特征及其综合利用的途径·····	曾卫胜 (97)
银母寺铅锌矿伴生银的赋存状态·····	李明寰 (99)
青海锡铁山铅锌矿床氧化带中金银赋存状态及工艺性质研究·····	符增有 张凯 张慧文 (100)

提高宝山铜矿铅锌系统银回收率可能性与途径的工艺矿物学研究	陈安平(106)
锡铁山锰银矿工艺矿物学研究	杨锡惠(111)
伴生金的赋存状态及其综合利用	董振寰(117)
江西弋阳铜矿伴生银工艺矿物学研究	董振寰(119)
铜柏银矿自然银的黑色被膜及其再生硫化银的研究	马秀盘(125)
广西南丹茶山锑——钨矿床银的赋存状态研究	邓德福(127)
镍黄铁矿的断裂面结构及其表面的化学特性	关杰 东乃良(130)
关于提高甘肃西城铅锌矿田矿石经济效益途径的探讨	邱允赞 张发(149)
铅铜山铅锌矿XF ₁ 选矿样工艺矿物学特征	李寿芝(143)
广东大尖山铅锌矿选矿工艺矿物学研究	李素贤(148)
广东石录铜、钼矿矿物组成及工艺性质研究	张继梅(153)
工艺矿物学在选矿研究中的应用	陆建有(157)
工艺矿物学在包头稀土矿选矿试验中的作用	汪自文(160)
黄岗铁锡矿铁锡赋存状态及矿物工艺性质研究	曾三红(163)
浙江省建德多金属矿铜、锌精矿不合格原因考查	林永立 张发(168)
江西某稀有金属矿区矿石特征及选冶试验	曾纪伦(172)
浅谈我国南方花岗岩风化壳离子型稀土矿床矿石特征及其工艺性质	张苏云(177)
选矿工艺在我厂的应用及其经济效益	杨丹平(181)
褐铁矿中铜锌矿物综合回收研究	刘福忠(182)
中国钨矿工艺矿物学特征及其选矿工艺	葛立生(185)

三、冶金过程工艺矿物学研究

包钢含铈炼钢渣工艺岩石学研究	苏良赫 罗晨(190)
某地铝矾土矿浮选尾矿合成莫来石的研究	任允芙 朱秦生(196)
二期铜渣处理试验过程中各种产物的物质组成研究	周贵珍(201)
工艺矿物学在炉渣研究及综合利用中的应用	孙智永(209)
钛铁矿还原机理研究	叶彦(213)
锌锰干电池中锰回收工艺流程的相组成考查及其转变机理的研究	马跃华(216)
铁水予处理脱硫渣的工艺岩石学研究	忻立波(220)

四、方法研究及其他

也谈单体解离度计算方法问题	邓德福(224)
矿物几何法体积含量计算原理的补充	张荣寰(226)
XKJ-I型、II型显微颗粒计数器研制及应用	张明歧(229)
我国首次发现的镉银黝铜矿	符增有 张惠文 赵纯培 贾殿武(232)
病马尘肺中无机成分的矿物学研究	艾平 赵纯培 程伟(233)

世界矿相学的新进展

——国际矿物学协会第十四届大会矿相学学术讨论综述

徐国风* 邵克忠 马新兴 蔡长金

(武汉地质学院)

1986年7月13—19日在美国加利福尼亚州斯坦福召开的国际矿物学协会第十四届大会盛况空前,有来自世界各国的七百多名矿物学家参加学术交流活动。我国选派了由二十多人组成的中国矿物学家代表团参加会议,并为1990年7月在我国首都北京举行国际矿物学协会第十五届大会作准备。国际矿物学协会矿相学委员会(COM/IMA)是国际矿物学协会下设之十三个专业委员会(或工作小组委员会)中的一个,负责金属矿物学方面的工作。矿相学委员会在国际矿物学协会的活动中起着巨大的作用,占有重要地位。在第十四届大会的交流论文中有很大份量是矿相学(金属矿物学)方面的著作,会议分组宣读,讨论的209篇论文中矿相学有20篇,占9.6%。会议展览出355篇论文中矿相学有36篇,占10.1%。

由国际矿物学协会矿相学委员会(已通过改名为金属矿物学委员会)主持,讨论交流了以下三个大方面的论文,现分别简要综合报告如下。

一、金属矿物的矿相学(矿石学)、矿物物理和矿物化学

英国Aston大学地质科学系矿相学家D.J.Vaughan在其题为《硫化物矿物的表面性质和电子结构》的论文中应用X射线电子图象法、螺旋旋转光谱法、反射率色谱颜色定量研究法以及转换电子穆斯堡尔谱法研究了方铅矿和斑铜矿的“纯”矿物和暴露于空气及水中的矿物表面。论文指出方铅矿最好是用(100)解理面作矿物表面性质研究。他的研究结果表明富硫的PbS比富Pb的PbS氧化速度快,认为系由富铅的PbS表面有S的缺位造成。斑铜矿在空气中迅速氧化变色并失去光泽。和新鲜的纯斑铜矿表面相比,氧化的斑铜矿表面之 R_{400} (入射光为400毫微米的反射率,下同)升高而 R_{700} 降低。还经实验证明,斑铜矿的氧化速度与其化学成分中的Cu/Fe比率以及矿物的化学计量性有关。论文著者持在氧化斑铜矿的表面下面有一个带有“硫化铜层”的三价铁氧化物之水合物存在的观点。

日本Tsukuba大学化学系I.Nakai等作了题为《As-Sb-S体系的晶体化学》的学术报告。论文的作者在温度为250—400℃、压力为1000kg/cm²的条件下合成了 $(As_{1-x}Sb_x)_2S_3$ ($0.2 \leq x \leq 1$),用X射线晶体结构分析和电子探针分析确定了As-Sb-S体系固溶体的范围。

*执笔人为徐国风

研究表明,在 $Sb_2S_3-AsSbS_3-As_2S_3$ 系列中,辉锑矿的固溶体范围为 $Sb_{1.56}As_{0.44}S_{2.88}$,硫锑矿(Getchellite, $AsSbS$)的固溶体范围为 $As_{1.01}Sb_{0.99}S_{3.01}-As_{1.27}Sb_{0.73}S_{3.03}$,锑雌黄(Wakabayashilite)固溶体的范围为 $As_{1.87}Sb_{0.13}S_{3.01}-As_{1.74}Sb_{0.26}S_{2.88}$,雌黄固溶体的范围为 $As_{1.82}Sb_{0.18}S_{3.04}-As_2S_3$ 。另用人工合成的富As之辉锑矿(含As25mol%) $Sb_{1.5}As_{0.5}S_3$ 用X射线测得其空间群属Pbnm, a_0 为11.282(3)Å, b_0 为11.279(4)Å, C_0 为3.786(1)Å, $Z=4$ 。富As之硫锑矿 $As_{1.3}Sb_{0.7}S_3$ 其空间群属 P_{21}/a , a_0 为11.850(14)Å, b_0 为9.040(7)Å, C_0 为10.197(13)Å, $\beta=116.15(11)^\circ$, $Z=8$ 。还用日本Tsukuba大学光子工厂产BL-10B型同步辐射器照射样品作EXAFS分析, 结果发现As在硫锑矿和辉锑矿中的定位结构(Local Structure)与在雌黄中非常近似。全部As原子与S都呈三方锥配位(Trigonal Pyramidal Coordination)。在辉锑矿中半数的Sb与S呈三方锥配位, 另一半的Sb和在硫盐矿物中一样与S呈四方锥配位, 并且As-S间距(约为0.2 Å)小于Sb-S间距。此项研究成果可用于解释 $As_2S_3-Sb_2S_3$ 体系的固溶体范围。

美国密苏里州Missouri-Rolla大学地质学和地球物理学Hagni R.D教授宣读了题为《密苏里东南部铅矿化区矿物的矿相学和共生顺序》论文。他指出美国密苏里铅矿化区是世界最大的铅矿产区。矿床富含Pb、Zn、Cu、Fe、Co、Ni的硫化物、Cu-As硫盐以及白云石、石英、方解石、迪开石和沥青等脉石矿物。矿石产于上寒武系Bonneterre沉积建造中, 该建造由白云岩和页状白云岩组成。矿床系在有利的沉积岩相和构造条件下形成。矿石具块状构造, 浸染状构造和晶洞状构造, 发育有填隙结构、交代结构和出溶结构。

经矿相学研究, 第一矿化阶段为交代寄主岩(白云岩和页状白云岩)的浸染状铁及铁-镍硫化物形成。矿物生成顺序可能为黄铁矿、白铁矿、方硫铁镍矿, 第二矿化阶段为交代白云岩的呈局部产出之块状斑铜矿-黄铜矿集合体形成, 其中包含有少量钴-镍硫尖晶石类矿物, 铁、镍、钴的双硫化物、镍砷化物、铜-砷硫盐和铜硫化物等产出。矿物生成顺序可能为斑铜矿、黄铜矿、硫铜镍矿、镍硫铜钴矿、黄铁矿、方硫铁镍矿、方硫镍矿、含钴黄铁矿、辉砷镍矿、砷黝铜矿、硫砷铜矿、蓝辉铜矿、斜方蓝辉铜矿、辉铜矿、铜蓝和留色铜蓝等。第三矿化阶段为大量黄铜矿-闪锌矿-方铅矿阶段, 其形成温度为137-82°C, 包裹体盐度约为23wt%NaCl。第四矿化阶段为晶洞产物阶段。晶亮的白云石晶体系多次淋滤、反复沉淀的结果。较早形成的方铅矿八面体晶体被部分地淋滤、溶蚀, 往后为方铅矿立方体晶体石英和其他硫化物沉淀。其中针镍矿则系由硫镍矿、硫镍钴矿、方硫镍矿等转变而来。最后的第五矿化阶段沉淀方解石和微量迪开石、白铁矿、黄铜矿、黄铁矿、方硫铁镍矿和沥青。此矿化阶段的成矿温度和包裹体盐度均较低。

硫化物矿物系多次反复沉淀作用造成。如论文指出黄铜矿有九个世代、闪锌矿有五个世代、方铅矿有七个世代、黄铁矿和白铁矿有许多世代等。看来, 金属矿质沉淀的长期性、每种金属矿物和脉石矿物沉淀的重复性以及大多数矿物明显的波动性这两点是美国密苏里东南部矿化区金属矿床和密西西比河谷式矿床的主要特点。非常可能, 这些特点是由成矿作用的长期性、矿液活动的脉动性、含矿流体物理-化学特征和化学组成富集作用的波动性、先前已沉淀晶出之矿物的局部溶解作用、相同组份的重复沉淀性以及表生含矿溶液和可能为岩浆热液成因之原生卤水的混合作用等造成。

美国弗吉尼亚工业学院和州立大学地质科学系J.R.Craig教授在其提出的论文《黄铁矿的变质作用》中指出黄铁矿是层控变质硫化物矿床中普遍存在广泛分布的耐熔硫化物矿物之

一。黄铁矿随温度、压力条件变化的物理-化学响应用于矿物学研究相当重要。较软的矿物如黄铜矿、闪锌矿等常常在黄铁矿颗粒附近形成“压力影”结构。在低温条件下黄铁矿易于碎裂而在高温条件下则呈位错流动塑性变形。论文着重指出温度升高时在变质作用中黄铁矿-磁黄铁矿集合体将出现黄铁矿衰减的趋势和更富硫之磁黄铁矿发育的现象。结果导致早期黄铁矿细粒的破坏和消失，磁黄铁矿作为新生晶体或者作为“增生晶体延伸相”产出。作者提供的实验证明当黄铁矿与磁黄铁矿的比例为1:1的硫化物块状集合体在600℃温度条件下遭受变质作用，温度下降到300℃时由磁黄铁矿中释放出来的硫可以形成占集合体总量5%的细粒黄铁矿，当原始黄铁矿与磁黄铁矿的比例为1:4和1:9时则形成18%和34%的细粒黄铁矿。这些研究成果对于探讨层控变质块状硫化物矿床的形成机理具有重要意义。

国际矿物学协会矿相学委员会副主席、美国地质调查所丹佛中的B.F. Leonard教授等在会议上宣读了题为《爱达荷州Thunder山破火山口杂岩体银的赋存状态》研究报告。报告在指出银是与破火山口杂岩体有关之金、锑、钨矿床的附生元素之后简介了矿床地质概况。该区金矿床是位于破火山口杂岩体中心始新世流纹质凝灰岩和火山碎屑岩内的交代体。金、锑、钨矿床是与前第三系岩石中的环状断裂有关的浅成火山热液交代型矿床。矿体多呈网状矿脉产于硅化带中或其附近。作者们认为大多数矿床为低品位的浅成低温热液矿床或浅成高温热液矿床。矿石中除金、银矿物外，稀疏浸染状的黄铁矿和毒砂是最普遍的伴生矿物。

已鉴定出来的银矿物有：自然银、银金矿、螺状硫银矿、辉银矿（后转变为螺状硫银矿）、硫锑银矿、辉锑银矿、浓红银矿、含银黝铜矿和尚未准确定名的Ag-Sb-S及Ag-Fe-Sb-S矿物、碲银矿、硒银矿、角银矿、水银矿等。怀疑该区可能存在的银矿物为硫金银矿、硫锑银铅矿、辉锑银铅矿和硫锑铜银矿等。以上矿物中除银金矿、螺状硫银矿和含银黝铜矿产出较多外，其余都是很少见的微量矿物。

银金矿的化学成分范围为从 $(Au_{0.316}Ag_{0.684})$ 到 $(Au_{0.994}Ag_{0.006})$ ，即成色从546到951。但最普遍的化学组成是 $(Au_{0.41}Ag_{0.59})$ ，即成色为560的银金矿。

螺状硫银矿是该区最接近化学计量标准成分的银矿物。只在罕见的情况下有一点点Cu或Se进入矿物晶格。螺状硫银矿通常产在贱金属硫化物和含银黝铜矿的边缘；它也呈放射状排列的纤维晶束产于石英中，或呈早先生成之辉银矿的假象产出。

含银黝铜矿在金、银矿床中以从 $(Cu_{5.00}Ag_{3.50}Fe_{1.71}Zn_{0.24})$ $(Sb_{3.51}As_{0.24})$ S_{13} 到 $(Cu_{5.00}Ag_{3.92}Fe_{1.70}Zn_{0.28})$ $(Sb_{3.50}As_{0.23})$ S_{13} 的成分产出。含银黝铜矿在锑-汞矿床中往往含Hg（如含10%的Hg和3%的Ag）。

该区的银还可以呈微量元素在许多其他矿物中赋存。如毒砂可含Ag1—2ppm，黄铜矿最高达1500ppm，在硫锑铜矿中含0.04原子数的银，铜蓝和蓝辉铜矿（微含银），方铅矿（可达6000ppm），闪锌矿（0.6—1ppm）和辉锑矿（1—1500ppm银）。

银还在该区许多植物中产出，如火山灰腐泥木含Ag达2—300ppm，银在火山灰木质物中的含量约为其在土壤中的10倍。这些现象可用于生物地球化学勘查找矿工作中。

澳大利亚南澳Adelaide大学地质学和地球物理学系R.A. Both和国际矿物学协会矿相学委员会主席、奥地利矿业大学矿物学岩石学研究所E.F. Stumpft教授在其题为《Broken Hill矿体中银的分布》论文中也对硫化物矿石银的赋存状态进行了富有成效的研究。众所周知，世界闻名的Broken Hill铅-锌-银矿体由一系列产于早元古界Willyama层变质沉积岩和变质火山岩中的矿石透镜体组成。该矿床一般被认为属海底喷发沉积矿床并经受了复杂的

形变作用和麻粒岩相的变质作用 (I. K. Plimer, 1984)。论文作者们从Broken Hill 4个矿山共5个矿体中取了63件样品, 主要以反光显微镜和电子探针的分析结果来考察银在矿石中的分布。研究表明该区黝铜矿含Ag 0.06—50.88%, 大多数在1—25%范围之内, 在所有5个矿体中银黝铜矿的含量变化范围都很大。该区方铅矿中银的含量在不同矿体中有较大差别, 5个矿体有1个较高、1个低、3个中等。Broken Hill的主要含银矿物是方铅矿、黝铜矿和浓红银矿。论文指出以前的地球化学研究认为Broken Hill所有的矿体都具有相同的特征化学成分(对单个矿物也如此), 但此次银的分布研究成果(以Ag在方铅矿中的含量为纵坐标, Ag在黝铜矿中的含量为横坐标作图, 交会点分散, 5个矿体有所不同且与平均值差别较大)则表明上述趋势不明显。

加拿大地质调查所的矿物学家D. C. Harris在其展出的论文《安大略省赫姆洛金矿床的矿物学研究》中首次对二十世纪八十年代初发现的世界级新型金矿床进行了深入的矿物学研究。此太古代绿岩带中新型金矿床与以前发现产于绿岩带下部层位铁镁质、超铁镁质绿片岩相变质岩(包括科马提岩)中不同, 它产于绿岩带上部层位长英质的变质火山岩和泥质副变质岩的接触带上。主矿化带延长达2900米、往下延伸2500米, 矿化厚度达3—45米。矿石平均品位为7.6克/吨金, 主矿体至少有7000万吨矿石(534吨黄金)。金矿石还富含Mo、Sb、As、Hg、Tl、V和Ba并含有多种多样的矿物集合体。最常见的金属矿物是黄铁矿、辉钼矿、辉锑矿、黝铜矿-砷黝铜矿、自然金(可含Hg 22%以上、Ag 29%)、闪锌矿(含Hg 27%以上)、辉铋矿、雄黄、辰砂和硫砷汞铜矿。微量和痕量金属矿物有方铋金矿、硫铋铅矿、车轮矿、双晶矿、砷硫铋铅矿、硫铋铊铜矿、自然铋、脆硫铋铅矿、硫铋铁矿、辉铋镍矿、辉铁铋矿、砷铋矿、自然砷、毒砂、雌黄、辉砷镍矿、副雄黄、硫砷铅矿、褐硫砷铅矿、砷车轮矿、砷汞矿、硫砷铋汞矿、钼砷铊钽石、斜硫铋铊矿、硫砷铋铊矿、钛铁矿、磁铁矿、砷铅矿等。脉石矿物主要为石英、重晶石(含Sr大于6ppm)、绢云母、钼白云母(含 V_2O_5 多于8.5%)、金红石(可含 V_2O_5 5—6%)、钡微斜长石(含BaO 16.6%以上)。其它微量副矿物有电气石、榍石、金云母、黑云母、微斜长石、钠长石、角闪石、砷铊铁钙石、钛铋钙石、褐帘石、独居石、钙铝榴石、符山石和白钨矿等。

二、硫酸盐、钨族矿物和工业应用

法国著名矿相学家Y. Moelo等在其硫铋铅矿同源矿物族专题报告中对法国产辉铋银铅矿、维硫铋铅银矿、富硫铋铅矿等铅铋硫酸盐矿物的产状作了报道。该报告报道法国Nantes西部La Roche-Baloue片麻岩采石场内有一条石英脉产有白钨矿、毒砂、方铅矿、Pb-Bi-Ag硫酸盐矿物。矿脉由以下三个矿化阶段形成: (I) 气成石英-正长石阶段; (II) 石英-白钨矿-毒砂(磁黄铁矿和辉钼矿)-硫铋铅矿同源矿物族阶段(350—400°C); (III) 浅成低温热液黄铁矿-白铁矿-黄铜矿-含Ag的斜方辉铋铅矿-第二世代辉铋银铅矿-自然铋-黝铜矿阶段。

第一世代和第二世代辉铋银铅矿在正交偏光下普遍显示复式双晶。在第一世代辉铋银铅矿中总是有许多辉铋银铅矿-硫铋铅矿系列中贫Ag-Bi的端员矿物的出溶叶片。相反, 第二世代辉铋银铅矿细小晶体中十分纯净, 其中完全没有上述出溶叶片存在。维硫铋铅银矿(Vikingite)和辉铋银铅矿相似, 也发育有聚片双晶和其他双晶。在富Ag-Bi的富硫铋铅

矿 (Heyrovskyite) 中则没有双晶。这三种硫盐矿物频繁生成共面网定向连生的共生组合。方铅矿由于机械成因的聚片双晶造成显示弱非均质性。非均质方铅矿经电子探针分析表明含Bi 3.1%和含Ag 1.6%。铅硫盐矿物含Se 0.02—0.05%、Sb 0.04—0.14%、Cd 0.1—0.8%，在硫铋铅矿同源矿物族中Cd的含量随Ag-Bi含量加大而增加。斜方辉铋铅矿含Cu 1%、Ag 2.6%。该研究报告又一项表明铅硫盐矿物系属的重要来源之一。

联邦德国海德堡大学矿物学岩石学研究所矿物学家G.H. Moh教授在讨论会上宣读了题为《辉铋锡铅矿-圆柱锡矿连晶的研究》论文。他采用反光显微镜、X光分析、电子探针分析、穆斯堡尔谱分析和人工合成实验的方法，研究辉铋锡铅矿-圆柱锡矿连晶。论文以穆斯堡尔谱法研究 ^{57}Fe 、 ^{121}Sb 和 ^{119}Sn 同位素来解决矿物中元素的价态问题。如查明辉铋锡铅矿中有一部分锡为 Sn^{+2} ，在 Pb/Sn^{+2} 等于2/1条件下Pb甚至完全被 Sn^{+2} 取代，形成 $\text{Sn}_2^{+2}\text{Fe}^{+2}\text{Sb}_2^{+3}\text{Sn}_2^{+4}\text{S}_{14}$ （原为 $\text{Pb}_2\text{Fe}^{+2}\text{Sb}_2^{+3}\text{Sn}_2^{+4}\text{S}_{14}$ ）。辉铋锡铅矿可含不到1%的Zn、In、Ge， Ge^{+4} 部分地取代 Sn^{+4} 已由实验所证实。

玻利维亚某些圆柱锡矿带有少量辉铋锡铅矿或硫铋锡铁铅矿 (Incaite) 的连晶研究表明圆柱锡矿中 Pb/Sn^{+2} 比值很大（即 Sn^{+2} 很少），锡几乎全部氧化成为 Sn^{+4} ，形成 $\text{Pb}_4\text{FeSb}_2\text{Sn}_4^{+4}\text{S}_{16}$ 。

联邦德国汉堡大学矿物学岩石学研究所M. Tarkian教授在其论文中论述了铂族矿物的化学成分和反射率的关系问题，他指出自电子探针应用二十年来有力地推动了铂族矿物的研究工作，已有80种以上铂族矿物经过详细研究定名。加拿大矿物能源工艺中心矿物科学实验室C.J. Cabri提供了最多的铂族矿物研究资料（1981），M. Tarkian和H.J. Bernhardt于1984年发表了铂族矿物光学数据和维氏硬度值编制的R-VHN图鉴。论文作者所在的汉堡实验室已完成产自Orekeep、Merensky Reef、Stillwater、Shelland和日本、印尼婆罗洲、苏联乌拉尔等地35种铂族矿物的测试、研究工作。已有150种以上铂族矿物的反射率色谱资料输进该实验室的数据库。

不同矿床、不同成因之同种铂族矿物的化学成分有差异，反射率特征也有所不同。论文例举的实例有：

1. Os-Ir-Ru互化物——苏联乌拉尔产这种天然合金矿物系列含Ru最高，印尼婆罗洲产则几乎只含Os、Ir（Os/Ir比值不同）。矿物的反射率随Ir的含量增大而加大。自然铱、自然铱和铱铱矿三者的反射率色散曲线明显不同（差异主要在560—680毫微米间）。

2. Pt-Fe互化物——系铂矿床中最常见的铂族矿物。其化学组成在 $\text{Pt}(\text{Fe})$ 、 Pt_3Fe 和 PtFe 之间变动，矿物的反射率随Fe含量增大而降低。

3. (Pd, Pt)S固溶体系列——硫铂矿和富铂布拉格矿在Merensky Reef普遍产出，但缺乏硫钯矿。相反，硫钯矿和富钯布拉格矿在Stillwater却是产出最多的铂族矿物。在Stillwater(Pd, Pt)S还和Pd的碲化物、砷化物、铋化物以及含钯的镍黄铁矿一起产出。Stillwater的Pd:Pt约为3.5:1，而Merensky Reef此比值仅为0.4:1。硫钯矿的反射率比布拉格矿中间相固溶体的反射率高2%。

4. Ru-Os-Ir硫化物—— $(\text{Ru}_{0.5}\text{Os}_{0.5})\text{S}_2$ 中Ir取代Os不超过10%，用反射率特征不能区分硫钨矿 RuS_2 、含Os或富Os硫钨矿。

5. Rh-Ir-Pt硫砷化物——硫砷铑矿-硫砷铱矿系列矿物反射率随Rh含量增高而加大。

硫砷铂矿 (Plalansite) 系Tarkian 1986年的新发现。

6. Pd-Pt碲化物——贫Bi的黄碲钨矿比富Bi的黄碲钨矿反射率高。Pd-Bi-Te系列中Pt自由的矿物都是随着Bi含量增加而降低其反射率。

十分明显,产地不同的同种矿物由于矿石成因和形成条件不同而导致化学成分发生差异。

美国密苏里-罗拉大学地质系地球物理学系Pignolet-Brandom在其向会议提交并在应用矿物学委员会讨论会上宣读的论文《高温冶金产物的矿相学研究》中指出“高温冶金产物”的复杂特性给研究者提出了挑战。只有查清高温冶金产物的“相”成分及其结构关系才有可能分析其复杂的特性。而高温冶金产品通常是细粒紧密连晶且其光学性质和化学组成难于确定。他介绍了他们综合采用反光显微镜、电子探针、扫描电镜-能谱仪组合装置(SEM-EDS)和背散射分析等手段研究高温冶金产物的经验。反光显微镜对产物中的“不透明相”进行常规鉴定,SEM-EDS对“未知相”的主要组成元素和微量成分进行半定量的检测,进一步用电子探针作元素定量分析。背散射扫描可检查难区分的连晶内的物相是否均匀。冶金产物包括冶炼过程中的各种中间产物、炉渣、铅泉华、铜废渣等,比较这些产物对提炼金属有利的理想物理性质和不利的非理想物理性质最终可以防止在炉渣中的金属损失和帮助选择效益最好的冶炼方案。

三、新研究法和新装备

加拿大多伦多大学地质系J.C.Rucklidge在国际矿物学协会矿相学委员会主持的最后一次讨论会上阐述了他的题为《质谱加速器在地质学上的应用》论文。他介绍所谓质谱加速器(Accelerator MASS Spactrometry)就是指串联连接喷射离子源的纵列加速器构成的一套能够综合高空间分解力和低检测极限并测量范围广泛(多种元素和同位素)的装置而言。这种新装置测定同位素可达 10^{-15} 级,还能测定罕见的放射性同位素(传统仪器不能测定)。此装置从毫克级重量的抽提碳样品可以测定5万年前的 ^{14}C 和其他宇宙成因的 ^{10}Be 、 ^6Al 、 ^{36}Cl 、 ^{129}I 等同位素。此外还可以测定范围十分广阔的地质体。质谱加速器由于要求负离子注入加速器,故具有高电子吸引力的元素最适用于这种新装置检测。这些元素有C、O、S、Cl、Cu、Sn、Au和大多数铂族元素等。论文强调指出对这些铂族元素可以检测超ppb级的低浓度,对斯里兰卡、布什维尔德产石墨中的痕量元素可检测到 10^{-11} 级。质谱加速器还可以设法测定稳定同位素。出席这次学术会的中国矿物学家代表团部分成员参观了美国斯坦福大学的加速器装置。

加拿大矿物能源工艺中心矿物科学实验室的L.J.Cabri在讨论会上宣读了他的题为《显微部分诱导X射线激发(Micro-PIXE)技术在加拿大一些贱金属矿石研究上的应用》论文。他强调指出显微部分诱导X射线激发(Micro-PIXE——Partical Induced X-Ray Excitation)分析技术已成功地用于质子探针(Proton Probe)测定贱金属矿石中硫化物矿物的痕量元素(硫化物矿物作为“PIXE”的“厚靶”)。他介绍质子探针系采用能量消散探测器之非破坏性的痕量元素测定技术。由X射线产生之元素浓度精确的衍生强度可以利用X射线厚靶模型综合适量元素增生之最小平方编码的近代发展新成果而获得。标准化校准工作系由人造硫化物标准完成。诸如黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿和闪锌矿等矿物的检测极限是

小于5到20ppm,但元素Se为44ppm,Sn为50ppm。大家知道,许多贱金属硫化物矿石的主要问题是含银矿物(含Ag100—20%的矿物)、含银矿物(含Ag20—1%)和带银矿物(含Ag小于1%)的含银量精确测定问题。某些含Ag多于1%的带银矿物已超过电子探针的检测极限(如方铅矿含Ag0.9%、黄铜矿含Ag0.29%)采用电子探针法即不能检出(其他大多数矿物同此)。

L.J.Cabri指出显微部分诱导X射线激发技术已广泛应用于加拿大贱金属矿石(诸如Brunswick、Geco、Kidd河、Mattagami-Norit和Nanisivik等矿山)微量元素测定工作。例如测得38件Kidd河产黄铜矿样品90%含Ag大于10—12ppm,最高可达1600ppm,37件闪锌矿样品35%含Ag大于12—13ppm,最高可达300ppm。10件Brunswick矿山产黄铜矿样品含Ag28—106ppm,40件闪锌矿样品62%含Ag大于9—13ppm,最高可达54ppm。黄铁矿含Ag4.9ppm或略多(不能检出)。还有少数闪锌矿样品测定了其他痕量元素As、Se、Cd、In、Sn等的含量,黄铁矿样品测定了Cu、Co、Zn、As、Se、Sn等元素,磁黄铁矿测定了Cu、Ni、Co、As、Se、Ag等。

有意义的是,法国奥尔良地质矿物研究所G.Remond等在应用矿物学委员会主持之“问题与探索”专题讨论会上也介绍了他们综合应用显微部分诱导X射线激发质子探针(Micro-PIXE)和电子探针(EPMA)技术检测硫化物的痕量元素(Ag、Cd、In、Se、Ga、Ge、Hg、Cu等)的宝贵经验。他们对比两种方法都可测定的样品和元素(如闪锌矿含Cd1000—7000ppm、Ga1000—13000ppm、Cu2000—20000ppm)发现只有25%的样品测定结果有点差别,即达到了75%的吻合率。他们进一步发现黄铜矿的AgEPMA法的检测极限为300ppm,而PIXE法则为10ppm,EPMA法未检出In、Se、Hg闪锌矿样品用PIXE装置可以检测其含量。看来,显微部分诱导X射线激发质子探针在研究金属矿物的痕量元素含量很有发展前途。

国际矿物学协会矿相学委员会秘书、法国巴黎第六、第七大学矿物学结晶学实验室B.Cervelle教授等在讨论会上宣读了题为《铬铁矿光片的拉曼激光探针分析》的论文。该文以拉曼激光探针(Raman Laser Microprobe)探头面积约为一平方微米)研究了天然铬铁矿(Mg、Fe)(Cr、Al、Fe)₂O₄和人工合成的MgAl_{2-x}Cr_xO₄、FeAl_{2-x}Cr_xO₄、Mg_{1-x}Fe_xAl₂O₄光片。这种新研究法已查明铬尖晶石类矿物的拉曼带频率 ω_r (以 cm^{-1} 为其单位)随Cr、Al的含量变动而变化。B.Cervelle等给出54个测量数据制成的曲线图谱(以 ω_r 为纵座标、 $\text{Cr} + \text{Fe}^{3+} / \text{Cr} + \text{Al} + \text{Fe}^{3+}$ 为横坐标),得出最富铬矿物 ω_r 数值最小(680cm^{-1})、最富铝矿物 ω_r 值最大(760cm^{-1})的结论。

加拿大CANMET能源矿山资源部W.Petruk还在应用矿物学讨论会上推荐并介绍了具有选择可信图象、选编图象、自动分析图象能力的SEM-IPS-IA自动图象分析仪,推动了测试仪器联动化、自动化、电子计算机化趋势的发展。

国际矿物学协会矿相学委员会定量资料卡(QDF)编辑、英国不列颠博物馆(自然历史)矿物部A.J.Criddle在讨论会上介绍了金属矿物定量资料卡(第二版)的编辑出版情况。他强调第二版的特点是金属矿物鉴定除应有X射线研究资料外,化学成分系用电子探针分析确定和反射率色散曲线用电子计算机以数学方程式表达。当然,增补了第一版1977年出版以后的新资料。譬如第一版有204张资料卡片只包括155个矿物种和49个矿物亚种及变种,第二版则有420张资料卡片包括了327个矿物种和93个矿物亚种及变种,其中85%以上具有全

波段反射率色谱数据。此外，反光显微镜下的浸蚀技术也得到应有的考虑。第二版QDF光学资料十分详尽，不仅可以极容易地区分自然金、银金矿、金银矿等同系列矿物，而且还能区分诸如硒铜蓝和软碲铜矿等光学性质近似的矿物，非常明显，即将出版第二版QDF是一套具有权威性有用的定量资料汇集出版物。

联邦德国汉堡矿物学岩石学研究所H.J. Bernhardt为了适应矿相学仪器自动化、电子计算机化的发展趋势，推出了“金属矿物鉴定全自动系统”装置。H.J. Bernhardt指出反射率光谱是金属矿物最重要的鉴定特征，但过去未能普遍采用是商品仪器（显微镜及测微光度计）价格昂贵及缺乏测量数据和分析对比鉴定矿物的联合装置。该研究所制成了一种可测量金属矿物各种单色光反射率并利用电子计算机数据来鉴定矿物的简易全自动装置。此装置利用16个连续的滤光片或单色仪（柱状单色仪或光栅单色仪）得到400—700毫微米范围内每隔20毫微米的16个波长的单色入射光（与标准波长只差0.47—0.75毫微米），以微型电动机使之在显微镜系统中自动变动。该装置再配备HP-75C型小型电子计算机并联动以打印机、微型录放机、RS-232型计算机接口、数字电压表等。该自动装置约需100分钟时间完成16个反射率数据的测量、制图和方程化工作。再用1—15分钟时间即可完成未知矿物和已知矿物反射率光谱数据的对比步骤。最后由打印机自动给出未知矿物的可能名称。采用RS-232型接口可以改用更大型的电子计算机（如HP-9816型计算机），那时就能输入金属矿物的化学成分资料等用于综合鉴定矿物。

为了充分利用金属矿物的光学性质和化学成分来综合鉴定矿物，埃及开罗大学工程学院矿业系F. M. Nakhla教授宣读了题为《金属矿物用反射率参数和化学组成鉴定问题》的论文。他首先指出金属矿物的反射率 R_{470} 、 R_{640} 、 R_{650} 取决于矿物的化学、物理、晶体结构参数。强调矿物反射能力重要而可靠的数据是 ΔR （ R_{470} 减 R_{650} 的正差值）或 $\Delta R'$ （ R_{470} 减 R_{650} 的负差值）。由此他将金属矿物划分为两大类：

I. $R_{470} > R_{650}$ 的矿物类——即 ΔR 为正值的矿物，它们化学成分中的金属元素为Cu、Ag、Pb、Zn、As、Sb、Bi、U、Th、Sn、W、Ta-Nb、Cr、Mn、TR。这类矿物常显示白色、蓝色和各种色调的灰色反射色。上述金属元素的氧化物、含水氧化物等属于这一大类。代表性的矿物为硫锑铋铅矿（ ΔR 为40）、斜方辉铋铅矿（3.7）、硫锑铅矿（4.2）、脆硫锑铅矿（3.3）、辉铜矿（6.6）、赤铁矿（5.1）、磁赤铁矿（5.7）、蓝辉铜矿（8.7）、针铁矿（3.2）、纤铁矿（3.4）等。

II. $R_{470} < R_{650}$ 的矿物类——即 $\Delta R'$ 为负值的矿物，它们化学成分中的金属元素为Fe、Co、Ni、Pt、Ir、Au、Au + Ag、Te。这类矿物显示浅黄、深黄到红和褐色的自色反射色。代表矿物为碲金矿（ $\Delta R'$ 为-9.5）、斜方碲金矿（-6.5）、等轴硫钒铜矿（-2.8）、黄铁矿（-4.4）、白铁矿（-4.4）、方硫铁镍矿（-9.1）等。

F. M. Nakhla还在划分以上两大类的基础上再结合其他光学性质将170种金属矿物编成4个大鉴定表以帮助鉴定矿物。

由金属矿物鉴定定量化、计算机化的趋势所推动，美国密苏里-罗拉大学地质系地球物理学系R. D. Hagni等也向会议推出一个电子计算机系统和程序——ORE. ID程序，他也指出由于下列五种原因使反光显微镜在鉴定金属矿物方面不能充分发挥作用：（1）单一反光显微镜只能观测定性资料；（2）定量测量要求的仪器昂贵使大多数实验室难以配备；（3）反光显微镜只能提供一、两个简单的光学性质资料；（4）反光显微镜测定的大多数性质不够确

切；(5) 反光显微镜利用近代先进技术不够。

R. D. Hagni等提供的近代化金属矿物鉴定系统，其核心部分是一个指令命名为ORE。ID的电子计算机鉴定程序输入了649种金属矿物的定量、定性鉴定资料。定量资料包括有平均维克硬度值(352种矿物)和反射率数值。半定量和定性资料包括Talmage硬度分级(A、B、C、D、E、F、G共7级)、非均质性的强度(0、1、2、3、4、5、6共7级)、反射色的颜色和色调、内反射的颜色和色调。上述资料可由国际矿物学协会矿相学委员会编撰的定量资料卡片(QDF)获得。此外补充的资料则大部分来自美国密苏里-罗拉大学，其余来自文献资料。将未知矿物7个项目的资料输入计算机藉助ORE，ID程序与已知矿物数据对比，很快即可得出该未知矿物的可能名称。作者指出金属矿物化学成分的资料有助于鉴定金属矿物。作者还强调ORE，ID程序是一个可以发展的计算机程序，还能补充增加几个方面的新数据。比如78种铂族矿物的基本资料，407种矿物的颜色定量数据(色度坐标值X、y，视觉反射率Y，主波长 λ_d 和纯度Pe)。

由上述资料不难看出，国际矿相学的最新发展具有以下五个方面的特点：

1. 不断探索将最先进的新技术、新方法引进矿相学领域(如质谱加速器、质子探针、拉曼激光探针、扩展X射线吸收精细结构分析、自动图象分析系统等)；
2. 着重研究影响学科发展方向并能取得显著经济效益的重大课题，如对规模特大的火山岩型金银矿床、密西西比河谷式铅锌矿床、块状贱金属硫化物矿床、玻利维亚锡矿床、层控变质硫化物矿床、赫姆洛型金矿床、布罗肯-希尔层控型沉积变质铅锌银矿床等矿石进行深入的矿相学研究(传统方法和现代方法相结合)；
3. 对成分复杂、颗粒细小、研究难度大的硫盐类矿物、铂族矿物等进行详细的研究；
4. 重视金属矿物人工合成试验(如As-Sb-S体系、铬尖晶石类矿物等)、金属矿物物理(如表面性质)、穆斯堡尔谱(如 ^{57}Fe 、 ^{121}Sb 、 ^{119}Sn 等)以及工业应用的研究；
5. 定量化、自动化、电子计算机化。

但是，与此同时除少数国家外，国外矿相学界对金属矿物研究在地质找矿方面的应用重视不够。我国在金属矿物标型性研究、金属矿物找矿矿物学方面的探索应继续重点发展。我国矿相学工作者们给大会提供的中国产含铁神鹰铜矿、铜镍硫化物、金矿物、易解石、褐钨铀矿、辉铁锑矿、辉钼矿、辉锑镍矿、辉锑锡铅矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、碲化物、碲铋化物、黑钨矿、骑田岭矿(Qilianlingite, $\text{Fe}_2\text{Nb}_2\text{WO}_{10}$)、含银硫铜铁矿以及深海宇宙球粒中的镍黄铁矿、方铁矿、磁铁矿和浅海大陆架上沉积的铁锰氧化物和氢氧化物等的深入研究专题论文受到与会同行专家们的重视和好评。

有色金属工艺矿物学年评*

田 福 纯 执笔

(北京矿冶研究总院)

作为矿物工程学基础的工艺矿物学由于在研究方法与研究内容上的不断深入,应用范围不断扩大,以及工艺矿物学工作者亲自深入生产现场解决实际问题,近两年又取得新的进展。

一、金银工艺矿物学

在当前国内外市场金银需求量急剧增加,世界金银价格不断上涨情况下,国内外均出现了采金热,相应地金银工艺矿物学研究也蓬勃发展。

在地质探矿方面 为扩大金银资源,确定找矿方向,寻求成矿规律,研究了从源区—风化壳—洪积—坡积砂矿—冲积砂矿—滨海砂矿—海洋砂矿金在自然界的系列演变。近年来,铁帽型金矿床也受到重视。为扩大金储量,进行了外围金矿成矿预测的找矿矿物学研究,在我国也发现了多处铁帽金,而且运用晶体场理论解释了为什么金富集在铁帽第三带氧化富集带,为找矿起到了重要作用。此外,对细粒金的迁移机理的认识,提出了第四纪层状矿床的问题,需重视综合普查同第四纪和新生代泥质沉积物有关的新型层状金矿。此外,金矿勘探工作中利用石英的热发光性作为找矿标志寻找含金石英脉。对自然金的生物成因的研究结果指出,细菌将溶解的金从水中结晶出来,围绕菌体结晶长大,为在金矿区地下水和土壤中富集金指出了前景。

在难处理金的工艺矿物学研究方面 国外对卡林型金矿按金的赋存形式与矿物共生组合,将矿石划分为A、B、C三种类型。A型是上部氧化矿,黄铁矿已深度风化,氧化矿固有的渗透性和金粒度很细(1~5微米)造成毋需细磨而氰化提取迅速和金的回收率较高;B型由与碳质一起的含金黄铁矿组成,金在黄铁矿中呈亚显微细粒浸染,为防止碳在氰化过程中的再吸附需氯化或氧化,被称为难处理矿石;C型为金与细晶质玉髓和微晶石英共沉积的含金矿石,具有浸液不能到达的封闭孔隙,焙烧与氯化均无法改善的由粒度引起的难处理矿石。近年来在我国陕西勉县李家沟,湖南衡东石峡,贵州三都苗龙、册亨板其以及湖北大冶丰山铜矿外围角砾状大理岩中均相继发现大型卡林型金矿。经详细的工艺矿物学研究,其金矿含Au高达31.64克/吨,金矿化均匀,超高压电镜选区衍射发现金以0.0 μ 微米均匀分布于以水云母为主的粘土矿物中,试剂浸取试验证明为非物理吸附,而黄铁矿和毒砂等硫化物中的金只占不到6%,根据工艺矿物学研究结果,针对此种化学吸附状态的金,采用带正电荷的明胶作解吸剂,浮选精矿金达175.32克/吨,回收率70.58%,焙烧500°C开始破坏水云母结构

* 本文国内动态部分由工艺矿物学协作组成员提供

水时，金浸出率最大达89.83%，也说明金未进入水云母晶格（水云母晶体结构在750°C才被全部破坏），而是在水云母接面的静电力作用引起的化学吸附。苗龙金矿矿石金品位5.41克/吨，以其金—砷的独特关系，只有将金的载体矿物毒砂和含砷黄铁矿通过细磨从脉石中解离出来，浮选成砷金精矿。经对-20微米的毒砂—砷黄铁矿精矿（含Au79.3克/吨）用70% I_2 +14% NH_4I 浸取，只有2.27%浸出率，说明直接氰化提金行不通。根据工艺矿物学研究结果，针对此种金的存在形式，采取了回转窑低温弱氧化气氛脱砷，再高温氧化气氛脱硫，然后水溶液通 Cl_2 ，得Au、Cl或Au、Na络合物，再经锌粉置换工艺，金浸出率达90%。此工艺用于改造同类型的新疆克拉玛依的哈图金矿，也大大提高了该矿原有提取指标。铁帽金的工艺矿物学研究，如安徽铜陵代家冲铁帽金，江西武山铁帽金等相继进行了工作，铁帽金特点是以微细粒包裹金和裂隙金分布于褐铁矿中，直接氰化难以回收，一是矿石破碎加工过程中由于大量褐铁矿存在，易使金粒表面受铁污染生成次生膜难于氰化，另一是矿石中铁锰氧化物和粘土矿物的存在影响金的收率（溶于氰化物中的金被其吸附）。各种难处理类型的金矿石的冶金加工可从化学分析和金在各类脉石与硫化物相中的赋存形式的研究结果得到指导。此外，国外研究了自然金的化学成分对提Au的影响，银对金的氰化有影响，金—银合金的溶解速度随 A_g 含量增加而减慢。研究了金的粒度对提金的影响，研究结果指出，在浮选或氰化之前对大于0.2mm的粗粒金应用重选预选，可大大降低磨矿费用与药剂消耗。利用扫描电镜对自然金表面精细结构对提取金影响的研究结果指出，自然成因的表面瘤状和微孔对氰化有利而对混汞不利，而在工艺过程中造成的表面有嵌入物时混汞不利，对氰化无影响。

在赋存状态研究方面 利用电子顺磁共振发现了晶格金。通过不同温度下对含金与不含金毒砂的EPR谱线研究，前者具有明显的吸收峰，吸收峰面积大小与金含量成正比，其谱图具有电子空穴心的各向同性g因子特征，证明 Au^{+1} 替代 F^{+2} 进入硫化物晶格中，从而产生电子空穴心。采用穆氏鲍尔效应对河台金矿载金黄铁矿进行了测定，四极分裂值稍大，峰高与半宽度较不含金黄铁矿存在较大差异，说明有部分铁原子核处电场梯度发生变化为金原子进入黄铁矿晶格或空穴提供了佐证。

银的工艺矿物学研究 银的工艺矿物学研究比金复杂得多。银以主要元素、微量元素和不定量形式存在于其中的矿物超过200种。贱金属硫化物中的银，在成矿期大部分溶解在方铅矿中，少部分溶解在黄铜矿中。方铅矿中的银在多数情况下富集在黝铜矿或其它含银矿物的微米级颗粒中。黝铜矿随其粒度和含银量浮游性质有复杂变化，含Ag较低的（平均5.25%）多数进入铅精矿，但含Ag高的（平均含Ag11.37%）或大颗粒黝铜矿进入铜精矿，少量很细的与黄铁矿连生的，或含Ag最低的颗粒则损失于尾矿。银金矿或其它银矿物极易氧化生成硫化银薄膜，薄膜具脆性，磨矿过程易泥化损失于尾矿。解决银损失的途径之一是减少矿石堆放时间，防止氧化。银又在许多硫化物或硫酸盐矿物中以固溶体形式取代铜，在碲化物和硒化物中取代铜、金和某些铂族元素。由于银矿石的复杂性，只有在充分的工艺矿物学研究基础上才能更好的回收银。

由金属学会选矿学术委员会工艺矿物学组、有色金属总公司科技部工艺矿物学科技协作组和中国选矿情报网工艺矿物学网积极组织研讨的金工艺矿物学规范问题，已相继制定了伴生金、脉金、砂金的工艺矿物学规范试行草案或推荐草案，对统一认识、统一表述起到了积极作用。

近两年来，完成了许多地区的脉金、砂金以及几个大的铜、铅、锌基地的伴生金银的工

艺矿物学研究。摸清了Au、Ag分布特点，粒度特征，产出的规律性，给选别工艺提供了依据。如对山东18个典型金矿的金的工艺矿物学研究，根据载体矿物种类，金粒大小及其工艺特性，对山东脉金矿进行了工艺类型划分。广东省提出了对全省金的工艺矿物学普查课题。随着综合回收伴生金银的呼声日益提高，湖南省对已勘探完毕的矿山，提出了重新评价金、银的问题。几乎所有伴生金、银的矿山都提出了要求进行金、银工艺矿物学研究，进行矿石可处理性评价。一些有色金属选厂则多数要求作生产流程的工艺矿物学考查，要求了解金、银在工艺过程中的行为，金银富集点和回收途径，以促使矿石中的金、银进入计价产品中。如瑶岗仙钨矿建厂多年未回收伴生的银与铜，经过工艺矿物学考查，其中金多以独立矿物形式存在，有银黝铜矿、辉铋银铅矿、深红银矿、辉铋银铅矿、自然银、脆银矿、黝锡银矿、铋银矿等多种银矿物，对银在矿石中的分布与配分，银矿物的工艺特性均作了详细的研究后，使选厂改造了工艺流程，银的回收率由原来的30%提高到70%，铜的回收率由原来45%提高到85%，每年多产银1.95吨，铜114吨，年盈利增加40—50万元。通过对湖南水口山铅锌矿、黄沙坪铅锌矿、瑶岗仙钨矿、汝城钨矿等14个矿山相继进行的金、银工艺矿物学研究，使选厂改造了流程与药剂制度，综合回收了伴生金、银。综合14个矿山的年产值就增加了千万元以上。江西德兴铜矿85年销售收入的14%来自于回收伴生金，而总利润的74.52%为提金所得。

二、利用先进测试仪器，加强了工艺矿物研究

随着贫、细、杂复合矿石开发利用任务的日益增加，针对这类资源开发过程中出现的问题开展的工艺矿物学研究也不断深入，在矿石及矿物工艺性质研究方面有了新进展。

在纠正矿物混乱名称方面 由于现代测试手段的不断更新，大大提高了研究工作中的精确度与准确度。如在金川铜镍矿石中确定了羟镁硫铁矿 $6\text{Fe}_{0.9}\text{S}\cdot 5(\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})(\text{OH})_2$ 的存在，由于它的特征与墨铜矿相似，过去一直与墨铜矿混淆，准确定名，对考查镍、铜损失原因有直接帮助。在青海锡铁山铅锌矿氧化带发现了柴达木石 $(\text{ZnFe}^{+2}(\text{SO}_4)(\text{OH})\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ 和铜银黝铜矿 $(\text{Cu}, \text{Ag})_{10}\text{Cd}_2(\text{Sb}, \text{As})_4\text{S}_{13}$ ，在广西银母寺铅锌矿床中发现银镍黄铁矿。此外，又如汞银矿、锰银矿的发现等等对研究矿床成因和综合利用将有一定的意义。

在对资源进行评价方面 对有争议的我国西北有色金属矿山重要基地锡铁山铅锌矿出现的占相当大储量的含锌菱铁矿能否利用的问题，进行了工艺矿物学研究，利用微束分析等综合技术查明了锌在矿石中的分配和含锌菱铁矿（锌菱铁矿）的化学组分与矿物嵌布特征。在石膏型矿物石中，纯锌菱铁矿含Zn仅13.85%，片岩型矿石中锌菱铁矿含Zn才12.76%，焙烧后含Zn也不大于22%，再佳的选别工艺也不可能选出百分之百的纯矿物，因此锌精矿品位不会大于15%，达不到冶炼要求指标。工艺矿物学研究结果证明，这种占全区38%储量的矿石目前无法利用，应从储量表中剔除。工艺矿物学研究与矿山地质密切结合可及时指导矿山基建工程的安排与出矿计划的制定。

对湖南川口钨矿钨的存在形式和分配规律的研究，查清了相当一部分钨以含钨褐铁矿形式存在。从而正确评价了川口钨矿的经济价值，确定了目前无法利用，避免了盲目上马建厂。

在系统评价矿石可处理性与揭示矿石难选原因的本质方面 针对金川铜镍矿石降镁提铜