

工艺矿物学近十年的主要进展

彭明生¹, 刘晓文², 刘羽³, 杨志军¹

1. 中山大学 地球科学系, 广州 510275; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;
3. 福州大学 紫金矿业学院, 福州 350108

摘要:我国的工艺矿物学在过去十年中的重大进展主要表现在以下几方面:(1)矿物加工和冶金工艺矿物学的发展与应用;初步建立了矿物-生物浸矿机制和各类微生物冶金的制约因素,为生物选矿和冶金过程中工艺矿物学奠定了新的理论基础。(2)新的分析技术的发展及其应用使工艺矿物学开始从定性走向定量;探测和揭示了微生物在分子水平上与矿物表面相互作用和能量转换。这些研究将有助于了解微生物矿产开采和微生物选矿和冶金的控制因素的机制,为建立一个新的选冶工艺矿物学打下了深厚基础。(3)将矿物的晶体化学,矿物物理学,量子矿物学与工艺矿物学紧密结合,使这门应用学科不仅在选、冶、加工工艺等提取其中的某种有用元素,而且也促进了新兴的矿物材料和技术的发展。总之,在未来新的分析技术发展中,将被更广泛地用于研究矿物质,矿物-水界面和矿物-微生物界面,这不仅在新型的工艺矿物学发展中取得了好的成果,而且在环境矿物学,也有广泛的应用前景。

关键词:工艺矿物学;生物选矿;生物冶金;矿物材料;新的分析技术

中图分类号:P57 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)03-0210-08

The Main Advances of Process Mineralogy in China in the Last Decade

PENG Ming-sheng¹, LIU Xiao-wen², LIU Yu³, YANG Zhi-jun¹

1. *Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China;*
2. *School of Resources Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;*
3. *Zijin Mining Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China*

Abstract: The main advances of process mineralogy in China in the last decade occur in the following areas. (1) Process mineralogy has been applied to study mineral process and metallurgy which helps understand mechanisms of microbial-mineral extraction and controlling factors in microbial metallurgy, and such establish a solid foundation for new applications of process mineralogy in mineral process and metallurgy. (2) New analytical technologies have greatly advanced process mineralogy from qualitative to quantitative analyses, for example, Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electronic Microscope (QEMSCAN) and Mineral Liberation Analyzer (MLA) have been developed to determine mineral compositions, morphology, particle size, textures among mineral particles and trace element distribution in a fast and precise way. This lend a hand to probe and to understand microbial-mineral interfacial interactions and related energy conversion at a molecular-level, and such established a foundation for new advances of metallurgical process mineralogy. (3) Process mineralogy together with mineral crystal chemistry, mineral physics and quantum mineralogy benefit not only the extraction of valuable elements during mineral processes and metallurgy but also the advance of new mineral materials and technological applications. In summary, the future advance of new analytical techniques (e. g., synchrotron radiation spectroscopy and microanalysis) will be more extensively used in investigations of minerals, mineral-water interfaces and mineral-microbial interfaces and provide better understanding in process mineralogy as well as in environmental mineralogy and molecular environmental geochemistry.

Key words: process mineralogy; microbial processing; microbial metallurgy; mineral materials; new analytical; technologies

收稿日期:2011-12-05 收到,2012-02-07 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40502007;40940013;41073021)

第一作者简介:彭明生(1938-),女,教授,博士生导师,主要从事矿物物理,量子矿物学和工艺矿物学研究. E-mail: pssgz@163.com.

20 世纪以来新理论、新技术的发展与突破,矿物学和其它学科一样发展很快^[1~6],其中工艺矿物学在最近十年里也取得了飞跃性的发展。自 1995 年成立工艺矿物学专业委员会以来,我国矿物学家将矿物的晶体化学、矿物物理学与工艺矿物学紧密结合,使这门应用学科不仅在选、冶、加工等方面有所应用,而且在矿物材料工艺学、宝石矿物、环保矿物材料等研究方面的应用都取得了新成果。工艺矿物学的发展已成为促进我国经济发展的一种重要科学技术手段。然而,在发展此应用科学的同时,人们出于经济效益的考虑,往往只注意了应用技术的开发,忽视了基础理论的深入探讨,导致在矿物材料、宝石改色和元素的赋存状态等研究领域难以取得预期效果。造成这一现象的主要原因还是晶体化学、矿物物理学与量子矿物学研究的基础不够。因此,在开展应用研究的同时一定要重视理论的研究和发展。

1 选矿与冶金工艺矿物学的发展

传统工艺矿物学的任务是为矿石的可处理性提供矿物学评价,对矿山的生产流程作矿物学考察与矿物学故障分析,并具体研究矿物(元素)的赋存状态,矿物的嵌布粒度特征、镶嵌关系等。工艺矿物学的研究一直局限于为矿山的选矿流程提供宏观矿物学依据。落后的研究手段使一些伴生有用元素的赋存状态无法查明,许多贵金属元素的回收率一直很低,矿床的综合利用率无法提高。近十年来矿物资源的综合利用获得了很大的提高^[7~10]。随着量子理论的发展,矿物谱学和微束分析方法获得广泛的应用,工艺矿物学的面貌焕然一新。谱学和微束是研究元素赋存状态的重要方法^[11]。彭明生等^[12,13]的研究发现了康家湾的含 As 黄铁矿中存在晶格,查明了长期困扰白钨矿选矿工艺的“灰钨矿”包裹体。还发现其中有橄榄状的自然镍和纳米级的铁锰矿物^[14]。近十年来人们对不可见金的赋存状态研究十分重视,发现了纳米金、晶格金。在 2010 年全国矿物科学与工程大会(福州)和 2011 年中国矿物岩石地球化学全国学术研讨会上,研究者报告了含砷和含碲金矿床矿物中金的赋存状态,论述了我国南方寒武系黑色页岩中铂族元素赋存状态——铂钯的差异富集现象,采用金的穆斯堡尔谱(MOS)和 X 射线光电子能谱(XPS)发现含有不同于自然金的化学结合金 $[\text{AsAu}]^{2-}$ ——金纳米团金显负价态,提出它是金在自然界重要存在的形式之一;确定了广西金牙和贵州烂泥沟卡林型金矿中原生矿石毒砂和含砷

黄铁矿中不可见金呈负价态^[15]。表明毒砂和含砷黄铁矿中存在晶格金,这些研究成果丰富了人类对自然金成矿规律的认识,促进了金的选矿、综合利用的工艺水平。元素的赋存状态研究是确定选矿和冶金工艺流程的关键,也是提高回收率的关键。广西金牙和贵州烂泥沟晶格金选矿回收率较低。我国含砷难处理金矿资源丰富、分布广泛,由于常规氰化浸出率较低,近年来采用细菌氧化-氰化浸出法;在细菌氧化过程中,含砷金精矿中的毒砂易被氧化分解,经过 HQ0211 菌(以氧化亚铁硫杆菌为主的混合菌)氧化后,脱砷率可达 93.10%,而在氰化过程中含砷金精矿中的毒砂无法被氧化分解,因此,必须强化细菌氧化过程,使载金毒砂中的金粒充分分离或暴露^[16~22]。

我国铝土矿铝硅比小于 5 的低品位铝土矿分离难、氧化铝提取效率低、铝电解能耗高;通过对我国铝工业面临的难题研究,近年来突破选矿领域表面组份和性质相似的矿物间分离的难题,构建了铝土矿中矿物晶体结构、化学组成与表面润湿性、电性、可浮性的相互关系,建立了系统的铝矿物分离浮选剂分子组装和界面作用力理论,实现我国低品位铝土矿资源的高效利用,扩大铝土矿可利用资源量 2 倍以上。通过新疆羟硅铍石型铍矿矿石的工艺矿物学研究,发现有用元素铍的赋存状态主要以在羟硅铍石中为主,且羟硅铍石存在于萤石脉之中,这些认识为矿石的分选方法和工艺条件提供了理论依据,同时提供了成因矿物学依据和找矿标志,扩大了矿床储量,使目前有经济价值的铍矿物增至五种^[23,24]。

细菌氧化法具有投资少、生产成本低廉、流程简单、操作安全及环境污染小等优点。中南大学 1952 年建校以来,其选矿和冶金工艺学学科就居于亚洲的前列,在原中国有色金属工业总公司矿产资源生物提取基础实验室和湖南省矿冶生物工程中心的基础上,于 2004 年组建生物冶金教育部重点实验室,获得了多个 973 项目,即对“微生物冶金的基础”和“微生物冶金过程强化的基础”进行研究。研究主要围绕利用微生物将矿石中的有价元素选择性浸出,制备高纯金属及其材料的生物冶金展开,以解决我国特有的低品位复杂矿产资源工艺难题,扩大我国可开发利用的矿产资源量^[25~30]。

微生物浸矿体系即微生物与矿物间形成的界面是一个既有生物活性又有化学活性的界面,它向经典界面化学提出了许多新问题,在进一步开展微生物与矿物相互作用研究时必须要考虑的。首先微生物

物是一个复杂系统,微生物细胞的胞内、胞外连同与微生物-矿物固体间构成的各种界面都是动态的,是在不断变化中的复杂体系;其次微生物与矿物的相互作用是一个能够引起微生物细胞结构改变和固体结构与功能改变的复杂过程,不能简单地用表面吸附热力学和动力学来描述。针对微生物与矿物相互作用过程中的这些特殊性问题,从生物学和矿物学、冶金、化学等多学科交叉层次上理解这一复杂系统中有机基质与无机矿物交互作用的特征,从分子水平研究微生物-矿物多相界面生物学-化学过程的理论问题,揭示生物有机体调控或代谢产物诱导矿物氧化分解的机制及矿物与微生物的作用对微生物生命活动及微生物群落多样性的影响,发现各类微生物冶金的制约因素^[31~34],为解析和调控生物冶金过程中工艺矿物学研究奠定了新的理论基础。

探测微生物-矿物作用前后界面物种的组成和物态的变化,直接分析浸矿过程,结合透射电镜、扫描电镜、扫描隧道显微镜,原子力显微镜等,原位观测微生物-矿物作用过程中界面形貌、结构特征,探索界面结构特征与微生物-矿物作用的内在联系,为微生物-矿物多相界面相互作用理论研究提供最直接的微观实验数据,推进相关理论研究的深层次发展,从而揭示生物有机体调控或代谢产物诱导矿物氧化分解的本质。采用激光共聚焦显微镜, FISH 探针等生态分析技术,研究微生物在矿物表面吸附、形成生物膜的过程及生物膜的空间结构。通过基因组学及蛋白质组学技术,对硫氧化系统中功能基因及主要蛋白质进行分析,揭示微生物浸矿体系细胞与矿物表面间的物质和能量传输规律,并最终建立硫化矿物浸出化学-生物学机制。

针对我国复杂低品位铜镍钴、铜钼和铜锌硫化矿资源,研究生物冶金复杂系统多样性规律与生物冶金新体系设计原理,解决生物冶金工程条件、物理化学因素调控和微生物群落结构与功能分析相结合的难题,形成原生硫化矿浸出与溶液分离提取技术原型。系统化地集成或优化生物氧化及提金技术,实现大规模的生物堆浸氧化生产,清洁、高效地利用低品位高砷难处理金矿资源,使工业生产中处理金精矿的砷含量提高到 10%。

对尾矿和冶金渣进行工艺矿物学分析^[35~39],并利用各种矿物加工和冶金方法进行探索,寻求资源,在尽可能回收的前提下,对固体尾矿和冶金渣进行材料深加工,不仅实现固体废弃物的综合治理,并且实现经济上的增值。例如香花岭地区尾矿综合利用研究、钨矿尾砂工艺矿物学研究、梅山钢渣处理制酸

污水及钢渣后续利用研究(钢渣工艺矿物学部分)等生物-矿物多相界面的研究离不开新技术、新方法的发展和运用。

2 新技术和新方法的发展是工艺矿物学发展的支柱

矿物学研究的每一个阶段都以新技术和新理论的引导为标志。工艺矿物学的研究更是如此。从矿物的应用来看,除了提取有用金属的传统选冶方向工艺矿物学外,每一种矿物实际上都是具有独特性能的一种材料,

工艺矿物学研究技术的突破,是澳大利亚开发研制的 QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electronic Microscopy),该系统由 X-射线能谱确定矿物的成分,由背散射电子像区分物相。矿物的自动识别由其软件中的 SIP (Species Identification Program) 完成,它为一个矿物能谱成分数据库,能谱分析数据与此数据库中数据比对,从而识别矿, QEMSCAN 可自动测定解离度、矿物嵌布粒度、矿物相对含量等工艺矿物学参数,同时可编程得到研究者感兴趣的参数。

自动矿物分析仪 (Mineral Liberation Analyser, MLA) 是目前世界上最先进的工艺矿物学参数自动定量分析测试系统,由于它能快速、准确地测定矿物组成及含量、元素赋存状态、产品磨矿粒度分布等工艺矿物学数据,可以实现对选矿厂工艺流程合理性的快速评估,为企业改进生产工艺、提高资源回收率提供技术依据。MLA 是由澳大利亚昆士兰大学矿物研究中心在充分利用背散射电子像区分矿物相的基础上开发研制而成。X-射线能谱能进行多点分析,可供灵活选择,增加矿物鉴定的准确性。对扫描电镜的工作距离进行了优化,使所得到的背散射像更加清晰。该仪器的投入使用,将使我国矿产综合利用装备迈入世界先进行列。

北京矿冶研究总院、中国地质科学院矿产综合利用研究所和紫金矿业集团均已经引进了 MLA,北京矿冶研究总院和美国 FEI 公司建立了中国联合实验室,目前研究人员充分发挥 MLA 的技术优势和测试特点,在矿石中发现了碲铋钨矿、铋碲钨矿、碲钨矿等共计 13 种钨钼矿物。同时,还查清了矿石中钨钼矿物的分布特征、嵌布粒度以及钨钼元素的赋存状态。并在金矿、稀土以及磷矿等类型矿物的工艺矿物学研究中取得了一系列重大的成果。

由此可预见 MLA 和 QEMSCAN 的自动扫描电镜系统将成为以后工艺矿物学研究的重要手段,在

未来的一段时间内,工艺矿物学研究机构都将会试图开发自己的工艺矿物学参数测定系统,充分运用这一技术优势,积极探索其新的应用方法和领域,进一步拓展 MLA 在工艺矿物学研究中的应用范围。人们把应用这样系统开展的工艺矿物学研究称为“定量矿物学”(Quantitative Mineralogy)和“自动矿物学”(Automated Mineralogy)。工艺矿物学参数自动测定系统的出现,是工艺矿物学领域所取得的最大成就。这些系统的出现不仅使解离度测定实现了自动化,也使解离度测定的准确性和可重现性得到了很大提高。许多研究机构已在展开这一领域工作。

另外 LAM-ICP-MS(激光消溶微探针感应耦合等离子体质谱)和 SIMS(二次离子质谱)对原位痕量元素分析,特别在系统分析铂族元素(PGE's)和金微量的应用,在近 10 年也得到广泛应用。

3 近十年工艺矿物学发展的新增长点——矿物材料工艺学

1995 年在工艺矿物学成立的同时出版了我国第一部有关专辑——《矿物物理与矿物材料新工艺》^[20],极大地推动了我国工艺矿物学新增长点的发展。在全国召开工艺矿物学和矿物材料工艺研讨会 6 次、学术成就在国内产生了导向性作用。

矿物材料资源丰富。与过去大多数矿产资源利用不同,矿物材料不是选冶工艺提取其中的某种有用元素,而是利用矿物的某些物理、化学性能,开发非金属矿物的低成本综合利用,工艺技术是矿物材料研究的基本思路。这两大应用矿物学科学的结合,不仅推动了国民经济和高新技术的发展,同时也极大地丰富了本学科内容,成为工艺矿物学发展的又一充满生机活力的生长点^[4~7]。随着矿物材料的制备和天然矿物的改性技术的发展,高技术矿物材料的出现也将成为可能。

“同步辐射 X 光吸收光谱及其在工艺矿物学上的应用”体现了新技术在矿物物理及工艺矿物学方面的应用成果。兰晶石,红柱石,硅线石的化学成分相同,因局部结构不同,AL 的 K 边 XANES 分别为 1568.2 eV, 1567.8 eV, 1566.0 eV, 对应 AL 的配位数分别为 6, 5, 4。AL 的 K 边能量随着配位数增加而增大,化学键的强度增强,影响到这三种矿物的晶胞体积和比重,由此影响选矿工艺流程。同步辐射 X 射线吸收光谱(SRXAS)也已应用于以矿物为载体的环境催化剂的研究、固-液界面的微观机制研究、毒性痕量元素在矿物中赋存状态的研究、核废料的

矿物处置研究等^[40~46]。无机-有机复合柱撑粘土的微结构研究中利用固体高分辨魔角旋转核磁共振技术(MASNMR)谱学研究,对高岭石-莫来石热转变及蒙脱石酸活化过程中的微结构演化进行了深入细致的研究。提出了影响高岭石的热稳定性的主要决定因素。用 EPR 谱揭示了重金属离子在蒙脱石中的三种不同赋存状态,完善和发展了粘土矿物对重金属离子的吸附理论,利用透射电子显微镜结合能谱和选区电子衍射对纳米矿物材料研究和工艺处理取得了新的进展^[47~50]。例如矿物深加工、矿物材料制备过程中表征微观结构及物化特性提供了先进测试手段与科学的分析方法。随着我国化学工业和冶金工业的快速发展,含重金属铅、铜、镉、铬、汞等废水污染已成为我国严重的社会问题。由于这一类废水中含有的重金属离子不能被生物降解和破坏,在人体内长期积累会导致慢性中毒。由此矿物学环境属性与无机界天然自净化作用原理,得到广泛的应用,使矿物材料研究与环境的联系更加紧密,提出第四类污染治理方法——矿物法。例如在利用黄铁矿和磁黄铁矿强还原性一步法,还原六价铬与沉淀三价铬污染物^[51, 54]、蛭石热效应固硫除尘、钙基蒙脱石低成本制备垃圾填埋场防渗材料、电气石环境材料的开发利用等研究方面取得了进展,为治理环境污染提供了新途径。一些化学工业区利用磷灰石进行重金属废水治理。工业废弃物的资源化也越来越受到重视,出现了一系列的新成果^[55, 56]。

金刚石与其它宝石矿物材料的合成与优化:近十年对我国的蓝宝石、海蓝宝石、黄玉等进行了一系列的优化处理,对淡黄色金刚石进行了退色处理,褐色金刚石进行了辐照处理。褐色和红色金刚石中的常见的全位错和刃型位错均属后期变形成因位错。辐照改色的红色天然金刚石和辐照改色深紫红色天然金刚石的 TEM 研究表明它们都具有强烈的晶格畸变,存在点-线-面的缺陷,能直接观察到晶格条纹像和原子像-点缺陷(空隙-电子心)。认为辐照改色的红色和辐照改色的其它颜色的金刚石是由于辐照产生的色心所引起的,与改色前后的塑性变形无关^[57, 58],对于金刚石的合成和优化具有指导意义。我们对国产六面顶高压设备的温度和压力控制系统进行了全新的设计和改造,使其具备了高精度、高稳定性长时间的精确稳定控制,满足了宝石级金刚石的合成要求。研究了 Ni-Mn-Co 合金触媒和多种自己设计不同配比的铁基触媒合成宝石级金刚石的特点,配制出了优化配比的适合于宝石级金刚石生长的优质 Fe 基合金触媒,例如 Fe-C(H)系高温高

压合成金刚石的形态大多为八面体与天然金刚石相同并合成出了尺寸为 5 mm 的优质 Ib 型宝石级金刚石单晶。在此基础上,通过在合金触媒中添加适当的氮杂质俘获元素,最终合成出了尺寸为 4 mm 的高纯度宝石级 II a 型金刚石单晶。化学气相沉积(CVD)金刚石,人们利用高温低压 CVD 合成金刚石取得较大的突破,是人工合成金刚石技术发展的第二次大飞跃。成功地进行了宝石级金刚石的合成,生长出大颗粒——10 ct 的达到宝石级的浅褐色金刚石,并将其改色成功,倍受世界关注。2011 年又合成了 13.5 ct 优质金刚石^[59, 60]。氢是金刚石中仅次于氮的最丰富杂质元素之一,无论是天然金刚石、HPHT 合成金刚石,还是 CVD 多晶金刚石,都不同程度地存在氢杂质,而且相关分析表明氢进入金刚石中的量与压力大小呈现一定的相关关系。在不同类型的金刚石中会以不同的电荷状态的氢进行迁移与扩散,氢还会以一定的化学态自陷于金刚石的结构中。大量的理论与实验结果表明:氢在金刚石体内的存在会影响金刚石的电导率、热导率及红外传播等属性^[61]。

金刚石改性的复合材料,人造钻石粒以铜渗透制成上下二层金属,这种复合材料——钴铜导热板已经取得了专利,于 2010 中国国际高新技术成果交易会上获得“优秀产品奖”。

4 工艺矿物学的展望

(1) 没有先进的基础理论指导和先进的测试手段作后盾,工艺矿物学研究不可能得到最大的突破,深入的基础理论研究先进的测试手段的应用是工艺矿物学发展的基础,因此应加强基础理论的研究和先进的测试手段的应用。

(2) 矿产资源高效利用和实现矿业可持续发展。促进工艺矿物学与矿物选矿、冶金、采矿以及地质探矿等学科更大程度的融合,使工艺矿物学研究为矿山企业优化选冶流程服务,不再只满足于弄清其组份和结构,镶布粒度和嵌镶关系。关键是国家要重视发展矿山企业。只有巨大的矿山企业才有能力组织完成从地质勘探到磨矿、选矿到出产品这一整体过程的最优化,保证资源高效回收,也带动工艺矿物学得到发展。

(3) 加强矿床的工艺矿物学评价工作,针对每个新发现的矿床除了详细的地质工作外,还应该针对不同矿石做详细的工艺矿物学工作。工艺矿物学研究的成果不但可以为矿物的加工工艺和综合利用提供依据,还可以为成矿规律的研究和矿床预测提

供成因矿物学的微观信息,例如矿物标型特征。

(4) 建立数字化 MLA 的系统。快速准确获得工艺矿物学参数,建立数学模型预测选矿指标是工艺矿物学发展趋势。目前最先进的自动测定系统 MLA 的引进,应该与矿山企业相结合,与生产相结合,才可望取得重大成果。

参考文献 (References):

- [1] 彭明生,李迪恩,施倪承,杨志军,李国武,张恩. 改革开放以来我国矿物学的发展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(增刊), 18-24.
Peng Mingsheng, Li Dien, Shi Nichen, Yang Zhijun, Li Guowu, Zhang En. Since China's reform and opening up the development of Mineralogy and prospect[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(suppl.), 18-24. (in Chinese with English abstract)
- [2] 彭明生,梁金龙,张恩,杨荣勇. 世纪之交工艺矿物学的发展与展望[A]. 欧阳志远. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望[C]. 北京:原子能出版社, 1998:7-14.
Peng Mingsheng, Liang Jinlong, Zhang En, Yang Rongyong. The turn of the century the development and Prospect of process mineralogy[A]. Ouyang Zhiyuan. The turn of the century mineralogy, petrology, geochemistry, retrospect and prospect[C]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998:7-14. (in Chinese)
- [3] 彭同江. 我国矿物材料的研究现状与发展趋势[J]. 中国矿业, 2005, 14(1):17-20.
Peng Tongjiang. Present situation and development of mineral materials in China[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(1):17-20. (in Chinese with English abstract)
- [4] 廖立兵. 我国矿物功能材料研究的新进展[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(9):151-158.
Liao Libin. New development of functional mineral materials in China[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(9):151-158. (in Chinese with English abstract)
- [5] 汪灵. 矿物材料的概念与本质[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2):1-9.
Wang Ling. Concept and essence of mineral materials[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(2):1-9. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈敬中. 纳米科技的发展与纳米矿物学研究[J]. 地质科技情报, 1994, 13(2):32-38.
Chen Jingzhong. Development of nano science and technology and study of nanomineralogy[J]. Geological Science and Technology Information 1994 13(2):32-38. (in Chinese with English abstract)
- [7] 熊述清,马成义. 某铂钯铜镍共生矿选矿技术研究[J]. 矿产综合利用, 2003, 4:3-7.
Xiong Shuqing, Ma Chengyi. Experimental Research on Mineral Processing Technology for a Pt-Pd-Cu-Ni Intergrown Ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2003, 4:3-7. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘敏. 金宝山铂钯矿多元素的相关关系与铂族矿物的产出形式[J]. 矿产综合利用, 2002, 5:28-32.
Liu Min. Multielemental relationship of Jinbaoshan Pt-Pd ore and

- occurrence of platinum group minerals[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2002, 5: 28-32. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨磊, 刘飞燕, 刘厚明, 陈小青. 青海某铜铅锌矿床中伴生银的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2009, (2): 22-25. Yang Lei, Liu Feiyan, Liu Houming, Chen Xiaoqing. Process Mineralogy Study on Associated Silver in a Deposit in Qinghai Province [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009, (2): 22-25. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨磊, 刘飞燕, 徐莺. 某铷矿的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2010, (6): 25-27. Yang Lei, Liu Feiyan, Xu Ying. Process Mineralogy Research on a Rubidium Ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2010, (6): 25-27. (in Chinese with English abstract)
- [11] 彭明生, 李迪恩. 矿物谱学研究及其意义[J]. 矿产地质研究院学报, 1986, 4: 40-49. Peng mingshen, Li Dien. Mineral spectrum of research and its significance[J]. Mineral Resources and Geology, 1986, 4: 40-49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 彭明生, 李勋贵. 康家湾铅锌金矿床金的工艺矿物学研究[A]. 北京第五届工艺矿物学会议论文集[C]. 北京: 北京矿冶研究总院, 1991: 18-21. Peng Mingsheng, Li Xungui, The Kangjiawan lead and zinc gold deposit gold process mineralogy[A]. The fifth process mineralogy conference proceedings[C]. Beijing Research Institute of Mining and Metallurgy, 1991: 18-21. (in Chinese)
- [13] 彭明生, 张惠芬. 矿物物理与矿物材料新工艺[M]. 广州: 中山大学出版社, 1995. Peng Mingsheng, Zhang hui Fang. New technology of Mineral physics and mineral materials[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1995. (in Chinese)
- [14] 彭明生. 海洋锰结核的谱学研究及其意义[A]. 香港科技大学, 97 海岸海洋资源与环境学术讨论会论文集[C]. 香港: 香港科技大学出版, 1998: 139-143. Peng Mingsheng. A spectroscopic study of the marine manganese nodules and its significance[A]. Hong Kong University, Symposium Proceedings of 97 coastal marine resources and environment [C]. Hongkong University of Science and Technology Publishing, 1998: 139-143. (in Chinese)
- [15] 李九玲, 元锋, 徐庆生. 含砷和含碲金矿床矿物中金的赋存状态—负价金和芥末金研究进展[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 64. Li Jiuling, Yuan Feng, Xu Qingsheng. Mode of occurrence of arsenic and minerals containing tellurium gold deposit gold - the negative price of gold and mustard gold research progress [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(suppl.): 64. (in Chinese)
- [16] 马驰, 卞孝东, 王守敬, 郭俊刚, 王盘喜. 金矿的工艺矿物学研究[J]. 黄金, 2011, 32(10): 47-50. Ma Chi, Bian Xiaodong, Wang Shoujing, Guo Jungang, Wang Panxi. Research on process mineralogy of gold ore [J]. Gold, 2011, 32(10): 47-50. (in Chinese with English abstract)
- [17] 石玉臣, 常耀超. 某含砷金矿的工艺矿物学研究[J]. 有色金属工程, 2011, 5: 41-43. Shi Yuchen, Chang Yaochao. Process Mineralogy of containing arsenic and gold mine in Qinghai [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2011, 5: 41-43. (in Chinese)
- [18] 李艳峰. 某难处理金矿的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011, 5: 1-4. Li Yanfeng. Process Mineralogical Research on a Refractory Gold Ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011, 5: 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李岩, 刘爽, 徐政. 安徽某高砷高硫难处理金矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2010, 10: 75-78. Li Yan, Liu Shuang, Xu Zheng. Investigation of beneficiation for a high arsenic & sulfur-containing gold ore from Anhui Province [J]. Metal Mine, 2010, 10: 75-78. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨洪英, 杨立, 魏绪钧, 孙铭. 高砷金精矿工艺矿物学和细菌氧化[J]. 有色金属, 2000, 52(4): 64-67. Yang Hongying, Yang Li, Wei Xujun, Sun Min. Process mineralogy and bacteria oxidation of high arsenic gold concentrates [J]. Nonferrous Metals, 2000, 52(4): 64-67. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨洪英, 巩恩普, 杨立. 低品位双重难处理金矿石工艺矿物学及浸金影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, (12): 1742-1745. Yang Hongying, Gong Enpu, Yang Li. Process mineralogy of low-grade double refractory gold ore and influencing factor on gold leaching [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science) 2008, (12): 1742-1745. (in Chinese with English abstract)
- [22] 林种玉, 吴剑鸣, 傅博强, 薛茹, 周剑章, 郑泉兴, 刘月英, 傅锦坤. 巨大芽孢杆菌 D01 吸附金(Au³⁺)的谱学表征[J]. 化学学报, 2004, 62(18): 1829-1834. Lin Zhongyu, Wu Jianming, Fu Boqiang, Xue Ru, Zhou Jianzhang, Zheng Quanxing, Liu Yueying, Fu Jingkun. Spectroscopic Characterization on Interaction of Gold (Au³⁺) Biosorption by Bacillus megaterium D01 [J]. Acta Chimica Sinica, 2004, 62(18): 1829-1834. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘晓文, 毛小西, 刘庄, 华燕丽. 红铁矿的工艺矿物学研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 59-60. Liu Xiaowen, Mao Xiaoxi, Liu Zhuang, Hua Yanli. Processing mineralogy of red iron ore [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(suppl.): 59-60. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘晓文, 毛小西, 刘庄, 华燕丽. 羟硅铍石型铍矿的工艺矿物学研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 61-62. Liu Xiaowen, Mao Xiaoxi, Liu Zhuang, Hua Yanli. Hydroxyl silicon beryllium stone beryllium ore process mineralogy [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(suppl.): 61-62. (in Chinese)
- [25] 邱冠周, 袁明亮, 杨华明, 宋晓岚, 王海东. 矿物材料加工学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003. Qiu Guanzhou, Yuan Mingliang, Yang Huaming, Song Xiaolan, Wang Haidong. Mineral materials science [M]. Changsha: Central South University Press, 2003. (in Chinese)
- [26] 甄世杰. 金川高镁型低品位硫化镍矿生物浸出的应用基础与技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. Zhen Shijie. Application basis and technology research on the bioleaching of Jinchuan low grade nickel-bearing sulfide ore contain-

- ning high magnesium [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [27] 罗焱杰, 张成桂, 刘元东, 吴学玲, 管昊, 廖荷欢, 罗海浪, 刘学端, 邱冠周. 氧化亚铁硫杆菌中铜代谢相关两个基因的差异[J]. 生物技术, 2009, 19(2): 9-11.
Luo Yanjie, Zhang Chengui, Liu Yuandong, Wu Xuelling, Qiu Guanzhou. Differences between two copper related genes in the genome of *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Biotechnology, 2009, 19(2): 9-11. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张成桂, 张倩, 王晶, 张瑞永, 何环, 夏金兰, 邱冠周. 阴离子对嗜酸氧化亚铁硫杆菌生长和硫氧化活性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2237-2242.
Zhang Chengui, Zhang Qian, Wang Jing, Qiu Guanzhou. Effect of anions on growth and sulfur oxidation activity of *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2237-2242. (in Chinese with English abstract)
- [29] 康健, 王海华, 高健, 邱冠周. 诱变混合微生物对铜蓝的浸出[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(1): 72-75.
Kang Jian, Wang Haihua, Gao Jian, Qiu Guanzhou. Study on leaching of covellite by mixed microorganisms after mutation [J]. Mineral Engineering Research, 2009, 24(1): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [30] 谢海云. 高砷硫化铜精矿细菌浸出及砷的综合利用工艺及理论研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
Xie Haiyun. The technology and mechanism of bacteria leaching high-arsenic copper sulfide concentrate and comprehensive utilization of arsenic [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [31] 刘汉钊. 矿物学在金选冶上的应用[J]. 中国有色冶金, 2010, (03): 7-11.
Liu Hanzhao. Process mineralogy and application in gold metallurgy [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010, (03): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨洪英, 杨立. 细菌冶金学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Yang Hongying, Yang Li. Bacterial metallurgy [M]. Beijing: 2006. (in Chinese)
- [33] 田晓娟, 杜德平, 彭立娥, 李星洪. 金矿的细菌浸出处理研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 557-563.
Tian Xiaojuan, Du Deping, Peng Lie, Li Xinghong. Bacterial leaching of refractory gold ore [J]. Geology in China, 2008, 35(3): 557-563. (in Chinese with English abstract)
- [34] 崔日成, 杨洪英, 富瑶, 陈森, 张硕. 不同含砷类型金矿的细菌氧化浸出[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 694-699.
Cui Richeng, Yang Hongying, Fu Yao, Chen Sen, Zhang Shuo. Biooxidation-cyanidation leaching of gold concentrates with different arsenic types [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 694-699. (in Chinese with English abstract)
- [35] 白俊智, 林国梁, 邓宇扬, 陈朝中. 从尾矿中回收利用矿物材料可行性研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 67-68.
Bai Junzhi, Lin Guoliang, Deng Yuyang, Chen Chaozhong. Recovery from the tailings mineral materials [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(suppl.): 67-68. (in Chinese)
- [36] 孟宇群, 胡志刚, 代淑娟, 宿少玲. 微细粒浸染包裹含砷金矿石金的回收[J]. 有色金属(选矿部分), 2006, 5: 17-19.
Meng Yuqun, Hu Zhigang, Dai Shujuan, Su Shaoling. Recovery of particulate disseminated arsenic-containing gold ores [J]. Nonferrous Metals (mineral processing section) 2006, 5: 17-19. (in Chinese with English abstract)
- [37] 唐朝军, 董发勤, 代群威, 张伟, 肖文丁, 霍婷婷, 徐雪梅. 嗜酸氧化硫杆菌对中低品位磷矿的浸磷效率研究[J]. 矿物学报, 2011, 31(2): 280-283.
Tang Chaojun, Dong Faqin, Dai Qunwei, Zhang Wei, Xiao Wending, Huo Tingting, Xu Xuemei. A study on leaching effect of acidithiobacillus thiooxidans to phosphor from low-grade phosphate ores [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(2): 280-283. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张伟, 董发勤, 代群威. 微生物富集铀[J]. 铀矿冶, 2005, 24(4): 198-202.
Zhang Wei, Dong Faqin, Dai Qunwei. Microbial accumulation of uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(4): 198-202. (in Chinese with English abstract)
- [39] 慈云祥, 臧凯赛, 高体玉. 几种微生物的红外光谱研究[J]. 高等学校化学学报, 2002, (6): 1047-1049.
Ci Yunxiang, Zang Kaisai, Gao Tiyu. FTIR study of microbes [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2002, (6): 1047-1049. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘威, 任瑞晨. 透射电子显微镜在矿物加工与利用中的应用[J]. 微计算机信息, 2010, 34: 141-143.
Liu Wei, Ren Ruichen. The application of transmission electron microscopy in the mineral processing and utilization [J]. Microcomputer Information, 2010, 34: 141-143. (in Chinese with English abstract)
- [41] 彭明生, 李迪恩, 林冰, 梁金龙. 同步辐射 X 射线吸收光谱在矿物学、地球化学中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(1): 33-37.
Peng Minsheng, Li Dien, Lin Bin, Liang Jinlong. Application of Synchrotron radiation X-ray absorption spectroscopy in mineralogy, geochemistry [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1999, 18(1): 33-37. (in Chinese with English abstract)
- [42] 彭明生, 胥焕岩, 刘羽. 同步辐射 X 射线吸收光谱在环境矿物学中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(3): 217-221.
Peng Minsheng, Xu Huanyan, Liu Yu. Application of synchrotron radiation X-ray absorption spectroscopy in environmental mineralogy [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(3): 217-221. (in Chinese with English abstract)
- [43] 彭明生, 李迪恩. 硅酸盐玻璃中的 Na、Mg、K-边 XANES 谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(5): 873-876.
Peng Minsheng, Li Dien. Na and Mg K-edge XANES study in silicate glasses [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(5): 873-876.
- [44] 彭明生, 李迪恩. 沸石为载体的新型 Ni-Mo 环境催化剂[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(2): 42-43.
Peng Minsheng, Li Dien. Environmental catalysts containing Ni and Mo supported on zeolite [J]. Journal of Safety and Environ-

- ment, 2001, 1(2): 42—43. (in Chinese with English abstract)
- [45] 杨志军, 刘小雨, 林峰, 梁榕, 彭明生, 李红中. Fe-C(H)系高温高压合成金刚石多晶的RAMAN与PL光谱研究[J]. 超硬材料工程, 2009, 21(6): 4—8.
Yang Zhijun, Liu Xiaoyu, Lin Feng, Liang Rong, Peng Minsheng, Li Hongzhong. Raman and PL spectra studies of the HPHT synthetic polycrystalline diamond from Fe-C(H) system[J]. Superhard Matenal Engineering, 2009, 21(6): 4—8. (in Chinese with English abstract)
- [46] 刘明学, 张东, 康厚军, 张伟, 董发勤. 铀与酵母菌细胞表面相互作用研究[J]. 高校地质学报, 2011, 17: 53—58.
Liu Mingxue, Zhang Dong, Kang Houjun, Zhang Wei, Li Ye, Pang Xiaofeng, Dong Faqin. The interaction between uranium and yeast cell surface[J]. Geol. J. China Universities, 2011, 17: 53—58. (in Chinese with English abstract)
- [47] He H P, Frost L R, Deng F, Zhu J X, Wen X Y, Yuan P. Conformation of surfactant molecules in the interlayer of montmorillonite studied by ^{13}C MAS NMR[J]. 2004 Clays and Clay Minerals, 52(3): 350—356.
- [48] He H P, Guo J G, Zhu J X, Yuan P, Hu C. ^{29}Si and ^{27}Al MAS NMR spectra of mullites from different kaolinites[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60: 1061—1064.
- [49] 何宏平, 朱建喜, 邓凤, 文晓燕, 杨丹, 郭九皋. HDTMA + 柱撑蒙脱石的固体 ^{13}C -NMR研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 18—22.
He Hongping, Zhu Jianxi, Deng Feng, Wen Xiaoyan, Yang Dan, Guo Jiugao. ^{13}C MAS NMR Study of HDTMA + Pillared Montmorillonite[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [50] 沈艳杰, 龚文琪. 雷绍民电子显微技术在矿物材料研究中的应用[J]. 中国非金属矿工业异刊, 2004, 3(40): 31—33.
Shen Yanjie, Gong Wenqi. Leishao min electron microscopy techniques in the study of mineral materials[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2004, 3(40): 31—33. (in Chinese with English abstract)
- [51] 鲁安怀. 矿物学研究从资源属性到环境属性的发展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 245—251.
Lu Anhuai. Development of properties of mineralogy from resource to environmental[J]. Geol. J. China Universities, 2000, 6(2): 245—251. (in Chinese with English abstract)
- [52] 鲁安怀, 卢晓英, 陈代璋, 唐军利. 天然磁黄铁矿处理含Cr(VI)废水实验研究[J]. 生物及环境材料, 1997, 643—646.
Lu Anhuai, Lu Xiaoying, Chen Daizhang, Tang Junli. New method of natural iron sulfide clean chromium-containing wastewater[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 643—646. (in Chinese with English abstract)
- [53] 鲁安怀. 关键带中天然半导体矿物与微生物协同作用及其环境响应[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 160—161.
Lu Anhuai. Natural rutile-involved photocatalytic process assisted by microorganism[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(suppl.): 160—161. (in Chinese with English abstract)
- [54] 曾翠平, 鲁安怀, 李艳, 吴婧, 王鑫, 丁瑞, 颜云花. 红壤中微生物群落对半导体矿物日光催化作用的响应[J]. 高校地质学报, 2011, 17(1): 101—106.
Zeng Cuiping, Lu Anhuai, Li Yan, Wu Qian, Wang Xin, Ding Rui, Yan Yunhua. Response of microbial community to sunlight catalysis of semiconductor minerals in red soil[J]. Geol. J. China Universities, 2011, 17(1): 101—106. (in Chinese with English abstract)
- [55] 胥焱岩, 彭明生, 刘羽, 石和彬. 一种新型环境矿物材料在废水处理中的应用研究-硅质磷块岩吸附水溶液中镉离子的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(5): 15—18.
Xu Huanyan, Peng Mingsheng, Liu Yu, Shi Hebin. Application of a new environmental mineralogical material in wastewater treatment—Study on the sorption of aqueous cadmium ion with siliceous phosphorite[J]. Tech. Equip. Environ. Poll. Control, 2003, 4(5): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [56] 胥焱岩, 刘羽, 彭明生. 一种新型环境矿物材料在废水处理中的应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(12): 12—15.
Xu Huanyan, Liu Yu, Peng Mingsheng. Application of a new environmental mineral material in wastewater treatment[J]. Tech. Equip. Environ. Poll. Control, 2002, 3(12): 12—15. (in Chinese with English abstract)
- [57] 蒙宇飞. 褐色金刚石的缺陷与呈色机制研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
Meng Yufei. Studies on defects and coloration mechanism of brown diamond[D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2006. (in Chinese)
- [58] 苑执中. 红色和其它颜色金刚石的微结构研究及其应用[D]. 广州: 中山大学, 2008.
Yuan Zhizhong. Microstructure characteristics and applications of red and other color diamonds[D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2008. (in Chinese)
- [59] Meng Y F, Yan C S, Krasnicki S, Liang Q, Lai J, Shu H Y, Yu T, Steele A, Mao H K, Russell J. Hemley high optical quality multicarat single crystal diamond produced by chemical vapor deposition[J]. Phys. Status Solidi A, 2012, 209(1): 101—104.
- [60] Meng Y F, Yan C S, Lai J, Krasnicki S, Shu H Y, Yu T, Liang Q, Mao H K, Russell J. Hemley Enhanced optical properties of chemical vapor deposited single crystal diamond by low-pressure/high-temperature annealing[J]. Pnas, 2008, 105(46): 17620—17625.
- [61] Yang Z J, Li H Z, Peng M S, Chen J, Lin F, Su Y W. Study on the HPHT synthetic diamond single crystal from Fe-C(H) system and its significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(16): 1951—1957.