



主编 汪贻水
彭 觥
肖垂斌

矿山地质选集

第五卷 工艺矿物学研究
与矿山深部找矿



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

矿山地质选集

第五卷 工艺矿物学研究
与矿山深部找矿



主编 汪贻水
彭 觥
肖垂斌



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

矿山地质选集第五卷:工艺矿物学研究/汪贻水, 彭觥, 肖垂斌主编. —长沙:中南大学出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 5487 - 1734 - 8

I. 矿... II. ①汪... ②彭... ③肖... III. ①矿山地质 - 文集 ②工艺矿物学 - 文集 ③矿山 - 深部地质 - 找矿 - 文集

IV. ①TD1 - 53 ②P57 - 53 ③P624 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 159749 号

矿山地质选集第五卷:工艺矿物学研究与矿山深部找矿

主编 汪贻水 彭 觥 肖垂斌

☐责任编辑 刘石年 胡业民

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南地图印制有限责任公司

☐开 本 880 × 1230 1/16 ☐印张 16.5 ☐字数 561 千字

☐版 次 2015 年 8 月第 1 版 ☐印次 2015 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1734 - 8

☐定 价 126.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 简 介

《矿山地质选集》是值中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年之际,根据“国务院关于加强矿山地质工作的决定”,将我国各矿山地质工作者及中国地质学会矿山地质专业委员会 35 年来在做好矿山地质工作方面所取得的成绩、进展和突破,以其阶段性总结、著作、论文形式集结出版,以达到承前启后,促进提升的作用。选集共分十卷,内容包括矿山地质实用手册,实用矿山地质学理论与工作,六十四种有色金属及中国铂业,矿山地质与地球物理新进展,工艺矿物学研究及矿山深部找矿,3DMine 在矿山地质领域的研究和应用,尾矿库设计、施工、管理及尾矿资源开发利用技术手册,铅锌矿山找矿新成就,铜金矿山找矿新突破,矿山地质理论与实践创新。

本卷为《矿山地质选集第五卷:工艺矿物学研究及矿山深部找矿》,由《矿山地质选集》丛书主编汪贻水、彭觥、垂斌选编自《矿山地质创新》(主编王峰、韩润生、汪贻水,冶金工业出版社 2013 年出版)及《矿山深部找矿》(主编李水明,副主编汪贻水、彭觥等,冶金工业出版社 2013 年出版),另有部分未发表过的工艺矿物学的论文在本卷中一起集结出版。本卷重点介绍了随着国内外新的测试方法和技术设备的出现,在工艺矿物学研究领域所取得的新进展及其研究成果对矿山选冶加工的指导意义;另外本卷还介绍矿山深部找矿的重大成就和所作贡献。

本书主要供矿山地质工程师使用,对从事矿山地质领域的科研、设计、教学、矿山管理人员也是一部极为重要的参考书。

《矿山地质选集》编委会

顾问 何继善 孙传尧 沃廷枢 王道隆 陈景河 王京彬
主编 汪贻水 彭 觥 肖垂斌
委员 (按姓氏笔画排序)

王玉往	王建青	王建国	王 峰	王海龙	王静纯	文美兰
邓金灿	申 萍	叶樟良	史海燕	冯晓元	巩恩普	刘石年
刘代喜	刘全坤	刘金平	刘建军	刘建雄	刘铁兵	刘慎波
江新华	孙信牙	孙振家	杜运斌	杨志刚	杨 兵	杨昔林
杨保疆	李万亨	李义邦	李广斌	李升福	李克庆	肖仪武
邱小平	何军生	邸明明	汪 宏	沈远超	沈建忠	宋晓军
张小华	张木毅	张吉龙	张会琼	张锦章	陈军峰	陈 进
陈锡廉	陈新旺	范其明	范洪海	罗已翀	罗先熔	周尚国
郑小礼	屈绍东	胡业民	胡建明	胡祥昭	饶玉学	姚 曙
袁怀雨	聂荣峰	莫江平	贾国相	党新生	高 林	陶 勇
黄明然	黄 诚	常玉刚	梁新权	彭建堂	彭润民	韩秀丽
韩润生	程 春	雷时斌	樊继平	潘 才	魏俊浩	

编辑部成员

汪贻水	彭 觥	肖垂斌	胡业民	刘石年	范其明	邸明明
史海燕						

前言

今年是中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年。35 年来,全国矿山地质找矿、勘探和开发取得了巨大成就,矿山地质学的理论研究和矿山地质找矿的新技术、新方法也有了长足的进展,发表的地质论著数以千计。此次就中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年之际,我们选择了部分论文著作编辑出版这套《矿山地质选集》,共分为十卷。第一卷为矿山地质实用手册,第二卷为实用矿山地质学理论与工作,第三卷为六十四种有色金属及中国铂业,第四卷为矿山地质与地球物理新进展,第五卷为工艺矿物学研究及矿山深部找矿,第六卷为 3DMine 在矿山地质领域的研究和应用,第七卷为尾矿库设计、施工、管理及尾矿资源开发利用技术手册,第八卷为铅锌矿山找矿新成就,第九卷为铜金矿山找矿新突破,第十卷为矿山地质理论与实践创新。

自中华人民共和国成立特别是改革开放 30 多年以来,广大地质工作者在全国范围内开展了大规模的矿产勘查工作,作出了巨大贡献,有力地为我国工农业生产及国民经济增长提供了矿产资源保障。矿业的发展,也给矿山地质工作带来了极为繁重的任务,但意义也极为重大。2006 年 1 月 20 日国发[2006]4 号文《国务院关于加强地质工作的决定》指出:“矿山地质工作对合理开发利用资源、延长现有矿山服务年限意义重大。按照理论指导、技术优先、探边摸底、外围拓展的方针,搞好矿山地质工作。加强矿山生产过程的补充勘探,指导科学开采。加快危机矿山、现有油气田和资源枯竭城市接替资源勘查,大力推进深部和外围找矿工作。开展共伴生矿产和尾矿的综合评价、勘查和利用。做好矿山关闭和复垦的地质工作。”

为贯彻上述宗旨,中国地质学会矿山地质专业委员会及其有关矿山 35 年来,竭尽全力,将扩大矿山接替资源、延长矿山服务年限作为首要任务,为发展矿山地质工作作出了重要贡献,为许多大、中型矿山提供了大量的补充资源,例如中国铂业——金川大型铜镍(铂)硫化物矿床;中国古铜都——铜陵及周边地区找矿理论及实践;紫金矿业及山东玲珑金矿的找矿进展;戈壁明珠——锡铁山铅锌矿和西南麒麟——会泽铅锌矿以及广东凡口铅锌矿的深边部找矿突破,均使这些大矿山获得了新的生命,全国矿山地质工作也取得了宝贵的经验。

为适应建设资源节约型、环境友好型社会的总体要求,必须以科技进步为手段,以管理创新为基础,以矿产资源节约与综合利用为重要着力点,全面提高矿产资源开发利用效率和水平。多年实践证明,工艺矿物学研究在矿产资源评价和矿产综合利用过程中起到了极其重要的作用,尤其在低品位、共伴生、复杂难选等矿产资源及尾矿资源的开发利用过程中取得了明显的效果。许多矿山在这一方面取得了重要进展和可观的效益。

加强矿山管理和环境地质工作,合理规划地质资源的开采,防止乱挖滥采,提高采、选回收率,减少贫化损失和浪费,也是矿山地质的一项重要工作,要大力开发利用排弃物质,变废为宝,增加矿山收益。

矿产资源是矿业发展的基础,人才资源是矿业发展的保障。中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 年来,一直得到我国老一辈地质学家的关心和支持。一方面是他们学会和对矿山地质发展的关心和支持,另一方面,在他们的培养和帮助下,大批年轻的矿山地质工作者不断成长、崛起。在大家共同努力下,开创出今天的矿山地质事业的大好局面。《矿山地质选集》所收录的部分论文著作,反映了我国老一辈和新一代地质工作者在矿山地质理论研究、矿山地质地球物理找矿新方法新技术、计算机技术和 3DMine 软件在矿山地质中的应用、矿山深边部找矿等方面的新进展、新突破。只是鉴于选集篇幅所限,无法将 35 年来矿山地质工作者的论文全部选入,敬请谅解!

展望未来,虽形势大好,但任务仍然艰巨。唯有以此为新的起点,努力攀登新的高峰!

让我们共同努力吧!

《矿山地质选集》编委会
2015 年 3 月

目 录

工艺矿物学在矿山地质和开发中的应用

矿产地质勘查中的工艺矿物学研究	肖仪武(1)
某难选铁矿石的工艺特性研究	王 玲(4)
某金矿工艺矿物学研究	方明山 肖仪武 童捷矢(9)
国外某氧化铜矿工艺矿物学研究	付 强 李艳峰 贾木欣(14)
工艺矿物学研究在复杂矿中的应用	马 驰 卞孝东 王守敬(17)
我国铌钽钨锡矿产分布与赋存状态研究	王静纯 余大良 徐翠香(21)
某金矿金工艺矿物学特征研究及在选矿生产中的指导作用	王军荣(24)
无机微晶材料是矿山工艺矿物学的发展和矿山可持续发展的方向	李章大 周秋兰(29)
国外工艺矿物学进展及发展趋势	贾木欣(33)
MLA 在铅锌氧化矿物解离度及粒度测定中的应用	方明山 肖仪武 童捷矢(38)
还原焙烧对某“宁乡式铁矿”矿石回收利用的影响	金建文(41)
济源新安难处理高磷铁矿矿石工艺性质研究	王 玲 刘广宇(46)
多金属结核工艺矿物学研究	方明山 贾木欣 何高文(51)
贵州织金含稀土磷矿床中稀土矿物的分布特征	肖仪武 武慧敏 金建文(56)
河南低品位铝土矿工艺矿物学研究	李艳峰 王明燕 费涌初(58)
贵州瓮福磷尾矿工艺矿物学研究	李艳峰 方明山(64)
影响新疆萨瓦亚尔顿金矿中金氰化浸出效果的矿物学因素	王 玲 王 辉(69)
秘鲁某斑岩型含砷铜钼矿工艺矿物学研究	于宏东 金建文(74)
内蒙古某锌银铜锡多金属矿工艺矿物学研究	王明燕(78)
某低品位铌-钽多金属矿中锂的可利用性	李艳峰 邓雁希 王 玲(83)
红土型镍矿工艺矿物学研究	肖仪武(90)
柿竹园 30 号矿体铜锡多金属矿工艺矿物学研究	王明燕 肖仪武 金建文 费勇初(93)
某原生金矿的工艺矿物学研究	杨 毅 李和平 袁 威(98)
梅山尾矿工艺矿物学研究	陈 平(101)
河北某难选钼矿工艺矿物学研究	马 驰 卞孝东 王守敬(106)
某铜矿山老尾矿中铜的赋存状态研究	王 玲 王明燕(112)
某难选镜铁矿工艺矿物学研究	李 磊 王明燕 李艳峰(117)
津巴布韦某地金矿石工艺矿物学研究	于宏东(121)
青海某难选铁矿石工艺矿物学研究	方明山(126)
河南某钼矿工艺矿物学研究	王明燕(129)
菲律宾某尾矿样中金的赋存状态研究	王 玲(134)
某铜钼尾矿工艺矿物学研究	郜 伟 王 玲(139)
铝电解废旧阴极的工艺矿物学研究	袁 威 金自钦 杨 毅(143)
广西珊瑚钨锡矿床矿化特征及钨矿物研究	李 莉 王滋平 刘运锴 姚金炎 刘 伟(147)

矿山深部找矿理论与实践

论矿山深部找矿新途径	方啸虎	汪贻水	彭 舫	(152)					
“十二五”与矿山地质学的全方位发展	彭 舫	汪贻水	杨保疆	肖垂斌	王静纯	(154)			
发展中国矿山地质学	王静纯	汪贻水	彭 舫	杨 兵	(160)				
构造叠加晕预测金矿盲矿的共性与特性	李 惠	禹 斌	李德亮	马久菊	孙凤舟	李 上			
	魏 江	赵佳祥	翟 培	王 俊	王 晓	张贺然	(163)		
陕西太白双王角砾岩型金矿床构造叠加晕研究跟踪及预测效果	禹 斌	李 惠	李德亮	马久菊					
	孙凤舟	李 上	魏 江	赵佳祥	翟 培	王 俊	王 晓	张贺然	(166)
广西珊瑚钨锡矿资源接替勘查项目找矿效果及找矿前景分析	徐文杰	刘运锴	谭少初	(173)					
拓展新理念 采用新技术 实现地质找矿新突破	方啸虎	汪贻水	(180)						
勘查技术在金矿找矿中的应用——以澳大利亚 Stawell 金矿勘查为例	李万伦	王学评	张 凡	陈 晶	(187)				
花岗岩型钨锡铌钽矿床成矿规律与找矿标志	余大良	王静纯	徐翠香	(193)					
地电化学新方法寻找隐伏多金属矿研究——以青海三岔矿区为例	黄 标	罗先熔	覃斌贤	黄学强	姚 岚	唐志祥	(197)		
河南周庵矿区铜镍多金属矿床地电化学异常特征及找矿预测	姚 岚	罗先熔	黄志昌	黄学强	黄 标	李世铸	(202)		
河北金厂峪金矿床成矿规律研究及深部找矿预测	高永军	杨志刚	(207)						
广西佛子冲铅锌矿成矿规律与成矿预测	覃明飞	陈有大	杨俊杰	张 慧	(216)				
广西宾阳县某锑矿区地球物理特征及构造研究	黄理善	敬荣中	刘雯婷	王建超	王 晔	(223)			
广西恭城县栗木锡矿接替资源勘查	覃宗光	姚锦其	林德松	邓贵安	董业才	李学彪	颜自给	(228)	
华北克拉通古元古代金矿床成矿作用探讨	邱小平	张长青	姜志幸	(242)					
山西堡子湾一九对沟隐爆角砾岩型金矿和钼矿成矿关系探讨	龙灵利	王玉往	廖 震	(249)					
大力重视矿山生产勘探	汪贻水	彭 舫	肖垂斌	王静纯	(253)				

工艺矿物学在矿山地质和开发中的应用

矿产地质勘查中的工艺矿物学研究

肖仪武

(北京矿冶研究总院矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京, 100044)

摘要: 若能从矿点的发现或地质勘查阶段就重视工艺矿物学的研究, 了解矿石的工艺性质, 就能对矿石的可利用性作出更为正确的评价, 为找矿靶区的确定和矿业投资的决策提供科学依据, 规避投资风险。

关键词: 矿产勘查; 工艺矿物学; 投资风险

在合理开发和利用矿产资源中, 工艺矿物学的地位与作用越来越为人们所重视。多年的科研、生产实践表明, 若能从矿点的发现或地质勘探阶段就重视工艺矿物学的研究, 了解矿石的工艺性质, 将会使人们获得对矿床更全面的认识, 因而能作出更为正确的评价; 若能在矿山、选矿厂建设前期就对矿石进行详尽的工艺矿物学研究, 将会对选矿试验方案的选择和最佳工艺流程的确定起到重要的指导作用, 为找矿靶区的确定和矿业投资的决策提供科学依据, 规避投资风险。下面就举几个实例加以说明。

1 银矿

通过普查工作发现该银矿为一个大型的氧化程度高的银矿床, 含 Ag 154 g/t, 其他伴生元素还有 Cu 0.27%、Pb 0.33%、Zn 0.19%、As 0.35%。

矿石的矿物组成比较复杂。银矿物主要为硫砷铜银矿、砷硫锑铜银矿、辉银矿, 其次为硫铁银矿、少银黄铁矿、银铁矾; 铜矿物主要为孔雀石、蓝铜矿, 其次为黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、辉铜矿、锑黝铜矿等; 铅矿物主要为砷铅矿, 偶尔可见方铅矿及白铅矿; 砷矿物主要为臭葱石, 另有很少量毒砂; 锌矿物为闪锌矿; 铁矿物主要为褐铁矿、赤铁矿等。脉石矿物主要为方解石, 其次为石英, 其他还有黏土矿物、绢云母、白云母、白云石、长石、重晶石、蛇纹石等。

矿石中的银矿物硫砷铜银矿、砷硫锑铜银矿、辉

银矿主要以不规则状产出, 有时呈星点状嵌布于脉石矿物中。从表 1 可见, 矿石中银矿物的嵌布粒度都比较细, 90% 左右的银矿物嵌布粒度小于 0.074 mm; 而在 -0.010 mm 粒级中, 其占有率高达 13.21%, 这将直接影响银的选矿回收指标的提高。

表 1 矿石中银矿物的粒度组成 (%)

粒 级/mm	含 量	累 计
>0.074	10.31	10.31
0.074 ~ 0.043	13.44	23.75
0.043 ~ 0.020	35.92	59.67
0.020 ~ 0.015	11.82	71.49
0.015 ~ 0.010	15.30	86.79
<0.010	13.21	100.00

根据银的赋存状态, 采用浮选回收矿石中的银是可行的, 浮选回收对象主要为银复硫盐及硫化银矿物及其他伴生的铅、铜等硫化矿物, 这样可生产出银精矿产品。由于氧化矿石性质复杂, 一方面要使细粒银矿物能较好地单体解离, 另一方面又不至于过磨泥化, 恶化浮选工艺流程, 因此采用合理的磨矿工艺十分重要。矿石中有害元素砷含量较高, 相当一部分砷与银、硫结合赋存于硫砷铜银矿、砷硫锑铜银矿及其他银矿物中, 砷在银精矿中必然富集。要获得较好的

银回收率和降低精矿含砷量将会比较困难。

2 钛铁矿

该矿石的矿物组成相对简单，属赋存于辉长岩体中的高磷低钛的岩浆型矿床，规模较大，可以露天开采。在预查阶段开展了工艺矿物学研究。矿石含TiO₂7.31%、Fe 24.71%、P₂O₅ 2.75%、S 0.018%。矿石中含钛矿物为钛铁矿；含铁的矿物主要为铁硅酸盐矿物，其铁的占有率为64.98%，钛铁矿中的铁占全铁的20.24%，磁铁矿中铁仅占7.76%。

钛铁矿主要以不规则粒状嵌布在脉石矿物中，有时与细粒、微细粒磁铁矿和赤铁矿紧密共生在一起。磁铁矿多与赤铁矿构成集合体以不规则状沿钛铁矿边缘分布；微细粒磁铁矿常星散分布在脉石矿物中，有时在脉石矿物中呈网脉状嵌布，以这种形式分布的磁铁矿粒度约5 μm，磁铁矿与钛铁矿或脉石矿物相互之间解离较困难。磷灰石是矿石中主要有害杂质成分，多以不规则状、圆粒状、椭圆状嵌布在硅铝酸盐矿物中，与钛铁矿、磁铁矿关系不密切，粒度粗，易于单体解离，对钛精矿质量影响很小。

表 2 矿石中钛铁矿和磁铁矿的粒度分布(%)

粒度范围 /mm	矿物名称			
	钛铁矿		磁铁矿	
	含 量	累 计	含 量	累 计
>0.589	0.67	0.67		
0.589~0.417	4.78	5.44		
0.417~0.295	13.19	18.63		
0.295~0.208	20.18	38.81	0.84	0.84
0.208~0.147	21.02	59.83	0.59	1.43
0.147~0.104	15.43	75.26	2.40	3.83
0.104~0.074	11.66	86.92	6.64	10.47
0.074~0.043	8.10	95.02	15.09	25.56
0.043~0.020	2.64	97.66	15.31	40.87
0.020~0.015	1.30	98.96	13.56	54.43
0.015~0.010	0.73	99.69	9.07	63.50
<0.010	0.31	100.00	36.50	100.00

由表2可以看出，矿石中钛铁矿的嵌布粒度相对较粗，主要集中在0.043~0.417 mm 粒级，而磁铁矿嵌布粒度则很细，主要集中在<0.074 mm 粒级，其中<0.010 mm 粒级就占了36.50%。由于磁铁矿主要

呈微细粒状、脉状分布于脉石矿物和钛铁矿中，即使细磨，大部分的磁铁矿也难于与脉石矿物和钛铁矿解离，难以用弱磁选回收磁铁矿，而当在强磁选条件下回收钛铁矿时，与脉石矿物连生的磁铁矿又会和与其连生的脉石矿物一起进入钛铁矿精矿中，从而造成钛铁矿难以富集。采用重选-浮选联合工艺流程回收钛铁矿可能效果会好些。总的来说，该矿石为难处理矿。

3 钼矿

该钼矿的含矿岩石为闪长岩，其中角闪石、金云母、长石及石英构成岩石的主体矿物，在岩浆晚期残浆和热液阶段，残浆及热液沿着主体矿物的裂隙或主体矿物边界侵入，形成辉钼矿细脉，所以整体来看辉钼矿是呈脉状产出的。矿石中钼品位较高，平均为0.15%。

矿石中其他金属矿物含量低，主要为辉钼矿，其次为磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿、针铁矿等；脉石矿物主要为角闪石、辉石、长石、方解石、白云石等；此外还含有影响钼精矿品位的滑石和石墨。

在辉钼矿脉内，辉钼矿呈半自形长片状晶体产出，有的晶体因压力影响出现弯曲。在离辉钼矿主脉较远的部位，辉钼矿呈细小弥散片状晶体及鳞片状分布在脉石矿物边缘或分散于脉石矿物之间。这种结构的辉钼矿细小，难于与脉石矿物解离。滑石在矿石中含量不高，但由于滑石具有很好的天然可浮性，它对辉钼矿浮选的影响却不小。矿石中滑石主要与方解石共生，其次与白云石、角闪石及蛇纹石共生，它是由透闪石及蛇纹石蚀变而成的。石墨主要嵌布在白云石颗粒周边，粒度较细，多在10 μm 以下。

表 3 辉钼矿的粒度分布(%)

粒度范围 /mm	辉钼矿	
	含量	累计
>0.208	2.03	2.03
0.208~0.147	4.78	6.81
0.147~0.104	4.40	11.21
0.104~0.074	6.21	17.42
0.074~0.043	18.84	36.26
0.043~0.020	23.62	59.88
0.020~0.015	11.59	71.47
0.015~0.010	10.71	82.18
<0.010	17.82	100.00

辉钼矿的嵌布粒度较细，74 μm 以上的辉钼矿只占 17.42%，-10 μm 粒级辉钼矿就占了 17.82%。

表 4 磨矿产品辉钼矿解离度测定结果(%)

-74 μm 占有率	辉钼矿单体	与脉石连生体
60	55.30	44.70
70	62.59	37.41
80	64.40	35.60

从解离度测定结果看，-74 μm 60% 的磨矿产品中辉钼矿的解离度为 55.30%，磨至 -74 μm 占 80% 时辉钼矿的单体解离度也只有 64.40%。矿石中辉钼矿的嵌布粒度细，细磨后辉钼矿单体解离效果也不好，这一定会影响钼的回收率。虽然矿石中滑石、石墨的含量只有 1.25%，但相对于辉钼矿的矿物量(0.24%)来说还是比较高的，由于它们都属于易浮矿物，因此，矿石细磨后会使得易浮的滑石及石墨大量进入钼精矿中，使精矿品位降低。此外矿石中还含有一定量的蛇纹石、金云母、绿泥石及透闪石等矿物，这些矿物可浮性虽没有滑石及石墨强，但比长石、石英及碳酸盐矿物可浮性好，同时这些矿物易先被磨细而泥化，夹带严重，也会影响钼精矿的质量。因此，可以视该矿石为难选矿石。

4 结语

西方发达的矿业大国十分重视金属矿产资源开发全过程的工艺矿物学研究。而我国目前只注重为制订

合理的选矿工艺流程方案而开展原矿石的工艺矿物学研究，忽视矿产资源勘查阶段和选矿厂生产过程中有关产品的工艺矿物学研究。

加拿大 Falconbridge Limited 在 Sudbury 有一铜镍资源，Falconbridge Technology Centre 通过系统获取有代表性的三种不同类型的钻探岩心样品做浮选实验并利用 QEMSCAN(矿物自动分析仪)的工艺矿物学研究对此新资源做了评价，结果表明三种矿石可浮性不同，但它们的磨矿产品解离度几乎相同，表明可浮性差异是由矿石中蛇纹石、滑石和辉石含量不同造成的。这使人们在此资源开发之前就掌握了该资源的可加工利用性质。这表明在地质勘探工作中进行详细的工艺矿物学研究，将为资源开发决策提供重要的矿石可利用信息，便于对矿产资源的可利用性进行合理评价。因此，应该加强矿产地质勘查过程中的工艺矿物学研究，了解矿石性质，降低投资风险。

参考文献

[1] 斯米尔诺夫. 硫化矿床氧化带[M]. 北京: 地质出版社, 1955.

[2] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝, 等. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1987.

[3] 《中国矿床》编委会编著. 中国矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[4] 贾木欣. 国外工艺矿物学进展和发展趋势[J]. 矿冶, 2007, (2): 95-99.

[5] 曾海等. 我国矿产资源开发利用中的问题及对策分析[J]. 国土资源科技管理, 2007, (2).

某难选铁矿石的工艺特性研究

王 玲

(北京矿冶研究总院矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京, 100070)

摘 要: 为合理开发某难选铁矿, 采用化学物相分析、扫描电镜分析、X 射线衍射分析等综合手段, 对矿石的工艺特性进行系统研究。矿石中铁矿物主要为磁赤铁矿, 其次为褐铁矿, 还有少量赤铁矿及磁铁矿。针对该难选铁矿石中铁矿物嵌布粒度很细、铁矿物之间以及与铁绿泥石等共生关系密切的特点, 矿石必须细磨且进行阶段磨矿。此次分别测定了全部铁矿物集合体及不包括褐铁矿的铁矿物集合体的工艺粒度, 前者作为磁选预先抛尾时确定磨矿细度的参考, 后者为提高铁精矿品位提供了重要参考依据。

关键词: 磁赤铁矿; 铁绿泥石; 工艺粒度; 单体解离度; 难选铁矿石

世界铁矿资源丰富, 但我国铁矿石富矿少、贫矿多, 而且尚存大量未被开发利用的难选铁矿石。复杂难选铁矿石的特点之一为含铁矿物种类繁多、嵌布粒度细且相互共生密切, 具有工业利用价值的有磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿等, 其中褐铁矿、菱铁矿等弱磁性含铁矿石为较难选别的铁矿石。

1 矿石的化学性质

矿石的多元素分析结果见表 1。

表 1 矿石多元素分析结果

组 分	TFe	FeO	SFe	Ni	Cr	Co	Mn	S
含量/%	44.20	6.58	43.55	0.85	1.98	0.07	0.55	0.026
组 分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	L. O. I.
含量/%	11.53	11.81	0.49	1.33	0.017	0.07	0.24	7.40

从表 1 结果看, 铁是主要回收元素, 伴生有用组分主要为镍和钴, 能否综合回收利用, 需要进一步查明其赋存状态。

2 矿石的矿物组成

通过光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射等多种仪器、方法查明, 矿石中铁矿物主要为磁赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), 其次为赤铁矿、褐铁矿及少量磁铁矿; 镍矿物主要为镍黄铁矿[(Fe, Ni)₉S₈]; 其他金属矿物可见微量黄铁矿、金红石等。矿石中脉石矿物主要为铁绿泥石及高岭石, 其次为铬尖晶石[(Fe, Mg)(Cr, Al)₂O₄], 还有少量方解石、石英、钾长石、钠长石等。

将矿石综合样(-0.074 mm)进行弱磁选, 并对磁选精矿及磁选尾矿分别进行 X 射线衍射分析, 分析结果分别见图 1、图 2, 矿石的矿物组成及相对含量见表 2。

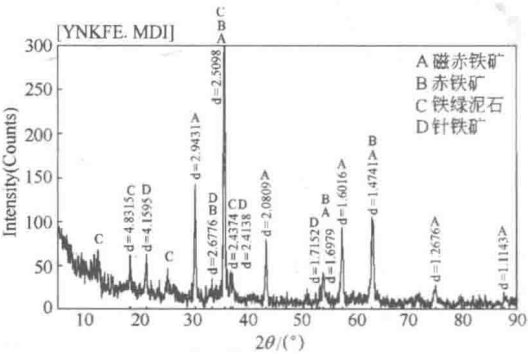


图 1 矿石综合样磁性产品的 X 射线衍射图

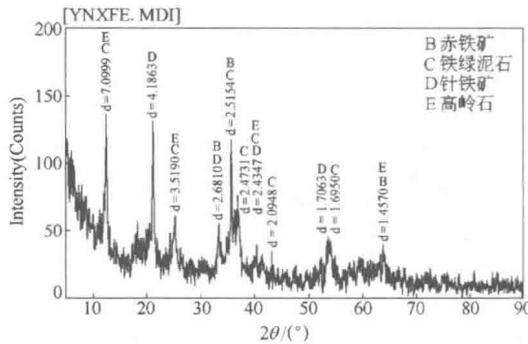


图 2 矿石综合样非磁性产品的 X 射线衍射图

表 2 矿石的矿物组成及相对含量

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
磁赤铁矿	33.71	铁绿泥石	15.36
磁铁矿	1.86	高岭石	10.33
褐铁矿、赤铁矿 ^①	27.32	方解石	1.85
铬尖晶石	7.03	石英	1.18
镍黄铁矿	0.12	长石等	1.23

① 其中以褐铁矿为主，赤铁矿为次。

3 矿石中重要矿物嵌布特征

3.1 磁赤铁矿

磁赤铁矿主要是磁铁矿在氧化条件下经次生变化作用形成的，磁铁矿中 Fe^{2+} 完全由 Fe^{3+} 所代替， $3\text{Fe}^{2+} \rightarrow 2\text{Fe}^{3+}$ ，有 $1/3\text{Fe}^{2+}$ 所占据的八面体位置产生了空位，而晶体结构未变，均为等轴晶系。磁赤铁矿具有与磁铁矿相当的磁性。

磁赤铁矿是该矿石中的主要矿物，也是主要的回收矿物，产出特征十分复杂。绝大部分磁赤铁矿与磁铁矿、赤铁矿紧密共生，以磨矿中几乎不可分离的集合体形式存在(见图 3)，磁赤铁矿与褐铁矿的嵌布关系也十分紧密且复杂(见图 4)，需要在很细的磨矿细度下方可相互解离。磁赤铁矿与铁绿泥石常呈细密层状或犬牙交错的嵌布关系产出，尤其是部分铁绿泥石、高岭石呈微细不规则状嵌布于磁赤铁矿中，或磁赤铁矿呈微细粒包裹于铁绿泥石等黏土矿物集合体中(见图 5)。磁赤铁矿与铬尖晶石共生关系也比较紧密，磁赤铁矿有时沿中细粒铬尖晶石边缘包裹产出(见图 6)。

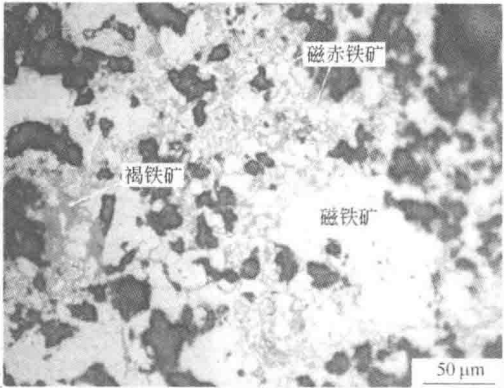


图 4 磁赤铁矿与磁铁矿、褐铁矿紧密共生(反光)

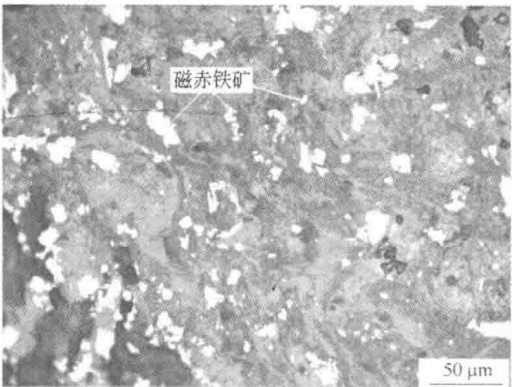


图 5 磁赤铁矿与铁绿泥石紧密共生(反光)

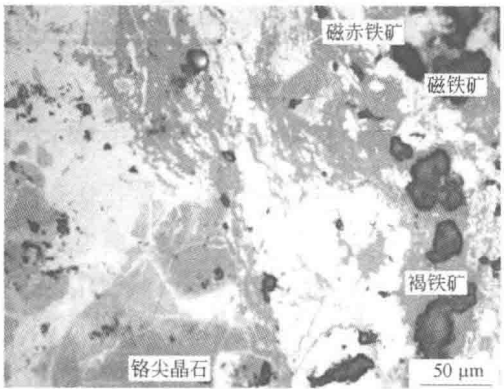


图 6 磁赤铁矿与磁铁矿、铬尖晶石及褐铁矿紧密共生(反光)

3.2 赤铁矿

赤铁矿也是矿石中重要的铁矿物之一，大部分赤铁矿交代磁铁矿产出，并与磁赤铁矿、磁铁矿呈十分紧密的共生关系嵌布于铁绿泥石等脉石矿物中，赤铁矿有时也被褐铁矿交代并包裹于其中产出。

3.3 磁铁矿

磁铁矿也是矿石中主要的回收矿物之一，绝大部分磁铁矿被磁赤铁矿、赤铁矿、褐铁矿深度交代，使得磁铁矿一般呈交代残余与磁赤铁矿、赤铁矿、褐铁矿紧密共生产出，还有部分磁铁矿被褐铁矿深度交代后呈微细粒浸染于褐铁矿或褐铁矿与铁绿泥石等黏土

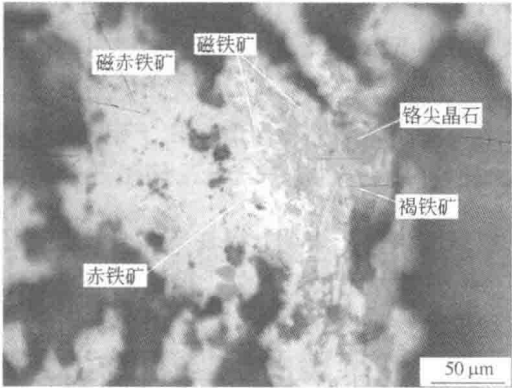


图 3 磁赤铁矿与赤铁矿、磁铁矿及褐铁矿紧密共生(反光)

矿物集合体中。磁铁矿与铬尖晶石共生也十分紧密，磁铁矿有时沿铬尖晶石边缘产出，磁铁矿晶隙间有时可见铬尖晶石呈微晶固溶体析出。高倍扫描电镜下常

可见磁铁矿与磁赤铁矿集合体中包裹微细片状高岭石或铁绿泥石等杂质矿物。部分磁铁矿中还可见微粒镍黄铁矿包裹体(见图7)。

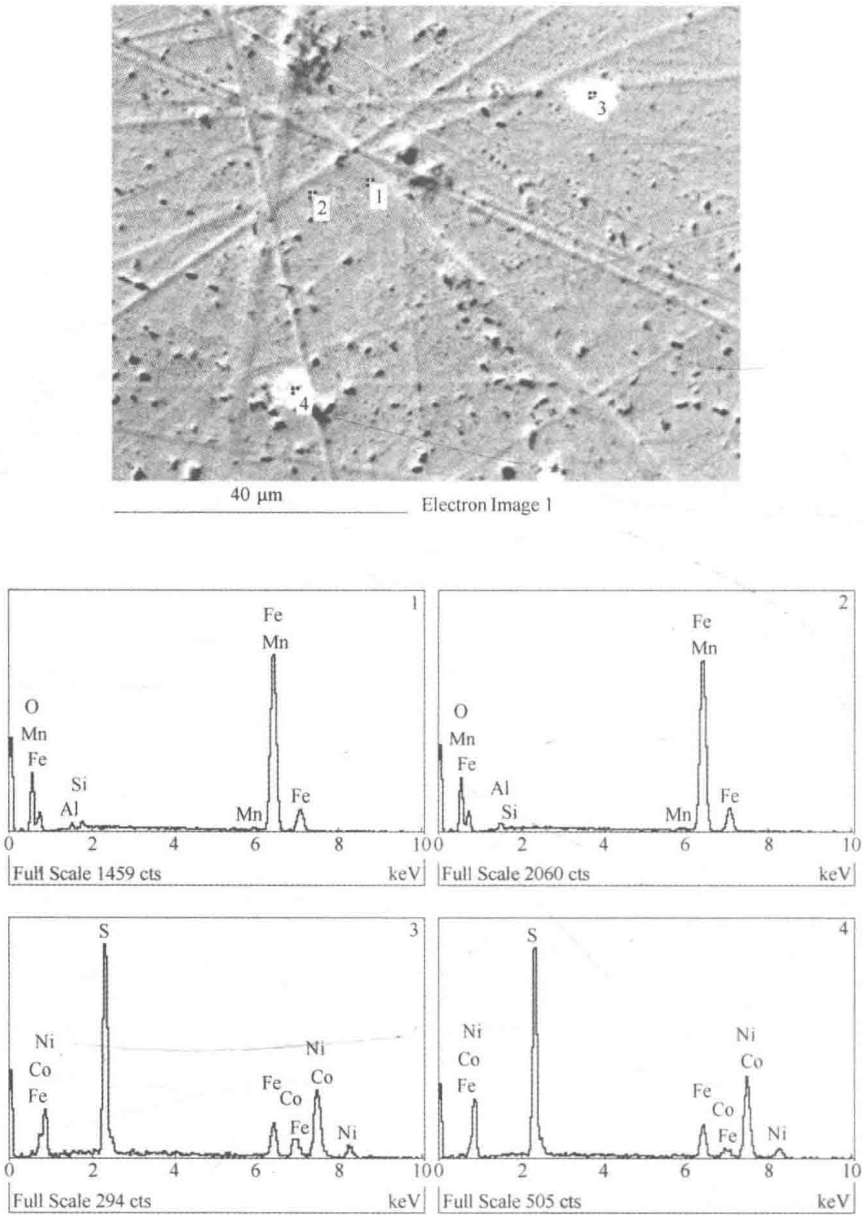


图7 扫描电镜背散射图(上)及重要矿物能谱图(下)
(镍黄铁矿呈微细粒包裹于磁赤铁矿与磁铁矿的集合体中)
1, 2—磁铁矿(含杂质 Al, Si); 3, 4—镍黄铁矿(含 Co)

3.4 褐铁矿

褐铁矿指针铁矿与绿泥石、高岭石等黏土矿物形成的微晶或隐晶集合体。褐铁矿是矿石中主要的铁矿物之一，常不同程度交代磁铁矿、磁赤铁矿及赤铁矿并与之紧密共生产出，当交代程度较深时，褐铁矿中仅可见磁铁矿、磁赤铁矿及赤铁矿的微细粒残余。褐铁矿与绿泥石等黏土质脉石矿物共生关系也十分紧密，常相互穿插或胶结形成复杂的集合体。

X 射线能谱分析表明，褐铁矿除含铁外，还含有 Al、Si、Ni 等多种元素。另外，褐铁矿本身含水也很高，其理论含铁只有 52.70%。

4 矿石中重要矿物嵌布粒度特征

在显微镜下用线段法测定了矿石中重要矿物的嵌布粒度。考虑到磁赤铁矿与赤铁矿共生关系十分紧密，磨矿时几乎无法单体解离，而磁铁矿、磁赤铁矿的磁性

相当，在弱磁选过程中均为目的矿物，所以测定了磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的工艺粒度。针对该矿必须细磨且阶段磨的情况，测定了磁赤铁矿、赤铁矿、磁铁矿与褐铁矿集合体的工艺粒度，作为预先磁选抛尾时确定磨矿细度的参考，统计结果见表3。

表3 矿石中重要矿物的嵌布粒度统计结果

粒级/mm	磁赤铁矿、赤铁矿 及磁铁矿集合体		磁赤铁矿、赤铁矿、磁 铁矿及褐铁矿集合体	
	含量/%	累计/%	含量/%	累计/%
+0.589	2.77	2.77	3.41	3.41
-0.589 ~ +0.417			4.03	7.44
-0.417 ~ +0.295			6.27	13.71
-0.295 ~ +0.208			8.05	21.76
-0.208 ~ +0.147	2.93	5.70	9.66	31.42
-0.147 ~ +0.104	5.18	10.88	10.04	41.47
-0.104 ~ +0.074	8.82	19.70	9.83	51.30
-0.074 ~ +0.043	15.94	35.64	18.54	69.84
-0.043 ~ +0.020	24.88	60.53	17.04	86.88
-0.020 ~ +0.015	7.32	67.85	2.77	89.66
-0.015 ~ +0.010	12.25	80.10	6.06	95.72
-0.010	19.90	100.00	4.28	100.00

注：计算结果取小数点后2位，尾数四舍五入，后同。

从表3结果看出，矿石中磁铁矿的嵌布粒度很细，铁矿物集合体的嵌布粒度相对较粗，但仍以中细粒为主。

从磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的嵌布粒度分布情况来看，只有19.70%分布于0.074 mm粒级以上，而0.010 mm粒度以下的分布率高达19.90%。所以在磨矿过程中磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的单体解离难度很大。

从磁赤铁矿、赤铁矿、磁铁矿及褐铁矿集合体的嵌布粒度分布情况来看，51.30%的铁矿物集合体分布在0.074 mm粒级以上，4.28%分布在0.010 mm粒度以下。根据铁矿物集合体的嵌布粒度特点，矿石需要细磨才能获得较高品位的铁精矿。

5 矿石中重要矿物的解离度分析

将原矿(0~2 mm)矿样分别磨至不同磨矿细度，测定其中重要矿物的单体解离度，以便更加合理地制定磨矿工艺及选矿工艺流程。不同磨矿细度下磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的单体解离度测定结果见

表4。根据磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的单体解离度测定结果，当磨矿细度为-0.074 mm占99%时，集合体的单体解离度为82.51%，单体解离仍不充分，主要与铁绿泥石及褐铁矿连生产出，其次与铬尖晶石连生。

表4 原矿不同磨矿细度下磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体的单体解离度

-0.074 mm 占有率/%	磁赤铁矿、赤铁矿及 磁铁矿集合体的单体解离度/%				
	单体	连生体			合计
		与褐 铁矿	与铬 尖晶石	与脉石	
35	13.86	28.38	10.24	47.52	100.00
45	21.45	22.21	9.92	46.42	100.00
55	38.64	20.54	9.06	31.76	100.00
65	52.71	18.31	8.44	20.54	100.00
75	58.61	17.62	8.11	15.66	100.00
85	61.47	16.06	7.34	15.13	100.00
95	79.91	7.14	4.02	8.93	100.00
98.6	81.74	6.67	3.38	8.21	100.00
99	82.51	6.23	3.31	7.95	100.00

6 矿石中铁、镍的赋存状态

结合化学分析、化学物相分析及显微镜分析，矿石中铁主要以独立铁矿物形式存在，铁矿物以磁赤铁矿为主，其中铁分布率占总铁50.88%，其次为褐铁矿、赤铁矿，其中铁分布率为32.58%，还有少量磁铁矿，其中铁分布率为3.03%。其余铁分布在铁绿泥石、铬尖晶石中，铁分布率为13.46%，还有微量分布于镍黄铁矿、黄铁矿等硫化铁矿物中，分布率仅为0.05%。

矿石中镍的赋存状态比较复杂，其中0.37%的镍以微粒镍黄铁矿形式存在于磁赤铁矿与磁铁矿集合体中，占有率为43.53%；0.27%的镍以吸附态或类质同象形式分布于铁绿泥石中，占有率为31.76%；还有0.21%的镍分散于褐铁矿中，分布率为24.71%。从镍的赋存状态来看，目前镍的回收价值不大。

7 结论

(1)矿石中铁矿物嵌布粒度极细，磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿集合体在0.074 mm粒度以下的分布率

高达 80.30%，当磨矿细度为 -0.074 mm 占 99% 时，集合体的单体解离度仅为 82.51%，单体解离不充分，要想获得较好铁精矿，矿石必须细磨。

(2) 矿石中还有相当部分铁以褐铁矿形式存在，一方面，褐铁矿本身含杂含水较高，其理论含铁只有 52.70%；另一方面，褐铁矿与磁赤铁矿、赤铁矿及磁铁矿共生十分密切，相互嵌生关系十分紧密且复杂，即使细磨矿也难以使褐铁矿与其相互解离，褐铁矿进入铁精矿势必影响铁精矿品位的提高。

(3) 矿石中铁矿物均与铁绿泥石、高岭石等黏土矿物共生关系密切，在细磨矿条件下，弱磁选时铁绿泥石很容易因连生或机械夹杂被带入铁精矿而影响铁精矿品位。

由此可见，采用弱磁选工艺可回收以磁赤铁矿为主的大部分铁矿物，要想取得理想的铁回收指标，矿石必须细磨且阶段磨矿，磁赤铁矿、赤铁矿、磁铁矿与褐铁矿集合体的工艺粒度可作为预先磁选抛尾时确定磨矿细度的参考。磁赤铁矿、赤铁矿与磁铁矿集合

体的工艺粒度及单体解离度为提高铁精矿品位提供了重要参考依据。

参考文献

- [1] 刘秀铭, John SHAW, 蒋建中, 等. 磁赤铁矿的几种类型与特点分析[J]. 地球科学, 2010, 40(5): 592 - 602.
- [2] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山, 200(3): 11 - 14.
- [3] 洪秉信, 傅文章. 矿物解离度与工艺粒度关系和解离难易度探讨[J]. 矿产综合利用, 2012(1): 56 - 60.
- [4] 李维兵, 宋仁峰, 刘华艳. 我国难选铁矿石选矿技术进步评述[J]. 金属矿山, 200(11): 1 - 4.
- [5] 印万忠, 丁亚率. 我国难选铁矿石资源利用现状[J]. 有色矿冶, 2006(增刊): 63 - 68.
- [6] 朱立军, 傅平秋. 碳酸盐岩发育土壤中的磁赤铁矿及其成因机理研究[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(2): 27 - 30.
- [7] 王秋林, 陈雯, 余永富, 等. 难选铁矿石磁化焙烧机理及闪速磁化焙烧技术[J]. 金属矿山, 2009(12): 73 - 76.

某金矿工艺矿物学研究

方明山¹ 肖仪武¹ 童捷矢²

(1. 北京矿冶研究总院矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京, 100044; 2. FEI 公司, 美国)

摘要: 山东某金矿中金的品位为 5.20 g/t, 为查明该金矿的矿石性质和特征, 运用传统的光学显微镜以及自动矿物分析仪等大型先进的仪器对该金矿进行了详细深入的工艺矿物学研究。结果表明: 矿石中的金矿物及含金矿物嵌布粒度很细, 其中又有相当一部分以包体金的形式嵌布于脉石矿物中; 而且有 8.37% 的金赋存于碲金矿、碲铜金矿、碲金银矿以及碲银矿(含 Au)中; 这两个方面是影响矿石中金的回收的最主要因素。

关键词: 金; 工艺矿物学; MLA

山东某金矿中金的品位为 5.20 g/t, 含量相对较高, 但是由于其矿石性质比较复杂, 实际生产过程中金的回收效果不佳。为合理开发利用该矿石资源, 在运用传统的光学显微镜进行分析研究的基础上综合利用自动矿物分析仪(mineral liberation analyser, 简称 MLA)等大型先进的仪器对该金矿进行了详细深入的工艺矿物学研究^[1]。

1 矿石的化学成分

矿石的化学分析结果见表 1。化学分析结果显示: 矿石中 Au 的品位为 5.20 g/t, Ag 13.47 g/t, 含 Fe 2.88%, 含 S 0.63%, Cu、Pb、Zn 的含量都很低。可见, 样品中最主要的有价元素为 Au。

表 1 矿石的化学分析结果

元素	Au, g/t	Ag, g/t	Fe	S	Cu	Pb	Zn
含量/%	5.20	13.47	2.88	0.63	0.01	0.017	0.17
元素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C
含量/%	49.83	13.00	12.08	1.09	5.93	0.20	2.98

2 矿石的矿物组成及相对含量

矿石中共有 6 种金矿物及含金矿物, 分别为自然金、碲金矿、碲金银矿、碲铜金矿、铜金矿以及碲银矿(含 Au); 银矿物主要为碲银矿。矿石中其他金属矿物含量较低, 其中最主要为褐铁矿、赤铁矿以及黄铁矿, 另有少量的金红石、黄铜矿等。脉石矿物主要为长石、石英、方解石和云母, 其次为高岭石、白云石以及少量的磷灰石、萤石、重晶石和锆石等其他矿

物。矿石的矿物组成及相对含量见表 2。

表 2 矿石的矿物组成及相对含量

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
长石	25.64	白云石	4.99
石英	22.98	褐铁矿	3.57
方解石	18.85	赤铁矿	
云母	15.00	黄铁矿	1.19
高岭石	6.75	其他矿物	1.03

3 矿石中金矿物及含金矿物的嵌布特征

3.1 自然金

自然金是矿石中最主要的金矿物, 其主要呈粒状嵌布于黄铁矿以及石英等脉石矿物中; 另外还有部分自然金呈长条状产出, 嵌布于黄铁矿等矿物的裂隙之中。自然金的嵌布粒度很细, 嵌布粒度主要集中于 1~5 μm 之间。

根据自然金与其他矿物的嵌布关系, 可将其分为包裹金、粒间金和裂隙金三类^[2~3]。矿石中的自然金主要以粒间金的形式嵌布, 其次以包体金和裂隙金的形式存在。以这三种形式产出的自然金分别占矿石中总金矿物量的 23.78%、20.92% 和 19.58%, 占矿石中总金比例的 32.72%、30.35% 和 27.93%, 是矿石中金回收的主要对象。其中以粒间金形式嵌布的自然金与黄铁矿的嵌布关系比较密切, 大多嵌布在黄铁矿颗粒间或嵌布于黄铁矿与石英、方解石以及白云石之间(见图 1、图 2), 另少量嵌布于长石颗粒之间。而以包体金形式存在的自然金主要包裹于长石、黄铁