

• 高等学校教学用书 •

工艺矿物学

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

工 艺 矿 物 学

东北工学院 周乐光 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

工艺矿物学

东北工学院 周乐光 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街黄城根北街29号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 11 1/2 字数 272 千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷

印数00,001~3,500册

ISBN 7-5024-0717-0

TD·120 (课) 定价2.30元

前 言

自1979年起工艺矿物学已被列为选矿专业必修课。编写这本教材既是为了满足本科教学的需要，又是对有关高校十年来教学实践的总结。教材内容按50课时编排。

全书对工艺矿物学的基本概念、任务，反光显微镜下矿物的光学性质和鉴别方法，工业矿石及其选矿产品的矿物组成、含量、嵌布特征、元素赋存状态、有用组分的单体解离度，工艺矿物流程图以及工艺地质填图等方面的基本理论与研究方法，作了全面系统的介绍。既可作本科教学用书，也可供在工艺矿物学、选矿、地质等部门工作的科技人员参考。

教材共分6章、两个附录。其中第1、5、6章由东北工学院周乐光编写，第2章及附录一由北京科技大学李前懋编写，第3、4章及附录二由西安冶金建筑学院周国华编写。由东北工学院、北京科技大学、西安冶金建筑学院、南方冶金学院、昆明工学院、唐山工程技术学院和鞍山钢铁学院有关教师组成的教材编写小组，曾于1987年10月和1988年5月先后两次审定和讨论了书稿内容。1988年8月初稿完成后，又由主编周乐光统一进行了修改和润色。

工艺矿物学正处于内容及方法不断更新的发展时期，为了推动学科的进一步完善与提高，衷心期望使用本书的读者提出批评指正。

编 者

1989年3月

目 录

1 总论	1
1.1 工艺矿物学的发展概况及其地位与作用	1
1.2 工艺矿物学研究内容	3
1.3 取样	6
1.4 误差控制	9
2 不透明矿物鉴定	16
2.1 晶体光学的基本知识	16
2.2 矿相显微镜	18
2.3 不透明矿物的光学性质	27
2.4 不透明矿物的其他物理性质	36
2.5 常用的其他鉴定方法及金属矿物鉴定表	40
3 矿石组成矿物定量	56
3.1 分离矿物定量	56
3.2 目估定量	63
3.3 镜下矿物定量	65
3.4 化学多元素分析矿物定量	70
3.5 仪器定量	76
3.6 某些特殊矿石类型的矿物定量	78
3.7 矿物定量结果校核	81
4 矿石中元素赋存状态	82
4.1 元素在矿石中的存在形式	83
4.2 元素赋存状态研究方法	85
4.3 元素的配分计算	96
4.4 研究实例	99
5 矿物嵌布特征	109
5.1 概述	109
5.2 矿物粒度	111
5.3 矿物粒度测量方法和技术	115
5.4 矿物嵌布特征分析	125
6 矿物工艺性分析和工艺地质填图	130
6.1 原矿工艺性质	130
6.2 工艺地质填图	132
6.3 流程产物工艺性分析	140
6.4 矿物解离的数学模型	153
附录 1 矿物工艺性分析实例.....	159
附录 2 常见矿物工艺性参数表.....	169
主要参考文献.....	178

1 总 论

1.1 工艺矿物学的发展概况及其地位与作用

人类对矿物原料的利用,已有数千年历史。不过,大规模地开发和采掘则还是本世纪初叶的事。随着近代大工业的建立,各国正以前所未有的规模和速度消耗着地下资源。资源危机,已成为当今世界一个普遍性的社会问题。加强资源综合利用,提高有用组分回收率,是应付这一挑战的有效途径。H.Ф.切里谢夫统计,目前地壳上已知的3300余种矿物,被利用的仅140多种。而由于选冶工艺原因,这为数有限的矿种资源,又有相当大的一部分被白白丢失。黑色金属是20%,有色金属是40%,稀有金属的损失则高达50%以上。工业生产的迅猛发展,一方面是使越来越多的低品位、细颗粒、共生组合复杂的矿石进入选冶工业部门;另一方面是对回收指标的要求日趋增高。因而矿石工艺处理水平必须要以相应的速度提高,以适应这一社会技术要求。工艺矿物学,即是在工业生产和技术进步的有力推动下,应运而生的一门新兴边缘学科。

和所有其它学科的萌芽、生长和发展一样。作为一项依附于矿物学、选矿学的工业技术,工艺矿物学的出现可以追溯到工业社会之初,甚或更早一些。20世纪40年代后,随着实际资料的极大丰富,相邻基础学科与测试技术的进步,特别是概率论、数理统计和体视学的引进,光学显微镜、 x 射线衍射、电子显微镜、电子(离子)探针的应用,使学者们有可能从理论体系、基础知识、研究方法、基本内容等方面进行系统地总结和论述。追寻它的学术发展方向。阐明它在社会发展和国民经济中的地位和作用。而A.И.金兹堡和И.Т.亚历山大罗娃,1974年《工艺矿物学——新的矿物学分支》的问世,则标志着工艺矿物学,作为一门独立而成熟的技术科学,稳步而成功地跨进了现代科学之林。

苏联是工艺矿物学研究起步较早的国家。H. M. 费多罗夫斯基在论述矿床地质-经济综合评价原则时,即蕴含着对矿石进行工艺矿物学分析的观念。以全苏矿物原料研究所为代表的一系列研究机构,从战前开始即陆续组建了一批以矿石工艺矿物学性质为其研究对象的矿物学组。当时的主要任务,是向分选工艺人员提供所需要的矿物含量、元素配分,嵌布特征及产品单体解离度等项参数。这一时期的工作,在1946年B. B. 多利沃-多布罗沃利斯基和B. A. 格拉兹科夫斯基的专著中,曾有过系统性的总结。近10~20年来,由于矿石工艺处理方法的进步、矿物原料利用范围的扩展,矿产资源综合利用程度的提高,新型观测手段的出现,加之工艺矿物学研究方法的发展,在苏联,工艺矿物学已成为地质、选矿、冶炼等部门技术进步的重要依托。

我国早在本世纪50年代即开始了这方面的工作。中南工业大学,长沙矿冶研究总院,北京矿冶研究总院等单位在学科的发展和完善上都程度不同地作出了自己的贡献。1979年成立隶属于中国金属学会选矿学术委员会的工艺矿物学学术组织后,国内各自分散的工艺矿物学研究,开始走向统一的运行轨道。到1987年10月,已先后召开了四次全国性的工艺矿物学学术交流会和二次专题讨论会。1983年创办的《工艺矿物》期刊,又为从事这方面研究的学者、开辟了一方总结成果、交流经验、切磋问题的学术园地。也向世界敞开了一

扇“工艺矿物学”窗口。

美国的“工艺矿物学委员会”成立于1979年4月。开始它隶属于冶金学会。1981年上半年扩大为冶金学会和采矿工程师学会的一个下属联合委员会。并于1981年芝加哥年会上，召开了工艺矿物学首届专题讨论会。

学科在国际上的代表人物有：A.И.金兹堡、B.З.布利斯科夫斯基、P.F.凯尔、W.帕克、P.兰姆道尔。苏联全苏矿物原料研究所、日本东北大学选矿制炼研究所应用矿物研究室，德意志联邦共和国洪堡-维达克选矿研究所岩矿室，都是国外从事这项工作较有成效的地方。

在工艺矿物学的积极参与下，矿产资源综合利用水平，近一、二十年来有了长足的进步。我国1986年的黄金生产中，15%的黄金产量即来自于其它矿种里的伴生金。至于选冶工艺加工水平，由于工艺矿物学的帮助，得以迅速提高的事例更是比比皆是。江西淮乐锰矿，矿石组成矿物有钙菱锰矿（34.65%）、赤铁矿（14.85%）、锰方解石（36.00%）、石英（9.0%）以及5.5%左右的水锰矿、褐锰矿和软锰矿。赤铁矿以1~5 μm 的粒度与钙菱锰矿共生。由于原始资料将紧密共生的钙菱锰矿和赤铁矿误认为是一种硬锰矿，并将锰方解石定名为普通方解石。因此，决定采用手选，重介质分选，跳汰及强磁选等手段，进行锰的选别和铁锰分离。结果是，当锰的品位由原矿的20%提高到26%时，锰的损失率已高达15%。经济效益极差。后经认真的工艺矿物学研究，比较准确地查明了矿石中各种矿物状况。这样就完全改变了矿石的工艺处理方案。对矿石工业评价也有了新的认识。不仅不再进行铁锰分离的机械分选，而且锰方解石也不再属于舍弃对象。因为它正是高炉冶炼所需要的炉料。显然，为了适应工艺加工要求，对矿石的分析不仅要有品位、储量、伴生组分等指标，还要掌握与工艺加工有关的矿石性质，以及性质的地质、物理、化学成因和空间分布规律。这些性质主要有：组成矿物的类别和含量、元素赋存状态、矿物嵌布特征、流程产品的矿物单体解离度，矿物的比重、电性、磁性、硬度、弹性、塑性、湿润性、可浮性、吸附性、离子交换性、热特性、溶解性、辐射性以及细菌性等。这些影响工艺加工的全部矿石特征，统一称之为矿石的工艺矿物学性质。研究矿石的工艺矿物学性质及其在加工过程中的性状的学科，即为工艺矿物学。

传统的地质勘探工作，大多是在金属平均含量的基础上，期望提交更多的储量。因此，找矿阶段的地质人员对矿床的研究，大多集中于矿物组成、结构构造、矿物生成顺序、矿物世代、共生组合关系、元素含量等。对于影响矿石工业利用价值的工艺矿物学性质一般涉及甚少。所以矿业生产中那种“储量很大，采出不多，得到更少”的事件时有发生。不少矿山选厂投产试车不久，就得积极筹划拆迁改建。小茅山多金属矿床，矿石含有铜、铅、锌、硫、铁、银等多种有用元素。早期采用氰化法浮选工艺，所得产品不仅铅锌互含超过标准，铜的回收指标也极不理想。精矿含铜有时可低到5%左右。以方铅矿为载体的银，仅有一半左右得到回收。后在查清矿石工艺矿物学性质的基础上，改用亚硫酸-硫化钠浮选工艺，除了生产出铜、铅、锌、硫的合格产品外，银的回收率也从58.7%提高到83.65%。因此，工艺矿物学除了要努力为选矿试验提供相应的矿石特征资料外，更要积极走向资源利用的全过程。有效地参与到地质勘探、矿床评价、储量计算等基础地质过程中。只有这样，才有可能对矿床做出恰如其分的地质评价，确定合理的选矿方法，选择最佳流程方案，控制、解释和预测工艺过程，推动分选技术、设备的不断更新。在可能的条件下，使

矿产资源在一个可以预见的时期内，得到充分利用。其有用组分得到最大限度地回收。另外，在工艺矿物学研究中，还要注意对矿石性质的地质成因和微观机理的分析。使对矿石工艺矿物学性质的认识与说明，从具体、个别、外在的表象描绘，向系统、本质、整体的规律性方向过渡。促使学科的理论体系、研究方法与基本知识跨进到一个新的更加成熟的理性王国。同时，为了更有效地发挥学科在国民经济中的作用，积极开展服务于本学科的专用测试仪器、方法和手段的研究也是非常重要的。这样就可以缩短矿石性质研究周期，增强其在矿业生产、科研、设计和试验中的适用性，使矿石性质、特别是一些常规性的工艺矿物学性质查定由繁琐、粗糙、费时，走向简便、快速、准确。以满足加工工业部门飞速发展的需要。

可以预期，经过工艺矿物学工作者的努力，在工业社会对矿产资源综合利用紧迫需要的推动下，工艺矿物学将稳步而迅速地跨向一个新的里程碑

1.2 工艺矿物学研究内容

作为一门独立的学科，工艺矿物学所要研究的内容是广泛而深刻的。同时随着矿产资源综合利用程度的不断深化和工业技术水平的提高，研究领域将会继续延伸和拓宽。但是，从学科的历史发展和今后可以预见的一个时期来看，它的最基本任务主要有以下10个方面。

1.2.1 矿石的矿物组成

这是工艺矿物学的一项基础性工作。主要内容有：查清矿床里的所有矿物种（亚种）属，判明各主要矿物特别是矿石矿物成分的变化规律；考查伴生物质特征；确定矿石组成矿物含量。

矿床中的矿物，数量上有多少之分；经济上有价值高低之别；性质上有稳定与否之差；成分上有变化程度的不同；加工利用时更是利弊各异。同时上述性质往往相互矛盾彼此制约。如鲁南一砂卡岩型含铜磁铁矿床，矿石中磁铁矿含量最多；黄铁矿在工业利用时危害性最大；而经济价值又以细粒黄铁矿中的银金最高。显然，为了对矿床做出综合利用的正确评价，使矿石的工艺处理方案尽可能趋向合理，对组成矿物的方方面面必须要有一个正确而全面的认识。

进行组成矿物研究时，对矿床中的矿物，不能只着眼于当前有用的那些矿石矿物。脉石和可能混入的围岩矿物同样也要加以认真考查。地质探矿储量计算时，尽管仅考虑对矿石矿物的回收。但选别加工时，作为与之相伴的脉石矿物同样要参与全部分选过程。对脉石矿物一无所知或所知甚少，都将影响矿石矿物的有效回收。此外，今天认为是无用的脉石矿物，随着工业技术的进步，成为矿石矿物的事例也是很普遍的。铂，早在200多年前就被发现，但当时人们却不会利用它。1735年西班牙政府颁布的一项法令中，明文规定铂为有害杂质。责令除去从砂矿中与金一起开采出来的铂。故当时根本就无“铂矿石”可言。直到19世纪，人们发现了干式冶炼制取铂的方法，并探明了铂的可贵性质后，铂才成为工业上的贵金属。含有一定数量铂的矿物集合体，构成为“铂矿石”。

另外，自然界矿物、元素组成多数起伏不定。这对矿物自身的经济价值或加工方式都有影响。例如某一含铌-钽铁矿的花岗岩矿床，矿物中 Ta_2O_5 ： Nb_2O_5 比值、因部位不同而异。花岗岩顶部的铌-钽铁矿中，两元素的比值为1.5：1~1：1；到了深部，由于 Nb_2O_5

含量的增高，其比值改变为1:1.5~1:2。至于对伴生物质的考查，则应无一遗漏地逐个查清。有害的成分（如钽-铌矿石中的黑钨矿）在分选时要设法除掉；有益的成分（象绿柱石和祖母绿矿石中的金云母）则要考虑回收。

矿石组成矿物含量的查定，是件难度较高的观测工作。它要求对样品中的各类矿物进行大量统计性观测。镜下观测尽管是最重要的观测手段，但除个别情况外，很少由它单独对含量作出结论。为了提高工作效率和观测精度，往往还要辅以其它检测手段。单矿物分离、选择性溶解、多元素化学全分析、物相分析等都是经常采用的方法。

1.2.2 矿石中所含元素（特别是有用元素）的赋存状态

同一元素赋存于多种矿物之中，是自然界的一种普遍现象。例如：某一热液型稀土矿床，所含稀土元素在氟碳酸盐（钇氟碳酸铈矿、氟碳酸铈矿）、氟化物（萤石、钇萤石）、磷酸盐（独居石、磷钇矿）和硅酸盐（水锆石、铁钽石）中均有存在。上述各矿物不仅稀土含量不同，选别性质也不一样。为了选取一个适宜的分选方案，并对可能回收的稀土元素量作出预测，在工艺流程设计之前，对矿石中稀土元素的赋存状态及其有关问题，都必须予以查清。

1.2.3 确定矿石组成矿物（特别是其中有用矿物）的嵌布特征

测绘其粒度分布曲线，并对可能出现的单体解离度作出预测。

嵌布特征（以及磨矿时的单体解离度），是矿石工艺矿物学性质中最重要的内容之一。它既影响流程方案的选择，又是确定磨矿细度和破碎方法的关键因素。显微镜下的颗粒测量，是解决这一问题的常规而基本手段。不过这种方法误差较大、劳动强度较高、费工费时，这些缺点需要努力改进。

1.2.4 查明矿石工艺能型的空间分布规律，编制矿物工艺图

这是工艺矿物学中涉及相邻学科最多，工程最为庞大的一项工作。其目的是为矿山采掘、选厂生产的合理高效运行提供依据。

本溪南芬露天铁矿，进入80年代后，选矿指标要求由原来的精矿品位64%、回收率80%，分别提高到68%和82%。初始阶段，他们沿用以往的“矿石性质单一”的概念来组织生产。结果很长一段时间也未能实现这一目标。近来，他们按照矿物成分，嵌布特征并结合小型试验的结果，将矿区各地段的矿石分别划分为条带状磁铁铁矿石，透闪石磁铁铁矿石、块状磁铁铁矿石和赤铁磁铁铁矿石等4种工艺类型，并据此组织开采，进矿和分选。结果，无论是在稳定选厂生产还是在提高选矿指标上，都收到了良好的效果。

1.2.5 研究矿石的表生变化

出露地表和构造断裂带附近的矿床，由于风化作用，其矿石常有一系列物理的、化学的改变。变化结果一般表现为：矿石疏松多孔、金属含量增高、矿物种类增加，原生矿石中类质同象元素形成新的独立矿物，大量元素以胶体吸附方式附着于细分散的赭色产物上，矿物表面覆盖上各种薄膜或者薄壳等。矿石的这种表生变化除了大家熟知的硫化矿物外，对于含矿的碱性岩、碳酸盐岩、磷灰石-磁铁矿、碳酸盐-重晶石-萤石-氟碳酸铈矿、含日光榴石的长石以及含稀有金属的伟晶岩中均有发生。风化作用形成的表生产物，无论是开采、分选，还是冶炼都和原生矿石有着明显差别。因此，工艺矿物学必须在查明表生变化性质的基础上，准确圈定表生产物边界，对其经济技术价值、储量和处理工艺进行单独的评价和研究。

1.2.6 分析矿物的工艺性质对其元素组成和微结构的依赖性

一般认为矿物具有一系列固定不变的性质，但分选实践确凿无疑地表明：不仅不同矿区，即使是同一矿区的同一种矿物也往往呈现出不同的工艺性质。

自然界完全一样的矿物是没有的。由于组成元素的不同，晶体结构的差别，矿物的物理、化学性质在基本一致的前提下，呈现出程度不同的波动。沉积变质含铁石英岩中的磁铁矿，比磁化系数为 $75000 \sim 100000 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$ 。而接触交代和岩浆矿床中的磁铁矿，由于含有较多的Mg、Ti、V、Mn和Al等元素，比磁化系数降到 $50000 \sim 77000 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{g}$ 。有趣的是，连它的生长大小对分选性质也有影响。个体较大的磁铁矿单晶，碎矿、磨矿时，磁畴结构遭到破坏，从而使得剩磁强度增高的微细颗粒，呈现出强大的絮凝性。导致大量脉石颗粒受到捕获而被带入精矿。成为提高精矿品位的重要障碍。

一般来讲，随着杂质元素的增多，晶体结构对称性的下降，均一性的破坏，矿物浮选时与药剂的作用就愈是活跃。所以，就可浮性而言，白铁矿比黄铁矿差，辉铜矿的等轴变体就比斜方变体强，单斜晶系的磁黄铁矿与六方晶系的磁黄铁矿相比，不仅磁性强，可浮性也要好得多。

因此，为了具体准确地指导矿物分选，工艺矿物学就必须深入到矿物内部组成和微观结构中，查明它们与矿物分选性质间的因果关系。编制“矿物成分与工艺性质”、“矿物结构有序度与工艺性质”之类的图解，用以指导和预测矿物分选工作。

1.2.7 考查矿物在工艺加工过程中的性状

自采掘之日起，矿物就开始了一系列的变化。除了常见的氧化（硫化物、自然硫）、溶解（氯化物、硫酸盐）等作用外，在工艺加工的每个环节几乎都有改变。象选别前的破碎、磨矿，它不仅极大地增加了矿物表面积，而且随着化学键的破裂形成了许多电价不饱和的表面。同时矿物的发光性，荷电性也要有所变化。至于浮选药剂作用对矿物性质的影响，更是大家所熟知的。因此，对矿物工艺性质的研究，不仅在工艺加工之前，而且对工艺加工的全过程，都要进行追踪研究。及时掌握工艺性质的变动趋势，为分选人员研究对策、采取措施、稳定选矿指标提供依据。

1.2.8 研究各种作用下，朝预定方向改变矿物工艺性质的可能性及其机理

按分选要求使矿物工艺性质朝预定方向作某种程度的改变，浮选中早已普遍采用这一作法。矿浆里添进捕收剂后，矿物表面的疏水性增强，矿粒就易于为气泡所捕收。相反，使用抑制剂，矿物表面将为亲水性的薄膜所包围，阻止了捕收剂与矿物表面的作用。然而，由于缺少对矿物与药剂作用机理的深入研究，工艺中这一成功的作法，大多仍旧停留在经验性积累和机械模仿上。至于用其它手段对工艺性质作更大范围的变动，这方面的研究就更少了。实际上，受到各种外力作用的矿粒，工艺性质都会有程度不同的改变。经超声波处理后的矿粒，不仅表面的污垢被清除，而且晶体内部结构缺陷也要发生变化。化学药剂可使矿物表面层的过渡型离子电价升高或降低。加热和放射性辐射，同样会对矿物工艺性质产生影响。这是个极有前途的研究领域，它将有可能使分选工艺最终摆脱矿物自然性质的制约和束缚，使那些当前看来工艺性质十分相近的矿物，有可能被有效地分离。

1.2.9 分析矿物工艺性质的成矿地质条件

矿物是地壳上地质作用的产物。具有的各种工艺性质都与自身成矿作用有关。黑钨矿的地质成矿条件主要有两类。交代作用生成的黑钨矿赋存于云英岩化的花岗岩体内；充填

作用生成的黑钨矿多在高温热液石英脉内。两者的铁、锰相对含量彼此各异。成矿温度愈高，MnO含量愈低，FeO含量愈高。由此而导致比重、硬度，比磁化系数均随FeO含量的升高而迅速上升。就浮游性而言，FeO含量多的黑钨矿，晶格能高，湿润接触角小，水分子易于极化，因而可浮性远不如MnO含量高的黑钨矿。又如绿柱石。伟晶岩型绿柱石，碱金属含量高，晶格缺陷多，比重大，可浮性差，热液型绿柱石晶格缺陷少，可浮性强。

总之，如果掌握了成矿作用与工艺性质之间的内在联系，那么就可以从成因矿物学的高度，论述和预测矿石的工艺性质。在工艺矿物学里，建立起一个重要的分支理论体系，从而有效地推动工艺矿物学的发展。

1.2.10 判明尾矿综合利用的可能性

尾矿中不仅常含有可被利用的元素，而且大量尾矿的存在，经常是环境污染和耕地削减的根源。工艺矿物学的任务在于从矿物地球化学的角度查明尾矿中可被利用的元素，以及它们的赋存状态，以提高矿产资源综合利用的程度。

上述十项基本任务，是就一个完整的工艺矿物学体系而言。它并非是矿石资源考查的统一要求。实际进行“工艺矿物学”分析时，还要根据矿石的形成特点及其类型的不同，提出对矿石工艺矿物学性质研究的不同要求。研究内容的繁简，分析程度的深浅，考查问题时的侧重与省略，均视具体对象而定。但是，其中有五个方面，则是不论什么矿石进行工艺矿物学考查时都必定要明确解答的。它们是：矿物的种类和数量；元素赋存状态及其配分比计算；矿物粒度测定；矿物嵌布特征及其单体解离度分析与连生体描述等。这五项内容的每个方面各有自己的独立理论体系。另一方面又具有强烈的实践性。特别是20世纪50年代后，各种近代测试仪器大量涌现，极大地提高了上述考查工作的速度和质量。同时，就目前国内外实际状况而言，绝大多数单位，尤其是那些分散的具体选矿工业部门，仍然采用光学显微镜作为基本考查手段。因为它不仅简单易行，而且还具有准确可靠的优点。对于一般黑色、有色、稀有贵重金属矿物，用光学显微镜观测获取的资料，基本也能满足现行工业生产要求，解答常规试验中的问题。正是基于这些考虑，从面向多数出发，教材仍以光学显微镜为主线，按上面列举的五个方面展开。至于其它内容和有关近代测试技术，将在相应章节予以适当说明，不再单列专章介绍。

1.3 取 样

工艺矿物学研究，主要是为地质、选矿（包括冶炼）提供资料。资料准确与否直接影响到这些工作的试验过程和质量。然而实际进行矿石性质考查的样品数量，不论是与选矿试验的矿石量，还是和自然界存在的矿床储量相比，其量都是很小很微不足道的。因此，对于进行工艺矿物学考查的那部分样品，就要求有充分的代表性。代表性不好，即使后续的具体观测工作如何精确细致，由此提供的工艺矿物学资料价值都不会很高。为了保证试样的代表性，根据研究的目的和内容，获取样品的方式主要有二种。一是从分选产品及试验用矿样中抽取；一是在工艺加工取样点上采取地质标本样。

选矿试验研究用矿样的采取，是项很繁重细致的工作。它通常是由建设单位负责组织，地质、选矿试验研究、设计单位参加，共同研究进行。试验研究、设计单位提出技术要求，地质部门负责编制采样设计。

取样前，必须对矿床，矿体产状，矿石的矿物组成、结构、构造、嵌布粒度、化学组成、有益和有害元素赋存状态、矿石物理技术特性、开采方法、采矿计划及技术要求等，都要基本清楚。在此基础上，才能制定出合理的采样方案，得到具有充分代表性的矿样。为此，应对矿石运进矿仓前的全过程进行周密的调查研究，从而找出影响矿样代表性的各种因素，以便在取样过程中逐个予以解决。

影响矿样代表性的因素很多，一般可概括为地质和开采两大类因素。

(1) 地质因素：取样时，首先考虑的是矿体本身的变化，即整个矿体的稳定程度。实际上完全均一的矿体是很少的。绝大多数矿体在矿石类型、结构、构造、矿物组成、粒度特性、有益和有害组分赋存状态、平均品位等方面，在空间的各个部位均是变化不定的。采样前，需要根据矿体这些特征，将矿石划分为不同的类型。求出不同矿石类型在整个矿量中所占的比例。按此比例采取的各种类型矿石混合样，就具有了整个矿体的代表性。至于采样点的多少，则视矿体的稳定程度而定。以铁矿为例，海相沉积的矿石性质比较稳定。取样地段和取样数量均可大为减少；砂卡岩型铁矿石由于性质多变，采样地段和取样数量均要有很大的增加。同时还要知道，不是任何矿床按矿石类型比例取一混合矿样就能满足要求。比如一些有色金属矿床，原生的硫化矿石与次生的氧化矿石，分选性质差别很大，这样就必须分别采样。其它矿床也有类似情况。象鞍山式铁矿中的磁铁矿和赤铁矿，也需要分别采样。总之，采样时，要充分顾及到矿体的地质特点及其分选工艺性质。

(2) 开采因素：由于开采方法的不同，除了使原有因素复杂化外，又增加了一些新因素。例如开采时，与矿体接触的围岩和矿体内的夹石必然要混入到采出的矿石中。一般露天开采围岩混入量为5~10%，地下开采的围岩混入量为10~20%，个别甚至可达25~30%，细脉状矿体混入量更大。因此，采样时就要把围岩和夹石含量按比例混入到矿样中。要是开采是按矿石类型分别进行，则要按矿石类型分别取样。另外不同的采矿方法，使采出的矿石粒度组成及其它性质，如比重、容重、混度、机械强度、含泥量等均有所差别，取样时也要估计到这些。总之，这部分工作要与采矿人员密切配合，根据他们的采矿设计予以合理考虑。

上述因素中，主要是地质因素。各类型矿石在全矿量中比例搞清了，取样就有了主动权。就可以知道应在哪些地段上取多少样，再加上开采因素和试验要求，基本就能保证所取样品的代表性。

这种样品，一般具有以下几个基本特征：

代表该矿床主金属（或伴生有益组分）各品级储量；

代表该矿床各类型矿石的平均品位。其中包括高、中、低三种品位；

代表矿石的矿物组成及其化学成分；

代表围岩、夹层、脉石的种类、性质及含量；

代表有用矿物粒度特征及矿石结构、构造特征。

如果对试样有特殊要求时，则要根据工作目的另行考虑。

样品的取样布置网络要金面考虑，在平面上，要照顾到全区情况适当布点；在剖面上，则要顾及到上、中、下各中段都有取样点。取样的数目，从提高试样代表性的角度来看，当然是愈多愈好。但过多也会造成浪费，因此要适宜。一般至少得有4个以上的采样点。样品的重量，如果试样为G，则金矿区实际取样重量不得小于2G。一般试样重100~

200kg。个别的可到1t。取样方法，要根据地质条件、矿石品位、取样点数及工作目的而定。常用的有爆破法、方格法、刻槽法、全巷剥层法等。

工艺矿物学研究用的矿块地质样，要是在现场采取，可在上述选矿试样的采样点上，按照矿石类型、结构、构造、工业品级的差别以及岩性和层位不同的顶底板围岩和夹石中采取。每种标本2~3块。规格不小于100×70mm。如果是在运回实验室的选矿样中抽取，首先就要用铁锹在水泥地板上将矿样充分拌匀、摊平。然后在其上等距离的均匀拣取矿块。利用这种方式获得的矿块手标本，即可对矿石物质组成进行比较全面系统的研究，提供工艺矿物学所能获取资料中的相当一部分。

另外，选矿试验用矿样数量一般很大。在正式进入可选性研究之前，不可少的都要经过筛分、破碎、混匀、缩分这样四道工序。破碎后的矿样粒度可到1~3mm。工艺矿物学研究，根据工作需要也常从这种细碎样中抽取适当数量的样品，经过清洗、筛分、团聚后，磨制成为可供镜下观测用的光（薄）片。

研究分选产品工艺矿物学性质的样品，是从选矿流程考查样品中抽取。不过按照缩分公式取得的产品矿样，不能直接用来进行工艺矿物学性质观测。还要经过脱泥和筛分。脱泥是为了清除细泥（主要是指5~10μm以下的微粒）。因为，当样品中的矿石颗粒附上矿泥后，矿物的真实分布状况将会部分或全部被掩盖。另外粘结在一起的泥团，不仅使观测者无从得到产品中矿石颗粒的实际粒度分布，同时，还会造成一系列其它方面的假象。矿泥的存在，轻者增大观测结果误差。严重时，可使观测资料根本无法使用。常用的脱泥办法是湿式筛分。它是将盛有物料的细筛（400目或325目），刚好浸没于盛水容器的水面下，用细水流冲洗。使筛上细泥流过筛孔落入容器中。筛上产品倒入瓷盆用烘箱烘干。然后用套筛进行筛分。筛分的目的，一方面是为了便于在显微镜（特别是立体显微镜）下观测，另一方面也是为了减少观测误差和有利于资料的数据处理。

从分选试验或选矿产品中抽取样品时，有个取样重量的问题。过多不但样品采制困难，研究时也很不方便。过少又无法保证矿物试样的代表性。

试样最小重量，主要与物料中矿石最大粒度、矿物嵌布特征，矿石品位有关。通常可用下式计算。

$$G = Kd^t \quad (1-1)$$

式中 G ——试样的最小重量，kg；

d ——试样中颗粒的最大粒径，mm；

K, t ——经验系数及指数。

系数 K 与有用组分的含量、颗粒大小和浸染均匀程度有关。而指数 t 与矿物连生体和颗粒的硬度、韧性、脆性和裂隙度等有关。

K 和 t 值可通过试验确定。但一般是按已有的经验选定。表1-1为我国实际取样中 K 和 t 的经验值。

既然 t 值一般定为2，因而可以只考虑矿石浸染均匀程度而选定 K 值。而矿石浸染程度一般也只是根据肉眼及放大镜作粗略估计。所以实际工作中，一般是按表1-2所列数值选定样品重量。

从上述粒度与试样最小重量的关系中可以看出，要得到重量较小的代表性样品，对试样必须要进行混匀和缩分。

表 1-1 几种矿石的k及t值

矿 石 类 型	k	t
铜 矿	0.10~0.20	2
钨 矿	0.20	2
钼 矿	0.20	2
脉锡矿	0.20	2
磷 矿	0.15	2
砂锡矿	0.20	2
从钨矿中选出的脉石	0.05	2

表 1-2 各类矿石样品的最小重量 (kg)

粒 度 (mm)	矿 石 浸 染 特 性		
	很 均 匀	中 等 均 匀	很 不 均 匀
20	15	40	160
10	4	10	35
8	2.5	6	20
5	1.20	2.50	7
3	0.45	0.90	2.50
2	0.20	0.40	0.90
1	0.06	0.10	0.18

混匀：是缩分前极重要的作业。只有被充分拌匀的试样才能开始缩分。常用的方法有以下4种。(1)铁锹拌匀法：即先用铁锹将试样堆成锥形的矿堆。然后在附近立一小木柱为中心，逐锹将试样轻轻撒于该木柱轴心，另行堆成新的圆锥。大量试样通过这种反复堆锥的作法，即可混匀；(2)环锥法：用铁锹将圆锥形堆变成大圆环，尔后再把圆环两边的试样堆成圆锥，反复数次，即可实现大量试样的混匀；(3)滚移法：细粒且量不多的试样可用此法混匀。将要混匀的试样置于橡皮布或油布上，提起油布的对角，使其中的试样来回翻滚。每翻滚一次调换一次油布的对角。经过5~6次的翻滚，就能使样品充分混匀；(4)槽型分样器法：少量细粒或粉砂矿试样，通过槽型分样器进行二等分，亦可达到混匀的目的。

缩分：常用堆锥四分法或网格法进行。前者将规则的圆锥压平成圆盘。再以十字板格为四份；以对角二分作为缩分出的试样。网格法是将试样混匀薄薄地平铺于油布或橡皮布上，然后划分成小方格。用平底小铲逐格取样。有时亦可用槽型分样器进行二分。

上述各点，是工艺矿物学对样品的总体原则要求。除此之外，由于研究目的和考查对象不同，对样品代表性要求的侧重点并不一样。因而，保证样品代表性的具体作法也就有了差别。同时，为了能够顺利地进行观测，对采集来的样品相应还要做一些必要的加工处理。只有这样，才能保证研究用样品的充分代表性。从而使矿石的工艺矿物学性质资料的可靠性，在第一阶段获得足够的物质保证。这些内容由于有着鲜明的针对性和实用性。故对它们的说明，将在教材的后续章节中，结合有关论述一并予以介绍。

1.4 误差控制

矿石工艺矿物学性质研究的重要方法之一，是在显微镜下对矿石中的主要有用和有害

组分的含量、存在状态、矿物粒度、嵌镶关系以及矿石在破碎过程中的连生、解离状况，迅速作出可靠的结论。解答上叙问题经常采用的一种方法，就是在显微镜下观测一定数量的矿物颗粒。从最稳妥的设想出发，为了完整准确地作出判断，理想的作法是对所研究矿石试样的全部（矿物）颗粒进行观测。只是这种作法在实际工作中是很难实现的。因为从某种意义上讲，对于任何一个矿石试样，在“颗粒数”这个问题上，实在是个名副其实的“无穷大”。因此，通常采取的办法是，用显微镜观测试样中有限的颗粒。其颗粒数的多少可以用二种办法决定。经验的作法是取1000~1500个观测点；另一种办法是根据数理统计原理求取一个合理的试样观测值。

1.4.1 参数标志量的分布函数

表征矿石某种性质的工艺矿物学参数，是镜下观测资料换算整理后的最终代表值。例如平均粒度和粒度分布柱状图，就是对矿物粒度逐个测试后予以数学处理的结果。颗粒的粒度值可称之为上两项参数的标志量。作完全类似的理解，单体的矿物颗粒、自然也就是单体解离度参数的标志量。

地壳上各种成矿作用形成的矿物，是多种因素在时间与空间上综合作用的产物。其自身的元素组成及其晶体结构具有极强的统计规律性。故而，由它所决定的各项工艺矿物学参数标志量，也都无一例外地呈现出：大小连续变化，极差明显，某个标志量值能否成为观测值所必然具有的偶然性等特点。因此，参数标志量实为一连续随机变量。现以 x 表示之。

为此，设 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 是一个相互独立的随机变量序列，它们具有有限的数学期望和方差

$$a_b = E(\omega_b)$$

$$\sigma^2 = H^2(\omega_b) \quad (b=1, 2, 3, \dots, m, \dots)$$

令：

$$\sigma_m^2 = \sum_{b=1}^m \sigma_b^2 \quad \text{并作和数}$$

$$y_m = \sum_{b=1}^m \frac{\omega_b - a_b}{\sigma_m} = \sum_{b=1}^m \omega_{mb}$$

设：

$$f_{mb} \text{ 是 } \omega_{mb} = \frac{\omega_b - a_b}{\sigma_m} \text{ 的特征函数}$$

并令：

$$\varphi_m(t) = \prod_{b=1}^m f_{mb}(t)$$

对上式两端取对数。然后在 $|t| \leq T$ （任意实数）范围内展开：

$$\begin{aligned} \ln \varphi_m(t) &= \sum_{b=1}^m \ln f_{mb}(t) = \sum_{b=1}^m \ln [1 + (f_{mb}(t) - 1)] \\ &= \sum_{b=1}^m (f_{mb}(t) - 1) - \sum_{b=1}^m \sum_{c=2}^{\infty} \frac{(-1)^c}{c} (f_{mb}(t) - 1)^c \\ &= \sum_{b=1}^m (f_{mb}(t) - 1) - R_m \end{aligned}$$

$$= -\frac{t^2}{2} + \left[\frac{t^2}{2} + \sum_{b=1}^m \int (e^{itx} - 1 - itx) dF_{m_b}(x) \right] - R_m$$

其中 $F_{m_b}(x)$ 代表 $\omega_{m_b}(x)$ 的概率。即 $F_{m_b}(x) = p[\omega_{m_b}(x)]$ 。最后：

$$\ln \varphi_m(t) = -\frac{t^2}{2} + \eta_m - R_m$$

当 $m \rightarrow \infty$ (充分大) 时, 对任何有限区间 $|t| \leq T$ 中的 t 而言, 均有 $\eta_m \rightarrow 0$, $R_m \rightarrow 0$ 。于是：

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \ln \varphi_m(t) = -\frac{t^2}{2}$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \varphi_m(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \text{——这是服从正态分布的随机变量的特征函数}$$

所以当 m 充分大时, 和数 $\sum_{b=1}^m \frac{\omega_b - \alpha_b}{\sigma_m}$ 趋向于正态分布。

矿石中矿物的生长, 大都要受到以下各种因素的影响。这些因素有成矿溶液的有用元素浓度、结晶时的温度、压力、冷却速度、元素周围的介质种类、数量和溶液的 pH 值等。所有这些因素彼此独立地影响着矿物。由矿物集合而成的矿石的工艺矿物学参数, 即是这许多偶然因素施加作用的总和。

如果以 $z_1, z_2, \dots, z_m, \dots$ 分别代表以上各因素所能影响的参数标志量的各个别部分。则：

$$x = z_1 z_2 \dots z_m \dots$$

两边取对数：

$$\ln x = \ln z_1 + \ln z_2 + \dots + \ln z_m + \dots$$

$$\text{令 } \ln x = y, \ln z_1 = \omega_1, \ln z_2 = \omega_2, \dots$$

故：

$$y = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n + \dots$$

我们知道, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots$ 中并不包含对标志量有显著影响的因素。这样, 上面结论的题设条件得到满足。所以 y 服从正态分布。不言而喻, y 的反对数 x , 就必然服从对数-正态分布。

由此可以得出：矿石的工艺矿物学参数标志量 x 服从对数正态分布。该分布的分布函数为：

$$f(\ln x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\ln x - \ln \bar{x}_g}{2\sigma_{\ln x}} \right] & \text{当 } x > 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } x < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中 $\sigma_{\ln x}$ —— 工艺矿物学参数标志量的对数的方差；

$\ln \bar{x}_g$ —— 工艺矿物学参数标志量几何平均值的对数。

1.4.2 方案设计的理论基础

数理统计是研究事物或现象统计规律的科学。它通过对有限观测资料的研究, 查明统计规律, 从而对所研究事物的整体进行推断, 并定量地反映出事物的基本特征。

现在面临的问题是要根据样本 (镜下观测) 资料, 对总体 (矿石试样) 的工艺矿物学

特征, 诸如矿物的化学成分、粒度、形状、单体解离度等参数作出合乎实际情况的判断。但样本只是总体中的一个局部, 由它来推断总体特征, 当然不可能有百分之百的把握。相反地, 倒有可能出现这样或那样的错误判断。例如矿石试样筛析产品单体解离度已合格, 我们有可能根据样本作出不合格的判断。这类错误在数理统计上称为“第一类错误”; 另一方面也有可能把事实上单体解离度不合格的试样筛析产品, 错误地当做合格产品予以接受。它在数理统计上称为“第二类错误”。两类错误发生的概率分别用 α , β 来表示。

$$\alpha = p(u - \Delta u > b > u + \Delta u, \text{实际 } H + \Delta_{1\sigma} > h > H - \Delta_{1\sigma})$$

$$\beta = p(u - \Delta u < b < u + \Delta u, \text{实际 } H - \Delta_{1\sigma} > h > H + \Delta_{1\sigma})$$

如果以 $L(H; m, u)$ 表示对于情况 $(u - \Delta u < b < u + \Delta u, \text{实际 } H - \Delta_{1\sigma} > h > H + \Delta_{1\sigma})$ 的接受概率。则:

$$\alpha = 1 - L(H; m, u)$$

$$\beta = L(H; m, u)$$

对于所研究的问题, 可以证明:

$$L(H; m, u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

式中 H ——矿石的某一项工艺矿物学参数;

$\Delta_{1\sigma}$ ——抽样误差范围;

h ——参数最佳观测值;

u ——抽样指标的最佳值;

Δu ——指标允许偏差;

b ——抽样指标;

m ——样本容量 (镜下观测的矿物颗粒数);

t ——保证程度的几率度。

由于 $L(H; m, u)$ 是 H 的单调下降函数, 如果能找到一个方案, 使之在两个控制点的两种错误发生的概率, 分别与要求的 α_0, β_0 相等。并且方案的两个观测点 α, β 得到控制, 那么方案里两类错误的发生概率就被控制住了。

为了使一次抽样镜下观测资料更有效更可靠 (也就是要尽可能提高估计量的精确度, 减少镜下观测时可能犯的两类错误), 除了要求样本应有独立性和代表性外, 对样本容量也是要有要求的。提高观测资料的精确性和可靠性, 一方面要改进统计分析方法, 使之能充分运用样本提供的资料来对试样总体作出估计和判断; 另一方面便是如何在一定的人力、物力条件下, 获取更多有用资料。前后两者加起来, 就是要针对具体问题选择一个最合理的样本容量 (矿物颗粒最佳观测数)。

1.4.3 方案设计

对于所分析的试样, 可用 M 代表矿石样品中某种矿物的颗粒总数, 则 $(M; m, u)$ 即完整地构成了一次抽样镜下观测方案。对于矿石试样某类矿物颗粒为 M 的总体, 随意观察到 m 个颗粒, 并测试到某项参数的抽样指标为 b , 若 $u - \Delta u < b < u + \Delta u$, 则认为镜下观测资料是可信的; 如果 $u - \Delta u > b > u + \Delta u$, 就认为镜下观测资料不可信, 对其结果不予接受。在 M 固定的情况下, m, u 变动, 一次方案 $(M; m, u)$ 将有 $M(M+1)/2$ 种方案可供选择。

假设试样总体 M 个颗粒中, 某项工艺矿物学参数的全及指标为 B , 则 $B/M = H$ 。当