

工艺矿物学

(第3版)

周乐光 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

工艺矿物学

(第3版)

东北大学 周乐光 主编

北京

冶金工业出版社

2007

内 容 提 要

本书对工业固体原料与产品的矿物组成、含量、嵌布特征、元素赋存状态、有用组分的单体解离,以及其他相关工艺性质的含义、作用、研究方法与基本理论进行了系统而全面的介绍。全书共分9章,主要包括总论、矿物的偏光显微镜鉴定、反光显微镜下的矿物鉴定、矿物研究的其他常用测试技术、工业固体原料与产物中组成矿物的定量、工业固体原料与产物中元素的赋存状态、矿物颗粒的粒度测量、矿物的单体解离、工业固体原料和产物的工艺矿物学研究等。

本书可作为高等院校和职业技术学院的相关专业教材,也可作为在职技术人员的培训教材或自学之用。

图书在版编目(CIP)数据

工艺矿物学/周乐光主编. —3版. —北京:冶金工业出版社, 2007.1

ISBN 978-7-5024-4110-4

I. 工… II. 周… III. 工艺矿物学 IV. P57

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第135154号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 俞跃春 美术编辑 李 心

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1990年5月第1版,2002年4月第2版,

2007年1月第3版,2007年1月第4次印刷

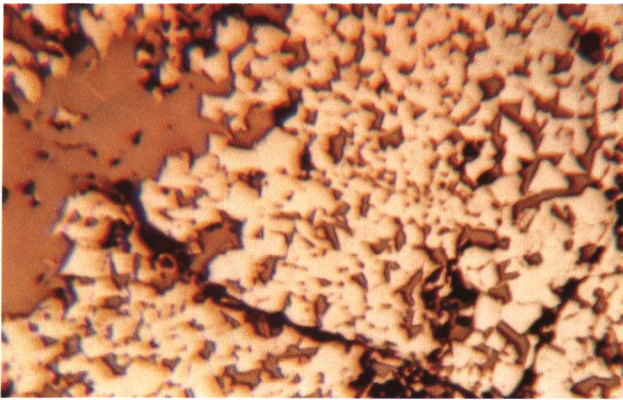
787mm×1092mm 1/16; 20.25印张; 1彩页; 479千字; 302页; 6551-9550册

45.00元

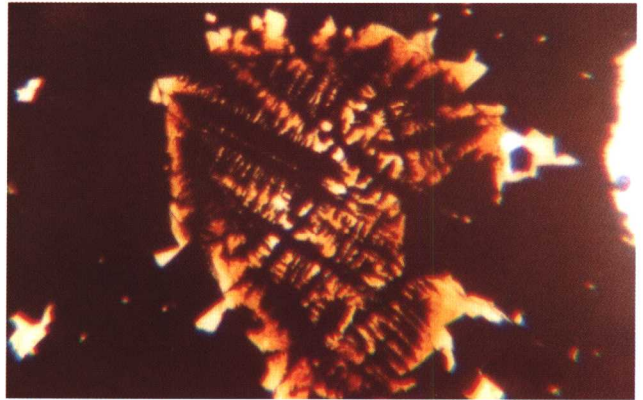
冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010) 65289081

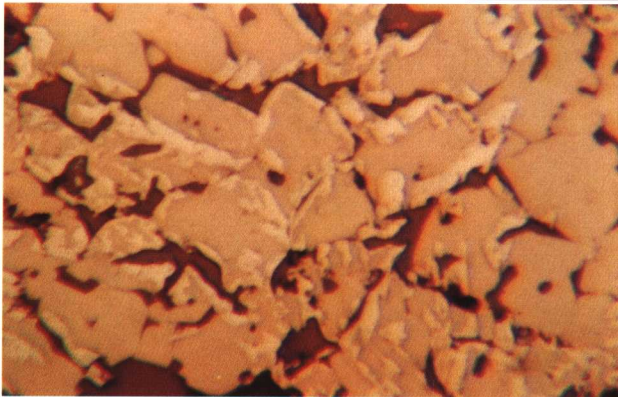
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



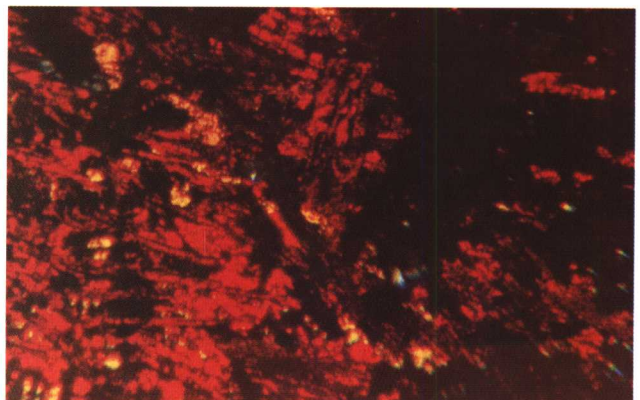
彩图1 磁铁矿的粒状结构(反射光×50)



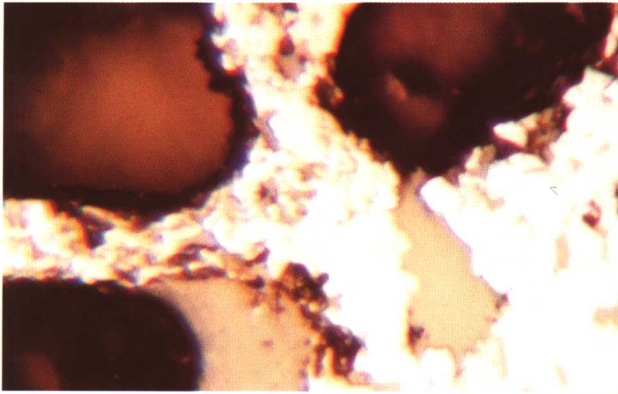
彩图2 和玻璃相(黄色)共生的磁铁矿树枝状骸晶(单偏光×125)



彩图3 由赤铁矿晶桥(浅灰)固结的磁铁矿自形,半自形晶(暗灰)(反射光×200)

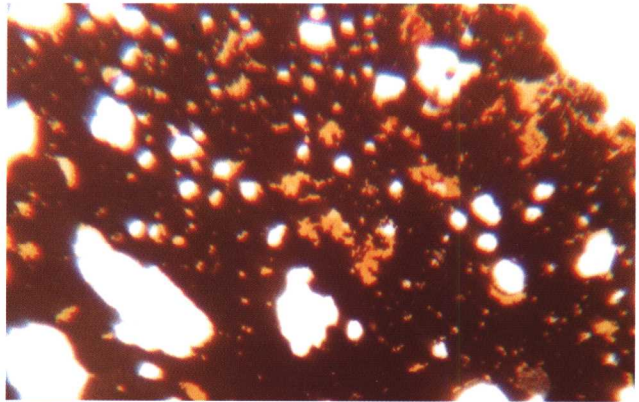


彩图4 铁酸钙(红色)与赤铁矿(黑色)组成的共晶结构(单偏光×100)

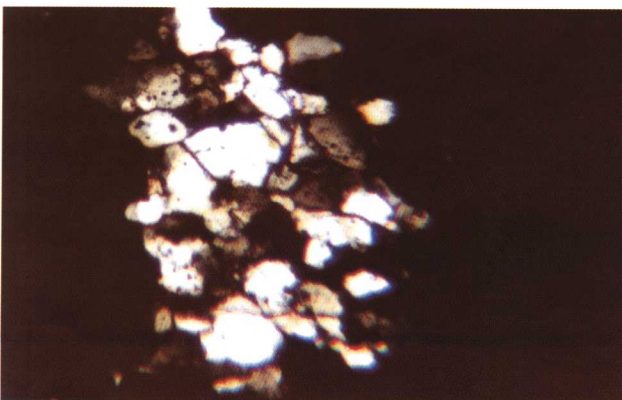
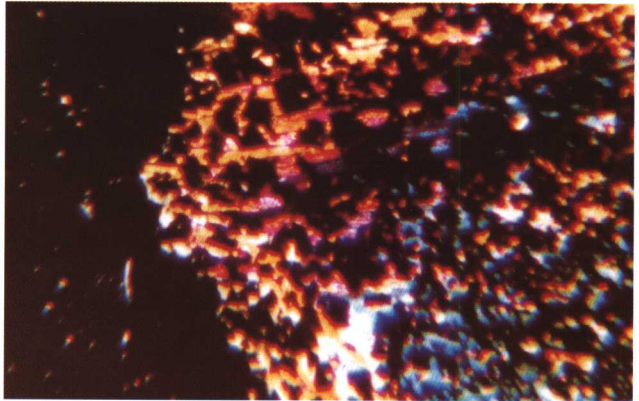


彩图5 赤铁矿的它型集合体（反射光×200）

彩图6 由气孔(白色)、玻璃相(黄色)、铁矿物(黑色)等组成的筛网状构造(单偏光×30)



彩图7 由磁铁矿(黑色)与硅酸二钙(彩色)形成的共晶结构(正交×125)



彩图8 球团矿中残留的石英颗粒群(正交×125)

第3版前言

“工艺矿物学”是研究工业固体原料与产品的矿物学特征，以及工艺加工时组成矿物性状的科学。它要求学生运用所学到的知识和技能，就工业固体原料与产品的矿物组成及影响、制约生产工艺指标的矿物性状做出准确的判断和说明。

为寻求问题解答而实施的工艺矿物学实验研究中，不仅要有对工艺矿物学各单项知识的理解和掌握，同时还要有：(1)综合运用多种技术手段和理论知识的能力；(2)知道解决某一问题时必须进行的实验研究内容；(3)对实验研究过程中的基本环节要了然于胸。有鉴于此，故而在《工艺矿物学》第3版中，修改了第5章和第6章，增加了第9章“工业固体原料和产物的工艺矿物学研究”，以期解决学生独立开展工作时，必须具有的上述三种能力。

第9章由三个独立的研究报告(摘要)组成，它们分别代表了工艺矿物学实验研究的三种常见类型。报告中，从样品的代表性要求、采集、加工、筛析开始，继而是相关技术手段的观测与试验，实验数据的分析、整理，直到研究结论的形成等必要环节，均都比较全面地有所体现。学生有了这样的参照标准，加之已有的理论知识，一般就能比较顺利地独立开展工作。

编者

2006年8月

第 2 版前言

1990 年出版的第 1 版教材，目的是为了满足不同金属矿物选矿专业的教学需要。所以天然金属矿物，成为全书编撰时内容取舍的主要依据之一。这次修订教材，增加了“矿物的偏光显微镜鉴定”，介绍了人工合成矿物与非金属矿物的镜下鉴定特征。这样做的目的，是为了使选矿、冶炼、陶瓷、建材、化工等相关专业的学生，都能依靠这本书学到自己需要的知识。

工艺矿物学是 20 世纪 70 年代兴起的一门新兴边缘应用学科。其后有关的新技术、新理论不断涌现。特别是“矿物的粒度测量”、“矿物解离”等方面更是有了长足的进展。为此，教材修订时，对那些已为实践认可的新成果均都作了比较全面的介绍和补充。

修订教材的另一较大改动是，用一章的篇幅专门介绍了“矿物研究的其他常用测试技术”。目的是使学生能够：（1）根据需要解决的问题，选取适宜的测试方法；（2）为测试工作提供合乎要求的样品；（3）能够基本正确地判读和使用测试工作所提供的数据、资料信息。

参加这次教材修订的有：东北大学周乐光（第 1、7 章），北京科技大学李建平（第 2 章 2.1~2.5 节），武汉工业大学毕晓平（第 2 章 2.6~2.7 节），昆明理工大学宋焕斌（第 3 章），南方冶金学院钟盛文（第 4 章），西安建筑科技大学吕宪俊（第 5、6 章），武汉冶金科技大学程寄皋（第 8 章）。

编者

2000 年 12 月

第 1 版前言

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与教材使用说明	3
1.2.1 工艺矿物学研究内容	3
1.2.2 教材使用说明	7
1.3 取样	8
1.4 误差控制	11
1.4.1 参数标志量的分布函数	11
1.4.2 方案设计的理论基础	13
1.4.3 方案设计	14
1.4.4 镜下观测的最佳颗粒数	15
1.4.5 抽样方案实际应用举例	15
小结	17
思考题	17
参考文献	17
2 矿物的偏光显微镜鉴定	19
2.1 晶体光学基本知识	19
2.1.1 自然光与偏振光	19
2.1.2 光在均质体与非均质体中的传播	20
2.1.3 光率体	20
2.1.4 光性方位	26
2.2 偏光显微镜	26
2.2.1 偏光显微镜的构造	26
2.2.2 偏光显微镜的调节与校正	28
2.2.3 偏光显微镜的保养	30
2.3 透明矿物在单偏光镜下的光学性质	31
2.3.1 矿物晶体的形态	31
2.3.2 解理及其夹角的测定	32
2.3.3 颜色和多色性、吸收性	33
2.3.4 薄片矿物的边缘、贝克线、糙面及突起	33

2.4	透明矿物在正交偏光镜下的光学性质	35
2.4.1	正交偏光镜间矿片的消光现象及消光位	35
2.4.2	正交偏光镜间矿片的干涉现象	36
2.4.3	干涉色和干涉色色谱表	39
2.4.4	补色法则和补色器	41
2.4.5	正交偏光镜间主要光学性质的测定和观察	42
2.5	透明矿物在锥光镜下的光学性质	45
2.5.1	一轴晶干涉图的形象特征和光性正负	46
2.5.2	二轴晶干涉图的形象特征和光性正负	50
2.6	油浸法测定折射率	53
2.6.1	浸油的配制及其折射率值测定方法	54
2.6.2	浸油薄片的制备	55
2.6.3	在碎屑油浸薄片,比较矿物与浸油折射率值大小的方法	56
2.6.4	油浸法测定矿物折射率值的步骤	57
2.7	常见透明矿物鉴定表	58
	小结	76
	思考题	76
	参考文献	76
3	反光显微镜下的矿物鉴定	77
3.1	光片与反光显微镜	77
3.1.1	光片	77
3.1.2	反光显微镜	77
3.1.3	光片的安装	80
3.2	矿物的反射率与双反射	81
3.2.1	反射率与双反射的概念	81
3.2.2	反射率与双反射的测定	82
3.2.3	影响反射率和双反射的因素	83
3.3	矿物的反射色与反射多色性	83
3.3.1	反射色与反射多色性的概念	83
3.3.2	反射色与反射多色性的测定	83
3.3.3	影响反射色和反射多色性的因素	84
3.4	矿物的内反射	85
3.4.1	内反射的概念	85
3.4.2	内反射的测定	85
3.4.3	影响内反射测定的因素	86
3.5	矿物的均质性与非均质性	86
3.5.1	均质性与非均质性的概念	86
3.5.2	均质性与非均质性的测定	87

3.5.3	影响均质性与非均质性的因素	87
3.6	矿物的偏光图	87
3.6.1	概述	87
3.6.2	均质矿物的偏光图	88
3.6.3	非均质矿物的偏光图	88
3.7	矿物的硬度	89
3.7.1	刻划硬度	89
3.7.2	抗磨硬度	89
3.7.3	抗压硬度	90
3.8	矿物的结构	91
3.8.1	晶形	91
3.8.2	解理	91
3.8.3	双晶	91
3.8.4	环带	92
3.9	矿物的浸蚀鉴定	92
3.9.1	浸蚀鉴定的概念	92
3.9.2	浸蚀鉴定的试剂、用具及操作	92
3.9.3	影响浸蚀鉴定的因素	93
3.10	矿物的其他鉴定特征	93
3.10.1	磁性	93
3.10.2	导电性	93
3.10.3	脆性和塑性	94
3.11	矿物鉴定表	94
	小结	102
	思考题	103
	参考文献	103
4	矿物研究的其他常用测试技术	104
4.1	电子与固体物质的相互作用	104
4.1.1	电子与物质的作用过程	104
4.1.2	产生的各种物理信号及其作用	106
4.2	X射线衍射分析	110
4.2.1	X射线的产生和性质	110
4.2.2	X射线在晶体中的衍射	113
4.2.3	粉晶和多晶体的研究方法	116
4.2.4	X射线衍射定性物相分析	119
4.3	透射电子显微镜	123
4.3.1	电子光学基础	123
4.3.2	透射电镜的工作原理与结构	127

4.3.3	试样的制备	128
4.3.4	透射电镜电子显微像的形成	129
4.3.5	电子衍射花样的特点与分析	130
4.4	扫描电子显微镜	134
4.4.1	扫描电镜的工作原理及构造	134
4.4.2	扫描电镜的主要性能	135
4.4.3	样品的制备及图像分析	136
4.5	电子探针微区分析	137
4.5.1	原理及构造	137
4.5.2	波谱仪及能谱仪使用范围的比较	139
4.5.3	试样制备	139
4.5.4	电子探针的分析应用	139
4.6	俄歇电子能谱表面微区分析	140
4.6.1	基本分析原理	141
4.6.2	俄歇电子能谱仪的组成及俄歇电子能谱图	141
4.6.3	应用实例	142
4.7	热分析方法	143
4.7.1	差热分析法	144
4.7.2	热重分析法	146
	小结	147
	思考题	149
	参考文献	150
5	工业固体原料与产物中组成矿物的定量	151
5.1	分离矿物定量	151
5.1.1	重力分离	152
5.1.2	磁力分离	154
5.1.3	介电分离	155
5.1.4	选择性溶解	156
5.2	目估定量	157
5.2.1	提纯目估法	157
5.2.2	测距目估法	158
5.3	镜下矿物定量	160
5.3.1	面积法	161
5.3.2	直线法	162
5.3.3	计点法	163
5.4	化学多元素分析矿物定量	164
5.4.1	硫化矿物的计算	165
5.4.2	碳酸盐、含 H ₂ O 和 [OH] ⁻ 矿物的计算	166

5.4.3	不含 H ₂ O 和 [OH] ⁻ 的硅酸盐矿物的计算	168
5.5	仪器定量	169
5.5.1	激光显微光谱矿物定量	169
5.5.2	自动图像分析仪矿物定量	170
5.6	某些特殊矿石类型的矿物定量	171
5.6.1	稀有矿物定量	171
5.6.2	细微矿物的定量	173
5.7	矿物定量结果校核	174
	小结	174
	思考题	175
	参考文献	175
6	工业固体原料与产物中元素的赋存状态	176
6.1	元素在原料与产物中的存在形式	177
6.1.1	独立矿物	177
6.1.2	类质同象	178
6.1.3	离子吸附	178
6.2	元素赋存状态研究方法	179
6.2.1	重砂法	179
6.2.2	选择性溶解法	180
6.2.3	电渗析法	182
6.2.4	电子探针法	183
6.2.5	激光显微光谱法	184
6.2.6	数理统计法	185
6.3	元素的配分计算	189
6.3.1	元素配分计算的方法及步骤	189
6.3.2	配分计算	190
6.4	研究实例	193
6.4.1	某含金铁锰土矿金赋存状态研究	193
6.4.2	某铂矿床铂族元素赋存状态的考查	197
	小结	200
	思考题	201
	参考文献	201
7	矿物颗粒的粒度测量	202
7.1	矿物嵌布特征与颗粒粒度	203
7.1.1	有用矿物嵌布特征	203
7.1.2	矿物颗粒粒度	204
7.1.3	颗粒的视粒度与平均粒度	205

7.1.4	粒度测量用样品和颗粒粒级划分	208
7.2	粒度测量基础	210
7.2.1	基本符号	210
7.2.2	基本公式	211
7.2.3	基本量的测量	212
7.2.4	目镜测微尺的格值标定	213
7.3	矿物粒度测量	213
7.3.1	概述	213
7.3.2	基本关系式—— (N_v) 的计算公式	214
7.3.3	测量和计算方法	215
7.4	测量误差与粒度分布图示	226
7.4.1	测量误差	226
7.4.2	粒度分布图示	228
7.5	嵌布特征在矿物分选中的意义	229
7.5.1	矿物嵌布特征分选类型	230
7.5.2	嵌布特征工艺性分析举例	231
	小结	232
	思考题	232
	参考文献	233
8	矿物的单体解离	234
8.1	矿物的解离与连生	236
8.1.1	矿物的解离方式与连生体类型	236
8.1.2	矿物解离的影响因素	238
8.1.3	T. P. 梅洛依连生定律	241
8.2	矿物解离数学模型	245
8.2.1	高登模型及赛 (Hsieh, 1994) 对模型的改进	245
8.2.2	威格模型	247
8.2.3	钦模型	252
8.3	矿物单体解离度测定	254
8.3.1	测定方法	254
8.3.2	测定程序	255
8.3.3	测定误差及其误差来源	257
8.4	解离度测定体视学误差校正	258
8.4.1	巴巴 (K. Baba) 等的校正方法	258
8.4.2	乔尼斯 (M. P. Jones) 等的校正方法	260
8.5	工艺矿物流程图	263
	小结	267
	思考题	268

参考文献	268
9 工业固体原料和产物的工艺矿物学研究	269
9.1 某铁矿的物质组成研究 (摘要)	269
9.1.1 概述	269
9.1.2 矿石的物质组成	269
9.1.3 铁、磷元素在矿石中的赋存状态	272
9.1.4 结语	277
9.2 某选厂强磁产品的工艺矿物学特征及其工艺矿物流程图 (摘要)	277
9.2.1 概述	277
9.2.2 矿样	277
9.2.3 粉矿的物质组成	279
9.2.4 铁元素在粉矿中的赋存状态	281
9.2.5 尾矿产品的工艺矿物学特征	282
9.2.6 精矿产品的工艺矿物学特征	286
9.2.7 工艺矿物流程图	290
9.2.8 结论	297
9.3 某公司球团烧结法熔剂分加试验样品的工艺矿物学特征 (摘要)	298
9.3.1 样品编号	298
9.3.2 组成矿物	299
9.3.3 结构构造	300
9.3.4 球团矿试样的矿物与结构构造	300
小结	300
思考题	301
参考文献	301

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 20 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。据 H. Φ. 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，这为数有限的矿产资源，又有相当大的一部分被白白丢失，其中黑色金属是 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。

和所有其他学科的萌芽、生长和发展一样，工艺矿物学的出现可以追溯到工业社会之初，甚至更早一些。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 年发表的《工艺矿物学——新的矿物学分支》一文，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。

前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。以前全苏矿物原料研究所为代表的一系列研究机构，从二战前即开始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有过系统的总结。1983 年 12 月，在列宁格勒召开的“工艺矿物学对于苏联原料基地发展的意义”讨论会上，强调指出了提高工艺矿物学理论水平和加强实验基础的意义。近年来，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，新型测试技术的应用，加之工艺矿物学研究方法的发展，在俄罗斯，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 20 世纪 50 年代即开始了这方面的工作。选矿、冶金、建材等相关部门都有专

门从事研究的人员和设备。进入 20 世纪 80 年代后,为了使各自分散的学术研究成果能及时得到交流,1979 年召开的中国金属学会选矿专门委员会决定成立隶属于它的工艺矿物学学组。之后于 1980 年 11 月 20~25 日在四川峨嵋召开了中国首届工艺矿物学学术交流会,会上提交论文 150 篇,与会代表近 200 人。自此各种形式的学术交流活动持续不断,到 1998 年,已先后召开了 14 次不同领域的全国性学术会议,其中有 3 次是“显微镜测定粒度和解离度”、“金银矿石工艺矿物学”与“中国非金属矿利用”等方面的专题讨论会。1983 年创办的《工艺矿物》期刊,既为从事这方面研究的学者开辟了一个总结成果,交流经验,切磋问题的学术园地,同时也向世界敞开了—扇“工艺矿物学”学术动态的窗口。

美国的“工艺矿物学委员会”成立于 1979 年 4 月。初期它隶属于冶金学会,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。

工艺矿物学学科在国际上的代表人物有:A. H. 金兹堡、B. 3. 布利斯科夫斯基、P. F. 凯尔、W. 帕克、A. M. 高登、R. P. 钦。前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、德国洪堡-维达克选矿研究所岩矿室、中国北京矿冶研究总院,都是世界上从事这项工作较有成效的机构。

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、元素含量等方面。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”的事件时有所闻。20 世纪 70 年代后,随着工艺矿物学研究工作的进步与加强,矿产资源综合利用水平有了明显的提高。我国 1986 年的黄金生产中,15%的黄金产量即来自于其他矿种里的伴生金。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。

此外,工艺矿物学的研究成果在冶金、建材、陶瓷、化工等行业的生产工艺中,同样也发挥着重要的作用。Y. Oho 关于由回转窑烧制的硅酸盐水泥熟料强度计算公式中,即是以熟料组成矿物的晶体光学常数、晶体形态、颗粒大小和煅烧温度等与工艺矿物学有关的因子组成的。又如我国西北某钢铁公司的高炉生产,自开工之日起,就长期为炉内结瘤所困扰。后经过对炉瘤的工艺矿物学研究,查明入炉精矿粉中霓石、钠辉石、钠长石、锂云母等矿物的过多残留,是导致高炉结瘤的根本原因。为此,高炉生产改为采用低碱度酸渣冶炼,使高炉炉渣中能有大量碱金属硅酸盐矿物生成,以提高终渣的排碱率。由于措施得当,具有良好的针对性,所以钾、钠等碱金属在炉内循环富集的可能性受到有效扼制,从