

实用铁矿石 选矿手册

SHIYONG TIEKUANGSHI
XUANKUANG SHOUCHE

印万忠 侯 英 李 闯 刘明宝 编著



化学工业出版社

实用铁矿石 选矿手册

SHIYONG TIEKUANGSHI
XUANKUANG SHOUCHE >>

印万忠 侯英 李闯 刘明宝 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《实用铁矿石选矿手册》着重介绍常见的铁矿物，我国主要的铁矿石工业类型，中国铁矿的生产与需求，磁铁矿、赤铁矿和菱铁矿的精矿质量标准，铁矿石的破碎筛分和磨矿分级工艺，磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、多金属共生复合铁矿石、超贫铁矿石、高磷铁矿石的选矿工艺和实践，铁矿石浮选过程中常用的捕收剂、抑制剂、活化剂、分散剂和有机高分子絮凝剂，铁矿石破碎、筛分、磨矿、分级、磁选、重选、浮选、焙烧、电选、浓缩和浆体输送设备，铁矿选矿过程的检测方法和自动控制方法，球团矿和铁精矿的制备方法，铁矿尾矿的处理、筑坝、浓缩和综合利用方法等。

本书适用于一线生产工人更好地掌握与铁矿石选矿相关的技术关键，便于通过查阅的方法快速找到实际操作的方法，解决生产中出现的问题；书中的新技术和新设备，便于铁矿选矿科技工作者拓宽新思路。本书也适用于大专院校的教师和学生作为参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用铁矿石选矿手册/印万忠编著. —北京：化学工业出版社，2016.6
ISBN 978-7-122-26923-2

I. ①实… II. ①印… III. ①铁矿物-选矿技术-技术手册 IV. ①TD951.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 087727 号

责任编辑：袁海燕
责任校对：吴 静

文字编辑：向 东
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装 订：三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 35 1/2 字数 939 千字 2016 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

I 前言 I

铁矿石是钢铁生产最为重要的基础原料，是我国的战略资源，我国炼钢生产中有80%左右的原料来自铁矿石冶炼的生铁。2014年中国进口铁矿石量达到9.33亿吨，比2013年同比增长13.8%，对外依存度进一步提高到78.5%，同比提高了9.7%。铁矿石进口依存度的提高，已成为我国钢铁工业经济安全的重大隐患。因此，高效利用我国自己的铁矿石资源已势在必行。尽管我国铁矿石资源储量丰富，但具有贫、细、杂的特点，因此，我国一直以来非常重视铁矿石的选矿技术。近年来，国内学者撰写了多本与铁矿石选矿相关的书籍，如《现代铁矿石选矿》、《中国黑色金属选矿实践》、《铁矿选矿技术》、《铁矿选矿新技术与新设备》等，但这些书籍在实用方面略显不足，本书从实用的角度全面介绍铁矿石的选矿技术、工艺与装备，既包含了传统的工艺和设备，又加入了目前铁矿选矿领域的最新选矿技术、工艺和装备，并结合典型生产实践，以更好地体现其实用性，在介绍设备时，还加入有关设备的使用注意事项，以便于读者更好地掌握和使用相关设备，即本书注重于介绍能真正用于生产实践的技术、工艺和装备。

《实用铁矿石选矿手册》主要根据铁矿石的特点，从实用的角度，描述不同类型铁矿石的选矿方法、工艺和设备，全书共分八章，即铁矿物、铁精矿质量标准、铁矿石选矿工艺与实践、铁矿石浮选药剂、铁矿石选矿设备、铁矿选矿自动化、铁精矿深加工和铁矿尾矿处理与综合利用，着重介绍常见的铁矿物，我国主要的铁矿石工业类型，中国铁矿的生产与需求，磁铁矿、赤铁矿和菱铁矿的精矿质量标准，铁矿石的破碎筛分和磨矿分级工艺，磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、多金属共生复合铁矿石、超贫铁矿石、高磷铁矿石的选矿工艺和实践，铁矿石浮选过程中常用的捕收剂、抑制剂、活化剂、分散剂和有机高分子絮凝剂，铁矿石破碎、筛分、磨矿、分级、磁选、重选、浮选、焙烧、电选、浓缩和浆体输送设备，铁矿选矿过程的检测方法和自动控制方法，球团矿和铁精矿的制备方法，铁矿尾矿的处理、筑坝、浓缩和综合利用方法等。

本书的出版，有利于一线生产工人更好地掌握铁矿选矿的技术关键，便于通过查阅的方法快速找到实际操作的方法，解决生产中出现的问题。另外，书中的新技术和新设备，便于铁矿选矿科技工作者拓宽新思路。本书也适用于大专院校的教师和学生作参考书。

本书由我国矿物加工领域知名学者印万忠教授（第2章、第3章、第8章），辽宁科技大学侯英博士（第5章5.1、5.5、5.8节和第6章）、北方重工集团李闯博士（第5章5.2、5.3、5.4、5.6、5.7、5.9、5.10、5.11节和第7章），陕西商洛学院刘明宝博士（第1章和第4章）编著。全书由印万忠教授统稿。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。



2016年5月

I 目录 I

第1章 铁矿物与铁矿石	1
1.1 铁矿物	1
1.1.1 磁铁矿	1
1.1.2 赤铁矿（镜铁矿）	2
1.1.3 菱铁矿	3
1.1.4 铁的氢氧化物（针铁矿、纤铁矿及褐铁矿）	4
1.1.5 钛铁矿	6
1.1.6 含铁硅酸盐矿物	7
1.2 我国铁矿石的工业类型	7
1.2.1 鞍山式铁矿	7
1.2.2 镜铁山式铁矿	8
1.2.3 大西沟式铁矿	9
1.2.4 攀枝花式铁矿	9
1.2.5 大冶式铁矿	10
1.2.6 宁芜式铁矿	10
1.2.7 宣龙-宁乡式铁矿	11
1.2.8 风化淋滤型铁矿	11
1.2.9 包头白云鄂博式铁矿	11
1.2.10 海南石碌铁矿	12
1.2.11 吉林羚羊石铁矿	14
第2章 铁精矿质量标准	15
2.1 高品质铁精矿质量评价体系	15
2.1.1 铁精矿质量标准评价	15
2.1.2 合理铁精矿品位的建立	15
2.2 磁铁精矿质量标准	16
2.3 赤铁精矿质量标准	17
2.4 多金属共生铁精矿质量标准	18
2.5 有色金属选矿回收铁精矿质量标准	18
第3章 铁矿石选矿工艺与实践	20
3.1 我国铁矿石选矿技术与工艺的进步	20
3.1.1 碎磨技术与工艺	20
3.1.2 磁选技术与工艺	23
3.1.3 浮选技术与工艺	26
3.1.4 重选技术与工艺	27
3.1.5 磁化焙烧技术与工艺	29
3.1.6 联合工艺	30
3.1.7 产品处理	31
3.1.8 铁矿选矿工艺流程的改造	33

3.2 磁铁矿选矿工艺	37
3.2.1 磁铁矿石选矿工艺的进步	37
3.2.2 典型工艺流程和生产实践	38
3.2.3 微细嵌布磁铁矿选矿技术与实践	55
3.3 赤铁矿选矿工艺	61
3.3.1 赤铁矿石选矿工艺的进步	61
3.3.2 典型工艺流程和生产实践	62
3.3.3 微细嵌布赤铁矿选矿技术与实践	67
3.3.4 鲕状赤铁矿选矿技术与工艺的进步	75
3.4 褐铁矿选矿工艺	100
3.4.1 褐铁矿石选矿工艺的进步	100
3.4.2 典型工艺流程与实践	105
3.5 菱铁矿选矿工艺	123
3.5.1 菱铁矿石选矿工艺的进步	123
3.5.2 典型工艺流程和实践	125
3.6 多金属共生复合铁矿石选矿工艺	139
3.6.1 多金属共生复合铁矿石选矿工艺的进步	139
3.6.2 典型工艺流程和实践	140
3.7 超贫铁矿石选矿工艺	177
3.7.1 超贫铁矿石选矿工艺的进步	177
3.7.2 典型工艺流程和实践	179
3.8 高磷铁矿石选矿工艺	184
3.8.1 高磷铁矿石选矿工艺的进步	184
3.8.2 典型工艺流程和实践	186
第4章 铁矿石浮选药剂	215
4.1 选矿药剂分类及进展	215
4.2 捕收剂	216
4.2.1 阳离子捕收剂	217
4.2.2 阴离子捕收剂	224
4.3 抑制剂	241
4.3.1 淀粉	242
4.3.2 木质素类	245
4.3.3 DNF、JE 型抑制剂	246
4.4 活化剂	247
4.4.1 常用活化剂	247
4.4.2 MHH-1 活化剂的应用试验	247
4.5 有机高分子絮凝剂	249
4.5.1 有机高分子絮凝剂	249
4.5.2 絮凝作用机理	249
4.5.3 磺化聚丙烯酰胺	250
4.5.4 腐殖酸盐	250

5.1	破碎设备	251
5.1.1	铁矿石破碎设备的进展	251
5.1.2	颚式破碎机	252
5.1.3	旋回破碎机	260
5.1.4	圆锥破碎机	266
5.1.5	高压辊磨机	272
5.1.6	冲击式破碎机	277
5.1.7	辊式破碎机	284
5.1.8	柱磨机	288
5.1.9	立式离心磨机	291
5.2	筛分设备	292
5.2.1	铁矿石筛分设备的进展	292
5.2.2	振动筛	292
5.3	磨矿设备	299
5.3.1	铁矿石磨矿设备的进展及种类	299
5.3.2	球磨机	301
5.3.3	棒磨机	305
5.3.4	自磨和半自磨机	305
5.3.5	砾磨机	307
5.3.6	立(塔)磨机	308
5.3.7	振动磨机	310
5.3.8	搅拌磨机	311
5.4	分级设备	312
5.4.1	铁矿石分级设备的进展	312
5.4.2	螺旋分级机	313
5.4.3	水力旋流器	316
5.4.4	斜窄流分级机	320
5.4.5	高频细筛	320
5.4.6	复式流化分级机	324
5.5	磁选设备	326
5.5.1	铁矿石磁选设备的进展	326
5.5.2	磁选机的分类	327
5.5.3	弱磁场磁选机	328
5.5.4	中磁场磁选机	337
5.5.5	强磁场磁选机	338
5.5.6	超导磁选机	346
5.5.7	磁重联合磁选机	348
5.5.8	尾矿回收机	359
5.5.9	预磁器	360
5.5.10	脱磁器	361
5.5.11	除铁器	365
5.6	重选设备	366
5.6.1	铁矿石重选设备的进展	366

5.6.2	跳汰机	367
5.6.3	螺旋溜槽(选矿机)	370
5.6.4	摇床	372
5.6.5	离心选矿机	373
5.7	浮选设备	377
5.7.1	铁矿石浮选设备的进展	377
5.7.2	BF-T型浮选机	378
5.7.3	浮选柱	379
5.7.4	磁浮选机	381
5.7.5	旋流静态微泡磁浮选柱	382
5.7.6	旋流浮选机	383
5.8	焙烧设备	384
5.8.1	铁矿石焙烧设备的进展	384
5.8.2	竖炉	385
5.8.3	回转窑	386
5.8.4	隧道窑	388
5.8.5	闪速磁化焙烧炉	390
5.8.6	悬浮磁化焙烧炉	391
5.8.7	水平移动-固定床式磁化焙烧机	392
5.9	电选设备	393
5.9.1	铁矿石电选设备的进展	393
5.9.2	电选机的特点和应用实例	393
5.10	浓缩设备	394
5.10.1	铁矿石浓缩设备的进展	394
5.10.2	浓密机	395
5.10.3	过滤机	404
5.11	浆体输送设备	408
5.11.1	浆体输送设备的进展	408
5.11.2	离心泵	409
5.11.3	容积式浆体泵	419

第6章 铁矿选矿自动化

423

6.1	铁矿选矿过程的检测方法	423
6.1.1	给矿量检测方法	423
6.1.2	矿浆流量检测方法	430
6.1.3	矿浆浓度检测方法	434
6.1.4	矿浆粒度检测方法	438
6.1.5	品位检测方法	441
6.1.6	水分检测方法	443
6.1.7	物位检测方法	444
6.1.8	磨机负荷量检测方法	448
6.1.9	pH值检测方法	451
6.1.10	浮选泡沫状态检测方法	452
6.2	铁矿选矿过程的自动控制方法	454

6.2.1	破碎筛分过程控制方法	454
6.2.2	磨矿分级作业控制方法	457
6.2.3	磁(重)选作业控制方法	464
6.2.4	浮选作业控制方法	467
6.2.5	浮选柱作业控制方法	470
6.2.6	浓缩作业控制方法	471
6.2.7	过滤作业控制方法	474
6.2.8	精矿和尾矿输送控制方法	475
6.2.9	环水系统自动控制方法	477
6.3	铁矿选矿厂自动控制实例	479
6.3.1	加拿大铁矿公司卡略尔(Carol)选矿厂生产系统自动控制	479
6.3.2	尖山铁矿选矿厂生产系统自动控制	484

第7章 铁精矿深加工 487

7.1	球团矿的制备方法	487
7.1.1	球团矿用铁精矿质量指标要求	487
7.1.2	我国球团矿制备方法	488
7.1.3	我国球团矿生产实例	502
7.2	超纯铁精矿的制备方法	505
7.2.1	超纯铁精矿的质量标准	505
7.2.2	超纯铁精矿的制备方法	506

第8章 铁矿尾矿处理与综合利用 507

8.1	铁矿尾矿的处理	507
8.1.1	铁矿尾矿的处理方法	507
8.1.2	铁矿尾矿筑坝的方法	510
8.1.3	尾矿库安全	518
8.1.4	尾矿库管理	525
8.1.5	尾矿浓缩技术	527
8.1.6	尾矿输送技术	535
8.1.7	尾矿废水处理与回用	537
8.2	铁矿尾矿的综合利用	538
8.2.1	尾矿的类型	538
8.2.2	铁矿尾矿中有价元素的回收技术	540
8.2.3	铁矿尾矿综合利用进展	543

参考文献 550

第1章 铁矿物与铁矿石

1.1 铁矿物

铁矿石是钢铁生产企业的重要原材料，种类繁多。在工业生产中，凡是含有可经济利用的铁元素的矿石叫作铁矿石，天然铁矿石经过破碎、磨碎、磁选、浮选、重选等程序逐渐选出其中的铁矿物。目前自然界已发现的铁矿物和含铁矿物约有 300 余种，常见有 170 余种。可用作炼铁原料的含铁的矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿等。

1.1.1 磁铁矿

磁铁矿（相对分子质量为 231.54）， FeFe_2O_4 或 $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{O}_4$ ，理论组成： FeO 31.03%， Fe_2O_3 68.96% 或含 Fe 72.4%，O 27.6%。其中 Fe^{3+} 的类质同象代替有 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 V^{3+} 等；替代 Fe^{2+} 的有 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ge^{2+} 等。当 Ti^{4+} 代替 Fe^{3+} 时，其中 $\text{TiO}_2 < 25\%$ 时称为含钛磁铁矿， $\text{TiO}_2 > 25\%$ 时称为钛磁铁矿，还有钒磁铁矿 $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{V}^{3+})_2\text{O}_4$ ，当含钒钛较多，其中 V_2O_5 含量可达 8.8% 时称为钒钛磁铁矿，铬磁铁矿 $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+})\text{O}_4$ ，其中 Cr_2O_3 含量可达 12%。

磁铁矿为八面体晶形，等轴晶系， Oh7-Fd3m ， $a_0 = 0.8396\text{nm}$ ， $Z = 8$ 。铁黑色，条痕黑色，半金属至金属光泽，不透明，无解理，有时可见平行 $\{111\}$ 的裂开，往往为含钛磁铁矿中呈显微状的钛铁晶石、钛磁铁矿的包裹体在 $\{111\}$ 方向定向排列所致。性脆。硬度 5.5~6。相对密度 4.9~5.2。具强磁性，居里点（ T_c ）578℃。居里点是磁性矿物的一种热磁效应，为磁性或反磁性物质加热转变为顺磁性物质的临界温度值。磁铁矿外形如图 1.1 所示。

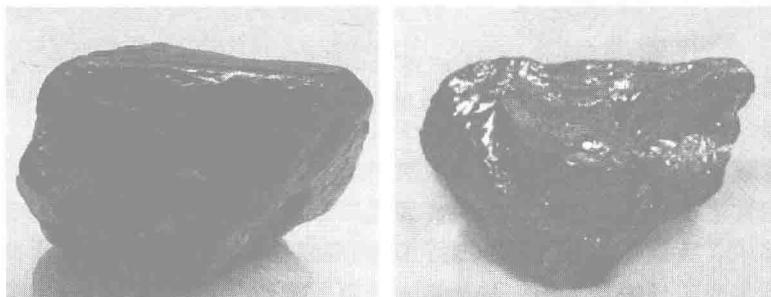


图 1.1 磁铁矿外形图

磁铁矿产于还原性环境，主要成因类型有岩浆型、接触交代型、高温热液型、区域变质型。

磁铁矿分布广，有多种成因。生于变质矿床和内生矿床中，岩浆成因矿床以瑞典基鲁纳为典型；火山作用有关的矿浆直接形成的以智利拉克铁矿为典型；接触变质形成的铁矿以中国大冶铁矿为典型；含铁沉积岩层经区域变质作用形成的铁矿品位低、规模大，俄罗斯、北美、巴西、澳大利亚和中国辽宁鞍山等地都有大量产出。磁铁矿是炼铁的主要矿物原料，也是传统的中药材。

1.1.2 赤铁矿（镜铁矿）

赤铁矿，分子式 Fe_2O_3 ，同质多象变体： $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，三方晶系 $a_{\text{rh}}=0.5421\text{nm}$ ， $\alpha=55^\circ17'$ ； $Z=2$ 。 $a_{\text{h}}=0.5039\text{nm}$ ， $c_{\text{h}}=1.3760\text{nm}$ ； $Z=6$ ，刚玉型结构，在自然界中稳定；等轴晶系的磁赤铁矿（ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ）是其同质多象体，尖晶石型结构，在自然界中呈亚稳定状态。化学组成：Fe 69.94%，O 30.06%。常含类质同象替代的 Ti、Al、Mn、 Fe^{2+} 、Ca、Mg 及少量的 Ga、Co；常含金红石、钛铁矿的微包裹体。隐晶质致密块体中常有机械混入物 SiO_2 、 Al_2O_3 。纤维状或土状者含水。据成分可划分出钛赤铁矿、铝赤铁矿、镁赤铁矿、水赤铁矿等变种。赤铁矿外形如图 1.2 所示。

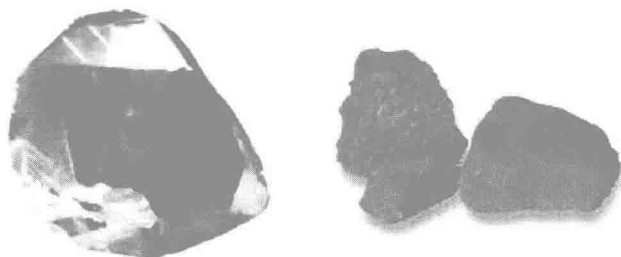


图 1.2 赤铁矿的外形图

赤铁矿的形态特征与其形成条件的关系是：一般由热液作用形成的赤铁矿可呈板状、片状或菱面体的晶体形态；云母赤铁矿是沉积变质作用的产物；鲕状和肾状赤铁矿是沉积作用的产物。赤铁矿结晶习性常呈板状晶体，主要由板面与菱面等所成之聚形，在 $\{0001\}$ 晶面上常出现有晶面条纹；集合体形态多样，显晶质的形态有鳞片状、粒状、块状，隐晶质及非晶质的形态有致密块状、肾状、鲕状、粉末状等。强金属光泽，片状、鳞片状的赤铁矿称为镜铁矿；细小鳞片状或贝壳状的镜铁矿称为云母赤铁矿，中国古称“云子铁”；依 $\{0001\}$ 或近于 $\{0001\}$ 连生的镜铁矿集合体为铁玫瑰；呈鲕状或肾状者称为鲕状赤铁矿或肾状赤铁矿；表面光滑明亮的红色钟乳状赤铁矿集合体为红色玻璃头；呈红褐色土状而光泽暗淡的称为赭石，中国古称“代赭”，而以“赭石”泛指赤铁矿。显晶质的赤铁矿呈钢灰色至铁黑色，隐晶质及非晶质的赤铁矿呈暗红色至鲜红色，但都具特征的樱红色条痕，金属光泽至半金属光泽，有时光泽暗淡。无解理；莫氏硬度 5~6，密度 $5.0\sim5.3\text{g/cm}^3$ 。

赤铁矿是在氧化条件下形成的，规模巨大的赤铁矿矿床多与热液作用和沉积作用有关。热液型赤铁矿的共生矿物除磁铁矿、石英、重晶石、绿泥石、菱铁矿及碳酸盐矿物之外，常有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂等共生。沉积型赤铁矿具有鲕状、豆状、肾状等胶态特征。假象赤铁矿是成矿环境富氧的一种标志。在氧浓度较低的环境条件下，赤铁矿中的部分 Fe^{3+} 被还原而形成磁铁矿，这种磁铁矿称为穆磁铁矿，穆磁铁矿是成矿环境出现还原的一种证据。

镜铁矿（specularite），是赤铁矿的变种，为一种较常见的铁矿物，也是冶金工业的重要原料之一，属复三方偏三角面体晶类。镜铁矿实质上是呈铁黑色、金属光泽的片状赤铁矿

集合体,因具有晶面光亮如镜而得名。细小鳞片状、贝壳状的镜铁矿集合体,则被称为云母赤铁矿。依(0001)连生的镜铁矿集合体,则被称为铁玫瑰。总体看来,镜铁矿是热液作用的产物,可见于不同类型的热液矿床中。

镜铁矿与赤铁矿最大的不同在于:赤铁矿无磁性,而镜铁矿常因含细小的磁铁矿包裹体,具有一定的磁性。镜铁矿较赤铁矿要稳定得多,在浅表风化剥蚀条件下,能够较为稳定存在,与褐铁矿、石英等共生,甚至能够见于河流重砂中。与其他类型铁矿床相比,镜铁矿独立矿床比较少,常见于含铁岩石中,如各类红层、基性-超基性岩、中酸性岩及沉积变质岩的裂隙及构造岩带中。也可以细脉浸染状产于多数有色金属-贵金属矿区中,如云南姚安老街子铁铜金银矿、江西德兴斑岩铜矿区、青海都兰白石崖铁多金属矿、云南东川铜铁矿、湖南浏阳七宝山角砾岩筒型金铜矿等。

世界著名赤铁矿(镜铁矿)矿床有美国的苏必利尔湖、俄罗斯的克里沃伊洛格、意大利ELBA岛、瑞士ST GOTTHARD、英国CUMBERLAND、巴西MINAS GEXAIS等。中国著名产地有辽宁鞍山、甘肃镜铁山、湖北大冶、湖南宁乡和河北宣化等。

1.1.3 菱铁矿

菱铁矿分子式 FeCO_3 。理论组成: FeO 62.01%, CO_2 37.99%。 FeCO_3 与 MnCO_3 和 MgCO_3 可形成完全类质同象系列,与 CaCO_3 形成不完全类质同象系列,因而其中常有 Mn 、 Mg 、 Ca 替代,形成变种的锰菱铁矿、钙菱铁矿、镁菱铁矿等。

菱铁矿为三方晶系,方解石型结构,复三方偏三角面体晶类。晶体呈菱面体状、短柱状或偏三角面体状。通常呈粒状、土状、致密块状集合体。沉积层中的结核状菱铁矿呈球形隐晶质偏胶体,称球菱铁矿。

菱铁矿为浅灰白或浅黄白色,有时微带浅褐色;典型菱铁矿外形如图1.3所示。风化后为褐、棕红、黑色。玻璃光泽,隐晶质无光泽。透明至半透明。解理完全。硬度4。相对密度3.7~4.0,随 Mn 、 Mg 含量增高而降低。有的菱铁矿在阴极射线呈橘红色。

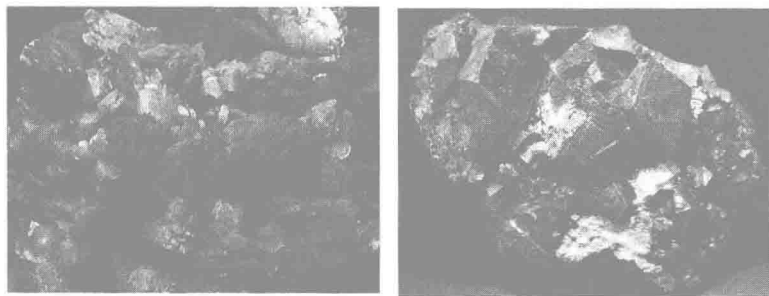


图1.3 菱铁矿外形图

沉积成因者,常产于黏土或页岩层、煤岩层中,具有胶状、鲕状、结核状形态,与鲕状赤铁矿、鲕状绿泥石和针铁矿等共生。在我国元古代、古生代地层中,都产有菱铁矿层。东北辽河群的大栗子富铁矿床,即由赤铁矿体、磁铁矿体及菱铁矿体所组成,历经成岩变质作用,菱铁矿呈粒状或致密块状。热液成因者,可单独存在或与铁白云石和方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物共生。有时交代石灰岩、白云岩等碳酸盐岩,呈不规则的交代矿层出现。菱铁矿在氧化带不稳定,易分解成水赤铁矿、褐铁矿而成铁帽。

菱铁矿大量聚集时可作为铁矿石。一般工业要求:炼铁用矿石,同褐铁矿石;需选矿石,边界品位 $\text{TFe} \geq 20\%$,工业品位 $\text{TFe} \geq 25\%$ 。

我国菱铁矿资源较为丰富,储量居世界前列,已探明储量 18.34 亿吨,占铁矿石探明储量的 3.4%,另有保有储量 18.21 亿吨。我国菱铁矿主要分布在湖北、四川、云南、贵州、新疆、陕西、山西、广西、山东、吉林等省(区),特别是在贵州、陕西、山西、甘肃和青海等西部省(区),菱铁矿资源一般占全省铁矿资源总储量的一半以上,如陕西省柞水县大西沟菱铁矿矿床储量超过 3 亿吨。菱铁矿多以碎屑颗粒或以胶结物的形式广泛分布于不同环境沉积岩中,特别是在湖泊和海相沉积物中十分常见。从成因类型来看,主要有与中酸性(包括偏基性与偏碱性)岩浆侵入活动有关的接触交代-热液铁矿床,如湖北大冶、福建马坑、内蒙古黄岗等;与中性钠质或偏钠质火山侵入活动有关的铁矿,如江苏、安徽两省的宁芜铁矿、云南大红山铁矿等;沉积型赤铁矿和菱铁矿床主要产于地台型碎屑碳酸盐建造中,如鄂西、赣西、湘东地区的赤铁矿-菱铁矿;变质沉积铁矿,形成于中晚元古代及震旦纪的沉积铁矿,如甘肃镜铁山、陕西大西沟、河北张家口等;风化淋滤残积型铁矿,主要是第四纪表生风化作用对早先形成的铁矿床的改造,如广东大宝山、贵州观音山等。

由于菱铁矿的理论铁品位较低,且经常与钙、镁、锰呈类质同象共生,因此采用物理选矿方法铁精矿品位很难达到 45% 以上,但焙烧后因烧损较大而可大幅度提高铁精矿品位。菱铁矿比较经济的选矿方法是重选、强磁选,但该法难以有效地降低铁精矿中的杂质含量。采用强磁选-浮选联合工艺能有效地降低铁精矿中的杂质含量,菱铁精矿焙烧后可作为优质的炼铁原料。世界著名的菱铁矿产地有:波兰的捷克波西米亚(Bohemia),德国的 Harz 山脉和 Freiberg,法国 Lorraine,英国 Cornwall,葡萄牙 BieraBaixa,美国宾州、密歇根州、犹他州、俄亥俄州东部、科罗拉多州、康乃狄格州 Roxbury、新泽西州 Franklin、加州 San-BernardinoCounty、威斯康辛州 Ladysmith、亚利桑那州 AntlerMine、纽约州、育空 Rapid-Creek,加拿大蒙特利尔 FranconQuarry、魁北克 MontSaint-Hilaire,巴西 MinasGerais,秘鲁 Huancavelica,玻利维亚 Tatasi,澳洲新南威尔州 BrokenHill、ProspectHi。

1.1.4 铁的氢氧化物(针铁矿、纤铁矿及褐铁矿)

铁的氢氧化物包括针铁矿、水针铁矿、纤铁矿和水纤铁矿及褐铁矿等。

(1) 针铁矿

分子式为 FeOOH , 含有不定量吸附水者称水针铁矿 ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), 理论组成: Fe_2O_3 89.86%, H_2O 10.14%。它们与纤铁矿 (FeOOH)、水纤铁矿 ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$)、更富水的氢氧化铁胶凝体、铝的氢氧化物、泥质等混合物。有时还含有 Cu、Pb、Ni、Co、Au 等, 肉眼很难区分, 统称为褐铁矿。

针铁矿颜色红褐、暗褐至黑色, 经风化而成的粉末状呈黄褐色; 条痕褐黄色; 金刚光泽至暗淡, 纤维状或鳞片状的具丝绢光泽; 解理 {010} 完全, {100} 中等; 断口参差状; 莫氏硬度 5~5.5; 密度 4~4.3g/cm³。针铁矿形成于氧化条件下, 是含低价铁矿物风化的典型产物, 也直接由无机和生物沉淀而形成于湖沼和泉水中, 也见于大洋底的锰结核中。它是褐铁矿的最主要组分, 分布广但很少大量富集, 仅在少数产地可构成重要的铁矿, 如法国洛林沿法德边界的所谓云煌岩矿等。针铁矿是次要的炼铁原料。针铁矿外形如图 1.4 所示。

(2) 纤铁矿

分子式 FeOOH 或 $\alpha\text{-FeOOH}$, 理论组成: Fe_2O_3 89.9%, H_2O 10.1%。组分中常有少量的 SiO_2 和 CO_2 杂质存在, 部分 Mn^{3+} 代替 Fe^{3+} 。含有不定量的吸附水量称水纤铁矿 ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$)。斜方晶系, 晶体结构为一水软铝石型。斜方双锥晶类, 晶体呈板状或片状; 通常以鳞片状、纤维状或块状集合体产出。红至红褐色; 条痕橘红色。半金属光泽。具三组相互垂直的解理。莫氏硬度 4~5, 密度 4.09~4.10g/cm³。纤铁矿石在氧化条件下

含铁矿物风化的产物，常与针铁矿共生，但比针铁矿少见。片状纤铁矿晶体有时是热液矿床。纤铁矿经脱水作用可形成磁赤铁矿 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)。纤铁矿外形如图 1.5 所示。

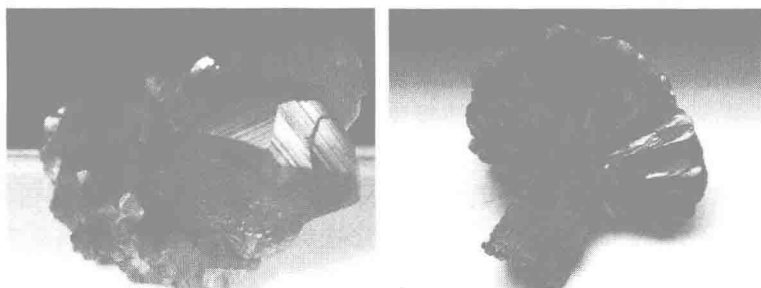


图 1.4 针铁矿外形图

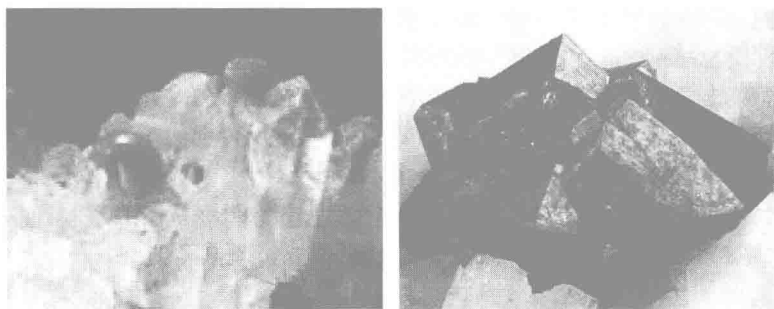


图 1.5 纤铁矿外形图

(3) 褐铁矿

“褐铁矿”一词并不是矿物的种名，通常是针铁矿、水针铁矿的统称。因为这些矿物颗粒细小，难于区分，故统称为“褐铁矿”。早先研究者通常认为褐铁矿是成分为 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的一种独立矿物，但目前 X 射线衍射分析表明，它们大部分是隐晶质的针铁矿，可混有纤铁矿、赤铁矿、石英、黏土等，含吸附水及毛管水，成分可变，物理性质亦可变，但基本上为 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。褐铁矿外形如图 1.6 所示。

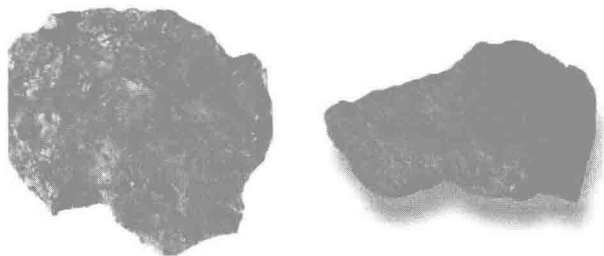


图 1.6 褐铁矿外形图

褐铁矿常呈致密块状或胶态（肾状、钟乳状、葡萄状、结核状、鲕状），似胶态条带状，或土状、疏松多孔状等。亦有呈细小针状结晶者，则多为针铁矿。呈细小鳞片状者，多为纤铁矿（又称红云母）。有时褐铁矿由黄铁矿氧化而来，并保存有黄铁矿的假象，称假象褐铁矿。在肾状、钟乳状褐铁矿表面常有一层光亮沥青黑色的薄壳（由褐铁矿脱水而来）并现锍色，通称为“玻璃头”。

褐铁矿呈黄色、褐色、褐黑-红褐色。条痕黄褐色或棕黄色，硬度 1~4，土状者硬度较

小, 相对密度 3.3~4.0。褐铁矿是表生作用产物, 主要成因类型为风化型及沉积型。

风化型: 含铁的硫化物 (如黄铁矿、黄铜矿)、氧化物 (如赤铁矿、磁铁矿)、碳酸盐 (如菱铁矿)、硅酸盐 (如海绿石、黑云母) 等矿物, 经过基本上同时进行的氧化和水化作用之后一般转化为褐铁矿。这一作用称为褐铁矿化作用。褐铁矿化在地表几乎到处可见。当褐铁矿在金属矿床氧化带露头上分布有一定面积时称为“铁帽”, 多由原生矿石和围岩中含铁矿物褐铁矿化而成。一般根据“铁帽”的颜色、构造和所含微量元素及次生的伴生矿物等标志 (次生矿物常与原生矿物的种类和结构构造有一定的关系), 可推断深部原生矿床的种类, 因此铁帽是很好的找矿标志。当褐铁矿呈大面积分布并大量富集时, 可作铁矿床开采。

沉积型: 常为海相和湖相沉积。系由氢氧化铁的胶体溶液凝聚而成。大量聚集时可成矿床。

褐铁矿矿石一般含铁在 35%~40% 之间, 高者可达 50%, 有害杂质 S、P 通常较高。我国探明褐铁矿储量 12.3 亿吨, 占全国矿石探明储量的 2.3%。主要分布于云南、广东、广西、山东、贵州、江西、新疆和福建。由于褐铁矿中富含结晶水, 因此采用物理选矿方法, 铁矿精矿品位很难达到 60%, 但与菱铁矿相同, 焙烧后因烧失较大而大幅度提高铁精矿品位。褐铁矿在磨矿过程中极易泥化, 难以获得较高的金属回收率。近年来, 随着新型高梯度强磁选机和新型高效反浮选药剂的研制成功, 强磁选、反浮选、正浮选、焙烧-磁选联合流程等都取得明显进展。

褐铁矿的含铁量虽低于磁铁矿和赤铁矿, 但因它较疏松, 易于冶炼, 所以也是重要的铁矿石。世界著名矿产地是法国的洛林、德国的巴伐利亚、瑞典等地。

1.1.5 钛铁矿

钛铁矿分子式为 FeTiO_3 , 理论组成: TiO_2 52.66%, FeO 47.34%。晶体属三方晶系的氧化物矿物, $a_{\text{rh}}=0.553\text{nm}$, $\alpha=54^\circ49'$; $Z=2$ 。或 $a_{\text{h}}=0.509\text{nm}$, $c_{\text{h}}=1.407\text{nm}$; $Z=6$, Fe^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 间可为完全类质同象代替, 形成 FeTiO_3 - MgTiO_3 或 FeTiO_3 - MnTiO_3 系列。以 FeO 为主时称为钛铁矿, MgO 为主时称为镁钛矿, MnO 为主时称为红钛锰矿。常有 Nb、Ta 等类质同象替代。在 $>960^\circ\text{C}$ 的高温条件下, FeTiO_3 - Fe_2O_3 可形成完全固溶体。随温度下降, 在约 600°C , FeTiO_3 - Fe_2O_3 固溶体出溶, 在钛铁矿中析出赤铁矿的片晶, 并平行于 (0001) 定向排列。

钛铁矿颜色为铁黑色或钢灰色。条痕为钢灰色或黑色。含赤铁矿包体时呈褐色或带褐的红色条痕。金属-半金属光泽。不透明, 无解理。硬度 5~6.5, 相对密度 4~5。弱磁性。钛铁矿外形如图 1.7 所示。

钛铁矿主要为岩浆型和伟晶型。岩浆型钛铁矿常作为副矿物, 或在基性、超基性岩中分散于磁铁矿中成条片状, 与顽辉石、斜长石等共生。伟晶型钛铁矿产于花岗伟晶岩中, 与微

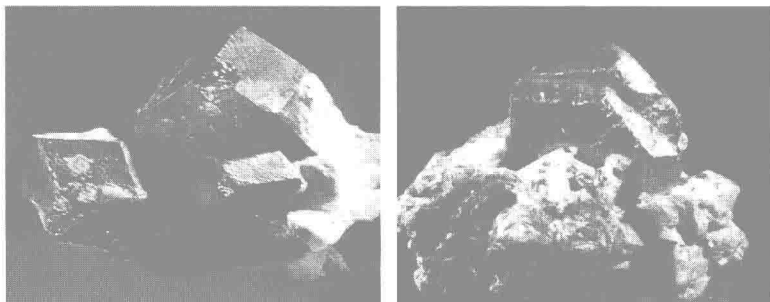


图 1.7 钛铁矿外形图

斜长石、白云母、石英、磁铁矿等共生。钛铁矿往往在碱性岩中富集。由于其化学性质稳定,故可形成冲积砂矿,与磁铁矿、金红石、锆石、独居石等共生。根据晶形、条痕、弱磁性可与赤铁矿或磁铁矿区别。钛铁矿是最重要的钛矿石矿物。

我国钛磁铁矿主要矿床分布在四川省的攀枝花和红格,米易的白马,西昌的太和;河北省承德的大庙、黑山,丰宁的招兵沟,崇礼的南天门;山西省左权的桐峪;陕西省洋县的毕机沟;新疆的尾亚;河南省舞阳的赵案庄;广东省兴宁的霞岚;黑龙江省的呼玛;北京市昌平的上庄和怀柔的新地。其中四川省表内储量占全国同类储量的95.1%,河北省占3.3%,陕西省占0.46%,山西省占0.35%。

截至2010年年底,我国保有原生钛(磁)铁矿储量3.6亿吨(其中A+B+C级别2.3亿吨);钛铁矿(砂矿)储量3803.19万吨(其中A+B+C级别2147.17万吨);若将我国2010年保有钛铁矿砂矿的A+B+C级矿物储量2147.17万吨按含 TiO_2 48%折算,则其 TiO_2 储量为1030.64万吨,仅占同年世界钛铁矿(TiO_2)27000万吨的3.83%;若再将其与原生钛磁铁矿岩矿(TiO_2)的A+B+C级储量(23191.50万吨)中目前可利用的约占50%以粒状钛铁矿产出的(TiO_2)储量11595.75万吨相加,其 TiO_2 总储量为12626.4万吨,则占同年世界钛铁矿(TiO_2)储量27000万吨的47.76%,从这个意义上说,我国可称为世界钛铁矿资源最丰富的国家。

除我国以外,世界上著名钛铁矿矿山还有俄罗斯的伊尔门山、挪威的克拉格勒和美国怀俄明州的铁山、加拿大魁北克的埃拉德湖等。

1.1.6 含铁硅酸盐矿物

硅酸盐矿物在自然界分布较广泛,已知的硅酸盐有800余种,约占已知矿物种的1/3。含铁硅酸盐矿物很多,如:橄榄石($\text{Mg, Fe}_2\text{SiO}_4$),电气石 $\text{Na(Mg, Fe, Mn, Li, Al)}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3](\text{OH, F})_4$,角闪石($\text{Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Na}_2, \text{K}_2\text{)}\text{SiO}_3$,黑云母 $\text{K(Mg, Fe)}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 等,在铁矿物中不同程度地会含有铁硅酸盐矿物。以这种形式赋存的铁矿物在目前的选冶条件下难以回收,因此将其作为合理的金属损失而以尾矿的形式丢弃。

1.2 我国铁矿石的工业类型

我国铁矿石类型主要包括鞍山式铁矿、大冶式铁矿、镜铁山式铁矿、大西沟式铁矿、攀枝花式铁矿、宁芜式铁矿、宣龙-宁乡式铁矿、风化淋滤型铁矿、包头白云鄂博式铁矿、海南石碌铁矿、吉林羚羊石铁矿等。除鞍山式铁矿和大冶式铁矿相对易选之外,其他几类铁矿都属于难选铁矿石,另外鞍山市铁矿石中微细粒嵌布的赤铁矿和磁铁矿也属于较为难选的铁矿石。目前我国低品位难选铁矿石资源的利用率极低,大部分没有回收利用或根本没有开采利用。

1.2.1 鞍山式铁矿

鞍山式铁矿床为大型铁矿床类型之一,属海相火山-沉积变质型铁矿床。产于辽宁省鞍山市、本溪市一带。铁矿赋存于太古宇鞍山群下混合岩层中。矿体呈层状、似层状,延长几百米至几千米,少数可达十余公里,延深数百米至千米以上。主要为含铁石英岩,个别地段也有含铁角闪岩矿层,下为混合岩层,由角闪岩层、含铁层、硅质岩层组成,其上为混合岩层。

鞍山式铁矿分布最广，是我国最重要的铁矿床。它不仅数量居于首位（约占总储量的50%），而且由于矿床储量规模一般较大（大中型矿床储量占本类矿床的90%），单个矿体的规模和厚度较大，埋藏不深，不少矿床可供露天开采，加之矿石类型以磁铁矿为主，矿床的分布又比较集中，使该类铁矿床在开发利用上占了极大的优势。

鞍山式铁矿为高硅贫铁矿石，可供综合利用的伴生组分极少，一般含铁27%~34%、二氧化硅30%~50%，但其一般含硫、磷低，易采、选，为主要开采对象。矿石构造有致密块状、条纹状和条带状，一般条带宽1~10mm。铁矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿，有时含有褐铁矿、菱铁矿；脉石矿物主要为石英，次要为角闪石、黑云母或辉石等。矿石可分为角闪石-磁铁矿-石英、磁铁矿-石英、赤铁-石英等组合。富铁矿石以致密块状赤铁矿、磁铁矿为主，还有疏松状磁铁矿。

不同产地的鞍山式铁矿石所含主要矿物及化学成分相近。如表1.1列出了我国几处大型鞍山式铁矿床矿石的化学组成。

表 1.1 我国几处大型鞍山式铁矿床矿石的化学组成 单位：%

矿床	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P
东鞍山	33.80	0.68	50.25	0.52	0.55	—	0.006	0.011
大齐山	31.70	4.35	52.94	0.19	0.34	0.80	0.031	0.035
大孤山	32.32	4.75	52.10	0.45	0.17	0.32		—
弓长岭	28.00	3.90	55.24	1.53	0.22	0.73	0.013	0.036
司家村	33.79	4.45	49.08	3.68	1.29	0.64	0.017	0.043
袁家村	32.94	2.71	48.67	2.33	0.85	1.68	0.020	0.096
舞阳	28.84	3.29	50.48	1.25	2.33	0.93	0.022	0.130

东鞍山铁矿石的结构主要为细粒、鳞片状变晶结构，交代、蜂窝及土状、包裹结构也常见；主要为条带状构造，其次为隐条带状和块状构造，部分为揉皱状和角砾状构造，在碳酸盐矿石中还分布较多的网脉状、蜂窝多孔状及土状构造等。齐大山铁矿石的结构较为复杂，但总的是以各种变晶结构为主，其次是受后期热液氧化和蚀变作用影响而形成的各种氧化交代结构；其构造以条带状为主，且主要是细条带状构造，其次是受后期动力变质作用的影响，在条带状构造的基础上叠加的揉皱和角砾状构造，还有少量块状构造。大孤山铁矿石以粒状变晶结构为主，伴有交代结构，包含变晶和压碎结构；其构造以条带和隐条带状构造为主，伴有揉皱状、角砾状及块状构造等。

处理这类矿石的有大孤山、东鞍山、齐大山、大石河、水厂、南芬、石人沟和马兰庄等选厂。

1.2.2 镜铁山式铁矿

镜铁山式铁矿是铁矿床类型之一。属沉积变质型铁矿床。甘肃镜铁山铁矿是我国西北地区重要的钢铁基地，目前保有铁矿石4亿吨。其矿床构造，以黑沟矿区为代表，可能主要为断层控，深部和外围找矿潜力巨大。矿产于甘肃省肃南裕固族自治县祁连山优地槽前震旦系镜铁山群中。因矿石中含镜铁矿多，故名镜铁山。已探明的铁矿床（点）有数十个，其中镜铁山矿床（包括桦树沟与黑沟两个矿区）为大型，柳沟峡和白尖矿床为中型，其余为小型或矿点。

镜铁山式铁矿属铁质碧玉型铁矿床，矿石中的铁矿物主要是镜铁矿和菱铁矿，含少量赤