

普通高等教育“九五”国家级重点教材

九五



XUAN KUANG XUE

选 矿 学

主 编 谢广元

副主编 张明旭 边炳鑫 樊民强

中国矿业大学出版社

XUAN KUANG XUE

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 筛分、破碎与磨矿

第 1 章 碎散物料的粒度组成与粒度分析	5
1.1 粒度及粒度分析	5
1.2 筛分分析	6
1.3 粒度特性曲线和粒度特性方程式	9
复习思考题	11
第 2 章 筛分及筛分机械	12
2.1 概述.....	12
2.2 筛分过程.....	15
2.3 筛分机械.....	26
复习思考题	50
第 3 章 破碎及破碎机械	51
3.1 概述.....	51
3.2 破碎基本理论.....	59
3.3 破碎机械.....	63
复习思考题	78
第 4 章 磨矿及磨矿机械	79
4.1 概述.....	79
4.2 磨矿作用及磨矿条件的确定.....	80
4.3 磨矿机械.....	86
复习思考题	98

第二篇 重力选矿

第 1 章 重选概论	99
1.1 重选研究的对象及其应用.....	99
1.2 重选的发展简况	100

第 2 章 重选的基本原理	102
2.1 概述	102
2.2 颗粒及颗粒群沉降理论	102
2.3 粒群按密度分层理论	115
2.4 颗粒在离心力场中的运动规律	117
2.5 斜面流分选理论	118
复习思考题.....	126
第 3 章 水力分级	127
3.1 概述	127
3.2 水力分析	128
3.3 水力分级设备	131
复习思考题.....	137
第 4 章 重介质选矿	138
4.1 概述	138
4.2 重悬浮液的性质	140
4.3 重介质分选机	148
4.4 旋转重介质流选矿	159
4.5 重悬浮液的回收与净化	174
4.6 重悬浮液密度的自动控制	179
4.7 干法选煤	183
复习思考题.....	191
第 5 章 跳汰选矿	192
5.1 概述	192
5.2 跳汰选矿原理	194
5.3 跳汰机	204
5.4 跳汰机的操作工艺与制度	229
复习思考题.....	233
第 6 章 溜槽与摇床选矿	234
6.1 概述	234
6.2 溜槽选矿	235
6.3 螺旋选矿	239
6.4 离心选矿	244
6.5 摇床选矿	248
复习思考题.....	261

第7章 重选生产工艺	262
7.1 炼焦煤选煤典型重选工艺	262
7.2 动力煤选煤典型重选工艺	265
7.3 金属矿物典型重选工艺	269
7.4 非金属矿物典型重选工艺	271
第8章 物料的可选性及重选工艺效果评定	275
8.1 概述	275
8.2 物料密度组成及其测定	275
8.3 可选性曲线及其应用	281
8.4 中国煤炭可选性的评定标准	296
8.5 分配曲线及其特性参数	296
8.6 重选工艺效果的评定	304
复习思考题.....	309
第三篇 磁电选矿	
第1章 磁选基本原理	310
1.1 概述	310
1.2 磁选原理	312
1.3 矿物的磁性	314
1.4 矿物磁性的测量	322
复习思考题.....	324
第2章 磁选设备	325
2.1 概述	325
2.2 磁选机设备常用磁性材料及其特性	326
2.3 磁选机的磁系	328
2.4 弱磁选设备	331
2.5 强磁选设备	340
2.6 高梯度与超导磁选设备	345
2.7 磁流体选矿	349
复习思考题.....	353
第3章 磁选工艺	354
3.1 铁矿石的磁选	354
3.2 锰矿石的磁选	359
3.3 有色和稀有金属矿石的磁选	360
3.4 非金属矿物的提纯和煤的脱硫	363

第4章 电选的基本原理	366
4.1 概述	366
4.2 矿物的电性质	367
4.3 矿粒的带电方式	369
4.4 电选过程的理论	372
复习思考题.....	373
第5章 电选机	374
5.1 概述	374
5.2 鼓筒式电选机	374
5.3 其他型式电选机	376
复习思考题.....	380
第6章 电选实践	381
6.1 黑色金属矿物的电选	381
6.2 有色和稀有金属矿物的电选	382
6.3 煤及其他矿石的电选	384
6.4 影响电选的因素	385
复习思考题.....	387
第四篇 浮游选矿	
第1章 浮选基本原理	388
1.1 概述	388
1.2 固、液、气各相性质	390
1.3 相界面性质与可浮性	400
1.4 气泡矿化	418
1.5 浮选动力学	426
复习思考题.....	429
第2章 浮选药剂	430
2.1 浮选药剂的分类与作用	430
2.2 捕收剂	431
2.3 起泡剂	449
2.4 调整剂	455
复习思考题.....	462
第3章 浮选机及辅助设备	463
3.1 浮选机的基本作用及评价	463

3.2	机械搅拌式浮选机	469
3.3	充(压)气式浮选机	479
3.4	空气析出式浮选机	484
3.5	浮选机的发展趋势和研究动态	486
3.6	浮选机的选择、计算、调节和测定	488
3.7	浮选辅助设备	491
	复习思考题.....	494
第4章	浮选工艺和实践.....	495
4.1	影响浮选的工艺因素	495
4.2	原煤性质对浮选的影响	495
4.3	粒度特性对浮选的影响	497
4.4	矿浆浓度对浮选的影响	498
4.5	矿浆液相组成对浮选的影响	500
4.6	浮选药剂及影响	503
4.7	浮选流程	506
4.8	煤炭浮选脱硫	512
4.9	煤泥浮选工艺效果检查和评定	514
	复习思考题.....	516
第5章	矿石的浮选实践.....	517
5.1	矿物可浮性分类	517
5.2	非极性非金属矿物的浮选	517
5.3	硫化矿浮选	519
5.4	有色金属氧化矿石和混合矿石的浮选	523
5.5	多价金属的极性盐类矿物的浮选	526
5.6	氧化物及硅酸盐矿物浮选	527
5.7	可溶性盐的浮选	527
	复习思考题.....	528
第6章	特殊浮选技术和工艺.....	529
6.1	特殊浮选的定义和类型	529
6.2	特殊浮选的基本原理	531
6.3	特殊浮选工艺和设备	533
	复习思考题.....	538

第五篇 固液、固气分离技术

第 1 章 概述	539
复习思考题.....	540
第 2 章 悬浮液的性质	541
2.1 液相的性质	541
2.2 固相的性质	542
2.3 固液体系的性质	543
复习思考题.....	546
第 3 章 煤泥水处理	547
3.1 粗颗粒煤泥水的处理	547
3.2 细颗粒煤泥水的处理	558
3.3 极细颗粒煤泥水的处理	569
3.4 洗水闭路循环	575
3.5 分级、浓缩效果的评定.....	577
复习思考题.....	582
第 4 章 脱水及脱水机械	583
4.1 物料中水分的赋存形态	583
4.2 粗颗粒物料的脱水.....	584
4.3 细颗粒物料的脱水.....	593
复习思考题.....	607
第 5 章 热力干燥	608
5.1 概述	608
5.2 干燥过程	609
5.3 干燥机	611
5.4 辅助设备	617
复习思考题.....	623
第 6 章 除尘与除尘设备	624
6.1 除尘	624
6.2 除尘器	625
复习思考题.....	629
参考文献	630

绪 论

自然界蕴藏着极为丰富的矿产资源。选矿就是利用矿物的物理或物理化学性质的差异,借助各种选矿设备将矿石中的有用矿物与脉石矿物分离,并达到使有用矿物相对富集的过程。选矿学是研究矿物分选的学问,是一门分离、富集、综合利用矿产资源的技术科学。

众所周知,地壳是由岩石组成的,而岩石是矿物的集合体。矿物就是在地壳中由于自然的物理化学作用或生物作用所生成的具有固定化学成分和物理性质的天然化合物或自然元素。矿物的种类繁多,在众多的矿物中,能为人类利用的称有用矿物。在当前的技术经济条件下,人们能够将含有有用矿物的岩石中的某些组分加以富集并利用,这类岩石就称为矿石。在矿石中,除有用矿物外,还含有目前无法富集或尚不能利用的一些矿物,这些无用的矿物称为脉石。对于煤炭而言,不能作为煤使用而以 SiO_2 为主要成分的矿石叫矽石。

有用矿物和无用脉石通常是共生在一起的。把矿石加以破碎,使之彼此分离,然后将有用矿物加以富集,无用的脉石抛弃,这样的工艺过程称为选矿。在选矿过程中选出的有用矿物称为精矿;抛弃的无用矿物称为尾矿。对煤炭而言,将煤和矽石分离,从而获得质量不同的产品的过程,称为选煤。

在自然界,除少数矿物为液体(如汞)外,多为固体。固体矿物都具有一定的晶体结构和物理化学性质。原矿或原煤中,有用成分和无用脉石或矽石,经选矿过程之所以能彼此分离,其基本依据是矿物的各种物理性质、表面的物理化学性质及化学性质所存在的差异。直接与选矿有关的矿物性质主要有密度、磁性、导电性、润湿性等。密度是指单位体积矿物的质量,它是重选的依据。矿物的磁性是它被磁铁吸引或排斥的性质。一般矿物可分为强磁性矿物(如磁铁矿等)、弱磁性矿物(如赤铁矿等)和非磁性矿物(如金刚石、赤铜矿等)。矿物磁性是磁选的依据。导电性是指矿物的导电能力。一般矿物有良导体、半导体和非导体之分。它是电选的依据。润湿性是指矿物能被水润湿的性质。易被水润湿的矿物称为亲水性矿物(如石英、方解石等)。反之,称为疏水性矿物(如辉铜矿、石墨等)。矿物的自然润湿性主要取决于矿物的结晶构造。不同润湿性的矿物具有不同的可浮性,因此,润湿性是浮选的依据。

选矿实践中,往往还采取人为的方法来扩大矿物物理化学性质的差异,以提高分选效率。如用磁化焙烧的方法改变矿物磁性;用酸和盐类处理矿物表面,选择性地改变矿物的导电性;用各种浮选药剂改变矿物的自然润湿性等。除此之外,矿物的形状、粒度、硬度、颜色、光泽等也往往是某些特殊选矿方法的依据。

根据不同的矿石类型和对选矿产品的要求,在实践中可采用不同的选矿方法。常用的选矿方法有重选法、磁选法、电选法和浮选法。其中浮选法应用最广。重选法广泛地应用于黑色、有色、稀有金属和煤的分选;磁选法多用于黑色金属和稀有金属的分选,也可用于从非金属矿物原料中除去含铁杂质,还可用于净化生产、生活用水以及重介质选煤中磁铁矿的回收;电选法用于有色金属矿石和稀有金属矿石、黑色金属(铁、锰、铬)矿石的分选,还用于非金属矿石(如煤粉、金刚石、石墨、石棉、高岭土和滑石等)的分选。除上述常用的四种选矿方法外,还有光电选矿法、化学选矿法及其他特殊选矿法。各种选矿方法有时单独使用,有时是

几种方法的联合应用。

矿石的选矿处理过程是在选矿厂(选煤厂)中完成的。不论选矿厂(选煤厂)的规模大小,一般都包括以下三个最基本的工艺过程:

① 矿石分选前的准备作业。包括原矿(原煤)的破碎、筛分、磨矿、分级等工序。本过程的目的是使有用矿物与脉石矿物单体分离,使各种有用矿物相互间单体解离,此外,这一过程还为下一步的选矿分离创造适宜的条件。

② 分选作业。借助于重选、磁选、电选、浮选和其他选矿方法将有用矿物同脉石分离,并使有用矿物相互分离获得最终选矿产品(精矿、尾矿、有时还产出中矿)。

③ 选后产品的处理作业。包括各种精矿、尾矿产品的脱水,细粒物料的沉淀浓缩、过滤、干燥和洗水澄清循环复用等。

有的选矿厂(选煤厂)根据矿石性质和分选的需要,在分选作业前设有洗矿预选抛废(如重介排矸或动筛跳汰排矸)以及物理、化学预处理,如赤铁矿的磁化焙烧、氧化铜矿的离析焙烧等作业。

矿石经过分选后,可得到精矿、中矿和尾矿三种产品,分选所得有用矿物含量较高、适合于冶炼加工的最终产品,叫做精矿。分选过程中得到的尚需进一步处理的中间产品,叫做中矿。分选后,其中有用矿物含量很低,不需进一步处理(或技术经济上不适于进一步处理)的产品,叫做尾矿。选煤的主要产品是精煤,副产品有中煤、混煤、煤泥等,选后的矸石和尾煤为废弃物,亦可进一步综合利用。

1. 选矿常用的工艺指标

① 品位——品位是指产品中金属或有用成分的质量与该产品质量之比,常用百分数表示。通常用 α 表示原矿品位; β 表示精矿品位; θ 表示尾矿品位。

② 产率——产品质量与原矿质量之比,叫该产品的产率,通常以 γ 表示。

③ 回收率——精矿中有用成分的质量与原矿中该有用成分质量之比,称为回收率,常用 ϵ 表示。回收率可用下式计算:

$$\epsilon = \frac{\gamma\beta}{100\alpha} \times 100\%$$

式中 ϵ ——回收率,%;

α ——原矿品位,%;

β ——精矿品位,%;

γ ——精矿产率,%。

有用成分回收率是评定分选过程(或作业)效率的一个重要指标。回收率越高,表示选矿过程(或作业)回收的有用成分越多。所以,选矿过程中应在保证精矿质量的前提下,力求提高有用成分回收率。

④ 选矿比——原矿质量与精矿质量的比值。用它可以确定获得1t精矿所需处理原矿石的吨数。常以 K 表示。

⑤ 富矿比(或富集比)——精矿品位与原矿品位的比值,常用 E 表示。 $E = \beta/\alpha$,它表示精矿中有用成分的含量比原矿中该有用成分含量增加的倍数,即选矿过程中有用成分的富集程度。

2. 选矿在国民经济中的地位和作用

从宏观上讲,在矿物原料加工的整个过程中,选矿是介于采矿与化工、冶金之间的学科。广义地说,选矿学是综合研究物料分离技术的一门学科,它涉及到数学、物理学、化学、地质学、矿床学、矿物学、晶体化学、物理化学、表面化学、流体力学、电磁学、计算机技术、采矿、冶金学、机械、电力、自动控制、化工等多种学科和工程技术。选矿作为一种有效的分离手段,早已广泛地应用在黑色金属及有色金属冶金工业、煤炭工业、化学工业、硅酸盐、陶瓷与建筑材料工业。近年来在金属的再生工业中和在环境保护领域,选矿技术的重要性也在不断提高。

选矿在冶金工业中得到最早、最广泛的应用。由于选矿可使矿石中的金属含量富集几倍至几百倍,而且在大多数情况下与冶炼过程相比,选矿成本低,因此在技术经济上有很大的优越性。通过选矿可以降低冶炼成本。由于脉石被大部分排除,减少了炉渣量,不仅降低了能耗,也相应地减少了炉渣中的金属损失,使冶炼回收率得以提高。选矿技术的应用和发展使矿石的工业品位的下限大幅度降低,这就使大量的原来被抛弃的脉石变为可利用的资源,相应地增加了金属矿产的回收率。

我国铁矿石的地质储量比较丰富,但贫矿石很多。在仅有的少量富矿石中,约有5%的矿石因含杂质过高不能直接冶炼。除了矿石贫之外,其矿物颗粒嵌布细,组分复杂也给矿石的开发利用带来困难。矿石储量虽大但“贫、细、杂”的特点决定了我国绝大多数铁矿石要经选矿处理。钢铁工业生产的实践表明,高炉炼铁实行“精料方针”,可以降低焦炭和石灰的用量,提高高炉利用系数。为此,在最佳选、冶经济效益的前提下,必须使铁矿石经过选矿,尽量提高铁精矿品位。

在有色冶金工业中,由于有色金属和稀有金属矿产资源的品位大都很低,各种有用矿物与脉石间共生的关系更为复杂,选矿就显得尤其重要。对于难选共生矿的开发利用,为了充分利用有价成分或为下一工序提供理想原料,往往需要多种选矿方法的联合应用和采用选冶联合流程,即以选矿方法处理原矿,得到精矿或中间产品,然后用火法和湿法冶金对选矿产品进一步处理。采用合理的流程结构应能提高选矿、冶炼两个过程总的技术经济效益。选矿也可作为冶炼工艺中的一个中间过程被采用,即将冶炼中间产品或最终产品(炉渣)用选矿处理。例如,我国金川有色金属公司冶炼厂现有的生产流程是将铜镍混合精矿用电炉熔炼、转炉吹炼产出高冰镍,经过缓冷后,再破碎磨矿,用浮选法获得铜精矿和镍精矿,用磁选法得到合金,此后分别进入各自的冶炼系统提取金属铜、镍和贵金属。又如,在我国现代化的贵溪冶炼厂中,冰铜经转炉吹炼后的转炉渣中含铜约4.5%,经铸渣机缓冷后进行破碎、磨矿,再用浮选法获得渣铜精矿,然后返回闪炼炉中熔炼。选矿用于其他冶金炉渣的处理方面也有成功的实例。

煤炭的分选是选矿技术在煤炭工业中的重要应用。煤炭是我国的主要能源,占一次能源的75%。原煤在生成过程中混入了各种矿物杂质,在开采和运输过程中不可避免地又混入顶板和底板的岩石及其他杂质。随着采煤机械化程度的提高和地质条件的变化,原煤质量将会越来越差。选煤的主要任务就是除去原煤中的杂质,降低煤炭的灰分和硫分,提高原煤质量,适应用户需要。例如,钢铁厂需要低灰分炼焦精煤。有资料表明,精煤灰分每降低1%,焦炭灰分可降低1.33%,而焦炭灰分每降低1%,炼铁焦比可降低2%,高炉利用系数可提高3%,同时,还可提高生铁的质量。煤中硫60%以上转入焦炭里,焦炭中硫分每增加0.1%,高炉用焦就多消耗2%,石灰多消耗2%,生铁产量降低2%~5%,生铁质量变差。

在我国,原煤含矸量一般为20%~30%,有的还更高。经洗选排弃大量矸石,除去原煤

中的杂质,可减少铁路的无效运输;降低煤炭的灰分和硫分,可以降低燃煤对大气的污染,保护环境。煤炭洗选加工常用的选矿方法有跳汰、重介和浮选法。

非金属矿物资源是化肥、陶瓷、建材、造纸、纺织、电子等工业部门的原料来源。天然的非金属矿物资源绝大多数也是多种矿物共生,不经过分选提纯也无法直接利用。如高岭土用于高级陶瓷和造纸工业时,对其中铁的含量控制极严。用作化肥原料的磷灰石中,氧化铝和氧化铁的含量一般不宜超过4%。其他供建材、电子等部门使用的矿物原料也都有一定的成分要求。因此,对于非金属矿产资源的开发利用,选矿自然是重要的加工过程。

在地质部门中,矿石的可选性试验对评价一个矿床往往是不可缺少的重要资料来源。此外,对于岩矿鉴定和重砂工作所需的单矿物的分离,选矿也是一个有效的手段。

选矿中的物料分离技术包含有多种高效的方法,近年来已在不少领域推广应用。例如,在固体废料(包括工业和城市垃圾)的处理和金属的再生工业中,高效分离技术日益显示出它的优势;在化纤工业中采用分离技术可排除混入原料中的某些杂质(砂粒、玻璃屑等);在粮食加工过程中分离技术可用于选种、除杂等。特别应当指出的是,目前在环境工程里用浮选法处理废水已卓有成效。在这一领域中常用的浮选法有溶气浮选法、散气浮选法、电浮选法、离子浮选法、絮凝浮选法和载体浮选法等。

选矿过程离不开设备和检测技术。选矿技术水平和生产实践的发展促进了与之配套的机械仪表工业的发展,形成了一个选矿设备的制造分支。这些先进的仪器、设备用于选矿工业和科研活动又促进了选矿学科自身的发展。

综上所述,国民经济的许多部门都离不开选矿这门技术科学。它的技术水平对许多经济部门产生较大的影响。选矿技术落后,会造成有用资源的损失浪费,选矿厂的产品成为无法利用的废物。反之,先进的选矿技术可以产生“一矿变多矿,一厂变多厂”的良好局面。从古代的淘洗法到今天种类繁多的选矿新技术和新设备的不断出现,选矿学已发展成为一门独立的学科。可以肯定,随着科学技术水平的提高和各国对原料、能源需求量的增加,选矿学科的技术水平将不断提高,应用的范围将越来越广,发挥的作用也将越来越大。

第一篇 筛分、破碎与磨矿

第1章 碎散物料的粒度组成与粒度分析

1.1 粒度及粒度分析

1.1.1 粒度及其表示方法

破碎筛分、磨碎分级与分选加工的物料均是碎散物料群体,构成该群体的颗粒大小不一,形状各异,在技术上通常引入“粒度”、“粒级”、“粒度组成”及“平均粒度”等概念来描述它们的特性——粒度特性。

粒度——描述单一颗粒大小的尺寸称为粒度。球形或立方体颗粒的粒度即为直径或边长;对于外形不规则的颗粒,其粒度以三维尺寸(长 a 、宽 b 、厚 c)的算术平均值 $d = (a + b + c) / 3$ 或几何平均值 $d = \sqrt[3]{abc}$ 表示。

粒级——用某种方法(如筛分)将粒度范围宽的物料群分离成若干个粒度范围窄的级别,这些级别均称为粒级,各粒级均以其上限粒度(d_1)及下限粒度(d_2)表示,如 $d_1 \sim d_2$ 或 $d_2 \sim d_1$ 或 $-d_1 + d_2$ 。

粒度组成——上述各粒级按粗、细不同顺序排列,并指明各粒级占物料群总量的质量百分率,这种资料称为粒度组成。它描述物料群的粒度分布情况,通常以粒度组成表表示(见表1-1-3)。

平均粒度——描述物料群的粒度称为平均粒度。对 $d_1/d_2 < \sqrt{2}$ 的粒级,即粒度范围较窄的物料群,其平均粒度 $d = (d_1 + d_2) / 2$;对于粒度范围较宽的物料群,通常有数个粒级,要用统计学上求平均值的方法计算其加权算术平均粒度 d_s ,或加权几何平均粒度 d_j ,或加权调和平均粒度 d_t :

$$d_s = \frac{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \gamma_3 d_3 + \cdots + \gamma_n d_n}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \cdots + \gamma_n} = \frac{\sum \gamma_i d_i}{\sum \gamma_i}$$

$$d_j = (d_1^{\gamma_1} \times d_2^{\gamma_2} \times d_3^{\gamma_3} \times \cdots \times d_n^{\gamma_n})^{\frac{1}{\sum \gamma_i}}$$

$$d_t = \frac{\sum \gamma_i}{\sum (\gamma_i / d_i)}$$

式中, γ_i 是平均粒度为 d_i 的粒级占物料总量的质量百分率。

对同一物料群采用不同的计算方法所得到的平均粒度值是不同的, 一般 $d_s > d_i > d_t$ 。往往有这种情况, 两批散料的平均粒度相等, 但它们各相同粒级的质量百分率却完全不同。为了更全面地说明散料的粒度特性, 又引入偏差系数 k 来描述散料中各粒级的不均布程度。

$$k = \frac{\delta}{d_s}$$

式中, δ 为标准差, $\delta = \sqrt{\sum (d_i - d_s)^2 \cdot \gamma_i / \sum \gamma_i}$; 其他符号含义同前。通常认为, $k < 40\%$ 、 $k = 40\% \sim 60\%$ 或 $k > 60\%$ 时, 散料的各粒级分布依次是均匀的、较均匀的、不均匀的。

综合运用粒度组成、平均粒度、标准差及偏差系数四种指标, 就能比较全面地描述碎散物料的粒度特性。

1.1.2 粒度分析方法

粒度分析是一种技术操作, 它的任务是测定碎散物料的粒度特性。粒度分析方法有多种, 选矿工程中常用的有以下三种:

① 筛分分析法——此法是利用筛孔大小不同的一系列筛子对散料筛分, n 层筛子可把物料分成 $(n+1)$ 个粒级, 各粒级的上、下限粒度通常就取相应筛子的筛孔尺寸。筛分分析法广泛用于测定 $0.04 \sim 100$ mm 散粒的粒度组成, 更大粒度的物料也可编制更大筛孔的筛子, 但对于小粒度的物料, 一是制作相应筛孔的筛子较困难, 二是很难筛得充分。一般干筛的分级粒度最小至 0.1 mm。 $0.04 \sim 0.1$ mm 物料须用湿筛。筛分分析法的特点是设备简单, 易于操作, 但筛析结果受颗粒形状和筛分时间的影响较大。

② 水力沉降分析法——此法是利用水力分析装置, 根据不同粒度的颗粒在水介质中沉降速度不同而分成若干粒级。该法适用于测定 $1 \sim 75$ μm 细粒物料的粒度组成, 其特点是不像筛分分析法那样严格按颗粒几何尺寸分级, 而是按沉降速度分级。因水力沉降过程受颗粒密度和形状的影响, 密度大的小颗粒与密度小的大颗粒有可能进入同一个粒级。

③ 显微镜分析法——此法是利用显微镜观察微细颗粒的大小和形状, 适用于 $0.1 \sim 50$ μm 的物料, 可检查分选产品或校正水力沉降分析结果, 也可研究矿石的结构。其主要特点是直观。

在选煤生产和选煤研究中, 应用最广泛的是筛分分析法。

1.2 筛分分析

1.2.1 筛分工具

1. 标准筛

标准筛是一套筛孔尺寸大小有一定比例的、筛孔边长及筛丝直径均按有关标准制造的筛子。使用时将各个筛子按筛孔大小从上至下顺序叠放, 上层筛孔大, 下层筛孔小。各筛子所处的层次次序称为筛序。每两个相邻筛子筛孔尺寸的比值称为筛比。有的标准筛确定一系列筛子中的某个筛子作为基准筛, 简称基筛。标准筛都有筛底和筛盖, 分别用以收集筛下产品和防止物料溅失。

由于各国采用的标准不同,所以有各种各样的标准筛,按筛比不同可大致将它们分为两类:一类的筛比是 $\sqrt{2}$,美国、英国、加拿大等国采用;另一类的筛比是 $\sqrt[10]{10}$,法国、前苏联等采用。 $\sqrt{2}$ 与 $\sqrt[10]{10}$ 称为基本筛比。为了得到粒度范围更窄的级别,还规定了辅助筛比,如 $\sqrt[4]{2}$ 、 $(\sqrt[10]{10})^6$ 等。

单位长度的筛面上所具有的筛孔数称为网目数,简称网目。有的标准筛的网目是指每英寸长度上的筛孔数,有的标准筛的网目是指每厘米长度上的筛孔数。我国目前还没有国家规定的标准筛,以前沿用上海标准筛和美国泰勒筛,二者相近,目前正在推广应用国际标准筛。表1-1-1列出了常见的六种标准筛。

表 1-1-1 常见标准筛制

泰勒筛		国际筛	上海筛		苏联筛		英国筛		德国筛	
网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	孔径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	筛孔尺寸 /mm	筛丝直径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm
2.5	7.925	8								
3	6.68	6.3								
3.5	5.691									
4	4.699	5	4	5						
5	3.962	4	5	4			5	3.34		
6	3.327	3.35	6	3.52			6	2.81		
7	2.794	2.8					7	2.41		
8	2.262	2.36	8	2.616	2.5	0.5	8	2.05		
9	1.981	2			2.0	0.5				
10	1.651	1.6	10	1.98	1.6	0.45	10	1.67	4	1.5
12	1.397	1.4	12	1.66	1.25	0.40	12	1.40	5	1.2
14	1.168	1.18	14	1.43	1.00	0.35	14	1.20	6	1.02
16	0.991	1	16	1.27	0.900	0.35	16	1.00		
20	0.833	0.8	20	0.995	0.800	0.30	18	0.85		
24	0.701	0.71	24	0.823	0.700	0.30	22	0.70	8	0.75
28	0.589	0.6	28	0.674	0.630	0.25	25	0.60	10	0.6
32	0.495	0.5	32	0.56	0.560	0.23	30	0.50	11	0.54
35	0.417	0.4	34	0.533	0.500	0.22	36	0.42	12	0.49
42	0.351	0.355	42	0.452	0.450	0.18	44	0.35	14	0.43
48	0.295	0.30	48	0.376	0.355	0.15	52	0.30	16	0.385
60	0.246	0.25	60	0.295	0.250	0.13	60	0.252	20	0.30
65	0.208	0.20	70	0.251	0.200	0.13	72	0.211	24	0.25
80	0.175	0.18	80	0.20	0.180	0.13	85	0.177	30	0.20
100	0.147	0.15	110	0.139	0.140	0.09	100	0.152	40	0.15
115	0.124	0.125	120	0.13	0.125	0.09	120	0.125	50	0.12
150	0.104	0.1	160	0.097	0.100	0.07	150	0.105	60	0.10
170	0.083	0.09	180	0.09	0.090	0.07	170	0.088	70	0.088
200	0.074	0.075	200	0.077	0.071	0.055	200	0.075	80	0.075
230	0.062	0.063	230	0.065	0.063	0.045	240	0.065	100	0.06
270	0.053	0.05	280	0.056	0.056	0.04				
325	0.043	0.04	320	0.05	0.040	0.03	300	0.053		
400	0.038									

在使用标准筛时,通常是把叠放好的一套筛子(包括筛底、筛盖和试样)整体固定在振筛机上,振筛机工作时能使套筛产生水平面内的摇动和垂直方向的振动,从而将试样筛分。根

据需要也可采用人工筛分。

2. 非标准筛

非标准筛并非是随意制作的筛子,对某些主要特征一般都作出规定。如煤炭工业规定筛孔尺寸依次为 100 mm、50 mm、25 mm、13 mm、6 mm、3 mm、0.5 mm,必要时可以增减筛孔尺寸。很显然,标准筛是用于细物料的筛分,而非标准筛是用于粗物料的筛分。另外,标准筛的筛框为较小的圆形金属框,筛面由铜、不锈钢、尼龙等丝线编织而成,非标准筛的筛框为较大的长方形木质框(也可用薄钢板焊接),筛面由低碳钢丝编织而成或用薄钢板冲孔而成。非标准筛的操作通常由人工进行,从粗孔到细孔逐个使用筛子,当试料中粗粒不多时,宜先用中等筛孔的筛子,然后分别从中孔到粗孔和从中孔到细孔逐个使用筛子。

1.2.2 筛分试验

筛分试验按筛分物料粒度的大小分为大筛分与小筛分,大筛分使用非标准筛,小筛分使用标准筛;按筛分时是否使用水介质促进筛分的进行又分为干筛与湿筛。因大粒度物料容易筛分,当试料水分与含泥量较大时,可以先晾晒,因此,大筛分一般采用干筛。对于小筛分,当试料水分与含泥量较小且要求不甚严格时,可采用干筛,否则宜采用湿筛。当然,湿筛需要辅以脱水及干燥作业。对于湿筛,通常是将单个的标准筛固定在高频电磁振动器上,手持振动器将筛子置于水盆中筛分。

筛分试验包括取样、筛分、称重、记录、结果处理等环节。取样要求有代表性,取样量与物料粒度有关,如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 试样量与物料粒度的关系

物料最大粒度/mm	0.1	0.3	0.5	1	3	5	10	20
样品最小质量/kg	0.025	0.05	0.1	0.2	0.5	2	5	20

筛分时间对试验结果有较大的影响,原则上以充分筛透即筛上物中不含有小于筛孔尺寸的颗粒为准,这通常要根据筛分的难易程度由经验而定,比如小筛分的筛分时间通常需要 10~30 min。衡量筛分时间是否足够的方法是,筛分完毕后再人工筛分,若在 1 min 内所得筛下物质量小于人工筛分前筛上物质量的 1%,则认为筛分时间足够。

干湿联合筛分是先用细孔筛(如 200 网目)进行湿筛,然后将筛上物过滤,放入不高于 75 °C 的恒温箱内烘干,再称重,根据筛分试样的质量及称出的筛上物质量计算出筛下物质量,最后将筛上物干筛并称出各粒级质量。干筛后得到的最底层细筛(与上述 200 网目筛相同)的筛下物要与湿筛时洗出的细泥合并计算。对于湿筛的筛下物,根据需要还可进一步湿筛分级,并逐级过滤、烘干、称重,否则,应整体过滤、烘干、称重。

在筛分试验过程中不得遗失物料,也不能使外界的物质进入试样中,称重须精确,筛分试验后各粒级质量和与原试样质量的差值,不得超过原试样质量的 1%~2.5%,否则试验无效。

试验结果处理的基本内容是计算产率。产率分为粒级产率与累积产率,粒级产率是该粒级的质量占被筛物料总质量的百分率,累积产率又分为筛上累积产率(又叫正累积)及筛下累积产率(又叫负累积)。正累积产率是大于某一筛孔的各粒级产率之和,负累积产率是小于

某一筛孔的各粒级产率之和。在计算粒级产率时，“被筛物料总质量”可以用各粒级质量之和，也可以用原试样的质量，此时把损失量加入最细级别，认为筛分时呈灰尘飞扬了。最基本的筛分试验记录及结果处理如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3 碎散物料粒度组成

粒 级 /mm	质 量 /kg	产 率		
		各粒级/%	筛上累积/%	筛下累积/%
12~16	22.5	15	15	100
8~12	30.0	20	35	85
4~8	45.0	30	65	65
2~4	22.5	15	80	35
0~2	30.0	20	100	20
合计	150.0	100		

煤炭大筛分试验的具体规程参见国家标准《GB/T 477—1998 煤炭筛分试验方法》，煤炭小筛分试验的具体规程参见原煤炭部标准《MT/T 58—1993 煤粉筛分试验方法》

1.3 粒度特性曲线和粒度特性方程式

1.3.1 粒度特性曲线

粒度分析的结果除用表格(如表 1-1-3)表示外,还可用曲线表示,称为粒度特性曲线,或粒度分析曲线,它是根据散料粒度组成表为依据绘制的,曲线的横坐标代表粒度,纵坐标代表产率。若纵坐标为粒级产率,则称为部分粒度特性曲线;若纵坐标为累积产率,则称为累积粒度特性曲线。如图 1-1-1、图 1-1-2 所示。

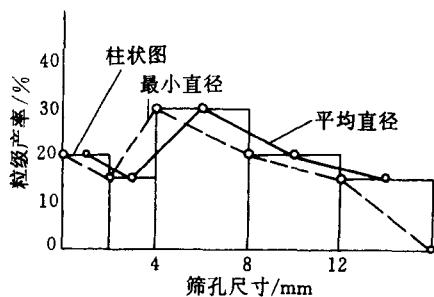


图 1-1-1 部分粒度特性曲线和柱状图

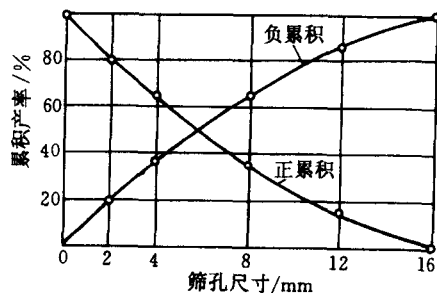


图 1-1-2 累积粒度特性曲线

与部分粒度特性曲线相比,累积粒度特性曲线在生产考查和流程计算上获得了更为广泛的应用,它具有如下特点:

- ① 正、负累积粒度特性曲线是互相对称的,若绘在一张图纸上,它们必交于物料产率为 50% 的点上。
- ② 正累积粒度特性曲线必交于纵坐标轴上物料产率为 100% 的点;负累积粒度特性曲

线必交于纵坐标轴上物料产率为0的点(坐标原点)。

累积粒度特性曲线有如下用途:

- ① 可确定任何指定粒度的相应累积产率;或由指定的累积产率查得相应的粒度。
- ② 可求出任一粒级($d_1 \sim d_2$)的产率,它等于粒度 d_1 及 d_2 所对应的纵坐标的差值。
- ③ 由曲线的形状可大致判断物料的粒度组成情况。对于正累积的粒度特性曲线,若曲线向左下角凹进,表明物料中细粒级含量多;若曲线向右上角凸起,说明粗粒级含量多;若曲线近似直线,则表示粗、细粒度分布均匀。

对于粒度范围很宽的物料,在绘制其粒度特性曲线时,既要考虑到横轴的比例,又要兼顾到越是接近原点,横坐标的分点就越密集,为此,必须把曲线绘在很大的图纸上。为了解决这个问题,可将曲线绘制在半对数坐标系或全对数坐标系中。

所谓半对数坐标系,是只把代表粒度的横坐标值取对数,而代表产率的纵坐标仍保留算术值。全对数坐标系是把横、纵坐标值均取对数。把横坐标取对数后,相邻粒度级之间在横轴上的间距,细粒级增长,粗粒级缩短,因此,在一般尺寸的图纸上就可绘制清晰准确的曲线,也便于使用。如筛分分析所用套筛的筛比相同,绘制半对数粒度特性曲线十分简便,因为所有相邻粒度之间在横轴上的间距都相等。例如,筛比为 $\sqrt{2}$ 的泰勒筛,各筛孔的对数差值恒等于 $\lg \sqrt{2}$ 。

图1-1-3是根据表1-1-3绘制的半对数累积粒度特性曲线,因 $\lim_{d \rightarrow 0} \lg d = -\infty$,故曲线的左端不能画到粒度为零处。图1-1-4是根据表1-1-3绘制的全对数负累积粒度特性曲线,因纵坐标也采用了取对数处理,曲线已直线化了,这样便于求出该直线的斜率和截距,进而将曲线用数学方程式表示出来,借此确定颗粒粒度在物料中的分布规律。

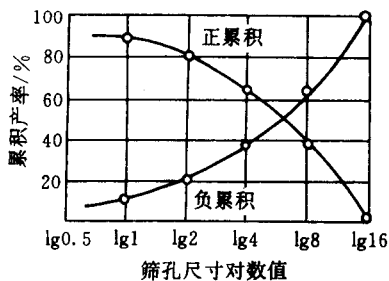


图 1-1-3 半对数累积粒度特性曲线

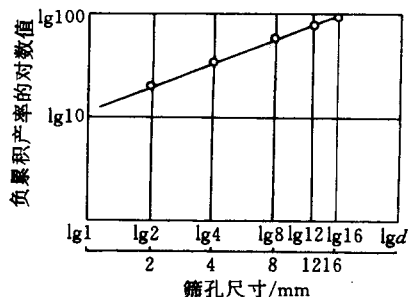


图 1-1-4 全对数负累积粒度特性曲线

1.3.2 粒度特性方程式

粒度特性方程式是研究表述物料群粒度特性的另一种方法,它是由筛分试验所得数据,经数学方法推理得到的经验公式。

1. 高登—安德列耶夫—舒曼公式

$$Y = 100 \left(\frac{X}{X_{\max}} \right)^K \quad (1-1-1)$$

式中 Y ——负累积产率;