

反射炉炼铜

大冶有色金属公司 河北矿业学院 编



冶金工业出版社

5.22

本书总结了我国反射炉炼铜的生产技术，对铜精矿的焙烧、反射炉熔炼的基本原理、炉子结构与操作等都作了系统的论述。书中还讨论了改善反射炉炼铜的技术经济指标和降低渣含铜等问题。本书主要供从事有色金属冶炼的工人、技术人员和干部阅读，高等和中等专业院校有关专业师生也可参考。

本书由大冶有色金属公司和河北矿冶学院重冶教研室所组成的编写小组编写。编写人员有董庆和（第一～三章、六～九章）、曾禄元（第四、七章）、陈孟春、王谦德、张庆廷、张平清、李抗生（第五、六章）。全书由董庆和审校整理。

本书初稿曾请大冶有色金属公司和白银有色金属公司的工人和技术人员审阅、修改。在编写过程中，还得到武汉冶金安全技术研究所、洛阳耐火材料研究所和北京有色冶金设计院等单位的支持和帮助。

反 射 炉 炼 铜

大冶有色金属公司
河北矿冶学院 编

冶金工业出版社出版
（北京灯市口74号）

新华书店北京发行所发行。

山西新华印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张8¹/₄ 字数215千字
1980年6月第一版 1980年6月第一次印刷
印数00,001~3,000册

统一书号：15062·3467 定价0.88元

目 录

第一章 概论	1
第一节 反射炉炼铜简述.....	1
第二节 炼铜原料.....	4
第二章 铜精矿的干燥和焙烧	8
第一节 铜精矿的干燥.....	8
第二节 铜精矿焙烧的基本理论.....	11
一、硫化物的着火温度.....	13
二、焙烧的主要化学反应.....	14
三、沸腾层的基本概念.....	15
第三节 沸腾焙烧的生产实践.....	23
一、沸腾炉.....	23
二、沸腾焙烧的生产操作.....	27
第三章 反射炉熔炼的基本原理	34
第一节 冰铜和炉渣的基本性质.....	34
一、冰铜.....	34
二、炉渣.....	42
第二节 反射炉的热传递.....	55
第三节 反射炉炉料的熔化过程和化学反应.....	59
一、炉料的熔化和冰铜、炉渣的形成.....	59
二、反射炉的主要化学反应.....	62
第四节 转炉渣在反射炉内的行为.....	66
第四章 反射炉及其附属设备	71
第一节 反射炉的结构.....	71
第二节 加料装置与烟道.....	87
一、加料装置.....	87
二、烟道.....	91
第三节 反射炉的废热锅炉.....	93

第五章 反射炉的加热	96
第一节 反射炉用燃料和燃烧的基本知识	96
一、粉煤、重油和天然气的一般特性	96
二、燃料燃烧的几个基本概念	98
第二节 反射炉的燃烧技术	102
一、粉煤的燃烧	102
二、重油和天然气的燃烧	112
三、炉膛压力的调整和炉气成分的控制	116
第三节 粉煤的制备	117
第六章 反射炉熔炼的操作和简易计算	122
第一节 开炉	122
第二节 生产岗位操作	125
一、加料	125
二、放渣	127
三、放冰铜	129
四、烟道清理	133
第三节 故障及其处理	134
一、炉底炉结	134
二、浮料和料坝	138
三、倒料坡	138
四、粉煤仓跑煤	140
第四节 停炉	142
第五节 反射炉的检修	145
一、小修	145
二、中修	146
三、大修	149
四、喷补法	150
第六节 反射炉熔炼工艺条件的测定和热工自动控制	153
一、反射炉熔炼工艺条件的测定	153
二、反射炉熔炼的热工自动控制	159

第七节 反射炉熔炼的简易计算	165
一、配料计算	165
二、热平衡计算	169
三、燃料消耗概算	175
第七章 反射炉熔炼的改进	177
第一节 反射炉熔炼技术经济指标的改善	177
一、生产率	177
二、燃料率	187
三、金属回收率	189
四、炉子寿命	190
第二节 降低反射炉渣含铜	194
一、影响反射炉渣含铜的因素	194
二、降低渣含铜的措施	206
第三节 反射炉熔炼过程的强化	210
一、富氧鼓风	210
二、预热鼓风	217
三、氧气顶吹反射炉熔炼	218
四、炉顶加热强化反射炉熔炼	220
第八章 反射炉烟气收尘	223
第一节 旋风收尘器	224
第二节 电收尘器	228
第九章 冰铜吹炼及其他熔炼产物的综合利用	234
第一节 冰铜吹炼	234
第二节 反射炉渣的综合利用	239
一、炉渣中金属的回收	240
二、矿渣棉的制造	245
三、渣砖的制造	247
四、炉渣废热的利用	249
第三节 反射炉烟气中 SO_2 的利用	250

第一章 概 论

第一节 反射炉炼铜简述

炼铜方法有火法和湿法之分。火法炼铜是在高温下熔炼含铜原料，利用铜与原料中脉石的物理化学性质上的差别，使铜与脉石分离，最后得到金属铜。湿法炼铜则是在一定条件下，使原料中的铜优先溶解于溶液中而与脉石分离，然后将所得含铜溶液进一步处理得到金属铜。从国内外炼铜实践来看，在炼铜工业中火法生产仍占主导地位。近十多年来，湿法炼铜发展很快，火法炼铜也出现了一些新的方法，如闪速熔炼、转炉富氧吹炼以及连续炼铜等等。但是，在世界铜生产中，用反射炉熔炼生产的铜产量仍居首位。据统计，目前，资本主义国家铜冶炼总生产能力中，反射炉熔炼约占50~56%，鼓风炉熔炼约占12%，闪速炉熔炼约占13%，电炉熔炼约占4~5%，生精矿转炉熔炼约占3~4%，湿法炼铜约占10~12%。

反射炉熔炼生产流程的基本工序可以归纳为：原料在熔炼前的准备；经制备的原料在反射炉内熔炼；炼出的冰铜在转炉内吹炼成粗铜；熔炼和吹炼产出的烟气的收尘和炉渣进一步处理，以及粉煤或其他燃料的准备。

原料熔炼前的准备，是指物料的干燥、焙烧、球团（制粒）等作业。

视原料性质和其他条件的不同，原料需采用不同的制备方法。不同的原料制备方法，又构成不同的反射炉熔炼流程。铜精矿经过干燥后直接加进反射炉熔炼，称为生精矿熔炼。当生精矿含硫过高而直接熔炼产出的冰铜品位过低时，这种精矿需先经过氧化焙烧，部分脱硫，再以焙烧产物焙砂（焙烧矿）进行熔炼，称为焙砂熔炼。将一部分精矿进行全氧化焙烧，原料中硫基本上脱除，再混以相当量生精矿进行熔炼，称为混合矿熔炼。

近二十多年来，随着选矿技术的发展，铜精矿的品位不断提高，精矿可以不经焙烧脱硫而炼出品位较高的冰铜。因此，一些炼铜厂趋向于采用生精矿熔炼法。反射炉熔炼生精矿的优点是：省去了焙烧工序，基建投资大约减少10~15%，铜的机械损失和在炉渣中的夹杂损失减少，铜回收率约可提高3~3.5%，同时劳动条件显著改善。但床能率较低，燃料单耗较高。

铜精矿的焙烧与否主要取决于原料成分，原料中硫铜比超过3.2~5时，一般都应当进行氧化焙烧脱硫。

在反射炉装加热料（热焙砂）的设备条件一时不具备而物料又需要氧化脱硫时，可采用混合料熔炼法。这种方法的熔炼性质有些类似于焙砂熔炼，其缺点是精矿与焙砂相混时飞扬损失较大。

我国的反射炉炼铜厂，有采用生精矿熔炼的，也有采用混合料熔炼的。

图 1—1 为生精矿反射炉熔炼的基本工艺流程。

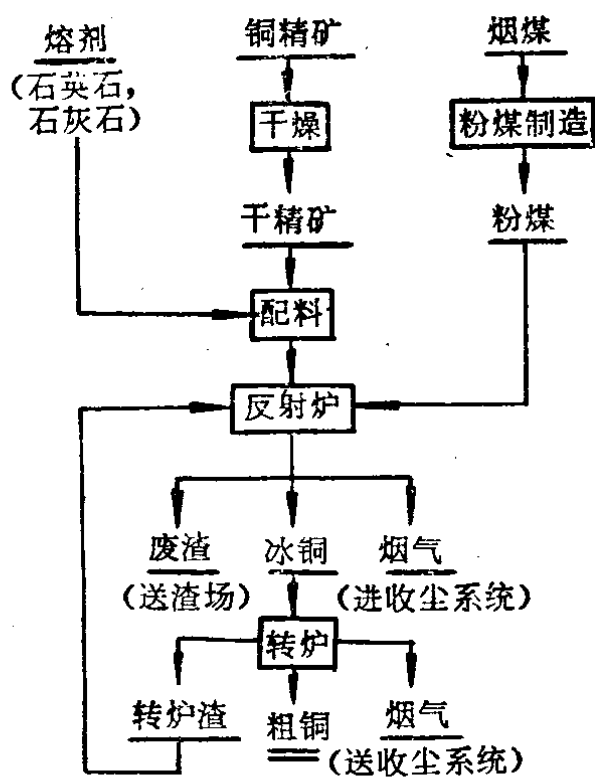


图1—1 生精矿反射炉熔炼基本工艺流程

反射炉是一个平卧的长方形炉子，用优质耐火材料砌成，直

接建造于地面上，炉室内长30~36米，内宽7~10米，内高3~4.5米。炉子的一端设置燃烧器，燃烧粉煤或其他燃料，对炉子供热。燃料和熔炼产生的烟气由炉子的另一端排出，经过废热锅炉和收尘设备后排入大气。熔炼用的物料由炉顶两侧的加料孔加入，在炉膛内的两个侧壁上堆积成料坡（图1—2）。

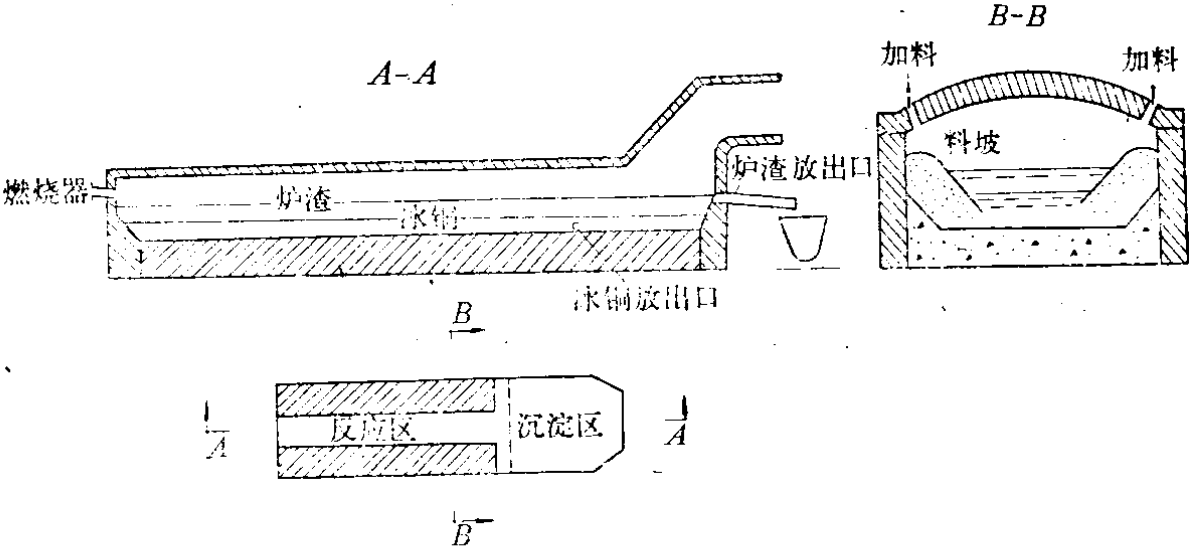


图1—2 反射炉熔炼示意图

反射炉熔炼过程的实质在于炉料直接加进炉内的高温区（1400~1500℃）迅速受热熔化，在受热及在熔化后向下流入熔池的过程中，产生一系列物理化学变化，最后在熔池内形成冰铜和炉渣，按比重不同而分层。

反射炉熔炼主要包括以下四个过程：

- （1）燃料的燃烧和气体的运动。
- （2）炉气、炉料、熔池、炉顶炉墙之间的热交换。
- （3）炉料受热，熔化和各种化学反应。
- （4）熔融产物的运动和分离。

按照固体炉料在炉内转化为冰铜和炉渣的运动规律，大体上可以把反射炉划分为两个区域（见图1—2）即：

（1）反应区，指炉料加入炉子的那一段及其邻近的区域。物料在这个部位加入，熔化，发生反应，最后生成冰铜和炉渣。

（2）沉淀区，这个部位通常不加料或加少量的料，熔炼产物最后在这里澄清分层，准备分别由炉内放出。

必须指出，这两个区域是逐步过渡的，并没有一个严格界限，事实上反应区同样也发生冰铜与炉渣的澄清作用，而有的工厂的反射炉，其冰铜放出口就设置在反应区。

基于以上所述，反射炉熔炼具有以下特点：

(1) 炉料直接进入高温区，在此熔化，发生反应。炉内反应基本上属于固相与固相间、固相与液相间以及液相内的反应。为了促进反应的进行，物料事先应充分混合。显而易见，大块物料从受热和炉料中各组分相互反应的角度来看，都不适合于反射炉熔炼，所以反射炉炉料的粒度不宜过大，实践认为不宜超过3~5毫米。

(2) 物料熔化主要靠燃料燃烧所产生的热力，一般力求在炉内获得高温。燃料燃烧的过剩空气量控制在10~15%范围内，过大，气体在炉内吸热过多，妨碍炉温的提高。反射炉内的气氛属于中性或微氧化性。

(3) 炉气只从炉料表面和熔池表面流过，加之气相中游离氧较少，所以炉内气相与固相之间以及气相与液相之间相互反应的条件是很差的。根据近代某些研究证明，气相中的氧量对渣的成分产生一定的影响。

(4) 炽热的炉气只和炉料表面接触，因此炉气热量的利用率很低，通常只有25~30%。炉气由炉内带走50%以上的热量，为了回收这一部分热，需要在炉后烟道上设置废热锅炉。

第二节 炼 铜 原 料

地壳中的铜含量占0.01%，而铁为5%，铝为8.1%。自然界含铜矿物已经发现的有200多种，其中常见的铜矿物列于表1—1。

在铜的硫化矿中分布最广的是黄铜矿，它所含的铜、铁、硫量差不多相等，即大约各占该矿物重的 $\frac{1}{3}$ ；其次是斑铜矿，它与黄铜矿不同，铜的含量很高，铁与硫的含量相对减少；再次是辉铜矿，它只含有铜和硫，不含铁，铜的含量几乎占矿物重的 $\frac{4}{5}$ 。

常见的铜矿物

表1—1

矿 物	化 学 分 子 式	成 分 (%)				
		Cu	Fe	S	As	Sb
硫化矿						
辉铜矿	Cu_2S	79.9	—	20.1	—	—
铜 蓝	CuS	66.5	—	33.5	—	—
黄铜矿	CuFeS_2	34.6	30.5	34.9	—	—
斑铜矿	Cu_5FeS_2	55.6	16.3	28.1	—	—
硫砷铜矿	Cu_3AsS_4	48.4	—	32.6	19.0	—
黝铜矿	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	46.7	—	23.5	—	29.8
砷黝铜矿	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_3$	52.7	—	26.6	20.7	—
硫铜钴矿	CuCoS_4	20.5	—	41.0	—	—
氧化矿						
赤铜矿	Cu_2O	88.8	—	—	—	—
黑铜矿	CuO	79.9	—	—	—	—
蓝铜矿	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57.6	—	—	—	—
孔雀石	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55.3	—	—	—	—
硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36.5	—	—	—	—
胆 矾	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25.5	—	—	—	—
水胆矾	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56.5	—	—	—	—
氯铜矿	$\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	59.5	—	—	—	—

在氧化矿中，孔雀石分布最广。其次是蓝铜矿。

铜矿石按其含铜量的多寡，可以分为富矿（含铜大于2%）、中等矿（含铜量1~2%）和贫矿（含铜小于1%）。目前，铜矿石的含铜量低至0.4~0.5%即认为达到可开采的标准。随着选

矿技术的发展，此最低值还会继续下降。

铜矿石中很少只含有单一的铜矿物，而常常伴生有其他一些金属。它们以各种金属矿物形态存在，此外还含有脉石矿物，即矿石的岩石基体。

硫化矿石中最常见的其他金属矿物是黄铁矿 (FeS_2)、闪锌矿 (ZnS)、方铅矿 (PbS)、有时有镍黄铁矿 (NiS)、硫钴矿 (CoS)。在处理硫化铜矿时应当设法综合回收铅、锌、镍、钴、铁、硫等有价值成分。

氧化铜矿石中常含有褐铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)、赤铁矿 (Fe_2O_3)、磁铁矿 (Fe_3O_4)、菱铁矿 (FeCO_3)以及其他金属氧化物。

铜矿石中的脉石矿物，最常见的是石英，其次是方解石、云母、绿泥石、重晶石等。脉石矿物中几种主要成分为二氧化硅 (SiO_2)、氧化钙 (CaO)、氧化镁 (MgO)、氧化铝 (Al_2O_3)和硫酸钡 (BaSO_4)。这些脉石矿物在火法冶金中是以造渣形态除去的对象。

此外，铜矿石中还含有少量的其他有价值元素，如砷 (As)、锑 (Sb)、铋 (Bi)、硒 (Se)、碲 (Te)、锰 (Mn)、钼 (Mo)、金 (Au)、银 (Ag) 等。

由铜矿床开采出的铜矿石通常主要是硫化矿。这种矿石常因其含铜品位低，并且伴生有铅、锌等有价值元素而呈多金属矿石形态，不适于直接冶炼，故一般需事先经过选矿处理，以提高矿石的品位，并尽可能与其他次要金属分离，分别产出铜精矿、铅精矿等。

表 1—2 中列有我国反射炉使用的主要铜精矿的化学成分。

反射炉用铜精矿成分 (%)

表1—2

矿山	Cu	S	Fe	SiO ₂	CaO	Zn	Co
1	13.75	37.95	31.10	6.6	4.3	3.65	—
2	16.37	26.98	25.30	16.2	3.1	2.40	—
3	20.62	31.58	31.0	7.5	1.7	0.3	—
4	18.75	7.43	10.20	33.0	5.5	0.35	—
5	15.0	31.0	29.30	18.8	2.2	0.35	—
6	12~12.5	34~36	38	3~4	0.5~1.5	—	0.23
7	18	24	32	7	0.5	—	0.085
8	12	4.5	38	15~17	2	—	—

注：8*矿山所产为氧化精矿。

第二章 铜精矿的干燥和焙烧

第一节 铜精矿的干燥

选矿厂送来的铜精矿通常含水10~20%，有时还更高。这种湿度大的铜精矿对下一步工序无论是沸腾焙烧或反射炉直接熔炼都不利。过湿的精矿沸腾焙烧时均匀进料困难，入炉后不易松散，影响焙砂质量，也易于堵塞沸腾炉前室。反射炉直接熔炼时，使炉子生产率显著下降，燃料率显著升高，还易于堵塞加料孔，增大劳动强度。故入厂精矿一般需经过干燥。

干燥物料常用的设备是回转窑。这种设备在冶金和化工中应用很广，其结构如图2—1所示。

回转窑的窑体是圆筒形，用12~16毫米的锅炉钢板焊接或铆接而成。圆筒的直径一般为1.2~2.2米，长9~15米，窑体与水平线形成3~5°倾角，圆筒内壁上垂直焊接一些长条形扬板。窑体借助于大滚轮支承在两对小托轮上，托轮支承在钢筋混凝土基座上。窑体上另设有一齿圈，通过减速装置与电机相连，借此使窑体以每分钟3~6转的速度旋转。窑的一端设置燃烧室，在此燃烧燃料，产生大量热气体，引入窑内。燃料可以采用块煤、粉煤、重油和煤气。采用液体燃料和气体燃料比较方便。窑的两端均设有窑封圈，防止冷风吸入，降低窑温。窑的排料端（窑尾）设有烟罩，窑内烟气由此烟罩排出，经收尘后排入大气。

干燥窑运转时，将潮湿的铜精矿经由加料溜子加入窑内。随着窑体的回转，在扬板的带动下，将物料扬散在窑内空间（见图2—2）。窑体有一定倾斜度，由于重力作用，物料由窑的高端（窑头）自动流向低端（窑尾）。燃烧室内燃料燃烧产生的大量热气体进入窑中与分散的物料接触，将热量传给湿料，使其中水分蒸发而为气流所带走，由此使铜精矿干燥。

在干燥生产实践中，通常用干燥强度来衡量设备的干燥能

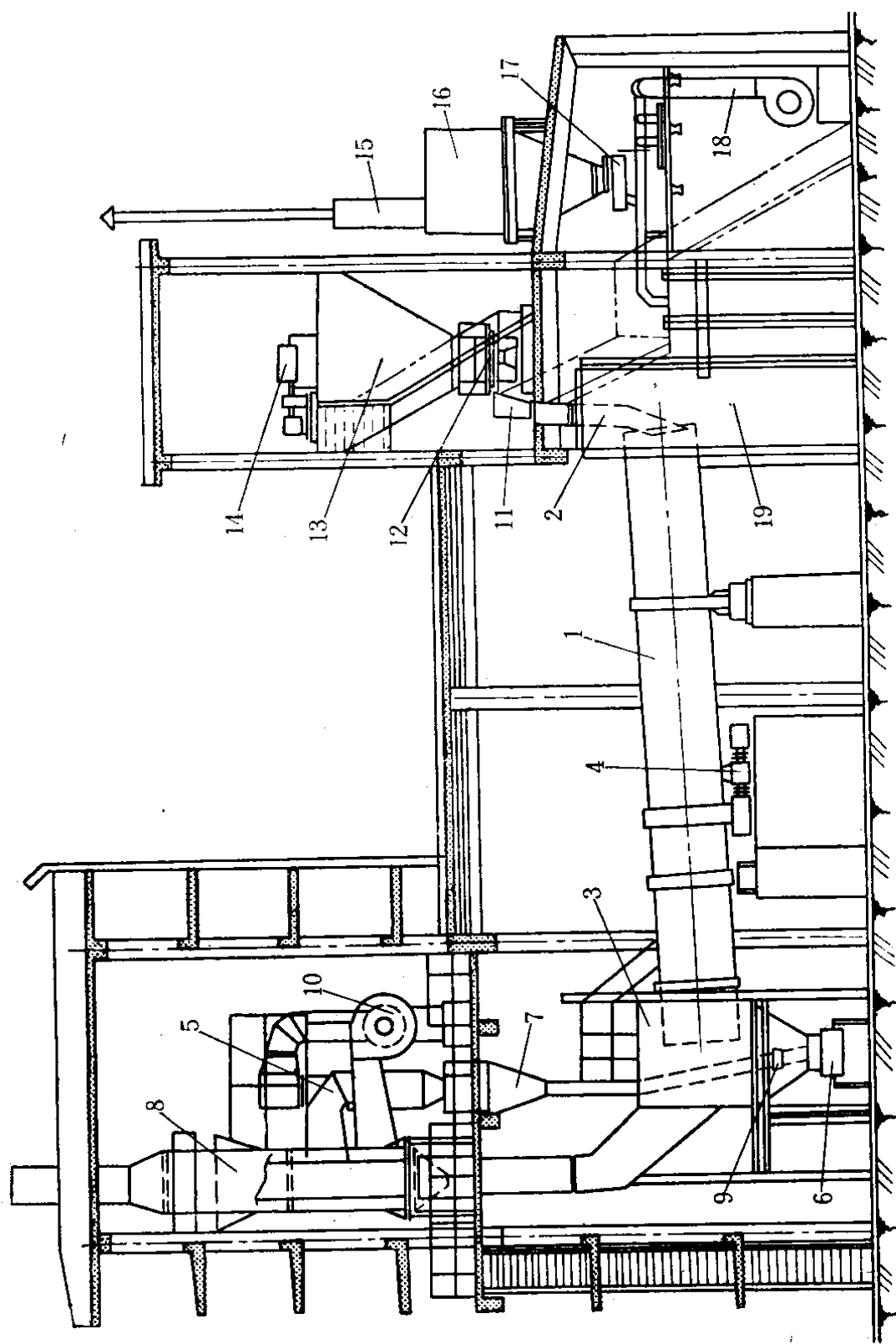


图2-1 回转窑及其附属设备

- 1—窑体；2—加料溜子；3—窑尾漏斗；4—传动系统；5—旋涡收尘器；6—皮带；
7—烟尘漏斗；8—水沫收尘器；9—锁气器；10—排风机；11—下料斗；12—加料圆盘；
13—料仓；14—皮带；15—粉煤布袋收尘；16—粉煤仓；17—给煤机；18—鼓风机；19—粉煤燃烧室

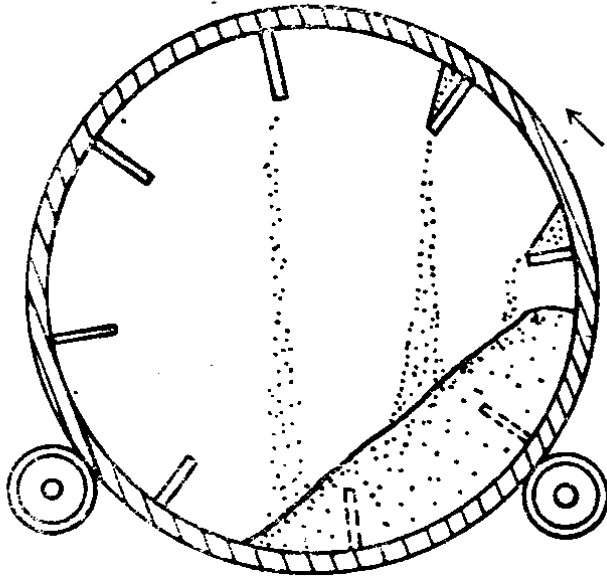


图2—2 回转窑内扬板作用图

力。所谓干燥强度，就是指单位时间内干燥设备单位容积所能气化排除的水分量，其单位常用公斤/米³·小时表示。例如，有一容积为21米³的回转窑，其加料量为250公斤/分，物料经过干燥，水分由12%降到6%，则此回转窑每小时脱除的水分为：

$$250 \times 60 \times (12 - 6) \% = 900 \text{ 公斤}$$

回转窑的干燥强度为：

$$900 / 21 = 42.3 \text{ 公斤/米}^3 \cdot \text{小时}$$

一般铜精矿回转窑干燥时的干燥强度为 40~55 公斤/米³·小时。但需指出，铜精矿干燥时不宜将水分降得过低，否则在运输和入炉时飞扬损失大，使金属回收率降低，劳动条件也不好。一般干矿残留水分不低于 5%。

影响干燥强度的主要因素有：

(1)单位时间内对窑的供热量。此供热量愈大，干燥强度也愈大。为此，必须提高并稳定入窑热气流温度，并适当增大热气流的流速。大的气流速度也有利于将蒸发出的水蒸气及时带走，减少气体中蒸气的饱和程度，有利于加速干燥。铜精矿干燥温度通常为800~900℃。温度过高，对于内部没有砖衬的回转窑，会引起窑体变形，热气流速度过大，使烟尘率增高，降低干燥的直

接回收率。通常窑内气流速度控制为10~12米/秒。

(2)物料与热气流的接触面积。物料与热气流的接触面积愈大,固体与气体之间的热交换愈好,愈有利于干燥。物料的初始含水量愈高,粘性愈大,则在其运动过程中不易松散,并易粘附在窑的内壁上,使干燥强度降低。实践证明,同样原料,初始湿度愈大,其干燥强度愈低。

为使窑内物料与热气流充分接触,生产中必须保证扬板完好,无脱落现象,以充分发挥其翻料作用。此外,在窑头部位窑外壁设有振打锤,随窑体回转,借离心力作用使此锤及时敲击窑壁,促使窑内粘附物料脱落。但这种振打方式并不理想,易使炉体变形。

(3)窑体的封闭程度。窑体若封闭不良,窑尾大量吸风,使窑内抽力相应减弱,蒸发出的水蒸气不能及时排出。窑头吸风,使热气流温度降低,也不利于干燥。

某炼铜厂采用 $\phi 1.5 \times 12$ 米回转窑,每小时处理9.5吨湿料,湿料含水17~18%,出窑干料含水约8%,干燥强度约为42公斤/米³·小时,干燥的烟尘率约为1%。由窑尾出来的烟气依次通过双管旋风收尘器,排风机和水沫收尘器后排入大气(见图2—1)。收尘效率在92%以上。燃料用粉煤,煤耗为1.2~1.5%。

回转窑用于干燥的优点是设备比较简单,易于操作。缺点是处理高湿度、高粘性的精矿时干燥强度低。其他干燥方法有气流干燥法、沸腾干燥法,但尚未见到应用于反射炉物料的干燥。

第二节 铜精矿焙烧的基本理论

硫化铜精矿的焙烧,是指物料基本上保持不熔条件下的氧化脱硫过程。

硫化铜精矿的焙烧是熔炼前的一项准备作业。但并不是任何一种铜精矿熔炼前都需要焙烧。焙烧与否取决于下一步熔炼所产冰铜的品位。如果反射炉熔炼产出的冰铜品位过低,则这种精矿需先焙烧而后熔炼。冰铜的最低品位系按各厂具体条件确定,通

常为25~30%，也有低至20%的。如果精矿熔炼出的冰铜品位高于各该厂确定的最低品位，则精矿可以不焙烧直接在反射炉内熔炼，即所谓生精矿反射炉熔炼。例如某炼铜厂所处理的铜精矿含铜16%，含硫32%。用粗略的计算，得出这种铜精矿直接熔炼所产出的冰铜品位，从而确定是否需要焙烧。

设反射炉熔炼脱硫率（生精矿熔炼）为28%，按100公斤铜精矿计算，则：

熔炼时氧化脱硫 $32 \times 28\% = 9$ 公斤

余硫 $32 - 9 = 23$ 公斤

通常反射炉熔炼出的冰铜含硫24%左右，故得到冰铜：

$$(23 \div 24) \times 100 = 95 \text{ 公斤}$$

冰铜品位则为： $(16 \div 95) \times 100\% = 16.8\%$

低于一般认为最低冰铜品位25~30%，可见这种铜精矿在熔炼前必须焙烧。

铜精矿中的大部分硫系与铁相化合。焙烧时，一部分硫氧化生成二氧化硫而脱除，相应地硫化铁则转变为氧化铁，熔炼时造渣。

冰铜主要由硫化亚铜和硫化亚铁组成。氧化脱去的硫愈多，余下的硫化亚铁愈少，相应地冰铜品位则愈高。

铜精矿焙烧时脱除的硫与原料含硫量之比称为脱硫率。同理，熔炼时也有脱硫率。

铜精矿焙烧可采用两种方法：多膛炉焙烧和沸腾炉焙烧。多膛炉是一种旧式焙烧炉，其主要缺点是生产能力低，设备结构较复杂，但脱硫率易于控制。沸腾焙烧炉是五十年代中期的产物，其特点是生产能力高，设备结构较简单，产品质量均匀。缺点是生产时矿尘量大，需要设置有效的收尘设备。目前这两种设备在炼铜厂都有采用。我国火法炼铜厂铜精矿焙烧系采用沸腾焙烧炉，本章系叙述有关沸腾焙烧的基本理论和一般操作实践，多膛炉焙烧从略。