

国外

鏈篦机——回轉窑

氧化球团譯文集

2



四川省渡口市科学技术情报研究所

目 录

采用立波尔 (Lepol) 法造球	(1)
铁矿物料焙烧固结机理的研究	(7)
球团矿固结机理 (评“再结晶理论”)	(10)
磁铁精矿球团的氧化动力学	(13)
在自熔性铁矿物球团固结过程中再结晶的作用	(16)
温度以及气体组成对球团矿烧结动力学的影响	(19)
焙烧气氛对球团制造的影响	(23)
关于球团的强度问题	(38)
关于铁矿物球团的机械强度	(45)
关于铁矿物球团的抗压强度	(49)
制取热还原过程中不破裂球团的途径	(52)
提高铁矿物球团的热稳定性	(58)
铁矿物球团的热物理特性 (报导 1)	(60)
冷球团的特性调查 (关于冷球团的研究 I)	(64)
在还原过程中球团矿的强度和体积变化	(66)
富磁铁精矿超熔剂性球团的还原强度	(69)
铁矿物球团在干燥过程中的热稳定性	(76)
碱度和加热速度对球团有效热物理特性的影响	(80)
不同脉石含量的铁精矿球团的碱度对其冶金性能的影响	(86)
在回转窑内焙烧的铁矿物球团质量的研究	(92)
钛磁铁精矿球团的组织特点和冶金性能 (报导 2)	(97)
添加返矿及焙烧制度对非自熔性球团矿氧化动力学的影响	(101)
自熔性球团质量改善的途径	(105)
列别金斯克精矿球团固结和冶炼性能的研究	(107)
精矿脉石的矿物组成对球团质量指标的影响	(116)
自熔性球团矿焙烧带的热交换及参数的计算	(121)

采用立波尔 (Lepol) 法造球

提要: 立波尔系统是由链篦机和回转窑组成的联合体系, 在冶金厂中用作细矿或精矿造球。已经有很多套设备用于镍矿、钛磁铁矿、铬矿和磷酸盐矿的造球。对这套设备作了简要叙述, 并对立波尔设备的结构和工作原理作了描述。该方法也可用于生产还原球团。在日本投产了一台链篦机面积约 300 米² 的立波尔设备。

1. 引言

在全世界范围内金属需要量增加了。为了满足这种需要, 必需开发和建设更多的矿山。但是这些矿石由于品位低或由于细颗粒的结构, 不进行原料准备而用通常的冶炼方法是不能冶炼的。因此, 为了能用细粒矿石或精矿生产出一种块状的, 因而适合于下一步冶炼的炉料, 需要引入造块工序。

造块的一种方法就是造球法。在铁矿石的加工工业中造球方法已应用 20 多年了, 而这种方法在有色金属矿石的处理中也越来越重要。

立波尔设备最初是在水泥工业中发展起来的, 并且在 20 年代末由湿法转变成干法。从建造了 400 套以上的立波尔设备所得到的经验来看, 这种方法用于各种原料造球是成功的。目前立波尔设备已用于镍矿、铁矿、磷酸盐矿、铬矿、钛矿和冶金厂一般造球以及用于生产优质耐火泥、冶金厂用的石灰石、白云石和重晶石。

2. 立波尔设备的结构:

立波尔设备的核心部份是焙烧机组, 即由链篦机、回转窑和冷却装置组成的联合体。球团装在链篦机的链篦上, 在输送过程中被脱水、干燥和予热, 然后进入回转窑中在所要求的最终温度下焙烧。热能是回转窑出来的热废气提供的, 通过抽吸使热废气通过链篦上的球团层。予热过程中球团发生硬化, 这将使球团在回转窑中产生的粉尘量减少到最低限度。

在焙烧机组前面相衔接的是磨矿设备, 因为球团生产需要具有一定粒度组成的矿粉, 矿粉的粒度将决定其造球性能。

图 1 到图 3 表示一套球团设备的各组成部份。这只是一套铬矿造球设备的流程示意图, 但其原理对所有的矿石造球设备都适用。

2.1 磨矿设备(图1):

细矿或精矿与返料一起从矿仓里出来并进入球磨机。采用的磨矿机类型取决于矿石的可磨性。对各种矿石来说以带有中间放矿的两段式分离磨矿机(双旋转体系统)为最好。

根据原料的情况安装了带有一个干燥室的磨矿机，这样磨矿机组可以作为磨矿——干燥设备使用。

在两段式分离磨矿机中，从第一段磨矿出来的被磨矿物可以通过中间放矿离开磨矿机。已经达到所要求粒度的那部份矿粉在涡轮分选机中分离出来并直接输送到贮料仓。较粗的矿粉进入第二段磨矿中，并在这里被磨到最终的细粒度。

从磨矿机排出的废气中较粗的矿石颗粒在粗粒分离器中被分离出来并重新返回磨矿机再磨。接着，废气还要在过滤装置中进行除尘。

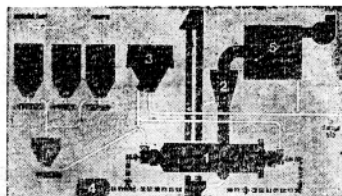


图1 磨矿设备

1. 磨矿机； 2. 粗粒分离器； 3. 风力选矿机； 4. 燃烧室； 5. 袋式过滤器。

图中，material feed—给料 returns—返料
to storage silo—进贮料仓

2.2 贮料仓与造球设备(图2)

矿粉装在料仓里。为了使出矿时毫无粘留，料仓安装了通风系统。矿粉通过风力输送管道和斗式运输机到达中间料仓。另一个中间料仓盛装添加剂和粘结剂。这两种原料通过配料皮带称按一定的配比从两个料仓放出来，并输送到流动式连续混料器中。

这两种原料在混合过程中加水使其予先润湿，这样可使混合原料湿润均匀，从而改善生球性能。

造球采用盘式造球机。

生球离开造球盘并通过排料溜槽落到倾倒式输送带上，此输送带将生球均匀地分布在下面的筛子上。小于8毫米的生球被筛分出来。在小规模及中等规模时，筛子的宽度与立波尔链筛机的宽度相属，筛上的生球团布满到链筛上，对于造球性能很好的矿石可以取消中间筛分。相反，对其他矿石必需考虑使用辊动筛，这种筛既起了筛分作用同时又使球团表面致密。

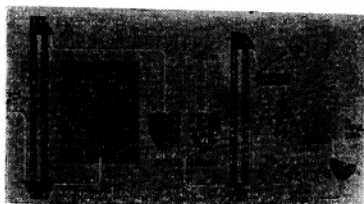


图2 造球设备

1. 贮料仓； 2. 添加物料仓； 3. 混料器；
4. 造球盘； 5. 筛。

图中，from mill—来自破碎机 dust—炉尘
additives—添加剂 water—水 to LEPOL
grate—进立波尔链筛 returns—返料

2.3 立波尔设备(图3)

链筛机上球团的料层厚度为150毫米，当链筛机运行速度改变时，料层厚度也要相应地改变。

为了使球团能经受住在回转窑中受到的机械应力而不破碎，立波尔链筛机应当完成的任务是使球团干燥、予热和予先硬化。

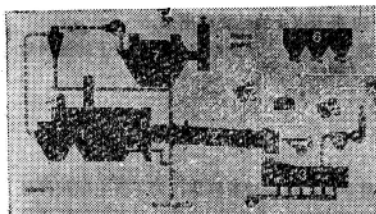


图3 立式波尔设备

1.立式波尔链筒机； 2.回转窑； 3.Recupol—冷却器； 4.燃烧器； 5.筛子； 6.成品球团料仓； 7.E—过滤器； 8.多管旋风除尘器。

图中：finished product—成品 returns—返料 to storage silo—进贮料仓



图4 带有中间墙和链筒的立式波尔链筒机的内部情况(安装结束前)。

没有末端的链筒机链条(图4和图5)通过干燥室和加热室,这两个室由一个中间墙互相分隔开。从回转窑中出来的热废气,在加热室里用抽吸的方法使其向下通过生球团层,然后用送风机将这些热废气压入干燥室。紧接着,温度为 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的废气被废气抽出机送到电除尘器中进行除尘,然后放入大气中。

位于加热室后面的旋涡除尘器对回转窑废气进行中间除尘,使其中一部分粉尘沉积出来。这部份粉尘连同电除尘器的粉尘和球团过筛时的筛下物一起成为造球原料的运料。

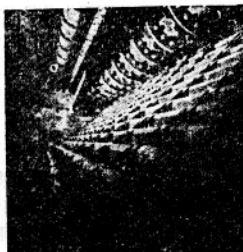


图5 链筒的回转(内部情况),在带有传动轴、上支撑轨轴和链筒下行段的传动侧视。

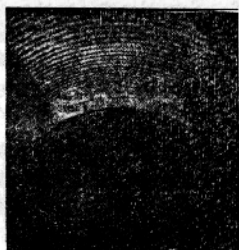


图6 冷却器的内部情况(从入口侧向出口方向观察)。

在回转窑中球团在焙烧温度下得到最终强化。焙烧温度同矿石种类及对球团提出的要求有关；大多数情况下在 $1100\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。

在回转窑出口,焙烧好的球团经传送溜槽落到Recupol冷却器中。这个冷却器同立式波尔链筒机一样,也是由一个安装在精壁里的、循环运转的链筒组成的(图6)。用送风机将冷空气从下面透过链筒和链筒上装的球团,使球团得到冷却。球团在冷却器末端落到深箱式运输机上并被运送到过筛站。在冷却器的出口安装一个链筒宽度为100毫米的筛网,这样只有小于100毫米的结块才能到达过筛站。

深箱式输送机将物料送到筛动筛，在这里将 50 毫米以上的球团筛出来。

斗式排料器排出的球团和筛下来的球团落到第二个筛子上，此筛将 8 毫米以下的细颗粒筛出来。这些细颗粒的物料返回到磨矿设备。

3. 试验与生产结果:

在自己的研究所里用不同的矿石进行多次造球试验，这些试验确认，为了使生球获得最佳性能，即生球直径在 8~20 毫米之间，抗压强度在 1.2~1.8 公斤/个球，对磨矿的要求是在筛孔为 90 微米的筛上残留物数量约为 10~12%。一般地说，当矿物含水量在 12% 以下时，在上面叙述过的双旋转体磨矿系统中（图 8）进行磨矿、干燥的联合操作是没有困难的。当原料含水量更高时，如红土矿，干燥必须在磨矿设备前面的单独干燥机里进行。

事实表明，用于先润湿的矿粉进行造球在大多数情况下是简单易行的。因此在造球盘前面设置一个连续混料器是必要的，在这个混料器里向矿粉中加入添加剂，同时通过喷水使原料润湿。

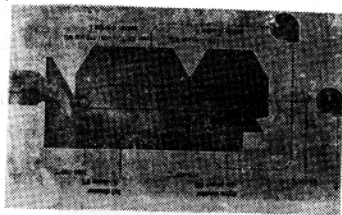


图 7 立波尔链篦机内的正常状况。

图中: drying chamber—干燥室 hot chamber—加热室 Suction chamber—吸入室

在造球以前通过适当的原料准备使原料条件保持恒定，诸如给料量、原料湿度及磨矿细度等，这样造出合格的球团在绝大多数情况下是没有问题的。当然，对于不同种类的原料必须调整造球盘的倾斜度、转数以及给料量和加水量，使这些因素适应于每一种原料。

立波尔设备在热能的利用上是最经济的一种焙烧设备，因为从回转窑出来的热废气两次通过球团料层从而实现了热废气与球团之间的最佳热交换。图 7 表示出立波尔链篦机内正常的温度和压力状况。

由于利用回转窑的热废气使链篦机上的球团层得到连续干燥，所以回转窑本身可以设计得比较短，这意味着，在链篦机的加热区废气温度可达 300~450°C，冷却区温度可达 700~800°C。链篦机所允许的最高温度由链篦机受热部件的耐热材料决定，即使在使用高合金材料的情况下，也应当对该设备运行状况进行调整，使热废气在冷却区的温度不超过 600°C。

热废气在链篦机的旋涡除尘器内经过中间除尘后，到达干燥区内的废气温度为 300~450°C。在干燥区内热废气使生球团脱水干燥，从而使其本身温度降至 120~150°C，并经过除尘后放入大气中。

对于热敏感性很强的球团，立波尔链篦机可以进一步划分两个干燥区，这样通过较低的温度使球团得到缓慢地干燥，从而避免了由于温度突变造成的球团碎裂。在这种情况下，回转窑热废气的流动可以这样来设计，在链篦机的第一个区域里使球团干燥的热废气采用 300~250°C 的较低温度。

立波尔链篦机内的压力状况通过在加热室与干燥室之间安装的热煤气鼓风机和废气鼓风机进行调整，使炉头内的压力控制在 $\pm 0 \sim 2$ 毫米水柱。干燥室内的负压为 -30~-50 毫米水

柱，干燥区内链篦下面的抽风室Ⅱ里面的负压为-100~-170毫米水柱。

回转窑焙烧区内的焙烧温度由使用的矿石种类和对焙烧球团的强度要求来决定。在生产铬矿球团时，根据铬矿种类的不同焙烧温度为1250—1350℃。在南非的一台球团设备上生产含铁的钛磁铁矿球团，焙烧温度大约需要1250℃，而镍矿球团的焙烧温度大约在1400℃。

球团离开回转窑后在链篦式冷却器——RecuPol系统中冷却。冷空气透过热的球团层之后被分成两股气流。从冷却器的前面温度高的那部分出来的空气已被加热到600~900℃，可以作为二次空气输送给回转窑。透过球团层的冷空气的其余部份，经过冷却器的废气除尘后放入大气中。但是也可将冷却器的这部分废气作为立波尔链篦机中干燥球团的热空气使用。这项措施可以改善整个立波尔系统的热能利用，并且由于取消了冷却器的废气除尘装置而节约了投资。



图8 双旋转体的干燥磨矿系统

4. 立波尔设备在工业中的应用：

经过认真的半工业试验并在半工业试验的设备上生产了大量的球团之后，现在已经为各种目的建了很多套立波尔设备。下面举几个例子：

4.1 镍矿：

1966年建了两套生产硅酸盐镍矿球团的立波尔设备，每台日产1150吨。矿石预先干燥到大约15%的湿度，再将50毫米大小的废石块筛去，接着在磨矿——干燥设备中将矿石磨到约90微米的粒度。直径约15毫米的球团在立波尔链篦机上（宽4米，长24米）干燥和予硬化，接着在回转窑（直径3.8米，长65米）中进行固结焙烧。球团冷却是在RecuPol冷却器（宽2.1米，长21米）中进行的。

4.2 铬矿：

在联邦德国使用一台立波尔设备用铬矿粉和铬精矿造球。粉矿或精矿在双旋转体磨矿机上磨到造球所要求的细度，在直径为3.2米的造球盘上造球。这套设备日产300吨焙烧球团。立波尔链篦机宽2.3米，长10米；回转窑直径3米，长18米。

4.3 含钒矿石：

在南非，一套造球设备用于处理含铁的钛磁铁矿。原矿磨好后与添加料混合、予先润湿并造球。在焙烧过程中，在原矿里以不溶解状态存在的钒转变成溶于水的钒酸盐化合物。冷却后的球团落到浸出设备中，在这里钒被浸出回收。这套设备日产480吨。立波尔链篦机宽2.8米，长10米。回转窑直径3.4米，长22米。

值得指出的是这套设备的燃烧系统是混合燃料燃烧。燃烧用油或用煤，或者用两种燃料的混合物。

4.4 磷酸盐矿:

早在1963年苏联就建了两套立波尔设备用于细颗粒磷酸盐矿造球,几年后又扩建了两套。60年代末荷兰的一个化工厂也建了三套立波尔设备。

在这类设备中所建有的造球都是以制取磷酸的一种特殊方法为基础的,这种方法是与一些磷酸化学工业联合发明的。磷酸盐球团经冷却后装入电炉。这套设备的特殊性在于,立波尔链篦机后面直接连接着 RecuPol 冷却器。球团的硬化在大约1050℃下进行,而且只是在链篦机上,回转窑是不必要的。宽3米、长26米的立波尔链篦机通常用两台直径为4.4米的滚筒装料。

4.5 冶金厂粉尘:

冶金厂自冶金工业各生产阶段的高质量粉尘具有越来越大的意义,必须充分回收利用粉尘中所含的金属和越来越重要的环境保护问题,是对于粉尘处理工业的发展具有决定意义的两个问题。到目前为止建造的最大的立波尔链篦机之一就是用于冶金厂粉尘造球的。面积约为300米²的链篦机具有4.8米的宽度和62米的长度。这台链篦机是日本的一个钢铁厂建造的,它与一台进行予还原的回转窑配套。球团是由冶金厂粉尘和还原剂的混合物制成的。

在链篦机上存在还原剂,这就对链篦机的结构提出了特殊要求。特别是为了避免由非控制性燃烧引起的链篦机过热,必须通过相应的结构设计在相当大的程度上减少多余空气的进入。

5. 立波尔设备在其他方面的应用:

罗列了上面一些实例,说明立波尔法在有色金属工业中应用很广泛。目前的发展趋向是单机具有更大的生产能力,即设备向大型化发展。上面最后一例用于处理冶金厂粉尘的立波尔设备的规模表明,具有较大的链篦机面积是可能的。目前建成的最大一台立波尔链篦机用在一台水泥设备上,其链篦面积为350米²(图9,译者略去)

另外,立波尔设备还可用于有色金属矿石的予还原。试验中已取得了很好的结果,证实立波尔设备用于这一目的是可行的。

应该指出,若操作情况允许的话,将热球团直接装入电炉在原则上是没有困难的。这样由于取消了冷却器使投资减少了,并且由于充分利用了热球团的热量降低了电炉的电能消耗,从而使整个生产过程更经济。

最近在有色金属矿石的造块方面又发明了一种新方法,用这种方法生产球团或团矿不用焙烧。因为这种方法目前还处于研究试验阶段,所以在产品质量和经济性方面与现有方法比较还为时尚早。

应根据设备所在的地点和对造块中间产品的质量要求来选择适宜的造块方法。根据世界上矿石储量的分布情况,将来要加强在出口矿石的矿山附近建设球团设备。在这种情况下对球团的强度要求特别高,因为球团需要经过多次转运和堆积,这时球团受到的负荷和磨损很大。事实表明,采用立波尔法生产的球团强度高、颗粒均匀而且球团的质量也均匀。

单麟天 译自西德《Aufbereitungs Technik》1975年, No 12, 626—630

铁矿物料焙烧固结机理的研究

[苏] Ю.С. 尤斯芬

Ю.С. 卡拉巴索夫

В.М. 苏希尼娜

球团固结系由于加热到高温下 (1350~1400°C) 所进行的物理—化学和物理—力学过程的结果。考虑到球团焙烧时发生矿石微粒的粘结 (Спекание), 这就向我们提出了确定这些过程某些规律性的任务。

本文介绍了分析纯的铁氧化物和中央采选公司精矿焙烧试验的结果。中央采选公司精矿的成份如下: (%)

Fe ₂	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	P	S
67.80	27.72	0.90	4.01	0.47	0.40	0.10	0.07	0.02

总计研究了 1000 个以上的试样, 研究工作系用直径为 15 毫米的圆柱形团块来进行的, 其孔隙率近似于球团的孔隙率, 团块系用经过干燥和筛分的物料 (赤铁矿粒度为—0.068 毫米和—0.100 毫米, 磁铁矿粒度为—0.050 毫米和—0.100 毫米), 在水压机上用压力为 500, 1000 和 2000 公斤/厘米²来压制的。

保证了最终结构和性质的团块试样, 在焙烧过程中最明显的现象就是收缩, 实验确定的收缩率不仅可以按团块焙烧前后的大小来测量, 而且可以在等温过程中用膨胀计连续不断地进行测定。

收缩率的数值 (试样的密度及粒度不变时) 取决于原料的特性和焙烧时可能发生的物质迁移机理, 在这方面, 铁的氧化物 (Fe₂O₃、Fe₃O₄) 之间有明显的差别。由赤铁矿、磁铁矿和在氧化气氛中焙烧过的磁铁矿制成的团块, 其收缩率比较如下: (%)

物 料	温 度 °C			
	900	1000	1100	1200
1. 赤铁矿	12.9	16.2	18.6	20.4
2. 磁铁矿	0	0.6	1.3	3.0
3. 焙烧时, 已氧化成赤铁矿的磁铁矿	0.8	0.9	1.6	2.8

(注) 焙烧时间, 30 分钟; 团压压力, 500 公斤/厘米²;
物料粒度: —0.05 毫米。

根据收缩曲线计算的结果，焙烧过程的活化能如下：

物 料	团压压力 (公斤/厘米 ²)	粒 度 (毫米)	活 化 能 (仟卡/克分子)
1. 赤铁矿	500	-0.068	14
2. 磁铁矿	1000	-0.05	90
3. 氧化成赤铁矿 的磁铁矿	1000	-0.05	12

磁铁矿团块焙烧的特点是具有很大的活化能(90 仟卡/克分子)，这个数值接近于铁氧化物中铁离子扩散的活化能数值(112仟卡/克分子)。由于收缩有差别和焙烧时的活化能有差别，可以认为，赤铁矿和磁铁矿(球团)*的焙烧固结具有不同的机理：磁铁矿(球团)*焙烧固结时发生物质迁移是由于体积扩散(объемная диффузия)的结果，而赤铁矿焙烧固结时则是扩散—粘性流动(диффузионно—вязкое течение)。

焙烧后团块试样的收缩主要是由于其孔隙率的降低，团块的孔隙率可按下式计算：

$$\Pi = \frac{\rho_{真} - \rho_{视}}{\rho_{真}} \cdot 100\%$$

式中 $\rho_{真}$ —物料细磨后的真比重

$\rho_{视}$ —团块的视比重

提高焙烧温度使焙烧过程强化后，引起孔隙率有规律的降低(图1)，然而，焙烧后团块的强度不仅决定于孔隙率的总数，而更具有重要意义的是团块的结构，即团块试样中微孔的分布和孔隙的有效平均尺寸(图2)。

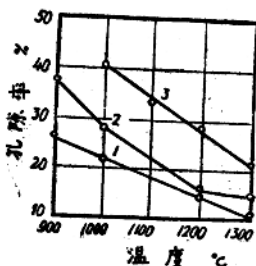


图1 孔隙率和温度的关系。

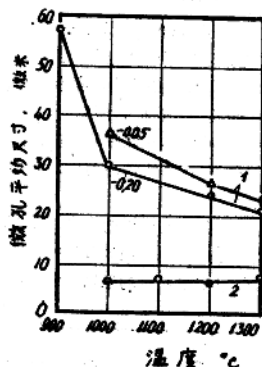


图2 各种焙烧温度下孔隙平均尺寸的变化
(焙烧时间为60分钟。)

- 1——焙烧时氧化成赤铁矿的磁铁矿(—0.05毫米；
2000 公斤/厘米²，60分钟)
2——在中性气氛中焙烧的磁铁矿(—0.05毫米；
2000 公斤/厘米²，60分钟)
3——赤铁矿(—0.100毫米；200公斤/厘米²，60分钟)

- 1——中性气氛中焙烧的磁铁矿(粒度为
—0.05毫米和—0.20毫米；压力为
2000 公斤/厘米²)
2——赤铁矿(粒度为—0.10毫米；压力为
200 公斤/厘米²)

() *括号内为译者注。

焙烧过程主要的总指标是成品团块试样的强度，该强度按试样单位面积所受的力来计算，它和焙烧温度的关系示于图3。

提高焙烧温度使结构参数发生变化：即孔隙率、平均微孔尺寸、晶粒结晶尺寸、液相数量。显然，其中孔隙率的影响最大（图4）。

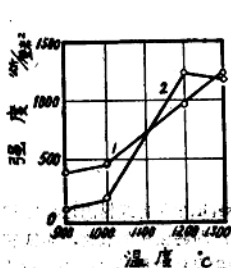


图3 团块抗压强度与焙烧温度的关系

（—0.50毫米；2000公斤/厘米²；60分钟） 1——氧化了的磁铁矿 2——在中性气氛中焙烧的磁铁矿

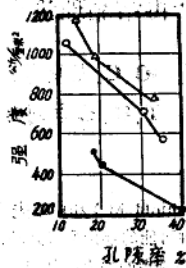


图4 孔隙率对其强度的影响

（—0.100毫米；2000公斤/厘米²；焙烧时氧化成赤铁矿的磁铁矿）

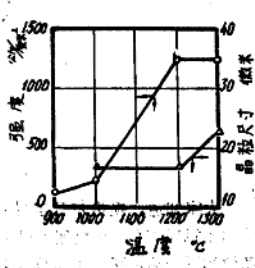


图5 温度对强度及磁铁矿晶粒尺寸的影响

（中性气氛中焙烧的磁铁矿，—0.05毫米；2000公斤/厘米²）

从图5可以比较一下温度对晶粒大小和对其强度的影响，当温度从900℃升高至1300℃时，晶粒的长大是不显著的，而这时其强度却增加到6倍。

总的说来，赤铁矿焙烧、磁铁矿焙烧和在中性及氧化性气氛中焙烧的膨胀研究表明，在1300℃时，赤铁矿的收缩率最大（与其余物料相比为22%比6%），磁铁矿焙烧时，其活化能最大（与其余物料相比为90千卡/克分子比10~14千卡/克分子）。磁铁矿团块和赤铁矿团块的固结是依照不相同的过程进行的（赤铁矿团块多半是依靠扩散—粘性流动，而磁铁矿则依靠体积扩散）。

磁铁矿焙烧时，微孔的平均尺寸等于50微米，而赤铁矿的则为8微米，磁铁矿团块焙烧后的强度与氧化了的磁铁矿团块焙烧后的强度相等（在1200℃时1000公斤/厘米²左右）。至于磁铁矿焙烧性能不良的流行见解是毫无根据的。

磁铁矿颗粒的再结晶程度，在焙烧时是不显著的，当温度由1000℃升到1300℃时，其晶粒的尺寸平均由18微米增加到25微米。磁铁矿团块的强度决定于磁铁矿颗粒的晶相粘结。

黄天正 译自《Изв.ВУЗОВ.Черная Металлургия 1971.№09》 李思母校

球团矿固结机理

(评“再结晶理论”)

[苏] Ю.С.尤斯芬

T.H.巴吉列维奇

大家知道, 提格尔德舍尔德 (Tighe, M.) 和卓塞夫 (Joseph, T.) 曾经提出过球团矿的固结机理^[1,2], 该机理系以下列四种可能的连接型式为基础的: 即磁铁矿的氧化, 赤铁矿晶粒的再结晶, 磁铁矿晶粒的再结晶和渣相的形成。其中, 赤铁矿晶粒的再结晶过程, 被认为是保证球团矿达到最高强度而具有决定性作用的一种固结型式。

这种观点, 无论在国外及苏联, 均获得广泛的应用, 长时期来被认为是唯一正确的, 并且被引用在各种科学文献和教科书中^[3-5]。可是, 在我们看来, 这样的机理, 不可能根据它来对球团矿进行定量的评价, 而且它本身也缺乏严密的科学论据。

将它分析一下, 也可发现有一系列的问题。例如: 氧化过程究竟如何影响到球团矿的强度? 为什么熔融物的生成 (“渣相连接”) 对球团矿的固结是主要的, 而对球团矿则不起显著的作用呢? 等等。此外, 所提出的机理也不可能解释许多实际已经出现了的规律性, 例如: 磁铁矿球团的固结和赤铁矿球团的固结在本质上的差别, 赤铁矿再结晶和磁铁矿再结晶的不同效果等。赤铁矿晶粒大小与球团矿强度之间的关系也不能从数量上得到证实。

莫斯科钢和合金学院通过大量实际的资料 (观察了国内外 200 多张工业性和实验室的球团矿光片, 并且鉴定了 60 多万个晶粒) 用实验的方法检验了这个机理^[6], 证明赤铁矿晶粒的再结晶是很有限的, 并且实际上也并不伴随着发生球团矿的固结过程。

进一步的研究表明, 在实际的条件下, 卓塞夫关于晶粒的大小会长大 10~20 倍的说法^[2], 不仅在实践上达不到, 而且在理论上也是不可能的。

过去的许多学者, 没有注意到孔隙率对晶粒长大的可能性在本质上的影响。我们把斯密思 (Smith, C.S.) 公式^[7]变换一下, 可以近似算出主要矿物晶粒临界平均尺寸:

$$D_{\text{к}} = \frac{d_{\text{ш}} \cdot V_{\text{ш}}' + d_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}}'}{V_{\text{ш}} + V_{\text{п}}}$$

式中

$d_{\text{ш}}, d_{\text{п}}$ ——夹杂物 (有脉石) 的晶粒平均尺寸, 微孔平均尺寸;

$V_{\text{ш}}, V_{\text{п}}$ ——夹杂物的体积分率 (доля), 微孔的体积分率;

$V_{\text{ш}}', V_{\text{п}}'$ ——夹杂物和微孔各在其总和中的分率。

在含铁量高的铁矿球团中, 微孔部份显著地大于脉石部份, 同时, 微孔的平均尺寸通常

小于晶粒尺寸。按格席晋 (Р.Е. Гегузин) 的意见^[7], 微孔阻碍再结晶的界面迁移 (сместение границ), 其原因在于沿气孔表面的界面迁移和界面延伸有关, 即和界面能的增加有关。

计算赤铁矿晶粒最大平均尺寸与孔隙率的关系表明, 晶粒的明显增长是在球团的孔隙率达到一定的数值时, 即“临界值”时开始, 例如, 当微孔的平均尺寸等于晶粒直径的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ 、孔隙率降到 20~25% 时, 可以指望晶粒开始长大。

附带说一句, 上述见解对于固相反应过程都是正确的。

考查球团固结过程表明, 球团固结过程其实是金属粉末烧结过程的一些复杂的变形。

其所以比较复杂, 是由于在其固结过程中有下列基本的差别: 即具有多元化合物体系, 分解出大量的气体 ($2.5 \sim 3$ 米³/公斤); 进行不均匀的氧化反应和固相化学反应; 在焙烧时, 有生成不同成份和性质的若干液相的可能性; 晶粒的塑性较低; 以及焙烧时间较短。

这些特点的存在, 不允许我们在球团焙烧过程中, 完全照搬金属粉末烧结过程的《典型的》规律, 在球团中热力学的平衡是否被打破, 这不仅决定于表面分散性 (Разность поверхности)、显微畸变 (микронскажение) 和浓度梯度, 而且也决定于化学反应的方向。因此, 降低体系自由能, 由于反应进行的结果, 同时产生比其他因素影响更大的物质流。因而, 当在另一参数下系统不平衡时, 在这一参数下, 系统就趋于平衡, 成为能量守恒, 所以在球团焙烧的条件下就难于用铁矿粉末烧结的理论和实验分析。

可是, 研究了烧结*的理论基础和现有的实验资料^[8,9]后, 可以作出如下结论: 烧结的主要机理是体积扩散, 而球团矿焙烧的主要机理是二个烧结阶段的组合。

在第一阶段, 其特征是由于烧结, 各个粒子互相粘在一起, 他们之间的接触面积随着增加, 同时孔隙率也减小, 可是, 全部粒子仍然还是单个的, 结构也还是孤立的, 在许多情况下, 它们被裂缝和纵向孔隙所包围, 就动力学的观点来说, 在这一阶段, 由于接触的周围有着特殊的几何形状, 对晶粒的长大是不利的, 因为晶粒的边界长度相应的增大了。

在第二阶段, 接触角变钝, 并且再结晶过程有一定的发展, 容积孔隙率没有降低, 随着微孔平均直径增大而微孔表面积减少时, 容积孔隙率保持不变的“内烧结”过程成为优势。

这样, 再结晶过程既不是单独的, 也不是最重要的过程, 只不过是烧结的结果, 同时, 其开始的温度比金属粉末烧结的开始温度高些, 达到绝对熔化温度的 80~90%。

液相的形成, 从本质上强化了焙烧过程, 以及在溶解—沉淀过程中引起晶粒长大有一定的活性, 其机理在于: 细的粒子 (溶解度较高) 逐渐地变小; 溶解在液相中, 而粗的粒子, 由于其溶解度较小, 则相反, 沉积在过饱和的溶质中, 并且引起其继续长大。

这样, 产生一定量的熔融物, 毫无疑问, 应该对焙烧的速度和焙烧效果有积极的影响, 可见, 轻视《渣键》的作用是毫无根据的。

解释球团焙烧机理, 正如微粒粉末烧结的机理一样, 可以利用实际上已发现的一系列液动成型规律来阐明。例如: 利用比较粗的物料不仅对提高生球质量是有利的, 而且对于提高焙烧速度也是有利的。按海林格 (Херринг) 的意见^[10], 焙烧时, 对半径为 R_1 和 R_2 的颗粒达到一定粘结程度所必需的时间 t_1 和 t_2 取决于颗粒半径, 可用下式计算:

式中:

K ——系数, 与焙烧机理有关, 对于体积扩散, 等于 3.0。

*注: 指金属粉末烧结——译者

由此可见,当铁矿物颗粒尺寸增加一倍时(如,由50微米增大到100微米),对于达到同样烧结程度所必需的焙烧时间则要增加到八倍,如果焙烧时间仍保持以前一样不变,则球团强度会变坏。

参 考 文 献

1. Tigerschiöld. M. Journal of the Iron and steel Institute, 1954, V, 177, №1, p 13~14.
2. Joseph. T. Blast Furnace and Steel Plant, 1955, V. 43, № 6~7.
3. Мейер. К и др. Черные металлы (Перед. с нем. Stahl u. Eisen). 1967, №11, с. 12~18.
4. Smrek, k. et al. sb. Práci Vyzkumn. ústavu. Železoruđn. doľu a hrudkoven n. p. Ejrovice. 1964, №4.
5. Гончаров Б. Ф. и Соломахин И. С. Производство чугуна. Изв-во «Металлургия» 1965.
6. Юсфин Ю. С. Базилевич Т. Н. и Савицкая Л. Ю. Известия вузов. Черная Металлургия, 1968, №9, с. 31~35.
7. Гегузин Я. Е. Физика спекания, Изв-во «Наука», 1964.
8. Colbe. R. L. Journal of the American Ceramic Society, 1958, v. 41, №2, p. 55~62.
9. Джонс. В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание (пер. с англ.), Изд-во «Мир», 1965.

黄天正译自《Сталь》1969年. №9. 778~779 蔡汝卓 校

(上接15页)

2. Похвиснев А. Н., Савельев Т. А. Сталь, 1958, №2, С. 105.
3. Хоклев Д. Г., Ручкин И. Е. В об. трудов института «Уралмеханобр», вып. 12, 1965, С. 130.
4. Эдстрем И. О. Проблемы современной металлургии, 1958, №1, С. 3.
5. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Металлургиздат, 1962.
6. Берман Ю. А., Ковалев В. Н. Обогащение руд, 1965, №4.
7. Ровенский И. И. В об. трудов НТО Ч. М, Т. ХХII. Металлургиздат, 1959, С. 364.

管友霞译自《ИЗВ. ВУЗ. Черная Металлургия》1971,
№1, 31~34. 顾昌悌 马家源 校

磁铁精矿球团的氧化动力学

[苏] IO. A. 别尔曼等

在高炉原料的准备上铁矿石精矿的造球占有益重要的地位^[1]。在焙烧固结过程中力求磁铁矿达到最大程度的氧化。

分析氧化程度不同的球团磨片后表明,在实际的高温焙烧条件下,磁铁矿球团的氧化以同心面的形式在氧化与未氧化物料之间出现甚为明显的界线的情况下进行的。

根据实验数据^[2-4]的分析可以认为,当可观察到的反应速度被氧向氧化表面扩散所限制时,高温下球团氧化动力学可足够精确地用扩散反应方程加以描述。在此情况下球团的氧化率 ψ 为

$$\psi = 1 - \frac{\delta_{\text{FeO}}^{\circ} \cdot \delta_{\text{Fe}}^{\circ}}{\delta_{\text{FeO}}^{\circ} \cdot \delta_{\text{Fe}}^{\circ}} \quad (1)$$

($\delta_{\text{Fe}}^{\circ}$ 、 $\delta_{\text{FeO}}^{\circ}$ 、 $\delta_{\text{Fe}}^{\circ}$ 、 $\delta_{\text{FeO}}^{\circ}$ —分别为开始时和观察瞬时铁和氧化亚铁的含量), ψ 与过程进行时间 τ 有关,其方程式为

$$\frac{1}{2} \left(1 - (1 - \psi)^{\frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{3} \psi = K\tau \quad (2)$$

式中 K —比例系数。

根据反应表面上氧的平衡和球团中参与反应的物料在球层内均衡扩散*方程式的解,可以求出

$$K = \frac{12.861D(C_0 - C_F)}{\rho \delta_{\text{FeO}}^{\circ} R^2} \quad (3)$$

式中 D —球团中氧的有效扩散系数;

C_0 —球团周围气体介质中氧的浓度;

C_F —取决于 Fe_3O_4 扩散的氧的平衡浓度^[5];

ρ —球团密度;

R —球团半径;

12.861—数字系数,等于氧气密度 [1.429] 与 Fe_3O_4 氧化反应的化学计算消耗系数的乘积^[7]。

为了按方程式(2)和(3)计算球团的等浓度氧化过程,仅需要用试验测定扩散系数 D ,因其他数值的确定并不困难。扩

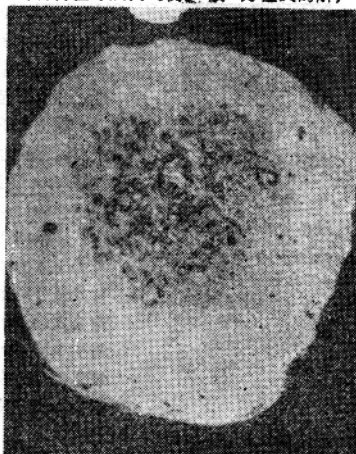


图1 球团局部氧化的磨片

*编者注:即沿扩散方向氧的浓度梯度是均匀的。

散系数的值一般不能通过已知数的分析来表示。

在选矿研究院用古勃金选矿厂（库尔斯克磁力异常区）的铁精矿制成的球团进行试验，而在索科洛夫—萨尔巴依采选公司的中心试验室用本厂精矿制成的球团进行试验。

往索科洛夫—萨尔巴依采选公司的球团物料中加入了数量为 5.3—8% 的石灰石使碱度 ($\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$) 等于 0.9、1.2 和 1.4，并加入 0.9% 的皂土。库尔斯克磁力异常区的精矿球团中未加入添加剂。

在直径为 600 毫米的实验元筒内进行物料造球。成球后生球在烘箱内烘干至固定的重量，这样得到的球团具有以下主要性能：

铁 精 矿	球团物料中含量, %				碱 度	球 径 毫 米	球团密度 公斤/米 ³
	FeS	FeO	CaO	SiO ₂			
古勃金厂	—	28.41	—	—	—	13	3740
索科洛夫—萨尔巴依采选公司	62.4	25.97	4.0	4.47	0.9	14	3420
	60.6	25.56	5.07	4.23	1.2	14	3170
	59.6	24.69	5.92	4.23	1.4	14	3040

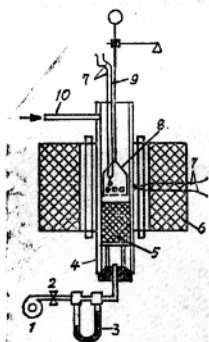


图 2 试验装置图

1—鼓风机；2—阀门；3—流量计；4—石英管；5—粘土填料；6—硅碳棒电炉；7—热电偶；8—装有球团的尼赫罗镍铬合金吊兰；9—吊兰的吊杆；10—供入氮气的接管

焙烧球团用的装置的示意图见图 2。在恒温条件下，在加热到一定温度的空气流（21% O₂）中进行焙烧。为避免在骤然加热时形成裂纹，将吊兰内的球团放在电炉内温度为 400—500°C 的区域予热 1—2 分钟，然后将吊兰放下至给定焙烧温度的电炉区域内。如系统试验所指出，在 1—2 分钟内热透（t=500°C）时球团的氧化是微乎其微的。

在焙烧区内保持一定时间后，吊兰提升至炉子上部，使球团在氮气流中冷却。焙烧后确定球团中铁与氧化亚铁的含量，并按方程（1）计算氧化率。

在选矿研究院的试验中反应管内的空气流速为 10.5 厘米/秒，而在索科洛夫—萨尔巴依采选公司的试验中为 38.6 厘米/秒（达到标准条件）。系统试验与文献^[4]的资料表明，在这样的气流速度下表面扩散阻力可以忽略不计。

库尔斯克磁力异常区与索科洛夫—萨尔巴依采选公司碱度为 1.4 的球团的试验结果见图 3。对于索科洛夫—萨尔巴依采选公司碱度为 0.9 和 1.2 的球团得到类似的图形。与理论公式（2）相符在所绘的坐标中氧化曲线变成直线，该直线与横坐标在 $\tau_0 = 2-2.5$ 分这一段上相交。很明显，这说明氧化化学反应的进行时间的存在是与球团的加热和形成反应活性中心有关系的^[6]。

直线倾斜角的正切为

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{60 \cdot 12.861 C \cdot D}{\gamma_8^{\circ} \text{FeO} R^3} \quad (4)$$

用公式(4)计算出球团在不同焙烧温度下有效扩散系数的值(图4)。

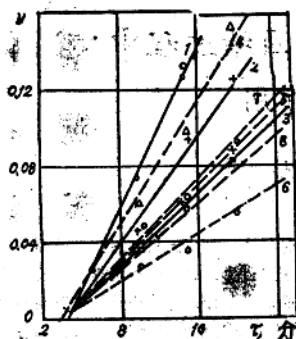


图3 在 $y = \frac{1}{2} [1 - (1 - \psi)^{\frac{1}{2}}] - \frac{1}{3} \psi$ 和 τ

坐标中球团的氧化曲线:

1—3—库尔斯克磁力异常区精矿, 温度分别为 1200、1000、800℃; 4—8—索科洛夫—萨尔巴依采选公司精矿, 温度分别为 1200、1000、900、1300 和 1350℃。坐标点根据试验资料算出

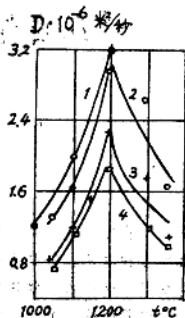


图4 球团中氧的有效扩散系数与焙烧温度的关系:

1—库尔斯克磁力异常区球团(非自熔性); 2—4—索科洛夫—萨尔巴依采选公司碱度分别为 0.9、1.2、1.4 的球团

在所进行的试验中有效扩散系数的值在 0.5×10^{-8} 到 3.2×10^{-8} 米²/秒之间变化。安德斯脱来姆根据马姆贝里耶特(瑞典)矿山的精矿制成的球团在 $t = 1230^\circ\text{C}$ 时氧化所进行的试验^[4], 得到的有效扩散系数值 $D = 4.65 \times 10^{-8}$ 米²/秒, 也就是比本试验稍高, 但属同一数量级。

当 $t < 1100 - 1200^\circ\text{C}$ 时, 随温度的提高 D 值也增加, 但温度再高时 D 值又降低(图3)。其他一些研究者(如文献^[7])也提出了这一点, 随温度的升高氧化反应速度的变化与上述情况相似, 但无足够依据。

在 $1100 - 1200^\circ\text{C}$ 以上时扩散系数随着温度上升而减少, 可以用精矿的烧结来解释, 也可以用球团部分地熔化并封闭了氧向氧化表面进行转移所经过的气孔来解释。根据试验资料, 相应于最大扩散系数的温度随着球团碱度的增加有某些下降。

根据试验结果得到的扩散系数值, 应用基本公式(2)可以计算球团氧化到一定程度所必须的时间, 而氧化程度跟焙烧条件和球团参数有关。

参 考 文 献

1. Хараш Л. И., Шитов И. С. и др. В сб. трудов и научно-технической сессии института «Механобр», Т. 11. Изд-во «Металлургия», 1966.

(下转12页)