

铁矿粉烧结

冶金工业出版社

铁 矿 粉 烧 结

[西德] F.卡佩尔 H.文德博恩 著

杨永宜 郭巧玲 刘宗林 译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书译自西德一九七三年出版的鲁奇公司 烧结 研究室主任 弗雷德·卡佩尔 (FRED CAPPEL) 和赫尔穆特·文德博恩 (HELMUT WENDEBORN) 合著的《铁矿粉烧结》(Sintern Von Eisenerzen) 一书。书中总结了作者近四十年来在铁矿粉 烧结 方面所做的大量试验研究成果, 归纳了世界一些国家烧结厂的操作经验, 对烧结过程的物理化学原理和热工学原理、烧结矿的岩矿相结构进行了探讨和研究, 提出了改善烧结矿质量的措施。此外, 对七十年代初期的烧结厂的装备水平和烧结厂自动化问题也作了介绍。可供从事烧结生产、科研人员和大专院校有关专业师生参考。

本书由赵德同志审校。翻译过程中对原书中的非技术性内容作了一些删节。

铁 矿 粉 烧 结

(西德) F. 卡佩尔 H. 文德博恩 著

杨永宜 郭巧玲 刘宗林 译

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 8 1/2 字数 223 千字

1979年3月第一版 1979年3月第一次印刷

印数 00,001~6,400 册

统一书号: 15062·3397 定价 (科三) 0.82元

目 录

第一章 概述	1
1.1 什么叫“烧结”	1
1.2 烧结法的作用	1
1.2.1 通过烧结提高某些矿石的含铁量	2
1.2.2 矿石粒度范围的均一化和粉矿部分的烧结	2
1.3 烧结法的发展和推广	9
1.3.1 烧结矿的发展	9
1.3.2 烧结矿在各国的推广	13
第二章 烧结过程	21
2.1 热力学过程	21
2.1.1 烧结过程中的料层温度分布	21
2.1.2 燃烧和传热	33
2.1.3 一氧化碳的产生	34
2.1.4 单位空气需要量	40
2.1.5 透气性	45
2.1.6 热平衡	46
2.2 物理—化学过程	49
2.2.1 水分的蒸发	49
2.2.2 焙烧	50
2.2.3 固相反应	52
2.2.4 还原和分解	52
2.2.5 造渣	55
2.2.6 再氧化和凝固	59
2.3 伴生元素的性质	59
第三章 原料	63
3.1 铁矿石和精矿	63
3.1.1 烧结生产使用的矿石	63
3.1.2 烧结生产对矿石性质的要求	65
3.2 厂内循环物料	79

3.3	熔剂	83
3.4	燃料	88
3.4.1	要求	89
3.4.2	燃料种类	89
3.4.3	燃料配比	92
3.4.4	燃料粒度	92
第四章	影响烧结过程的因素	93
4.1	返矿的影响	93
4.1.1	返矿平衡	94
4.1.2	返矿量对燃料量和料层厚度的影响	99
4.1.3	烧结生产率与返矿量	100
4.1.4	返矿量和烧结矿强度	107
4.1.5	烧结矿氧化度、还原性以及气孔度与返矿量的关系	110
4.1.6	热返矿的应用	115
4.2	混合料准备	120
4.2.1	混合	121
4.2.2	造球	121
4.2.3	加水	122
4.3	烧结机的布料	125
4.4	料层厚度	127
4.5	点火	131
4.6	负压的影响	132
4.6.1	空气耗量和烧结生产率与负压的关系	132
4.6.2	燃料消耗和烧结矿性质	135
4.6.3	负压对烧结矿生产费的影响	136
4.7	烧结矿从烧结机卸出后的处理	140
第五章	烧结矿的性质	144
5.1	机械强度和耐磨性	145
5.2	气孔度	146
5.3	氧化度	147
5.4	还原性	149
5.5	粒度组成、堆比重及软化性能	153
第六章	其它烧结方法	162

6.1	双层烧结	162
6.2	混合燃烧烧结法	163
6.3	热风烧结	167
6.4	氯化烧结	168
6.5	生产铁酸钙烧结矿	173
6.6	生产小球烧结矿	180
6.7	鼓风烧结	180
6.8	烧结机上冷却烧结矿	183
6.8.1	冷却过程	183
6.8.2	烧结机的设计	185
6.8.3	烧结矿的性质	187
6.8.4	生产费用	189
第七章 工艺设备		191
7.1	烧结厂的物料流程	191
7.2	主要单体设备	196
7.2.1	烧结机	196
7.2.2	混合和造球设备	200
7.2.3	给料设备	200
7.2.4	点火器	201
7.2.5	齿辊破碎机	204
7.2.6	废气和风机	205
7.2.7	烧结矿筛分	213
7.2.8	烧结矿冷却	217
7.2.9	废气除尘与环境除尘	220
7.3	烧结矿生产费用	227
第八章 烧结厂自动化		233
8.1	自动化的任务	233
8.2	烧结机速度控制	236
8.3	料流的控制	238
8.4	料量控制	239
8.5	给水量控制	241
8.6	点火器的控制	243
8.7	燃料量的自动调节	243

8.8 过程控制计算机的应用.....	245
8.8.1 烧结模型基础.....	245
8.8.2 步进式计算机.....	249
8.8.3 物理学模型.....	250
8.8.4 统计学模型.....	251
8.8.5 动力学模型.....	253
8.8.6 动力学模型的继续发展.....	258
8.8.7 过程计算机的其它任务.....	260
8.8.8 过程计算机安装的设计方案.....	262
参考文献	264

第一章 概 述

1.1 什么叫“烧结”

所谓“烧结”就是粉状料和细粒料在不完全熔化的条件下，或者说不允许整个原料都同时呈液相的条件下（物料处在熔化温度下的时间很短）烧结在一起。细粒料的固结主要靠固相扩散反应，以及颗粒表面软化，局部熔化和造渣。

在粉末冶金中，粉料粘结成型靠固相扩散反应，也称这一过程为干烧结。本书中叙述钢铁工业的粉矿和精矿粉烧结，扩散粘结仅起次要作用，其固结主要靠液相的产生。因此，称为熔化烧结。除特殊的烧结方法以外，碳和硫在通入料层的空气中燃烧，产生反应热，故也称为氧化烧结〔1〕。球团生产与烧结生产不同，细磨的矿粉或精矿粉造成大小相近的球团，经高温燃烧气体焙烧固结。球团的固结主要靠颗粒长大、结晶转化和渣的形成。因为这一过程一般认为是烧结反应，因此，球团矿有时也叫做球团烧结矿。“烧结”这个名词因此用来表示球团固结要比表示主要靠熔化使矿粉熔结在一起的烧结方法要更好一些。

1.2 烧结法的作用

为了保证料柱透气性良好，高炉要求炉料粒度均匀，粉末少，机械强度高。为了降低高炉焦比，要求含铁料还原性好、品位高。

这些要求只有通过含铁原料的预处理来达到。贫矿必须进行选矿，可以直接入炉冶炼的富矿，也要经过破碎和筛分，使粒度均匀。选别后得到的精矿粉、天然富矿粉和经破碎产生的粉矿，必须进行烧结。含二氧化碳、结晶水和水分较多的矿石，往往经破碎后，进行烧结，以便去除挥发成分，使铁富集。难还原的矿石，或者还原期间容易碎裂，或体积膨胀的矿石，经过烧结或造球焙烧，变成还原性良好和稳定性高的炉料。个别情况下，也

可以经烧结除去矿石中的有害元素，如硫。钢铁厂的循环物料，如高炉灰、轧钢皮、炼钢厂的粉尘，都可以用来烧结，以便回收利用。高炉造渣所需要的熔剂，也可加到烧结料中，这样在矿石入炉以前，水分和烧损成分被除掉，高炉炉料组成成分减少，烧结矿性质也得到改善。

因此，烧结法不仅能使粉矿造块，还对高炉原料起着火法预处理的作用。

关于通过烧结改善矿石的还原性、厂内循环物料的处理，以及烧结生产中使用熔剂的问题，将在有关章节中叙述。至于通过烧结富集矿石的可能性，矿石粒度均匀的必要性，以及回收粉料的造块问题，将在下面阐述。

1.2.1 通过烧结提高某些矿石的含铁量

通过烧结去掉某些矿石中的水分和烧损成分，达到富集矿石含铁量的作用，如图1所示。该图表示了各种矿石中有待还原的金属、有待分离的氧、造渣物、水分、结晶水和二氧化碳与炉料产铁率间的关系〔2〕。该图指出，在产铁率较低的情况下，高炉炉料中含有大量水分以及烧损成分。从图中还可以直接读出经过烧结提高的产铁率数值，如箭头1和2所示。

热耗和焦比与炉料产铁率和间接还原间的关系如图2所示。从图看出，在产铁率较低时，高炉的热耗相当高。在这种条件下，矿石不入高炉而在其它竖炉中焙烧后，焦比就可以大幅度降低。例如，在产铁率为28%，间接还原度不变的条件下，焦比可以降低到400公斤/吨生铁（箭头1所示）。

有些工厂，只使用我国开采的矿石冶炼，降低焦比的途径就是将这种矿石全部破碎到适于烧结的粒度，然后进行烧结。

在钢铁厂位于矿山附近时，可以将开采的某种贫矿进行烧结，这样既解决选矿方面无法经济选别的问题，又能与昂贵的进口富矿竞争。鲕褐铁矿乃是这类贫矿中的一种。

1.2.2 矿石粒度范围的均一化和粉矿部分的烧结

在炉料产铁率较高时，烧结可以改善高炉炉料的透气性和还

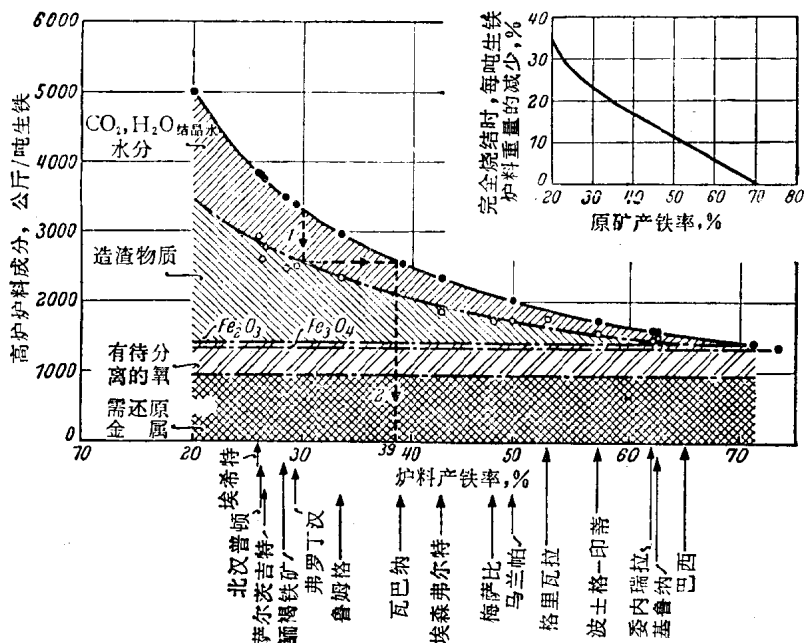
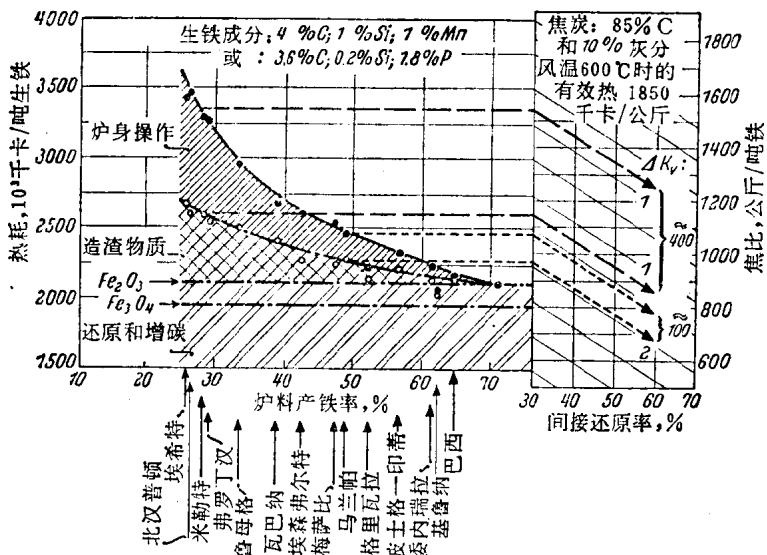


图 1 不同产铁率的各种矿石⁽²⁾



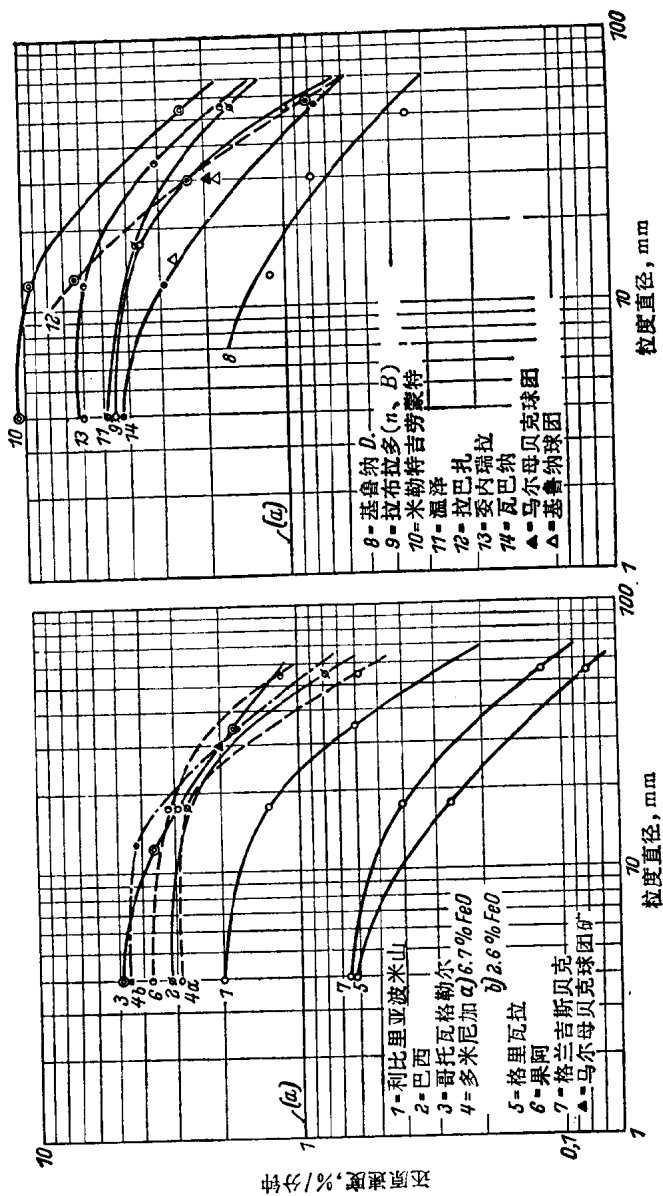


图 3 矿石的粒度与还原速度间的关系⁽⁵⁾⁽³⁾, (a) 理想的最低值

表 1 矿 石 试 样 的 化 学 成 分, %

矿 石	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	P
利比亚 波米山 (Bomi Hill)	65.5	19.5	<0.1	3.5 -	0.046
巴 西 里欧 (Brasil Rio)	65.6	2.8	<0.1	2.2	0.048
哥托瓦格勒尔 (Coto Wagner)	51.3	16.0	2.1	10.4	0.59
多米尼加 <i>a</i>	63.1	6.7	1.1	5.3	0.091
<i>b</i>	64.6	2.6	<0.1	4.6	0.051
果阿 (Goa)	57.6	2.5	<0.1	3.47	0.047
格里瓦拉 (Gellivara)	60.1	25.1	3.3	5.9	0.93
格兰吉斯克 (Grangesberg)	57.0	24.5	6.2	5.7	1.7
马尔姆贝瓦 (球团) (Malmerget)	68.8	1.1	0.2	0.4	0.014
基鲁纳 D (Kiruna)	59.0	25.0	5.5	4.3	1.59
拉布拉多 n.B (Labrador)	59.5	0.5	0.2	7.1	0.07
米勒特 吉劳蒙特 (Minette Giraumont)	35.2	9.2	13.2	8.4	0.62
刚 果 温泽 (Ouenza)	55.4	0.6	4.4	3.1	0.010
拉巴札 (Raposa)	49.6	0.7	0	9.7	0.92
委内瑞拉	62.2	0.4	0.1	2.9	0.12
瓦巴纳 (Wabana)	52.2	12.5	2.5	12.4	0.80

原性。透气性良好的前提是炉料粒度均匀。矿石粒度均匀的要求只有通过破碎和分级才能达到。但是，必须考虑到矿石破碎费用增高，并且破碎到较小粒度时，粉末也会增加。

在高炉炉料的间接还原区域，也就是 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 之间，矿石的还原速度应尽可能大^[3]。还原速度又与矿石粒度的大小有关^{[4][5]}，因此，对矿石粒度上限有一定的要求。还原速度与矿石粒度间的关系如图3所示。试验矿样的化学成分如表1所示。由图3可知，矿石粒度较小时，还原速度跟矿石粒度大小无关。在粒度较大时，随着矿石粒度增大，还原速度愈来愈小。

不同的矿石，其还原速度也不同。提高氧的分解速度对还原速度很小的致密磁铁矿更为重要。据哈·比恩鲍姆(H. Birnbaum)和耳·冯·伯格达迪(L. von Bogdandy)文章^[5]，在还原度为40%， H_2 作还原剂，温度为 800°C 的条件下，以还原速度达到约1%还原度/分做为标准，赤铁矿要达到这一还原速度，只要破碎到50~70毫米就可以了；而磁铁矿要达到同样的还原速度，则要求破碎到20毫米，甚至更小。

图4表示矿石经过不同分级，以及还原性不同的几种矿石(基鲁纳D、委内瑞拉、智利)对焦比的影响。图3指出基鲁纳D和委内瑞拉矿石在一定粒度下的还原速度。在同样粒度条件下，智利矿石的还原速度分别为：粒度为8毫米时，还原速度为3.1%/分；粒度为15毫米时，还原速度为2.5%/分；粒度为50毫米时，还原速度为0.85%/分；而粒度为70毫米时，还原速度则只有0.5%/分^[3]。

限制粒度下限的途径，就是采取筛分措施。这一点可以通过对料层中的气流性质的试验研究得到证明。料层粒度均匀时，气流速度以流态化点为上限。图5说明开始流态化的极限速度与粒度大小的关系。当高炉中的最大气流速度为3米/秒时，仍不超过稳定性的极限。当然，这只适用于粒度均匀和炉料透气性均匀的场合。

在炉料粒度不均匀的条件下，小颗粒填充在大颗粒间隙之

间，因而恶化料柱透气性。图 6 指出，炉料粒度愈不均匀，则空隙度和透气的有效断面愈小。在粉末为30~40%时，空隙度最小。炉料中的粉末集中在高炉的某一部位，则该处的透气性就最坏。

试 样	品位, Fe%	矿石类型	粒 度 毫米	工 厂
a_1	36.9	基鲁纳D	20~60	奥伯豪森 (Oberhausen)
a_2	33.7	基鲁纳D	6~20	
b_1	38.0	基鲁纳D	8~40	胡肯根 (Huckingen)
b_2	37.5	委内瑞拉	12~70	
c_1	42.0	智 利	15~70	胡肯根
c_2	45.0	智 利	8~50	

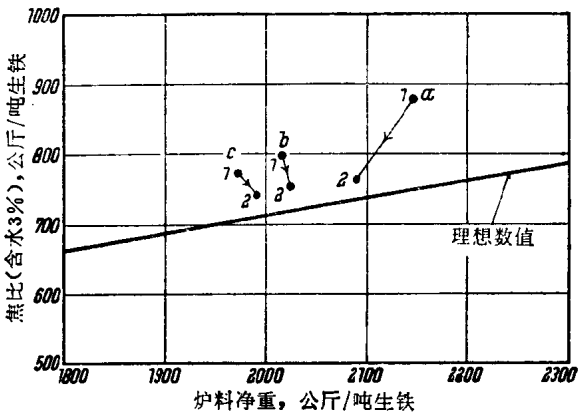


图 4 以炉料净重表示的还原性与焦比的关系

炉料粒度不均匀时，即便在流态化点以下，也会出现喷射现象，造成高炉行程破坏。管道一形成，引起炉料循环运动，以致无法调节炉况。

粉末筛分极限的确定，必须保证完全去掉筛下物。粒度在 5 毫米时，往往很难严格地跟粉末分开，因此，筛板的筛孔一般为 6~12毫米。但是，高炉炉料粒度下限即便为 3 毫米，仍能够达到良好的料柱透气性。这样产生的粉矿用来生产烧结矿，如前所

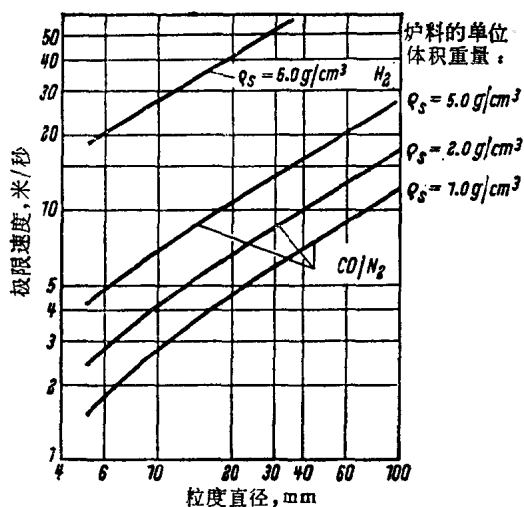


图 5 料层稳定性极限。流态化点与粒度大小的关系 (800°C , 1 大气压, 粒度均匀性 $\varepsilon = 0.4$) ⁽³⁾

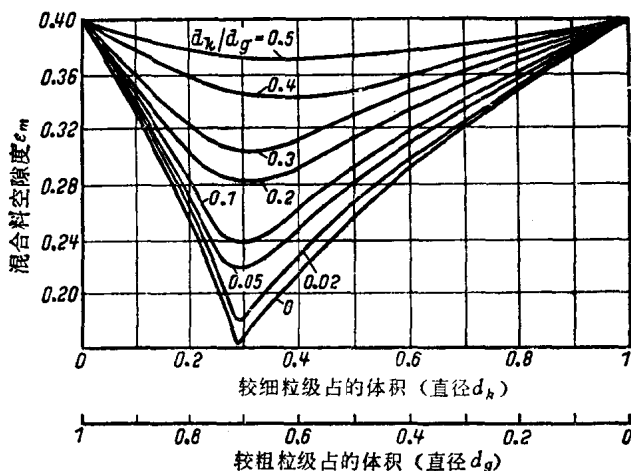


图 6 两种粒度混合料的空隙度与不同粒度组成比例间的关系 ⁽⁶⁾

述，对烧结矿也应有粒度上限要求和筛尽粉末的要求。为满足这些要求所采取的措施，将在以后详述。

关于炉料中含有粉末对高炉行程的破坏，以及对高炉操作结果的影响，在很多文献中已作了记载。但是，似乎没有美国高炉首批冶炼球团矿的试验记载。

这些试验清楚地说明，粉末增加，生产率就降低。一九五〇年，美国阿姆柯钢铁公司阿希兰（Ashland）厂，使用了70%的球团矿（球团矿中含 <0.58 毫米粉末达14.9%）冶炼，但生铁产量没有增加。一年以后，从这种球团矿中只筛去 <0.58 毫米粉末4.3%，就使生产率大幅度提高〔7〕。

在俄亥俄州米德尔敦，属于阿姆柯公司的另一高炉随后冶炼球团矿的试验再次证明，要想达到最高的生产率，就必须筛去炉料中的粉末。一九五四年，球团矿中含粉末 <0.58 毫米占22%，生产率仅有稍许提高。一九五七年，只从球团矿中筛去 <0.58 毫米粉末6.2%，则显著地改善了生产指标，这类试验的几个重要指标的比较如表2所示〔7〕。

表 2 炉料中不同球团矿入炉比的冶炼试验〔7〕

年	球 团 矿 %	风 量 米 ³ /分	CO/CO ₂	干 焦 比 公斤/吨生铁	产 量 吨/天	高 炉 灰 公斤/吨生铁
1954	0	2270	2.16	834	1260	103.5
1954	33.4	2210	2.13	775	1282	190
1954	50.3	2275	2.09	752	1387	219.5
1954	67.8	2185	2.06	726	1365	277
1957	83.8	2860	2.05	699	1835	194

1.3 烧结法的发展和推广

1.3.1 烧结矿的发展

一八九七年，特·亨廷顿（T.Huntington）和弗·赫伯莱茵（F.Heberlein）申请了含硫铅矿焙烧反应的专利，这是烧结法最早的专利（德国专利95601）。此烧结是采用间歇作业的鼓风烧结法。使用烧结锅或吹炉作烧结设备，该设备的底部有篦条。操作过程开始以前，先在篦条上铺一层木炭。木炭点火以

后，人们一铲一铲地将烧结混合料撒到烧红的木炭上，同时鼓入空气以维持燃烧过程的进行，直至整个混合料完全烧结为止。通过炉体的倾翻，倒出烧结矿。烧结锅和吹炉的操作条件很恶劣，既有粉尘，又有大量的燃烧气体，严重地妨碍人们操作。

威·约布(W.Job)在本世纪初曾建议，将硫酸渣和粉矿与用作燃料的煤混合，采取鼓风方式进行烧结。约布发明的倾动式炉子在一九〇二年就申请了专利(德国专利137438)。因此，威·约布被认为是铁矿石烧结法的发明人。第一座约布式的倾动式炉子，于一九〇四年安装在比利时列日(Lüttich)的科克里尔(Cockerill)厂，用于烧结高炉灰。

一九〇五年，埃·约·札韦尔斯贝格(E.J.Savelsberg)首次应用亨廷顿—赫伯莱茵锅烧结铁矿石(德国专利210742)。

设在美因(Main)河畔的法兰克福城的冶金公司和五金银行拥有亨廷顿—赫伯莱茵、约布和札韦尔斯贝格专利，其有关技术部门负责设备制造。

由于亨廷顿法可以大幅度降低炼铅生产成本，因此，在本世纪初的二十年，几乎世界的所有铅厂都采用这种方法。至一九一二年，欧洲已有15台这样的设备投产，用于烧结硫酸渣和循环物料。例如：位于杜依斯堡(Duisburg)的里德海里舍(Niederrheinische)冶金厂，位于斯德丁(Stettin)的克拉弗特(Kraft)厂，位于上西里西亚(Oberschlesien)的弗里顿斯冶金厂和同勒尔玛尔克冶金厂(Friedens und Donnermarkhütte)，以及位于留培克(Lübeck)的炼铁厂。

阿·斯·德维格特(A.S.Dwight)和尔·耳·洛于特(R.L.Lloyd)在这个时候建议采用抽风烧结法。他们发明了连续作业的带式烧结机。这种烧结机就是人们所熟悉的德维格特—洛于特设备(Dwight—Lloyd设备)。斯利彭巴赫(Schlippenbach)男爵在一九〇九年申请了连续烧结铅矿石的环式机专利。

美国德维格特—洛于特公司和采矿公司负责推销德维格特—