



烧结球团学

傅菊英 姜涛 朱德庆 编

● 有色金属冶金丛书 ●

● 中南工业大学出版社 ●



烧结球团学

傅菊英 姜 涛 朱德庆 编

中南工业大学出版社

烧结球团学

傅菊英 姜涛 朱德庆 编

责任编辑：秦瑞卿

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本：850×1168 1/32 印张：13 字数：333千字

1996年2月第1版 1996年2月第1次印刷

印数：0001—1000

ISBN 7-81020-840-3/TD·041

定价：18.00元

本书如有印装质量问题，请直接与生产厂家联系解决

前 言

本书是根据矿物加工工程专业的教学计划和大纲的要求,在《烧结理论与工艺》及《团矿理论与实践》的基础上编写的。

本书系统论述了烧结球团造块方法的基本理论与工艺,同时对球团矿直接还原理论、压团理论、工艺与设备也作了介绍。主要内容有:烧结料层燃料燃烧与传热规律、烧结过程物理化学变化、烧结料层的气体力学、烧结过程成矿机理、烧结生产工艺、成球理论基础、球团矿焙烧理论基础及其生产工艺、球团矿直接还原、低温固结球团法及压团原理与工艺等。本书作矿物加工工程和钢铁冶金专业大学本科教材,也可作有关工程技术人员、有色冶金、化学工程和非金属材料专业学生的参考书。

本书由傅菊英任主编,参加编写本书有姜涛(第一章、第二章、第五章及第六章)、朱德庆(第三章、第四章、第十一章、第十二章及第十三章)、傅菊英(绪论、第七章至第十章)。由傅守澄教授、李思导教授审阅全书。在编写过程中得到了矿物工程系领导、烧结球团研究所同志及有关厂矿工程技术人员的大力支持和帮助,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中错误难免,恳请读者批评指正。

编者

1995. 9. 25

目 录

绪论	(1)
0.1 烧结球团的任务及其在国民经济中的应用	(1)
0.1.1 烧结球团基本概念	(1)
0.1.2 造块在工业生产中的应用	(2)
0.2 烧结球团法的发展	(3)
0.2.1 烧结法	(4)
0.2.2 球团法	(5)
0.2.3 压团法	(8)
0.3 烧结球团造块法分类	(10)
0.3.1 烧结球团造块法比较	(10)
0.3.2 烧结球团造块法分类	(11)
0.4 烧结球团原料	(13)
0.4.1 铁矿	(14)
0.4.2 锰矿	(17)
0.4.3 熔剂	(19)
0.4.4 工厂含铁杂料	(20)
0.4.5 燃料	(21)

第一篇 烧结原理与工艺

1 烧结过程燃料燃烧与传热规律	(27)
1.1 烧结料层燃料燃烧基本原理	(27)

1.1.1	固体燃料燃烧热力学	(27)
1.1.2	固体燃料燃烧动力学	(28)
1.2	烧结料层中燃烧带的特性分析	(30)
1.2.1	烧结过程燃烧带厚度的计算	(30)
1.2.2	燃烧带特性与燃烧废气组成	(32)
1.3	固体燃料特性及用量对烧结过程的影响	(36)
1.3.1	固体燃料的粒度	(36)
1.3.2	固体燃料的种类	(37)
1.3.3	固体燃料的用量	(37)
1.4	烧结料层中的温度分布及蓄热	(39)
1.4.1	烧结料层中的温度分布特点	(39)
1.4.2	燃料用量对料层温度分布规律的影响	(39)
1.4.3	物料粒度对料层最高温度的影响	(43)
1.4.4	烧结过程的蓄热计算	(44)
1.5	烧结过程传热规律及应用	(48)
1.5.1	烧结过程传热现象	(48)
1.5.2	烧结过程传热规律	(51)
1.5.3	传热规律在烧结中的应用	(56)
2	烧结过程物理化学原理	(58)
2.1	水分在烧结过程中的行为与作用	(58)
2.1.1	水分的蒸发	(58)
2.1.2	水汽的冷凝	(61)
2.1.3	水分在烧结过程中的作用	(63)
2.1.4	防止烧结料层过湿的主要措施	(64)
2.2	烧结过程中固体物料的分解	(67)
2.2.1	结晶水的分解	(67)
2.2.2	碳酸盐的分解	(68)
2.2.3	氧化物的分解	(72)
2.3	氧化物的还原及氧化	(78)

2.3.1	氧化物的还原	(78)
2.3.2	低价铁氧化物的氧化	(85)
2.4	烧结过程脱硫	(88)
2.4.1	硫的存在形态及其对钢铁生产的影响	(88)
2.4.2	烧结过程脱硫原理	(89)
2.4.3	影响烧结脱硫的因素	(90)
3	烧结料层的气体力学	(95)
3.1	烧结料层的透气性	(95)
3.1.1	透气性的概念	(95)
3.1.2	烧结料层结构主要参数与透气性关系	(96)
3.2	烧结料层气体阻力损失	(102)
3.2.1	气体通过散料层的阻力损失计算	(102)
3.2.2	沃伊斯公式的实际应用	(106)
3.3	烧结过程透气性变化规律	(108)
3.4	改善烧结料层透气性的途径	(111)
3.4.1	加强烧结原料准备	(111)
3.4.2	强化制粒	(113)
3.4.3	强化烧结操作	(119)
4	烧结过程的成矿机理	(125)
4.1	烧结过程的固相反应	(125)
4.1.1	固相反应一般类型及特点	(125)
4.1.2	固相反应在烧结过程中的作用	(127)
4.2	烧结过程的液相形成与冷凝	(129)
4.2.1	液相的形成	(130)
4.2.2	液相的冷凝	(135)
4.3	铁矿粉烧结主要液相形成与冷凝过程的相图分析	(138)
4.3.1	铁—氧体系	(139)
4.3.2	硅酸铁体系($\text{FeO}-\text{SiO}_2$)	(140)

4.3.3	硅酸钙体系($\text{CaO}-\text{SiO}_2$)	(142)
4.3.4	铁酸钙体系($\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$)	(144)
4.3.5	$\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 体系	(145)
4.3.6	钙铁橄榄石体系($\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$)	(147)
4.3.7	钙镁橄榄石体系($\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$)	(149)
4.3.8	$\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ 体系	(151)
4.4	烧结矿的矿物组成、结构	
	及性质对烧结矿质量的影响	(152)
4.4.1	烧结矿中的矿物组成和结构及其性质	(152)
4.4.2	影响烧结矿矿物组成和结构的因素	(156)
4.4.3	烧结矿的矿物组成和结构对其质量的影响	(161)
5	烧结生产工艺	(166)
5.1	生产工艺流程	(166)
5.2	烧结原料准备	(167)
5.2.1	原料接受、贮存及中和混匀	(168)
5.2.2	原料的破碎、筛分	(171)
5.3	配料	(174)
5.3.1	配料目的和要求	(174)
5.3.2	配料方法	(175)
5.4	烧结料的混合与制粒	(176)
5.4.1	混合的目的与要求	(176)
5.4.2	混匀效率和制粒效果的评价	(177)
5.4.3	影响混合料制粒的因素	(178)
5.5	混合料烧结	(182)
5.5.1	布料	(182)
5.5.2	烧结点火与保温	(185)
5.5.3	烧结主要工艺参数选择	(191)
5.6	烧结矿处理	(199)
5.6.1	烧结矿的破碎筛分	(199)

5.6.2	烧结矿的冷却	(201)
5.6.3	烧结矿的整粒	(203)
5.7	烧结矿质量评价	(205)
5.7.1	化学成分及其稳定性	(205)
5.7.2	粒度组成与筛分指数	(206)
5.7.3	转鼓强度	(206)
5.7.4	落下强度	(208)
5.7.5	还原性	(210)
5.7.6	低温还原粉化性	(212)
5.7.7	还原软化—熔融特性	(216)
6	烧结新工艺	(220)
6.1	低温烧结法	(220)
6.1.1	低温烧结法实质	(220)
6.1.2	低温烧结工艺基本要求	(221)
6.1.3	实现低温烧结的生产措施	(223)
6.1.4	低温烧结技术的应用	(224)
6.2	小球团烧结法	(225)
6.2.1	概述	(225)
6.2.2	小球团烧结法的固结方式	(227)
6.2.3	小球团烧结法工艺流程与特点	(229)
6.2.4	小球团烧结矿高炉冶炼效果	(231)

第二篇 球团原理与工艺

7	成球的理论基础	(233)
7.1	水分在细磨物料中的形态及其作用	(233)
7.1.1	细磨物料的表面特性	(233)
7.1.2	吸附水的特性及其作用	(234)
7.1.3	薄膜水的特性及其作用	(236)
7.1.4	毛细水的特性及其作用	(238)
7.1.5	重力水的特性及其作用	(238)

7.2	细磨物料成球机理	(239)
7.2.1	细磨物料在成球过程中的行为	(239)
7.2.2	生球的粘结机理	(241)
7.3	细磨物料的成球过程	(244)
7.3.1	连续造球过程的三个阶段	(244)
7.3.2	批料造球过程的三个阶段	(246)
7.4	细磨物料的成球动力学	(247)
7.4.1	成球方式对成球动力学的影响	(247)
7.4.2	水分对成球动力学的影响	(249)
7.4.3	粘结剂对成球动力学的影响	(249)
7.5	影响细磨物料成球的因素	(251)
7.5.1	原料对成球过程的影响	(251)
7.5.2	粘结剂对成球的影响	(254)
7.5.3	造球工艺参数对成球的影响	(260)
8	生球干燥	(266)
8.1	生球的干燥机理	(266)
8.1.1	表面汽化控制	(267)
8.1.2	内部扩散控制	(267)
8.1.3	干燥速度	(268)
8.2	干燥过程中生球的行为	(271)
8.2.1	干燥过程生球强度的变化	(271)
8.2.2	生球干燥过程中发生破裂的原因	(272)
8.2.3	提高生球破裂温度的途径	(273)
8.3	影响生球干燥的因素	(274)
8.3.1	干燥介质的影响	(274)
8.3.2	生球性质对干燥过程的影响	(276)
8.3.3	球层高度对干燥过程的影响	(277)
8.3.4	粘结剂对干燥过程的影响	(277)
9	球团矿焙烧理论基础	(281)

9.1	球团矿焙烧过程概述	(281)
9.2	球团中磁铁矿氧化及脱硫	(282)
9.2.1	磁铁矿的氧化机理	(282)
9.2.2	球团矿中硫的脱除	(285)
9.3	球团矿焙烧固结的机理	(286)
9.3.1	固相扩散反应及其固结机理	(287)
9.3.2	液相固结	(292)
9.4	铁矿球团固结形式	(294)
9.4.1	磁铁精矿球团矿固结形式	(294)
9.4.2	赤铁矿球团矿固结形式	(296)
9.5	球团矿的矿物组成与显微结构	(297)
9.6	影响铁精矿球团矿焙烧的因素	(299)
9.6.1	焙烧温度的影响	(299)
9.6.2	加热速度的影响	(301)
9.6.3	高温保持时间的影响	(302)
9.6.4	焙烧气氛的影响	(302)
9.6.5	燃料燃烧的影响	(303)
9.6.6	冷却制度的影响	(304)
9.6.7	生球尺寸的影响	(305)
9.6.8	精矿粒度的影响	(308)
9.6.9	精矿中含硫量的影响	(308)
10	球团生产工艺	(310)
10.1	球团生产工艺概述	(310)
10.2	球团原料的准备	(311)
10.3	配料、混合与造球	(315)
10.4	竖炉法焙烧球团矿	(317)
10.4.1	概述	(317)
10.4.2	竖炉球团工艺流程	(319)
10.4.3	本钢竖炉球团工艺	(324)

10.5	带式焙烧机法焙烧球团矿	(328)
10.5.1	概述	(328)
10.5.2	鲁尔基—德腊伏型带式焙烧机法	(329)
10.5.3	鞍钢带式焙烧机球团工艺	(333)
10.6	链蓖机—回转窑法焙烧球团矿	(339)
10.6.1	概述	(339)
10.6.2	链蓖机—回转窑工艺过程	(340)
10.6.3	承钢链蓖机—回转窑球团工艺	(347)
11	球团矿直接还原	(351)
11.1	概述	(351)
11.2	球团矿还原机理及其结构变化	(353)
11.2.1	球团矿还原机理	(353)
11.2.2	球团矿还原膨胀及其结构变化	(355)
11.3	影响球团矿直接还原因素	(359)
11.4	球团矿直接还原主要方法	(363)
11.4.1	希尔(HLY)法	(363)
11.4.2	SL/RN法	(364)
11.4.3	米德雷克斯(Midrex)法	(367)
12	低温固结球团法	(370)
12.1	水硬性固结球团法	(370)
12.1.1	水硬性固结机理	(370)
12.1.2	影响水硬性固结因素	(372)
12.2	热液固结球团法	(372)
12.2.1	热液固结机理	(373)
12.2.2	影响热液固结的因素	(373)
12.3	碳酸化固结球团法	(374)
12.3.1	碳酸化固结机理	(374)
12.3.2	影响碳酸化固结因素	(375)
12.4	低温固结球团法发展	(376)

13	压团原理与工艺	(379)
13.1	压团法成型原理.....	(379)
13.1.1	压团过程中细粒物料的位移和变形.....	(379)
13.1.2	细粒物料密度在压团时变化规律.....	(381)
13.1.3	压团过程中力的分布和团块密度变化.....	(382)
13.1.4	团块粘结机理.....	(384)
13.2	压团成型设备.....	(386)
13.2.1	辊式压团机.....	(386)
13.2.2	冲压式压团机.....	(387)
13.2.3	环式压团机.....	(389)
13.3	粘结剂选择标准及压团工艺流程.....	(390)
13.3.1	粘结剂选择标准.....	(390)
13.3.2	压团工艺.....	(390)
13.4	影响压团过程因素.....	(392)
13.4.1	细粒物料的天然性质的影响.....	(392)
13.4.2	添加物的影响.....	(393)
13.4.3	压团工艺条件的影响.....	(393)
	参考文献	(398)

10.5	带式焙烧机法焙烧球团矿	(328)
10.5.1	概述	(328)
10.5.2	鲁尔基—德腊伏型带式焙烧机法	(329)
10.5.3	鞍钢带式焙烧机球团工艺	(333)
10.6	链蓖机—回转窑法焙烧球团矿	(339)
10.6.1	概述	(339)
10.6.2	链蓖机—回转窑工艺过程	(340)
10.6.3	承钢链蓖机—回转窑球团工艺	(347)
11	球团矿直接还原	(351)
11.1	概述	(351)
11.2	球团矿还原机理及其结构变化	(353)
11.2.1	球团矿还原机理	(353)
11.2.2	球团矿还原膨胀及其结构变化	(355)
11.3	影响球团矿直接还原因素	(359)
11.4	球团矿直接还原主要方法	(363)
11.4.1	希尔(HLY)法	(363)
11.4.2	SL/RN法	(364)
11.4.3	米德雷克斯(Midrex)法	(367)
12	低温固结球团法	(370)
12.1	水硬性固结球团法	(370)
12.1.1	水硬性固结机理	(370)
12.1.2	影响水硬性固结因素	(372)
12.2	热液固结球团法	(372)
12.2.1	热液固结机理	(373)
12.2.2	影响热液固结的因素	(373)
12.3	碳酸化固结球团法	(374)
12.3.1	碳酸化固结机理	(374)
12.3.2	影响碳酸化固结因素	(375)
12.4	低温固结球团法发展	(376)

绪 论

0.1 烧结球团的任务及其在国民经济中应用

0.1.1 烧结球团基本概念

烧结球团是将粉状物料变成在物理性能和化学组成上能满足下一步加工要求的人造块状原料的过程(即造块过程),所得产品不仅发生物理性质(包括密度、孔隙率、形状、大小和机械强度等)上的变化,也发生化学和物理化学性质(化学组成、还原性、矿物组成、膨胀粉化性、软熔性能等)上的变化,这类变化的结果更能满足下一步加工要求,并促进下一步加工或生产能力增长。

在当今世界上人造块状原料的生产方法,主要有三种,即烧结法,球团法和压团法。国内外一致将其通称为造块法(Agglomeration)。

(1)烧结法(Sintering)是将粉状物料(如粉矿和精矿)进行高温加热,在不完全熔化的条件下烧结成块的方法。所得产品称为烧结矿(块),外形为不规则多孔状。烧结所需热能由配入烧结料内的碳与通入过剩的空气经燃烧提供,故又称氧化烧结。烧结矿主要靠液相粘结(又称熔化烧结)、扩散粘结仅起次要作用。

(2)球团法(pelletization)是将细粒物料(尤其是细精矿)在加水条件下在专门造球设备上经滚动而成生球,然后再经焙烧固结的方

法。所得产品称为球团矿,呈球形,粒度均匀,具有高强度和高还原性。球团矿固相粘结起主要作用,液相粘结相很少。高温氧化焙烧时的热源主要由外部气体的燃烧来提供。

(3)压团法(Briquetting)是将粉状物料在一定外压力作用下,使之在模型内受压,形成形状和大小一定的团块的方法。团块强度主要由添加的粘结剂或粉状物料本身具有的粘结物保持。成型后团块一般还需要某种固结,而化学组成和矿物组成基本上保持原矿特性。

凡供冶炼用的原料(包括造块产品),在行业名称中通称为炉料(Burden)。若以原矿供冶炼用时,这种炉料称为生料(Raw material)。将多种原料配合又经高温处理的人造块矿称为熟料(Agglomerated material)。由于熟料的造渣等过程先行完成,在冶炼过程中只进行金属氧化物还原和分离,将使燃耗电耗大大降低,成本下降、设备生产能力提高,特别是在大型高炉冶炼中尤为显著,因此,在世界冶炼界把提高冶炼熟料比作为主要的研究目标。

0.1.2 造块在工业生产中应用

将粉状物料根据不同需要制造成块状产品的工艺,已在国民经济中的有关工业生产领域得到广泛应用。

在黑色冶金工业中,造块尤其是烧结和球团二大方法,对促进国内外钢铁工业发展起着举足轻重作用。高炉炼铁时为了保证高炉炼铁时在炉内的料柱透气性良好,要求炉料粒度大且均匀、粉末少,机械强度(包括冷强度和热强度)高,且具有良好的软熔性能;为了降低炼铁焦比,要求炉料含铁品位高,有害(S,P等)杂质少,且具有自熔性造渣性能和良好的还原性能。生产表明,上述诸多要求,完全可通过烧结球团高温造块法达到。此外,贫矿经过深磨细选后所得到的细粒精矿以及开采富矿时和对大块矿破碎过程中所产生的粉矿,都必需经过造块增大粒度后才能供高炉使用。对于含碳酸盐和结晶水较多的矿石,以及某些难还原和含有有害成分硫的矿石,皆可通过烧结球团高温造块法使有用成分富集和大部分脱除有害或无用成分。钢

铁厂内的各种含铁废料,各种含铁烟尘、泥与渣的综合利用,皆可用烧结球团造块法返回再利用,充分回收含铁金属;为改善烧结球团产品质量如钢渣,高碱度高炉渣等回用可提高烧结矿强度和还原性能,并使冶炼工厂环境质量得到提高。

烧结球团法不仅使粉料成块,还对高炉炉料起着火法预处理作用,使高炉冶炼达到高产、优质、低能耗的目的。表 0-1 所示为国外对各种炉料的高炉冶炼效果的影响。

表 0-1 各种炉料对高炉冶炼的影响

指 标	天然 块矿	天然 富矿	普通 烧结矿	高温球团矿		
				普通	熔剂性	预还原
焦比(kg/t _铁)	850	670	615	550	500	300
相对生产率(%)	100	127	139	155	170	256

由表 0-1 可知,高炉冶炼效果随熟料的使用而提高,提高的程度不仅表现于随炉料中熟料比增加而增加,而且还随熟料精制程度的提高而提高。它的作用可具体表现为:

(1)充分利用并扩大了有用资源的利用,如富铁粉矿和贫矿经深选得到的精矿皆须通过造块后才有可能利用。

(2)使冶炼厂含有用成分高的废料、尘泥和渣,在造块中掺和使用或单独使用,使工厂环境质量提高,综合利用了国家资源。

(3)经造块的产品物理性能和冶金性能改善,强化下一步工序的使用效果,并使之获得最佳的生产产品质量,取得最大的经济效益,促进国民经济的发展。

0.2 烧结球团法的发展

人造块矿中发展最早的是压团法,但随着世界钢铁工业迅速发