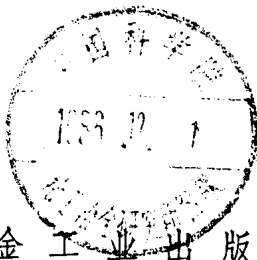


铁 矿 球 团 法

[西德] K. 梅耶尔 著

杉木 译

zk553.03



冶金工业出版社

序

二次世界大战之后，在许多国家，几乎所有各个生活领域中都产生了大量的急切需求，这就促成世界范围内钢铁工业生产的高涨。很多遭到损失或毁坏的生产设施需要更换、重建和扩建。这正是重新审查修改原有的钢铁工业生产方式和在可能与许可的地方采用革新技术的好机会。

这项恢复工作包括两个重要方面。一个方面是生产工艺设备和辅助设备的大型化，达到使生产能力比原来高得多的水平。一个引人注意的例子就是高炉容积增大，炉缸直径加大到15米，日产生铁达到10000吨左右。

另一个方面是通过改善原有工艺参数和引进新技术，钢铁生产取得了明显进展。有些新技术是以前早已知道的，但是并未得到应用。关于矿石原料准备，特别是与造块技术有关的各种技术进步方面，现举数例分述于下。

一、高炉炉料机械整粒（破碎、筛分、分级）

早在三十年代，很多专家就清楚将炉料在入炉冶炼之前加以分级是合理的〔2〕。但是，这种观点直到1950年前后才得到公认。从那时以来，原矿、焦炭以及其它炉料组分便都经过破碎、筛分，然后按较窄的粒度范围供给高炉。经过这种整粒工序后产生的矿粉量不断增大，需要大大增加烧结厂的生产能力（见第一章图9和图10）。通过采用整粒炉料并且提高烧结矿入炉比等这些措施，高炉炉料的透气性显著改善，生铁产量（利用系数）提高，焦比下降。

二、原矿热处理，析出挥发物

高炉操作的进一步改善是通过矿石在入炉前经烧结法或球团法热处理析出所含的挥发物（如 H_2O 或 CO_2 等）来达到的。在所需处理的矿石是鲕褐铁矿或褐铁矿时，这样一项矿石准备工艺就

尤为重要了。现在有一些钢铁厂的高炉是用100%烧结矿。

三、原矿机械选别，剔除脉石成分

铁矿石入炉之前，经过机械选别可以剔除大部分脉石成分。但是，经过这种处理后获得的是颗粒很细的精矿，因此需要造块。铁矿石造块可以使用烧结法和球团法。球团法作为一种可以替代烧结法的新造块方法已经得到工业性应用。

四、在烧结过程中改变矿石化学成分

在烧结过程中通过使用相应的添加剂可以改变矿石的化学成分，这就使人造富矿的冶金特性产生适宜的变化或得到改善。

按照这种办法，便可生产碱性乃至高碱度烧结矿，这早在1938年就已提出来了〔2〕。烧结法或球团法造块技术的发展是与高炉炼铁技术的发展密切相关的。

由于球团的可运输性良好，所以它还具有另外一些优点。随着球团进入国际市场，许多冶金工作者的一个希望就是铁矿石不经过高炉而是采用直接还原法炼钢，便更加接近成为现实了。

坚持不懈地努力改进直接还原工艺乃是新近发展的球团技术的最重要结果之一。

K. 梅耶尔
美因河畔法兰克福
一九八〇年九月

译者的话

本书系根据西德理学博士、化学博士K.梅耶尔 (Kurt Meyer) 教授所著 *Pelletizing of Iron Ores* 一书译出。该书于一九八〇年由美国斯普林格出版社 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York) 与西德钢铁出版社 (Verlag Stahleisen m.b.H. Dusseldorf) 联合出版。

K.梅耶尔博士任职于西德鲁奇公司, 从四十年代起一直从事球团理论与实验研究工作, 五十年代初期以来曾在 *Stahl und Eisen* 等主要刊物上发表过多篇论著, 还曾取得造球方法、造球与布料设备等方面的数项专利权, 六十年代获得西德亚琛 (Aachen) 大学博士学位。

《铁矿球团法》一书是作者对至今欧美各国铁矿石球团生产工艺技术、理论与实验结果以及作者本人的研究成果的综合概括, 取材广泛, 内容丰富, 包括铁矿石球团法的发展沿革, 球团在冶炼生产 (高炉炼铁与直接还原) 中的应用, 并对球团理论的某些问题作了专门阐述。全书采用多章节的编写形式, 叙述扼要, 衔接紧凑。其特点是力求用研究结果与实验数据说明事理。正如绪言中所说, 本书既不是工业性球团厂的设计手册, 也不是球团生产的精确指南, 因为原料特性千差万别, 具体条件又彼此各异。作者指出: 确切些说, 本书的目的乃是研究和阐述在不管原料特性怎样变化的条件下生产均匀优质球团的可能性和方法。

据译者管见, 铁矿球团技术在国外已经达到工艺成熟的地步, 球团矿已成为高炉炉料的重要组分。今后球团法的发展趋势是, 在不断加深理论研究、完善工艺技术的同时, 研究重点将放在改善球团特性、降低热能消耗、加强环境保护和提高自动控制水平等方面。

我国球团工业生产始于五十年代末期, 现已拥有一定生产能

力，可是由于种种原因，我国球团技术的发展还是比较缓慢的。从我国铁矿资源状况以及从今后钢铁生产发展的需要来看，球团工业在我国是很有前途的。要使我国球团技术顺利发展，一方面必须认真分析实际条件、总结以往的经验教训、加强理论与实验研究、积极发展多种球团方法，另一方面必须因地制宜科学地吸收国外成功经验与先进技术。

这里推荐的《铁矿球团法》，就是为读者调查了解、分析研究国外球团技术状况提供一些线索，希望它能够对从事球团理论和实验研究、工艺设计、生产和教学的同志们有所帮助。

在翻译过程中对原书某些错处已做更正，除必要者外，均未一一加注。

限于个人水平，谬误之处，恳请指正，不胜感激。

杉木

一九八三年于长沙

目 录

绪言	1
第一章 球团定义与铁矿球团法的发展阶段	3
第一节 铁矿石球团定义	3
一、铁矿石球团与其它人造富矿的区别	3
二、球团生产过程主要工序	4
第二节 铁矿球团法的发展阶段	5
一、第一阶段——替代烧结法	6
二、第二阶段——精矿球团	7
三、第三阶段——天然粉矿球团	9
第三节 铁矿球团法的作用	16
第四节 球团厂厂址配置与球团的可运输性	20
第二章 球团理论基础	24
第一节 生球形成的连接机理	25
一、主要连接因素	25
二、造球方式	25
第二节 生球固结	30
一、生球干燥	30
二、球团焙烧	39
三、焙烧球团的冷却	48
第三章 球团原料与原料准备	49
第一节 球团原料	49
一、含铁原料	49
二、铁矿石精矿	52
三、二次含铁原料	54
四、粘结剂与添加剂	55
第二节 原料准备	58

一、矿石选别	59
二、细粒铁矿石物理特性	63
三、磨矿	67
第四章 球团实验室及其任务	70
第一节 球团实验室的适用范围	70
第二节 球团实验室的工作任务	71
第三节 球团原料准备	72
一、原料准备	72
二、磨矿	75
三、磨矿设备与磨矿能耗	77
四、过滤	78
第四节 混合料准备与造球	79
一、混合料准备	79
二、造球	79
三、造球能力的确定	85
四、堆比重	85
第五节 生球焙烧固结	85
一、定向试验用加热炉	86
二、基本试验用固定型算式焙烧杯	87
三、球团试验厂	91
第六节 焙烧球团的特性及其试验方法	92
一、球团物理特性	92
二、焙烧球团的还原特性	94
第五章 球团工艺影响因素	102
第一节 影响造球的因素	102
第二节 水分对造球的影响	108
第三节 粘结剂与添加剂的影响	112
第四节 热处理对球团特性的影响	144
一、影响生球干燥的因素	145
二、干球预热	150
三、球团焙烧和冷却	152
四、添加剂同铁氧化物和脉石成分的反应	157

五、球团中赤铁矿的热解·····	159
六、球团热处理过程·····	160
第六章 焙烧球团的还原性状 ·····	165
第一节 还原过程中球团结构的变化·····	168
一、球团还原机理·····	169
二、还原过程中的结构变化·····	170
第二节 含磁铁矿和浮氏体的焙烧球团的还原性状·····	184
第三节 小结·····	186
第七章 特殊球团法 ·····	187
第一节 粘结剂固结球团法·····	187
一、格兰耶斯冷固结法·····	187
二、COBO法和MTU法·····	188
第二节 有色金属氧化物氯化挥发球团法·····	189
一、竖炉氯化挥发球团法·····	190
二、回转窑氯化挥发球团法·····	192
第三节 含钒铁矿石中五氧化二钒的提取·····	193
一、含钒球团竖炉焙烧法·····	194
二、含钒球团链算机-回转窑焙烧法·····	195
第四节 铁矿石脱砷球团法·····	195
第八章 造球设备 ·····	197
第一节 混合料的均匀性·····	197
第二节 造球设备操作方式的要求 ·····	198
一、主要类型的造球机及其造球方式·····	199
二、圆筒造球机·····	201
三、圆盘造球机·····	207
四、圆筒造球机与圆盘造球机的比较·····	213
五、振动筛与辊筛的比较·····	214
六、其它造球方式·····	215
第三节 生球输送与布料装置 ·····	216
一、辊式布料器·····	217
二、辊筛·····	218
三、滚动带式布料器·····	218

第九章 球团焙烧方法	219
第一节 竖炉球团法	220
一、竖炉炉型	221
二、工艺过程	222
三、竖炉规格、单炉产量及竖炉球团法的世界地位	225
第二节 链算机一回转窑球团法	227
一、链算机及其功能	227
二、回转窑及其功能	229
三、冷却机	229
四、热量消耗	230
五、爱立斯·恰默斯式链算机一回转窑法的现状及其世界地位	231
六、其它链算机一回转窑法	233
第三节 带式焙烧机球团法	233
一、带式焙烧机的应用	234
二、主要特点	235
三、镜赤铁矿用鼓风带式焙烧机法	236
四、麦基(McKee)型带式焙烧机法	237
五、鲁奇-德腊沃(Lurgi-Dravo)型带式焙烧机法	239
第四节 其它焙烧方法	246
一、环式焙烧机法	247
二、热固结法	247
三、洪廷顿-海伯兰型环转炉法	248
第五节 主要球团焙烧方法比较	248
一、原料矿石的变化	249
二、各种焙烧设备的单机能力	249
三、各种焙烧方法在世界球团生产中的地位	251
四、费用比较	251
第十章 球团厂工艺系统配置与工艺过程控制	253
第一节 工艺系统配置	253
第二节 工艺过程控制	253
一、原料分配	254
二、配料与加水	255

三、造球与生球输送·····	255
四、布料·····	255
五、焙烧·····	255
第三节 球团厂工艺过程控制方式的发展趋势·····	256
第十一章 球团在高炉冶炼中的应用 ·····	257
第一节 球团机械特性的影响·····	257
第二节 球团化学成分的影响·····	258
第三节 球团上料方式·····	259
第四节 球团与烧结矿的比较·····	259
第五节 球团入炉比·····	261
第十二章 球团在直接还原法中的应用 ·····	263
第十三章 球团理论若干问题 ·····	265
第一节 造球·····	268
一、细磨矿石颗粒同水的连接·····	269
二、物料颗粒特性对生球强度的影响·····	272
三、生球运动过程中滚动力的影响·····	272
四、圆盘造球机和圆筒造球机的设计与操作参数·····	273
第二节 球团焙烧固结·····	275
一、带式焙烧机上或竖炉内球团料层的传热·····	276
二、球团料层对流换热与工艺气流·····	277
三、回转窑内球团料层的传热·····	282
四、辐射换热·····	284
五、热传导·····	285
第三节 生球干燥·····	287
一、单个球团的干燥·····	287
二、球团料层的干燥·····	290
结束语 ·····	294
参考文献 ·····	296

绪 言

在铁矿石烧结生产中，目前只有抽风烧结法得到成功的应用，而铁矿石球团焙烧却使用有三种方法，即竖炉法、链算机一回转窑法和带式焙烧机法。

由于矿石的成因、构造、形态、晶形以及化学成分的不同，矿石特性变化很大。对于矿石原料准备和球团焙烧，这点均应予以考虑，以期在任何时候都能生产出稳定的优质球团。如今已有一些措施能够调整矿石特性的各种差别。但是，各相关参数应当是可变的，并应根据所处理矿石的性质来加以选择。这实际上说明：设计新厂或者是变更老厂所处理矿石的种类，是不能以通用程序为依据的。在每一具体情况下，几乎不可避免地都要进行试验来求出最佳参数。对于本书的构思和编写来说，这是一个决定性的因素。这本书实质上就是靠实验知识写成的，共包括下列十三章：

第一章叙述球团法三个最重要的发展阶段及其背景。

第二章阐述造球与球团焙烧的基本原理。

第三章介绍生产球团可以使用的各种矿石和添加剂及其准备工艺。

第四章介绍装备完善的球团实验室以及按照各种试验标准检验球团质量的方法。

为了达到良好的球团质量，必须通过大量试验来查明各个影响因素的类型和作用。这些想法便是第五章的课题。

第六章讨论了球团还原性状是球团质量的决定性标准，对于脱氧方面的试验研究均做了叙述，虽然作了许多努力，但有些问题仍阐明的不够彻底。

第七章介绍了几种特殊球团固结方法以及使用各种非常见的原料生产球团的可能性。

第八、九两章综述了现今采用的各种主要造球设备和焙烧设备。同时，在这两章中，还说明了工艺工程师同机械工程师和设计工程师合作对保证成功地运用球团工艺的重要性。

第十章提出了关于球团厂设计和工艺过程自动控制的一些见解。对于将所收集到的数据直接转换为其它条件，必须认真考虑，以免造成错误。

球团在高炉或是在直接还原设备中的性状，对于论证球团法应用的合理性及其将来的发展程度，是十分重要的。这一问题在第十一、十二两章中叙述。

为了使各章的连贯性不致被球团理论研讨或数学分析所打断，将各有关公式和方程均集中编写在第十三章中。此外，各章有关参考文献均附于书后。

本书既不是工业性球团厂的设计手册，也不是球团生产的精确指南，原因是原料特性千差万别，故具体条件也就彼此各异。

确切些说，本书的目的乃是：研究和阐述在不管原料特性怎样变化的条件下生产均匀优质球团的可能性和方法。

在现有大量文献中，凡是对于证明和支持各有关的球团理论、工艺参数以及相互关系有用者，均已在参考之列。

第一章 球团定义与铁矿球团法的发展阶段

第一节 铁矿石球团定义

铁矿石球团是用各种不同矿物组成和化学成分的铁精矿和天然粉矿生产的球粒状人造富矿，并且具有下述特性：

- 1) 粒度均匀，基本粒度范围为9~15毫米；
- 2) 气孔分布均匀，气孔率高，为25~30%；
- 3) 含铁品位高，在63%以上；
- 4) 实际上无烧损或挥发分；
- 5) 矿物成分均一，呈易还原的赤铁矿或含赤铁矿的化合物形态；
- 6) 机械强度高而稳定；
- 7) 运输过程中磨碎程度轻，状态良好；
- 8) 在还原气氛中承受热应力的状态下，机械强度仍然良好。

一、铁矿石球团与其它人造富矿的区别

细粒物料最简单最早的造块方法，是压块法。例如，在细粒铁矿石中增加一些水分或其它粘结剂，然后在很高的机械压力下压制成块。这种压块可以直接使用或者经过热处理加工之后再使用。虽然压块在熔炼炉或还原炉内的冶金性状十分良好，但是，由于加工成本较高，尤其是同需要造块的精矿或粉矿的巨大数量相比，压块设备的生产能力是有限的，所以铁矿石压块法未能得到发展。

压块法现仍用于少量粉尘或其它循环物料的造块。近来，这种方法对于细粒海绵铁压块的使用价值有所增长。

第二种方法即目前最主要的一种造块方法，是抽风烧结法。与球团法不同，烧结法具有下述特点：

- 1) 用较粗颗粒矿石作原料，其粒度达 8 毫米；
- 2) 用焦粉作主要能源；
- 3) 制粒的混合料加热（烧结）到稍微超过其软化点的温度；

4) 最终产品是部分熔融的海绵状烧结块，经过破碎、筛分达到所需要的粒度范围，一般 5~30 或 5~50 毫米。

图 1 示出了用上述三种造块方法生产出的人造富矿（压块、球团与烧结矿）的不同外观形状。

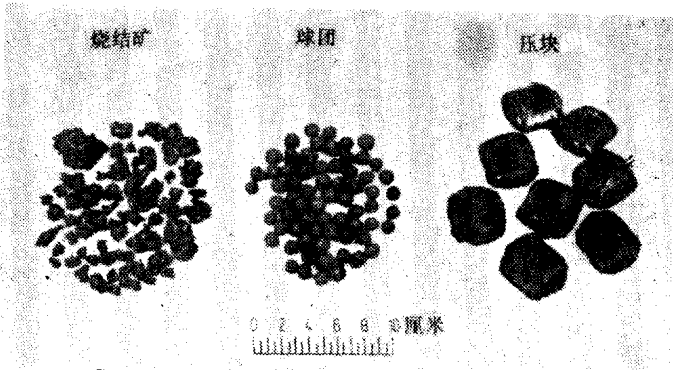


图 1 压块、球团与烧结矿外形比较

二、球团生产过程主要工序

第一个步骤是制取生球(造球)。粒度组成适宜的细粒铁矿石添加润湿剂(一般是加水)，在合适的设备(如圆筒或圆盘造球机)内滚动成球。用这种方法制成湿的球粒，即常说的生球。在造球过程中，还可以用其它添加剂，如添加膨润土(亦称“皂土”)来改善生球或焙烧球团的特性；添加石灰石或白云石来改变焙烧球团的冶金特性。

第二个步骤是将生球干燥和焙烧，以使球团获得所要求的特性。在大多数情况下，这点都是通过在氧化气氛中将球团认真加热到刚刚低于所处理矿石的软化点的方法来达到的。在球团加热过程中，不仅晶格结构产生变化，而且还出现其它形式的连接，如造渣成分相互之间的反应以及造渣成分同铁氧化物的反应。

烧成的高温球团要认真冷却，以便尽可能地保持生成的晶格结构和其它连接，而且要防止破裂。

生球还可以通过添加水硬性粘结剂（例如水泥或氢氧化钙）来固结，也可以在高压下用蒸汽固结。但是，这类球团的某些特性是与焙烧固结的球团不相同的（参阅第七章）。

第二节 铁矿球团法的发展阶段

铁矿石人造富矿，如压块、烧结矿、球团，并不是最终成品。它们都是由那种按其物质形态来看不能直接使用的细粒铁矿石制成的，因此，它们是从矿山到高炉或直接还原设备这一路程当中的中间产品。人造富矿生产的唯一目的，是要将生铁或钢的成本保持在最低水平。多年以来，大概直到本世纪初，装入高炉的铁矿石都是在矿山或钢铁厂经过破碎和部分经过筛分。在这种情况下，块矿便被优先选用，虽然有少量的粉矿也是会允许的。

这样一来，当时不能用的粉矿便堆积起来，越堆越多，得不到经济地利用。在高炉中粉矿只能得到数量有限的使用，因为粉矿会无规律地降低炉料的透气性，造成炉况不顺。

再者，粉矿有一大部分从高炉中被吹出，又要作为炉尘加以回收。这些回收的炉尘是一项可观的铁分，它们也和那些堆积起来不能使用的粉矿一样都被浪费了。在铁矿资源丰富的国家，这种炉尘的价值要比在铁矿资源缺乏的国家小些。积聚的炉尘数量多少，主要取决于所处理矿石的种类。在处理鲕褐铁矿或其它烧损物含量高的矿石时，炉尘量要比处理烧损物含量低的高品位、致密结构矿石时大得多。

大约在本世纪初，各工业发达的国家都曾经不同程度地探讨了处理这种粉尘的各种可能性，着手试用烧结法或压块法将炉尘造块，然后再入高炉冶炼。铁矿资源丰富的国家对这种造块技术是兴趣不大的。他们认为烧结是一种“避免不了的不幸”〔1〕。可是，在铁矿资源缺乏的那些国家里，情况则完全是另外一种样子。在那里，一直在大力发展烧结技术，不单是炉尘而且象黄铁

矿烧渣、轧钢皮以及炉泥等各种二次含铁原料都是很受重视的。未分级的原矿块经破碎、筛分后产生的粉矿的烧结，当时也引起了注意。

大约在同一时期，有一些研究工作者们在寻求能够替代烧结法的另外一种造块方法，尤其是在那些拥有粒度很细的粉矿或精矿的地区。这便是球团法的开端。

一、第一阶段——替代烧结法

烧结法的研究、发展和应用的各个不同阶段，特别是在需要处理粒度很细的铁矿石时，都要考虑改进这种方法，最后便导致要研究出一种能够替代烧结法的造块方法，即球团法。

首先，象瑞典和德国这样一些国家^[2]，很早以来就不得不对烧结法给以格外重视，他们必须解决数量不断增多的细粒精矿的处理问题。由于烧结混合料内大量配入这种细矿粉，各烧结厂单位生产能力受到的限制愈益明显。这首先在瑞典就引起对球团法的研究。精矿不再配入烧结混合料内，而是单独地加水制成生球，生球利用粘结剂固结或用焙烧方法固结。早在1912年，瑞典人A.G.安德生（Andersson）便已取得这样一项专利（专利证书号35124）。遗憾的是没有发表任何详细内容或冶炼效果^[3]。几乎在同一时期，德国也开展了类似的研究工作。1913年，发明者C.A.布莱克尔斯贝尔格（Brackelsberg）取得了德国专利（专利证书号289606）。这项专利提出的方法是：将粉矿加水或粘结剂混合、造球，然后在较低温度下焙烧固结。

瑞典的专利没有取得什么结果，可是布莱克尔斯贝尔格仍在继续他的研究工作^[4]。有一项最值得注意的试验结果就是：认识到球团^①可以比块矿或由相同原料制成的烧结矿的还原速度快。在这项研究工作过程中，于1926年为克虏伯公司莱茵豪森钢铁厂建造了一座日生产能力为120吨球团的试验厂^[5]。该试验厂于1935年改建，并且已显示出了球团法的主要特点。在1937年，为了腾

① 当时在德国将球团叫做“geröll”，即卵石的意思。——译者注

出场地建造一座大型烧结厂，这个试验厂便被拆除了。

这样一来，第一个发展阶段便告夭折。球团法被人遗忘了。烧结法便成为唯一的主要造块方法在整个世界上推广起来。等到第二个发展阶段铺平道路的时候（主要是在美国，同时又有瑞典），关于球团法的技术知识几乎已全部失传了。

二、第二阶段——精矿球团

第二个发展阶段是从解决由苏必利尔湖地区，主要是梅萨比矿区保证矿石供应的问题开始的。美国许多钢铁公司一直是由该地区供应含铁量在50%以上的高品位块矿和粗粒精矿，不需要进一步加工处理。在第二次世界大战期间和到战争结束时，这种富矿的储量几近枯竭，因此需要开辟其它矿源。梅萨比矿区有一个最富的矿床含有大量的贫矿资源，即常说的“铁燧岩”，它的品位很低，全铁含量约30%，并且几乎全部以磁铁矿形态存在。就机械强度而言，这种铁燧岩是很坚硬的。要将细粒嵌布在矿石内的磁铁矿分离出来，需要把矿石磨得很细，经过磁选之后，获得的精矿中小于325目（0.044毫米）粒级在85%以上。

里塞夫矿山公司球团厂（位于明尼苏达州银湾）所处理的精矿的典型粒度组成与化学成分列于表1〔6〕。小于325目粒级超过96%的这种精矿粒度过细，因为会降低烧结混合料的透气性，所以不能够良好地烧结。

大约在1943年，在明尼苏达大学矿山实验站的指导下在该站开展了铁燧岩精矿球团工艺的大力研究工作。当瑞典获悉这项研究工作之后，斯德哥尔摩瑞典钢铁研究院（Jernkontoret）于1946年成立了一个应用精矿的委员会〔7〕，这是一项纪念安德生专利重大意义的历史珍闻。

在M.蒂格尔舍尔德（Tieggerschiöld）的领导下，经过瑞典研究工作者们的努力，很快便建成了数座小型工业性球团厂。这些工厂所生产的球团是专门供给威伯格（Wiberg）法铁矿石直接还原用的，并且取得了显著成果〔8〕。这点首先表明球团是特别适合于直接还原的，因此，这也是对进一步发展直接还原法的一