

高炉软化熔融带的 反应及研究

(日) 斧胜也著

包头钢铁公司科技办公室

前 言

本书是根据一九七九年加拿大Mo—Master大学教授卢维高先生应邀来我国讲学时从日本带来的由新日铁八幡技术研究所斧胜也所著《高炉软化熔融带的反应及研究》一书的打字形印本翻译的。

书中系统地详尽地介绍了铁矿石类高温冶金性能的研究设备和研究方法,并以大量的研究和生产数据,论述了各种含铁废料的高温冶金性能之间的关系及其对高炉冶炼过程产生的影响。同时,还详尽地介绍了日本大高炉进行釜体解剖的方法和研究成果。这些研究成果处于国际领先地位,对于我国开展含铁废料高温冶金性能的研究和高炉冶炼基础理论研究均具有重要的参考价值。

由于形印本的质料较差,几乎所有的照片都模糊不清,因而只好在编印时将照片一概删去并同时也将每章后所附的参考文献目录略去。

参加本书翻译工作的:第一章绪论,第二章铁矿石类废料的软化、收缩(王振龙译,啊日棍校);第三章,铁矿石类的熔融、滴落(王廷鹏译,啊日棍校);第四章, SiO_2 的还原(高荣兰译,孙鸿业校);第五章,铁矿石类的熔融滴落和废料特性(高荣兰译,苏阳校);第六章,结论(王振龙译,啊日棍校)。

全书由啊日棍同志总校,部分章节曾经叶绪恕、冯志坚审阅。由于译者水平所限,书中难免有错误和不当之处,谨请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 序言	(1)
第二节 本研究的目的是和以往所进行的关系	(2)
1. 本研究和以往所进行的关系	
2. 研究的目的	
第二章 铁矿石类的软化、收缩	(4)
第一节 绪言	(4)
第二节 试验方法	(6)
1. 荷重软化实验装置及试验方法	
2. 熔融带滴落实验装置及试验方法	
3. 透气性实验装置	
第三节 球团矿、烧结矿荷重升温软化及收缩特性	(10)
1. 实验用试料	
2. 铁矿石类的荷重软化曲线	
3. 烧结矿的碱度、 Al_2O_3 含量及脉石熔点与荷重软化特性的关系	
4. 熔融机理	
第四节 软化熔融带的透气阻力	(23)
1. 熔融滴落试验中透气性的测定	
2. 升温过程中的透气阻力	
第五节 结语	(31)
第三章 铁矿石类的熔融、滴落	(33)
第一节 绪言	(33)
第二节 铁矿石类的熔化温度	(34)

2. 试验方法

2. 试验结果及讨论

2.1 金属铁的渗碳熔解

2.2 脉石对金属铁熔融、凝聚的影响

2.3 铁矿石类的熔化温度

2.4 烧结矿的熔化温度

2.5 球团矿的熔化温度

2.6 铁矿石类的熔化温度及脉石熔点

第三节 铁矿石类的软化及其在熔融带的特性…… (49)

1. 试验方法

2. 试验结果

2.1 碱度对铁矿石类的软化、收缩及滴落的影响

2.2 予还原矿石的软化、收缩和滴落

2.3 滴落温度及透气性

第四节 铁矿石类的熔化温度对炉况的影响…… (60)

1. 熔融带和高炉炉况

2. 生产高炉中铁矿石类的熔点和铁水温度与生铁含〔Si〕的关系

2.1 终渣碱度及熔点和铁水温度，生铁中〔Si〕含量的关系

2.2 改变烧结矿碱度的试验

2.3 大矸使用马鲁康纳球团矿的试验

3. 最适宜的脉石组成

3.1 脉石的熔化温度

3.2 滴落渣的组成

3.3 终渣组成

3.4 最适宜的脉石组成

第五节 铁矿石类的熔融及滴落机理…………… (75)

1. 生产高炉中矿石类的熔融与滴落

1.1 调查方法

1.2 还 炭及熔融状况

1.3 熔融层的滴落温度

1.4 熔融带的矿石类组织

2. 熔融及滴落机理

2.1 熔融及滴落过程的基础试验

2.2 从熔融到滴落的组成变化

2.3 矿石从熔融到滴落的行为

第六节 结语…………… (101)

第四章 SiO_2 的还 炭…………… (103)

第一节 绪言…………… (103)

第二节 试验方法…………… (103)

1. 单独金属试验及金属和渣的混合试验

2. 不接触焦炭的条件下Si向金属中移行的试验

3. 在炉气——金属铁反应时, 变换金属和焦炭比例的

试验

4. 炉气——金属快速加热时的反应试验

5. 焦炭灰分与金属铁反应的试验

第三节 试验结果及讨论…………… (108)

1. 炉风中 SiO_2 的还 炭

2. 不接触焦炭的情况下, Si向金属铁中的移行

3. 由焦炭灰分中的 SiO_2 产生SiO

4. 炉气——金属的反应速度

5. 焦炭和金属比值对炉气——金属铁反应的影响

6. 快速加热时的炉气——金属铁反应

7. 焦炭灰分与金属铁的反应

8. 生产高炉中SiO₂的发生量

9. 影响SiO₂还原的主要因素

第四节 结语..... (123)

第五章 铁矿石类原料的熔融滴落和原料性质(125)

第一节 绪言..... (125)

第二节 试验方法..... (125)

1. 予还原试验

2. 熔融带的滴落试验

3. 粉状炉渣渣化试验

第三节 块矿及酸性球团矿的熔融滴落特性..... (128)

1. 实验用试料

2. 块矿的熔融滴落特性

3. 酸性球团矿的熔融滴落特性

4. 块矿及酸性球团矿熔融滴落特性小结

第四节 烧结矿的熔融滴落特性..... (138)

1. 实验用试料

2. 熔融带滴落试验结果

3. 熔融滴落行为的研究

4. 粉状炉渣的渣化性

第五节 碱性球团矿及冷粘球团矿的熔融滴落特性(147)

1. 实验用试料

2. 熔融带滴落试验结果

3. 熔融滴落行为的研究

4. 球团矿中脉石的效果

第六节 予还原对熔融滴落特性的影响..... (154)

1. 烧结矿的熔融滴落特性和予还原度

2. 块矿、酸性球团矿、碱性球团矿及冷粘球团矿的熔融滴落特性和予还原度

第七节 各种矿石混装时炉料的熔融滴落特性… (163)

1. 实验用试料

2. 熔融带滴落试验结果

3. 熔融滴落行为的讨论

第八节 结语…………… (173)

第六章 结论…………… (174)

引用文献(略)

第一章 绪 论

第一节 序言

近年来,炼铁技术的进步是惊人的。其成果突出的表现在生铁产率和高炉利用系数的提高以及燃料比的下降等方面。炼铁技术的这些发展具有种种原因。特别是原料的预处理技术和高炉操作技术的明显提高分不开的。

原料处理技术是从加强铁矿石的粒度开始继而大量使用高碱度烧结矿以及球团矿的引进。但是,最近由于资源、环境的变动,如铁矿石组成的变化、烧结矿生产的限制、从而导致大量使用进口球团矿。因此,可以预言:对铁矿石质量的要求会越来越严格了。

高炉操作技术的发展主要表现在高炉的调温操作,燃料喷吹,富氧鼓风,超高压高炉的采用,以及高炉大型化等方面。但是,在这种高速发展的同时,有转向长期低速发展的趋势。因此,今后应把稳定高炉操作和降低能耗作为主要的目标。

为了达到降低能耗和高度稳定的高炉操作,正确掌握高炉内反应是十分重要的,与此相应的原料供应和高炉操作技术也必需确立。

关于高炉内的反应有过很多的研究,高炉上部,即块状带的各种现象大体上都解释清楚了。但是关于高炉下部,即软化、熔融、滴落带等高温部位的情况,还是十分不清楚的。对这个部分的研究将是今后炼铁技术发展十分重要的课题。

第二节 本研究的的目的以及和以往所进行研究的 的关系

1. 本研究和以往所进行研究的的关系

关于高炉上下降块状带反应的研究——炉内装入物性质变化的研究,已经很明确了。从而使装入物的还原粉化性、膨胀性及热裂性等物理性质获得了改善,同时作为决定高炉特性的主要因素的高炉高温下降的反应也被重视起来。

关于高炉内软化熔融带的研究,以前基本上分两类。一类是对于高炉高温区反应的主要因素进行单一化形式的基础研究,另一类是对试验高炉或生产高炉的调查研究。

作为高炉高温下降的基础研究,Gotlib对于从初渣到终渣的生成过程及在炉内的形响进行了详细的研究。另外,对炉渣性质也进行了实验室研究,以及1000℃以上FeO及渣中的FeO还原的研究,对高温状态单纯化后的重要因素也分别进行了相当的研究。但是,这些研究只是高炉反应的某一局下降现象的研究,还不能充分说明高炉高温下降的复杂的炉内反应。

荷重情况下的还原试验作为高炉内高温下降的铁矿石性质变化的研究方法已被广泛地采用。Burghardt等人作了等温下的荷重还原;国井、神尻、兜玉、桐山、三本木、大森等人作了升温条件下的荷重还原,并获得了许多铁矿石类原料的收缩及压力损失等方面的知识。荷重条件下的还原试验作为铁矿石类原料的评价方法已被广泛使用。但是,这个研究只是在温度1200℃以内的研究,对软化温度低的铁矿石和球团矿是适用的,但对于软化温度高的,例如高碱度烧结矿和高碱度球团矿就不适用了。现在

高炉炉料的绝大部分是高碱度烧结矿，并且球团矿也逐渐自熔性化。因此，大于1200℃以上的更高温度下的铁矿石类原料性质变化的研究就更为迫切了。

试验高炉或生产高炉在很早就利用炉顶探测口、炉身水平探测口及垂直探测口等设备对炉内温度及炉气组成进行了调查研究。根据炉内炉料的取样分析，对炉料的性质变化进行了研究。最初炉内取样是在最容易取样的炉顶口位、炉身上口及中口。这一口位的研究结果，使烧结矿的低温还原粉化等重要特性被揭示出来。此后利用高炉休风在炉内下口的取样颇为盛行，这样就对炉内炉料的还原状况、炉渣成分的变化等进行了研究。

作为操作中的炉内下口取样是以比利时CRM试验高炉的调查为开端的。根据这种特殊的取样方法对于炉内高温区的炉料组成变化进行了调查。此后，东京大学生产研究所的试验高炉也用同样的方法对各种条件下的炉内高温区进行取样，对炉内高温区的反应进行了研究。这样高炉内反应的研究重点就转向炉身下口的软化、熔融及滴落带。操作中的炉料取样还只有在试验高炉上进行，实际生产中的高炉炉内下口取样尚未能实现。

最近，将生产状态的高炉停风急速冷却，然后解剖，进行了炉内状况的调查。八幡东田5号高炉的调查，苏联采用N₂气冷却高炉解剖的调查，继而日本钢管厂试验高炉、新日铁广畑1号高炉及日本钢管川崎4号高炉均进行了解剖调查。这一系列的高炉解剖调查表明，在高炉内有炉料生成的岩盘状软熔层存在，此软熔层相当致密，它对炉内炉气的透气性有重大的影响。随着人们对高炉炉内状况的进一步了解，高炉高温区的软化、熔融及滴落时反应的

研究，势必会愈来愈被重视。

Haverkamp和Kondo等对于铁矿石、烧结矿及球团矿进行了熔融滴落特性的研究。鉴于他们的研究，获得了铁矿石类原料的软化、熔融及滴落机理研究的手段，但是关于高炉高温下矿石的变化行为总的来说还是不十分明确。据上所述，对于趋向稳定高炉操作和降低能耗的炼铁技术而言，了解高炉下反应将是特别重要的。

2. 研究的目的

如上所述，本研究是对高炉炉内反应的重要部分——关于炉料的软化、熔融过程的反应进行研究，为达到这个目的，进行以下几项研究：

1) 铁矿石类原料在软化带的行为。特别是炉料的化学性质和软化特性及其同软化时透气性关系的研究。

2) 明确软化至熔融的机理，熔融滴落特性和炉料性质之间关系的研究。

3) 在软化、熔融及滴落过程中，支配各种元素特别是生铁中主要元素Si转移因素的研究。

4) 通过洞冈4号高炉的解剖调查，对上述基础研究的确认。

5) 从软化、熔融及滴落性质的角度出发，确立了稳定高炉操作的在高温下迅速熔化的炉料。

第二章 铁矿石类的软化、收缩

第一节 序 言

高炉炉料的性质与高炉生产率有密切的关系，对于原料

料，不仅限于一般低温性质，而且对还炭粉化、热裂、还炭膨胀等性质也进行了一系列的研究，并有很多报告。进而关于高炉炉料在高温区的性质变化，有荷重软化试验法。在欧洲，铁矿石的软化、收缩性采用Burghaldt试验法评价。但是这个方法是在 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 时的等温荷重还炭试验，忽视了炉料在还炭过程中的影响以及对于软化、熔融性能高的炉料因受温度的限制而不适用。在我国，使用升温荷重软化试验法，并用它来评价炉料的性质。这个升温荷重软化试验方法还未成为标准的试验方法。还炭炉气组成、荷重、试料重量、试料容器的内径等也各不相同。且这种荷重软化试验法的最大问题是试验温度只有 1200°C 。所以，这个方法只适用于评价软化温度低的铁矿石、球团矿等。而对于软化、熔融性能高的高碱度烧结矿和自熔性球团矿则不适用，在加大荷重量的条件下，还能测出炉料之间的性质差别。但是软化、收缩的机理与温度有密切关系，因此，更高温度下的研究是十分必要的。

国井、三本木等讨论了在荷重条件下的还炭过程中物理、化学性质的变化。关于收缩机理、炉气压力损失，所进行的考文还是一个不十分详细的定性的讨论。而软化收缩时的压力损失的定量的研究到目前为止也没有例证。另外，根据高炉解剖调查，高炉内存在着由炉料生成的岩盘状的软熔层。可以看出，它对炉内炉气透气性的影响是很大的。因此，为了研究软化熔融带的透气性、对炉料软化收缩时的压力损失的讨论是非常必要的。

本章从上述观点出发，采用能达到 1400°C 的荷重软化实验装置及熔融带滴落实验装置，将软化带炉料的收缩和

压力损失与原料性质的关系的试验结果加以赘叙。

第二节 试验方法

1. 荷重软化实验装置及试验方法

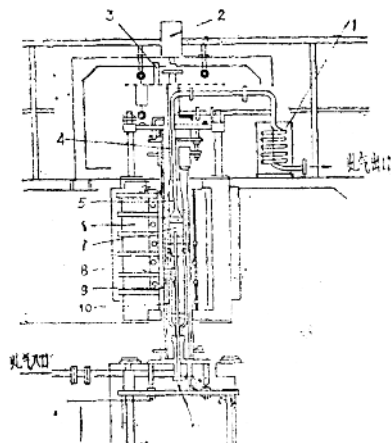


图2—1 荷重软化实验装置

1. 冷却器 2. 加压圆筒 3. 试料伸缩检测器
4. 压杆 5. 石墨撑棒 6. 电炉 7. 试料($\Phi 70\text{mm} \times 70\text{mm}$)
8. 氧化钨球 9. 高铝反应管 10. 石墨支管
11. 热电偶 12. 升降装置

试验设备简图如图2—1所示。反应管的材质是可测定到 1400°C 的高铝管。测出的伸缩量经电气变换后自动记录下来。荷重使用压缩氮气，石墨坩埚装入炉内及取出使用炉体的电动升降装置。图2—2是炉内构造详细图，高铝球予热炉气以达到试料升温的均匀性。测定项目：炉气的压力损失、自动记录试料的伸缩情况、相应的必要的排气

成分及试料的化学成分的分析。

设备材料及试验条件列于表2—1。坩埚内径70mm，试料装入体积固定（ $\varnothing 70$ 毫米 $\times 70$ 毫米）。有关矿石粒度对

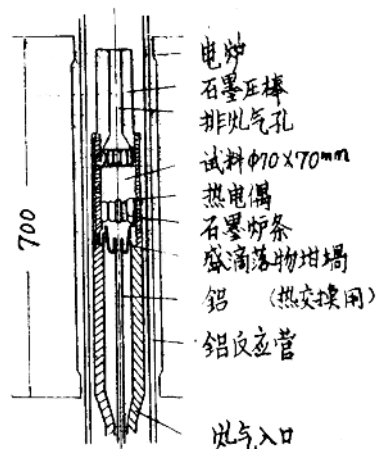


图2—2 炉内结构详图

透气性的影响进行了预备试验，因粒度在10毫米时坩埚壁的影响较小，因此，烧结矿、矿石的粒度定为10毫米，由于球团矿在制造上粒度有差异，因此选用了试料的平均粒度做试验。本试验所采用的升温曲线是根据生产高炉测温实验结果加以简化及附和于设备条件而制定的（1200℃以上的最高升温速度为5~7℃/分），列于表2—1。物料的荷重是随着高炉内炉料下降而变大的，但在高温状态下增加荷重时试料的变化随荷重变化的影响不易判别，因而荷重取一定值。虽然高炉内炉料所受的荷重其定异方面尚未

弄透,但是,可以推断,如果不是在休风中,炉身下 π 最大荷重估计1公斤/厘米²左右,因此本试验在800℃的荷重采用1公斤/厘米²。试验时间与实际高炉中炉料下降时间相

表2—1 设备材料及试验方法

设备材料及方法	项目	材质或方法
	反应量	高铝
	坩 锅	石墨内径70mm
	伸缩测定	电转换—自动记录
	荷 重	压缩N ₂
	发热体	砂碳棒
试验条件	炉气组成	CO 30%+N ₂ 70%
	炉气量	20升/分
	升温曲线条件	
	试料号	
	试料粒度	

附合即300分钟。并采用近似高炉炉气成份的炉气进行了预备探讨。在相当于炉身下端位置,还原度应大于70%。为简化试验操作,炉气成分固定30%的CO、70%的N₂。本试验中,当炉气压力损失超过500毫米水柱时停止试验。

2. 熔融带滴落实验装置及试验方法

实验装置如图2—3所示,立式电炉内装有内径48毫米的石墨坩埚,其底下设有个 ϕ 10毫米的滴落孔,试料装在

此坩埚中。石墨坩埚的大小采用电炉内径所允许的最大尺寸，试料粒度采用与高炉炉料相 附 的平 均粒度10~15毫米。试料高度以高些为好，但是因为电炉的等温带宽度只有50毫米，因此，试料高定为100毫米以便使收缩时的试料温度保持一定。矿石层下设有焦炭层，它是熔化了的金属

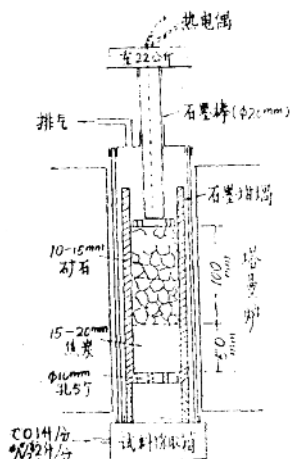


图2—3熔化带滴落实验装置

渗碳剂，为了防止矿石层收缩时滴落孔阻塞，从而保证熔化物向下顺利流过，因此将焦炭粒度定为15~20毫米、层高为50毫米。本设备主要用于1000℃以上的矿石软化、收缩、滴落等试验研究，所以事前用JIS还原法进行1000℃的间接还原制备试料（予还原试料）。荷重、炉内气氛及升温条件如图2—4所示。1000℃以前为氮气气氛下升温，到1000℃立即换为CO+N₂的混合气氛并恒温1小时，关于升温速度应尽量接近高炉的升温速度（10~20分），但本设备的最大升温速度只有7℃/分。为保证还原气氛，炉内的CO量定为1升/分，关于荷重应相当于中型高炉（2000M³）熔融带的实际荷重，取1.2公斤/厘米²。因此，本试验选用的诸条件主要是模拟高炉内的实际情况而定的。

3. 透气性实验装置

透气性试验在软化、熔融及滴落过程中测定是理想

的，熔融带滴落试验中测定透气性，由于高温下石墨坩埚的致密性差，所以用它来测定透气性是困难的，本试验是在试验途中（根据试验透气性温度的要求——译者）通 N_2 气，将坩埚在水箱中急速冷却，在常温下测定透气性。

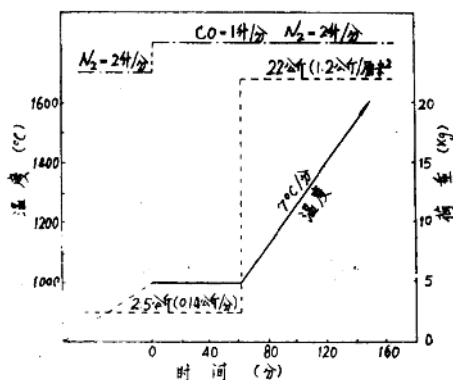


图2—4 荷重及升温条件

透气性测定装置如图2—5所示。

第三节 球团矿、烧结矿荷重升温软化及收缩特性

1. 实验用试料

供试验用的球团矿及烧结矿的化学分析分别列于表2—2及表2—3。我国现在使用的球团矿是以马鲁康纳球