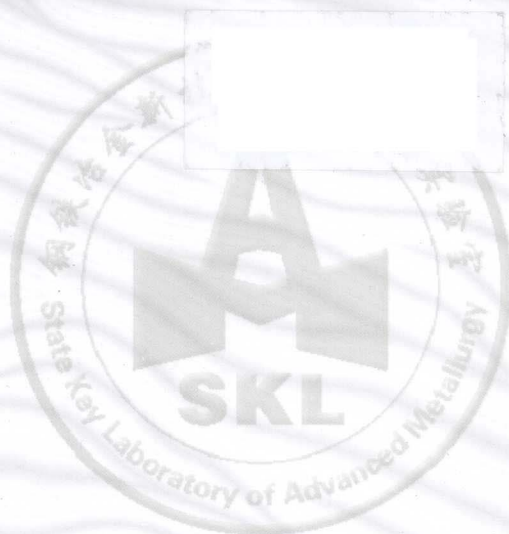


钢铁冶金新技术丛书

流态化还原铁矿粉 黏结机理及抑制技术

STICKING MECHANISM AND SUPPRESSION TECHNOLOGY OF
FLUIDIZED REDUCED IRON ORE POWDER

郭占成 公旭中 著



科学出版社

钢铁冶金新技术丛书

流态化还原铁矿粉黏结 机理及抑制技术

Sticking Mechanism and Suppression Technology
of Fluidized Reduced Iron Ore Powder

郭占成 公旭中 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为了阐明流态化炼铁过程黏结机理,开发抑制黏结技术。首先,研究了铁精粉和氧化铁颗粒流态化还原过程的流化、黏结特征及颗粒表面结构的演变规律,揭示了铁精粉和氧化铁颗粒流态化还原过程黏结特性。其次,利用高温在线观测系统研究了氧化铁还原过程中微观形貌和结构的演化,揭示了颗粒表面金属铁烧结作用是导致黏结的重要原因。通过多种金属烧结规律的研究,验证了纳微结构金属铁的烧结是导致流态化炼铁过程黏结的原因之一。最后,通过调控铁矿粉还原过程颗粒表面物相与金属铁的结构,抑制了表面铁原子的扩散,提出了抑制黏结的方法。采用铁矿颗粒表面包覆的措施,抑制了铁矿粉流态化还原过程中黏结的发生,延长了流态化还原时间,提高了金属化率,为开发抑制黏结技术提供了理论依据。

本书可供钢铁冶金专业及相关技术领域科技工作者、大学教师 and 研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

流态化还原铁矿粉黏结机理及抑制技术=Sticking Mechanism and Suppression Technology of Fluidized Reduced Iron Ore Powder/郭占成,公旭中著. —北京:科学出版社,2015

(钢铁冶金新技术丛书)

ISBN 978-7-03-042188-3

I. ①流… II. ①郭…②公… III. ①流态化-还原铁-研究 IV. ①TF591

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 241566 号

责任编辑:吴凡洁 万群霞 高 薇 / 责任校对:韩 杨

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:22 3/4

字数:440 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《钢铁冶金新技术丛书》编委会

主 任：周国治(中国科学院院士、北京科技大学教授)

副主任：张欣欣(北京科技大学校长、教授)

编 委：包燕平(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

成国光(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

陈伟庆(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

郭占成(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

李 晶(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

刘 青(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

焦树强(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

薛庆国(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

王静松(钢铁冶金新技术国家重点实验室教授)

《钢铁冶金新技术丛书》序

钢铁工业是我国国民经济建设和发展的支柱产业,但存在着巨大的节能减排压力、严重的铁矿资源短缺及迫切的高端产品生产技术需求。要解决这些我国钢铁工业可持续发展所面临的问题,在国家产业政策调整与引导的同时,必须加强基础理论研究与创新技术研发,开发具有自主知识产权的新工艺、新技术,推动钢铁产业技术进步。2011年10月,科学技术部批准依托北京科技大学建立钢铁冶金新技术国家重点实验室。钢铁冶金新技术国家重点实验室以国家重大需求为导向,紧密围绕碳素能源高效转化、冶金资源高效利用、高端钢铁材料高效生产等关乎我国钢铁工业可持续发展的基础理论和关键新工艺、新技术开展系统深入的科学技术研究。实验室坚持有组织的科学研究与自由探索相结合、基础研究与技术创新并重、长期目标与短期目标兼顾的原则,针对高温过程冶金物理化学、能量高效转换与链接、铁矿资源高效利用、钢的纯净化及夹杂物控制四个方向开展科学技术基础研究,力争通过基础理论的突破,在复杂矿资源综合利用、节能减排、洁净钢高效冶炼等关键技术上建立工业技术原理,并通过产学研结合开发新工艺、新技术、新装备。

钢铁冶金新技术国家重点实验室自成立以来已取得了一批重要成果,例如,在熔渣结构与物性预报方面,提出了以新一代几何模型为代表的一系列计算复杂熔体物理化学性质的理论方法和模型,并被广泛应用到相图计算、热力学数据提取、熔体物性计算和预报等领域,并形成了以“周模型”命名的理论体系,取得了国际领先的基础理论研究成果;在洁净钢和夹杂物控制方面,通过钢-渣-夹杂物等多元、多相反应热力学与动力学的系统研究,掌握了钢中O、S等杂质去除和夹杂物调控的机理,利用氧化物冶金技术改善钢的组织结构,开发新型洁净化生产装备,提出特殊钢洁净化生产新技术,研究成果应用于高品质汽车用钢、管线钢、轴承钢、弹簧钢、帘线钢等的生产;在冶金粉尘循环利用方面,揭示了各类冶金粉尘的矿物学结构特征及碳热还原过程中K、Na、Zn、Pb的分离、富集行为,突破了转底炉处理冶金粉尘若干关键工程技术,解决了冶金富钾粉尘分离提取氯化钾的关键工艺技术,建立了转底炉处理冶金粉尘和富钾粉尘生产氯化钾的示范工程,推动了我国钢铁冶金粉尘循环利用技术的发展;在节能方面,研发了电炉炼钢复合吹炼技术,发明了电炉炼钢集束射流技术,研究成果广泛应用于电炉炼钢工艺中,实现了电炉炼钢高效率、低能耗的冶炼过程。此外,针对全氧高炉炼铁、冶金过程二氧化碳资源化利用、钒钛磁铁矿资源综合利用、钢渣资源化利用等基础理论研究和技术研发也取

得了重要进展。

《钢铁冶金新技术丛书》本着“百花齐放、百家争鸣”的出版方针和“探索、创新、求实”的科学精神,将钢铁冶金新技术国家重点实验室的一些专题研究成果介绍给读者,以期对提高钢铁冶金学科的前沿理论水平、提升自主创新能力、培养钢铁冶金领域创新人才、促进钢铁工业技术发展贡献力量。



钢铁冶金新技术国家重点实验室学术委员会主任

中国工程院副院长、院士

2014年6月15日

前 言

2013年,我国粗钢产量达到7.79亿t,占全球粗钢产量的48.5%。作为国民经济的支柱产业,钢铁工业有力地支撑了我国国民经济的快速发展。炼铁过程是钢铁工业能耗最大的环节,也是钢铁企业节能减排的主要对象。目前,炼铁的主要设备是高炉,虽然现在已经非常成熟,但对“精料”的依赖成为其发展的最大障碍,其中热风、炼焦、烧结三大系统存在能耗高、污染重等问题。为了解决高炉炼铁过程中资源与环境的矛盾,非高炉炼铁技术一直受到广泛关注。

流态化炼铁工艺是典型的非高炉炼铁技术,该技术可以直接还原粉矿和铁精粉,避免了炼焦和烧结过程,同时能够利用低品位复杂共生矿,实现复杂共生矿的高效开发。但是该技术在工业化过程中仍然存在诸多问题,其中最主要的问题是矿粉流态化还原过程的黏结失流,它不仅降低了矿粉的还原速率,还无法实现连续生产。

由于黏结失流与颗粒的流体力学性质、物理化学性质和还原反应密切相关,并且这些因素相互作用、十分复杂,导致大家对黏结机理的认识存在争议,进而对抑制技术的作用机制认识不清。

为了阐明黏结机理和抑制黏结机理,本书介绍氧化铁颗粒流态化还原过程的流态化、黏结特性及氧化铁颗粒微观结构的演变规律,揭示氧化铁颗粒流态化还原过程的黏结机理。基于氧化铁颗粒流态化还原过程的热力学、动力学和流体力学,以及还原过程中氧化铁颗粒的微观结构状态,阐明由于颗粒表面析出纳微结构单质铁的烧结作用导致氧化铁颗粒还原过程的黏结失流,并结合多种表征手段分析铁晶须作为特殊的纳微结构单质铁存在时,不仅通过物理的勾连作用加速黏结的发生,还通过其表面铁原子的扩散促进铁晶须间的烧结作用,加速氧化铁颗粒还原过程的黏结。通过多种单质金属烧结现象及理论分析,验证纳微结构单质铁的烧结作用对氧化铁颗粒流态化还原过程的黏结失流作用。最后,基于调控铁矿粉还原过程中表面金属铁的结构与物相构成,阻止表面铁原子的扩散,提出改变表面析出单质铁的物相构成来抑制黏结的发生,采用析碳、碱土金属氧化物对铁矿粉进行表面包覆,实现流态化还原过程中颗粒黏结的抑制,延长流态化还原时间和提高铁矿粉的金属化率,得到抑制黏结的机理。

在此特别感谢为本书内容作出重要贡献的科研工作者,他们是王志研究员、唐惠庆副研究员、公旭中副研究员、胡晓军副教授、赵志龙博士、邵剑华博士、张奔博

士、钟怡玮博士、林银河博士、王其洪硕士、郭磊博士。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。



2014 年 7 月 1 日

目 录

《钢铁冶金新技术丛书》序

前言

第 1 章 铁矿粉气基流态化还原特性	1
1.1 铁精粉流态化还原特性	2
1.1.1 黏结过程中流化床的宏观现象	4
1.1.2 黏结失流时矿粉颗粒的表面变化	6
1.2 巴西精矿流态化还原特性	9
1.2.1 气氛和温度对流化时间的影响	10
1.2.2 气氛和温度对金属化率的影响	12
1.2.3 气氛和温度对床层膨胀的影响	13
1.2.4 气氛和温度对颗粒微观形态的影响	15
1.2.5 气氛对流化时间的影响动力学	22
1.2.6 还原气利用率分析	24
1.2.7 气氛和温度对瞬时利用率的影响	25
1.2.8 气氛和温度对平均利用率的影响	31
1.3 铁精粉与 CVRD 铁矿粉流化特性	33
1.3.1 颗粒粒度和表观气速对流化时间的影响	33
1.3.2 颗粒粒度与表观气速对金属化率的影响	35
1.3.3 粒度与气速对床层膨胀幅度的影响	36
1.3.4 颗粒粒度和表观气速对物相结构的影响	38
1.3.5 颗粒粒度和表观气速对颗粒表面形态的影响	41
1.3.6 不同粒度颗粒的黏结行为	45
1.4 铝铁共生矿流态化还原特性	50
1.4.1 铝铁共生矿和巴西精矿的比较	52
1.4.2 还原温度对黏结行为的影响	54
1.4.3 铝铁共生矿相组成的变化	56
1.4.4 还原度和金属化率的变化	59
1.4.5 铝铁共生矿气体还原固相反应热力学	60
1.4.6 铝铁共生矿还原反应热力学	63

参考文献	65
第2章 氧化铁颗粒气基流态化还原特性	67
2.1 氧化铁颗粒流态化还原特性判定	67
2.1.1 模拟流态化还原过程	67
2.1.2 氧化铁颗粒流化特性	69
2.2 氧化铁颗粒流态化还原特性演变	74
2.2.1 还原气体浓度对颗粒流化性能的影响	76
2.2.2 还原温度对颗粒流化性能的影响	79
2.2.3 还原气车速对颗粒流化性能的影响	83
2.2.4 不同还原气体体系中流化时间的变化	86
2.2.5 不同还原气体体系中颗粒物相组成的变化	89
2.3 氧化铁颗粒流态化还原过程中的黏结行为	93
2.3.1 CO 浓度对黏结时间的影响	96
2.3.2 还原势对黏结时间的影响	99
2.3.3 车速对黏结时间的影响	101
2.3.4 温度对黏结时间的影响	102
2.3.5 还原条件对黏结时间影响	104
参考文献	107
第3章 气基还原铁氧化物颗粒表面微观形态演变	109
3.1 铁氧化物还原过程中颗粒表面微观形态演变	109
3.1.1 温度对还原后金属铁析出形态的影响	113
3.1.2 CO 浓度对还原后金属铁析出形态的影响	115
3.1.3 颗粒粒度对还原后金属铁析出形态的影响	117
3.1.4 CO 还原铁氧化物的 TG-DTA	118
3.1.5 CO 还原过程中金属铁析出行为	119
3.2 析碳对铁氧化物气基还原过程中颗粒微观形态的影响	124
3.2.1 CO-Fe 体系对析碳反应影响的热力学	125
3.2.2 CO 浓度对析碳的影响	125
3.2.3 CO 浓度对 Fe_3C -Fe 平衡的影响	126
3.2.4 CO 浓度对析碳和渗碳平衡的影响	126
3.2.5 析碳对 CO 还原时金属铁析出形貌的影响	127
3.2.6 温度对析碳的影响	130
3.2.7 掺入 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 对析碳的影响	131
3.2.8 析碳对还原后铁析出形态转变的作用机理	132
3.3 掺入碱土金属氧化物后还原过程颗粒微观形态演变	134

3.3.1	CaO 对金属铁的形貌与还原速率的影响	136
3.3.2	CaO 对金属铁析出形态转变的作用机理	141
3.3.3	MgO 对金属铁析出形貌与还原速率的影响	143
3.3.4	MgO 对还原后铁析出形态转变的作用机理	148
3.3.5	碱土金属氧化物对铁氧化物还原形态的影响	151
3.3.6	碱土金属氧化物对金属铁析出形态与还原速率的影响	153
3.3.7	碱土金属氧化物对析出铁形态转变的作用	157
3.4	铁矿中杂质氧化物对还原颗粒微观结构的影响	159
3.4.1	Al_2O_3 对金属铁析出形貌和还原速率的影响	160
3.4.2	Al_2O_3 对还原后铁析出形态转变的作用机理	165
3.4.3	磷酸钙对气基还原过程金属铁析出形貌的影响	167
3.4.4	磷酸钙对铁氧化物气基还原动力学及机理	170
3.4.5	碱金属氧化物对 CO 还原时金属铁析出形貌的影响	172
3.4.6	碱金属氧化物对还原速率的影响	175
3.4.7	掺入同配比的矿质氧化物对还原动力学的影响	178
3.4.8	掺入矿质氧化物对金属铁析出形态变化的作用机理	179
	参考文献	183
第 4 章	金属及其氧化物高温流化黏结特性	189
4.1	金属及其氧化物高温流化特性	189
4.1.1	高温可视流化床	189
4.1.2	颗粒流化实验	190
4.2	金属氧化物的黏结失流行为	191
4.2.1	黏结温度的演变规律	191
4.2.2	金属氧化物表面金属化的演变规律	192
4.2.3	化学反应热效应对黏结行为的影响	193
4.3	金属的黏结失流行为	195
4.3.1	金属高温流化特性	195
4.3.2	金属的黏结温度演变规律	196
4.3.3	金属与材料熔点的关系	197
4.3.4	材料晶体类型对黏结的影响	199
4.4	不同温度下流态化金属铁颗粒的黏结行为	199
4.4.1	温度对床层压降的影响	200
4.4.2	温度对颗粒粒度的影响	201
4.4.3	温度对颗粒微观结构的影响	204
4.4.4	搅拌床层对黏结失流的影响	205

4.5	金属铁颗粒高温流化特性	206
4.5.1	粒度与气速对金属铁黏结温度的影响	206
4.5.2	流化介质对金属铁黏结温度的影响	207
4.6	金属铁烧结行为与高温流化特性的关系	212
4.6.1	初始流化速率与温度的关系	212
4.6.2	流化特性转变温度与黏结温度的关系	214
4.6.3	最小烧结温度的测定	215
4.6.4	最小烧结温度与黏结温度的关系	216
4.7	金属铁高温黏性的表征	217
4.7.1	金属铁表面能的理论计算与颗粒聚团热力学	217
4.7.2	金属铁表面黏度与颗粒黏性力	222
	参考文献	226
第5章	氧化铁颗粒流态化还原黏结机理	228
5.1	流态化还原过程中颗粒的演变	228
5.1.1	流态化还原过程中床层温度变化	228
5.1.2	流态化还原过程中颗粒物相组成	232
5.2	析出铁和黏结的关系	235
5.2.1	金属铁在惰性气氛中的黏结	235
5.2.2	金属铁表面特征与温度的关系	236
5.2.3	表面金属纳微结构的尺寸效应	238
5.2.4	界面反应强化表面扩散效应	241
5.3	析出铁对氧化铁颗粒表面黏性的影响	242
5.3.1	最小烧结温度	245
5.3.2	表面黏度与颗粒黏性力	247
5.4	铁晶须对黏结的贡献	249
5.4.1	铁晶须对黏结温度的影响	250
5.4.2	金属铁表面空位型缺陷	252
5.5	金属铁颗粒烧结临界固体桥	254
5.5.1	金属铁颗粒烧结临界固体桥半径	254
5.5.2	固体桥生长规律	256
	参考文献	257
第6章	微型流化床还原铁矿粉动力学	261
6.1	还原动力学模型	261
6.1.1	气基还原铁氧化物	263
6.1.2	动力学分析方法	264

6.1.3 非等温动力学	264
6.1.4 等温动力学	265
6.2 微型流化床还原铁矿粉	267
6.3 矿粉在微型流化床中的还原行为	271
6.3.1 矿粉在微型流化床中的还原度	271
6.3.2 流态化还原产物形貌	275
6.3.3 铁矿粉流态化还原活化能	279
6.3.4 铁矿粉流态化还原机理模型	282
6.4 铁矿粉 CO 还原动力学	286
6.4.1 CO 浓度对还原度的影响	286
6.4.2 反应产物形貌	287
6.5 包裹氧化物矿粉的还原行为	289
6.5.1 包裹 MgO 对还原度的影响	290
6.5.2 反应产物形貌	291
6.5.3 包裹 MgO 对活化能的影响	291
6.5.4 动力学模型机理	295
6.6 CO 还原铁氧化物动力学	297
6.6.1 CO 还原 Fe_xO_y 动力学	297
6.6.2 FeO 的 H_2 -CO 还原动力学	297
6.6.3 氢还原过程中产物结构的变化	298
6.7 析碳对 CO 还原过程动力学的影响	301
参考文献	304
第 7 章 氧化铁颗粒碳包覆流态化还原特性	306
7.1 碳包覆氧化铁颗粒流态化还原黏结特性	306
7.1.1 析碳反应对流化时间的影响	307
7.1.2 析碳反应对颗粒金属化率的影响	309
7.1.3 析碳反应对颗粒碳含量的影响	309
7.2 流态化还原过程中析碳特性	311
7.2.1 析碳的赋存状态	311
7.2.2 析碳在颗粒表面的消耗和积累	313
7.2.3 碳的赋存状态对金属铁性能的影响	314
7.2.4 碳的赋存状态对颗粒形貌的影响	317
7.3 碳包覆抑制氧化铁颗粒流态化还原黏结机理	320
参考文献	322

第 8 章 铁矿粉包覆氧化物流态化还原特性	324
8.1 铁精粉包覆氧化物流态化还原黏结特性	324
8.1.1 包覆氧化物对流化时间的影响	325
8.1.2 包覆氧化物对金属化率的影响	326
8.1.3 包覆氧化物对物相结构的影响	327
8.1.4 包覆氧化物对颗粒表面微观形态的影响	327
8.2 铁精粉颗粒表面包覆抑制黏结机理	331
8.3 铁精粉包覆氧化物床层膨胀	333
8.4 氧化铁颗粒包覆氧化物流态化还原特性	334
8.4.1 表面改性对还原产物金属化率的影响	335
8.4.2 表面改性对黏结时间的影响	337
8.4.3 表面改性对颗粒黏性的影响	338
8.5 表面改性颗粒物相组成与形貌	341
8.5.1 表面改性颗粒物相组成	341
8.5.2 表面改性颗粒表面形貌与元素分布	343
参考文献.....	347

第 1 章 铁矿粉气基流态化还原特性

从 20 世纪 90 年代开始,中国钢铁工业进入了一个快速发展阶段。2013 年,中国粗钢产量达到了 7.79 亿 t,占全球粗钢产量的 48.5%。作为国民经济的支柱产业,钢铁工业为中国的经济发展作出了巨大贡献。但是,炼铁工艺是一个资源、能源密集型产业,能源消耗占钢铁产品的 70%以上,是钢铁生产中资源、能源消耗的主要环节,也是钢铁企业节能减排的重要对象。目前,炼铁生产的主体是高炉炼铁,虽然它的技术已经非常成熟,但它对冶金焦的强烈依赖成为其发展的最大障碍。由于我国钢铁行业的迅猛发展及炼焦资源的日益短缺,国内焦炭价格在短短十多年内翻了 4 倍还多。此外,焦炉的水污染物、烧结的 SO_2 、粉尘和高炉 CO_2 的排放量很高,污染环境严重。因此,开发众多非高炉炼铁技术,期望能缓解炼铁工艺对资源、能源和环境的压力。

我国钢铁工业的快速发展,导致对铁矿石的巨大需求,加上国内外高品位铁矿资源的日益减少,因此高品位铁矿石的价格逐年攀升。虽然现在可以实现对国内外低品位铁矿资源的应用,但需要细磨、选矿富集才可达到炼铁的品位要求,而且随着铁矿资源的减少及较高选出率和铁品位的要求,铁精粉的粒度将越来越细。铁精粉供高炉炼铁使用前需经烧结造块,此工艺不但能耗高,污染重,而且降低了矿粉的还原动力学条件。与之相比,流态化炼铁技术可以直接使用粉矿和铁精粉,并易控制还原条件,实现低品位复杂共生矿的综合利用,因此它更适应铁矿资源发展的趋势。

流态化炼铁技术由于直接使用粉矿,摆脱了对冶金焦的依赖,比传统工艺更适合处理低品位复杂共生矿,反应器内传质和传热效率高等诸多优点,被认为是比较合理的炼铁工艺。但是,流态化炼铁技术在工业化过程中还存在很多问题,其中最关键的是矿粉在流态化还原过程中出现黏结问题,导致矿粉颗粒失去流化状态。这不仅降低了矿粉的还原速率,而且使整个生产流程无法连续化操作。

虽然国内外许多科研工作者对黏结失流问题的影响因素、发生机理和抑制技术进行了大量研究,但黏结失流与颗粒的流体力学性质、物理化学性质和还原反应密切相关,并且这些因素相互交织、协同作用,导致在不同条件下得到不同的黏结机理,而且这些认识只能解释特定条件下的实验现象,普适性差,没有得到共性结论。因此,对黏结机理的认识存在争议,进而导致对抑制技术的作用机理认识不清。

流态化还原技术实现工业化的最大障碍是铁矿粉在高温流态化还原过程中易出现黏结失流^[1,2]。铁矿粉的流态化还原特性研究主要集中在宏观操作因素对黏结的影响^[3,4],对黏结机理研究存在诸多争议,因此有必要开展这方面的研究,了

解气基流态化炼铁的流态化、黏结、失流等规律,探索铁矿粉气基还原过程黏结发生机理与抑制技术。

1.1 铁精粉流态化还原特性

实验所用主体设备为自主设计的热态可视流化床还原铁矿粉的装置(图 1.1)。其反应器是双层透明石英管,内径分别为 30mm 和 70mm,内管为流化床。气体流经外管与内管夹层的过程中进行预热,然后进入流化床。装置通过电阻炉控制热电偶和插入流化床内热电偶同步监控电炉和流化床温度。电阻炉留有观察窗口,肉眼可直接同步观察床层流化状态,同时通过压力变送器记录床层压降变化。实验数据通过无纸记录仪在线即时记录存储。温控和床层压降过程如图 1.2所示。流态化还原后的尾气通过红外和热导分析仪分别对 CO 、 CO_2 和 H_2 的体积分数进行在线分析,并实现即时记录存储(图 1.3)。

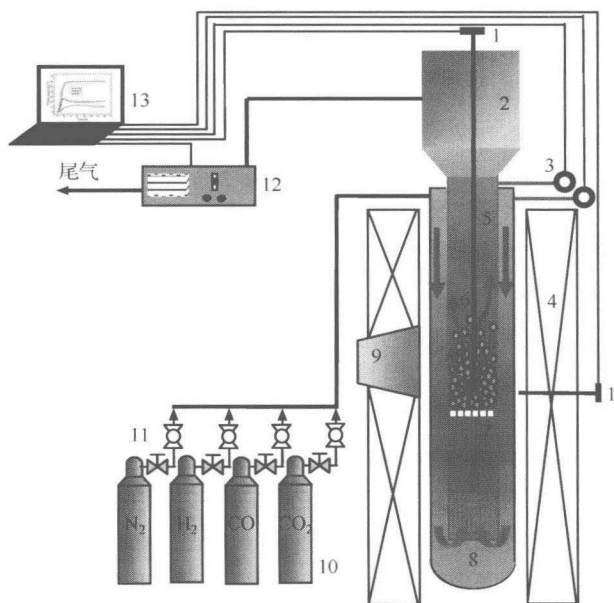


图 1.1 热态可视流化床结构示意图

1. K 型热电偶;2. 沉降室;3. 压力变送器;4. 电阻炉;5. 石英管;6. 流化床;7. 分布板;
8. 气体混合预热室;9. 透视窗;10. 高压气瓶;11. 气体质量流量计;12. 气体分析仪;13. 计算机

实验以 70g 经筛洗后的 75~110 μm 粒度级别的国产精矿粉为试样,其工业分析见表 1.1,主要物相为 Fe_3O_4 。还原气组成通过质量流量计调配 70% CO -30% N_2 和 70% H_2 -30% N_2 。流化气体流量约为 1.7L/min,为常压下鼓泡床状态。还

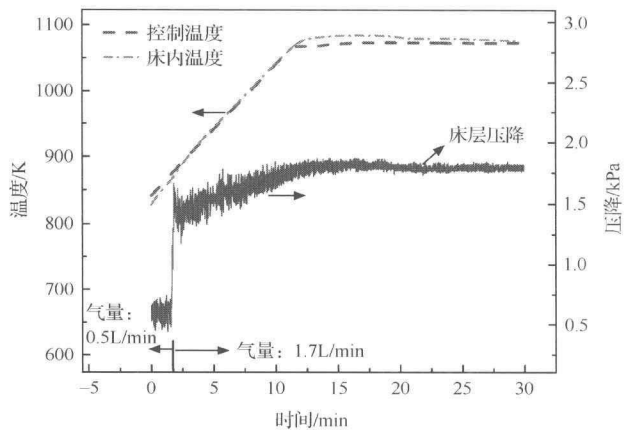


图 1.2 流化床温控和床层压降变化

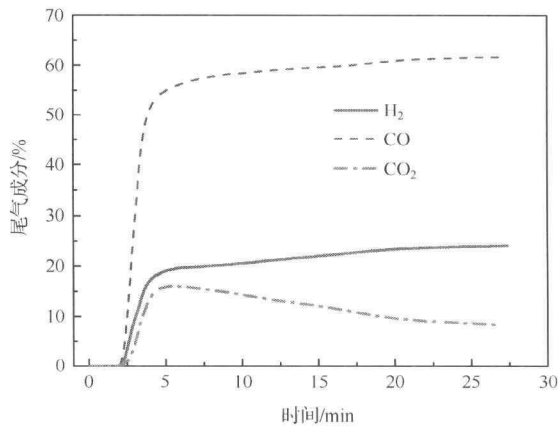


图 1.3 流化床尾气成分变化

原温度分别设定为 973K、1073K 和 1173K。试样在反应器中预热与冷却过程通入流速为 0.5L/min 的高纯 N₂ 保护。流化实验结束后,采用氯化铁滴定法对还原后样品进行化学分析,得到全铁和金属铁含量,以计算其金属化率。通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和能谱(EDS)分析观察还原前后试样物相和微观形态变化。

表 1.1 铁精粉工业分析

成分	TFe(全铁)	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P
质量分数①/%	63.38	26.23	1.94	0.33	4.49	1.49 [™]	0.15	0.042

① 全书涉及固体的百分比都为质量分数,没有特殊情况,将不做特别说明。