

冶/反/工/  
金/应/程/丛/  
学/书/

# 熔 融 还 原

冶金工业出版社

国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

# 熔融还原

---

杨天钧 黄典冰 孔令坛 著

北 京  
冶金工业出版社  
1998

## 内 容 简 介

本书在熔融还原过程热力学和动力学的基础上,讨论了煤气改质、熔融还原过程操作线图和泡沫渣等问题;从技术经济角度分析了近年来世人关注的 COREX、DIOS、AISI、Hismelt、CCF 和 Romelt 等六大流程;结合作者近年来研究的心得,介绍了含碳球团还原机理、冷固球团技术和作为预还原过程的物料平衡和热平衡的研究成果;从物料平衡和热平衡出发,研究了熔融还原过程的能量利用,并提出了含碳球团煤气循环熔融还原流程(PCG 流程)的概念。

本书可作为冶金、能源、化工等行业的工程技术人员,以及大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

熔融还原/杨天钧等著, -北京:冶金工业出版社,

1998.9

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-2150-5

I. 熔… II. 杨… III. 熔融还原-直接炼铁

N. TF557

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 28936 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 美术编辑 王耀忠 责任校对 朱 翔 责任印制 牛晓波

北京新兴胶印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1998 年 9 月第 1 版, 1998 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.625 印张; 230 千字; 262 页; 1—1500 册

24.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天，已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中，冶金工业作为一门基础材料工业，发挥了重大作用。本世纪上半叶以来，许多冶金学家应用化学热力学知识，对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究，这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来，冶金学知识体系和结构，随着冶金技术的发展和相关学科的进步，也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用，使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构，已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此，诸如，对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等，均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中，许多冶金学者努力学习相关学科，如现代化学工程、计算流体力学 (CFD)、传输理论等方面的知识，积极利用

数学解析方法和计算技术,来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题,并获得重要进展。日本学者巖岩、瀨川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新进展,于70年代提出冶金反应工程学概念,并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容的研究方面,起步于70年代末。近二十多年,国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势,吸收国外先进经验,注意促进多学科知识的交叉,逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中,并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果,增进国内外学术交流,改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件,中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者,并争取国外学者的参与或合作,编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致分为介绍冶金反应工程学理论的著作(一部分为高校教材或教学参考书)和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画排列,带\*号者为执行小组成员):

- 干 勇 (冶金部钢铁研究总院)
- \* 曲 英 (北京科技大学)
- 任崇信 (冶金工业出版社)
- 仲增楠 (中国金属学会)
- 杨天钧 (北京科技大学)
- 张丙怀 (重庆大学)
- 李尚诣 (冶金工业部科技司)
- 贺友多 (包头钢铁学院)
- 柯家骏 (中国科学院化工冶金研究所)
- 徐德龙 (西安建筑科技大学)

梅 炽 (中南工业大学)

\* 萧泽强 (东北大学)

赫翼成 (东北大学)

\* 蔡志鹏 (中国科学院化工冶金研究所)

戴永年 (昆明理工大学)

魏季和 (上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽，编写工作量大，且系初次组织，经验不足，错误和不足之处在所难免，请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

# 前言

近年来，作为跨世纪钢铁冶金新流程两大前沿课题之一的熔融还原技术发展很快，作者有幸参加国家攀登计划工程与技术科学项目“熔融还原技术基础研究”，根据科研和研究生教学中积累的资料和心得撰写本书，谨供冶金、能源、化工等行业的工程技术人员和在校师生参考。

作者于1991年出版了《熔融还原技术》一书，得到许多专家、同行的支持和鼓励。由于熔融还原技术发展迅速，本书收集了一些新的资料和作者的科研成果。作者由基础研究的最新进展出发，在分析了熔融还原过程热力学和动力学的基础上，侧重讨论了煤气改质、熔融还原过程操作线图和泡沫渣等问题，然后由技术经济的角度对于近年来世人关注的六大流程（COREX 流程、DIOSS 流程、AISI 流程、HISMELT 流程、CCF 流程和 Romelt 流程）进行了分析。作为近年来研究的心得，作者介绍了含碳球团还原机理、冷固球团技术和作为预还原过程的物料平衡和热平衡的研究成果。与此同时，作者从物料平衡和热平衡出发，研究了熔融还原过程的能量利用，并提出了含碳球团煤气循环熔融还原流程（PCG 流程）的概念。

本书由杨天钧、黄典冰、孔令坛编著，曲英、王新华、袁章福、吴铿、张建良、曾加庆、高斌、杨学民、龚一波等同志为本

EA46106

书提出了宝贵意见或参加了资料的收集工作，在此表示诚挚的谢意。

限于作者水平，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

杨天钧 黄典冰 孔令坛

1996年10月于北京科技大学



---

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| <b>1 绪论 .....</b>       | <b>1</b> |
| 参考文献 .....              | 8        |
| <b>2 熔融还原基础研究 .....</b> | <b>9</b> |
| 2.1 熔融还原的原理及发展 .....    | 9        |
| 2.2 预还原基础研究 .....       | 12       |
| 2.2.1 预还原反应热力学 .....    | 12       |
| 2.2.2 预还原过程能耗分析 .....   | 13       |
| 2.2.3 预还原过程能耗图解 .....   | 16       |
| 2.2.4 预还原反应动力学 .....    | 21       |
| 2.3 终还原基础研究 .....       | 27       |
| 2.3.1 终还原反应热力学 .....    | 27       |
| 2.3.2 终还原过程能耗分析 .....   | 30       |
| 2.3.3 终还原过程能耗图解 .....   | 34       |
| 2.3.4 终还原反应动力学 .....    | 42       |
| 2.4 煤气改质 .....          | 52       |
| 2.4.1 煤气改质物料及热平衡 .....  | 53       |
| 2.4.2 煤气改质的作用 .....     | 54       |
| 2.5 熔融还原全过程操作线图分析 ..... | 56       |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 2.5.1 | 熔融还原过程的操作线图             | 56  |
| 2.5.2 | 预还原度平衡点                 | 57  |
| 2.5.3 | 煤气改质对熔融还原过程的影响          | 58  |
| 2.6   | 泡沫渣的形成和抑制               | 61  |
| 2.6.1 | 泡沫渣的形成机理及影响因素           | 61  |
| 2.6.2 | 泡沫渣指数                   | 63  |
|       | 参考文献                    | 64  |
| 3     | 近年来开发的新流程技术及经济分析        | 67  |
| 3.1   | COREX 流程                | 68  |
| 3.1.1 | 工艺流程                    | 69  |
| 3.1.2 | 南非伊斯科尔公司 COREX 炉的技术经济指标 | 72  |
| 3.1.3 | COREX 的发展               | 81  |
| 3.1.4 | 主要问题                    | 84  |
| 3.2   | DIOS 流程                 | 85  |
| 3.2.1 | DIOS 主要研究结果             | 86  |
| 3.2.2 | DIOS 半工业性试验             | 97  |
| 3.2.3 | DIOS 流程的技术及经济特征         | 103 |
| 3.3   | AISI 流程                 | 105 |
| 3.3.1 | 工艺流程                    | 106 |
| 3.3.2 | AISI 流程产量及消耗主要影响因素      | 107 |
| 3.3.3 | AISI 流程技术及经济指标          | 107 |
| 3.4   | HIs melt 流程             | 110 |
| 3.4.1 | 工艺流程                    | 111 |
| 3.4.2 | SSPP 及 HRDF 试验结果        | 113 |
| 3.4.3 | HIs melt 流程的技术及经济评价     | 116 |
| 3.4.4 | HIs melt 流程应用前景         | 121 |
| 3.5   | CCF 流程                  | 121 |
| 3.5.1 | 工艺流程                    | 122 |
| 3.5.2 | 旋风熔化器                   | 123 |
| 3.5.3 | 旋风熔化的试验结果               | 124 |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 3.5.4 | CCF 过程的物料平衡和热平衡 .....           | 125 |
| 3.5.5 | CCF 流程技术及经济评价 .....             | 126 |
| 3.6   | Romelt (PJV) 流程 .....           | 127 |
| 3.6.1 | 工艺流程 .....                      | 128 |
| 3.6.2 | Romelt 流程的技术特点 .....            | 130 |
| 3.6.3 | Romelt 工艺半工业试验 .....            | 132 |
| 3.6.4 | Romelt 流程的经济技术指标 .....          | 133 |
| 3.6.5 | Romelt 流程的主要特点 .....            | 138 |
| 3.7   | 熔融还原技术及能耗特点 .....               | 139 |
|       | 参考文献 .....                      | 143 |
| 4     | 含碳球团研究的新进展 .....                | 147 |
| 4.1   | 含碳球团还原机理 .....                  | 148 |
| 4.1.1 | 固-固还原机理 .....                   | 148 |
| 4.1.2 | 二步还原机理 .....                    | 150 |
| 4.2   | 含碳球团还原过程模型 .....                | 156 |
| 4.2.1 | 界面反应模型 .....                    | 157 |
| 4.2.2 | 综合模型 .....                      | 160 |
| 4.3   | 含碳球团还原特点 .....                  | 166 |
| 4.3.1 | 含碳球团还原过程 .....                  | 167 |
| 4.3.2 | 含碳球团还原过程特点及其在熔融还原中的<br>应用 ..... | 178 |
| 4.3.3 | 含碳球团的直接还原度 ( $R_d$ ) .....      | 179 |
| 4.3.4 | 含碳球团直接还原度的变化 .....              | 180 |
| 4.4   | 含碳球团冷固结技术 .....                 | 185 |
| 4.4.1 | 波兰特水泥固结法 .....                  | 186 |
| 4.4.2 | 高压蒸养法 .....                     | 187 |
| 4.4.3 | 水玻璃固结法 .....                    | 189 |
| 4.4.4 | 含碳球团其他冷固结法 .....                | 191 |
| 4.5   | 含碳球团预还原过程物料平衡计算和热平衡<br>计算 ..... | 192 |

|          |                             |            |
|----------|-----------------------------|------------|
| 4.5.1    | 含碳球团中碳的直接还原度与煤气条件的关系        | 192        |
| 4.5.2    | 含碳球团竖炉还原过程分析                | 194        |
|          | 参考文献                        | 204        |
| <b>5</b> | <b>熔融还原过程能量利用及熔融还原技术展望</b>  | <b>208</b> |
| 5.1      | 熔融还原主要技术经济指标                | 208        |
| 5.1.1    | 预还原主要技术经济指标                 | 208        |
| 5.1.2    | 终还原主要技术经济指标                 | 211        |
| 5.2      | 终还原过程物料平衡计算和热平衡计算           | 213        |
| 5.2.1    | 终还原过程物料平衡计算                 | 214        |
| 5.2.2    | 终还原过程热平衡计算                  | 222        |
| 5.3      | 熔融还原全流程能耗分析                 | 228        |
| 5.3.1    | 国际上主要熔融还原流程的能耗计算            | 228        |
| 5.3.2    | 国际上主要熔融还原流程的工序能耗分析          | 230        |
| 5.4      | 含碳球团煤气循环熔融还原流程 (PCG)        | 234        |
| 5.4.1    | 工艺流程                        | 235        |
| 5.4.2    | PCG 流程能耗分析                  | 235        |
| 5.4.3    | PCG 流程的技术特点                 | 238        |
| 5.5      | 含碳球团煤气循环熔融还原流程 (PCG) 的预还原过程 | 240        |
| 5.5.1    | 预还原过程模型                     | 240        |
| 5.5.2    | 含碳球团煤气循环预还原过程               | 243        |
| 5.6      | 熔融还原技术展望                    | 247        |
| 5.6.1    | 非焦炼铁势在必行                    | 247        |
| 5.6.2    | 熔融还原与短流程                    | 250        |
| 5.6.3    | 广义的熔融还原                     | 254        |
|          | 参考文献                        | 257        |
|          | 索引                          | 258        |

# 1

## 绪 论

日本学者预测了下一世纪初期工业发达国家钢铁冶金流程发展态势,认为以铁矿石为原料的冶金流程中,熔融还原将有较大发展(图 1-1)<sup>[1]</sup>,并指出熔融还原和近终形连铸是跨世纪钢铁工业新流程的两大前沿课题。

熔融还原是指非高炉炼铁方法中那些获得液态生铁的冶炼工艺。本世纪 60 年代瑞典冶金学家埃克托普(S. Eketorp)为了将这种生产液态生铁的方法和直接还原相区别,称其为熔融还原。早期的熔融还原技术思想是既无需铁矿粉造块又不使用昂贵的冶金焦炭,既能生产高质量液态生铁又极少污染环境的钢铁冶金新工艺。经过多年的研究开发,当前一般认为即使利用烧结矿、球团矿作为原料,甚至使用少量焦炭,但只要不以其作为主要燃料的生产液态铁水的非高炉炼铁方法均属于熔融还原的范畴。

为了说明钢铁冶金流程发展的趋势,应该说明几种主要流程的还原氧化特点(图 1-2)<sup>[2]</sup>。传统的高炉—转炉流程(BF—BOF 流程)是以铁矿石(或人造块矿)和焦炭等为原料分层装入高炉,从风口鼓入热风,焦炭燃烧产生热量和还原气体,使铁氧化物还原熔化,生产的铁水在氧气转炉中冶炼,使其中的含碳量达到所需的各种钢种的要求,其还原、氧化过程如图 1-2 中的  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$  曲线所示。直接还原—电炉流程(DR—EAF 流程)是由竖炉或回转窑生产直接还原铁(DRI——海绵铁或 HBI——热压直接还原铁),并将其单独或与废钢一起装入电炉熔炼,使脉石与铁分离进入渣中,生产合格钢水,其还原氧化过程如图 1-2 中  $A \rightarrow D \rightarrow E$  曲线所示。二步法熔融还原—氧气转炉流程(SR—BOF 流程)的典型流程是由含铁原料在流态化或竖炉中预还原,其还原反应与

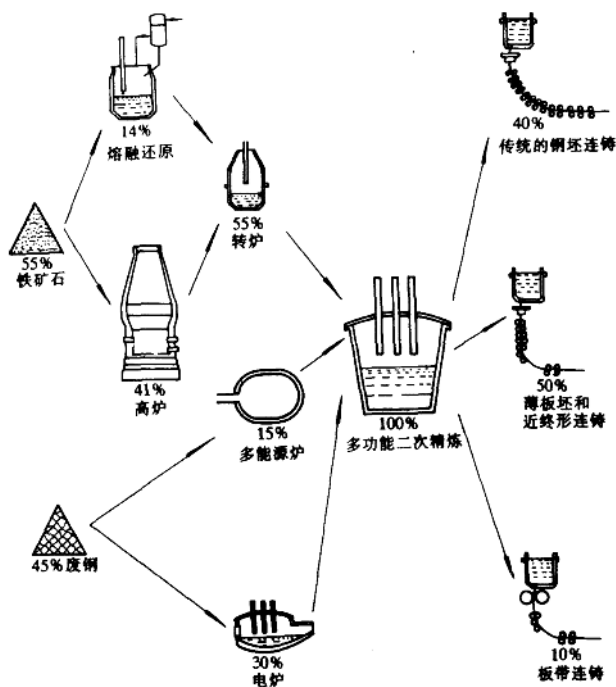


图 1-1 2020 年世界钢铁冶金流程预测<sup>[1]</sup>

直接还原相近，但可能还原度较低，然后在终还原反应器（如铁浴）中冶炼，其还原氧化过程如图 1-2 中  $A \rightarrow G \rightarrow B$  曲线所示。

由上述还原氧化过程的分析出发，熔融还原工艺将具有以下特点：

(1) 有效利用能源。世界范围焦煤储量仅占煤总储量的 10% 左右<sup>[3]</sup>。我国煤炭资源丰富，已探明的储量居世界第三位。但我国焦煤资源并不丰富，我国焦煤只占煤炭储量的 27% 左右，其中结焦性好的只占炼焦煤的 19.61%，粘结性好的肥煤占 13.05%<sup>[2]</sup>，

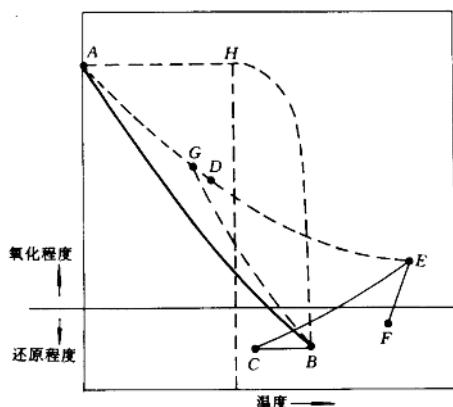


图 1-2 钢铁生产流程氧化-还原过程的比较

A—铁矿石；B—高炉出炉铁水；C—装入炼钢炉的铁水；D—海绵铁；E—出炉钢水；F—成品钢；A→B—高炉过程；C→E—氧气转炉炼钢过程；A→G—预还原；A→D—直接还原铁；D→E—电炉炼钢；G→B—终还原；A→G→B—二步法熔融还原；A→H→B—一步法熔融还原

而且分布不均。华北地区占 62%（其中山西省占 50%左右），其次是华东地区、东北、中南地区各占约 4%，许多地区焦煤匮乏。由于地区分布不均，煤炭运输给交通造成很大压力；加上焦发生产还需受到洗煤和炼焦设备投资的制约，因此，采用熔融还原技术，用非焦煤生产铁水是切合中国资源状况的冶金流程。熔融还原还可以产生高热值煤气或电能，这些二次新能源可以满足冶金厂能量平衡要求或其他行业的需要。最后，如能取消铁矿粉造块、炼焦工序，吨铁能耗可望节约 20%以上。

(2) 有利环境保护。熔融还原是一种比较洁净的钢铁生产流程。1990 年法国技术监察协会对现有的钢铁流程和熔融还原流程最终尾气排污量测定和预测结果如表 1-1 所示。从表中的数据可以看出，传统的炼焦、烧结—高炉流程对环境的污染远比熔融还

原流程严重得多。炼焦、烧结工序对环境的污染占钢铁流程的70%以上。焦炉在装煤、出焦时的煤气泄漏十分严重,1992年美国伯利恒钢铁公司因此被罚款670万美元;炉龄较长的焦炉炉门密封不严是难以解决的通病;烧结过程排放大量的粉尘及大量污染物质也难以解决。熔融还原流程不需建设焦炉和烧结机,将消除上述污染源,大大改善环境品质。

表 1-1 吨铁排放物中炉尘及有害物质量 (g)

| 炉尘及有害物          | 焦炉、烧结—高炉流程 |                  | 熔融还原流程     |
|-----------------|------------|------------------|------------|
|                 | 1990 年实测数据 | 预计到 2000 年可达到的数据 | 1990 年实测数据 |
| SO <sub>2</sub> | 1410       | 1000             | 53         |
| NO <sub>x</sub> | 1090       | 810              | 114        |
| 酚               | 100        | 60               | 0.04       |
| 硫化物             | 180        | 120              | 0.01       |
| 炉尘              | 1220       | 310              | 130        |

(3) 流程投资降低,生产规模灵活。熔融还原取消了炼焦、烧结工序,缩短流程,将可以节省钢铁生产基建和设备投资15%~20%以上。而且熔融还原可以在30万~70万t/a或100万~200万t/a规模的中小钢铁厂中取得良好的经济效益。虽然国内外冶金学家对跨世纪钢铁生产流程规模尚有争议,但从近年实践可以看出,面向市场的紧凑式流程(或称短流程)具有强大的生命力。如采用熔融还原流程,后续近终形连铸,其经济效益将超过当前的直接还原—电炉—近终形连铸的短流程。

(4) 提高生产效率。前期造块工艺,高炉软熔带的影响及高炉的许多要求,在新的熔融还原流程中将部分或全部取消。煤基直接还原的应用将取代焦炉,粉矿和天然块矿的直接应用将全部或部分取代烧结或球团,以颗粒流、颗粒反应为主的还原反应替

代了传统的气固相（或部分液相）反应。值得指出的是，高炉以气固相还原为主，反应时间需以小时计，生产率难以提高，加上软熔带的存在，使得高炉冶炼过程难以进一步强化。熔融还原采用颗粒反应进行预还原和高温下的熔态终还原，反应过程将以分钟计算，故而其生产率将可以大大提高，而且熔融还原的能量密度高，易于强化。

熔融还原技术的主要特点如表 1-2 所示。目前熔融还原研究开发成为世界潮流有其深刻的技术经济背景，主要在于：

(1) 制氧技术和电能转换技术的发展。第二次世界大战前，冶金工业使用富氧空气被视为一种奢侈的行为，更谈不上全氧冶炼。战后直至今天，低压制氧技术、大型制氧机的出现和变压吸附制氧技术的不断完善，使制氧电耗降至  $0.5 \sim 0.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ （标态）。氧气转炉的工业试验取得成功，无氮高炉在日本和俄罗斯开始工业实践，富氧煤粉燃烧不但获得高温而且加速了燃烧过程，从而有可能开发以煤为主要燃料的冶金流程。

煤粉燃烧需要用氧（实际上也是用电能转换）或者用高温电热技术（即电弧炉技术）来强化。70 年代以来，不断更新的等离子体电弧技术已广泛进入工业领域，等离子体发生器已达到 MW 级，平均寿命可达数百小时。80 年代瑞典已有 8 台 6MW 的非转移弧生产铬铁的等离子体电炉投入工业生产。能量高度集中的高效电热转换的等离子体电弧将在熔融还原流程中发挥巨大作用。

表 1-2 熔融还原技术特点

| 项 目  | 目前钢铁生产流程存在的主要问题 | 熔融还原流程的特点                         |
|------|-----------------|-----------------------------------|
| 能量利用 | 焦煤匮乏，我国焦煤资源分布不均 | 非焦炼铁；产生新能源（高热值煤气或电能）；吨铁能耗可望节约 20% |
| 环境污染 | 炼焦、烧结工序对环境污染严重  | 不建焦炉、不建烧结厂，消除钢铁工业污染 70% 以上        |