

# 现代有色金属 侧吹冶金技术

Modern Side-blown Smelting Technology for  
Nonferrous Metals

李东波 陈学刚 王忠实 著



冶金工业出版社  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

# 现代有色金属侧吹冶金技术

李东波 陈学刚 王忠实 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

## 内 容 简 介

本书详细地介绍了国内外侧吹熔炼技术的发展现状及分类、侧吹浸没燃烧技术的机理及应用、侧吹强化搅拌模拟仿真、侧吹冶炼领域的智能优化控制系统等内容；并且重点介绍了侧吹浸没熔池熔炼技术已在液态铅渣还原、铜精矿、废铅酸蓄电池铅膏、有色金属冶炼废物、锌浸渣等固体废物和有色金属回收等领域实现的工业化应用。本书内容丰富，数据翔实，技术先进，具有较强的专业理论价值和工程应用价值。

本书可供从事侧吹熔炼技术、有色金属冶金尤其是火法冶金、城市矿山回收等领域的科研工作者和工程技术人员阅读，也可供大专院校有关师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代有色金属侧吹冶金技术/李东波, 陈学刚, 王忠实著. —  
北京: 冶金工业出版社, 2019. 6

ISBN 978-7-5024-7916-9

I. ①现… II. ①李… ②陈… ③王… III. ①氧气侧吹  
转炉—有色金属冶金 IV. ①TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 216559 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 王 双 张熙莹 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7916-9

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京博海升彩色印刷有限公司印刷  
2019 年 6 月第 1 版，2019 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；22.25 印张；536 千字；343 页

238.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

# 序

中国有色金属冶金技术近十年来取得了巨大的进步。从20世纪70年代开始引进国外先进技术，到自主创新工艺和装备，有色金属工业发生了翻天覆地的变化。中国有色金属产量早已位居世界第一，有色冶金的主流工艺和装备已经处于世界先进水平，其中不乏中国独创的新技术，这为中国有色金属的可持续发展奠定了坚实的基础。

《现代有色金属侧吹冶金技术》一书的作者是李东波（教授级高工）、陈学刚（高级工程师）、王忠实（教授级高工）。三位作者长期从事有色冶金的科学研究和工程设计工作，不仅具有扎实的理论基础，也具有十分丰富的大规模工程化的实践经验，他们及其团队为侧吹熔炼技术的创新发展作出了重要的贡献。

侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术是以多通道侧吹喷枪，向熔池内高速喷入富氧空气和燃料，以剧烈搅动熔体和直接燃烧向熔体补热。当炉料加入熔炼区后，碳酸盐或硫酸盐物料随熔体的搅动快速散布于熔体之中，与周围熔体发生快速传热、传质，促进炉料的加热、分解、熔化等过程。目前该技术已在液态铅渣还原、铜精矿、废铅酸蓄电池铅膏、有色金属冶炼废物、锌浸渣等固体废物和有价金属回收等领域实现工业化应用。侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术物料适应性强，特别适用于不发热物料的处理，对有色金属二次资源的循环利用具有重要意义。

该书系统地总结了国内外侧吹冶金技术的发展历程、各种侧吹冶金的炉型和特点，重点介绍了中国恩菲工程技术有限公司开发的具有自主知识产权的侧吹浸没燃烧技术。书中对技术原理、工艺过程和设备以及工业实践都有详细的描述。此外，对侧吹过程的数值模拟仿真、水力模型以及智能优化控制研究，更是该书的鲜明特色。相信该书的出版对有色金属行业的科研人员、设计工作者及大专院校师生具有很好的指导作用，也可以供有关部门和企业的管理者参考。

李东波 著

2019年5月

# 前 言

侧吹熔炼技术目前已在液态铅渣还原、废铅酸蓄电池铅膏、有色金属冶炼废物、锌浸渣、铜精矿等固体废物和有价金属回收等领域实现了工业化应用，对于有色金属冶金、节能环保等领域的技术进步起到了重要的推动作用。从目前应用情况和未来推广前景看，这项技术必将成为对行业技术进步乃至国民经济发展具有重要战略意义的核心技术。但是目前国内介绍侧吹冶炼技术方面的著作较少，为此，作者精心撰写了本书，目的是为从事有色金属冶金、城市矿山回收领域的人员提供重要的系统资料。

本书详细地介绍了目前国内侧吹技术的发展现状及分类，还根据目前城市矿产资源利用、危险废弃物综合利用和处置的发展与市场的需要，重点介绍了侧吹浸没燃烧技术的机理及应用、侧吹强化搅拌模拟仿真、侧吹处理铜镍精矿技术等最新成果。为了适应智能冶炼和绿色冶炼的要求，对智能优化控制系统在侧吹冶炼领域的应用本书也有所涉及。希望本书的出版能对我国的有色金属冶金事业，特别是熔池熔炼技术的进步和升级改造起到一定的参考和推进作用。

本书是作者及其技术研究团队多年来在有色金属冶炼领域集体研究成果的总结，黎敏、曹珂菲、许良、冯双杰、李建辉、吴玲、吴金财、张云良等专家及工程师在相关研究方面提供了大力支持；研发团队王书晓、余跃、苟海鹏、代文彬、李鹏等博士协助开展了大量的研究工作，为相关实验开展和研究成果报告成稿作出了重要贡献。

本书在写作过程中得到了中国恩菲工程技术有限公司董事长陆志方、总经理伍绍辉、副总经理兼总工程师刘诚等领导的亲切关怀，以及合作企业豫光金铅股份有限公司、云南驰宏锌锗股份有限公司、湖北金洋冶金股份有限公司等单位的大力支持与鼓励，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

李东波

2019年5月

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1 现代侧吹熔池熔炼技术的发展 .....           | 1  |
| 1.1 国外侧吹熔池熔炼技术的发展 .....         | 1  |
| 1.1.1 瓦纽科夫熔炼技术 .....            | 1  |
| 1.1.2 HIsarna 工艺 .....          | 4  |
| 1.1.3 Romelt 工艺 .....           | 5  |
| 1.2 我国侧吹熔池熔炼技术发展概况 .....        | 6  |
| 1.2.1 侧吹熔池熔炼技术分类 .....          | 6  |
| 1.2.2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术的发展概况 .....   | 8  |
| 1.2.3 瓦纽科夫技术在我国的发展概况 .....      | 12 |
| 1.3 展望 .....                    | 13 |
| 参考文献 .....                      | 14 |
| 2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术 .....            | 15 |
| 2.1 技术的缘起 .....                 | 15 |
| 2.2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼工艺 .....          | 15 |
| 2.2.1 侧吹浸没燃烧熔池熔炼法的原理及炉体结构 ..... | 15 |
| 2.2.2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术的特点 .....     | 15 |
| 2.2.3 配套系统 .....                | 18 |
| 2.2.4 炉体安全运行监控系统 .....          | 18 |
| 2.3 工业化开发与应用 .....              | 19 |
| 2.3.1 工业化设计 .....               | 19 |
| 2.3.2 工业应用 .....                | 20 |
| 2.3.3 SSC 技术主要拓展应用方向 .....      | 22 |
| 2.4 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术优势 .....        | 26 |
| 参考文献 .....                      | 27 |
| 3 侧吹熔池熔炼炉的发展和特点 .....           | 28 |
| 3.1 侧吹炉的分类 .....                | 28 |
| 3.1.1 烟化炉 .....                 | 28 |
| 3.1.2 白银炉 .....                 | 29 |
| 3.1.3 瓦纽科夫炉 .....               | 30 |
| 3.1.4 其他侧吹炉 .....               | 30 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 3.2 富氧侧吹熔炼炉 .....           | 31  |
| 3.2.1 富氧侧吹熔炼炉技术原理 .....     | 31  |
| 3.2.2 富氧侧吹熔炼炉的结构 .....      | 31  |
| 3.2.3 富氧侧吹熔炼炉的特点 .....      | 32  |
| 3.2.4 富氧侧吹熔炼炉的主要技术指标 .....  | 33  |
| 3.3 侧吹浸没燃烧熔池熔炼炉 .....       | 34  |
| 3.3.1 侧吹浸没燃烧熔池熔炼炉技术原理 ..... | 34  |
| 3.3.2 设备特点 .....            | 35  |
| 参考文献 .....                  | 38  |
| <br>                        |     |
| 4 侧吹熔池熔炼过程的数值模拟仿真 .....     | 39  |
| 4.1 CFD 软件简介及应用 .....       | 39  |
| 4.1.1 概述 .....              | 39  |
| 4.1.2 通用商业 CFD 软件简介 .....   | 40  |
| 4.1.3 CFD 软件操作流程 .....      | 42  |
| 4.1.4 CFD 在冶金行业中的应用 .....   | 43  |
| 4.2 侧吹熔池熔炼过程的数值模拟 .....     | 44  |
| 4.2.1 物理模型及物性参数设置 .....     | 44  |
| 4.2.2 数学模型 .....            | 45  |
| 4.2.3 参数设置 .....            | 48  |
| 4.2.4 计算结果及分析 .....         | 49  |
| 参考文献 .....                  | 52  |
| <br>                        |     |
| 5 侧吹熔池熔炼水力模型研究 .....        | 53  |
| 5.1 概述 .....                | 53  |
| 5.2 水力模型理论基础 .....          | 54  |
| 5.3 水力模型试验装置 .....          | 56  |
| 5.4 圆形侧吹炉内熔池搅拌机理研究 .....    | 57  |
| 5.4.1 模型结构参数及实验参数 .....     | 57  |
| 5.4.2 实验方案 .....            | 58  |
| 5.4.3 实验结果及分析 .....         | 59  |
| 5.4.4 圆形侧吹炉水模型研究结论 .....    | 79  |
| 5.5 矩形侧吹炉内熔池搅拌机理研究 .....    | 79  |
| 5.5.1 模型结构参数及实验参数 .....     | 80  |
| 5.5.2 实验方案 .....            | 81  |
| 5.5.3 实验结果及分析 .....         | 82  |
| 5.5.4 矩形侧吹炉水模型研究结论 .....    | 106 |
| <br>                        |     |
| 6 侧吹浸没燃烧冶炼技术的工业实践 .....     | 108 |
| 6.1 液态铅渣侧吹还原的开发及应用 .....    | 108 |

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.1.1 | 技术开发背景                             | 108 |
| 6.1.2 | 工业试验示范厂的研发过程                       | 109 |
| 6.1.3 | 会泽冶炼厂液态高铅渣侧吹还原炉的工业实践               | 118 |
| 6.1.4 | 侧吹炉开炉                              | 133 |
| 6.2   | SSC技术在再生铅领域的应用                     | 142 |
| 6.2.1 | 概述                                 | 142 |
| 6.2.2 | 再生铅回收技术                            | 144 |
| 6.2.3 | 扩大试验研究                             | 148 |
| 6.2.4 | 湖北金洋铅膏连续熔池熔炼工艺示范项目                 | 156 |
| 6.2.5 | 再生铅生产烟气脱硫工艺                        | 166 |
| 6.2.6 | 侧吹浸没燃烧工艺处理再生铅最新进展                  | 172 |
| 6.2.7 | 硫酸铅渣处理方案                           | 175 |
| 6.2.8 | 喷枪烧损分析                             | 177 |
| 6.3   | SSC技术在锌浸渣等二次含锌物料回收利用领域的应用          | 198 |
| 6.3.1 | 开发背景                               | 199 |
| 6.3.2 | 国内外技术发展现状和趋势                       | 199 |
| 6.3.3 | 侧吹熔炼技术方案                           | 200 |
| 6.3.4 | 铅锌共生氧化矿和锌浸渣侧吹熔炼及烟气脱硫技术             | 203 |
| 6.3.5 | 2.5m <sup>2</sup> 侧吹熔炼技术与装备研究      | 210 |
| 6.3.6 | 13.4m <sup>2</sup> 侧吹炉产业化技术研究及生产实践 | 218 |
| 6.3.7 | 现有渣处理企业的工艺升级方案                     | 225 |
| 6.3.8 | 侧吹连续熔化—侧吹烟化技术的新进展                  | 229 |
| 6.3.9 | 锌浸出渣处理工程设计实例                       | 231 |
| 6.4   | SSC技术在粉煤灰挥发提锗中的应用                  | 235 |
| 6.4.1 | 锗的资源及地球化学性质                        | 235 |
| 6.4.2 | 锗的提取工艺简介                           | 235 |
| 6.4.3 | 锗的挥发原理分析                           | 236 |
| 6.4.4 | 煤烟灰侧吹工艺中试试验                        | 241 |
| 6.4.5 | 侧吹挥发富集锗的工程设计                       | 250 |
|       | 参考文献                               | 252 |
| 7     | 鼓泡法——富氧侧吹技术在硫化铜精矿冶炼中的应用            | 253 |
| 7.1   | 富氧侧吹熔炼工艺                           | 253 |
| 7.1.1 | 熔炼原理                               | 253 |
| 7.1.2 | 工艺流程                               | 253 |
| 7.1.3 | 原料、燃料和熔剂                           | 254 |
| 7.1.4 | 熔炼产物                               | 255 |
| 7.1.5 | 余热回收                               | 256 |
| 7.1.6 | 烟气收尘                               | 256 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1.7 | 烟气制酸 .....                                      | 257 |
| 7.2   | 富氧侧吹熔炼过程作业 .....                                | 257 |
| 7.2.1 | 配料与上料 .....                                     | 257 |
| 7.2.2 | 供风与供氧 .....                                     | 257 |
| 7.2.3 | 铜钨与炉渣的排放 .....                                  | 258 |
| 7.2.4 | 车间环境控制 .....                                    | 259 |
| 7.3   | 富氧侧吹熔炼过程控制 .....                                | 259 |
| 7.3.1 | 参数检测 .....                                      | 259 |
| 7.3.2 | 富氧侧吹熔炼工艺的参数控制 .....                             | 261 |
| 7.4   | 富氧侧吹熔炼工艺的物料平衡与热平衡 .....                         | 263 |
| 7.4.1 | 物料平衡 .....                                      | 263 |
| 7.4.2 | 热平衡 .....                                       | 266 |
| 7.5   | 富氧侧吹熔炼工艺的应用及其主要生产技术指标 .....                     | 266 |
| 7.5.1 | 富氧侧吹熔炼工艺的应用 .....                               | 266 |
| 7.5.2 | 富氧侧吹熔炼工艺的主要生产技术指标 .....                         | 267 |
| 8     | 侧吹浸没燃烧技术的应用展望 .....                             | 268 |
| 8.1   | SSC 在工业电镀污泥以及协同处置电子垃圾无害化、资源化处置领域的<br>应用展望 ..... | 268 |
| 8.1.1 | 工业电镀污泥和电子垃圾概述 .....                             | 268 |
| 8.1.2 | 侧吹浸没燃烧熔炼技术无害化、资源化处置方法 .....                     | 274 |
| 8.2   | 侧吹炉处理硫化锑精矿的应用展望 .....                           | 296 |
| 8.2.1 | 目前锑冶炼行业现状 .....                                 | 296 |
| 8.2.2 | 复合喷吹氧化熔炼—熔融还原直接炼锑工艺 .....                       | 297 |
| 8.2.3 | 侧吹浸没燃烧氧化挥发工艺 .....                              | 299 |
| 8.3   | 粗锡 SSC 还原熔炼 .....                               | 300 |
| 8.3.1 | 锡冶炼现状 .....                                     | 300 |
| 8.3.2 | 粗锡还原熔炼技术 .....                                  | 300 |
| 8.3.3 | SSC 炉还原熔炼 .....                                 | 303 |
| 8.3.4 | SSC 炉粗锡冶炼展望 .....                               | 307 |
| 8.4   | 侧吹浸没燃烧技术处理红土镍矿技术 .....                          | 308 |
| 8.4.1 | 红土矿现有处理工艺概述 .....                               | 308 |
| 8.4.2 | 富氧侧吹煤粉熔融还原技术的提出 .....                           | 313 |
| 8.4.3 | 富氧侧吹粉煤熔融还原红土矿技术 .....                           | 314 |
| 8.4.4 | 渣型选择 .....                                      | 321 |
| 8.4.5 | SSC 技术应用前景展望 .....                              | 322 |
| 9     | 智能优化控制系统在侧吹冶炼领域的应用 .....                        | 323 |
| 9.1   | 概述 .....  | 323 |

---

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 9.1.1 | 智能工厂发展的背景 .....             | 323 |
| 9.1.2 | 当前有色冶炼生产过程控制所面临的主要问题 .....  | 323 |
| 9.1.3 | 在线智能优化控制系统稳定侧吹炉生产的作用 .....  | 323 |
| 9.2   | 在线智能优化控制系统组成 .....          | 324 |
| 9.3   | 在线智能优化控制系统的控制逻辑 .....       | 325 |
| 9.4   | 在线智能优化控制系统的开发 .....         | 327 |
| 9.4.1 | 建模方法 .....                  | 327 |
| 9.4.2 | 建模及开发工具 .....               | 327 |
| 9.5   | 在线智能优化控制系统的功能及界面 .....      | 328 |
| 9.5.1 | 物料成分输入 .....                | 328 |
| 9.5.2 | 数模参数设定和变更 .....             | 330 |
| 9.5.3 | 目标参数反馈修正 .....              | 331 |
| 9.5.4 | OPC 数据通信 .....              | 331 |
| 9.5.5 | 检测输入 .....                  | 334 |
| 9.5.6 | 数据库架构存储 .....               | 334 |
| 9.6   | 软件部分源码 .....                | 337 |
| 9.6.1 | OPC 服务器数据通信模块 .....         | 338 |
| 9.6.2 | 模型与数据库交互 .....              | 340 |
| 9.7   | 机器学习算法在侧吹熔炼智能控制系统上的应用 ..... | 342 |

# 1 现代侧吹熔池熔炼技术的发展

侧吹熔池熔炼技术是从设于熔炼炉侧墙浸没熔池的风嘴或喷枪直接将富氧空气或燃料鼓入金属熔体或炉渣中，加入熔池的物料由于受到鼓风的强烈搅动作用，快速浸没于熔体之中，完成物理化学反应的一种强化熔池熔炼技术。

目前，此类方法在有色金属领域中的技术应用有：侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术、瓦纽科夫熔炼技术、诺兰达熔炼技术、特尼恩特熔炼技术等；在非高炉炼铁领域的技术应用有：Hlsarna 工艺、Romelt 工艺。

## 1.1 国外侧吹熔池熔炼技术的发展

### 1.1.1 瓦纽科夫熔炼技术

#### 1.1.1.1 瓦纽科夫法的起源

瓦纽科夫法是苏联重有色冶金专家瓦纽科夫 (A. V. Vanyukov) 教授研发并推广应用的熔池熔炼技术。瓦纽科夫教授在广泛研究铜精矿熔炼过程中物理化学性质、硫化物氧化机理、动力学和相分离的基础上，提出了在熔体中鼓入富氧空气直接熔炼硫化物原料的新工艺，随后在 1949 年作为一项发明提出，并从 1956 年起进行了多次小型试验、半工业试验，取得了满意的结果<sup>[1]</sup>。

1968 年，在莫斯科国立钢铁合金学院重冶教研室瓦纽科夫教授的领导下，在诺里尔斯克建了一台 3m<sup>2</sup> 试验炉来处理铜镍精矿，由莫斯科国立有色金属科学研究所、哈萨克斯坦科学院冶金选矿研究所、诺里尔斯克矿冶联合体和巴尔喀什矿冶联合公司等单位参加。但该炉结构极不完善，炉墙是钢质箱式水套，鼓风氧浓度也未超过 28%，基本类似于鼓风炉或烟化炉。由于钢水套无法承受熔渣长期冲刷，导致炉子不能长时间运行。1974 年，在巴尔喀什铜厂建造了另一台 4.8m<sup>2</sup> 试验炉，炉墙采用了铜水套，熔炼铜精矿的床能力达到 50~70t/(m<sup>2</sup>·d)。

瓦纽科夫工艺成功的关键一步是在俄罗斯北极圈以北的诺里尔斯克铜厂建设了世界第一台 20m<sup>2</sup> 工业炉。该炉于 1977 年 12 月试车投产，第一个连续 10 昼夜操作达到了全部设计指标，并一直工作到 1983 年。截止到 1987 年，大约有 10 种不同类型的瓦纽科夫炉投入工业运行，其中在诺里尔斯克建有 2 台 48m<sup>2</sup>、1 台 36m<sup>2</sup>、1 台 20m<sup>2</sup> 的瓦纽科夫炉，用于处理铜镍精矿；在巴尔喀什建有 2 台 30m<sup>2</sup> 的瓦纽科夫炉，用于处理铜精矿。

#### 1.1.1.2 瓦纽科夫炉简介

瓦纽科夫炉具有垂直的炉膛，该炉置于平整的钢筋混凝土基础之上，炉的底部是由铬镁砖砌成的炉缸，其示意图如图 1-1 所示。侧墙由铜水套组成，直接落于炉缸上。炉顶用

钢水套封起来，留有加料口和排烟口。两边侧墙都设有风口，富氧空气由此送入炉内。原料、熔剂、燃料按需要的比例配好后从炉顶加料口加入炉内，在混合液-气相的强烈搅拌下进行熔化、反应过程。与鼓风机不同，瓦纽科夫炉的炉膛充满着熔体，鼓风机直接吹向渣层，搅动剧烈，加速了质和热的交换，强化了熔炼过程，形成的铜铈和炉渣在风口带以外平静区域内沉降分离。熔炼过程生产的冰铜沉于底部，经冰铜虹吸口放出供转炉吹炼。炉渣由相反的方向经渣虹吸口放出。从炉顶排出的高浓度二氧化硫烟气经余热锅炉及收尘净化后送制酸。截至 2010 年，各国使用瓦纽科夫炉的企业情况见表 1-1<sup>[2]</sup>。

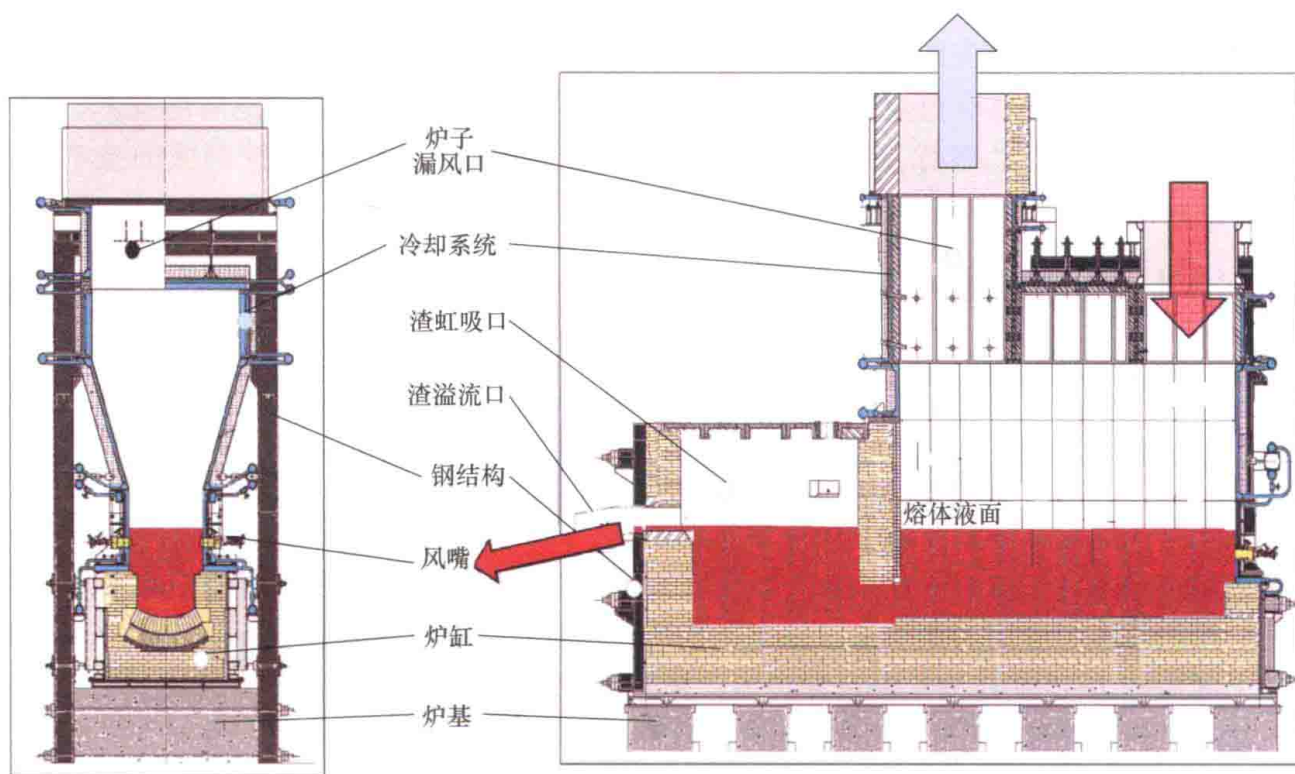


图 1-1 瓦纽科夫炉示意图

表 1-1 截至 2010 年各国瓦纽科夫炉情况汇总

| 地址或公司            |      | 原料      | 炉膛面积<br>/m <sup>2</sup> | 年份    | 日处理量<br>/t · d <sup>-1</sup> | 备注 |
|------------------|------|---------|-------------------------|-------|------------------------------|----|
| 诺里尔斯克，俄罗斯        | 1 号  | Cu-Ni 矿 | 20                      | 1977  | 2000                         | 工业 |
|                  | 2 号  | Cu-Ni 矿 | 48                      | 1985  | 2000 (3200)                  | 工业 |
|                  | 3 号  | Cu-Ni 矿 | 48                      | 1986  | 2000                         | 工业 |
|                  | 4 号  | Cu-Ni 矿 | 36 (3 号改)               | 1991  | 3200                         | 工业 |
|                  | 5 号  | 高品位铜矿   | 6.2                     | 1995  | 500                          | 工业 |
| 巴尔喀什，哈萨克斯坦       |      | Cu 矿    | 4.8                     | 1974  | 300                          | 试验 |
|                  |      | Cu 矿    | 35                      | 1985  | 1800                         | 工业 |
|                  |      | Cu 矿    | 35                      | 1987  | 1800                         | 工业 |
| 梁赞，俄罗斯           | 各种原料 | 1.5~2.1 | 1977~1991               | 25~75 | 试验                           |    |
| 乌斯奇卡米诺戈尔斯克，哈萨克斯坦 | 各种原料 | 0.96    | 1984~1991               | 10~40 | 试验                           |    |

续表 1-1

| 地址或公司     | 原料      | 炉膛面积<br>/m <sup>2</sup> | 年份   | 日处理量<br>/t·d <sup>-1</sup> | 备注 |
|-----------|---------|-------------------------|------|----------------------------|----|
| 皮里茨克, 俄罗斯 | Fe 矿    | 20                      | 1986 | 700                        | 试验 |
| 中乌拉尔, 俄罗斯 | Cu 矿    | 48                      | 1994 |                            | 工业 |
| 勒夫达, 俄罗斯  | Cu-Ni 矿 | 48                      | 1994 | 2500                       | 工业 |
| 三星公司, 韩国  | 垃圾      | 1.5                     | 2000 |                            | 试验 |

### 1.1.1.3 瓦纽科夫法的特点

瓦纽科夫法是熔池熔炼技术的一种, 因此具有熔池熔炼技术普遍具有的共同点, 如炉料不需细磨; 不需干燥, 相反需要加水润湿 (含水 6%~8% 或更高); 粒度可大至 50mm; 用皮带机传送加炉料和燃料。此外, 瓦纽科夫法还有以下特点:

(1) 鼓入熔融渣层的富氧空气或工业氧气保证了熔体的强烈鼓泡搅拌, 搅拌功率达 40~100kW/m<sup>3</sup>。在此种情况下, 液-固-气三相之间的反应速度极快, 而且在饱和度不大的条件下, 新相生成并加速生长, 靠团聚 (碰撞) 作用使炉渣中的金属或铜钨长大至 0.5~5mm 的液滴, 能迅速地下沉, 并与炉渣分层, 因此无须设置大面积的沉淀区域。

(2) 瓦纽科夫炉在产出铜钨含 Cu 40%~60% 的情况下, 炉渣含铜量 (未经贫化处理) 小于 0.6%。

(3) 由于特点 (1), 炉墙采用铜水套围成。靠铜水套工作面上形成的冷凝炉渣层来抵御炉渣的冲刷和腐蚀。

(4) 由于铜水套能迅速带走热量, 有可能采用高氧浓度的鼓风 (如炼铅时氧气浓度曾达 93%), 加上没有另设沉淀区, 这样就有可能达到高的床能力 (40~120t/(m<sup>2</sup>·d)), 可能使冶炼过程获得更大的强化。

(5) 铜水套比用耐火砖衬里的热损失量大。

(6) 固定在侧墙上的水冷风口结构简单、造价低廉, 开风、停风快捷方便, 风口寿命长达数年。鼓风氧气浓度较高时可以不插或少插风口。

(7) 富氧鼓风的压力较低, 0.8~1.0MPa, 风口无需氮气保护。

(8) 炉内上部空间高, 加料口不会被喷渣堵塞, 也使铜冶炼烟尘率保持在较低水平 (0.5%~1.5%)。

(9) 为了确保水套安全工作, 必须有一个冷却水循环系统。它带来的缺点是使得炉子外部连接显得很复杂, 且在车间内逸出水蒸气影响环境。

(10) 当压缩 (富氧) 空气放空和蒸汽放空的位置不当或者未采用有效的消声处理时, 以及插风口时, 会产生噪声污染。

20 世纪 90 年代前, 苏联建设有 7 台瓦纽科夫炉用于生产, 90 年代建有 4 台工业生产炉。进入 21 世纪后, 俄罗斯基本上没有新建瓦纽科夫炉, 主要是建了若干试验炉, 进行了处理红土镍矿侧吹冶炼镍铁的工业试验。而其他强化熔池熔炼方法, 如氧气底吹熔炼技术、顶吹浸没喷枪技术也实现了产业化、工业化的快速发展。

瓦纽科夫熔池熔炼技术本身是非常先进的冶炼工艺, 但由于其提出和发展年代较为久

远, 并且苏联使用瓦纽科夫炉的企业多建在地广人稀的北极或西伯利亚等地区, 不重视余热的回收和烟气的无害化排放, 导致其炉子配套的余热锅炉、控制系统等长期一直未能拓展研究和进步, 整体配套有缺陷, 难以跟上其他先进熔池熔炼技术的步伐。中国于 2001 年引入了该技术, 进行本土化改造后, 于 2011 年后在中国得到了迅速工业推广。

目前该技术主要由俄罗斯莫斯科国立钢铁合金学院以技术包的形式推广。

### 1.1.2 HIsarna 工艺

HIsarna 工艺由煤基熔炼过程和熔融旋涡预还原过程组成, 该工艺结合了改进的 HIs melt 的侧吹还原熔炼过程和塔塔钢厂旋涡熔炼技术。HIsarna 反应器如图 1-2 所示<sup>[3]</sup>。

HIs melt 工艺是一种直接使用粉矿、粉煤的侧吹还原炼铁工艺。力拓集团于 1982 年开始研发该工艺, 在澳大利亚 Kwinana 地区建设的 HIs melt 示范工厂于 2005 年 4 月开炉, 2008 年 12 月停产。2017 年 8 月 24 日, 山东墨龙石油机械股份有限公司与力拓集团正式签约, 力拓集团向山东墨龙转让 HIs melt 技术的所有知识产权、专利及商标等, 至此, 山东墨龙实现了 HIs melt 技术的完全消化吸收。在澳大利亚 Kwinana 厂的基础上, 对矿粉预还原、SRV 炉炉衬、煤气处理等进行了技术创新和设计优化, 实现了完全国产化。

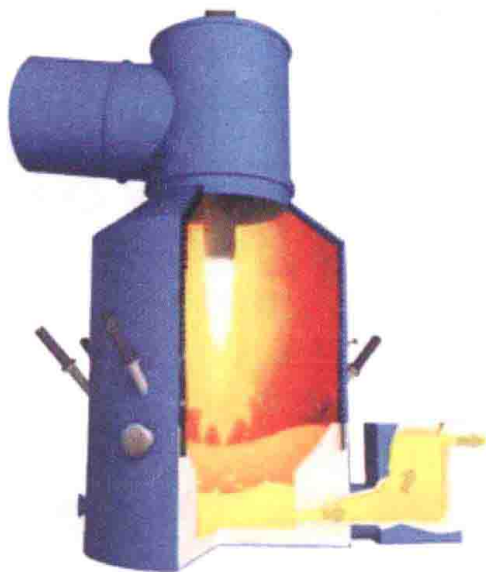


图 1-2 HIsarna 反应器

2009 年, 力拓集团与印度塔塔钢厂的 CCF 工艺结合, 开发 HIsarna 工艺, 2011 年 6 月开始工业试验, 试验进行了 2 个月, 最长连续试验时间为 12h。由于石灰喷枪出故障, 而后又遇到欧洲钢厂经济危机, 试验停止。

HIsarna 突破性炼铁工艺技术是欧洲超低二氧化碳炼钢 (ULCOS) 项目的一部分。HIsarna 技术的主要优势是取消了现在高炉炼铁过程中所需的烧结/球团和炼焦这两大高耗能工序。如果该技术可行且能够成功实现工业化生产, 将有利于降低钢铁制造成本、减少能源消耗和二氧化碳排放, 使资源利用效率提高到一个新水平。

HIsarna 中试厂于 2010 年建在塔塔钢铁公司荷兰艾默伊登钢厂, 并从 2011~2014 年进行了四次试验。

(1) 第一次试验: 2011 年 4~6 月, 目标是进行理论实践, 在对原料未做处理情况下生产铁水。2011 年 5 月 20 日, 第一次成功出铁。

(2) 第二次试验: 2012 年 10 月 17 日至 12 月 4 日, 目标是较长和持续生产铁水。实现持续 8~12h 生产, 生产能力是设计能力的 80%。最后一轮达到 8t/h 的设计能力。

(3) 第三次试验: 2013 年 5 月 28 日至 6 月 28 日, 目标是持续生产铁水, 对各种原料进行试验。

(4) 第四次试验: 2014 年 5 月 13 日至 6 月 29 日, 目标是持续稳定生产 7 天, 对各种原料进行试验。试验结果达到目标。

2017 年下半年, 塔塔钢铁公司开始进行第五次试验, 也是中试试验的最后一次, 为期

半年，目的是进一步验证用于确保排放最少的新技术。在这次试验准备的过程中，对试验装置进行了彻底检修，将设备高度增加了 10m 以上（最高点为 37m）。在此次试验后，预计 2018~2019 年工业化试验也将开始，包括设计、建造和试验一个工业化规模的 HIsarna 装置，能力扩大 20 倍。

HIsarna 工艺属于非高炉炼铁的前沿技术，使用铁浴熔融炉作为终还原设备，采用高氧化性炉渣操作，因此在高磷矿、钢厂含锌粉尘等特殊矿处理方面有优势，该工艺后续进展值得关注。

### 1.1.3 Romelt 工艺

Romelt 工艺是典型的一步法侧吹还原炼铁工艺，之所以称为 Romelt，是为了纪念莫斯科国立钢铁合金学院的冶金学家罗米尼兹<sup>[4]</sup>。

Romelt 工艺的开发起源于瓦纽科夫工艺的工业生产实践。但瓦纽科夫工艺和 Romelt 工艺在物理化学反应有原则性的区别，前者是氧化过程，而后者是还原过程。Romelt 工艺是莫斯科国立钢铁合金学院在 20 世纪 80 年代中期开发的，利用非焦煤、氧气和矿石（块矿或粉矿）以及钢厂产生的含氧化铁废弃物来生产铁水的侧吹熔池还原熔炼工艺。示范厂建在了俄罗斯新利佩茨克钢铁厂内。Romelt 工艺是唯一处在工业化边缘的一步法熔融还原工艺。

印度钢铁管理局与俄罗斯的 3 家机构合资组建了 Romelt-SAIL 印度有限公司（RSIL），俄方 3 家机构参与了 Romelt 工艺的开发。印度国家矿业开发公司正在印度中部的 Nagarnar 建设一套年产 30 万吨的 Romelt 工艺设备，以矿石加工时产生的矿泥为主要原料。另外，印度国家铝业公司在奥里萨邦堆积了大量的氧化铝厂产出的赤泥。印度国家铝业公司已开始深入调研，建造年产 24.3 万吨的 Romelt 炉。它用于含铁废物同铁矿石一起作为入炉原料。

Romelt 工艺采用侧吹技术，是瓦纽科夫炉在非高炉炼铁领域的延伸和创新。

Romelt 工艺流程是将含铁氧化物、矿粉所需要的熔剂以及煤粉等不经特殊处理装入原料仓，各种原料按一定的比例，连续地卸在一个普通的胶带输送机上，混合物料直接从 Romelt 炉顶部的加料口加入炉内，然后混合料以“半致密流（semicompact stream）”的形式进入熔池。其工艺流程图如图 1-3 所示。

冶炼过程中，熔池温度高达 1500~1600℃，被剧烈搅拌的熔渣迅速将其熔化。混合料中的粒煤既是还原剂也是燃料。该工艺流程中，一次风是富氧空气，从较低的一排风口喷入熔融的渣层，对渣层进行必要的搅拌，熔渣中的粒煤一部分直接将其中液态铁氧化物还原成铁滴，其他部分在渣中循环并与一次风中的氧进行部分燃烧，形成气体还原剂一氧化碳，这样渣层内部保持很强的还原性，大大降低了最终排出的炉渣终点铁含量；二次风是工业纯氧，经较高的一排风口从熔池表面喷入，对熔池表面产生的一氧化碳进行二次燃烧。熔池剧烈的鼓泡和液态渣的飞溅，产生了巨大的反应界面，同时飞溅起来的渣滴返回熔池内。低风口位于相对平静的渣层，金属化的铁液从该处进入金属熔体，同时渣铁从该处开始分离。渣和铁分别从炉两端的虹吸口排出。

Romelt 法由莫斯科国立钢铁合金学院开发并取得发明专利，新日本制铁公司和 Missho Iwai 公司取得了该工艺的商业化设计和设备供货的许可证。1985 年以来已试验性地生产了

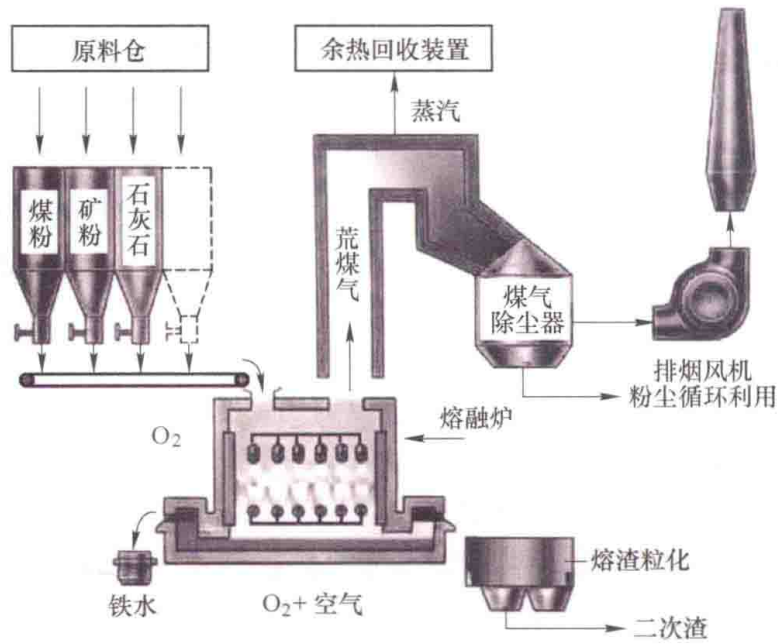


图 1-3 Romelt 工艺流程图

近 300 次，渣含铁 2% 以下。该工艺采用水冷炉壁挂渣技术，这种技术用极少热损失 (3%) 节约了大量耐火材料，当然同时也存在着漏水和爆炸的潜在风险。

### 1.2 我国侧吹熔池熔炼技术发展概况

#### 1.2.1 侧吹熔池熔炼技术分类

我国侧吹冶炼技术主要分为两种类型：(1) 采用瓦纽科夫炉，即鼓泡法；(2) 采用自主发明的侧吹浸没燃烧熔池熔炼炉，即侧吹浸没燃烧熔池熔炼法 (side-submerged combustion smelting process, SSC)。

##### 1.2.1.1 鼓泡法

鼓泡法 (瓦纽科夫法)，即富氧空气通过设置于侧墙铜水套上的风嘴，喷吹到高温熔体中上浮，并剧烈搅拌熔池上部，形成喷流层。从炉顶加入的粒煤在熔池上部的喷流层与氧、炉渣、炉料发生一系列冶金物理化学反应，所有的放热、还原等反应均发生在熔池上部的喷流层。生成的渣、金属或铜铈回到下部熔池进行澄清分离。其反应原理示意图如图 1-4 所示。

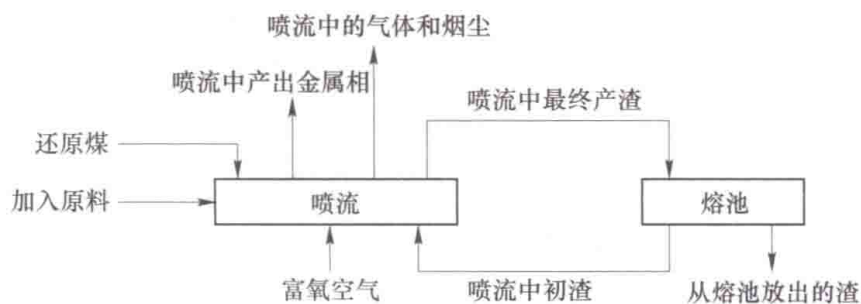


图 1-4 鼓泡法瓦纽科夫炉反应原理

优点：(1) 炉体结构简单，采用铜水套拼接而成；(2) 鼓泡法在炉窑的高温区采用最合适，风口为铜水套冷却，炉况正常条件下使用寿命较长；(3) 配套设施少，只需要使用煤和富氧；(4) 适用于自热的硫化精矿。

缺点：(1) 熔池热平衡不易维持，由于风嘴只喷吹富氧进入熔池，风嘴区域的熔池冻结后易产生炉结；(2) 需要频繁捅风口，存在严重的噪声污染、自动化程度低；(3) 从风口吹入的氧气与熔体反应容易发生局部过氧化，导致泡沫渣威胁安全生产；(4) 难以处理不发热的氧化物料等冷料。

结合目前工业生产现状，鼓泡法仅仅在铜精矿自热熔炼、液态铅渣直接还原热料领域实现了成熟的工业化生产。而在其余不发热物料领域，国内部分企业进行了鼓泡法工艺处理不发热的物料的尝试，比如铅膏、锌渣等，但均未能实现理想的指标和工业化，实践证明鼓泡法工艺不适用于处理不发热物料。主要原因为：采用鼓泡法处理不发热的物料，行业内采用的主要措施是过高的熔池搅拌功率，目的是最大程度地使从炉顶上部加入的粒煤等物料搅入熔池，与上升的氧气流股发生燃烧放热反应，以维持热平衡。剧烈搅拌才能将部分煤带入熔池与氧反应，给熔池补热，但煤的密度远远小于熔池渣密度，煤在熔体上下分布不均匀，且落入熔池时高温下容易崩裂分解成细粉，造成了煤的利用率不高。因为鼓泡法瓦纽科夫炉的热平衡是一个动态过程，不仅与风口高度、炉体宽度、煤量以及搅拌强度有关，而且在实际生产中，熔体内上下温差也取决于各种炉料组分、炉况及黏度。由于煤燃烧的滞后性和炉内鼓风量的波动，造成下部熔池热平衡发生剧烈波动，当熔池上下温差大时，炉子顺行困难。

### 1.2.1.2 侧吹浸没燃烧熔炼法

浸没燃烧熔炼法最早起源于玻璃窑熔化冷料，苏联从 1963 年就开始研究浸没燃烧装置。该装置是一种能直接在熔池中组织燃料完全燃烧的高生产能力的设备，同时还具有很长的使用寿命，炉体是用水冷式壁板制成。该炉的特点是可以对炉壁进行水蒸发冷却，可以利用废气余热加热燃烧空气和粒化配合料，浸没燃烧炉总热量有效利用率高，炉内温度 1200~1400℃，主要用于熔制硅酸盐块及玻璃棉等。

侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术（简称 SSC 技术）是中国恩菲工程技术有限公司结合烟化炉向熔池内部喷吹粉煤及空气和玻璃窑浸没燃烧法熔化冷料的思路，自主发明的一种用于处理不发热物料的先进冶炼工艺。其反应原理示意图如图 1-5 所示。

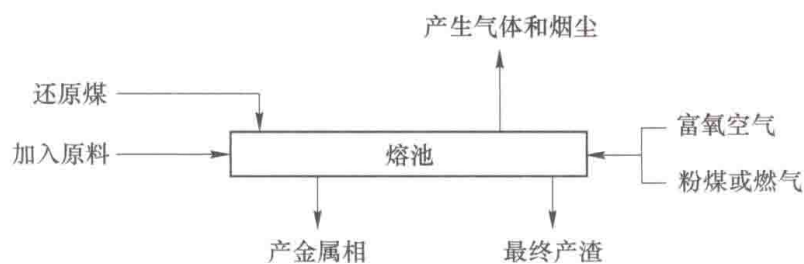


图 1-5 侧吹浸没燃烧熔炼法反应原理

浸没于熔池的侧吹喷枪将燃料和助燃富氧空气喷入熔池中燃烧，直接加热熔池内部，浸没燃烧的产物在熔液之间形成一个十分宽广的热传导表面，大大强化了热交换过程，同