

■ 赵俊学 李小明 崔雅茹 编著

# 富氧技术 在冶金和煤化工中的应用



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 富氧技术 在冶金和煤化工中的应用

赵俊学 李小明 崔雅茹 编著

北京  
冶金工业出版社

## 内 容 简 介

本书从富氧技术的基础理论入手,介绍了氧气的制取,结合氧气在燃烧、冶金反应中的特点,讨论和分析富氧在钢铁冶金、有色冶金和化学工业中的应用及其进展。主要内容包括:概述、氧气的制备、富氧燃烧技术、氧气在钢铁冶金中的应用、富氧技术在有色金属冶金中的应用、氧气在煤化工中的应用等6章。书中有大量具有操作性的实例和图表,内容丰富、实用。

本书不仅可供钢铁冶金、有色冶金、化工领域的工程技术人员参考,也可用于冶金、化工专业本科生和研究生的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

富氧技术在冶金和煤化工中的应用/赵俊学,李小明,崔雅茹  
编著. —北京:冶金工业出版社,2013.5

ISBN 978-7-5024-6238-3

I. ①富… II. ①赵… ②李… ③崔… III. ①富氧熔炼  
②富氧喷煤 IV. ①TF111 ②TF538

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第104479号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 李 臻 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6238-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2013年5月第1版,2013年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;16.75印张;403千字;257页

48.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

在冶金和煤化工行业，富氧技术（包括纯氧气）的使用已经是一个普遍现象。在有氧参与反应的场合，用纯氧或富氧后的气体代替空气，不仅使得一些过去无法实现的工业过程变为可能，也是强化生产、降低能耗、治理环境污染、提高技术水平、增加经济效益的有效技术措施。本书从氧气制备、冶金和化工用氧基础理论、工业用氧工程实践等方面对氧气在冶金和煤化工上的应用进行了总结和分析，希望能通过不同专业领域之间的结合，增强彼此的了解与相互借鉴，为推进富氧技术在这些领域更好地应用提供参考。

本书是在参考了国内外大量的专著、文献资料，并结合编者长期从事相关教学的经验以及部分科研实践成果的基础上编写而成的。编写过程得到了陕西省冶金物理化学重点学科的支持，在此表示感谢，同时对所有引用文献的作者，以及在本书编写过程中帮助资料收集及整理的研究生表示感谢。

本书第1章、第2章由赵俊学、崔雅茹编写，第3章由李小明编写，第4章由赵俊学、李小明编写，第5章由崔雅茹、赵俊学编写，第6章由赵俊学编写。全书由赵俊学统稿。

由于编者能力水平有限，书中的不足在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2013年2月于西安

# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1 概述 .....                            | 1  |
| 1.1 氧气的性质 .....                       | 1  |
| 1.1.1 氧气的物理性质 .....                   | 1  |
| 1.1.2 氧气的化学性质 .....                   | 1  |
| 1.2 氧气的工业应用 .....                     | 2  |
| 1.2.1 制氧技术的发展及氧气在工业中的应用概况 .....       | 2  |
| 1.2.2 现代工业用氧状况 .....                  | 3  |
| 1.3 氧气的制备 .....                       | 7  |
| 1.4 氧气的标准 .....                       | 7  |
| 1.5 氧气工业应用展望 .....                    | 8  |
| 参考文献 .....                            | 8  |
| 2 氧气的制备 .....                         | 10 |
| 2.1 氧气的来源 .....                       | 10 |
| 2.1.1 空气的成分 .....                     | 10 |
| 2.1.2 空气中的杂质 .....                    | 10 |
| 2.1.3 空气的液化 .....                     | 11 |
| 2.2 制氧方法分类 .....                      | 12 |
| 2.2.1 电解法 .....                       | 12 |
| 2.2.2 化学法 .....                       | 12 |
| 2.2.3 空气分离法 .....                     | 13 |
| 2.2.4 不同制氧方法的比较 .....                 | 15 |
| 2.3 深冷法制氧 .....                       | 16 |
| 2.3.1 深冷技术发展概况 .....                  | 16 |
| 2.3.2 深冷空分制氧基本原理 .....                | 16 |
| 2.3.3 制氧设备 .....                      | 17 |
| 2.3.4 深冷法典型装置及流程 .....                | 19 |
| 2.4 吸附分离法 .....                       | 22 |
| 2.4.1 吸附分离的发展概述 .....                 | 22 |
| 2.4.2 吸附分离方法的分类 .....                 | 23 |
| 2.4.3 真空变压吸附 (V 变压吸附) 制氧流程和主要设备 ..... | 23 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 2.5 膜分离              | 24 |
| 2.5.1 气体膜分离技术概述      | 24 |
| 2.5.2 气体分离膜的分离机理     | 25 |
| 2.5.3 气体膜分离系统        | 26 |
| 2.6 集成耦合法            | 28 |
| 2.6.1 变压吸附-低温精馏联合技术  | 28 |
| 2.6.2 变压吸附-膜分离联合技术   | 33 |
| 2.6.3 膜法-深冷法联合分离技术   | 34 |
| 2.7 制氧系统的评价及选择       | 35 |
| 2.7.1 制氧系统的评价        | 35 |
| 2.7.2 制氧系统的选择        | 36 |
| 2.8 氧气的贮存和输送         | 37 |
| 2.9 用氧安全             | 38 |
| 参考文献                 | 40 |
| 3 富氧燃烧技术             | 42 |
| 3.1 富氧燃烧概述           | 42 |
| 3.2 富氧燃烧及其热力学特性      | 43 |
| 3.2.1 富氧燃烧方法         | 43 |
| 3.2.2 富氧燃烧特性         | 44 |
| 3.2.3 富氧燃烧的节能和环保效果   | 52 |
| 3.2.4 低氧燃烧           | 55 |
| 3.3 常用燃料及其燃烧         | 57 |
| 3.3.1 固体燃料           | 57 |
| 3.3.2 气体燃料           | 58 |
| 3.3.3 液体燃料燃烧方式和特点    | 59 |
| 3.4 富氧燃烧技术的工业应用      | 61 |
| 3.4.1 富氧燃烧在玻璃炉窑中的应用  | 62 |
| 3.4.2 富氧燃烧在循环流化床中的应用 | 63 |
| 3.4.3 富氧燃烧在燃煤锅炉中的应用  | 63 |
| 3.4.4 富氧燃烧在发动机中的应用   | 64 |
| 3.5 富氧燃烧技术发展趋势       | 65 |
| 参考文献                 | 65 |
| 4 氧气在钢铁冶金中的应用        | 67 |
| 4.1 钢铁冶金中用氧概述        | 67 |
| 4.2 氧气在钢铁冶金中的应用基础    | 68 |
| 4.2.1 燃烧反应           | 68 |
| 4.2.2 熔池精炼中的氧化反应     | 69 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 4.3 氧气在炼铁中的应用                     | 71  |
| 4.3.1 氧气在高炉中应用的技术背景               | 71  |
| 4.3.2 富氧鼓风及富氧喷吹在高炉炼铁中的应用          | 72  |
| 4.3.3 富氧喷吹的工程实践                   | 80  |
| 4.3.4 全氧高炉                        | 84  |
| 4.3.5 氧气煤粉熔剂复合喷吹                  | 92  |
| 4.3.6 氧气高炉作为整体煤气化联合发电 (IGCC) 造气单元 | 95  |
| 4.3.7 高炉煤气富氧燃烧                    | 96  |
| 4.3.8 富氧在熔融还原中的应用                 | 97  |
| 4.3.9 氧在直接还原中的应用                  | 102 |
| 4.4 氧气在炼钢中的应用                     | 104 |
| 4.4.1 氧气在炼钢中的应用进程                 | 104 |
| 4.4.2 氧气在转炉炼钢中的应用                 | 105 |
| 4.4.3 铁水预处理                       | 116 |
| 4.4.4 氧气在电炉炼钢中的应用                 | 118 |
| 4.4.5 氧气在氩氧脱碳精炼炉中的应用              | 122 |
| 4.5 富氧在轧钢加热炉上的应用                  | 123 |
| 4.5.1 富氧燃烧技术在欧美轧钢加热炉上的应用          | 123 |
| 4.5.2 富氧燃烧技术在国内轧钢加热炉上的应用          | 124 |
| 4.5.3 加热炉低 NO <sub>x</sub> 富氧燃烧技术 | 125 |
| 参考文献                              | 126 |
| 5 富氧技术在有色金属冶金中的应用                 | 128 |
| 5.1 富氧技术在有色冶金中的应用概述               | 128 |
| 5.1.1 有色冶金中富氧技术的发展                | 128 |
| 5.1.2 有色冶金中采用富氧技术的优点              | 131 |
| 5.2 有色冶金中应用富氧技术的原理                | 134 |
| 5.2.1 富氧在有色火法冶金中应用的基础理论           | 134 |
| 5.2.2 富氧在有色湿法冶金中的应用理论             | 138 |
| 5.3 富氧在铜冶金中的应用                    | 141 |
| 5.3.1 铜冶金技术的发展概况                  | 141 |
| 5.3.2 铜精矿的富氧焙烧                    | 145 |
| 5.3.3 铜富氧造钼熔炼                     | 146 |
| 5.3.4 铜钼的富氧吹炼                     | 161 |
| 5.3.5 铜火法冶炼领域发展思路                 | 165 |
| 5.3.6 富氧在铜湿法冶金中的应用                | 166 |
| 5.4 富氧在镍冶金中的应用                    | 169 |
| 5.4.1 镍冶金技术的发展概述                  | 169 |
| 5.4.2 镍精矿的富氧焙烧                    | 169 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.4.3 硫化镍矿的富氧造钼熔炼 .....        | 171 |
| 5.4.4 镍钼富氧吹炼 .....             | 179 |
| 5.4.5 氧化镍矿的富氧鼓风炉熔炼 .....       | 179 |
| 5.4.6 镍铁的吹氧精炼 .....            | 180 |
| 5.4.7 富氧在镍湿法冶金中的应用 .....       | 180 |
| 5.5 富氧炼铅技术 .....               | 183 |
| 5.5.1 铅精矿的焙烧—鼓风炉还原熔炼 .....     | 184 |
| 5.5.2 氧气闪速炼铅法 .....            | 188 |
| 5.5.3 熔池熔炼法 .....              | 190 |
| 5.5.4 液态高铅渣直接炼铅法 .....         | 195 |
| 5.5.5 氧气在烟化炉中的应用 .....         | 197 |
| 5.6 富氧炼锌技术 .....               | 202 |
| 5.6.1 锌精矿的富氧沸腾焙烧 .....         | 202 |
| 5.6.2 ISP 密闭鼓风炉炼铅锌 .....       | 204 |
| 5.6.3 回转窑法处理含锌浸出渣 .....        | 206 |
| 5.6.4 锌精矿富氧直接浸出 .....          | 207 |
| 5.7 氧气在其他有色金属冶炼中的应用 .....      | 210 |
| 5.7.1 Platsol 法 .....          | 210 |
| 5.7.2 含硫的铂族金属物料中氧压浸出铂族金属 ..... | 211 |
| 5.7.3 碱硫氧压提取金银方法 .....         | 211 |
| 5.7.4 酸性加压氧化法处理金精矿 .....       | 212 |
| 5.7.5 矿石中提取金银的新工艺 .....        | 212 |
| 5.7.6 富氧加压焙烧辉钼矿焙烧工艺 .....      | 213 |
| 5.7.7 含锆物料加压浸出提取锆的工艺方法 .....   | 213 |
| 5.7.8 富铟烟尘中氧压提取铟的方法 .....      | 214 |
| 参考文献 .....                     | 215 |
| 6 氧气在煤化工中的应用 .....             | 218 |
| 6.1 概述 .....                   | 218 |
| 6.2 我国煤化工产业发展状况 .....          | 219 |
| 6.2.1 焦化 .....                 | 219 |
| 6.2.2 煤汽化及化学品合成 .....          | 220 |
| 6.2.3 煤液化 .....                | 221 |
| 6.3 煤汽化技术 .....                | 221 |
| 6.3.1 煤的汽化反应 .....             | 221 |
| 6.3.2 国内外煤汽化技术发展概况 .....       | 222 |
| 6.3.3 煤汽化技术分类及特点 .....         | 223 |
| 6.3.4 典型煤汽化技术 .....            | 225 |
| 6.3.5 大型煤汽化工艺中的氧气对汽化效果的影响——    |     |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 以 Shell 煤汽化工艺为例 .....      | 238 |
| 6.3.6 氧气在煤炭地下汽化中的应用 .....  | 242 |
| 6.4 煤化工产品生产 .....          | 243 |
| 6.5 煤炭现代化利用战略方向——多联产 ..... | 246 |
| 6.6 富氧干馏技术 .....           | 248 |
| 6.6.1 富氧干馏的技术背景 .....      | 248 |
| 6.6.2 富氧干馏工艺及技术 .....      | 248 |
| 6.6.3 富氧干馏理论分析 .....       | 249 |
| 6.6.4 富氧干馏工业试验 .....       | 254 |
| 参考文献 .....                 | 256 |

# 1 概 述

## 1.1 氧气的性质

围绕在地球周围的气体称为大气，大约有 1000km 厚。人类生活在地球大气的底部，一刻也不能没有空气，其中对人类最重要的是空气中的氧气。

氧具有能与除了贵金属——金、铂、银及稀有气体——氦、氖、氩、氙、氡以外的其他所有物质急剧化合生成化合物的性能。氧元素是地球上丰度最高、分布最广泛的元素。大量的氧以游离的形式存在于大气中，占空气总量的 20.946%（体积分数），许多生化过程和化学变化都是在空气中进行的。

### 1.1.1 氧气的物理性质

氧元素在元素周期表中属于第二周期第 VIA 族，其电子层结构为  $1s^2 2s^2 2p^4$ ，氧气的相对分子质量为 31.9988。在常温及大气压力下，氧气为无色透明、无臭、无味的气体，氧气比空气略重。在温度为  $0^{\circ}\text{C}$ 、压力为 101325Pa 时， $1\text{m}^3$  氧的质量为 1.43kg。在温度为  $20^{\circ}\text{C}$  及上述压力下， $1\text{m}^3$  氧气的质量为 1.33kg。氧在大气压力下冷却至  $-183^{\circ}\text{C}$  时，就变成天蓝色、透明而且易于流动的液体。1kg 液态氧在蒸发时，可以得到相当于温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、压力为 101325Pa 状态下的气态氧  $0.75\text{m}^3$ 。当将液态氧继续冷却至  $-218^{\circ}\text{C}$  时，就形成蓝色的固态结晶。如果经过长时期的弱放电，液态氧就部分地变为一种新的化学物质——液态臭氧——一种深蓝色易爆炸的液体，转变过程需热量为  $7.98\text{kJ/mol}$ 。和氮相同，气态氧可溶解于水。氧还具有感磁性，是顺磁性气体，也就是说，其质点在磁铁的作用下可带磁性，并可被磁铁所吸引。其容积磁化率在常见气体中是最大的。氧气的主要物理性质见表 1-1。

表 1-1 氧气的主要物理性质

| 性 质                                                     | 数 值                   | 性 质                                                                   | 数 值     |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| 一阶电离势/eV                                                | 12.059                | 密度( $0^{\circ}\text{C}$ )/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$            | 1.43    |
| 分子直径/nm                                                 | 0.28~0.42             | 声速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                                    | 315     |
| 气体常数/ $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ | 8.31434               | 热导率( $280\text{K}$ )/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ | 0.1528  |
| 沸点/K                                                    | 90.188                | 介电常数                                                                  | 1.00053 |
| 表面张力/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                    | $13.2 \times 10^{-3}$ | 溶解率/ $\text{cm}^3 \cdot (100\text{gH}_2\text{O})^{-1}$                | 4.89    |

### 1.1.2 氧气的化学性质

氧是典型的非金属元素，其化合价一般是 -2 价，只有和氟化合时，才为 +2 价 ( $\text{OF}_2$ )，氧在过氧化钠 ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) 中呈 -1 价。氧气的化学性质比较活泼。除了稀有气体、

活性小的金属元素如金、铂、银之外，大部分的元素都能与氧反应。

所有燃烧、缓慢氧化的化学反应，即物质与氧化合的反应，在纯氧气中都可非常迅速且急剧地进行，同时放出大量的热。例如，若将只发烟而未燃烧的木棒放入盛有氧的容器中时，木棒会燃起明亮的火焰。如将在空气中呈白色火焰燃烧的硫块置入盛有氧的容器中时，则会骤然起火并燃起美丽的紫色火焰。除了不能与氦、氖、氩等稀有气体及一些不活泼金属反应外，氧与其他所有的金属元素和非金属元素都能化合成氧化物。

(1) 氧气与金属反应。例如：

$2\text{Mg} + \text{O}_2 = 2\text{MgO}$ ，剧烈燃烧发出耀眼的强光，放出大量热，生成白色固体。

$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$ ，红热的铁丝剧烈燃烧，火星四射，放出大量热，生成黑色固体。

$2\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{CuO}$ ，加热后亮红色的铜丝表面生成一层黑色物质。

(2) 氧气与非金属反应。例如：

$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ，剧烈燃烧，发出白光，放出热量，生成能使石灰水变浑浊的气体。

$\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ ，发出明亮的蓝紫色火焰，放出热量，生成有刺激性气味的气体。

$4\text{P} + 5\text{O}_2 = 2\text{P}_2\text{O}_5$ ，剧烈燃烧，发出明亮光辉，放出热量，生成白烟。

(3) 氧气与一些有机物反应，如甲烷、乙炔、酒精、石蜡等能在氧气中燃烧生成水和二氧化碳。例如：

$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ，剧烈燃烧。

$2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ，剧烈燃烧。

(4) 氧与活泼金属（如 Li、Na 等）元素反应时可以形成过氧化物和超氧化物。

(5) 氧还可和惰性气体氙反应间接生成氧化物。例如：



## 1.2 氧气的工业应用

氧气在工业上的应用，主要是利用其上述的化学性质，用作燃烧助剂和氧化剂。通过发生氧化反应等，可以实现如下目标：

- (1) 实现所需要的反应，如氧化等；
- (2) 得到需要的热量；
- (3) 强化生产过程，提高设备的生产效率；
- (4) 减少污染和更有效的废物处理；
- (5) 降低能源消耗和运行成本；
- (6) 使得原来无法在工业上实现的过程变为可能。

在冶金和化工行业的技术进步中，氧气扮演的角色将会越来越重要。

### 1.2.1 制氧技术的发展及氧气在工业中的应用概况

早在 19 世纪中、后期就有过在工业上利用氧气强化冶金过程的设想，但由于当时缺乏高效价廉的制氧方法和设备，这种设想并未实现，直到用低温蒸馏法从空气中制氧取得成功，才在美国和德国建立起了第一批小规模制氧站（每小时产几十立方米氧气）。1905 年，首次进行了富氧吹炼铜的研究，旨在强化冶金过程。

20 世纪 50 年代后，由于氧气炼钢和高炉富氧炼铁获得广泛应用，氮肥工业迅速发

展,加速了制氧机制造工业发展的进程,拥有各种大型机组的制氧站相继建立,氧的价格随之降低,从而有力地促进了冶金工业更大规模地使用氧气。当前,国外制氧机生产氧气的的能力已达 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

1913~1914年,比利时在日产100t的高炉中首次进行了富氧(含氧23%<sup>①</sup>)冶炼试验。

1940年,苏联氧气生产能力已居欧洲的首位。第二次世界大战后,由于水力、火力发电工程和制氧技术的发展,用氧规模日益扩大,制氧机的电耗和成本不断下降,用氧更为经济合理,进一步扩大了氧的应用范围。1970年,苏联用于有色冶金中的氧量由 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 增长到1980年的 $22.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。20世纪80年代初,苏联主要工业部门用氧比例为:钢铁工业用氧占氧气产量的60%,化学工业用氧占35%,有色冶金工业用氧占2.5%,其他部门用氧占2.5%。

美国1978年氧气产量为 $17.8 \times 10^6 \text{ t}$ ,其中70%用于钢铁工业,12%用于化学工业,6%用于有色冶金业。

1979年,日本制氧机工业氧气年产量为 $70.92 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,钢铁和有色冶金用氧量占45%,化学工业用氧量占32%。

中国在20世纪50年代中期开始研究制氧机技术,制氧机的质量和制造水平也在逐步提高,氧气主要用于化工和钢铁行业。直到1979年,中国才在铜厂的密闭鼓风炉上进行含氧24.2%的富氧熔炼试验。1981年以后,国家为发展有色金属工业,把富氧熔炼作为节能、控制污染、强化冶金过程的重要技术政策,从而推进了富氧在有色冶金中的应用。

现在大规模的制氧技术已经成熟,制氧成本不断降低,可根据用氧质量和用量要求为用户提供不同的供氧方案以满足工艺要求。

可以看出,氧气的使用是随着制氧技术的发展而不断发展的。现在,氧气已广泛应用于冶金、化学等工业中。

## 1.2.2 现代工业用氧状况

### 1.2.2.1 冶金工业

在人类冶金发展史中,从炼金术到现代冶金,始终和能源消耗密不可分,冶金离不开燃料与空气。早期的冶金过程完全依赖于燃料在自然的空气中燃烧以维持所需的热量。由矿物中提取金属就在此状况下进行,从而为人类提供各种所需的金属材料,对人类文明做出了重要的贡献。

早期的冶金都是利用空气,火法冶金更是如此。一方面需要燃料供热,耗费大量能源(近代随着燃料资源的减少,矛盾更加突出);另一方面又产出大量的燃烧炉气,有时炉气中含有毒成分,如 $\text{SO}_2$ 、 $\text{As}_2\text{O}_3$ 等,若不回收利用,会对环境造成严重污染。

20世纪70年代初,富氧在冶金中得到了广泛的应用,遍及炼钢、炼铁与铜、铅、锌、镍、钴、锡等。目前,世界上大多数国家如美国、英国、日本、俄罗斯、德国、法国、加拿大等均已广泛推广和应用了富氧技术,使用范围越来越广。

① 本书中涉及的气体含量,如无特殊说明,均为体积分数。

面对能源资源的减少及环境污染,未来的冶金工业必须做出较大的技术改进,以同时满足社会发展对冶金材料的需求和人类对生存环境的质量要求。冶金上富氧的应用便是最有效的解决办法之一,该项技术已被认为是近半个世纪以来冶金界的“四大发明”之一。

#### 1.2.2.2 钢铁工业

##### A 高炉

高炉富氧鼓风能够显著地降低焦比,提高产量。一般使用的富氧浓度为 24% ~ 25% (体积分数)。据统计,富氧浓度提高 1%,铁水产量可以提高 4% ~ 6%,焦比降低 5% ~ 6%。喷煤作为与富氧鼓风配套技术已经在现代化的钢铁企业中得到广泛的应用,在节能、高效生产的同时,大幅度降低了焦比和生产成本,提高了企业的竞争力。在当每吨铁水的喷煤率达到 300kg 时,相应的吨铁耗氧量为 300m<sup>3</sup>,由于富氧程度目前仍然有限,氧气纯度可以稍低。从技术发展看,不断提高喷煤比例,发展煤基炼铁工艺是一个研究热点,氧气的使用量将会进一步增加。曾有全氧高炉的概念,该技术将会消耗更多的氧气。

##### B 转炉

铁变为钢的过程主要是一个氧化过程。氧与碳、磷、硫、硅等元素发生氧化反应,这不仅降低了钢的含碳量,除去了磷、硫、硅等杂质,而且还可以用反应热来达到冶炼所需要的温度。早期的冶炼采用空气作为氧化介质,为了达到需要的高温,采用预热空气、喷吹重油、提高铁水中氧化放热元素含量如硅含量等措施。氧气转炉炼钢法(LD法)从20世纪60年代初开始推广使用,是炼钢工艺的一大变革,此法是在转炉中吹入高纯氧气,从而使冶炼时间大幅缩短,产量大幅度提高,吨钢耗氧量通常为 50 ~ 60m<sup>3</sup>,其氧气纯度要求大于 2 级。目前,氧气转炉已经成为炼钢最主要的设备,其产钢量已占钢总产量的 75% 以上。按照我国 2011 年产钢量 6.8 亿吨,吨钢耗氧 55m<sup>3</sup>计,年总耗氧量可达 374 亿立方米。

##### C 电弧炉

传统电弧炉采用电弧熔化废钢,冶炼电耗高、效率低。电炉吹氧可以加速炉料的熔化以及杂质的氧化,达到提高生产能力和特种钢质量的双重目的。电炉吨钢耗氧量依照冶炼钢种的不同而有所差异。如冶炼碳素结构钢的吨钢耗氧量为 20 ~ 25m<sup>3</sup>,而合金钢吨钢耗氧量为 25 ~ 30m<sup>3</sup>。在现在的高效电弧炉工艺中,已经普遍装配了强化吹氧及氧燃烧的助熔装置,尤其是部分企业配加铁水作为电弧炉冶炼原料,耗氧量更大。

此外,在钢铁企业中钢材的加工清理、切割等都需要耗氧,平均吨钢耗氧为 11 ~ 15m<sup>3</sup>。

由于钢铁产量巨大,在所有的氧气消耗中,钢铁冶炼消耗占 50% 以上。

#### 1.2.2.3 有色冶金

富氧技术在有色金属冶金中的推广应用比钢铁冶金晚,这主要是因为有色金属的多品种及冶炼处理的复杂性所致。有色冶金中富氧的使用量占总富氧消耗量的 6% 以上。主要用于如熔池熔炼炉、反射炉、鼓风机、闪速熔炼炉及吹炼转炉和精炼过程中的各种炉型(如精炼反射炉)中。

在有色冶金方面,为了节能增产,发展自热冶炼,综合利用资源和保护环境,正在推广氧气冶炼法。有色金属矿中的铜、铅、锌、镍、钴、锑、汞等元素,大都以硫化物的形

式存在,冶炼反应多为氧化放热反应。一般有色金属的硫化矿含硫 20% ~ 30%,硫本身就是一种燃料,1kg 硫相当于 1.32kg 的标准煤。在有色金属冶炼过程中通入氧气,可将硫充分燃烧以维持冶炼温度、提高冶炼速度。以铜为例,富氧炼铜可节能 50%,即在同样的燃料下,铜的产量可以增加 1 倍,同时烟气中的二氧化硫含量增加,可回收制造硫酸以减少硫化物的排放量,保护环境。

对铜冶金,世界上已有 60% 以上的工厂采用了富氧技术。目前新的技术有荷兰的 Outokumpu 闪速炉、加拿大的 Horne 熔炼厂采用的 Noranda 法、日本 Naoschirma 熔炼厂用的 Mitsubishi 法、苏联 Balhash 厂采用的熔炼法、智利 Caletones 厂采用的改良转炉熔炼法 (CMT) 及中国的白银炼铜法。Inco 式富氧熔炼法是当今节能的新型富氧炼铜法,有逐渐取代传统炼铜方法的趋势。传统的密闭鼓风机 (据统计,吨铜耗氧量大于 300m<sup>3</sup>) 正在被取代或采用新的富氧熔炼技术进行相应的改造。

炼铅工业中已采用的比较新的技术,如 QSL 炼铅法、基夫赛特炼铅法、艾萨熔炼法等都已采用富氧技术。世界各国正在逐步推广应用这些节能降耗的炼铅新方法。在含铅烟尘的处理中,富氧的使用能明显节能降耗。如瑞典 Ronnskar 熔炼厂在 TBRC 炉上采用富氧炼铅,即 TBRC (卡尔多) 法。世界上 60% 以上的炼铅企业都采用了富氧技术。

锌冶金厂是最早采用富氧技术的有色冶金工厂,富氧最早应用于锌的沸腾焙烧。目前锌冶炼主要采用焙烧浸出工艺流程,甚至全湿法流程。而锌精矿的高压湿法浸出工艺早在 1958 年就开始应用富氧技术,20 世纪 80 年代 Cominco 公司的特雷尔厂就采用了富氧浸出的全湿法工艺。目前在锌焙烧、锌渣挥发、锌烧结、锌鼓风炉熔炼及处理铅锌混合矿的 ISP 法都采用了富氧技术。

目前世界上 50% 以上的镍是通过采用富氧技术冶炼所得,如火法工艺中的 Outokumpu 闪速熔炼法和镍鼓风熔炼法都采用了富氧技术。

总之,富氧技术已经应用于空气参与的冶金过程。在冶金过程中,特别是火法冶金过程,由于富氧技术具有节省能源、降低能耗、增强处理能力、降低生产成本、减少炉气量从而有利于炉气的处理等优点,传统的凡有空气参与的冶金过程都可以使用富氧技术,如烟化炉、贫化炉等冶金炉中均有希望采用富氧技术。

未来铜、铅、锌、镍、锡、锑等有色金属的火法冶金中,凡不采用富氧技术的工艺均将被淘汰。

富氧技术在冶金应用中的发展过程见表 1-2。

表 1-2 富氧技术在冶金应用中的发展过程

| 年 份         | 研究、应用的单位、个人,处理矿物形态、方法及应用的设备                            |
|-------------|--------------------------------------------------------|
| 1920 ~ 1930 | 富氧冶金处理低品位精矿的试验研究                                       |
| 1931        | Besemer 转炉上采用富氧                                        |
| 1933        | Cominco 对富氧锌沸腾焙烧进行研究测试                                 |
| 1937        | Cominco 富氧锌沸腾焙烧实现工业化应用                                 |
| 1945        | Inco 对铜精矿富氧熔炼进行研究测试                                    |
| 1949        | Cominco 在铜鼓风炉、烟化炉进行富氧操作                                |
| 1951        | 日本 Hitachi 熔炼厂对富氧转炉熔炼进行研究,同奥地利富氧顶吹转炉技术 (LD 技术) 实现工业化生产 |

续表 1-2

| 年 份  | 研究、应用的单位、个人，处理矿物形态、方法及应用的设备                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1952 | 加拿大 Inco 富氧闪速炉熔炼投产                                                                                     |
| 1958 | 日本 Hitachi 熔炼厂富氧转炉投产                                                                                   |
| 1960 | 苏联伊尔库茨克进行富氧铜鼓风炉熔炼                                                                                      |
| 1961 | 日本 Ashio 熔炼厂在 Outokumpu 闪速炉上进行富氧熔炼研究                                                                   |
| 1962 | Asarco 对铅鼓风炉进行富氧技术研究                                                                                   |
| 1963 | 苏联在 Almalsk 和 Balkhash 厂采用富氧技术                                                                         |
| 1966 | 日本采用 Noranda 法的 Saganoseki 熔炼厂在鼓风炉和 Pierce-Smith 转炉上进行富氧熔炼研究生产                                         |
| 1967 | 苏联在 Almalsk 熔炼厂的铜反射炉中试验采用富氧，同时 Inco 在反射炉、TBRC 炉、转炉上开始使用富氧，Nkana 对富氧炼铜反射炉进行研究，Hoboken 对鼓风炉、转炉进行富氧应用研究   |
| 1968 | 芬兰在 Hajavaltad 的 Outokumpu 闪速炉上进行富氧应用研究                                                                |
| 1970 | 加拿大在 Home 熔炼厂对 Noranda 法的试验厂进行富氧熔炼研究，同年日本在 Outokumpu 闪速炉上富氧技术投入应用，苏联 Kiveet 厂对 Cu-Zn-Pb 的复杂精矿进行富氧技术的熔炼 |
| 1971 | 日本的 Onahama 熔炼厂对 Mitsubishi 法进行富氧技术研究，智利在 Harjavata 的 Caletone 熔炼厂的铜镍闪速炉上使用富氧                          |
| 1974 | 日本 Naoshima 熔炼厂对 Mitsubishi 法使用富氧                                                                      |
| 1976 | 智利 Caletones 熔炼厂在 CTM 熔池熔炼炉上使用富氧                                                                       |
| 1978 | 瑞典 Ronnskar 熔炼厂处理铜精矿上采用富氧                                                                              |
| 1980 | 澳大利亚在 Mount Isa 的 Isamelt 的铅试验厂中采用富氧                                                                   |
| 1982 | 美国 Morenci 熔炼厂对富氧喷射熔炼进行研究                                                                              |
| 1986 | Ismelt 试验厂用富氧技术处理铜精矿                                                                                   |
| 1987 | 澳大利亚用苏联法的铅厂投入生产                                                                                        |
| 1990 | 大量的有色金属生产中使用富氧                                                                                         |

#### 1.2.2.4 化学工业

在化学工业中，氧主要用作合成氨及其他化工产品的原料造气汽化剂，造纸行业中氧气漂白及脱水 and 用于制造硝酸、硫酸、尿素、甲醇、甲醛以及石油炼制等。以合成氨工业为例，我国 2011 年的合成氨产量约为 6000 万吨，当氧气纯度为 98% 时，固体燃料造气吨氨耗氧量为  $500 \sim 880\text{m}^3$ （每吨合成氨耗煤约 1.66t）；液体燃料造气的吨氨耗氧量为  $600 \sim 760\text{m}^3$ ；气体燃料造气的吨氨耗氧量为  $250 \sim 700\text{m}^3$ 。煤化工已经成为重要的工业氧大户，在以煤汽化为基础的现代煤化工中，大量使用富氧技术，如 Texaco 水煤浆汽化、Shell 干粉煤汽化等。根据相关资料，我国到 2020 年，煤制甲醇产能将可达 3000 万 ~ 4000 万吨，煤制油产品可达 3600 万 ~ 3900 万吨，每吨甲醇煤耗 1.65t，每吨油品煤耗 6.04t，综合煤耗及氧气消耗巨大。

#### 1.2.2.5 富氧燃烧

燃料在富氧助燃空气中燃烧时具有下列特点：

(1) 燃烧速度加快, 燃料燃烧完全。

(2) 空气过剩系数降低, 空气过剩系数在 1.05 ~ 1.10 之间, 可获得较高的火焰温度。

(3) 所需的助燃空气量减少, 烟气排放量和热损失降低, 对热量的利用率有所提高, 提高燃料燃烧效率。

(4) 火焰温度提高, 火焰强度增大, 传热效果增强。火焰温度随着氧浓度的增加而升高, 但火焰温度增加的幅度是随着氧浓度逐渐提高而逐渐下降的。

氧浓度越高, 加热温度越高, 可利用热量所占的比例也越大; 同时富氧助燃降低了空气过剩系数, 燃料消耗相应减少。根据已有的测试结果, 燃料消耗降低 8% 以上, 相应地减少了对大气的污染, 烟气排放低于国家排放标准。

总之, 在冶金和化工过程中使用氧气可以取得各种有益的效果, 在不同行业中有许多典型工艺流程已经开始或正在考虑用氧气代替空气, 因此氧气会在工业生产中扮演越来越重要的角色。

### 1.3 氧气的制备

鉴于氧元素在自然界中以单质的形式存在于空气中, 还以化合物的形式存在于水、岩石和动植物体内, 因而制备氧气的主要方法包括由空气中分离出氧气和从含氧化合物中分解出氧气两种, 前者是物理法, 后者是化学法。制取氧气的原料可为空气、水及氧化物, 因而相应的制取方法有空气分离法、水电解法、化学法等, 其中空气分离法还可细分为深冷法 (低温精馏法)、变压吸附法、膜分离法及集成耦合法等, 它们具有不同的机理, 也适用于不同的要求。

对工业应用要求而言, 主要是采用空气分离法制氧。在空气分离领域中, 低温法是传统的制氧方法, 变压吸附法和膜分离法是新兴的制氧方法。变压吸附法在近 10 年来迅速普及, 技术日臻成熟; 而膜分离法正处在进一步研究和发展之中。

目前中国的空气分离技术仍以低温精馏法为主, 未来的空气分离技术的发展因不同行业的工艺要求, 将会出现深冷、变压吸附和膜分离法并驾齐驱的格局, 随着能源紧张加剧, 节能型的非低温技术将发展更快。联合工艺, 包括深冷-变压吸附、膜-变压吸附、膜-化学催化反应等工艺, 它们将比单一工艺更节能、成本也低, 将成为气体分离的主要方法。

### 1.4 氧气的标准

在 GB/T 3863—2008 中对工业氧的产品质量作了具体规定, 产品氧的纯度分为两级, 详见表 1-3。在工业应用中, 可根据用途确定不同的氧含量水平。

表 1-3 工业氧技术要求

| 项 目                              | 指 标   |       |
|----------------------------------|-------|-------|
| 氧 (O <sub>2</sub> ) 含量 (体积分数) /% | ≥99.5 | ≥99.2 |
| 水 (H <sub>2</sub> O)             | 无游离水  |       |

## 1.5 氧气工业应用展望

如前所述,氧气在工业上主要是利用其氧化及与元素氧化的放热特性,用作燃烧助剂和氧化剂,氧气已经在燃烧、冶金及化工过程等获得了大规模的应用,不仅使得原来无法在工业上实现的过程变为可能,而且取得了强化生产过程、提高设备的生产效率、减少污染、降低能源消耗和运行成本等效果,氧气已经成为冶金及化工过程不可或缺的重要原料及手段之一。

氧气主要用于过程工业,用于有氧参与反应或需要燃烧提供热量的工业过程。在早期,人们更多地关注用氧成本是否足以使得整体生产成本降低,具有直接经济效益。在节能环保要求日益提高的今天,还应考虑环境及社会效益。在许多工业部门的工程实践已经表明采用富氧技术(包括纯氧气的使用)可以很好地兼顾这两个方面,这也为富氧技术的进一步推广及开发利用展示了良好的应用前景。

工业用氧是伴随着制氧技术的发展而发展的,氧气及富氧气体的大规模低成本制备是富氧技术应用的基本前提,大规模工业化应用又为制氧技术的进步提供了强大的推动力。因此,氧气工业应用将会围绕这种相互依存与促进的关系不断强化及进步。预计将会在如下几个方面展开:

(1) 低成本制氧技术的开发。不仅包括氧气的获得,还将围绕制氧过程副产品的制备及利用等,构建更为有效的综合利用工艺,在更高的层次上实现高效、节能、减排。

(2) 多种制氧工艺与技术的选择与优化。根据不同的工业需求配置合理的制氧工艺,并综合考虑经济及环保等因素,实现整体效果的最优化。

(3) 工业部门的用氧技术开发。在采用空气作为载氧介质的过程中,改用富氧技术后,要求对整体工艺上的许多环节进行调整。其中第一个就是局部温度大幅度升高的问题,这可以通过配加冷却剂及增大冷循环气量的方式加以解决;第二个是反应器热量及气流分布变化的问题,可以通过改变反应器设计及改变循环气量等方式解决。随着这些问题的解决,将为富氧技术的应用打开空间。

围绕地球且富含氧气的大气,为人类提供了源源不断的氧的供给。对工业过程采用空气或富氧技术的工艺属性(包括能量利用及化学反应物利用)上讲,前者是先应用后分离,后者是先分离后应用,而大量的工程实践表明先分离后应用可取得更加有益的效果。现在不同行业中有许多典型工艺流程已经或正在用氧气(包括富氧后的气体)代替空气,氧气将会在过程工业生产中扮演越来越重要的角色。

### 参 考 文 献

- [1] 张阳,等.富氧技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 毛月波.富氧在有色冶金中的应用[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [3] 张霞,童莉葛,王立.富氧燃烧技术的应用现状分析[J].冶金能源,2007,26(6):41~44.
- [4] 刘庆才,陈淑荣.富氧燃烧的主要环境影响因素概述[J].节能与环保,2004(5):26~28.
- [5] 李华.氧气炼钢技术的里程碑与挑战[J].世界金属导报,2006.
- [6] 秦民生,张建良,齐宝铭.全氧鼓风高炉冶炼钒钛铁矿石的优越性[J].钢铁钒钛,1991,12(2):6.
- [7] 徐凤琼.富氧在冶金中的应用和发展[J].云南冶金,1999(2):3.