

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0063-09

闪速熔炼在中国的进展与研究^① ——冷风技术及“非接触冶金”

张文海

(南昌有色冶金设计研究院, 南昌 330002)

摘要: 从环境保护角度阐述了世界铜、镍闪速熔炼的发展与现状, 讨论了“冷风节能”及其工业应用技术。介绍了中国在“闪速炉扩产”、“闪速冶金事故监控”、“水套新材料”、“闪速炉连续炼铜”等方面的研究成果。为根本解决强化冶金对炉衬的腐蚀, 提出了“非接触冶金”的思路, 描述了中心旋涡柱闪速熔炼方法, 并介绍了旋涡喷嘴基本设计及计算机仿真实验。

关键词: 闪速熔炼; 冷风冶炼; 非接触冶金; 中心旋涡柱闪速熔炼

Progress and research of flash smelting in China —Cold air technology and “non-contact metallurgy”

ZHANG Wen-hai

(Nanchang Engineering & Research Institute of Nonferrous Metals, Nanchang 330002, China)

Abstract: From the viewpoint of environmental protection, international development and present situation of copper and nickel flash metallurgy were expatiated, cold air energy saving and its industrial application technique were discussed. The studies in China on the parts of limit of production expansion for flash furnace, monitoring for accidents in flash metallurgy, new material of water jacket and continuous copper smelting by flash furnace were introduced. To fundamentally solve the problem of corrosion to furnace liner by intensified metallurgy, the idea of non-contact metallurgy was put forward. The flash smelting method of central swirling column was described, and the basic design of swirl nozzle and computer simulation experiment was introduced.

Key words: flash smelting; cold air smelting; non-contact metallurgy; central swirling column flash smelting

1 闪速熔炼是清洁的铜、镍强化冶金新工艺

人类的文明和世界冶金技术的进步紧密相联。譬如, 和人类相处最长久的铜, 随着远古铜器的出现, 特别是 3 000 年前中国“青铜文化”的辉煌, 标志着人类结束了长达 10 万年之久的石器时代。

2002 年, 中国有色金属总产量达 1 012 万 t, 超过美国, 位居世界首位, 其中精铜的产量为 165.4 万 t, 消费为 250 万 t, 分别排世界第 2 位和第 1 位。中国已成为世界有色金属的生产大国和消

费大国。

发展有色金属工业的首要问题是环境保护, 特别是防止 SO₂ 对大气的污染。例如铜冶炼, 每生产 1 t 铜, 就会产生 2~3 t SO₂。由于冶炼技术问题, 20 世纪 70 年代初, 美国炼铜厂硫利用率不到 20%。但自从美国国会通过了限制工业废弃物排放的法律后, 促使企业采用先进的冶炼工艺, 至 20 世纪 90 年代, 硫利用率迅速上升到 95% 以上, 如图 1 所示^[1]。

表 1 是世界银行组织在《污染防治手册》中对铜冶炼项目可接受的最大排放指标的规定。

美国的环境标准是逐步严格的。Utah 炼铜厂

① 作者简介: 张文海(1939-), 男, 国家工程设计大师。

通讯作者: 张文海, 高级工程师; 电话: 0791-6280199; E-mail: ZWH3902@163.com

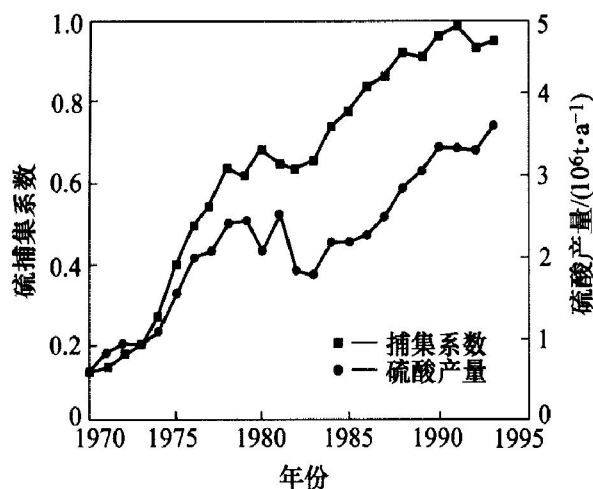


图1 美国炼铜厂硫利用率的演变

表1 世界银行组织允许的炼铜厂
最大排放指标(mg/m^3)

项目	最大值
SO_2	1 000.00
As	0.50
Cd	0.05
Cu	1.00
Pb	0.20
Hg	0.05
冶炼过程产生的粉尘	20.00
其他途径产生的粉尘	50.00

原采用反射炉工艺，为达到当时 SO_2 排放标准，1978 年花费 2.8 亿美元从加拿大引进了 2 台诺兰达炉，年产铜 10 万 t。之后，由于标准的提高，又花费 7.7 亿美元从芬兰引进 1 台闪速炉，取代了诺兰达炉，达到了新的排放标准，同时，年产铜提高到 30 万 t。

各国排放标准的不断提高，也有力促进了世界有色冶金技术的进步，在铜、镍领域，出现了很多强化熔炼新工艺。从机理上划分，可区别为在熔体中进行反应的熔池熔炼和在空间进行反应的空间熔炼 2 个分支。

1) 熔池熔炼

诺兰达熔炼 (加拿大);
三菱熔炼 (日本);
ISA—澳斯麦特熔炼 (澳大利亚);
特尼恩特熔炼 (智利);
瓦纽可夫熔炼 (俄国);
KHD 熔炼 (德国);
白银熔炼 (中国)。

2) 空间熔炼

奥托昆普闪速熔炼 (芬兰);
Inco 闪速熔炼 (加拿大)。

奥托昆普闪速熔炼是芬兰科学家于 1949 年发明、20 世纪 60 年代在日本得到发展的强化冶金新工艺，是当前世界铜、镍的主要生产方法。与其他工艺比较，优点是能更好地解决 SO_2 高空污染及低空污染问题，硫控制率可达 99% 以上，同时劳动条件好、节能、高效和适于大规模生产，因此得到了迅速发展。目前全球有 46 座闪速炉，其中铜 40 座，镍 6 座，分布于 23 个国家或地区。闪速炉产铜量已约占世界总产量 50% 的份额。

在中国，一直到 20 世纪 80 年代，炼铜厂还是普遍采用传统的反射炉、鼓风炉、电炉等方法，硫回收率不到 60%，排放的烟气含 SO_2 浓度达 6 000 ~ 30 000 mg/m^3 ，环境污染严重。

位于长江之畔的安徽铜陵第一冶炼厂，是新中国于 1952 年建设的第一座炼铜厂，采用鼓风炉工艺，每年向大气排放 SO_2 4 万 t，厂区周围生态严重破坏，蔬菜含砷、铅、铜分别超标 35 倍、21 倍和 40 倍；89% 儿童患呼吸道疾病，32% 白血球下降；职工指甲含铜超常规 76 倍。铜陵的环境状况是当时中国铜工业的缩影，如图 2 所示。

1980 年，采用引进技术的中国第一座闪速炉

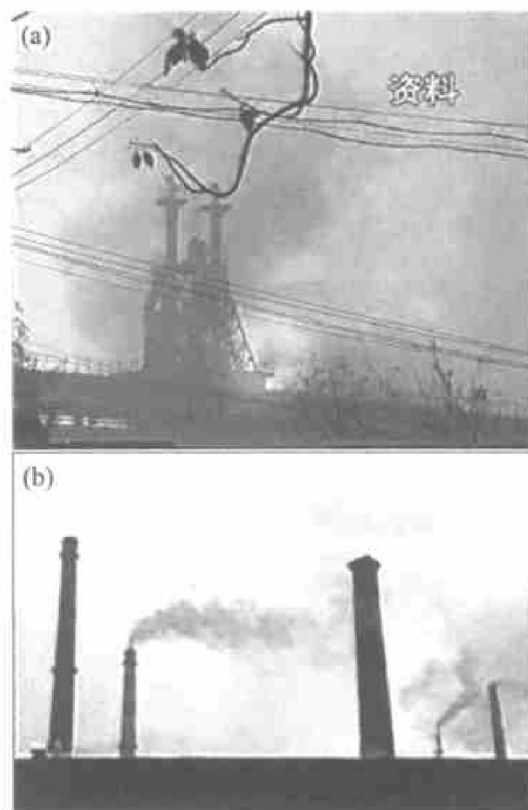


图2 20 世纪 80 年代铜陵环境状况

在江西贵溪开始建设, 1985 年建成投产, 拉开了中国铜工业“清洁生产”的序幕。

然而, 在闪速炼铜技术引进后的 10 余年间, 这个先进的工艺一直未能在国内得到推广。主要原因是闪速熔炼有多项复杂的工艺技术和专用设备, 在贵溪引进项目中, 含专利 42 项、秘密技术 143 条。如果再重复引进一套, 包括技术许可证和设备, 在 20 世纪 90 年代, 大约需要 80 亿元人民币。

因此, 消化引进技术, 开展闪速炼铜技术攻关, 实现设备国产化, 降低工程投资, 成为中国铜工业装备水平能否全面提升的关键。

1997 年, 为了前述的安徽铜陵第一冶炼厂重建工程(即金隆铜业), 中国有色界携手合作, 经过多年攻关, 我国第一座自行设计、设备国产化, 并达到世界先进水平的闪速炼铜厂建成投产。

目前, 中国已有 2 座铜闪速炉, 1 座镍闪速炉, 2002 年闪速炉产铜量的份额约为 40%, 预计至 2005 年可能达到 60%, 而产镍量目前已超过 95%。

2 “冷风”闪速熔炼技术的发展

2.1 闪速炉送风温度的沿革

图 3 所示是闪速炉简图。微细的硫化物精矿从喷嘴以 100 m/s 的速度喷入反应塔, 呈极大比表面积状态弥散于高温反应塔空间, 形成气体包裹粒子的优越化学动力学条件, 反应极为迅速, 大约只须 2 s 即完成熔炼的基本反应过程, 因此被称作“闪速熔炼”。

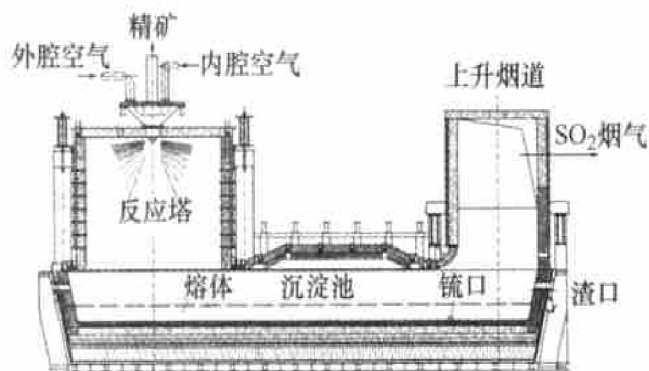


图 3 闪速炉简图

闪速熔炼问世以来, 送风温度经历了 3 个阶段的变迁:

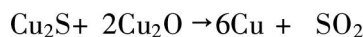
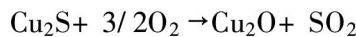
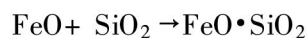
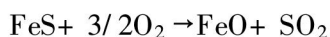
- 1949 年~ 1972 年, 热风-普通空气熔炼;
- 1972 年~ 1988 年, 热风-富氧空气熔炼;
- 1988 年~ 今, 冷风-富氧空气熔炼。

所谓“冷风”是指空气自然温度的“常温风”。

世界“热风”闪速炉的历史长达 40 年, 原因是闪速炉反应塔高度仅 6~ 7 m, 精矿粒子在塔中行进速度约 3 m/s, 停留时间很短, “热风”有益于精矿的预热、脱水和提前着火燃烧, 是必须的条件。同时, 闪速冶金界也推崇“大风高温”, 认为“热风”节能^[2]。因此, 以前各国闪速炉都是采用热风, 温度多为 400~ 600 ℃, 最高达 1 200 ℃, 我国贵溪冶炼厂采用的是 450 ℃。

2.2 “冷风”工艺的出现

提高闪速炉产能是降低成本的重要途径, 而提高产能就必须成比例地增加氧气送入量, 这是因为硫化矿物火法冶金的实质是元素硫和铁通过氧化反应及交互反应被脱除的过程:



但是, 增加氧气(增加送风量或提高富氧浓度)受到“热风”2 个方面制约:

1) 增加送风量受精矿喷嘴能力的制约

空气必须以适宜的速度通过精矿喷嘴送入反应塔, 由于热风体积膨胀达 2~ 5 倍, 而喷嘴的尺寸(即截面积)有限, 从而限制了大风量的通过。

2) 提高富氧浓度受反应塔热平衡的制约

富氧浓度、送风温度和燃料量是决定炉内温度的 3 个要素, 在确定的温度条件下, 三者达到平衡。如果提高富氧浓度, 就必须相应降低送风温度或减少燃料量。由于闪速熔炼是基本不用燃料的“自热过程”, 因此, 提高富氧浓度的唯一途径是采用“冷风”。

从而, 闪速炉采用“冷风”的技术研究, 成为世纪之交闪速冶金界的热门课题。

位于美国亚利桑那州的玛格玛铜业公司圣·马维尔炼铜厂建于 1956 年, 原有 3 台反射炉, 年产铜 30 万 t, 是一座特大型炼铜厂。为解决 SO₂ 污染问题, 与政府签订了采用闪速熔炼工艺的改造合同。

但是, 在 20 世纪 80 年代, 单台闪速炉产能水平仅 10~ 15 万 t, 为了用一台闪速炉达到年产铜 30 万 t 的目标, 玛格玛公司决定采用“冷风”工艺。新的工厂于 1988 年投产, 生产中遇到了以下问题^[3,4]:

1) 闪速炉化学反应不完全, “下生料”严重;

2) 容易发生精矿“流态化”事故, 闪速炉给料失控, 车间环境差;

3) 炉衬损伤剧烈, 严重时 3~5 个月炉壳即发红, 甚至烧穿。由于经常性的停料热补, 工厂作业率低, 粗铜加工费增加。

1999 年世界铜价跌至 1 365 美元/t 的历史低位, 国际贸易铜加工费 (TC/RC) 也从 1996 年的 126/12.6 美元/t 跌至 1999 年的 30/3.0 美元/t^[5], 世界铜冶金行业受到严重冲击。玛格玛设计年产铜 30 万 t, 1998 年和 1999 年产量均为 14.5 万 t, 工厂于 2000 年关闭。

玛格玛在技术上遇到的问题, 加深了各国对“冷风”工艺的疑虑, 有的企业取消了原先确定的“冷风”扩产工程的实施。

2.3 “冷风”技术在中国的进步

2.3.1 工程研究

随着计算机技术的发展, 现代建模与仿真技术成为继理论研究和实验研究之后的第 3 种认识客观世界的重要手段^[6]。1992 年, 南昌有色冶金设计研究院运用研发的“闪速冶金 NCC 软件”, 对闪速熔炼送风温度、含氧浓度、铜钼品位、燃料种类及工厂规模做了系统研究, 为优化工艺和能源方案提供了量化的依据^[7]。对于送风温度, 提出了“冷风节能”的论点。1996 年在国际第 8 届闪速冶金会议发表的“闪速熔炼能源优化”论文做了如下描述: “随着反应塔送风温度的提高, 熔炼的能源消耗和成本上升, 能源消耗增加 1.4 倍, 成本增加 1.3 倍。从节能考虑, 采用热风不合理”^[8], 如图 4 所示。

表 2 所示是 2003 年中国金隆铜业三期扩建工

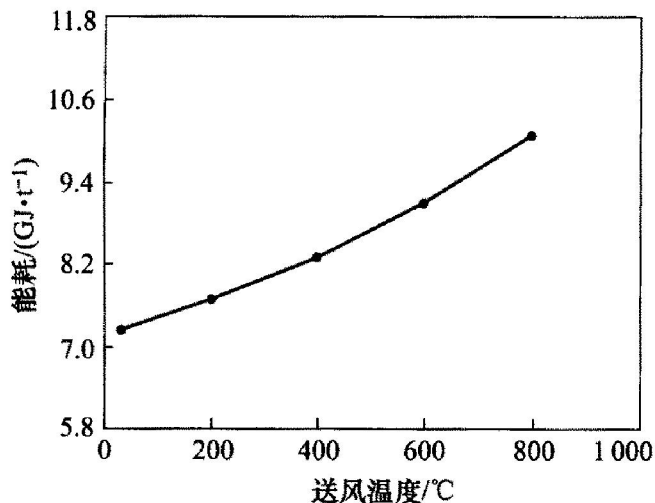


图 4 闪速炉送风温度与熔炼能耗

表 2 金隆铜业三期年产铜 30 万 t 扩产工程
“送风温度-氧气浓度-燃料”平衡关系及能耗

送风温度/°C	送风含氧量/%	重油量/ (kg·h ⁻¹)	熔炼能耗/ (MJ·t ⁻¹)
-50	49.0	0	2 446
0	47.4	0	2 489
25	46.7	0	2 512
100	44.3	0	2 586
200	41.0	0	2 702
300	37.8	0	2 840
400	34.4	0	3 008
500	31.0	0	3 216
600	27.5	0	3 479
700	24.0	0	3 824
784	21.0	0	4 208

程提供的送风温度与能耗关系的最新数据。

2.3.2 “冷风”工程技术的解决

1995~1998 年间, 中国金隆铜业开展了对“冷风”工程技术的攻关。针对玛格玛工厂“下生料”、“精矿流态化”及“炉衬损伤”问题, 探明了“反应始点滞后”和“单通道喷嘴气流偏析”是重要原因, 实施了“多通道喷嘴”、“减压均衡氧势”、“精矿过干燥”以及“反应塔立体冷却优化”等多项新的工程技术, 经热态工业试验, 在以下关键环节上取得了成效。

1) 研究“冷风”对 H₂O-O₂-SO₂ 体系分子扩散的不利影响, 开发了精矿过干燥和强化系统密闭性及隔热性技术, 防止精矿颗粒“二次水膜”的再生, 从化学动力学条件上避免“下生料”的发生。

2) 为均衡反应塔空间氧势与粒子场, 精矿喷嘴由玛格玛式的“单通道进风”改为“4 通道进风”(如图 5 所示), 并通过降低工艺风压力, 改善了精矿分散效果。在芬兰波里实验室的小型工业实验和在金隆的试运行都表明, 新设计的多通道喷嘴显著减轻了气流偏析及颗粒对炉衬的冲刷。

3) 研制了“整体熔铸无间隙铜水套”, 质量标准示于表 3。其中 $d 17 \text{ mm}$ 过球直径和 80% 无间隙率 2 项核心指标超过国外先进水平, 显著提高了水套抗腐蚀能力。

4) 研究“冷风”与“热风”闪速炉“焦点区”漂移特性的差异, 优化闪速炉“立体冷却”结构, 延长了反应塔砌体寿命。

国内外原“热风”闪速炉的砌砖一般 1 年左右即被侵蚀至 80 mm 左右趋于稳定, 金隆“冷风”闪速炉运行 3 年后的测定数据如下:

表 3 金隆无间隙铜水套质量指标

序号	项目	中国金隆	日本小山
1	尺寸检查	长度方向 $\pm 6\text{ mm}$ 宽度方向 $\pm 4\text{ mm}$ 铜管距外表面公差 $\pm 2.5\text{ mm}$	长度方向 $\pm 6\text{ mm}$ 宽度方向 $\pm 5\text{ mm}$ 铜管距外表面公差无规定
2	过球检查	铜管规格 $d 32\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，过球直径 $d 17\text{ mm}$	铜管规格 $d 32\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，过球直径 $d 16\text{ mm}$
3	无间隙率	$\geq 80\%$	$\geq 70\%$
4	射线检查	任抽 5 块	任抽一块
5	切开检查	任抽 2 块，切成 4 片	无规定
6	固溶化处理	固溶化处理	无规定

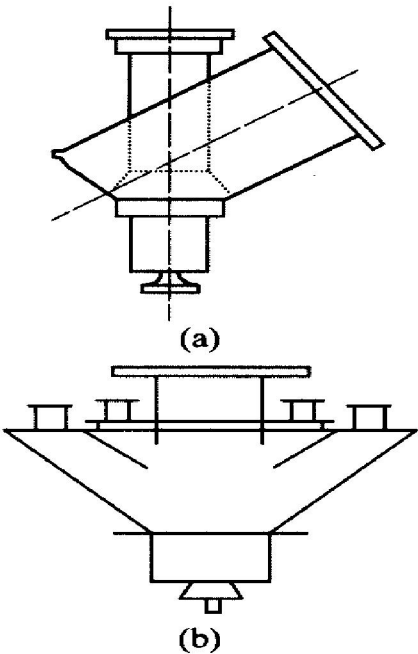


图 5 精矿喷嘴的改进
(a) —美国玛格玛工厂 (单向进风);
(b) —中国金隆铜业 (双腔四通道)



图 6 金隆“冷风”闪速炉



图 7 金隆铜业清洁的炼铜厂

测定时间 2000. 2. 17
测定方法 钻孔法
砌砖材质 法国西普 C104 电铸镁铬砖，砌砖厚度 300 mm
余留砖厚 130 mm

金隆闪速炉(图 6) 1997 年投产至今已运行 6 年，年作业率超过 97%，是世界首先实现长期、连续、稳定运行的“冷风”闪速炉。

2000 年，中国贵溪冶炼厂也停止了原进口的热风制备系统，改为冷风直接冶炼，并且产铜量从 15 万 t 提高到 20 万 t，2003 年又进一步提高到 30 万 t，成为世界大型闪速炼铜厂之一。

中国金隆铜业在“冷风”冶炼领域的技术进步，促进了世界闪速熔炼的发展(见图 7)。2002 年 5 月芬兰奥托昆普火法冶金技术主席 Matti Maurola 访问中国时，赞誉金隆工厂是“国际闪速冶金俱乐部的品牌”。

3 世界闪速熔炼研究新进展

3.1 国外研究动态

围绕降低成本和保护环境 2 个主题，世界闪速冶金界在新工艺、新材料、信息技术等方面提出了许多很好的研究方向，并取得成果。其中富于前景的重要研究有：

- 1) 美国肯尼柯特—芬兰奥托昆普闪速吹炼技术^[9]。它的出现有可能淘汰已有 100 多年历史的 PS 转炉吹炼工艺。
- 2) 日本玉野工厂 CO 还原气氛控制技术^[10]。

它的成功使闪速炉直接获得弃渣, 取消炉渣的再处理工序。

3) 加拿大 HATCH 公司和澳大利亚西方矿业的复合膜水套新材料研制与应用^[11]。

4) 日本对闪速炉兼作废物处理站的研究^[12]。依据闪速炉空间燃烧的特性, 可以成为处理废轮胎、废油、下水道污泥等各种城市垃圾的焚烧炉, 做到冶炼过程不仅不污染环境, 还有助于环境的保护。

5) 芬兰对闪速冶金安全生产监控技术研究。这是冶炼强度不断提高后, 各国闪速炉工厂普遍面临的新问题^[13]。

3.2 中国的研究与进展

1) 闪速炉扩产限度研究

测定数据证实^[6], 在反应塔顶部下方 2 m 左右, 氧的分压实际上已为零, 说明精矿在反应塔中完成反应的时间不到 1 s, 因此, 从反应速度分析, 闪速炉还存在很大的增产潜力。

但是, 增加投矿量受到反应塔“热强度”的限制。“热强度”是衡量耐火材料砌体所承受腐蚀强度的指数, 物理含义是炉膛单位容积每小时的热通量:

$$Q = \sum q / V \quad (1)$$

式中 $\sum q$ 为每小时产生的热量总和, 包括化学反应热、燃料燃烧热、热风显热等, $\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为炉膛容积, m^3 。

20 年前, 公认合适的最大热强度是 $1\,000 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 此时反应塔寿命为 8~10 年。而现在该数值已被提高到 $1\,600 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 甚至更高, 代价是反应塔炉衬的损伤, 因此需要对“产量—投资—修理费”的综合效益作出评估, 也即确定反应塔“热强度”的合理极限值。依据目前耐火材料性能及冷却保护技术水平, 控制热强度低于 $2\,300 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 较宜。

基于对闪速炉扩产技术的研究, 中国贵溪冶炼厂 $d6.8 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ 闪速炉年产铜能力已经从设计的 9 万 t 逐级提高到 11、15、20 及 30 万 t, 热强度也从 $770 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 上升到了 $1\,445 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。进一步的发展, 应当有望达 55 万 t 以上。

金隆铜业 $d5.0 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ 闪速炉年产铜能力也从设计的 10 万 t 提高到 15 万 t, 并将进一步提高到 30 万 t, 届时, 热强度将达到 $2\,300 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 再进一步提高, 可能难度较大。

2) 闪速冶金安全生产监控技术研究

1997 年 6 月 27 日, 芬兰奥托昆普闪速炉工厂发生爆炸。1998 年 5 月 1 日巴西 MSF 冶炼厂闪速

炉车间发生火灾, 都给工厂造成重大损失。

为提高企业依靠科学技术防范事故的能力, 2001 年, 中南大学、贵溪冶炼厂和金隆铜业合作完成了“闪速炉炉衬监测及蚀损预警研究”^[14]。

2002 年, 南昌有色冶金设计研究院和加拿大阿尔伯塔大学合作研究“闪速冶金在线智能监控与事故预报系统”(国家“八六三”计划引导项目 2002AA001040), 并在中国的金隆铜业创建了“安全生产监控站”。下步计划是建立“全球闪速冶金安全网站”, 旨在实现各国安全生产知识的共享。

3) 水套新材料研究^[15]

如图 8 所示, 高温炉窑的耐火材料砌体需要在水套保护下工作。

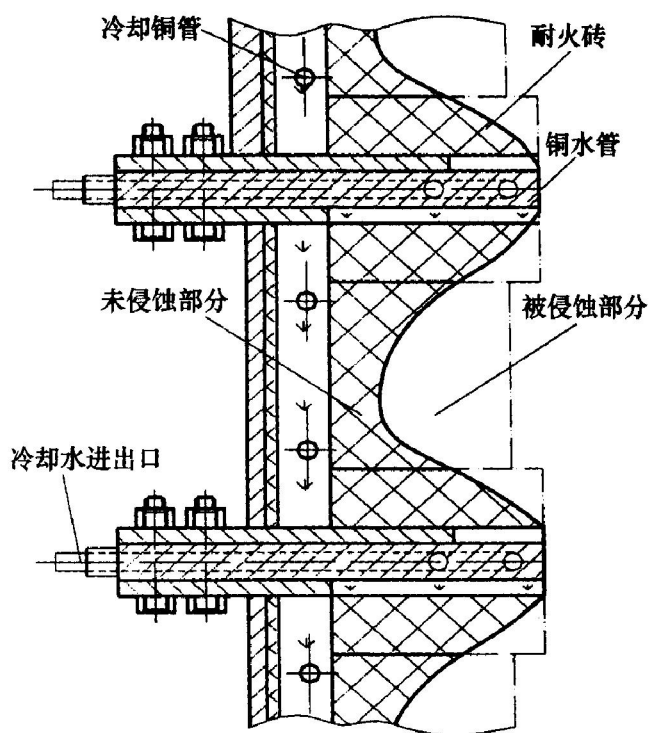


图 8 闪速炉反应塔立体冷却结构

迄今, 各国闪速炉水套均为纯铜制造, 成型方法有钻孔和铸造 2 种。选材的主要依据是纯铜具有高的导热系数, 如表 4 所示。

表 4 金属热物理性能对比

金属	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
铜	395	1 083
钨	169	3 410
钼	137	2 625
铁	79	1 530
钛	18	1 820

然而, 各国闪速炉铜水套漏水事故都常有发生, 究其原因, 铜的熔点低是重要因素。同时, 对管壁结垢状态与机理的研究也表明, 高的导热系数

也存在负面影响。并且,铜水套价格昂贵,每吨达 3.8 万美元。因此,有必要重新检讨传统的纯铜水套材料,包括高导热性能新钢种研究;高熔点铜基合金研究和水套成型技术研究。

期待的新材料应同时兼备高的导热系数和高的熔点双重性能:熔点 $> 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 导热系数 $> 200\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

4) 闪速炉连续炼铜^[16]

受甘肃省白银有色金属公司关于优化白银炉的委托,南昌有色冶金设计研究院提出了结合白银炉与闪速炉优点的“闪速炉连续炼铜新工艺”。带有预反应塔的闪速炉基本设计示于图 9。反应塔产出品位 70% 的铜钼,由一体化的熔池直接侧吹或顶吹至粗铜。取消转炉,实现连续炼铜。

5) “非接触”冶金——中心旋涡柱闪速熔炼研究^[17]

闪速炉需要承受高温、冲刷以及强腐蚀的苛刻条件,炉衬难免损伤。作为对策,研制高性能的耐火材料以及加强水冷却保护是有效的,但都是有限的。

上世纪,国外出现了日本、法国的电熔铸镁铬砖、奥地利的直接结合镁铬砖,日本古河矿业的水套冷却等新材料、新技术,都对保护炉衬做了重要贡献。1999 年,芬兰学者 Jokilaakso 提出了“水不是最好的耐火材料吗?”^[18],但即使建造全水套闪速炉,腐蚀问题仍然存在。由此,是否可能从冶金工艺上寻求一种可以不完全依赖耐火材料的根本解

决方案?南昌有色冶金设计研究院和中南大学提出了“非接触”冶金概念,并开展了“中心旋涡柱闪速熔炼”的研究(中国发明专利,申请号 03125473.X)。

深度干燥的粉状物料和氧气从设于反应塔顶部中央的“旋涡式精矿喷嘴”切线喷入,沿反应塔轴线形成粒子、氧气和温度三集中的“旋涡柱”高温区。在径向,“旋涡柱”与塔壁之间存在粒子、氧势和温度梯度的“环状非接触过渡圈”。

目前,已完成如图 10 所示的“旋涡式精矿喷嘴”基本设计(中国实用新型专利,专利号 01251991.X),并进行了流体场、粒子场及温度场的计算机仿真实验。

实验条件:

旋流数 $s = 0.4$

投矿量 $3\,707\text{ t/d}$

工艺风 含氧 53.6%, 速度 177.2 m/s

中央氧枪 含氧 95.6%, 速度 199.5 m/s

分散风 含氧 23.2%, 速度 3.3 m/s

图 11~ 图 14 显示了仿真的部分图像。

4 差距与展望

中国在闪速冶金领域已经积累了近 20 年的工程科学研究与生产经验,特别是在“冷风”冶炼方面的研究和实践为世界闪速冶金的发展做了有益的工作,当前,总体技术居于世界先进水平,部分技术领先。

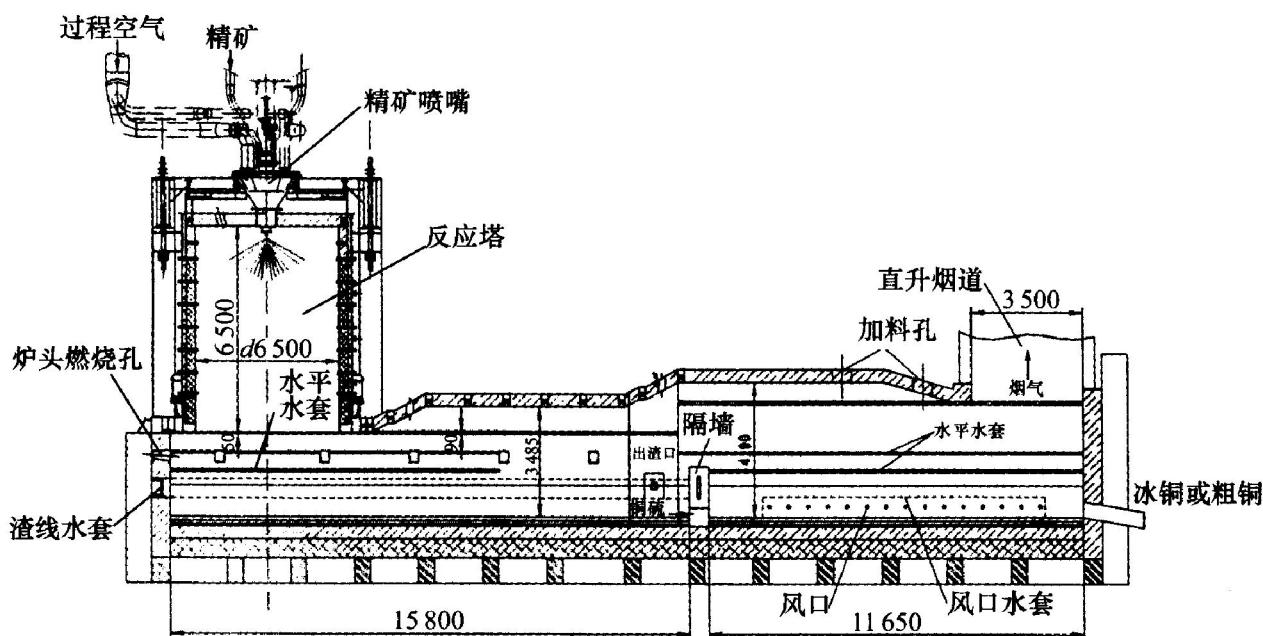


图 9 闪速连续炼铜炉

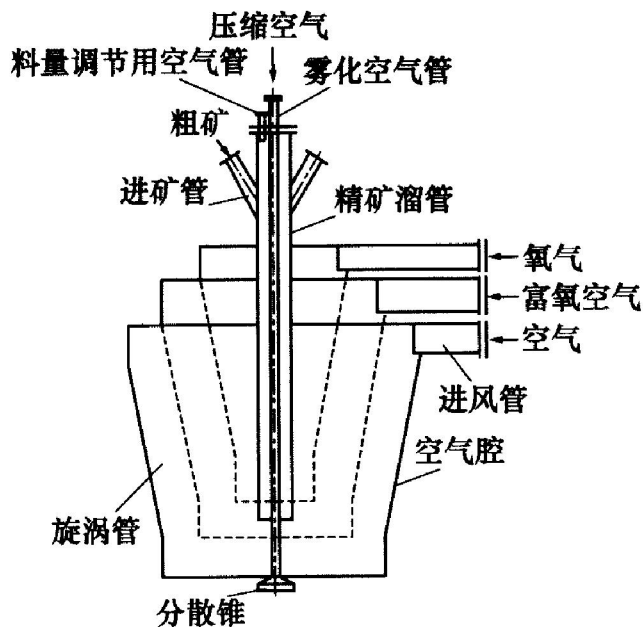


图 10 旋涡式精矿喷嘴

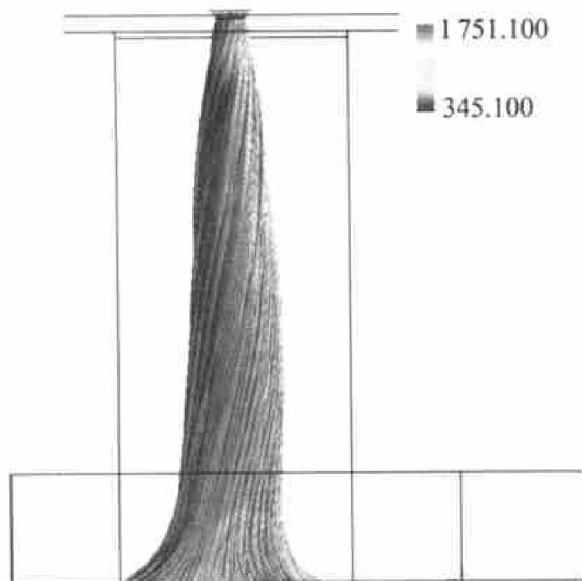


图 11 中心柱粒子轨迹与温度场
(温度及颗粒轴向集中, 形成明显中心旋涡柱, 但柱径/塔径欠小)

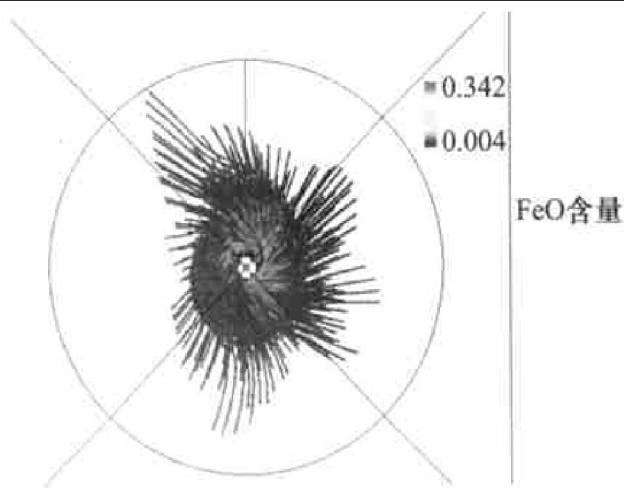


图 12 断面粒子轨迹与 FeO 含量

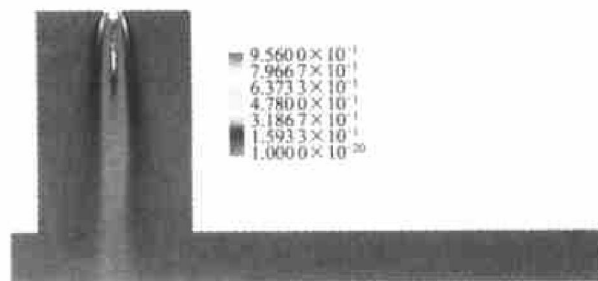


图 13 气相 O_2 浓度场
(塔顶下方 2 m, 中心区 O_2 浓度为 0)

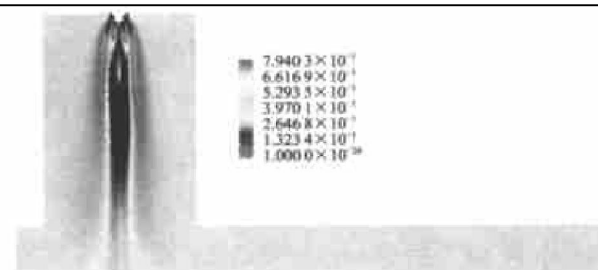


图 14 气相 SO_2 浓度场
(平均浓度 60.0%, 中心区浓度 79.4%)

表征我国闪速炼铜技术水平的标志是:

- 1) 以“冷风冶炼—烟气双级动力波净化—计算机在线控制”为特征的综合工艺技术;
- 2) 硫控制率 99.5%;
- 3) 工厂作业率高于 97%;
- 4) 吨铜熔炼直接能耗低于 4000 MJ;
- 5) 铜钼品位标准偏差 50.000 ± 0.360 , 铜钼温度标准偏差 1210.000 ± 4.270 , 炉渣 Fe/SiO_2 标准偏差 1.500 ± 0.026 , 计算机控制在线率大于 99%;
- 6) 劳动生产率 300 t/(人·a) 或 60 万美元/(人·a);
- 7) 阴极铜质量通过伦敦 LME-A 级注册。

在世纪之交, 世界闪速冶金界在工程科学研究方面取得了多项重要成果, 但中国在以下 2 方面存在差距。

1) 硫的控制率低, 约为 99.5%, SO_2 排放量约 8 kg/t (Cu)。国外最好水平是美国肯尼柯特冶炼厂, 硫的控制率超过 99.9%, SO_2 排放量仅 2 kg/t (Cu)。国内工厂主要污染源是转炉吹炼工序, 因 SO_2 泄漏导致低空污染。

2) 闪速炉反应塔单位面积产能低, 约为 0.8 万 t/m^2 , 国外目前最好水平是日本佐贺关冶炼厂, 达 1.39 万 t/m^2 , 如表 5 所示。

表 5 闪速炉反应塔单位面积产能对比

序号	国家	工厂	反应塔尺寸	铜产量/ ($10^4\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	单位面积铜产能/ ($10^4\text{t}\cdot\text{m}^{-2}$)
1	日本	佐贺关	$d6.2\text{ mm}\times 5.9\text{ mm}$	42	1.39
2	中国	贵溪	$d6.8\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$	30	0.83
3	中国	金隆	$d5.0\text{ mm}\times 7.0\text{ mm}$	15	0.76

金隆铜业正实施中的年产铜 30 万 t 扩产工程将使闪速炉反应塔单位面积产能超过 1.5 万 t/m², 成为世界高产能闪速炉之一。

强化冶金最主要的技术难点是对耐火材料的保护。基于“非接触冶金”概念的中心旋涡柱闪速熔炼是一种可以不完全依赖耐火材料的新工艺研究, 如果获得成功, 将为世界闪速熔炼创造新的发展空间。

参考文献

[1] 陈 W J, 迪亚兹 C, 卢拉斯奇 A. 美洲铜冶炼工业发展前景展望[A]. 铜的火法冶金——1995 年铜国际会议论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 2-33.

[2] 安藤元雄. 高温度酸素富化送風による大型自溶炉の開発[渡辺賞][J]. 日本矿业会誌, 1972, 7: 25-29.

[3] Jones D M, Gonzales T W. BHP San Ma 闪速炉第一作业周期的最新资料[A]. 闪速炼铜(世界第 8 届闪速冶金会议论文集)[C]. 1997. 75-81.

[4] 何昌明, 张文海, 李顺松, 等. 赴美国玛格玛铜业公司圣·曼沃尔炼铜厂的考察报告[J]. 江西铜业工程, 1991, 3: 14-19.

[5] 吕晓红, 王中奎. 峰回路转总相宜——近 20 年铜市场回顾及 2000 年预测[J]. 有色冶炼, 1999, 6: 52-57.

[6] 李伯虎, 柴旭东, 杨 民, 等. 现代建模与仿真技术的新发展. 中国科学技术前沿(第 6 卷)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 141-162.

[7] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 143, 157-160.

[8] DENG Shu-hua, ZHANG Wen-hai. Optimization of flash smelting energy schemes[A]. Proceedings of the Fifth International Flash Smelting Congress USA[C]. Finland: Outokumpu OY, 1996. 177-182.

[9] Outokumpu O E C. 中国大冶冶炼厂闪速吹炼扩产[R]. Outokumpu, 2000.

[10] 柴田隆顕. 玉野製錬所自電炉におけるエネルギー回収と代替燃料技術の確立[J]. 資源・素材学会誌, 1990, 8: 441-449.

[11] Papazogloy D, Elliot B J. 复合炉模冷却系统在闪速炉的应用[A]. 闪速炼铜世界第 9 届闪速冶金会议论文集[C]. 2000. 164-176.

[12] 小寒藤井. 日本闪速熔炼的最初应用及进展[A]. 闪速炼铜世界第 9 届闪速冶金会议论文集[C]. 2000. 1-6.

[13] Pyykko P. 哈亚瓦尔塔冶炼厂的安全环保挑战[A]. 闪速炼铜世界第 9 届闪速冶金会议论文集[C]. 2000. 145-152.

[14] 中南大学, 贵溪冶炼厂, 金隆铜业有限公司. 闪速炉反应塔炉衬保护在线监测及蚀损预警系统[R]. 2001.

[15] 高温水套材料及其成型技术开发《立项报告》[R]. 南昌有色冶金设计研究院, 2002.

[16] 铜、镍硫化物精矿闪速熔炼冶金工艺[P]. 中国专利 01138379.8.

[17] 南昌有色冶金设计研究院. 旋涡式精矿喷嘴基本设计书[R]. 2002.

[18] Jokilaakso A. 水不是最好的耐火材料吗[A]. 闪速炼铜世界第 9 届闪速冶金会议论文集[C]. 2000. 153-163.

(编辑 杨 兵)