

引用格式:叶松鹤,姜忠明,韩鹏业. 低硫褐煤在阳极精炼还原中的实践与应用[J]. 有色设备,2025,39(5):48-53.

YE Songhe, JIANG Zhongming, HAN Pengye. Practice and application of low-sulfur lignite in anode refining reduction [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 48-53.

# 低硫褐煤在阳极精炼还原中的实践与应用

叶松鹤, 姜忠明, 韩鹏业

(谦比希铜冶炼有限公司, 赞比亚 卡鲁鲁西市)

**[摘要]** 为应对传统阳极精炼还原剂(柴油、国产低硫煤)成本高、污染大的问题,本文研究了赞比亚当地低硫褐煤(全硫 0.5%~1.0%、干燥无灰基挥发分 18.02%~21.03%、固定碳 56%~58%)作为替代还原剂的可行性。通过系统分析铜阳极精炼还原原理及硫元素对阳极板质量的影响机制,重点考察了低硫褐煤中灰分、固定碳、挥发分等关键组分在还原过程中的行为与作用,并优化出铜液氧含量  $1300 \pm 200$  ppm 的核心控制参数。研究表明,以低硫褐煤作为阳极精炼还原剂,阳极板铜合格率可以稳定控制在 99.49% 以上,还原剂单位成本下降 83%,在降本增效的同时,兼顾职业健康与环境保护,具备良好的推广价值。

**[关键词]** 低硫褐煤; 阳极精炼; 还原剂; 硫控制; 灰分; 固定碳; 工业应用

**[中图分类号]** TF813 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0048-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.006

## 0 前言

在当前的工业生产中,阳极精炼还原过程至关重要,而低硫褐煤在这一领域的研究具有重大的意义和价值。随着全球能源的日益紧张以及对环保要求的不断提高,寻找高效、经济且环保的材料用于阳极精炼还原成为当务之急。低硫褐煤作为一种具有特定性质的煤炭资源<sup>[1]</sup>,在阳极精炼中展现出了—定的潜力。随着全球对铜等金属需求的不断增长,提高阳极精炼效率和质量成为了重要的研究方向。而低硫褐煤的特性,如低硫含量、高挥发分等,使其在阳极精炼过程中可能发挥独特的作用<sup>[2]</sup>。低硫褐煤的低硫含量在阳极精炼中具有重要意义。一方面,低硫褐煤可以减少环境污染。在阳极精炼过程中,硫分的存在会产生二氧化硫等有害气体,对环境造成污染。低硫褐煤的使用可以降低硫分的排放,减少环境污染<sup>[3]</sup>。另一方面,低硫褐煤在阳极精炼中可以减少因硫分带来的杂质,提高铜的纯度。在阳极精炼过程中,硫分可能会与铜结合,形成硫化铜等杂质,影响铜产品的质量。低硫褐煤的使用可以降低

硫分的含量,减少杂质的形成,提高铜的纯度<sup>[4-6]</sup>。

谦比希铜冶炼有限公司(以下简称 CCS)国外进口的材料、设备等到达各港口,通过陆运转运至厂区,备品备件和大宗物资存在采购和运输周期长、成本大等问题。由于特殊的地理位置、资源和基础工业等原因,赞比亚境内 4 大冶炼厂均采用柴油作为阳极精炼还原剂,见表 1。CCS 曾采用木炭、国产还原剂,木炭对当地环境破坏较大,而采用柴油或者国产还原剂,还原剂成本占精炼总成本的 24%。为破解此成本与供应瓶颈,CCS 根据赞比亚国情,启动了采用当地产低硫褐煤作为阳极精炼还原剂进行试验和攻关,拟解决该瓶颈。

表 1 赞比亚 4 大冶炼厂产能及精炼还原剂

Table 1 Zambia's top 4 smelters capacity and refining reductants

冶炼厂	产能/万 t	精炼还原剂
KANSASHI	30	柴油
MOPANI	22	柴油
KCM	25	柴油
CCS	25	国产还原剂/柴油

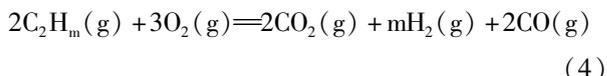
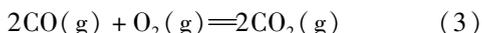
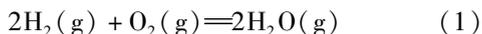
[收稿日期] 2024-12-22

[第一作者] 叶松鹤(1983—),男,云南鹤庆人,工程师,大学本科,主要从事铜冶炼工作,现任谦比希铜冶炼有限公司熔炼分厂厂长。

## 1 阳极精炼

### 1.1 基本原理

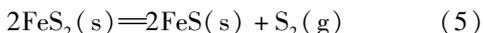
阳极精炼主要包括两个过程:氧化和还原。氧化阶段是通过鼓入  $O_2$  搅拌,利用氧化反应将杂质除去。在氧化过程中,铜水中的杂质氧化一部分以烟气形式经排烟管排出,一部分以炉渣的形式经炉口排出。经过氧化后,除金、银、硒、碲等,多数杂质是以氧化物或化合物的形式存在于铜液中。进入还原阶段,  $Cu_2O$  优先于杂质氧化物被还原,杂质氧化物能否被还原,取决于铜液的脱氧程度,即最终含氧量。只有在铜液含氧量很低时,杂质才会被还原到最低。因此,还原剂的选择和还原时间的控制是决定阳极铜质量好坏的重要因数。目前,阳极精炼使用的木炭、低硫煤、重油、柴油、天然气、液化石油气等还原剂均属于碳氢化合物,与  $Cu_2O$  产生下列反应<sup>[7-8]</sup>,见式(1)~(4)。



通过还原剂的作用,实现了铜的还原,提高了铜的纯度,为后续的浇铸等工艺提供了高质量的阳极铜。但是,若为了增加杂质的还原而进一步脱氧,将会延长还原时间,增大还原剂的消耗。

### 1.2 S 对阳极板质量影响

根据研究表明,硫在煤中的存在形态有无机硫(一般为  $FeS_2$ )和有机硫,无机硫在高温下分解,见式(5)。



反应生成的硫单质在还原气氛中部分以蒸气形态进入烟气,部分被氧化成  $SO_2$  进入烟气;大部分  $FeS$  进入还原渣中脱除,部分  $FeS$  溶解于铜液中,继续发生反应,浇铸时出现“冒硫”现象,产生鼓包,影响阳极板质量。

对于有机硫,由压缩空气喷吹进入铜液,还原剂中的有机硫发生首先与空气中的氧接触发生氧化反应,当空气中的氧被消耗完,硫被铜液中  $Cu_2O$  氧化发生氧化反应<sup>[9-10]</sup>,见式(6)。



还原前期,  $Cu_2O$  含量较大,反应速率相对较大,硫以  $SO_2$  形态随烟气排出;还原后期,  $Cu_2O$  含量降低,反应短时间不能完全反应。不管是无机硫还是有机硫,当含 S 超过 0.5%,均会对阳极板质量造成一定的影响。

### 1.3 低硫褐煤的特性及选择

低硫褐煤作为一种煤化程度较低的矿产煤,其独特的物化特性构成了其应用价值的基础。低硫褐煤属于低挥发、低硫的煤种。全硫含量通常低于 0.8%,远低于高硫动力煤,这意味着在燃烧或还原过程中,二氧化硫等含硫气体的排放量显著降低,这一特性使其在阳极精炼还原过程中具有重要的环保价值。挥发分含量通常在 25%~40%,属于低挥发分煤种。适量的挥发分在高温下能迅速析出并燃烧,为炉内提供良好的还原气氛,低硫褐煤的挥发分处于一个较为理想的平衡区间。另外,在使用过程中带入较少的硫元素,可有效减少阳极板鼓包现象,提升阳极板质量。

阳极精炼对还原剂要求较高,根据国内外各冶炼厂经验,其主要技术要求如下:

- 1) 成分要求:见表 2 中限值;
- 2) 粒度要求:最大粒径  $\leq 5$  mm。

表 2 还原剂技术指标要求

Table 2 Reducing agent technical indexes requirements

成分	%				
	干燥基全硫	干燥基灰分	干燥基水分	干燥无灰基挥发分	空气干燥基固定碳
限值	$\leq 0.50$	$\leq 10.00$	$\leq 6.00$	$\geq 10.00$	$\geq 65.00$
X1	1.57	22.55	3.77	21.03	55.77
X2	1.06	20.26	2.40	20.96	58.36
Y1	1.15	23.31	2.02	18.19	57.92
Y2	0.73	24.74	2.29	18.02	56.65

对赞比亚仅有的 X 和 Y 两家煤炭生产的褐煤取样分析,其化学成分见表 3,均存在固定碳低、灰

表 3 低硫褐煤化学成分

Table 3 Chemical composition of low sulfur lignite

编号/元素	%				
	Cu	Co	Fe	S	SiO <sub>2</sub>
X	8.56	2.84	48.55	0.65	27.3
Y	4.93	1.97	48.97	0.58	26.8

分高、含硫高的特点,达不到精炼还原剂技术要求。

为此,选取含 S 相对较低(0.5%~1%)的低硫褐煤,经过破碎粒度达到 $\leq 5$  mm 后,采用 LV 喷吹系统进行试验。

## 2 还原过程实践和控制

### 2.1 灰分的影响

灰分作为还原剂中的不可燃无机矿物组分,其含量高低直接关系到阳极铜的纯净度、工艺渣量以及综合生产成本。过高的灰分会从多个方面对精炼过程产生负面影响:首先,灰分在还原过程中可能以夹杂物形式进入铜液,直接增加阳极板中的杂质元素含量,潜在影响其导电性与后续电解精度;其次,

灰分的存在稀释了还原剂的有效成分,导致其热值降低,为达到相同的还原效果需要消耗更多还原剂;最后,灰分构成了精炼渣的主要来源,渣量的增加不仅意味着金属铜的机械夹杂损失升高,也加大了扒渣作业的强度和辅料消耗。

通过理论计算可以量化灰分对渣量的影响。以一个处理量为 300 t 铜/炉的生产周期为例,在还原剂单耗为 12 kg/t-Cu、低硫褐煤灰分为 22% 的工况下,与一种灰分较低的基准还原剂(如柴油)相比,使用低硫褐煤将导致精炼渣产生量增加约 12%。还原结束后,这些灰分以固态“干渣”形式漂浮于铜液表面,便于清除。采用不同还原剂产出阳极板物理外观及主要化学成分见表 4。

表 4 阳极板物理外观和主要化学成分对比

Table 4 Comparison of physical appearance and main chemical composition of anode plate

还原剂	物理外观	Cu/%	S/ppm	Fe/ppm	Bi/ppm	O/ppm
柴油	无鼓包	99.60	16.44	19.26	118	603
国产还原剂	无鼓包	99.56	19.64	14.74	125	1 174
低硫褐煤	有鼓包	99.49	65.63	71.94	227	1 376

然而,研究分析证实,尽管低硫褐煤的灰分较高,但其主要成分为惰性硅铝酸盐,对阳极板的关键化学质量指标(如主成分铜含量及贵金属残留)并未构成显著影响。此外,成分分析还揭示,这部分干渣中夹带有一部分未完全反应的褐煤。基于此,我们提出了将此类干渣返回至 PS 转炉进行循环利用的工艺方案,这不仅能够回收残余的碳质还原剂,提高资源利用率,也能将其中携带的铜元素重新富集回收,在一定程度上抵消了因渣量增加带来的部分成本。

### 2.2 固定碳的影响

固定碳作为还原剂的核心有效成分,其含量与性质对阳极精炼过程的经济与技术指标具有决定性影响。固定碳在高温下主要通过 2 种方式发挥作用:首先,其与氧气发生燃烧反应,释放出大量热量,为精炼炉内维持持续、稳定的高温反应环境提供了基本保障,这对于铜液保温及还原反应的顺利启动与进行至关重要;其次,固定碳及其气化产生的一氧化碳(CO)能够与阳极铜中的杂质氧化物(如  $\text{Cu}_2\text{O}$ 、 $\text{PbO}$  等)发生还原反应,生成金属单质和  $\text{CO}_2$ ,从而有效降低阳极板的氧含量,提升其导电性能和冶金质量。杂质的高效去除直接降低了阳极板的电阻,

有助于在后续电解工序中提高电流效率,降低整体生产成本。为系统评估固定碳的实际影响,本研究选取了木炭、柴油、国产还原煤及低硫褐煤 4 种典型还原剂进行对比试验。

从成分上看,木炭与国产还原煤的固定碳含量最高,均超过 70%,理论上应具备优异的还原效率。然而,物理特性显著制约了其实际应用:木炭密度低、质地轻脆,在破碎至 5 mm 以下规格的预处理过程中,产生了大量粉尘,飞扬损失严重。柴油虽非固体碳,但其在高温下裂解生成的碳黑反应活性高,但停留时间短,极易以黑烟形式快速溢出铜液,导致有效碳利用率低且对环境造成严重污染。在同等级进料重量条件下进行还原试验,平均数据如图 1 所示。

试验结果表明,木炭受预处理破碎损失大和密度低的双重影响,实际参与反应的固定碳比例下降,导致其单耗大。柴油作为还原剂时,为避免过度冒黑烟造成的环境污染和金属损失,操作中必须严格控制喷入量,这使得其还原时间较长,综合单位成本高。国产还原剂虽在固定碳含量、还原效率与利用率上表现良好,对环境的影响也较小,但高昂的运输成本致使其单位成本最高,经济性不佳。低硫褐煤

的固定碳含量适中,但其物理结构致密,在破碎和投料过程中物理损失极小。

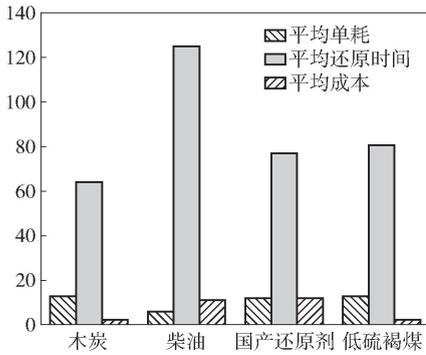


图 1 还原剂单耗对比

Fig. 1 Comparison of reducing agent unit consumption

通过长时间的生产实践验证,其单耗稳定,平均还原时间适中,在综合权衡还原效率、预处理损失、环境友好度与原料成本后,展现出最为显著的成本优势,是实现经济性与工艺稳定性最佳平衡的技术选择。

### 2.3 控制 S 对阳极板质量的影响

褐煤含 S 较高。为进一步研究分析并解决 S 对阳极板质量的影响,采用在不同氧化和还原时间下进行试验对比。为了减少其他因素的影响,试验在同等进料量和出铜温度下进行,综合了具有代表性的炉次分析比较,见表 5。

相同氧化时间下,还原时间越长,含氧越低,在浇铸过程中容易出现“析氢”现象,此外还原剂中 S

表 5 不同氧化和还原状态下的产品情况

Table 5 Products in different oxidation and reduction states

炉次/指标	氧化时间/h	还原时间/h	还原温度后/°C	含氧及取样情况	浇铸情况
1	0:43	1:10	1 221	974ppm, 花纹细	鼓包 2 块
2	0:45	1:40	1 222	800ppm, 花纹细	鼓包 41 块
3	1:00	1:16	1 217	1 310ppm, 花纹细	无鼓包
4	1:24	1:11	1 222	2 160ppm, 花纹细	鼓包 25 块

残留在铜液中量增加,导致阳极板出现大量鼓包,影响阳极板质量,见表 5 中炉次 1 和 2 样品。

为了确保氧化除杂,控制“析氢”现象,试验在适当增加氧化时间、相同还原时间下进行,目的是为了提高铜液中的氧含量。通过取样分析,氧含量达到 1 310ppm,浇铸中鼓包现象明显改善,氧含量超过 2 000ppm,则无法满足阳极板质量要求,且还会出现鼓包,见表 5 中炉次 3 和炉次 4。

还原结束后,铜液中和铜液表面干渣中都存在一定的 S,在浇铸过程中继续与 O 发生反应生成 SO<sub>2</sub>,而反应的概率与 O 含量有关。为了进一步验证还原后铜液中含 O 与 S 对阳极板质量的影响,生产过程中将 O 含量稳定控制在 1 200 ~ 1 400ppm。

试验表明,提高含 O 量后,可以有效降低铜液中的 S 含量。为控制含 S 在浇铸过程中对阳极板质量的影响,需要控制铜液中的氧势,使其能在浇铸过程中继续与 S 发生反应。当铜液的氧势不足,浇铸时铜水从出铜口到铜模过程中不断吸 O,在铜模中与 S 发生反应,冷凝的铜表面和内部形成气泡,出现

“冒硫”现象,破坏阳极板表面,即形成阳极板表面出现鼓包现象,就会对阳极板质量产生较大影响,导致合格率偏低。通过大量的试验和分析,含 O 量的最佳控制标准为 1 300 ± 200ppm。

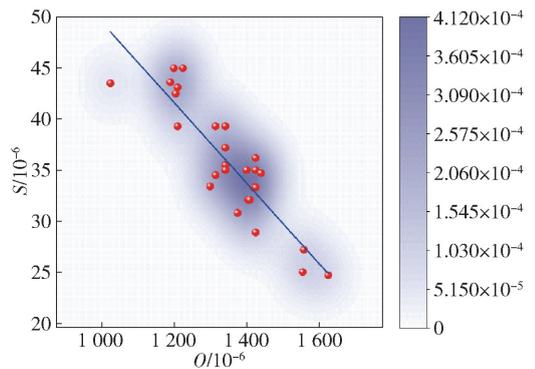


图 2 O 与 S 含量关系图

Fig. 2 Plot of O versus S content

### 2.4 挥发分的影响

低硫褐煤中挥发分主要为 C、H 化合物,在燃烧过程中会产生还原性气体,如一氧化碳等。这些还

原性气体能够参与阳极精炼中的还原反应,例如可以与阳极板表面的氧化态金属发生反应,将金属氧化物还原为金属单质,从而有助于提高阳极板的纯度。此外,挥发分的燃烧会改变炉内的气氛组成,合适的挥发分含量可以营造出有利于还原反应进行的还原性气氛,促进金属氧化物的还原以及杂质的去除。但如果挥发分含量不当,可能会导致炉内气氛过于还原或氧化性过强,偏离了阳极精炼所需的最佳反应气氛,进而影响反应的方向和速率,不利于精炼过程中各化学反应的平衡控制。试验发现,当挥发分含量稳定在 18%~21% 时,还原周期较挥发分低于 15% 的煤种缩短 8%~10%。

挥发分燃烧过程中可能会产生一些污染物,如二氧化硫、氮氧化物、烟尘等。这些污染物的排放会对周边环境造成污染,不符合环保要求,特别是在大规模的阳极精炼生产中,如果不能有效控制挥发分燃烧产生的污染物排放,可能会引发严重的环境问题,可以通过负压控制和布袋收尘处理。

### 3 结语

针对传统还原剂成本高、存在职业健康与环保隐患的问题,本文系统研究了低硫褐煤作为阳极精炼还原剂的工艺可行性及影响机制,破解了这一技术与经济难题。通过深入揭示氧、硫元素在精炼过程中的变化规律,有效控制硫含量对阳极板浇铸质量的影响,为低硫褐煤在工业化稳定生产中的应用提供了技术依据。经过 1 年多的生产实践,该技术实现了多重显著效益。

1) 实现对柴油、国产低硫煤的完全替代,阳极板铜合格率稳定在 99.49% 以上,鼓包率控制在 0.3% 以下,满足后续电解工艺对阳极板的质量要求,验证了低硫褐煤在阳极精炼中的工艺适配性。

2) 通过优化挥发分燃烧污染物控制方案(负压+布袋收尘),SO<sub>2</sub> 排放量较柴油还原剂减少 32%,烟尘排放浓度降至 15 mg/m<sup>3</sup> 以下,既符合赞比亚当地环保标准,又降低了烟气对操作员工的健康危害,实现绿色冶炼。

3) 还原剂单位成本较柴油降低 83%,在资源匮乏、进口成本高的地区,提供了低成本、环保化的还原剂替代范例,具备广泛的推广应用前景。

#### [参考文献]

- [1] ZHAO H, BAI Z, BAI J, et al. Effect of coal particle size on distribution and thermal behavior of pyrite during pyrolysis [J]. *Fuel*, 2015(148):145-151.
- [2] 师亚文,周玲妹,武正鹏. 乘在低阶高硫和低硫煤中的赋存形式及其对浮沉脱除的影响[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S1):34-40.
- [3] 范玉强,徐君,高广博. 石灰石和灰化温度对燃煤中重金属固定率影响的实验研究[J]. *冶金能源*, 2016, 35(2):4.
- [4] 李林山,张磊. 铜阳极火法精炼氧化还原脱杂生产实践[J]. *甘肃冶金*, 2023, 45(6):52-55.
- [5] 孙丽娜,王辉. 阳极炉精炼现状及发展趋势[J]. *铜业工程*, 2020(4):69-72.
- [6] 张应. 精炼阳极炉提高阳极板质量生产实践[J]. *中国金属通报*, 2019(11):221-222.
- [7] 朱祖泽,贺家齐. *现代铜冶金学*[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [8] 翟玉春,刘喜海,徐家振. *现代冶金学*[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [9] SOLTANIEH M, KARIMI Y. Copper reduction in anode furnaces with natural gas [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2005, 44(3):429-434.
- [10] SALI Haitham Ibraheem, HASHI Mustafa Shakir. The effect of preparation conditions on the characteristics of anodized copper oxide[J]. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, 60:666-676.

## Practice and application of low-sulfur lignite in anode refining reduction

YE Songhe, JIANG Zhongming, HAN Pengye

(Chambishi Copper Smelting Limited, Kalulushi, Copperbelt Province, Zambia)

**Abstract:** To address the issues of high cost and significant pollution associated with traditional reducing agents (diesel oil and domestic low-sulfur coal) used in anode refining, this study investigates the feasibility of using local low-sulfur lignite in Zambia (with a total sulfur content of 0.5%~1.0%, dry

ash-free volatile matter of 18.02% ~ 21.03% , and fixed carbon content of 56% ~ 58% ) as an alternative reducing agent. By systematically analyzing the reduction principle of copper anode refining and the mechanism of sulfur's impact on anode plate quality, the study focuses on examining the behavior and role of key components in low-sulfur lignite (such as ash, fixed carbon, and volatile matter) during the reduction process, and optimizes the core control parameter of copper liquid oxygen content at  $1300 \pm 200$  ppm. The research results show that when low-sulfur lignite is used as the reducing agent for anode refining, the qualification rate of copper in anode plates can be stably controlled above 99.49% , and the unit cost of the reducing agent decreases by 83% . While reducing costs and improving efficiency, it also takes into account occupational health and environmental protection, thus possessing good promotion value.

**Keywords:** low-sulfur lignite; anode refining; reducing agent; sulfur control; ash content; fixed carbon; industrial application ▲

---

## 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)等数据平台下载使用。

本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010 - 63936591、010 - 63933053 联系。

《有色设备》编辑部