

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.03.001

铜冶炼过程碳排放及自热熔炼分析

晏滔^{1,2}, 余小吕², 杨应宝^{1,2}, 周世伟¹, 李博¹, 魏永刚¹

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
2. 易门铜业有限公司, 云南 玉溪 651100)

摘要:“双碳”背景下,我国铜冶炼作为高耗能高排放行业需突破资源、能源、供求关系等多重制约因素,方能迈上铜工业低碳绿色创新可持续发展道路。采用熔炼系统能量流平衡模型研究其能源利用收支情况,有利于进一步挖掘节能潜力,实现富氧底吹熔炼过程的低碳可持续化高效生产。通过计算铜冶炼厂底吹熔炼体系各类热量的收入和支出行为,解析无碳质燃料投入工况下的热量收支平衡关系,继而提出无碳自热熔炼的优化改进方案。因此,从原料适配、操作制度、设备优化等多方式调控以实现富氧底吹无碳自热熔炼。从碳源上减少或避免煤粉的加入,从而降低过程碳排放,以期铜冶炼的清洁生产提供有益的思路和建议。

关键词:富氧底吹熔炼;自热熔炼;热量平衡;碳排放;优化方案

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)03-0001-07

Analysis of Carbon Emission and Self-Heating Smelting in Copper Smelting Process

YAN Tao^{1,2}, YU Xiaoli², YANG Yingbao^{1,2}, ZHOU Shiwei¹, LI Bo¹, WEI Yonggang¹

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yimen Copper Industry Co., Ltd., Yuxi 651100, Yunnan, China)

Abstract: Under the background of “Dual Carbon Goal”, China’s copper smelting, as a high-energy-consuming and high-emission industry, needs to break through the multiple constraints of resources, energy, supply and demand, in order to move towards the low-carbon, green, innovative and sustainable development of the copper industry. Adopting the energy flow balance model of the smelting system to study its energy income and expenditure situation is helpful to further explore the energy saving potential and realize the low-carbon sustainable and efficient production of oxygen-enriched bottom-blowing smelting process. By calculating the various types of heat income or expenditure behavior of bottom-blowing smelting system in copper smelters, the heat balance relationships without carbon-free fuel input were analyzed, and the optimization and improvement plan of carbon-free self-heating process was proposed. Therefore, in order to realize oxygen-rich bottom-blown carbon-free self-heating smelting, it can be controlled in many ways, such as raw material adaptation, operation system and equipment optimization. To reduce or avoid the addition of pulverized coal from carbon source, so as to reduce the carbon emission of the process, as a result, it can provide useful ideas and suggestions for the cleaner production of copper smelting.

Key words: oxygen-rich bottom blowing; self-heating smelting; heat balance; carbon emission; optimization scheme

收稿日期:2023-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974142)

作者简介:晏滔(1990-),男,学士,工程师;通信作者:周世伟(1990-),男,博士

在国家双碳政策和用能结构转型的背景下,能源密集型有色金属产业链备受关注。铜作为现代工业的基础原料,是不可或缺的有色金属品种之一,铜冶炼行业也相应纳入全国碳市场的行业子类,但在下游精炼铜需求扩张,上游铜精矿对外依存度不断提升的供需矛盾下,我国铜工业碳排放及能耗现状面临着前所未有的挑战。

据统计,近年来我国有色金属行业 CO₂ 年排放量约 6.5 亿 t,铜冶炼 CO₂ 总排放量约 919 万 t,占有色行业碳排放量的 1.41%,平均生产 1 t 电解铜 CO₂ 排放量为 1.04 t^[1]。以中国铜业旗下的西南铜业、东南铜业、赤峰云铜为例,其年产电解铜总产量约 130 万 t,碳排放量约 136 万 t,按照碳交易价格折算碳排放费用 7 800 万元以上^[2]。

纵观铜产业链,从上游原料铜精矿到下游产品电解铜的主要生产工序包括:造钼熔炼—炉渣贫化—转炉吹炼—阳极炉精炼—电解精炼,各工序对无烟煤、天然气、电力、焦炭、柴油等原料有着不同程度的需求。其中熔炼、吹炼和精炼是主要的高耗能、高排放环节^[3],涉及燃料燃烧碳排放(煤炭、燃气、油料等在冶金炉内与氧气充分燃烧产生碳排放)、电耗及能耗产生的碳排放、能源作为碳质还原剂参与还原反应,还原过程涉及焦炭、天然气等原材料消耗产生的碳排放、碳酸盐分解等碳排放。

造钼熔炼作为火法铜冶炼最关键的一环,我国传统的熔炼工艺存在着污染大、能耗高、效率低下的问题。根据铜冶炼工厂数据,从生产工序角度剖析,熔炼阶段能耗占比 22.1%,碳质燃料能耗占比 12.2%,电耗占比 9.9%,正是对碳质燃料的依存程度较高,相应产生的碳排放高达 229.6 kg/t。

为了更充分地厘清碳排放来源的影响程度,直接从碳排放的类型入手,分为直接排放和间接排放^[4]。在工厂 25 万 t 阴极铜产量所带来的直接碳排放中,燃料燃烧占比 5.83%、能源充当原料参与反应占比 1.10%、中间过程反应占比 0.24%;间接碳排放中,净购入电力占比 91.37%、净购入热力占比 1.55%。可见,在铜冶炼环节 CO₂ 直接排放集中体现在燃料燃烧,间接排放体现在电力的消耗;在火法冶炼阶段的碳排放集中体现在燃料燃烧,也就是说碳质燃料的引入对整个火法冶炼阶段的碳排放控制带来不利影响。

由于近几年低碳经济持续推进,针对以上碳排放及能耗的现实性挑战,国家对铜冶炼水平在科技创新领域有了很大的提升,不断涌现先进的冶炼技

术方案^[5-8]。富氧底吹熔池熔炼新工艺具有环保、高效、节能等特点,其中无碳自热熔炼就是其满足当下双碳背景的一大战略性优势,使我国的低碳铜冶炼水平上升到一个新的层面。

1 氧气底吹无碳自热熔炼

当今多元化的炼铜工艺中,无论是闪速熔炼或是不同富氧喷吹方式的熔池熔炼,富氧强化造钼熔炼中产出高品位冰铜,就需要在造钼熔炼过程合理调控原料结构和燃料配备率,以满足造钼熔炼体系中物料和热量的收支平衡,使生产顺利进行。

但是普通富氧高温强化造钼熔炼过程中需要消耗一定量的燃料。例如,我国富氧侧吹熔池熔炼的配煤率为 3%,铜陵金昌的奥斯麦特熔炼炉燃料率为 7%^[9],澳大利亚艾萨熔炼炉燃料率为 5%。从以上配煤率的现状来看,离自热熔炼明显还存在一定差距。

1.1 氧气底吹无碳自热熔炼特点

底吹熔炼炉最主要特点在于氧气和空气通过底部氧枪连续送入炉内铜钼层,产生剧烈的搅拌,迅速完成造钼、造渣等熔炼过程。一方面,底吹熔炼工艺由于铜钼本身流动性远好于渣,雷诺数大,容易形成紊流流场。动力学条件比顶吹及侧吹工艺^[10]好,动力学不是速率限制环节^[11];另一方面,直接鼓入冰铜层的富氧气体优先与 FeS 反应,当气泡传递到渣层时,氧势已大大降低,因此减少了渣的过度氧化,抑制了泡沫渣的生成,渣的流动性好^[12],易于分离。此外,底吹熔炼对原料的适应性较强,可处理复杂难处理的多金属矿、含金银高的贵金属伴生矿和低品位铜矿等。最重要的是,底吹熔炼过程中具有自热熔炼程度高的优点,最大限度利用了入炉物料之间相互反应提供的热能,有利于减少外配煤的投入。这主要是富氧底吹熔炼过程中氧浓度高,产生的烟气体量小,炉子的散热面积小,带走的热量少,容易实现自热熔炼。

影响富氧底吹自热熔炼的因素主要有以下几方面:

1)富氧浓度。富氧浓度与自热熔炼速度成正比,运用纯氧或高浓度的富氧产生的烟气体量小,从而减少烟气带走热量。

2)合理的炉料 S/Cu。炉料 S/Cu 越高就越容易实现自热熔炼,但 S/Cu 过大导致炉内热负荷过剩,影响炉体使用寿命,过低的 S/Cu 也会导致供热不

足,无法实现自热熔炼。

3)合理的炉渣 Fe/SiO₂。控制 Fe/SiO₂在完成造渣放热反应的同时,避免熔剂量过多导致渣量变大,炉渣带走的热量也显著增加。

可见,原料中关键产热元素放热和生成产物耗热的程度受到原料初始结构的影响。当前铜冶炼入炉原料以铜精矿为主,流程返料(氧化渣、渣精矿)为辅,并根据炉况配入燃料(无烟煤)。为了实现自热熔炼,就需要对入炉原料结构进行合理优化,如添加辅料或调整熔渣组成^[13],满足维持熔炼过程所需的热量。

1.2 氧气底吹无碳自热熔炼工艺原理分析

如果自热熔炼过程收入总能量大于所消耗的总能量,则能实现“低能—零能—负能”熔炼^[14]。“氧气底吹无碳自热熔炼”工艺意味着铜熔炼可完全实现自热熔炼,即不加碳质燃料实现自热过程,免去碳质燃料投入带来的直接碳排放。

理论上,炉体底部喷吹的高浓度富氧,在上升过程中使炉料中的硫化物发生氧化反应放出大量热量,氧化作用是借助于气-液相质量传递,热量是从内部加热熔体,改善炉内热量交换传递条件,提高换热效率;熔池内主要发生物料的熔化、硫化物的氧化反应和造渣反应^[15]。通过控制氧气射流的强度,满足熔体中全部反应所需条件;喷吹气体具有较高的富氧浓度,离炉烟气量少,炉壁不用铜水套冷却保护;热量平衡后实现热量的自给自足,无需额外供能。熔炼过程不配煤不仅减少了碳质燃料投入,还降低了燃煤耗氧量。

理论分析需结合工厂实际情况,在正常生产工艺条件下,达到物料平衡一般相较热量平衡而言更容易稳定实现。而热量的收入和支出关系与富氧底吹熔池熔炼过程碳质燃料的补给量息息相关,这就需要对富氧底吹熔池熔炼体系的热量收入和支出的平衡关系、盈亏关系进行详细的分类,分项定量计算分析,从而量化指导原料结构与热量收支的联动调节,以此实现在减少甚至不配碳质燃料的条件下,依然满足富氧底吹造钼熔炼产出高品位冰铜的阶段产物要求。

2 氧气底吹无碳自热熔炼热平衡定量计算

2.1 热平衡计算原理模型

底吹熔炼热平衡计算根据工艺设计标准(重有色金属冶金炉窑热平衡的测定与计算方法(富氧熔池熔

炼炉):YS/T 1291—2018、重有色金属冶金炉窑热平衡测定与计算方法(铜底吹炉):YS/T 1176—2017),从冶金热力学角度计算底吹熔炼热平衡工艺条件。在满足工艺设计标准的前提下进行热平衡计算,是保证底吹熔炼过程热力学可行的重要手段和必要步骤。

底吹熔炼热平衡计算的总则是保证热收入与热支出相等,热收支平衡如图1所示。

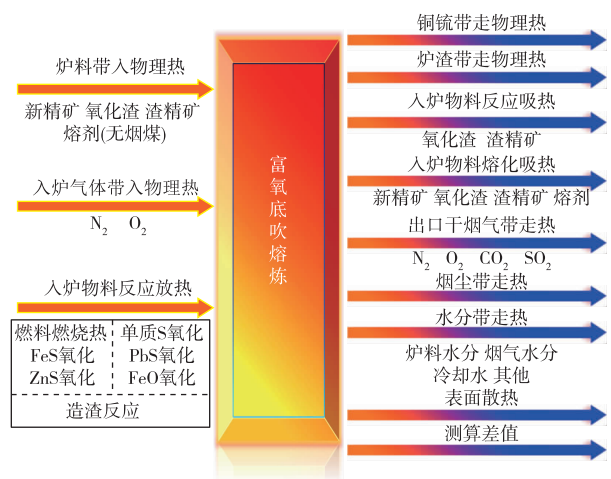


图1 热收支平衡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat income and expenditure

底吹熔炼热平衡收入项包括:1)投入物料的显热,如铜精矿、渣精矿、氧化渣、燃料、熔剂、入炉气体等,主要根据物料中化合物的成分、数量及温度计算显热,然后加和。2)化学反应热,根据投入的原料和生成的产物中的所有化合物生成焓来计算化学反应热。

底吹熔炼热平衡支出项包括水分带走热、铜钼显热、炉渣显热、烟气和烟尘显热以及热损失,若化合物在温度区间内有相变热产生,须分段计算并加上物质相变熔化吸热。

总的底吹熔炼热平衡计算原理^[16]表示为:

$$\sum_i \Delta H_{298} + \sum_i \int_{298}^T C_{P,i} dT = \sum_j \Delta H_{298} + \sum_j \int_{298}^T C_{P,j} dT + Q_{\text{loss}} \quad (1)$$

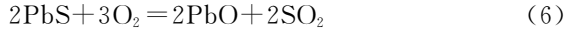
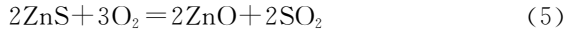
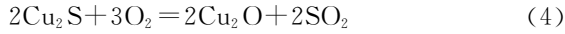
式中, ΔH_{298} 为化合物生成焓(kJ/mol); $C_{P,i}$ 为化合物热容系数(J/K); T 为计算温度(K); Q_{loss} 为热损失(J); i,j 分别代表投入物和产物。

2.2 分析各类热量收入或支出行为

热量收入主要是指氧化反应放热、物料带入热

量和造渣反应的放热。

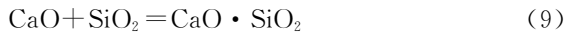
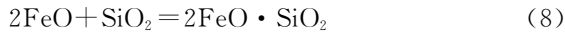
1)氧化反应放热:



其中,S为底吹熔炼提供了大部分的热量。

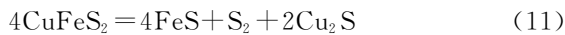
2)煤燃烧热量主要是指加入的无烟煤燃烧放出的热量。

3)造渣反应放热:



热量支出主要是指吸热反应所需热量、冰铜炉渣带走的热量、烟气烟尘带走热量、炉体自身的散热以及其他热损失。

1)分解反应吸热所需热量主要是指硫化物分解和碳酸盐分解:



2)铜铈、炉渣、烟气烟尘带走的热量:主要是指反应产生的高热值铜铈、炉渣、烟气烟尘排出体系,不能在炉体内提供热量,因此产出这些物质需要带走一部分的热量。

3)炉体自身的散热:主要是指炉子内部进行高温反应,炉体具有很高的温度,炉壁与周围的空气墙壁等进行热量传递所造成的热量损失。

4)物料中水分气化吸热、冷却水带走热以及其他热损失:主要是指物料中的水分蒸发、气化所需要吸收的热量,循环冷却水带走的热量等。

根据高杂铜原料氧气底吹无碳自热熔炼的物料平衡和反应规律,采用 FactSage 热力学计算软件,获取原料中各物质的比热容和底吹熔炼过程涉及各化学反应的焓变,计算并分析高杂铜原料氧气底吹无碳自热熔炼体系能量流的收入与支出行为。

3 氧气底吹造铈无碳自热熔炼工艺的热平衡计算案例分析

对云南某铜熔炼厂进行连续 100 d 的产入产出记录,并对其数据进行统计处理。所涉及的熔炼通过添加混合铜精矿、流程返料(氧化渣、渣精矿)、熔剂,经烟气余热干燥后水分降低至 10.19%,在 1 200 ℃ 的冶炼温度下进行富氧冶炼。在添加 86 662.67 kg/h 的混合新精矿、3 641.92 kg/h 的流程返料、6 919.75 kg/h 的熔剂条件下,所得综合入炉原料的元素成分为(%):Cu 19.43、Fe 25.81、S 25.12、Al 2.60、Ca 3.63、Mg 0.19、Pb 1.14、Zn 1.09、As 0.59、其他 20.4。单位物质物料 S 含量为 0.23 kg。鼓入的富氧空气质量为 27 423.22 kg/h,漏风质量为 825.6 kg/h。在此条件下冶炼所得冰铜质量为 19 454.65 kg/h,品位为 72.294%,主要元素组成(%):Cu 72.29、Fe 4.93、S 18.80、SiO₂ 0.73、CaO 0.05、Pb 0.69、Zn 0.36、As 0.26、其他 1.89。冶炼所产生的炉渣数量为 55 432.77 kg/h,成分(%):Cu 2.685、Fe 41.29、S 0.61、SiO₂ 22.55、CaO 2.29、MgO 1.275、Pb 0.325、Zn 1.785、As 0.08、其他 27.11。渣中铜含量为 2.685%。产生的烟尘为 1 109.94 kg/h,烟气量为 49 475.79 kg/h。计算表明,总体入炉物料收入为 125 473.15 kg/h,物料支出为 125 473.15 kg/h。

根据上述理论,结合熔炼过程硫化高温分解、氧化还原等反应过程,对此工况下熔炼的热收入与热支出进行了计算,表 1 为底吹炉的热收入。可以得到,每小时热收入为 257 929 MJ,不添加无烟煤的情况下煤粉燃烧放热量为 0,99.61%的热收入来源于黄铜矿、斑铜矿等的 S 氧化放热。

表 2 为底吹炉的热支出。在热支出项中,铜铈带走热占热支出的 6.81%,为 17 880.49 MJ/h,铜渣带走热占热支出的 29.35%,为 77 112.67 MJ/h,入炉物料熔化吸热占热支出的 26.62%,为 69 942.03 MJ/h,干烟气带走热占热支出的 17.83%,为 46 856.06 MJ/h,水分带走热占热支出的 14.48%,为 38 049.61 MJ/h,炉体表面散热损失占热支出的 3.05%,为 8 001 MJ/h,热收入与热支出之间差值为 4 824.89 MJ/h,占比 0.02%。

表 1 热量收入项汇总表

Table 1 Summary table of heat income items

符号	项目	数量/(MJ·h ⁻¹)	占比/%	合计占比/%	
Q1	物料带入热	新精矿	593.84	0.23	0.30
		渣精矿	88.81	0.03	
		氧化渣	20.99	0.01	
		熔剂	83.21	0.03	
Q2	入炉气体带入热	氮气	86.27	0.03	0.07
		氧气	106.25	0.04	
Q3	入炉物料反应热	原料中 S 的氧化放热	84 300.88	32.68	99.61
		ZnS 氧化反应放热	8 889.92	3.45	
		PbS 氧化反应放热	10 328.41	4.00	
		FeS 氧化反应放热	123 621.63	47.93	
		FeO 氧化放热	15 381.38	5.96	
	造渣反应	14 427.10	5.59		
Q4	煤粉燃烧放热	0	0	0	
	热收入合计	257 928.69	100.0	100.0	

表 2 热量支出项汇总表

Table 2 Summary table of heat expenditure items

符号	项目	数量/(MJ·h ⁻¹)	占比/%	合计占比/%	
Q1'	铜铈带走热	17 880.49	6.81	6.81	
Q2'	铜渣带走热	77 112.67	29.35	29.35	
Q3'	入炉物料反应吸热	渣精矿反应吸热	2 135.35	0.81	0.96
		氧化渣反应吸热	404.12	0.15	
Q4'	入炉物料熔化吸热	氧化渣熔化吸热	2 055.62	0.78	26.62
		渣精矿熔化吸热	8 180.77	3.11	
		新精矿熔化吸热	53 865.20	20.50	
		熔剂熔化吸热	5 840.44	2.22	
Q5'	干烟气带走热	46 856.06	17.83	17.83	
Q6'	水分带走热	烟气水分带走热	19 276.85	7.34	14.48
		炉料水分蒸发吸热	18 619.48	7.09	
		其他水分吸热	3.98	0.00	
		冷却水带走热	149.30	0.06	
Q7'	烟尘带走热	2 372.26	0.90	0.90	
Q8'	炉体表面散热损失	8 001.00	3.05	3.05	
	误差	4 824.90	0.02	0.02	
	热支出合计	262 753.59	100.0	100.0	

在不添加无烟煤的条件下,热支出略高于热收入,理论上无法实现自热熔炼。但实际生产过程该工况下可以满足底吹炉自热熔炼对热量的要求。下面对理论计算与实际生产运行的误差进行分析,其中热收入与热支出计算的误差主要来源于:

1)综合入炉原料称量,包括各类国产及进口铜精矿和杂矿,以及流程返渣等。

2)出炉产物铜铈和铜渣的称量,以及烟气烟尘量的把握。

3)物料平衡计算方法的多样化。购进的原料和冶炼过程中间物料、产品都需精准计量^[17]。

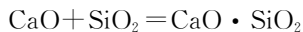
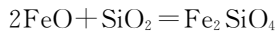
本计算利用企业长期稳定的生产数据入炉物料质量,通过铜回收率、铜铈品渣率、烟尘率、脱硫率等参数进行铜铈质量、渣量、烟尘量以及烟气量的计

算。此方法具有更好的参考价值,且无需称量及输入各产物的质量,可根据输入项及相关参数的改变实现对产出相质量的预估计算,实现产出相和输入相的相关动态计算。但对于另一种计算方法,利用实际工厂提供的数据,在已知入炉物料的种类及质量、产物质量的前提下进行物料平衡计算。虽然此方法输入实际数据较多,更贴切实际生产,但同时需要输入及输出数据,无法直接实现产物输出与产物输入的动态计算,且物料平衡的误差受各产物称量准确性的影响较大。所以虽然本次计算采用的第一种方法与实际数据的匹配有一定偏差,但是尽可能地减少了由于企业称量及检测引入的不可控因素。对于企业实际生产过程该工况下,通过提高得物质入炉物料 S 含量即提高黄铜矿等高硫矿配比以增加

热收入,并利用烟气干燥入炉矿石以降低热支出,从而可以满足底吹炉自热熔炼对热量的要求。

根据工程案例实际生产数据计算分析可知,要实现富氧底吹熔炼体系不添加额外碳质燃料进行热量补充,就需要重点考察影响热量收支平衡的热计量类别,并结合改进措施的可行性进行双向调控。

实现自热熔炼优化调控的基本思路就是在合理可控的范围内尽可能地增加热量收入,减少热量支出,达到底吹炉自产热量的稳定饱和状态。入炉物料反应放热在整个热收入中承担主要作用;入炉物料熔化吸热、熔炼产物带走显热在整个热支出里是主要散热项,尤其是铜渣带走热在热支出占比最大。以上热计量类别都与入炉原料结构及产物性质相关度较高,在此条件下可采取相应举措来优化热量平衡:提高物质入炉物料 S 含量以增加热收入;控制入炉原料中 SiO_2 以调节熔渣的 Fe/SiO_2 保持 1.5~2.0,添加的石英熔剂参与造渣反应:



该过程放热且自发进行并产生大量铁硅渣、钙硅渣,这就需要控制造渣剂的投入,降低熔渣产量,减少排渣过程中带走的热量,减少热支出;采用高富氧浓度提高冰铜品位,保持在 65%~78%,降低铜硫质量以降低放硫带走的热量,同时使得更多铁的硫化物通过氧化反应为熔炼提供热量,易于自热熔炼的实现。

除此之外,高温烟气无组织逸散和高温炉体表面热交换都会耗散体系的热量增加体系热平衡困难。针对以上热计量类别的优化,可采取相应举措降低热量损耗并进行热量回收:利用烟气干燥入炉矿石以降低热支出,熔炼过程产生大量高温烟气(含 SO_2 、 CO_2 、 H_2O 、 O_2 、 N_2),对烟气有组织捕捉通过余热锅炉、电收尘后,进一步干燥硫化铜精矿,减少入炉矿石中的水分,降低熔炼过程中水分蒸发所带走的热量;加强炉体保温措施,减少高温炉体与外界环境的热量交换,热支出项减少,易于自热熔炼的实现。

4 结论与展望

“碳达峰、碳中和”的时代要求和铜产业扩张的发展态势的背景下,有色行业能耗及碳排放情况值得关注。我国铜生产过程碳排放源主要来自电力消耗及化石燃料消耗。从铜冶炼产业的源头到末端,相应的低碳降耗措施也得以应运而生:从原料结构适配,代替碳源燃料发挥最大释热性能,实现源头减

碳;到强化冶炼过程,高温富氧高效喷吹改善传热传动效率,结合余热回收,从而发挥热量最大利用率,实现过程减碳;再到对 CO_2 资源化利用,实现铜冶炼末端减碳。

正是由于铜冶炼造钼熔炼阶段的高能耗以及对化石类碳质燃料的依存度较高,使得熔炼作为火法铜冶炼中调控作业最关键的一环,碳质燃料过程配备率归零,才能真正实现无碳自热熔炼。在具体生产实践中,提高物质入炉物料 S 含量以增加热收入;控制入炉原料中的 SiO_2 以调节造渣反应产渣量,降低出渣带走炉内热量;采用高富氧浓度提高冰铜品位,降低铜硫质量;减少烟气和水分挥发散热;减少炉体散热,采取适当措施有效地控制体系热量平衡将使无碳自热熔炼成为可能。

顺利实现“双碳”目标,减少碳质燃料的投入,转变能源发展方式、加快推进非化石能源发展将是今后铜冶炼行业节能减排发展的重要方向。

参考文献

- [1] 李丹. 碳中和背景下铜行业碳排放水平测算[EB/OL]. [2023-09-20]. <https://www.mymetal.net/21/0514/18/3FFD99E0CFD30E82.html>.
LI D. Measurement of carbon emission level in copper industry under the background of carbon neutrality [EB/OL]. [2023-09-20]. <https://www.mymetal.net/21/0514/18/3FFD99E0CFD30E82.html>.
- [2] 张国成. 中国铜冶炼行业竞争格局及市场份额[EB/OL]. [2023-09-20]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/220811-6003b2ac.html>.
ZHANG G C. Competition pattern and market share of copper smelting industry in China[EB/OL]. [2023-09-20]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/220811-6003b2ac.html>.
- [3] 陆阳. 铜冶炼行业清洁生产评价指标体系研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2017.
LU Y. Research on evaluation index system of cleaner production in copper smelting industry[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology,2017.
- [4] 顾一帆,杨弘扬,吴玉锋,等. 中国铜产业体系演化的碳中和实现机制研究[J]. 中国环境管理,2023,15(4):61-71.
GU Y F, YANG H Y, WU Y F, et al. Research on carbon neutrality realization mechanism of copper industry system evolution in China [J]. China Environmental Management 2023,15(4):61-71.
- [5] GAINES L L. Energy and materials flows in the

- copper industry[R]. US Department of Energy, 1980, ANL/CNSV-11.
- [6] WANG J B, LIU W, CHEN L, et al. Analysis of China's non-ferrous metals industry's path to peak carbon; a whole life cycle industry chain based on copper[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164454. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.164454.
- [7] 曲贞为, 张煜, 邵学东, 等. 双碳目标达成在铜冶炼企业中的探索[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(3): 113-116.
QU Z W, ZHANG Y, SHAO X D, et al. Exploration of achieving double carbon goal in copper smelting enterprises[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(3): 113-116.
- [8] 张宏. 闪速冶炼过程碳排放量计算和碳排放减排策略[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(3): 109-112.
ZHANG H. Carbon emission calculation and carbon emission reduction strategy for flash smelting process[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(3): 109-112.
- [9] 崔志祥, 申殿邦. 低碳经济与氧气底吹熔池炼铜新工艺[J]. *有色冶金* 2011, 27(1): 17-20.
CUI Z X, SHEN D B. Low carbon economy and new process of copper smelting in oxygen bottom blowing bath[J]. *Nonferrous Metallurgy Energy* 2011, 27(1): 17-20.
- [10] 许欣. 综合回收处理炉设计特点及应用[J]. *中国有色冶金*, 2021, 50(5): 12-16.
XU X. Design features and application of comprehensive recovery and treatment furnace[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2021, 50(5): 12-16.
- [11] 鲁晓娟, 谢刚, 曾桂生, 等. 自热熔炼含镍铜精矿的热力学分析[J]. *有色金属*, 2004, 56(1): 31-33.
LU X J, XIE G, ZENG G S, et al. Thermodynamic analysis on autogenous smelting of nickeliferous copper concentrate[J]. *Nonferrous Metals*, 2004, 56(1): 31-33.
- [12] 衷水平, 陈杭, 林泓富, 等. 我国铜熔炼工艺简析[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2017(11): 1-8.
ZHONG S P, CHEN H, LIN H F, et al. Brief analysis on copper smelting process in China[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2017(11): 1-8.
- [13] 李强, 杨必文, 章小兵, 等. 废线路板自热熔炼渣物化性能研究[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(7): 114-120.
LI Q, YANG B W, ZHANG X B, et al. Research on physicochemical properties of autothermal melting slag of waste circuit board[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(7): 114-120.
- [14] 朱光俊, 杨治立. 自热熔炼节能途径探析[J]. *冶金能源*, 2006, 25(1): 6-10.
ZHU G J, YANG Z L. Study on the energy saving ways of heat-self smelting[J]. *Metallurgical Energy*, 2006, 25(1): 6-10.
- [15] 朱祖泽. 现代铜冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHU Z Z. Modern copper metallurgy[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [16] 李东波, 蒋继穆, 梁帅表. 现代氧气底吹炼铜技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
LI D B, JIANG J M, LIANG S B. Modern oxygen bottom blowing copper technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.
- [17] 丁永昌, 张宏斌, 苏江峰, 等. 基于“三连炉造钨捕金”提升铜冶炼企业金属回收率的金属平衡管理研究[J]. *有色设备*, 2023, 37(2): 84-87.
DING Y C, ZHANG H B, SU J F. Research on metal balance management for improving the metal recovery rate of copper smelting enterprises based on “Three Continuous Furnace matte making and gold capture”[J]. *Nonferrous Equipment*, 2023, 37(2): 84-87.