

# 铜火法冶炼过程中杂质元素的分布规律及对回收率的影响问题研究

赵国良

赤峰云铜有色金属有限公司 内蒙古 赤峰 024000

**摘要:** 本文深入探讨了铜火法冶炼过程中杂质元素的分布规律及其对回收率的影响。文章概述了铜火法冶炼的基本原理、原料与杂质元素,详细分析了造钼熔炼、吹炼、精炼与电解过程中杂质元素的分布特性,以及不同熔炼工艺对杂质元素分布的影响。本文从直接影响、间接影响和特定杂质元素深入分析三个方面,阐述了杂质元素对铜回收率的作用机理。提出了优化冶炼工艺、提高回收率的策略与建议,包括原料预处理与精选、冶炼过程参数优化、杂质元素去除与回收技术,以及环保与节能减排措施,旨在为铜火法冶炼的可持续发展提供理论支持和实践指导。

**关键词:** 铜火法冶炼; 杂质元素; 分布规律; 回收率

## 1 铜火法冶炼过程概述

在铜的生产工艺中,铜火法冶炼占据着极为重要的地位,其流程和原理对于铜的提取和纯度提升有着关键影响。

### 1.1 火法冶炼的基本原理

铜火法冶炼基于高温化学反应原理,实现铜矿石或精矿中铜与杂质的有效分离。在高温环境下,一般温度可达1000°C-1300°C,铜矿石或精矿发生一系列复杂的物理化学变化。首先,矿石中的金属硫化物被氧化,如常见的黄铜矿(CuFeS<sub>2</sub>)在高温条件下发生高价硫化物分解:  $2\text{CuFeS}_2 = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS} + 1/2\text{S}_2$ ,氧气充足的条件下发生氧化反应:  $2\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeO} + 3\text{SO}_2$ ;  $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2$ ;  $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ 。生成的氧化亚铁(FeO)会与加入的熔剂(如二氧化硅SiO<sub>2</sub>)发生造渣反应,  $\text{FeO} + \text{SiO}_2 = 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ,形成炉渣,从而将铁等杂质从铜中分离出去。而硫化亚铜(Cu<sub>2</sub>S)则进一步在高温下与氧气反应,  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 = \text{Cu} + \text{SO}_2$ ,生成粗铜或  $2\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$ ,生成的氧化亚铜(Cu<sub>2</sub>O)再与未反应的硫化亚铜发生反应,  $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{Cu}_2\text{S} = 6\text{Cu} + \text{SO}_2$ ,最终得到粗铜。这一系列反应利用了不同物质在高温下的氧化还原特性和造渣性质,实现了铜与杂质的分离,为后续精炼生产高纯度铜奠定基础。

### 1.2 原料与杂质元素

铜火法冶炼的主要原料是铜矿石和铜精矿。铜矿石种类繁多,常见的有黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿等。这些矿石在开采时,往往伴生着多种杂质元素。从来源上看,杂质元素一部分是由于铜矿石形成过程中地质条件的复杂性而混入其中。例如,砷、锑、铋等杂质元素常

与铜以类质同象的形式存在于矿石晶格中。另一部分杂质元素来源于选矿过程中难以完全去除的伴生矿物,如铅、锌等常与铜矿物共生<sup>[1]</sup>。同时,在运输和储存过程中,也可能引入一些杂质。在冶炼过程中加入的熔剂,如石灰石、石英石等,若其纯度不高,可能会带入钙、镁、铝等杂质元素。而燃料,无论是煤炭还是天然气,其中的硫、氮等元素在燃烧过程中会进入冶炼体系,影响铜的冶炼过程和产品质量。这些杂质元素在火法冶炼过程中,会随着冶炼反应的进行,在不同产物中分布,对铜的回收率和产品质量产生不同程度的影响,因此研究原料中的杂质元素对于优化铜火法冶炼工艺至关重要。

## 2 铜火法冶炼过程中杂质元素的分布规律

铜火法冶炼过程中,杂质元素的分布规律是一个复杂且关键的问题。这些杂质元素不仅影响铜的纯度,还直接关系到冶炼效率和环境保护。

### 2.1 造钼熔炼过程中的杂质元素分布

造钼熔炼是铜火法冶炼的首要环节,主要目的是将铜精矿中的铜与其他元素分离,形成铜钼(主要由铜和硫组成)和炉渣。在这一过程中,杂质元素的分布受到多种因素的影响,包括熔炼温度、炉渣成分、原料中的杂质含量等。在造钼熔炼中,贵金属如金、银等通常会富集在铜钼相中,这是因为铜钼对这些贵金属具有良好的捕获能力。而砷(As)、锑(Sb)、铋(Bi)、铅(Pb)和锌(Zn)等杂质元素则会在熔炼过程中不同程度地挥发进入气相,或者以氧化物的形态进入炉渣。例如,As大部分会进入气相中,而Pb和Zn则更倾向于以氧化物形态存在于炉渣中。此外,这些杂质元素在铜钼、炉渣和烟尘中的具体分布比例还会受到熔炼工艺参数的

影响,如富氧浓度和铜硫品位的变化。

## 2.2 吹炼过程中的杂质元素分布

吹炼是铜火法冶炼的下一个重要步骤,旨在进一步去除铜硫中的杂质,特别是硫元素,以获得更纯净的粗铜。在这一过程中,杂质元素的分布同样受到多种因素的影响。吹炼过程中,除了铜、铁和硫外,其他杂质元素的行为各异。Zn大部分会被氧化进入渣相,而Ni、Pb、Co等元素则大都以硫化物形态进入冰铜相。大部分的Sb、Bi和Ag也会进入冰铜相,而As则大部分挥发进入气相。这些杂质元素在吹炼过程中的具体分布取决于吹炼条件、原料成分以及吹炼设备的类型。例如,在顶吹熔炼工艺中,As在烟尘中的分配比会随着富氧浓度的增加而减少,而在炉渣中的分配比则相应增加。

## 2.3 精炼与电解过程中的杂质元素分布

精炼与电解是铜火法冶炼的最后环节,旨在进一步去除粗铜中的杂质,提高铜的纯度。在这一过程中,杂质元素的分布主要受电解条件和精炼工艺的影响。在精炼过程中,通过氧化和还原反应,可以去除粗铜中的大部分杂质元素。然而,一些难以去除的杂质元素,如砷、锑、铋等,仍会残留在铜中。这些杂质元素在电解过程中会进一步分离。在电解精炼时,阳极上的铜和比铜更负电性的金属会电化溶解,以离子状态进入电解液;而比铜更正电性的金属和某些难溶化合物则不溶于电解液,以阳极泥形态沉淀。这样,铜与杂质就实现了进一步的分离。阳极泥中富含金、银等有价金属,可以进一步回收。而电解液中的杂质离子则需要在净液过程中去除<sup>[2]</sup>。

## 2.4 不同熔炼工艺对杂质元素分布的影响

铜火法冶炼中采用的熔炼工艺对杂质元素的分布具有显著影响。目前,常见的熔炼工艺包括闪速熔炼、底吹熔炼、侧吹熔炼和顶吹熔炼等。闪速熔炼工艺中,精矿中的As、Sb、Bi、Pb和Zn等杂质元素会严重污染环境,并导致废热锅炉清灰难度加大、电收尘效率降低等问题。底吹熔炼工艺中,通过添加适量焦炭粉,可以防止高价砷氧化物的生成,促进As以低价态挥发脱除。侧吹熔炼工艺中,杂质元素的分配主要由硫品位决定。当硫品位降低时,As、Sb和Bi在炉渣和烟尘中的分配比提高;而当硫品位增加时,Zn更容易以挥发的形式除去。顶吹熔炼工艺中,As、Sb和Bi等杂质元素在烟尘、炉渣和铜硫中的分布比例会受到富氧浓度和铜硫品位的影响。

## 3 杂质元素对铜火法冶炼回收率的影响机理

### 3.1 杂质元素对铜回收率的直接影响

杂质元素对铜回收率有着直接且显著的作用。一些杂质元素会与铜形成合金或化合物,从而改变铜在冶炼

过程中的物理化学性质,导致铜的损失增加,回收率降低。例如,砷、锑等杂质元素与铜具有较强的亲和力,在冶炼过程中容易与铜形成砷化铜( $\text{Cu}_3\text{As}$ )、锑化铜( $\text{Cu}_3\text{Sb}$ )等化合物。这些化合物在后续的冶炼步骤中,难以完全将铜与杂质分离,部分铜会随着杂质进入炉渣或其他副产物中。研究表明,当原料中砷含量增加1%时,铜回收率可能会降低2%-3%。另外,某些杂质元素在高温下的挥发性也会直接影响铜的回收率。比如汞元素,其在铜火法冶炼的高温条件下极易挥发。如果在冶炼过程中不能有效捕集汞,不仅会造成环境污染,还会导致部分铜以汞齐的形式随汞挥发而损失,进而降低铜的回收率。

### 3.2 杂质元素对冶炼过程的间接影响

杂质元素还会通过对冶炼过程的干扰,间接影响铜的回收率。首先,杂质元素会改变炉渣的性质。铅、锌等杂质元素进入炉渣后,会改变炉渣的熔点、黏度和密度等物理性质。当炉渣中铅含量增加时,炉渣的熔点会降低,黏度也会发生变化。这可能导致炉渣与冰铜的分离变得困难,使得部分铜被包裹在炉渣中无法有效回收,从而降低铜的回收率。其次,杂质元素会影响反应动力学。例如,铁元素在铜火法冶炼中是常见的杂质元素,过多的铁会参与氧化还原反应,消耗大量的氧气和熔剂。这不会仅影响反应速率,还会导致反应体系的温度难以控制,进而影响铜的还原过程,使得铜的回收率下降。另外,杂质元素对设备的腐蚀也会间接影响铜的回收率。一些杂质元素在冶炼过程中会产生腐蚀性气体,如硫元素在氧化过程中会生成二氧化硫( $\text{SO}_2$ )。这些腐蚀性气体不仅会对冶炼设备造成损害,影响设备的正常运行和使用寿命,还可能导致生产中断,增加生产成本,降低铜的回收率<sup>[3]</sup>。

### 3.3 特定杂质元素对回收率的深入分析

以铋元素为例,铋在铜火法冶炼中是一种不容忽视的杂质元素。铋在冶炼过程中的行为较为复杂,它既会与铜形成合金,又会在不同的冶炼阶段表现出不同的分布特性。在造铜熔炼阶段,铋部分进入冰铜,部分进入炉渣。进入冰铜的铋在后续的吹炼和精炼过程中,会逐渐富集在粗铜中。由于铋与铜的熔点和化学性质较为接近,在精炼过程中难以完全去除。当粗铜中铋含量较高时,会导致铜的导电性和加工性能下降,为了保证产品质量,往往需要增加精炼工序或采用更复杂的精炼工艺,这无疑会增加生产成本,降低铜的回收率。再看镍元素,镍在铜火法冶炼中也会对回收率产生影响。镍在高温下会与铜形成固溶体,且镍的氧化还原电位与铜较

为接近,这使得在电解过程中,镍难以与铜有效分离。部分镍会随着铜一起在阴极析出,导致阴极铜的纯度下降。为了生产高纯度的阴极铜,需要对电解液进行额外的净化处理,去除其中的镍杂质,这不仅增加了生产流程的复杂性,还会导致部分铜在净化过程中损失,从而降低铜的回收率。

#### 4 优化冶炼工艺、提高回收率的策略与建议

##### 4.1 原料预处理与精选策略

原料的预处理与精选是提高铜火法冶炼回收率的关键步骤,首先,对原料进行精细的破碎与磨矿,确保矿石中的铜矿物与脉石矿物充分解离,这有助于后续选矿过程中铜的有效回收。其次,采用高效的浮选药剂和工艺,对矿石进行精选,以最大限度地提高铜精矿的品位,同时降低杂质元素的含量。此外,对于含有高比例难选矿物的原料,可以考虑采用联合选矿方法,如磁选、重选与浮选相结合,以提高铜的回收率和精矿质量。同时,加强对原料中杂质元素的分析与检测,为后续的冶炼过程提供准确的数据支持。

##### 4.2 冶炼过程参数优化

冶炼过程参数的优化是提高铜回收率的重要手段,这包括熔炼温度、氧气浓度、炉渣成分、还原剂种类与用量等多个方面。通过精确控制熔炼温度,可以确保铜矿物与杂质元素的有效分离,同时避免过高温度导致的能耗增加和设备磨损。合理调整氧气浓度,可以优化铜的氧化速率和杂质的去除效率。炉渣成分的优化有助于降低杂质元素在炉渣中的溶解度,从而提高铜的回收率。此外,选择合适的还原剂种类与用量,可以确保铜的有效还原,同时减少还原过程中的能耗和杂质元素的再氧化。为了实现这些参数的优化,可以采用先进的在线监测技术和智能控制系统,对冶炼过程进行实时监控和调整。

##### 4.3 杂质元素去除与回收技术

杂质元素的去除与回收是提高铜回收率和资源利用率的关键,对于挥发性杂质元素,如砷、锑等,可以采用烟气除尘与净化技术,将杂质元素从烟气中捕集并回收。对于难挥发的杂质元素,如铅、锌等,可以通过调整

冶炼工艺参数和优化炉渣成分,将其富集在炉渣中,随后进行炉渣的综合利用或无害化处理。此外,对于贵金属等有价值的杂质元素,可以采用电解精炼、化学沉淀或萃取等方法进行回收。这些技术的选择和应用应基于原料特性、冶炼工艺和环保要求等多方面因素的综合考虑<sup>[4]</sup>。

##### 4.4 环保与节能减排措施

环保与节能减排是提高铜火法冶炼可持续性的重要保障,为了实现这一目标,可以采取多种措施。首先,加强冶炼过程中的废气、废水和固废的治理,确保排放达标。例如,采用高效的烟气脱硫、脱硝和除尘技术,减少大气污染物排放;建设完善的废水处理设施,确保废水达标排放;对炉渣等固废进行综合利用或无害化处理。其次,推广节能技术和设备,降低冶炼过程中的能耗。例如,采用高效节能的熔炼炉和精炼设备,优化能源利用结构,提高能源利用效率。此外,加强冶炼过程中的余热回收与利用,如利用烟气余热发电或供暖,进一步提高能源利用效率。通过这些措施的实施,不仅可以降低冶炼过程中的环境负担,还可以提高铜火法冶炼的经济性和可持续性。

##### 结束语

综上所述,铜火法冶炼过程中杂质元素的分布规律及其对回收率的影响是一个复杂而关键的问题。通过深入研究杂质元素的分布特性和影响机理,可以更好的理解铜火法冶炼过程中的物理化学变化,从而优化冶炼工艺,提高铜的回收率和产品质量。同时,加强环保与节能减排措施的实施,对于降低冶炼过程中的环境负担、提高经济性和可持续性具有重要意义。

##### 参考文献

- [1]谢钊生,李帅伟.铜冶炼炉渣回收选铁的实践和探索[J].铜业工程,2022(02):50-55.
- [2]樊有琪,蔡兵,罗永春,杨晓艳.铜冶炼烟尘与废酸协同处理工艺技术探索[J].云南冶金,2022,51(03):110-115.
- [3]周开敏,于跃,张云鹏.铅冶炼烟气净化污酸砷汞去除工艺应用实践[J].硫酸工业,2022(02):38-41.
- [4]文燕儒,熊家强,张鹏.富钴铜冶炼渣提钴工艺的研究现状及展望[J].有色冶金设计与研究,2022,43(02):14-17.