

# 氧气底吹技术在有色冶金的研发与应用

文·蒋继穆

01

氧气底吹技术最初应用于炼钢领域。上世纪30年代起,相关研发工作相继开展,最终在60—70年代实现了工业应用。氧气底吹技术具有高效、节能、环保等显著优点,随制氧技术的进步,在世界钢铁领域得到广泛应用,大幅提升了钢铁冶炼的整体技术水平。

此后,将氧气底吹技术应用于有色冶炼领域的想法也随之产生。但是,氧气底吹技术在钢铁冶炼领域的应用与在有色金属冶炼领域的应用有很大差异:

氧气底吹技术炼钢,目的在于脱除铁水中的硫、磷、硅等杂质,控制碳含量,可以同时加入废钢,熔化调质生产各种牌号的碳钢,亦可在钢水中加入

02

1973年,2位美国教授提出将氧气底吹技术应用于铜冶炼领域的设想,称之为“SL炼铜法”,进行小试后,申请了专利,但中试未获成功。

1974年,德国鲁奇公司在SL炼铜法的启发下,申请了QSL氧气底吹一步炼铜专利,并于1984年进行了产业化示范试验。

在我国,上世纪80年代,为淘汰环境污染严重的烧结—鼓风炉传统炼铜工艺,行业对清洁工艺的需求十分迫切。当时,各国都在开展新的炼铜工艺研究,但其中多为一步或一步一炉炼铜,引进到国内会带来一些工程问题,且成本相对较高。

以提高我国有色冶炼技术自主创新性和技术适用性为使命,中国恩菲工程技术有限公司(以下简称“中国恩菲”)前身——北京有色冶金设计研究总院提出了设想“氧气底吹熔炼—电还原炼铜”新工艺的研发。

1983年,经国家科委批准,该课题被列入国家“六五”科技攻关计划,由中国恩菲和水口山矿务局(现湖南水口山有色金属集团有限公司前身,以下

03

但是,恩菲人的攻关仍在继续。

在对水口山氧气底吹试验及白银公司引进QSL氧气底吹一步炼铜的失败进行分析时,中国恩菲的专家团队发现,问题的重点在于还原阶段。

烧结—鼓风炉炼铜工艺的污染点主要在于,烧结过程中,二氧化硫的逸散与烧结块返粉破碎造成粉尘飞扬。而如果采用氧气底吹熔炼技术替代铅精矿烧结,将熔渣渣铸送鼓风炉还原,不但能有效解决炼铜环保问题,液态高铅渣还原两道技术难题,还能在改造项目中,保留铅厂原有鼓风炉还原设施并继续加以利用,从而大幅降低改造费用。这无疑为研发提供了新的思路。

1997年,中国恩菲提出了氧气底吹熔炼—鼓风炉还原炼铜新工艺。由中国恩菲牵头,组织河南豫光金铅冶炼厂、安徽池州冶炼厂、浙江温州冶炼厂等3家单位共同出资,利用水口山原有氧气底吹吹

04

恩菲人的脚步从未停止。

在推广应用氧气底吹熔炼—鼓风炉还原炼铜新工艺的过程中,新的需求又出现了:将该工艺应用在旧厂改造项目中,可以继续利用原有鼓风炉系统,所以节约投资成本的优势比较明显。而在新建项目中,应用该技术不但会浪费物理热,还会增加铸锭工序,加大厂区占地面积和投资额,并不是最优选择。

为此,恩菲人持续研发,推出氧气底吹熔炼—热渣直接还原工艺,降低了能耗,省去了铸锭工序,还可选用更廉价的还原剂取代鼓风炉用的焦炭,大幅降低了生产成本。

2005年,中国恩菲申报的高浓度渣直接还原的研发课题获得科技部支持,被列为国家重大产业技术开发项目。目前,中国恩菲已研发3种工

05

从氧气底吹熔炼技术的立项研发,到第一条生产线的成功产业化,这个过程耗费了19年时间。而在其后的12年里,技术得到持续推广和广泛应用,总产能达到400万吨/年,占全国铅冶炼总产能的87%,并已向国外建厂成功投产。一项技术能如此迅速地推广应用,世界冶金史上都属罕见。

以300万吨产铅量计算,与传统流程比,氧气底吹熔炼工艺可每年节省标煤近150万吨,年减排二氧化硫近20万吨,年增效约4亿元。氧气底吹技术在铅冶炼的开发应用,彻底改变了我国铅冶炼的落后面貌,目前我国已占世界产铅总量的2/3,行业竞争力跃居世界第一。

其他金属或合金,生产各种牌号的合金钢。冶炼过程是间断作业,炉内气氛在氧化和还原之间周期性变化,熔渣渣率和烟尘率很低,产出物中,成品率超过95%。

氧气底吹熔炼有色金属,过程多为连续作业。炉内气氛或为氧化或为还原,对稳定有较高要求。熔渣产物主要是炉渣,主金属产品难以超过50%,烟尘率视不同原料有所波动。此外,有色金属原料常为多金属共生矿,难以彻底分选,熔炼工艺需考虑多金属综合回收利用,所以相对于钢铁冶炼,有色冶炼的反应机理较为复杂。

也正因此,氧气底吹熔炼的成熟技术并不能简单移植到有色金属领域,需要针对不同金属品种的不同特点进行一一开发。

简称“水口山”)牵头,北京矿冶研究总院、北京钢铁研究总院、中南工业大学、中科院化冶所、西北矿冶研究院等行业企业院所参与,组成攻关小组共同开展研究,并于1985年底在水口山建成年产3000吨粗铅的氧气底吹熔炼—电还原炼铜成套工业试验装置。至1987年底,先后进行17批次试验,共熔炼近900吨粗铅,产出340多吨粗铅。试验表明,氧气底吹熔炼炉除了存在氧枪寿命短这一突出问题,其余指标均较为理想;电还原系统受资金限制,所建设施简陋,还原剂粉煤供给为临时措施,难以满足试验要求,无法产出合格渣。1987年11月,试验告一段落。

随后,为尽快解决铅冶炼的严重污染问题,我国引进了德国鲁奇公司QSL一步炼铜工艺,并在甘肃白银有色公司(现白银有色集团前身)建设了世界首个氧气底吹熔炼有色金属项目,并于1994年建成投产。但是,因部分技术不成熟,加上经济原因,项目投产不久即关闭至今。

事实证明,截至上世纪末,无论是自主研发还是引进消化,氧气底吹技术在我国有色冶炼领域的应用均未取得成功,这无疑进一步证明,该技术在有色领域的产业化应用具有相当难度。

06

验装置与1.5平方米小型鼓风炉,进行氧气底吹熔炼—鼓风炉还原炼铜新工艺半工业试验,重点在于解决鼓风炉还原高铅渣铸块存在鼓风炉渣含铅高的问题,并一举成功。

在此基础上,中国恩菲于2002年分别在安徽池州冶炼厂和河南豫光金铅冶炼厂建成年产3万吨和5万吨粗铅的示范生产线。而后,2条生产线操作稳定,产能很快提升到年产5万吨和8万吨粗铅的水平。粗铅生产单位能耗比传统烧结—鼓风炉工艺降低50%,硫回收率提高到96%以上,硫捕集率超过99%,革除了返粉破碎,有效解决了传统工艺造成的二氧化硫低空污染及含铅粉尘飞扬问题。

氧气底吹熔炼—鼓风炉还原炼铜新工艺有效改善了铅冶炼的生产环境,提高了银的回收率,降低了投资成本,受到生产企业的高度好评。该工艺于2003年获中国有色金属工业科技进步一等奖,2004年获国家科技进步二等奖。在推广应用的过程中,被国家九部委发文指定为我国首选炼铜工艺。

07

艺,分别为侧吹炉供煤加粒煤还原、底吹炉供天然气加粒煤或碎煤还原和竖炉电热焦炭还原。前二种已取得成功,并在济源金利建成投产20万吨/年国内最大氧气底吹熔炼—侧吹还原炼铜生产线,在河南峨山建成投产10万吨/年双底吹熔炼生产线。

氧气底吹熔渣直接还原炼铜形成的第二代炼铜新工艺,与第一代氧气底吹熔炼—鼓风炉炼铜工艺相比,能耗再降30%,吨铅成本减少100多元。第二代炼铜新工艺投资更省,还具有能耗低、环保好、操作方便灵活、原料适应性强、生产成本低等诸多优点,主要指标均达到世界领先水平。

总体来看,氧气底吹熔炼技术已经在国内获得了广泛应用和推广。截至2014年,包括老厂改造或新建项目在内,全国已有42条生产线采用氧气底吹熔炼技术。

08

此后,中国恩菲又在技术应用过程中,与生产企业共同开发了诸多具有行业开创性的应用技术:在河南万洋项目中,打破常规,取消还原炉后的电热前床,开发三炉连续炼铜,使炼铜工艺更简洁、能耗更低、劳动生产率更高;在河南豫光金铅项目中,铅精矿搭配处理铅蓄电膏泥,不但节能效果更好,硫酸铅中的硫也得到更加合理的回收,为二次铅的回收开辟了新途径;在河南峨山项目中,铅精矿搭配处理高炉炼铁及电炉炼钢含铅的烟尘,将含铅高达20%的还原炉渣送烟化炉再度回收,使资源得到充分综合利用,取得良好经济效益;在山东恒邦项目中,铅精矿搭配处理氧化渣或含金黄铁矿回收贵金属,大幅降低了炼金成本,为黄金冶炼开拓了新途径。

06

将氧气底吹技术应用于铜冶炼领域的探索,始自1990年。其时,中国恩菲和水口山联合,利用水口山氧气底吹熔炼试验装置进行炼铜试验,以铜精矿搭配处理水口山康家湾高硫含金黄铁矿,称之为“造流捕金”。试验连续进行217天,进展非常顺利,并于1991年正式完成,取得了理想结果。1992年,中国恩菲获得“底吹熔池炼铜法及其装置”专利授权。1993年,“水口山炼铜法”获部级科技进步一等奖。随后,国内3家企业要求采用此工艺建厂。但是,由于试验的粗铜规模不足3千吨/年,我国也已明文规定,禁止新建规模小于年产5万吨/年的铜冶炼厂——3千吨/年一

步扩至5万吨/年,扩大比远超过10:1的常规许可值。一时,国内失去了该工艺工业化应用的可能性。也正因为如此,越南生权大龙1万吨/年电铜冶炼厂成为世界首个氧气底吹熔铜工业生产项目。项目于2007年底顺利投产,为国内后续建设5万吨/年以上规模的氧气底吹熔铜工厂提供了可靠依据。

从2007年至今,8年时间里,国内先后10个氧气底吹熔铜项目投产运行。其中最大的,单系列处理精矿量达150万吨/年,相当于年产40万吨粗铜,是世界单系列最大的铜冶炼厂之一(图5),项目已于2015年12月中旬达产对标。正在设计和建设的氧气底吹熔铜项目还有多家,中国恩菲还为诸多国外企业进行了可行性或预可行性研究设计。

07

氧气底吹熔炼取得成功后,在吹炼阶段,传统转炉技术的局限性便突显出来。转炉吹炼为间断作业,存在三大缺点:(1)用包子将铜渣倒运入转炉时存在严重的二氧化硫低空污染问题;(2)转炉间断作业致使烟气量与烟气中的二氧化硫量波动较大,不利于后续制酸;(3)间断作业炉衬热震频繁,炉寿短。

为解决上述问题,中国恩菲于2009年向科技部申报“氧气底吹连续炼铜清洁生产关键技术及装备研究”,获准并被列为国家863研发课题。为此,团队与中南大学、北京科技大学、东北大学等高校,就氧枪结构、氧枪布局、吹炼渣型、反应机理、炉渣渣化等课题,围绕计算机模拟、水模型与基础理论有关的小型试验等方面,开展了大量扎实研究工作。在此基础上,恩菲团队于2012年在豫光金铅完成了铜渣底吹连续吹炼冷态半工业试验,在山

08

为什么该技术成功开发后,能够得到如此迅速的推广应用?作为技术开发的亲历者,我认为,氧气底吹熔铜技术比现有其他先进炼铜工艺更为优越。主要体现在以下几点:

1. 能耗最低

与顶吹、诺兰达、特尼恩特、三菱法等炼铜工艺相比,氧气底吹技术的氧浓更高,烟气量更低,烟气带走热量更少;与闪速、瓦里柯夫、金峰炉等氧浓较高的炼铜工艺相比,底吹吹由于无需大量水冷元件,故炉体散热损失更少;氧气底吹熔炼的反应机理与其他所有工艺不同,可划分为5个区域。氧气从炉底参与铜渣反应,铜渣作为氧的载体作用于精矿,完成造渣反应。因此,氧气底吹熔炼的造渣反应氧势低,渣中的铁多氧化为氧化亚铁,渣熔点低,相同温度下黏度低,不易形成泡沫渣,降低了跑炉事故发生概率;熔渣可以采用高铁渣型,配入的二氧化硅熔剂率也相应低于其他各种工艺,因而相同产能下,熔炼的物料量最少,能耗也就最少。

2. 铜的回收率最高

如1所述,氧气底吹熔炼熔剂率最低,渣率最低,经渣渣后弃渣量最低,弃渣带走的铜最少,铜的回收率自然最高。

3. 流程短,熔炼强度高,投资省

09

上述诸多技术优势,无疑是氧气底吹熔铜技术得到迅速推广的重要原因,而另一个不可忽视的必要条件,就是中国恩菲自身的技术实力。

自1953年成立至今,60多年来,中国恩菲积累了丰富的工程经验,拥有雄厚的技术实力和卓越的人才队伍,这无疑都为开展技术研发提供了重要的支持和保障。在战略层面,中国恩菲按照上级单位要求,根据发展实际和对行业的前瞻研判,制定了科技发展规划,明确了方向和目标;在体制层面,中国恩菲设有以恩菲研究院和技术发展部为统领的研发组织部门,依托设立在公司的院士专家工作站、2个博士后科研工作站等平台,着力培育研发骨干人才;在机制层面,中国恩菲明确规定,将公司收入的3%以上投入科技开发工作,从资金上提供保障。此外,建立健全对发明创造、专利发明人员、研发工作有贡献人员的激励机制,提高员工科技创新积极性。

10

未来,为进一步实现资源利用最大化、环境影响最小化、能源消耗最低化和工艺装备智能化的目标,中国恩菲将继续开展技术研发与应用拓展研究,主要包括以下几个方面:

1. 纵向和横向拓展氧气底吹技术的应用领域,在铜、铅复杂和难回收资源回收,镍、钴、稀贵金属资源回收,冶炼固体废物处理,重金属污染土壤环保处理,城市固废垃圾处理等方面开展应用研究;

2. 在全面满足目前国际先进环保影响前提下,进一步全系统优化,开展未来发展环境适应性研究,以满足未来30年—50年国际对环境影响的

步扩至5万吨/年,扩大比远超过10:1的常规许可值。一时,国内失去了该工艺工业化应用的可能性。也正因为如此,越南生权大龙1万吨/年电铜冶炼厂成为世界首个氧气底吹熔铜工业生产项目。项目于2007年底顺利投产,为国内后续建设5万吨/年以上规模的氧气底吹熔铜工厂提供了可靠依据。

从2007年至今,8年时间里,国内先后10个氧气底吹熔铜项目投产运行。其中最大的,单系列处理精矿量达150万吨/年,相当于年产40万吨粗铜,是世界单系列最大的铜冶炼厂之一(图5),项目已于2015年12月中旬达产对标。正在设计和建设的氧气底吹熔铜项目还有多家,中国恩菲还为诸多国外企业进行了可行性或预可行性研究设计。

00

东东营方园完成铜渣底吹吹炼连续吹炼工业试验,顺利完成国家863计划课题,为技术的后续产业化应用打下了坚实基础。2014年,世界首条氧气底吹连续炼铜工业化示范生产线全线拉通,产出首批合格阳极板。消息传出,行业再度轰动。

氧气底吹连续炼铜工业化示范生产线采用氧气底吹熔炼—铜渣底吹连续吹炼工艺。氧气底吹熔炼产出的高品位铜渣态流入氧气底吹连续吹炼炉,富氧空气从炉底的氧枪鼓入,使铜渣中的铁氧化造渣,炉内熔体形成粗铜层、白铜层和渣层,打眼放粗铜,溢流放渣,吹炼的送风过程实现连续化,吹炼烟气连续化。终于,中国恩菲2006年申报专利中提出的技术设想得以实现。而更加重要的是,在氧气底吹熔铜技术持续升级的过程中,我国也已成为世界范围内炼铜、炼铅工艺技术最全、设计能力最强、运营效益最高、环保效果最佳的国家,真正实现了从追赶引到引领的重大跨越。

如1所述能耗最低,因此氧气底吹熔炼是目前所有炼铜工艺中唯一无需干燥精矿和外供燃料,即可直接进入吹炼的炼铜工艺。与闪速、特尼恩特、三菱工艺比,省去了精矿干燥工序、粉状熔剂制备系统及电热熔分炉。与艾萨和奥斯特顶吹工艺比,无需圆盘制粒、粉煤制备或供油系统以及电热熔分炉等设置,因而流程短,加上炉体为卧式,厂房配置低,又无水冷元件,整体投资省。

4. 对原料适应性强

经过冶炼过程中气体自下而上的强烈搅拌,铜精矿中夹杂的低沸点伴生元素,如砷、锑、铅、铋等的化合物更易挥发进入烟尘而与主金属分离。对于高沸点贵金属,经铜渣自下而上反复冲洗,能很好地溶解并富集于铜渣中。试验表明:氧气底吹熔炼过程中,砷的脱除率达95%以上,金、银捕集率达99%。

5. 环保条件好

湿精矿直接进入炉,湿精矿倒运与给料过程无扬尘产生;炉体密封性好,负压操作,无烟气外泄;所有收集的烟尘均通过气密输送。

6. 炉衬寿命长,作业率高

氧气底吹熔铜由下而上,炉内熔体自中心向两边缓慢流动,不直接冲刷炉衬,炉衬寿命一般都在3年以上,且氧枪寿命高达半年,作业率一般可达95%以上。

由于具有投资省、能耗低、环保好、回收率高、生产成本低等优点,氧气底吹技术深受行业内外的高度关注,尤其得到生产企业的广泛赞誉。中国恩菲开发的新技术、新工艺、新设备,在产业化应用中全部一次投产成功,这不仅给予用户极大应用信心,也给恩菲团队带来了持续突破的动力。

伴随氧气底吹技术相关研究的深入,中国恩菲的科研设计人员持续以先进可靠为目标,围绕配套设施进行开发,实现了诸多新的开创:比如,冶金炉设计组对铜渣底吹熔炼到炼铜,再到铜渣底吹连续吹炼,从物料处理量5万吨/年到150万吨/年,开发了大小十几种规格的底吹炉,全部一次投产成功;热工专业为氧气底吹熔炼新工艺配套开发余热锅炉,目前已获20余项国家专利,其中12项发明专利,总体技术在我国处于领先水平;硫酸专业配套设计的制酸车间,集成应用了国内外制酸新技术,尤其在低温中温热能利用和污酸回收、尾气脱硫等方面,取得了重要进展,大幅降低了制酸能耗和成本,有效改善了冶炼环境。

更高标准要求;

3. 开展装备大型化和智能化研究,使该工艺成为国际有色金属冶炼的首选技术。

氧气底吹技术,是中国恩菲联合行业企业共同开发的自主技术,更是中国有色金属行业完全自主开发的重要技术。中国恩菲和行业同仁,都肩负着提升技术应用水平、拓展技术应用范围的神圣使命,上述研究,也将为氧气底吹技术的应用开辟更为广阔的天地,中国恩菲将充分发挥自身有色冶金工程国家队的责任担当,使氧气底吹熔炼技术成为国家铜、铅、镍、钴等基础金属产业转型发展的关键支撑技术,成为提升国家有色金属产业国际竞争力的核心保障技术,成为国际产能与装备制造合作的引领技术,成为国际基本金属冶炼优先技术。



本文作者:蒋继穆,1939年生,教授级高级工程师。全国工程勘察设计大师,享受国务院特殊津贴,曾任中国有色工程设计研究总院副院长兼总工程师、技术委员会主任、中国有色金属学会常务理事、中国硫酸协会副理事长、中国钨业协会理事等职务。现任中国恩菲工程技术有限公司高级顾问专家。

## 恩菲印迹

- 世界首个氧气底吹熔炼项目 豫光金铅冶炼厂
- 世界最大氧气底吹熔炼炉 济源金利冶炼厂
- 世界首个氧气底吹还原炼铜项目 安阳市山冶冶炼厂
- 世界首个氧气底吹熔炼项目 越南生权大龙冶炼厂
- 世界第一条氧气底吹造流捕金项目 山东恒邦复杂精矿综合回收生产线
- 世界最大氧气底吹造流捕金项目 中原黄金冶炼厂整理搬迁升级改造项目