

# 降低精炼炉石墨电极消耗实践

梁光生, 邵 亮

(内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 针对精炼炉加热过程中, 电极易出现氧化、熔损、热振及脱落等现象, 通过多炉次试验, 采用最优送电参数、尽早形成微泡沫化精炼白渣、优化底吹模式、精确温度控制、优化除尘控制和电极扳手等有效措施, 使精炼炉电极消耗由 2021 年的 0.544 kg/t 降至目前的 0.347 kg/t, 保证了精炼炉冶炼稳定顺行, 实现了降本增效以及高效连铸。

**关键词:** 精炼炉; 石墨电极; 消耗机理

中图分类号: TF71

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)01-0032-04

## Practices on Reducing Consumption of Graphite Electrode for Ladle Furnace

Liang Guang - sheng, Shao Liang

(Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** Such effective measures as adopting optimum parameters of power transmission, forming refining white slag with microfoam as early as possible, optimizing modes of bottom blowing, accurate temperature control as well as optimizing dust removal control and electrode wrench are taken through experiments of multiple heats aiming at such phenomena as oxidation, melting loss, thermal vibration and drop out of electrode easily occurred during the heating process of ladle furnace. As a result, the consumption of electrode for ladle furnace is decreased from 0.544 kg/t in 2021 to current 0.347 kg/t so that stable and trouble-free operations of smelting for ladle furnace is ensured as well as cost decreasing and benefit increasing and high efficiency continuous casting are achieved.

**Key words:** ladle furnace; graphite electrode; consumption mechanism

内蒙古包钢钢管有限公司制钢分厂于 1996 年建成投产两台 100 t 钢包精炼炉, 采用单立柱控制三根电极加热模式。精炼炉采用三根石墨电极对钢水进行加热升温, 加热时三相电极插入渣层中, 采用埋弧加热。同时, 钢包底部进行氩气搅拌, 形成高碱度还原钢渣, 对钢液进行脱氧、脱硫、合金化、去除夹杂物等冶金反应<sup>[1]</sup>。该设备主要用于对钢水进行加热升温, 钢水的合金化, 在转炉和连铸机之间起到良

好的衔接作用。石墨电极吨钢消耗是精炼生产成本重要指标之一, 在实际冶炼过程中, 石墨电极年消耗量占精炼总成本的 15% ~ 20%。石墨电极采用埋弧加热, 过程中除了熔融钢液和渣液对其侵蚀外, 会偶发断折、接头剥落、电极底端缺块、错扣等问题, 使电极消耗量升高, 石墨电极价格近几年一直在高位运行, 不但增加了冶炼成本, 而且影响了现场生产的顺行。为确保精炼炉设备的顺利运行, 精确控制钢

水成分、温度命中率 and 产品质量,有效控制成本,在生产工艺以及使用电极方面有优化改进的必要。降低吨钢电极消耗,减少现场调整电极次数,减轻工人劳动强度,保证精炼炉冶炼稳定顺行,实现降本增效,同时也为企业绿色低碳发展创造条件。

## 1 精炼过程电极消耗机理

石墨电极是一种人造石墨材质导电材料,以石油焦、沥青焦为骨料,煤沥青为黏结剂,经过多道工序制成。石墨电极具有良好的导电性和抗氧化性,在钢液面形成 2 000 ℃ 以上高温弧光向钢液传递热量。加热过程中,钢包底部持续吹氩,钢液表面高温区的热量被流动的钢液不断地带到低温区,使整炉钢水不断地吸收来自高温电弧的热量,从而使整炉钢的温度得到升高。

电极消耗主要包括电极的切面消耗、侧面消耗、以及折断消耗<sup>[2]</sup>。

### 1.1 电极切面消耗

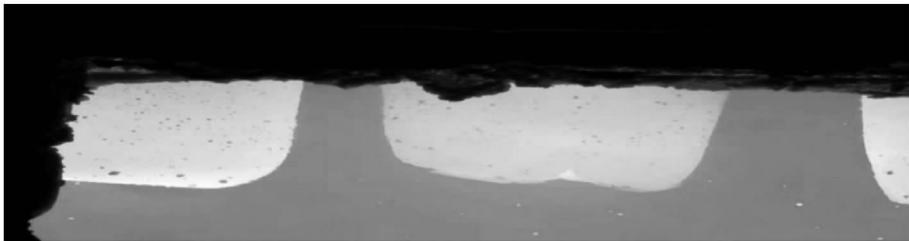


图1 电极端面消耗图

### 1.2 电极侧面消耗

电极的侧面消耗,指电极圆柱体表面被氧化消耗。正常情况下,炉内为微负压,石墨电极表面与炉气中的氧气发生化学反应。石墨电极超过 400 ℃ 时,氧气容易与石墨电极表面发生反应,温度到达 600 ℃

因为加热过程中产生高温电弧,造成加热端的电极高温升华,电极的端面产生消耗,在热应力的作用下,电极端面产生裂纹甚至脱落,同时炉渣和钢水对电极的侵蚀,也会导致电极发生化学反应或熔解。电极端面各部分的温度不同,产生热应力,也会导致电极出现裂纹、断裂,这种现象会因为电流强度的增加而不断扩大。精炼炉采用大电流、低电压供电,其电弧弧长较短,电弧在大电流的电磁作用影响下易向外偏移。电极在泡沫渣的翻滚冲刷下,也会被炉渣侵蚀。钢液面在钢包底部氩气搅拌下产生波动,液面钢水对电极进行冲刷,也会导致电极熔解消耗,如图 1 所示。钢水在精炼过程初期,炉渣未进行还原,氧化性较强,电极和氧化性炉渣接触,炉渣中的氧化铁、氧化锰等物质,与电极产生化学反应;精炼冶炼后期,钢渣与电极含有的碳元素反应,也会导致电极熔解消耗。所以钢包炉底吹氩气、过程温度控制、钢水成分目标控制等都会对石墨电极的消耗产生影响。

以上,发生氧化反应更加强烈,如图 2 所示。这种反应对石墨电极表面气流速度和氧气浓度十分敏感,当精炼炉内氧压较低时,电极侧面消耗也相对较少。精炼冶炼过程中,碳发生的氧化反应比碳的气化反应相对较弱,因此不是石墨电极消耗的主要原因。

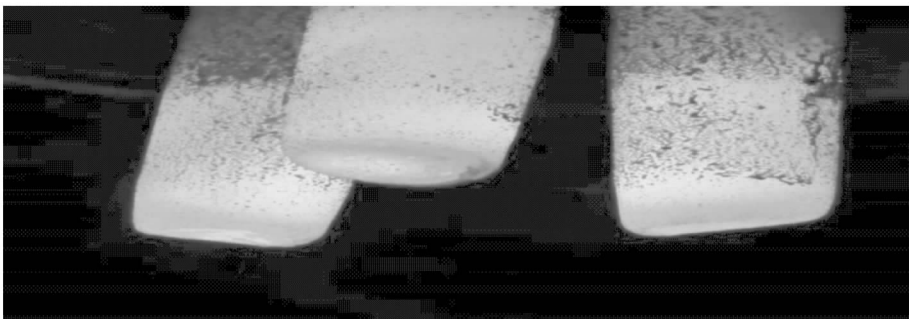


图2 电极侧面消耗

### 1.3 电极折断消耗

电极折断通常在第一节电极和第二节电极连接处接头折断,如图3所示。主要原因是电极连接时旋合度不够造成不紧密或两支电极连接处的灰尘没有处理干净,存在微小的缝隙,导致电极与电极间电阻增大,连接处容易出现局部过热发红现象,电极前

端出现氧化冲刷变细的情况,在温度升高过程中,同时受到电磁力的影响;单立柱控制3根电极加热模式造成电极升降系统运行不稳定,容易导致电极出现高位折断,往往发生在调整电极后3炉钢,使精炼冶炼被迫终止。



图3 电极高位折断图

## 2 降低精炼炉石墨电极消耗的措施

### 2.1 选择合理的供电参数及制度

(1)制钢分厂精炼炉送电系统分为10个档位,200~300 V电压范围内,不同的档位,加热功率不同,升温速度不同。优化送电功率,采用合理电压和电流档位,保持电弧的稳定,减少电磁感应的冲击。根据钢种冶炼周期优化送电工艺,确定精炼炉化渣时宜采用1—4档,提温时宜采用7—9档,保温时宜采用4—7档。

(2)优化供电制度。电极端面的熔损与电流强度、加热时间成正比,其关系如下<sup>[3]</sup>:

$$C_{\text{tip}} = R_{\text{sub}} \cdot I^2 \cdot T_{\text{po}} / P \quad (1)$$

式中: $C_{\text{tip}}$ 为电极下端的熔损,kg/t; $R_{\text{sub}}$ 为升华率,kg/(kA<sup>2</sup>·h); $I$ 为电流,kA; $T_{\text{po}}$ 为通电加热时间,h; $P$ 为精炼炉生产率,t/炉。

根据以上公式,结合内蒙古包钢钢管有限公司制钢分厂精炼冶炼特点,根据钢液及钢渣情况优化送电加热模式。在钢水精炼初期采用短电弧、大功率档位加热,快速熔化渣料;在渣料融化后采用长电弧,加大功率,提高升温速度;在钢水精炼后期,选择适当的电弧长度和输入功率,精确控制钢水温度在一定的范围内,降低电极切面和侧面消耗。

### 2.2 制定合理的造渣制度

(1)渣量的加入与配比。经观察,加热送电时

电弧长度在70~90 mm,因此渣层厚度应控制在不小于100 mm,通过计算与实际操作,得出带入钢包钢渣重量应控制在700~1 200 kg,主要包括石灰、脱氧剂、电石等。

(2)电极加热时渣料加入方式,应采用少量、多批次的方式分批加入,杜绝一次性加入过量的渣料进入钢包形成料坨,避免电极与料坨产生碰撞造成电极伤害。

(3)尽快创造碱性还原气氛,尽早形成微泡沫化精炼白渣,减少氧化环境对电极的影响。

(4)建立合理的返渣制度,即精炼白渣的再利用。精炼白渣是具有碱性的还原渣,通过前返或后返把精炼白渣加入新处理的钢水中,加之氩气搅拌,配以脱氧剂,能够更加快速造出碱性还原渣。经过返渣的炉次,在精炼炉初期供电加热时,炉渣相对更易熔化,初期化渣时间明显缩短。并且精炼白渣具有良好的泡沫性,有利于石墨电极尽早实现埋弧加热,提高电能利用效率,减少精炼加热送电时间。通过返渣可降低单炉供电时间和精炼电耗,有效避免因调整电极后3炉钢电极高位折断。

### 2.3 全流程合理控温

及时热修钢包,确保热钢包到位,避免转炉等待钢包现象。在冶炼低磷低硫品种钢时,充分利用废钢烘烤炉,预热钢包8~10 min,使钢包从1 000℃预热至1 200℃,保持钢包温度并增强钢包蓄热能

力,有效保证低磷、低硫钢水到达精炼就位温度,保证连铸顺利浇注情况下尽可能降低精炼处理时间,缩短精炼加热时间,同时合理控制转炉出钢时间及温度,严控过氧化出钢,转炉、精炼、连铸各工序执行好联系制度,把握好生产时序,为实现准时化生产创造良好条件。

## 2.4 合理控制氩气搅拌

合理控制氩气搅拌流量及强度,避免造成钢水冲

刷电极,造成电极消耗。精炼冶炼过程全程进行吹氩搅拌,需要分阶段动态控制氩气流量。通过合理控制氩气流量,可以减少炉盖粘渣,也可以避免钢水强烈流动造成的电极折断事故。制钢分厂通过对精炼底吹过程中氩气调节与钢液流场进行数据统计及分析发现,就位钢水条件不同对吹氩效果影响较大,根据试验数据及与检验结果的综合分析,确定精炼底吹的氩气流量控制的参数标准,如表1所示。

表1 底吹氩气流量控制效果表

阶段	时间/min	流量范围/(L·min <sup>-1</sup> )	主要目的
破顶阶段	0.1~0.2	500~600	利用高压力、大流量氩气搅拌钢液顶破渣壳
取样阶段	1~2	30~60	均匀钢水成分和温度,弱吹便于测温取样
造渣阶段	3~6	100~260	快速形成具有较高碱度和较低氧化性的精炼渣
提温阶段	10~20	150~300	根据钢水就位温度、各种热损失及升温速率等综合考虑,满足钢种离位温度要求
脱硫阶段	2~5	400~500	采用强搅拌促进硫元素由钢液向钢-渣界面迁移,发生化学反应,生成硫化物向渣层迁移
微调阶段	1~3	150~200	根据就位成分进行合金微调,满足钢种要求

## 2.5 合理控制除尘强度以及优化电极扳手

(1)根据生产实际情况合理控制除尘设备运行强度,在保证除尘效果的情况下,适当减小除尘设备运行强度。根据冶炼时不同阶段改变除尘器阀门的开启度,控制尽量少的空气吸入钢包内。通过钢包底吹氩、埋弧加热、脱氧、炉盖的升降保证钢包的还原气氛,形成钢包微负压,避免空气中的氧气与石墨电极发生氧化反应。

(2)电极扳手优化。石墨电极强度低,易折断,实际冶炼过程中使用的石墨电极都是由短电极连接而成的长电极,因此石墨电极的连接质量、连接的紧固程度至关重要。把扭矩过大或扭矩过小扳手淘汰掉,根据现场实际情况,优化电极扭矩参数,保证连接质量,在使用中当扭矩值达到规定的理想值时,扳手会发出响声,同时扳手会部分卸载,确保了石墨电极连接质量。另外接电极时一定要吹扫干净,电极旋转必须到位,避免电极的接头处出现微缝隙,可有效避免电极出现高位折断的情况发生。

## 3 结束语

通过对减少精炼炉电极吨钢消耗的探索,钢液冲刷电极、电极氧化剥落、电极意外折断等现象明显减少,电极的吨钢消耗显著降低,从2021年全年平均电极消耗0.544 kg/t下降到目前的0.347 kg/t。保证了精炼设备的稳定运行,提高了钢坯产量与质量,有效减少生产事故发生和操作人员劳动强度,为包钢(集团)公司“四降两提”工程贡献了力量。

## 参 考 文 献

- [1] 张士宪,赵晓萍. 炉外精炼工[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [2] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.
- [3] 雷辉. 降低LF炉电极消耗的工艺技术探索[J]. 四川冶金,2008,30(6):11-13.