

· 综述 ·



底吹搅拌技术在电弧炉中的应用与发展

贺 庆, 姚同路, 李相臣, 赵进宣, 赵 舸
(钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081)

摘 要:发展电弧炉短流程炼钢是钢铁工业实现“双碳”目标的重要途径。近年来,现代电弧炉技术发展迅速,电弧炉底吹搅拌技术也在不断进步和推广,对电弧炉生产的高效化和节能化作出了重要贡献。针对电弧炉底吹搅拌技术的机理、工艺特点、系统组成、气体种类、底吹元件类型及工艺布置方式进行综述,并对底吹技术的应用情况进行总结分析。模拟计算得出,远离底吹装置的区域,钢液流速明显偏低。结合炉型特点布置底吹装置及优化底吹气量,可改善熔池动力学条件,促进钢液元素传质,实现降低能耗和原材料消耗、提高生产效率的效果。深入开展底吹技术研发,与吹炼、供电、喷粉等工艺技术耦合,并结合新炉型特点制定底吹工艺制度,实现智能化底吹是发展现代电弧炉短流程技术的重要方向。

关键词:电弧炉; 短流程炼钢; 底吹搅拌; 数值模拟; 搅拌能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00206 **中图分类号:**TF741. 5

Application and Deveopment of Bottom Blowing Stirring Technology to EAF

He Qing, Yao Tonglu, Li Xiangchen, Zhao Jinxuan, Zhao Ge
(Metallurgical Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The development of electric arc furnace (EAF) short process steelmaking is an important way for the iron and steel industry to realize the goal of "double carbon". In recent years, the modern EAF technology has been developing rapidly, and the bottom-blowing stirring technology of EAF is also progressing and being promoted, which makes an important contribution to the high efficiency and energy saving in production with EAF. This paper summarizes the mechanism, process characteristics, system composition, gas type, bottom blowing element type and process arrangement of the electric arc furnace, and summarizes the application of the bottom blowing technology. Simulation calculations shows that the flow rate of molten steel is obviously low in the area far away from the bottom blowing device. By arranging the bottom blowing device and optimizing the volume of bottom blowing gas in conjunction with the furnace characteristics, it is possible to effectively enhance the dynamic conditions of the molten pool, facilitate the mass transfer of elements within the molten steel, thereby achieving the goal of reducing energy and raw material consumption, and enhancing production efficiency. Therefore, it can be inferred that conducting research, combining different techniques such as blowing, power supply and powder injection, formulating bottom blowing process system according to the characteristics of different new furnaces, as well as realizing intelligent bottom blowing are important directions for the development of short process steelmaking of modern EAF.

Key Words: EAF; Short Process Steelmaking; Bottom Blowing Stirring; Mathematical Simulation; Stirring Energy

电弧炉短流程炼钢工艺作为重要的炼钢方法,具备生产灵活、环保节能的优点。随着国内废钢资源的积累和钢铁工业“双碳”目标的提出,电弧炉流程发展步伐加快,技术水平不断提高。由于电弧炉冶炼的主要原料是废钢,决定了其冶炼过程具有热量不足、熔池流动性差的天然缺陷,炉内钢液运动主要通过钢液自然对流、电极电流感应驱动等作用进行,自身低搅拌强度容易造成钢液温度、成分不均,渣中氧化铁增多,脱磷、脱碳等效率降低的问题^[1]。对于采用常规操作的普通电弧炉,由于熔池混匀性

较差,上下温差可达到 $21 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C/m}^{[2]}$ 。而底吹气体搅拌技术可加强熔池循环流动,加快传质传热速度,将其应用到电弧炉冶炼中可以弥补以上不足。

20世纪80年代,美国林德分公司和德国蒂森钢公司最先在65 t电弧炉底部安装底吹装置。此后,底吹电弧炉炼钢技术飞速发展,逐步在普通电弧炉、偏心底出钢电弧炉、超高功率电弧炉上得到应用。在国外,日本、美国、墨西哥、意大利、德国、巴西等国家对电弧炉底吹技术进行积极的研究和应用开发。在国内,长城特钢1992年即在10 t电弧炉上安装底吹

气体搅拌装置^[3],使冶炼时间缩短 30 min。近年来,天津钢管、衡阳华菱、西宁特钢等钢厂和北科大等科研机构先后对电弧炉底吹工艺改造、底吹炉役、底吹二氧化碳等进行深入研究及应用,使氧耗降低 1.4 m³/t,石灰消耗降低 3.9 kg/t,脱硫率提高 7%^[4-6]。近年,电弧炉底吹气体搅拌技术逐步趋于成熟并得到推广应用,但仍存在底吹元件寿命提高、底吹流场优化和如何与其它工艺耦合等技术突破点。本文通过对电弧炉底吹流场进行模拟计算,结合底吹搅拌技术的机理、工艺及现场实践,提出现代电弧炉底吹技术发展方向,以期国内电弧炉短流程炼钢工艺发展提供参考与启发。

1 电弧炉底吹搅拌机理及特点

1.1 底吹搅拌机理

电弧炉底吹搅拌的基本原理是使底吹气体从电弧炉炉底直接吹入熔池,然后气体以气泡形式上浮,同时带动钢液运动。底吹搅拌使电弧炉搅拌能增大。研究得出,如只考虑感应搅拌,电弧炉炼钢的搅拌能仅有 1~3 W/t,采用底吹搅拌后可增大 10 倍以上,如以 0.06 m³/(min·t)的底吹强度自电弧炉底部吹入氩气,其搅拌能达到 375~400 W/t^[7]。

当熔池搅拌强度增大到一定水平,混匀时间会迅速缩短。对熔池混匀特性进行比较实验得出,在 50 t 电弧炉中以 0.3 m³/min 的流量底吹氩气,混匀速度比原来快 2~3.5 倍^[8]。

底吹气体进入熔池后,气体对钢液所作的功包括出口附近压力突降引起的等温膨胀功、升温膨胀功、气体本身动能、气体上升时的浮力做功。其中,浮力影响最大,故与熔池的深度密切相关。底吹气体时,搅拌能与底吹气体流量、熔池温度、深度等参数的关系如式(1)^[9]。在熔池钢液量、深度及温度一定的条件下,熔池的搅拌能与底吹气量成正比关系。

$$\varepsilon_e = 28.5 \frac{QT}{W_s} \lg \left(1 + \frac{H}{1.48} \right) \quad (1)$$

式中: ε_e 为电弧炉底吹搅拌能,W/t; Q 为底吹气体流量,m³/min; T 为熔池温度,K; W_s 为钢液重量,t; H 为

熔池深度,m。

根据混匀时间可表征采用底吹搅拌后的熔池均匀化效果。由于电弧炉熔池浅,搅拌能对混匀时间的影响规律与常规容器存在区别。研究者针对二者影响关系进行过多次实验测定,其关系式可统一表示为式(2)形式。

$$\tau = m \cdot \varepsilon_e^n \quad (2)$$

式中: τ 为混匀时间,s; ε_e 为电弧炉底吹搅拌能,W/t;系数 m 和炉容大小有关;指数 n 和底吹元件的数量、布置方式、喷吹气体等因素有关,一般是在-0.6~-0.1的范围^[10-11]。

图 1 表示不同研究者得出的电弧炉底吹搅拌能对混匀时间的影响关系^[9,12-14]。其中 τ_1 、 τ_3 是日本研究者在 50 t 底吹电弧炉上实验得出, τ_2 、 τ_4 是国内研究者在 10 t、25 t 底吹电弧炉上实验得出。虽然各研究结果的初始混匀时间不同,但总变化趋势相同,混匀时间均随着底吹搅拌能的增大而减小。当底吹搅拌能在 0~10 W/t 影响最大,混匀时间从最大值迅速减小至原来的 40%~50%。搅拌能从 10 W/t 增大到 30 W/t 的过程中,混匀时间减小的趋势减缓,缩短到只有 1.5~3.4 min。当底吹搅拌能大于 30 W/t 后,混匀时间受底吹搅拌能的影响已很小,尤其大于 50 W/t 后,曲线趋于平坦。因此从搅拌能对混匀的影响效率看,电弧炉冶炼时可将底吹搅拌能控制在小于 50 W/t 的范围。

1.2 成分控制

当熔池搅拌力不足时,反应物传质速度降低,限制化学反应进行,同时,钢液的热量传输受到影响。由于热量传递慢,熔池温度梯度较大,导致废钢熔化慢、化渣不良和冶炼时间延长。增加底吹搅拌后,熔池中的钢-渣-气三相传质、钢渣及钢液-废钢间的传热都得到明显改善,其对钢液中不同成分影响见表 1。

使用底吹技术可提高[C]、[O]、[S]的控制水平。由于渣中(FeO)和熔池中的[C]向渣钢界面传质速度提高,电弧炉熔池碳氧积更接近平衡值^[4,15]。如某厂 100 t 电弧炉增加底吹后,实测碳氧

表 1 底吹对钢液成分控制的影响

Table 1 Effect of bottom blowing on composition of molten steel

成分	方程式	影响效果
C	(FeO)+[C]=Fe+CO(g)	传质加快,促进反应
S	[FeS]+(CaO)=(FeO)+(CaS)	传质加快,氧位降低
P	2[P]+5(FeO)=(P ₂ O ₅)+5Fe	传质条件改善,提高成渣效率
N	N ₂ =2[N]	熔池内部气泡促进脱 N

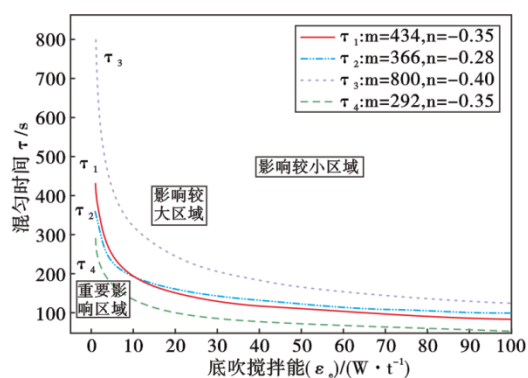


图1 电弧炉底吹搅拌能与混匀时间的影响关系

Fig. 1 The influence relationship between stirring energy and mixing time of EAF bottom blowing

积由原来的 0.0033 降低到 0.0028 。熔池内 $[S]$ 的容量传质系数由无底吹的 $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 增大至底吹后的 $4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ^[12], 加上渣中 (FeO) 和钢液氧位降低, 脱硫反应明显加快。经测定和计算, 底吹时钢液中 $[C]$ 和 $[S]$ 的传质系数分别为 $0.9 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 和 $0.45 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ^[16]。

研究表明, 底吹搅拌使脱磷传质条件大幅改善, 降低冶炼终点熔渣及炉渣氧化性, 减少出钢脱氧合金量。某厂测得较小的底吹气量下, 平均磷分配系数由 23 提高到 26^[17]。采用底吹脱磷剂技术, 渣中 P_2O_5 可大于 10%^[18]。研究者通过工业试验测得, 增加底吹使钢液中 P 含量降低 0.005%, 脱磷率提高 12.1%^[19]。底吹气泡内氮分压远小于平衡分压, 可促进脱氮。调整后期搅拌强度和气体种类可使终点 $[N]$ 控制在 0.0045% 以下^[20]。

此外, 底吹对于废钢和难熔合金的熔化都有促进作用。计算表明, 长度大于 0.8 m 的成捆轻废熔化时, 增加底吹搅拌, 熔化时间缩短 51%^[7]。

2 电弧炉底吹系统

2.1 系统组成及搅拌气体

电弧炉底吹系统包括供气系统、底吹元件和控制系统。气源接入供气系统主管路后, 通过支路对气体进行调节、切换, 然后经输送管道和底吹元件

进入电弧炉熔池内, 如图 2 所示。

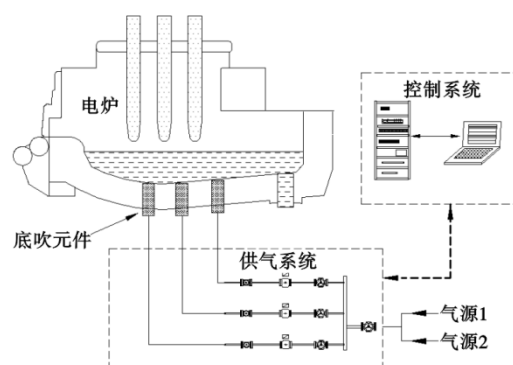


图2 电弧炉底吹系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bottom blowing system in EAF

电弧炉底吹搅拌可选择的气体有 Ar 、 N_2 、 O_2 、 CO 、 CO_2 和天然气等, 不同气体具备不同工艺特点, 见表 2^[4-6, 17, 21-22]。对于底吹氩气、氮气等气体, 熔池搅拌能主要来自初始动能、温度膨胀功和浮力做功。采用 CO_2 等参与熔池反应的底吹气体, 还有反应生成气体的膨胀功, 因此, 搅拌力有所增强。

2.2 底吹元件类型及维护

底吹元件是电弧炉底吹系统的关键装置。通常, 按照喷嘴顶部是否与钢液直接接触分为接触型和非接触型。采用接触型时, 底吹气体直接搅动钢液, 搅拌强度大, 缺点是元件寿命偏短。采用非接触型时, 底吹气体通过透气砖孔隙弥散成小气泡再进入钢液, 搅拌力相对偏弱, 耗气量大, 但底吹元件寿命更长。日本东京钢公司与川崎耐火材料公司结合两者优点开发出 EF-KOA 系统, 底吹元件由透气性捣打料、多孔塞和镁铬质套管组成^[21]。按照管路特点划分, 底吹元件分为喷嘴式及透气塞式。喷嘴式又分为单管、双层套管、多管等。透气塞式包括 DPP 型、MHP 型、VRS 型和 TLS 型等, 见表 3。

底吹元件一般由 MgO-C 复合材料和其它部件组成, 具备良好的透气性、耐高温性、抗热震性、抗

表2 不同底吹气体的比较

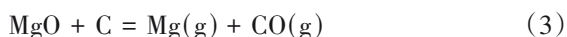
Table 2 Comparison of different bottom blowing gases

气体	特点	应用单位
Ar	理想的底吹惰性气体, 但使用成本高, 多用于炼钢后期。	衡阳华菱、天津钢管等
N_2	成本低, 应用广泛, 但会使钢液增氮, 需要优化工艺促进脱氮。	意大利 Beltrame 厂日本中山制钢所等
天然气	搅拌能力强, 可提供辅助能源, 是较理想的底吹气体, 使用时要注意防爆。	墨西哥 Deacero 厂等
O_2 、空气、 CO	搅拌能力强, 使用较少。易使钢液氧化, 损坏底吹装置, 需配保护气体。	日本东京制钢公司、山阳特钢 德国 Klbckner 公司等
CO_2	搅拌增强, 适当升高熔池温度, 利于脱氮, 应用较少。	西宁特钢等

表 3 典型透气塞型式
Table 3 Typical breathable plug types of bottom blowing parts

类型	研制厂家	应用特点
DPP	奥地利 Redex 公司	定向多孔型透气元件,具备搅拌均匀、寿命较长、更换方便等特点,应用广泛。
MHP	美国 Veitscher 公司	结构与 DPP 型近似,可分为接触型和非接触型,喷吹效果较好。
VRS		
TLS	美国 Liquid air 公司	气流柔和、分散、寿命长。

冲击性等性能。底吹元件工作面不断被运动的钢液侵蚀和冲刷,并在高温下发生化学反应,见式(3),于是元件产生裂纹和剥落。



急剧的温度变化造成的热应力、出钢后期熔渣侵蚀也会影响寿命。根据研究者在试验中得出底吹气量、熔池温度和侵蚀数据,可作出图 3^[23]。可见,气量越大,温度越高,侵蚀速度越快。接触式底搅系统,如 EF-KGC 系统的透气元件寿命为 300~500 炉^[8],而非接触式底搅系统使用寿命最长可达到 4 000 炉^[2]。调整操作工艺参数也可增加使用寿命,安钢对不同阶段的流量进行优化,使透气砖的使用寿命和炉龄从 240~300 炉提高到 700 炉以上,实现与炉龄同步^[24]。

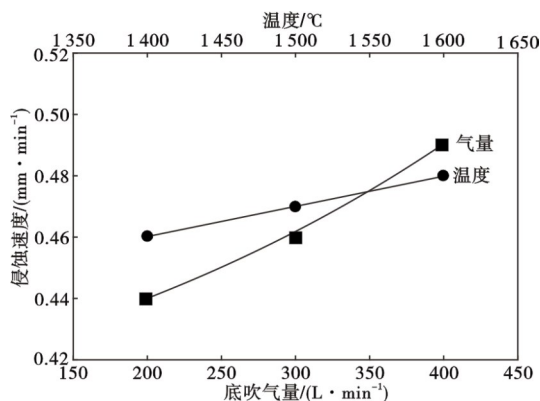


图 3 气量和温度对底吹元件侵蚀的影响

Fig. 3 Effect of gas volume and temperature on erosion of bottom blowing element

3 底吹工艺布置

底吹装置常见布置方式如图 4 所示^[8-10,21,25-28]。由于电弧炉的类型和尺寸不同,底吹布置方式也有区别,一般是装 1~4 支吹气元件。通常,小炉子在炉底中心装 1 支,大中型炉子在电极圆上两电极之间的位置装 3 支,如图 4(a)和图 4(b),如日本东京钢公司冈山厂按图 4(b)布置。考虑到 EBT 电弧炉的出钢区温度偏低,在靠近出钢口处增设喷嘴,增强

小熔池的搅拌,见图 4(c)和图 4(d),如墨西哥 Deaceor 厂按图 4(d)布置。为了减小对电极操作和电弧的干扰,底吹元件可布置在电极间区域,且与炉膛直径为一定比例的圆周上,见图 4(e),如美国 Union Carbide 公司和 Slater 钢铁公司将底吹装置布置在炉膛直径 60% 的圆周上,并在电极之间的对应区域。

结合搅拌特点,选择不同的布置方式。研究者针对 30 t 电弧炉进行实验,得出内 3 孔和内 4 孔布置较为理想,内 4 孔是在内 3 孔基础上在电极中心增加 1 个,见图 4(f)。有研究者发现,采用非均匀底吹布置方式后,其气液动量传输条件对熔池流动性的改善效果更好。意大利 Bltrame 厂在 3 个低温区中的两个区各布置 1 个底吹装置,见图 4(g)。西宁特钢的 75 t 电弧炉,经过试验确定 3 个底吹元件的最优布置方式为非对称分布,与水平轴线的最小夹角分别为 75°、23°和 45°。也有厂家在电弧炉上选择外 3 孔布置,同时,其中两个底吹元件是在两个电极中心线偏炉后的位置,如图 4(h)。

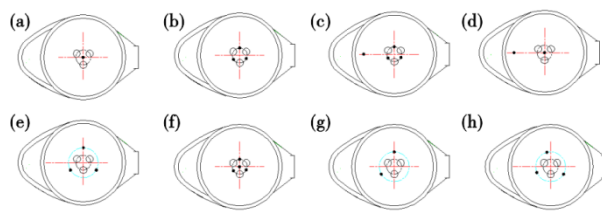


图 4 不同的底吹布置方式

Fig. 4 Different arrangements of bottom blowing

4 底吹流场特性模拟

为提高电弧炉底吹工艺水平,研究者们采用数值模拟结合冷态模拟、工业实验的方法探讨熔池流场特性,推动底吹技术。

马国宏等^[37]使用 Fluent 模拟电弧炉三相流,得出底吹可使熔池搅拌速度提高 3~5 倍。多位研究者的模拟结果明确底吹气量增大后熔池流速增大,死区减少^[19,39]。芮树森等^[39]对 30 t 电弧炉进行模拟计算和水模测定,认为底吹电弧炉熔池包括主循环

区、漩涡区和死区。漩涡区在主循环区的中心,速度偏低,而死区主要在熔池侧壁与熔池表面交界等区域,钢液速度极低,很少参与循环。杨泽世等^[26]模拟100 t电弧炉,将EBT区域底吹流量从100 L/min增加至150 L/min,使死区面积减少22%,熔池平均流速提高18%。Wei等^[35]通过研究比较三底吹元件布置方式,确定非对称布置为最佳方案。Yang等^[25,27]通过模拟得出,不同底吹元件的气量采用线性分布方式搅拌效果更好。但底吹气量存在最佳值,付建辉等^[40]对40 t电弧炉模拟得出气量最佳值为30~40 m³/h。

笔者通过建立电弧炉底吹三相流数值计算模型,研究电弧炉熔池流动变化规律。计算时忽略熔池化学反应,铁水相不可压缩,采用VOF多相流模型以及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、无滑移壁面和标准壁面函数。边界条件设置为速度入口和压力出口。模型基于100 t电弧炉建立,几何尺寸和网格模型如图5所示。

计算得出,100 t电弧炉不同底吹布置条件下深度150 mm的熔池速度分布云图如图6所示。可看到图6(a)中熔池布置两支底吹,靠近偏心区钢液速度低(<0.01 m/s),死区区域面积较大。图6

(b)中熔池布置三支底吹,边缘死区区域减小,但靠近炉门处低速区域(<0.01 m/s)分布明显更多。

5 底吹应用及新技术

电弧炉底吹技术发展迅速,在各种炉型中得到广泛应用。1992年,钢铁研究总院与长城特钢开发出普通电弧炉的底吹技术,在10 t电弧炉上投入使用,缩短冶炼时间30 min^[3]。日本山阳特钢在超高功率电弧炉上采用底吹技术,生产率提高15%,电耗下降40~50 kW·h/t。为减小EBT电弧炉偏心区钢液温差,底吹技术进一步推广,如意大利Bl-trame厂、墨西哥Deaceor厂等。国内钢厂得出冶炼周期比无底吹时缩短3.4 min,将EBT区底吹流量增大至150 L/min后又缩短0.7 min^[15]。随着康斯迪电弧炉、竖式电弧炉等技术的成熟,底吹技术广泛应用。西宁特钢、通钢第一炼钢厂等多家钢厂均在Consteel电弧炉上安装底吹装置,与供电等工艺结合后取得良好效果^[4,29]。江苏沙钢在竖式电弧炉上安装DPP底吹供气元件,钢液收得率和生产率得到提高^[30]。部分代表厂家的底吹技术见表4^[5,7,22,29-31]

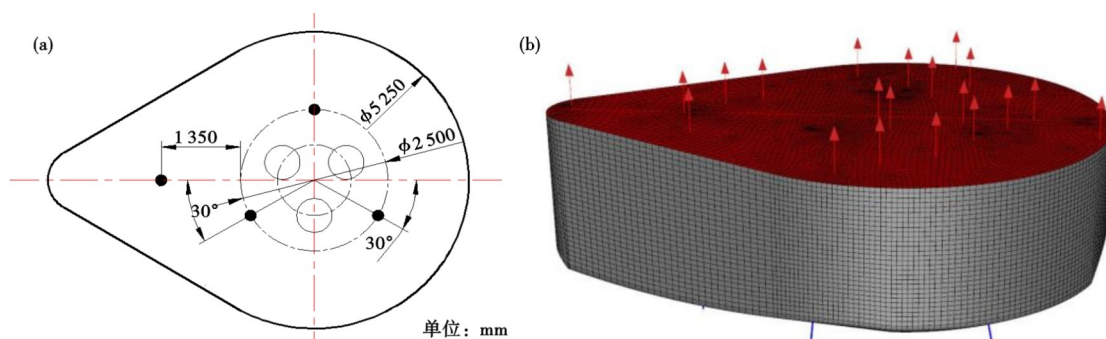


图5 电弧炉模型:(a)几何尺寸,(b)网格模型

Fig. 5 Electric arc furnace model: (a) geometric size, (b) grid model

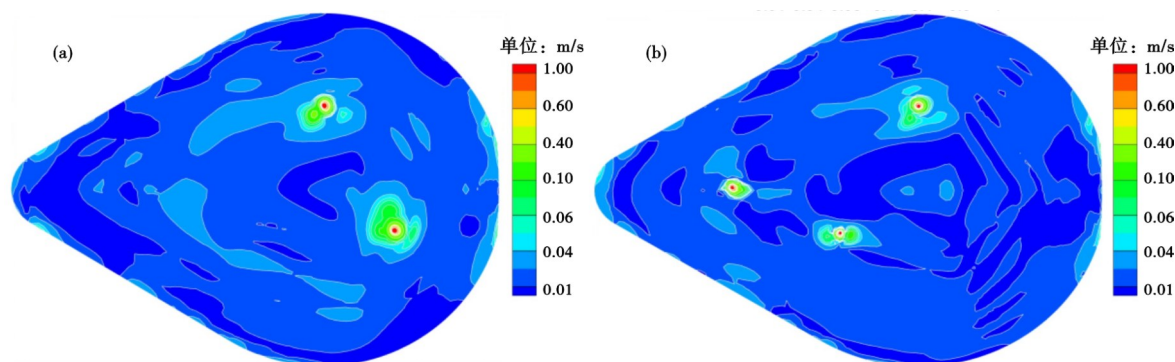


图6 不同底吹布置条件下100 t电弧炉深度150 mm熔池速度分布云图:(a)2支底吹,(b)3支底吹

Fig. 6 Cloud chart of velocity distribution with depth of 150 mm under different process layouts of bottom blowing parts of 100 t EAF: (a) 2 bottom blowing parts; (b) 3 bottom blowing parts

表 4 电弧炉底吹技术应用实绩
Table 4 Application performance of bottom blowing technology in EAF

序号	厂家	容量/t	炉型	气体	底吹元件	工艺效果
1	日本—德国 K-ES 法	27	普通	氧气, 惰性气体等	3~6 个双层套管式底吹元件。	与二次燃烧技术结合, 生产率提高 33% 以上。
2	墨西哥 Deacero 厂	45	UHP	天然气, N ₂	炉底中心和出钢口附近各装 1 个, 单管式。	降低能耗 40 kW·h/t, 冶炼时间缩短 16~20 min。
3	日本中山制钢所	100	直流	N ₂	1 个靠近炉门, 1 个靠近偏心区	炼钢时间缩短 5%~6%。
4	新良特钢	50	EBT	N ₂ /Ar	2 个, 在电极间冷区, 分别靠近炉门和偏心区。	金属料消耗降低 17 kg/t, 冶炼周期缩短 4 min。
5	衡阳华菱	90	UHP	N ₂ /Ar	3 个底吹透气砖装置	冶炼周期缩短 6.68 min, 金属料消耗减少 7.54 kg/t。
6	江苏沙钢	90	竖炉	Ar	3 个底吹元件, 2 个在竖井侧。	收得率提高, 电极消耗降低 10%, 氧气消耗降低 2 m ³ /t。
7	通钢一炼	70	Consteel	N ₂ /Ar	3 个底吹元件, 在电极间冷区	脱[C]速率上升到 0.1%/min, 电耗减少 8.2 kW·h/t, 冶炼时间缩短 4 min。

当前,底吹搅拌技术在电弧炉炼钢领域的应用发展主要表现在以下方面:

(1) 底吹技术深度研发

结合电弧炉底吹元件寿命、增氮、脱磷、电弧炉留钢操作等工艺问题,研究者相继研发和优化电弧炉炼钢安全长寿底吹技术、底吹 CO₂ 技术、底吹控制模型技术、底吹预警技术、埋入式喷粉技术等,取得较好效果。工业实践中,底吹元件寿命已可超 800 炉次^[4,32-36,41]。

(2) 多工艺技术耦合

底吹技术可与多种工艺技术相结合。日本钢管公司京浜钢厂将底吹与氧化物熔融还原技术结合,用于冶炼不锈钢^[7]。随着电弧炉复合吹炼技术的成熟,将电弧炉底吹技术与炉壁枪、炉门枪、侧吹喷枪等技术结合成为必然趋势^[37-38,42]。天津钢管、新余特钢、西宁特钢等钢厂采用复吹工艺,匹配不同冶炼阶段的氧气和底吹气体,极大降低物料消耗等指标,如天津钢管的钢铁料消耗降低 32 kg/t,新余特钢的渣中 FeO 降低 8.15%。

(3) 新应用及新发展

近年,各种新型电弧炉包括 Consteel 炉、量子炉、SHARC 电弧炉、ECOARC 电弧炉等应用越来越广泛,以适应连续加料、高效生产的需要。由于加料位置、电极位置及炉型变化,为均匀化熔池,新炉型对底吹提出更多要求,包括底吹元件数量的增加(5 支以上)、底吹位置的多样化等。因此,结合新炉

型装备特点,对底吹工艺布置、安装方式、设计参数等进行优化,对促进电弧炉短流程炼钢技术的发展意义重大。

当前,智能化底吹已成为电弧炉智能化的重要技术。如钢铁研究总院、北京科技大学等院所研发的电弧炉智能底吹控制系统,已在多个厂家推广应用。

6 结论

(1) 电弧炉熔池混匀时间与底吹搅拌能呈幂函数关系,其指数和底吹元件的数量、布置方式、喷吹气体等因素有关,增加底吹搅拌可大幅促进冶炼过程熔池 C、O、S、P 等元素的传质,均匀钢液温度,进而提高冶炼效率。

(2) 电弧炉底吹效果受搅拌气体、底吹元件、底吹参数等影响很大,底吹元件寿命是电弧炉底吹系统的难点技术,应通过改进元件结构、材料及优化操作参数提高元件寿命。

(3) 通过底吹流场特性模拟结果可知,底吹布置和流量对改善电弧炉熔池流动性至关重要。应结合不同电弧炉的类型和尺寸,合理布置底吹装置及采用最佳底吹气量,以有效消除死区面积,改善熔池动力学条件。

(4) 电弧炉底吹搅拌具有降低能耗和原材料消耗、提高钢液质量和生产效率等优点。结合新型电弧炉特点发展底吹搅拌技术,实现智能化底吹,是未来电弧炉技术发展的重要方向。

参考文献

[1] 陈煜,赵瑞敏,魏光升. 电弧炉炼钢过程的系统工程思考[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 74-79.

[2] 沈才芳,孙杜成,陈建斌. 电弧炉炼钢工艺与设备[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:320.

- [3] 何 平,张荣平,梅洪生. 10吨底吹电弧炉工业实验研究[J]. 钢铁,1994,29(3):35-39.
- [4] 王 欢,朱 荣,刘润藻,等. 二氧化碳在电弧炉底吹中的应用研究[J]. 工业加热,2014,43(2):12-14+17.
- [5] 杨幸福,韦 波,陈代兵,等. 90 t电弧炉底吹工艺实践的研究[J]. 工业加热,2015,44(2):17-18+26.
- [6] 王学义,朱 荣,李国丰,等. 90 t电弧炉底吹工艺效果分析[J]. 工业加热,2013,42(2):39-41.
- [7] 何 平,张德铭,邓开文,等. 电弧炉底吹气体搅拌技术[J]. 钢铁,1992,27(9):65-70.
- [8] 刘会林,朱 荣. 电弧炉短流程炼钢设备与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:740.
- [9] 李士琦. 现代化电弧炉炼钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.
- [10] 李连福,姜茂发. 电弧炉底吹搅拌新技术[J]. 炼钢,1994,10(3):55-60.
- [11] 芮树森,刘金琨,武振廷,等. 底吹电弧炉均匀混合特性[J]. 钢铁,1995,30(S1):32-35.
- [12] 何 平. 底吹电弧炉熔池内物理化学行为分析[J]. 钢铁研究学报,1995,7(3):16-21.
- [13] 何 平. 底吹电弧炉炼钢的理论分析[J]. 特殊钢,1989,10(3):10-13.
- [14] 成国光,覃祖柱,范 涛. 电弧炉底吹气搅拌冷模拟研究[J]. 炼钢,1994,10(3):17-20.
- [15] 吕 明,李 航,杨凌志,等. EBT区域底吹流量变化对电弧炉炼钢的影响[J]. 钢铁,2019,54(10):38-44.
- [16] 李 青,洪 新. 底吹电弧炉钢-渣反应系统钢液侧元素传质系数研究[J]. 包头钢铁学院学报,2001,20(4):297-300.
- [17] 张代杰. 电炉炼钢底吹新技术[J]. 钢铁研究,1991,19(3):52-56.
- [18] Tsutomu N, Shuji T, Osamu H, et al. Mechanism of hot metal dephosphorization by injecting lime base fluxes with oxygen into bottom blown converter[J]. Trans Iron Steel Inst Jpn,1983,23(6):513-521.
- [19] Wei G S, Zhu R, Dong K, et al. Research and analysis on the physical and chemical properties of molten bath with bottom-blowing in EAF steelmaking process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2016,47(5):3066-3079.
- [20] Wei G S, Zhu R, Dong K, et al. Influence of bottom-blowing gas species on the nitrogen content in molten steel during the EAF steelmaking process[J]. Ironmaking & Steelmaking,2018,45(9):839-846.
- [21] 赵小浚. 国外电弧炉底吹技术的发展[J]. 钢管,1995,24(5):12-15.
- [22] 曹妙康. 直流电弧炉底吹气体搅拌加深熔池冶炼技术[J]. 上海金属,1998,20(2):34-37.
- [23] 朱 荣,董 凯,刘润藻. 电弧炉炼钢安全长寿底吹技术的研究开发[C]. 2016年特钢年会论文集,南昌,2016:7-11.
- [24] 吴红广,王新志,蔺学浩. 安钢100 t电弧炉高效冶炼技术的研究与应用[J]. 河南冶金,2021,29(6):38-41.
- [25] Liu F H, Zhu R, Dong K, et al. Simulation and application of bottom-blowing in electrical arc furnace steelmaking process[J]. ISIJ International,2015,55(11):2365-2373.
- [26] 杨泽世,杨凌志,宋景凌,等. 电弧炉EBT区不同底吹搅拌条件的钢液流动数值模拟[J]. 工程科学学报,2018,40(S1):123-129.
- [27] Yang Z S, Yang L Z, Cheng T, et al. Fluid flow characteristic of EAF molten steel with different bottom-blowing gas flow rate distributions[J]. ISIJ International,2020,60(9):1957-1967.
- [28] 曾新光. 电弧炉底吹氩气搅拌工艺[J]. 特殊钢,2000,21(3):50-52.
- [29] 董 凯,李金伟,朱长富. 底吹搅拌在Consteel电炉中的应用[J]. 工业加热,2011,40(1):60-62.
- [30] 徐建华. 底吹炼钢技术在竖式电弧炉上的运用[J]. 江苏冶金,1999,27(3):25-27.
- [31] 刘永刚,陈三芽,王 婧,等. 电弧炉底吹系统的生产工艺及冶金效果[J]. 工业加热,2011,40(1):63-65.
- [32] 王学义,宋智宇. 降低电炉管线钢氮含量生产工艺摸索[J]. 工业加热,2019,48(6):14-16.
- [33] 朱 荣,魏光升,唐天平. 电弧炉炼钢流程净化冶炼技术[J]. 炼钢,2018,34(1):10-19.
- [34] 贾晓娟,贾宝刚,杜永慧,等. 锰合金电弧炉吹炼模式的探索[J]. 铁合金,2019,50(6):1-3.
- [35] Wei G S, Zhu R, Wang Y, et al. Technological innovations of electric arc furnace bottom-blowing in China[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2019,26(9):909-916.
- [36] 汪成义,吴 巍,杨利彬,等. 120 t转炉底吹供气系统控制模型与应用效果[J]. 特殊钢,2020,41(3):10-14.
- [37] 马国宏,朱 荣,刘润藻,等. 电弧炉炼钢复合吹炼技术的研究及应用[J]. 中国冶金,2013,23(12):12-15.
- [38] 刘永刚,魏光升,吴学涛,等. 65 t电弧炉复合吹炼的水模拟研究[J]. 工业加热,2018,47(6):51-54.
- [39] 芮树森,刘金琨,武振廷,等. 底吹电弧炉熔池流场测定及数学模型[J]. 钢铁研究学报,1995,7(1):5-10.
- [40] 付建辉,刘庭耀,陈 均. 40 t偏心电弧炉底吹工艺数值模拟及工业试验研究[J]. 钢铁钒钛,2023,44(1):129-134.
- [41] 邓浩华,彭 锋,李 晓. CO₂在炼钢工艺中的资源化利用现状与展望[J]. 特殊钢,2023,44(5):9-13.
- [42] 张福君. 基于全废钢电弧炉的炼钢新工艺基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.