

GCr15 轴承钢转炉冶炼中“C-P-T”协同控制工艺优化研究

肖丙政¹, 谢海平¹, 魏刚武¹, 孙陶安², 王海川², 邓爱军²

(1 南京钢铁股份有限公司特钢事业部研发处, 南京 210035; 2 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243032)

摘要:对 100 t 转炉冶炼轴承钢生产过程进行了热力学研究与分析, 优化建立了转炉冶炼过程保碳、脱磷、控温 (“C-P-T”) 的协同控制工艺路线, 并应用于轴承钢冶炼生产。结果表明, 炉内脱磷反应不会在磷碳选择性氧化温度到来时立刻停止, 而是有一段缓慢的衰减过程。为了深脱磷的需要, 冶炼前期一次倒渣的最佳时间应控制在 350 ~ 380 s, 温度区间为 1 360 ~ 1 437 °C; 通过脱碳速率模型预测出轴承钢冶炼中后期的脱碳速率为 (0.21% ~ 0.28%)/min; 为了保碳控温的需要, 在吹炼末期可采取高拉碳补吹的方式进一步精确调控终点钢液温度。一个炉役期生产数据统计显示, 终点碳、磷、温度三者同时命中目标的炉次占比达到了 76.67%, 钢液纯净度得到大幅提升。

关键词:转炉; GCr15 轴承钢; 热力学; 保碳脱磷控温; 协同控制; 纯净度

Optimization of “C-P-T” Co-operating Control Process in Converter Steelmaking for GCr15 Bearing Steel

Xiao Bingzheng¹, Xie Haiping¹, Wei Gangwu¹,
Sun Taoan², Wang Haichuan², Deng Aijun²

(1 R & D Department of Special Steel Division, Nanjing Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210035;
2 School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032)

Abstract: The production process of steelmaking bearing steel by 100 t converter is studied and analyzed with thermodynamics. The co-operating control process of carbon preservation, dephosphorization, and temperature control (C-P-T) in converter steelmaking process is optimized and established, and applied to produce bearing steel. The results show that the dephosphorization reaction in furnace does not stop immediately when the selective oxidation temperature of phosphorus and carbon comes, but has a slow decay process. In order to meet the need of deep dephosphorization, the optimal time of first slagging out in early stage of the new process should be controlled between 350 s and 380 s, and the temperature range is 1 360-1 437 °C. The decarburization rate model predicts that the decarburization rate of bearing steel in the late stage of smelting is (0.21%-0.28%)/min. In order to keep the requirement of carbon preservation and temperature control, the catch carbon and reblow can be adopted in the end phase of blowing to further accurately control the temperature of liquid steel. According to the production data statistics of a furnace service period, the heat ratio of end carbon, phosphorus and temperature hit the target at the same time accounts for 76.67%, and the purity of liquid steel is greatly improved.

Key Words: Converter; GCr15 Bearing Steel; Thermodynamics; Carbon Preservation Dephosphorization Temperature Control; Co-operating Control; Purity

高品质轴承钢主要用于生产特殊服役条件下的轴承套圈、滚动体及轴套等, 广泛应用于航空航天、海洋工程、军工等领域。因此, 要求轴承钢材料具有较高的纯净度和良好的均匀性^[1-3]。与电弧炉冶炼轴承钢相比, 转炉冶炼轴承钢具有原料条件较好, 铁水质量相对废钢较为稳定、可控, 终点气体含量更低, 生产成本低廉等明显优势。无论何种冶炼工艺, 对于钢中有害元素磷的有效去除和控制都是至关重要的。转炉内钢液脱磷处理主要有两条工艺路线。

一是采用两座转炉分别进行脱磷和脱碳处理, 即“双联工艺”, 该工艺脱磷和脱碳分别在两个转炉中同时进行, 生产效率高, 不会产生回磷问题; 二是脱磷和脱碳在同一转炉内进行, 该工艺为现今普遍采用, 适合于低磷高碳钢种的冶炼^[4-6]。

众所周知, 转炉冶炼前期炉温较低, 有利于脱磷反应的快速进行, 中后期炉温迅速升高, 若采用高碳出钢, 控制时间短, 易产生回磷现象。为确保 GCr15 轴承钢的成品磷含量要求, 一般冶炼方式是保磷出

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重大项目资助 (KJ2020ZD25)

作者简介: 肖丙政 (1982 -); 男, 副主任; E-mail: xiaobingzheng@njsteel.com.cn 收稿日期: 2022-03-30

通讯作者: 邓爱军 (1982 -); 男, 博士, 副教授; E-mail: ajdeng@ahut.edu.cn

钢后再增碳,易造成碳-磷(“C-P”)不协调。而为保碳采用补吹升温工艺又易回磷不能保住碳,易造成碳-温(“C-T”)不协调。为此,要做到“C-P-T”三者同时命中目标显然控制难度较大。前人^[7-9]对普通高碳钢的保碳出钢有过很多研究,这些研究多数集中在对钢中磷含量要求不高的高碳钢上,而如何实现对高碳高铬钢 BOF 保碳脱磷控温的研究却鲜见报道。

南钢第二炼钢厂现有 100 t 转炉两座,其中 1[#] 转炉为顶底复吹氧气转炉,具有良好的冶金反应动力学条件。对于冶炼高品质 GCr15 轴承钢而言,“C-P-T”三者协同命中一直难以实现。通过对现有冶炼条件和实际工况进行综合研究分析,拟采用留

渣换渣工艺生产 GCr15 轴承钢,冶炼前期采取低温脱磷,过程精准控制,终点高拉碳出钢,从而实现保碳脱磷控温三命中的目标。

1 冶炼前期“C-P-T”协同控制热力学

1.1 轴承钢终点控碳目标理论分析

GCr15 轴承钢对钢液的纯净度有着极高的要求,其主要化学成分如表 1 所示。它对钢液的纯净度有着极高的要求。转炉在冶炼高品质轴承钢时确保终点能够留得住碳,从而能够降低钢中总氧含量,是提高钢液纯净度的重要途径之一。

转炉吹氧脱碳反应达到动态平衡时,钢中溶解

表 1 GCr15 轴承钢标准和目标控制化学成分/%
Table 1 Standard and control aim chemical composition of GCr15 bearing steel/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Ti
标准成分	0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	≤0.015	≤0.015	≤0.20	1.40~1.65	≤0.050	≤0.003
控制目标	0.97	0.25	0.35	≤0.010	≤0.005	≤0.20	1.45	0.015	≤0.003

氧随着碳含量的增加急剧下降,碳氧含量呈反比例关系。研究表明^[10-11],当钢中[C] > 0.3% 时,炉内脱碳反应以氧的直接氧化反应为主,此时碳氧反应速率由供氧强度与钢中碳向反应界面的传质速率共同决定,加强底吹搅拌效果可促进钢中碳的传质速率,提高碳氧反应速率。

实际生产时,由于钢液升温主要由供氧时间和强度决定,降低供氧强度或减少吹氧时间可实现保碳出钢,但难以保证出钢温度,这会给精炼生产工序带来升温困难,不利于组织连续生产。因此,根据轴承钢的液相线温度制订合适的出钢温度,既满足后道工序的生产需求,又能保证钢中留有足够的碳。根据碳氧积理论和钢种生产要求,将轴承钢冶炼时转炉出钢溶解氧含量定为 100×10^{-6} ,这样可大幅度地降低后道工序的脱氧负荷,此时钢中的理论碳含量为 0.25%。考虑到实际生产与理论研究的差别,且为实现“高拉补吹”的冶炼工艺,本研究将终点控碳目标设定为 0.30%。

1.2 “C-P-T”协同控制热力学研究

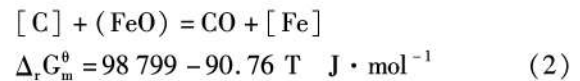
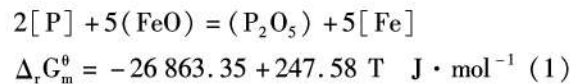
1.2.1 冶炼前期低温脱磷的最佳一倒温度探索

1[#]顶底复吹氧气转炉具有良好的深度脱磷动力学条件,研究分析脱磷反应热力学是弄清转炉在不同时期吹氧脱磷的前提条件,也是制定本研究深度脱磷工艺的基础。

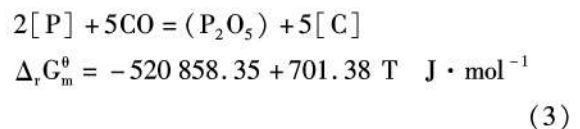
在标准状态下,磷碳选择性氧化转变的温度在 1 500 K 左右^[12-13],而在 1 123 ~ 1 450 K 时,铁水中

的磷氧反应优先进行,脱磷得以迅速进行,而脱碳反应受到抑制;随着炉内温度的不断上升,当超过这一转变温度时磷氧反应受到抑制,而碳氧反应则趋于活跃。如果以这一转变温度作为转炉冶炼 GCr15 轴承钢前期的一倒指导温度,其结果是渣铁不能很好分离,倒渣量不足总渣量的 30%,一倒脱磷率不足 40%。这是由于理论转变温度 1 500 K 偏低,虽然低温有利于脱磷,但低温同样对石灰溶解不利,初期渣不能迅速形成,不利于磷氧反应的迅速进行。这说明理论与实践操作存在差异,需以此转变温度为参考点,展开进一步的热力学研究与分析,以找到最佳的一倒指导温度。

转炉吹炼初期炉内锰、硅元素基本氧化结束,此时在渣-金界面主要发生如下反应:



根据式(1)和式(2)可得到钢中[P]和[C]选择性氧化的耦合反应式:

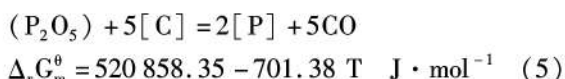


在炼钢温度下反应式(3)有:

$$\Delta_r G_m^0 = -520\,858.35 + 701.38T + RT \ln \frac{a_{P_2O_5} \cdot a_C^5}{a_P^2 \cdot P_{CO}^5} \quad \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (4)$$

式中： a_i -反应物或者生成物组元 i 的活度； P_{CO} -炉内 CO 气体的分压。

式(4)即为非标准状态下，炉内磷碳选择性氧化反应的热力学方程式。然而随着炉内反应的不断进行，温度不断上升，反应(3)的吉布斯自由能将大于0，反应将反向进行，即发生回磷现象，则有：



在上述条件下，现场取得的铁水样和熔渣成分数据如表 2、表 3 所示，根据转炉冶炼非标态计算数据及结果^[14-16]。令式(4) $\Delta_r G_m^0 = 0$ ，可计算出在实际工况下，转炉内磷碳选择性氧化的转变温度 $T_{trans1} = 1\,633\text{ K}$ ，其变化情况如图 1 所示。

由图 1 可知，冶炼初期炉内整体温度偏低，在 T_{trans1} 温度以下，钢液中的 $[P]$ 可被钢液内的 CO 气泡(式 3)和渣金界面处的 (FeO) (式 1)同时氧化，初期钢液中的 CO 气泡相对较少，渣料中加入了大量 (FeO) (球团矿)使得 $[P]$ 的氧化主要按反应(1)

表 2 一倒时铁水样平均成分/%

Table 2 Average composition of molten iron sample at first poured/%

C	Si	Mn	P	S	Ti
3.2	0.023	0.12	0.012	0.02	0.010

表 3 一倒时熔渣平均成分/%

Table 3 Average ingredient of liquid slag at first poured/%

CaO	MgO	MnO	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	TiO ₂
36.87	5.8	7.3	15.4	26.75	2.26	1.97

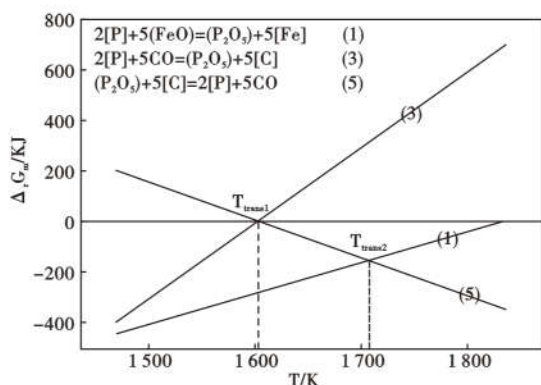
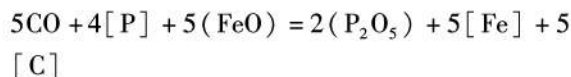


图 1 磷碳选择性氧化与 $\Delta_r G_m$ 的关系

Fig. 1 Relationship between selective oxidation of phosphorus-carbon $\Delta_r G_m$

进行。随着冶炼过程不断进行，炉内温度超过 T_{trans1} 时，脱磷(式 1)和回磷(式 5)共同进行。随着温度从 T_{trans1} 向 T_{trans2} 变化，带来反应自由能的此消彼长，脱磷反应的趋势在逐渐降低，而回磷反应的趋势在逐渐增大。上述热力学分析表明，随着炉内温度不断升高，脱磷反应不会在磷氧选择性氧化温度 T_{trans1} 时立刻停止，而是在 T_{trans1} 至 T_{trans2} 温度区间内继续进行，并逐渐走向衰减。因此，可认为在炉内 T_{trans1} 和对应渣中 (FeO) 含量平衡时，随着碳氧反应进行导致炉内温度升高，此时渣中 (FeO) 含量相应升高，而与之重新达到吉布斯自由能等于 0 的温度点也相应升高，故一倒温度可适当向后延长。当炉内温度继续升高达到 T_{trans2} 时，炉内脱磷和回磷达到动态平衡，熔渣中磷容量达到最大值，可认为 T_{trans2} 为炉内磷氧化和还原转变的临界温度点。据此可得出，一倒温度大于这一临界点时，钢中的碳即开始大量氧化，而熔渣的 (P_2O_5) 开始逐步还原进入钢液中，转炉脱磷保碳能力逐步下降。

将式(1)钢中 $[P]$ 的氧化和式(5)熔渣中 (P_2O_5) 的还原进行耦合，可以得出转炉内磷氧反应的动态平衡式：



$$\Delta_r G_m = -547\,721.7 + 948.967 T + RT \ln \frac{a_{P_2O_5}^2 \cdot a_C^5 \cdot a_{[Fe]}^5}{a_P^4 \cdot P_{CO}^5 \cdot a_{(FeO)}^5} \quad \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (6)$$

$$T_{trans2} = \frac{547\,721.7}{948.967 + 19.14 \lg \frac{a_{P_2O_5}^2 \cdot a_C^5 \cdot a_{[Fe]}^5}{a_P^4 \cdot P_{CO}^5 \cdot a_{(FeO)}^5}} \quad (7)$$

式中： a_i -反应物或生成物组元 i 的活度。

令式(6) $\Delta_r G_m = 0$ 时，可求得磷被氧化和被还原时的动态平衡温度 $T_{trans2} = 1\,710\text{ K}$ 。磷氧反应达到动态平衡时，熔渣中 (P_2O_5) 含量达到最大值，为尽可能控制回磷反应发生，炉内温度应低于 T_{trans2} 。同时，为了冶炼后期深度脱磷的需要，要求 T_{trans2} 接近或略高于终点温度，这是冶炼 GCr15 轴承钢的关键控制难点所在。

上述热力学研究表明，转炉内脱磷反应不会在磷碳选择性氧化温度到来时立刻停止，而是有一段缓慢的衰减过程，在冶炼 GCr15 轴承钢时为了深度脱磷的需要，采用留渣换渣法(或多次换渣法)生产时，一次倒渣的最佳温度应控制在 $1\,360 \sim 1\,437\text{ }^\circ\text{C}$ ，此时熔渣中的 (P_2O_5) 含量达到最大值，以此来最大

幅度地降低钢液中的磷含量,从而能够为冶炼后期脱磷控温提供有力保障。

1.2.2 一次倒渣最佳温度控制对前期的脱磷效果

通过双渣法工业试验生产 260 炉 GCr15 轴承钢,试验炉次以一次倒渣最佳温度为指导,将一次倒渣钢液温度目标控制在 1 360 ~ 1 437 °C。通过对试验生产炉次一次钢液脱磷率进行统计分析,其结果如图 2 所示(散点数据有重合)。分析温度区间内的不同时间段倒渣脱磷率数据发现,当一次倒渣时间小于 350 s 时,一次钢液脱磷率随着一次倒渣时间的缩短而降低,脱磷率一般不超过 55%;而当一次倒渣时间超过 390 s 时,钢液脱磷率随着倒渣时间的延长而降低。分析认为,这是初期温度不够高,石灰不能充分快速地溶解,固磷效果不佳;之后随着温度的继续升高又出现了回磷反应,降低了脱磷率。统计数据发现,当一次倒渣时间控制在 350 ~ 380 s,一次倒渣的温度能够控制在 1 360 ~ 1 437 °C 这一温度区间。此时,一次钢液脱磷率一般能达到 65% 以上,最高脱磷率达到了 85.3%。

2 冶炼中后期的保碳控温

2.1 冶炼中后期脱碳速率模型的建立

由于碳氧反应复杂多变,在冶炼反应开始的前期,脱碳反应速率较低,速率变化不大可以看成是一个速率常数,随着炉内各类反应的不断进行,到了中后期脱碳反应开始激烈进行,此时的脱碳速率主要与氧枪枪位、供氧量、加料量大小及频次等有关。为揭示高碳钢吹炼中后期炉内的脱碳规律,找到可以用来指导实际生产的理论控制模型至关重要。通过对现场 260 炉次冶炼数据进行综合梳理,并对其进行回归计算分析后发现,一倒碳、终点保留碳、一倒时

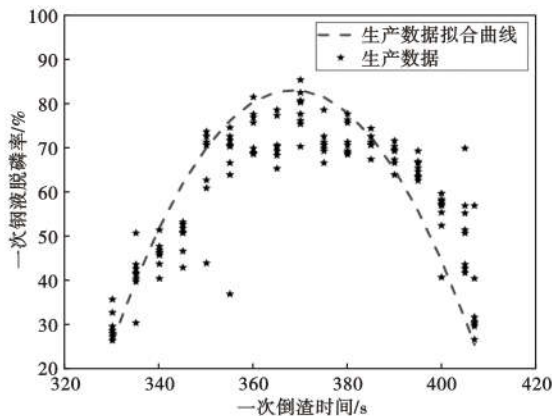


图 2 一次倒渣时间对一次钢液脱磷率的影响

Fig. 2 Effect of time of first slagging out time on primary dephosphorization rate of molten steel

间、终点吹炼时间、氧枪枪位和供氧量都对脱碳速率有影响。由于冶炼中后期造渣料的加入量和频次相对固定,且绝对数量有限,因此在模型变量中可以忽略。脱碳速率模型变量主要考虑有一倒碳、终点保留碳、一倒时间、终点吹炼时间、氧枪枪位和供氧量。

统计分析 100 t 转炉冶炼 GCr15 轴承钢的 260 炉次数据,由于数据呈散点分布,可近似认为各影响因素对脱碳速率呈一次关系,经多元回归后得出炉内中后期脱碳速率:

$$V_c = \frac{d_c}{d_t} = 0.132 + 0.105 [C]_{\text{一倒}} - 0.102 [C]_{\text{终点}} + 0.03 t_{\text{一倒时间}} - 0.02 t_{\text{终点时间}} - 0.003 2H_{\text{枪位}} + 0.007 2 \times 10^{-4} v_{O_2} \quad (8)$$

$$(N = 260, R = 0.88, S = 0.007 2, F = 0.003)$$

式中: $[C]_{\text{一倒}}$ —一次倒渣时钢中碳含量, %;

$[C]_{\text{终点}}$ —吹炼结束时终点碳含量, %;

$t_{\text{一倒时间}}$ —一次倒渣吹炼结束时间, min;

$t_{\text{终点时间}}$ —终点吹炼结束时间, min;

$H_{\text{枪位}}$ —吹炼中后期氧枪距液面平均高度, m;

v_{O_2} —吹炼过程氧气流量, $(Nm^3 \cdot h^{-1})$ 。

回归分析表明,上述 6 因素对 V_c 由强到弱的影响顺序为:① $H_{\text{枪位}}$ → ② v_{O_2} → ③ $t_{\text{一倒时间}}$ → ④ $[C]_{\text{一倒}}$ → ⑤ $t_{\text{终点时间}}$ → ⑥ $[C]_{\text{终点}}$;其显著性水平分别为 $|B_1|$:

$|B_2|$: $|B_3|$: $|B_4|$: $|B_5|$: $|B_6| = 0.935: 0.709:$

$0.025: 0.018: 0.007 2: 0.003 8$ 。通过脱碳速率模型计算出 GCr15 轴承钢冶炼中后期的脱碳速率为 $(0.21\% \sim 0.28\%)/\text{min}$ 。根据不同炉次参数计算得到的脱碳规律,合理控制好终点吹炼时间,终点碳含量基本可以稳定控制在 0.30% 左右。

2.2 终点高拉补吹钢液温度修正调控

对 GCr15 高碳低磷钢而言,为保证冶炼前期的脱磷效果,整个吹炼周期内炉温都应控制的较低,而为了确保转炉后工序操作的稳定性,对出钢温度又有一定的要求,权衡利弊,对终点“C-T”的协调控制问题应以保温度为先决前提,通过将终点碳含量控制在 0.30% 以上,采取高拉补吹的方式,并适当延长终点补吹氧时间,从而达到保碳控温的冶炼目标。

转炉吹炼接近终点时,吹入炉内的氧气主要用于钢液中碳和铁的氧化,氧化反应放出的热量使得炉内温度不断升高。根据炉内热平衡原理,在吹炼后期高拉补吹阶段不考虑加入矿石,在铁水、废钢等初始装入量稳定的情况下,何平等^[17-18]研究了补吹氧量与炉内温升的相应关系,得出如下关系式:

$$\Delta T = b_1 \cdot \frac{\Delta O_2}{W_{\text{steel}}} - b \quad (9)$$

式中: ΔT - 补吹阶段钢液温升值, $^{\circ}\text{C}$;

ΔO_2 - 补吹氧气量, Nm^3 ;

W_{steel} - 炉内钢液质量, t ;

b_1 - 氧化反应引起的温升系数, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{t} / \text{Nm}^3$;

b - 炉内散热引起的温降, $^{\circ}\text{C}$;

由于转炉吹氧量是时间的函数, 为了简化计算, 将氧化反应放出热量引起的温度变化看作是补吹时间的一次函数, 并考虑冷却剂的加入情况, 简化式(9)可得到:

$$\Delta T = k \cdot t - \sum m_i \cdot \theta_i - b \quad (10)$$

式中: k - 氧化反应放出热量引起的温升速率常数, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$;

t - 补吹时间, s ;

m_i - 各类冷却剂的加入质量, kg ;

θ_i - 各类冷却剂的冷却效应, $^{\circ}\text{C}/\text{kg}$;

对于确定钢种, 相同炉役期内相近的冶炼炉次, 转炉的散热项 Q 散热可近似认为相同, 由其所引起的温降 b 也可看作是常数, 其具体数值可由实验确定。而式(10)中的 k 和 θ_i 可由相同转炉的生产大数据和生产经验确定。根据 100 t 转炉冶炼 GCr15 轴承钢 260 炉次的的数据, 经过迭代计算可得出: $k = 1.55 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, $\theta_i = 0.072 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{kg}$ (本研究只采用球团矿为吹炼末期冷却剂), $b = 16.26 \sim 19.12$, 本研究取 $b = 17.7$ 。故式(10)可进一步简化为:

$$\Delta T = 1.55t - 0.072 m_{\text{球团矿}} - 17.7 \quad (11)$$

式中: t - 补吹时间, s ;

$m_{\text{球团矿}}$ - 补吹过程中加入的压球质量, kg

通过上述分析可知, 在吹炼末期为了保碳控温的需要, 根据式(11)采取高拉补吹的方式可进一步精确调控终点钢液温度, 该式可作为转炉操作人员在冶炼 GCr15 类高碳钢确定终点钢液温度时的理论参考依据。

3 “C-P-T”工艺路线闭环优化与冶金效果分析

3.1 “C-P-T”协同控制工艺路线描述

根据上述对于 GCr15 轴承钢冶炼初期、中后期关键技术控制点的深入研究与分析, 制定了冶炼全程“C-P-T”协同控制的工艺路线, 并对其进行了工业生产验证与闭环修正优化, 其结果如图 3 所示。优化工艺路线完整描述为: 在 T1 时刻下枪, 加入第一批造渣料吹炼开始, T1→T2 时间段为前期低温脱

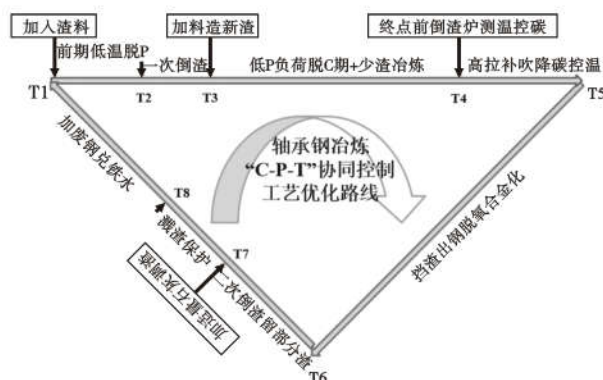


图 3 GCr15 轴承钢工业生产的“C-P-T”协同控制工艺优化路线

Fig. 3 “C-P-T” co-operating control process in optimization industry production for GCr15 bearing steel

磷阶段, 由上述分析可知该时间段宜控制在 350 ~ 380 s; T2→T3 时间段为第一次倒渣时间, 倒渣应尽可能倒尽; T3 时刻开始加入第二批渣料造新渣, T3→T4 时间段为低磷负荷脱碳期, 同时也为脱磷反应的中后期, 相比较与传统冶炼工艺该时间段渣量要少很多; T4 时刻脱碳吹炼结束, 此时倒炉测温控碳, 如果“C-T”和钢液成分均满足出钢要求, 则直接出钢, 若温度未命中, 则执行 T4→T5 时间段工序; T5→T6 为挡渣出钢脱氧合金化; T6→T7 为第二次倒渣且留部分热渣; T7→T8 根据终渣流动性和碱度情况加入适量石灰调渣, 并进行溅渣护炉; T8 时刻开始加废钢兑铁水, 后即进入下一个冶炼循环周期。

3.2 “C-P-T”协同控制冶金效果分析

工业生产验证共进行 60 个炉次, 其中一次倒渣温度在 1360 $^{\circ}\text{C}$ 以下为 18 炉, 在 1360 ~ 1437 $^{\circ}\text{C}$ 为 21 炉, 在 1437 $^{\circ}\text{C}$ 以上为 21 炉, 统计分析各温度区间的脱磷效果如图 4 所示。由图 4 可知, 一次倒渣温度在 1360 $^{\circ}\text{C}$ 以下 18 炉的平均脱磷率为 38.36%; 在 1437 $^{\circ}\text{C}$ 以上 21 炉的平均脱磷率为 47.1%; 而一次倒渣温度在 1360 ~ 1437 $^{\circ}\text{C}$ 的 21 个炉次, 其平均脱磷率则达到了 65.77%, 表现较好。这主要是由于合适的倒渣温度使得前期石灰得到了充分熔化, 炉渣中的容磷量达到了最大值, 对于冶炼过程前期的脱磷反应形成了积极的促进作用, 现场倒渣时表现为炉渣流动性好, 渣铁分离明显, 炉渣亮度合适。

通过 60 炉生产数据对冶炼中后期 (T3→T4 时间段) 的脱碳速率控制效果进行验证, 并将实际脱碳速率与模型计算速率换算成相对误差 (脱碳速率绝对误差的绝对值与实际脱碳速率之比), 然后得出这 60 炉钢的相对误差分布, 如图 5 所示。由图 5

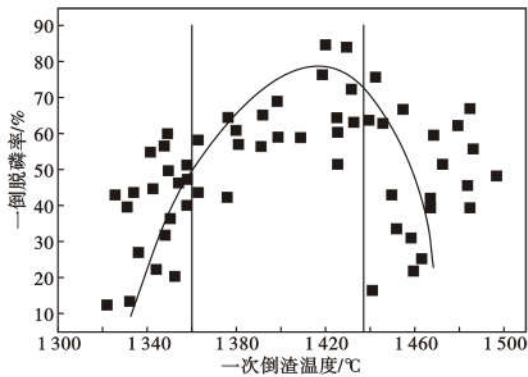


图4 一次倒渣温度对一次钢液脱磷率的影响

Fig. 4 Effect of temperature at first slagging out on primary dephosphorization rate of molten steel

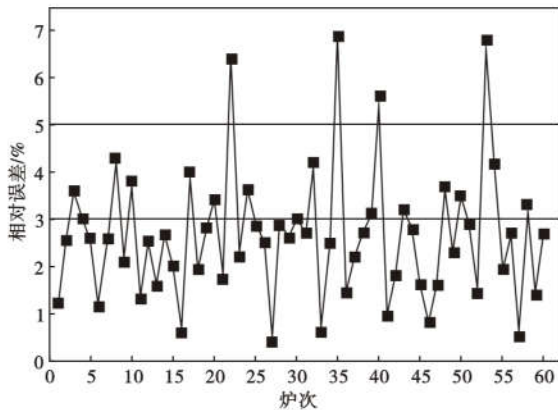


图5 脱碳速率回归模型的相对误差分布

Fig. 5 Relative error distribution of decarbonization rate of regression model

可知,脱碳速率回归模型的相对误差主要集中在5%以内,共计56炉,占总验证炉数的93.33%;而相对误差在3%以内的炉数共计43炉,占总验证炉数的71.67%;该回归模型的整体平均相对误差为

2.38%。通过上述对该回归模型的相对误差分析可知,该模型计算值与现场实际生产值吻合度较高,脱碳速率控制效果较好,可以用来指导实际生产。

此外,工业生产还就终点钢液碳含量、磷含量、溶解氧含量、出钢温度及综合渣量进行了逐一对比验证,结果表明,“C-P-T”协同控制工艺生产路线比传统单渣法冶炼具有更为明显的优势。一个炉役期生产数据统计显示,终点碳、磷、温度三者同时命中目标的炉次占比达到了76.67%。

4 结论

(1)“C-P-T”协同控制热力学研究表明,在冶炼GCr15 轴承钢时为了深度脱磷的需要,可采用留渣换渣法(或多次换渣法)生产,冶炼初期一次倒渣时间应控制在350~380 s,倒渣的最佳温度区间为1360~1437 °C,此时一次钢液平均脱磷率能达到65%以上,最高脱磷率可达85.3%,以此来最大程度地降低钢中磷含量,从而能够为冶炼后期脱磷控温提供有力保障。

(2)对生产260炉数据进行多元回归计算后得到了吹炼中后期的脱碳速率模型,对其进行生产验证表明,计算值与现场实际生产值吻合度较高,整体平均相对误差为2.38%。冶炼中后期的脱碳速率约为(0.21%~0.28%)/min,脱碳速率控制效果较好,可以用来指导实际生产。

(3)通过对GCr15 轴承钢冶炼初期、中后期关键技术控制点的研究分析,制定了冶炼全程“C-P-T”协同控制的工艺优化路线。一个炉役期生产数据统计显示,终点碳、磷、温度三者同时命中目标的炉次占比达到了76.67%,钢液纯净度得到大幅提升。

参考文献

- [1]王坤,胡锋,周雯,等. 轴承钢研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金,2020,39(9):119-128.
- [2]屈志东,谢有,孟晓玲,等. 高品质轴承钢 BOF-LF-RH-CC 和 EAF-LF-VD-CC 工艺夹杂物演变规律[J]. 炼钢,2020,36(2):76-80.
- [3]龚伟,战东平,姜周华,等. 转炉流程生产高品质轴承钢的实践[J]. 中国冶金,2013,23(4):35-39.
- [4]马勇,王晓峰. 转炉双联法冶炼超低磷钢工艺研究[J]. 鞍钢技术,2013,(3):11-15.
- [5]邓爱军. 高铁用轴承钢冶金过程的关键技术研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2019.
- [6]白雪峰,张一民,孙彦辉,等. 转炉双联炼钢工艺热态渣再利用脱磷的工业试验[J]. 炼钢,2018,34(5):31-36.
- [7]陈均,李盛,周明佳,等. 120 t 转炉半钢炼钢去磷保碳工艺的生产试验[J]. 特殊钢,2020,41(6):32-35.
- [8]姚潜,于国庆. 120 t 转炉单联脱磷保碳冶炼工艺的研究与实践[J]. 福建冶金,2018,47(6):33-36.
- [9]陈均,王二军,李小勇,等. 半钢冶炼提高转炉终点碳出钢试验研究[J]. 铸造技术,2019,40(10):1054-1059.
- [10]李勤,王立永,丁立丰,等. 300 t 转炉终点碳氧积控制技术的研究[J]. 炼钢,2019,35(5):10-15.
- [11]邓建军,林路. 邯钢250 t 转炉吹炼参数对传质能力影响的实验研究[J]. 工程科学学报,2016,38(S1):213-218.
- [12]王杰,曾加庆,杨利彬. 复吹转炉双渣法脱磷冶炼工艺一次倒炉温度最优化选择[J]. 炼钢,2015,31(4):34-37.
- [13]周朝刚,李晶,武贺,等. 转炉双渣脱磷一次倒渣温度研究[J]. 钢铁,2014,49(3):24-29.
- [14]黄希祐. 钢铁冶金原理(第3版)[M]. 北京:北京工业出版社,2004.
- [15]陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1984:183.
- [16]魏寿坤. 冶金过程热力学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [17]何平,刘浏,赵进宜. 转炉吹脱碳升温规律与终点控制研究[J]. 钢铁钒钛,2013,34(1):35-40.
- [18]何肖飞,王新华,陈书浩,等. 攀钢转炉双渣法脱磷的试验研究[J]. 钢铁,2012,47(4):32-37.